



# Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain

Amélie Laurent

► **To cite this version:**

Amélie Laurent. Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain. Histoire. Université François Rabelais - Tours, 2007. Français. <tel-00214256v2>

**HAL Id: tel-00214256**

**<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00214256v2>**

Submitted on 24 Jan 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE FRANCOIS RABELAIS  
TOURS

Ecole doctorale : Science de l'Homme et  
des Sociétés

Année Universitaire : 2006-2007

**THESE POUR OBTENIR LE GRADE DE  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TOURS**

Discipline : Histoire

Présentée et soutenue publiquement

par :

Amélie LAURENT

le 7 décembre 2007

**Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain**

Volume de texte (1)

-----

Directeur de thèse :

Henri GALINIÉ

-----

**JURY :**

- |           |         |                                |   |
|-----------|---------|--------------------------------|---|
| - BREYSSE | Denys   | professeur                     | Université Bordeaux 1                                 |
| - BRULET  | Raymond | professeur (rapporteur)        | Université Catholique de Louvain                      |
| - DENIS   | Alain   | professeur (rapporteur)        | Université Bordeaux 1                                 |
| - GALINIÉ | Henri   | directeur de recherche au CNRS | UMR 6173 CITERES                                      |
| - GARMY   | Pierre  | conservateur du Patrimoine     | UMR 5140 Archéologie des<br>Sociétés méditerranéennes |



## Remerciements

Je tiens à remercier d'abord Henri Galinié, mon directeur de thèse (LAT – Université de Tours) de m'avoir proposée ce sujet et de m'avoir fait confiance pour mener ce projet, et cela, depuis la maîtrise. Son expérience, son soutien et ses conseils ont été essentiels pour l'orientation de mes recherches et ma réflexion.

Je remercie également Denys Breysse (CDGA- Université Bordeaux 1), qui est aussi à l'origine de ce sujet et qui m'encadre depuis 2001, pour sa disponibilité et pour l'attention portée à ce sujet. Ses conseils et ses connaissances en mécanique des sols, en statistique et géostatistique m'ont été très bénéfiques notamment pour l'approche méthodologique.

Une mention spéciale aux personnes qui ont suivi de près ces années de recherches :

- Mélanie Fondrillon (Université Tours), collègue de travail et amie, avec qui j'ai travaillé depuis ces 6 dernières années sur les questions de méthodes sur l'approche stratigraphique et sur le traitement des données archéologiques. Son soutien de chaque instant, ses conseils et ses relectures ont été très bénéfiques ;
- Pierre Breul (Université Clermont-Ferrand), avec qui j'ai partagé les campagnes de prospection géotechnique et au géoendoscope à Tours et à Lyon. Ses encouragements et ses conseils d'ordre méthodologique ont été très enrichissants.

Je remercie le LAT pour l'investissement matériel qui a rendu possible ce projet et ses membres pour leur soutien, particulièrement :

- Elisabeth Zadora-Rio, directrice du LAT, pour m'avoir proposée de réaliser une prospection géotechnique en Pologne dans le cadre de l'ACI TTT et pour les souvenirs de ce voyage,
- Xavier Rodier, pour son suivi permanent et ses conseils,
- Pascal Chareille, pour son aide en statistique
- Monique Ségura pour ses encouragements,
- les doctorants, mes amis de parcours, Nicolas, Anne, Mao, Olivier, Bastien, Vincent, Mélanie C., Julien C., Benoît... pour leur aide sur le terrain, les conseils tant sur la méthode que sur la forme. Merci aussi à Manu pour les relectures.

Je tiens à associer à ces remerciements toute l'équipe du CDGA qui m'a chaleureusement accueillie durant les séjours à Bordeaux, les doctorants et les enseignants-chercheurs :

- Laurent Houy, avec qui j'ai travaillé sur les analyses de traitement de signal, pour sa disponibilité et son apport scientifique,
- Sophie Dominique, pour sa gentillesse et ses conseils sur l'approche spatiale de l'étude,
- Halidou Niandou et Antoine Marache pour leurs conseils sur le traitement statistique.

J'exprime toute ma gratitude envers ceux qui ont mis à disposition leurs terrains d'étude et qui m'ont aidée à mettre en œuvre la prospection géotechnique :

- Anne Pariente, directrice du service archéologique municipale à Lyon pour l'attention portée à ce sujet, son accueil chaleureux et son investissement. Elle m'a permis de rencontrer les géologues de Lyon et le personnel des Services des Balmes.
- Emmanuel Bernot et Etienne Hoffman, archéologues municipaux de Lyon pour leur disponibilité et leur aide sur le terrain,
- Nicolas Fouillet, Anne-Marie Jouquand et Raphaël De Filippo, archéologues de l'INRAP à Tours, pour leur intérêt sur le sujet et leur aide sur le terrain,

- Les personnels de la mairie de Tours du service des Parcs et Jardins, M. Flabeau, Mlle Roux et particulièrement, Mr Phylisater, responsable des jardiniers du centre-ville qui m'a fait découvrir les dessous des différents parcs étudiés.
- Mr Haie du service de la voirie à Tours pour son suivi et ses conseils,
- Mr Larousse du service des eaux à Tours pour sa curiosité sur le sujet.

Durant cette aventure, j'ai bénéficié des expériences des géophysiciens, qu'ils en soient remerciés :

- Michel Martinaud (Université Bordeaux 1) avec qui les échanges étaient fructueux et qui m'a chaleureusement accueillie lors de mes séjours au CDGA,
- Christian David (INRAP) pour ses encouragements,
- Alain Tabbagh et Julien Thiesson pour leurs conseils sur le terrain durant le voyage en Pologne.
- Alain Kermorvant (Université Tours) qui m'a accordé du temps pour la prospection sur le site de la Bazoche

J'ai aussi eu le plaisir de travailler avec les géologues du Laboratoire GÉEAC (Université de Tours) :

- Isabelle Gay avec qui les échanges ont été enrichissants,
- Sébastien Salvador-Blanes et Sylvie Morice qui m'ont beaucoup aidée pour le traitement géostatistique des données.

Je remercie aussi les membres du CNAU pour leur gentillesse, leur accueil et leurs encouragements.

Enfin, mes pensées et mes remerciements se tournent vers ma famille, mes parents, mes sœurs et Michaël pour m'avoir supportée, pour m'avoir encouragée mille fois et pour leurs corrections. Merci à tous les amis, Julien (pour son aide et ses corrections), Denis, Charlotte, Alexandra...

## Liste des abréviations

BSAT :	Bulletin trimestriel de la Société Archéologique de Touraine
CDGA :	Centre de développement des Géosciences Appliquées (Bordeaux)
CNRS :	Centre National de la Recherche Scientifique
CUST :	Centre Universitaire des Sciences et Techniques (Clermont-Ferrand)
DEPAVF :	Documen d'Evaluation du Potentiel Archologique des Villes de France
GéAC :	Lavoratoire de Géologie des Environnements Aquatiques Continentaux (Tours)
GIS :	Groupement d'Intérêt Scientifique
LAT :	Laboratoire Archéologie et Territoire (Tours)
LAUT :	Laboratoire d'Archéologie Urbaine de Tours
LERMES :	Laboratoire d'Etudes et Recherches en Mécanique des Structures (Clermont-Ferrand)
PCR :	Programme Commun de Recherche
SGBD :	Système de Gestion et Base de Données
SIG :	Système d'Information Géographique

## Avertissements

Les mots suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire.

Le mémoire est composé de deux volumes de texte avec 150 figures (vol. 1 et 2), d'un volume de 136 planches (vol. 3) et d'un volume de 153 annexes (vol. 4). Certaines annexes (relevés de terrain) sont présentées dans le CD-Rom.

## Table des matières

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>	<b>5</b>
<b>AVERTISSEMENTS.....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>12</b>
<b>CHAPITRE 1- ETAT DE LA RECHERCHE SUR LA PRATIQUE DE L’EVALUATION EN ARCHEOLOGIE URBAINE EN FRANCE ET EN EUROPE DU NORD .....</b>	<b>15</b>
1-1- ETAT DES CONNAISSANCES SUR L’HISTOIRE DES VILLES.....	15
1-1-1- <i>La ville comme objet d’étude</i> .....	15
• « La ville en soi » .....	15
• Les sources d’informations disponibles.....	16
1-1-2- <i>Les questions historiques concernant les villes en France et en Europe du Nord</i> .....	17
1-2- LE DEVELOPPEMENT DE L’ARCHEOLOGIE URBAINE EN EUROPE ET EN FRANCE .....	18
1-2-1- <i>La recherche en archéologie urbaine</i> .....	18
1-2-2- <i>Les enjeux de l’archéologie urbaine en France : analyse et gestion des archives du sol</i> .....	19
1-3- PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE : APPORT DE L’EVALUATION POUR LA CONNAISSANCE DE L’HISTOIRE DES VILLES .....	22
1-3-1- <i>L’évaluation : une question de vocabulaire</i> .....	22
1-3-2- <i>Les objectifs de l’évaluation du potentiel archéologique d’une ville</i> .....	23
• Une mesure aussi précise que possible de l’épaisseur du dépôt archéologique .....	23
• Une délimitation des transformations de l’espace urbanisé ancien.....	24
• Des hypothèses sur les usages de l’espace aussi détaillée que possible .....	24
• l’inventaire des destructions portées au sous-sol .....	25
1-3-3- <i>Présentation des pratiques de l’évaluation archéologique des villes en Europe</i> .....	26
• Etudes régionales, nationales.....	26
- Les inventaires archéologiques .....	26
- Les enquêtes régionales et nationales.....	27
• Etudes Individuelles.....	28
- Les études basées sur l’analyse topographique des villes .....	28
- Les documents d’évaluation du patrimoine archéologique des villes de France (DEPAVF) .....	29
- Etudes pour la caractérisation des sols anthropiques et naturels .....	33
• Conclusion.....	34
1-4- ETUDIER LE SOL URBAIN POUR LA CONNAISSANCE HISTORIQUE DES VILLES .....	35
1-4-1- <i>Définition du sol urbain</i> .....	35
1-4-2- <i>La formation du sol urbain vu par l’archéologue</i> .....	35
• Formation du sol urbain.....	36
• Emprise du sol urbain.....	38
• Méthodes pour l’analyse de l’hétérogénéité du sol urbain.....	38
1-4-3- <i>Les caractéristiques du sol urbain vu par le géotechnicien</i> .....	40
• Définition du sol urbain par le géotechnicien .....	41
• Les méthodes pour l’analyse de l’hétérogénéité du sol urbain.....	41
1-4-4- <i>Typologie fonctionnelle du dépôt archéologique</i> .....	42
• Définition de l’échelle d’analyse .....	42
• Typologie fonctionnelle.....	43
- Occupation extérieure .....	44
- Occupation intérieure.....	45
- Construction.....	46
- Destruction.....	47
- Remblais / comblements d’aménagement.....	47
- Remblais / comblements liés à l’usage .....	48
- Naturel anthropisé.....	48
- Naturel .....	49
• Postulat sur la typologie fonctionnelle du dépôt archéologique.....	49
1-5- BILAN .....	51

## CHAPITRE 2- PRESENTATION DES METHODES ET DES TECHNIQUES POUR L'ANALYSE DU VOLUME DE SOL URBAIN ..... 52

2-1- LES TECHNIQUES D'ÉVALUATION DU POTENTIEL ARCHEOLOGIQUE EN MILIEU URBAIN .....	52
2-1-1- Les sondages archéologiques .....	53
2-1-2- Les sondages géologiques et géotechniques .....	54
2-1-3- Les prospections géophysiques .....	56
2-1-4- Une nouvelle méthode de prospection géotechnique en milieu urbain : l'utilisation du pénétromètre de type PANDA .....	57
• Objectifs .....	58
• Principes du PANDA .....	58
• Les premières applications sur un site archéologique .....	59
- Mise en place d'un enregistrement adapté à l'échelle archéologique et géotechnique .....	60
- Modélisation de l'hétérogénéité du site de Saint-Julien .....	62
- Représentation de la stratification du site de Saint-Julien par l'élaboration d'une image en « code-barres » ...	66
- Mise en place d'un référentiel archéologico-mécanique pour la caractérisation du sol sur le site de Saint-Julien .....	68
• Couplage au géoendoscope .....	71
2-2- LE PROBLEME DE LA DEFINITION DE L'ECHELLE D'ANALYSE POUR L'ÉVALUATION DU VOLUME DE SOL URBAIN .....	73
2-2-1- Les données utiles à l'évaluation : le potentiel informatif en milieu urbain .....	73
• Les données archéologiques, historiques et planimétriques .....	73
• Les données géotechniques et géologiques .....	75
• Les informations sur les atteintes portées au sous-sol .....	77
2-2-2- Le problème du choix de l'échelle d'analyse .....	80
• La représentation des données en ville .....	80
• La représentativité des données .....	82
• Échelle de la ville, échelle du site : découpage en transect .....	83
2-3- LES OUTILS POUR REPRESENTER ET MODELISER LE SOL URBAIN .....	85
2-3-1- L'appréhension de l'espace par l'archéologie .....	85
• La place de l'espace en archéologie .....	85
• « L'espace urbain » .....	86
2-3-2- Utilisation et utilité d'un SIG .....	87
• Définition des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) .....	87
• Application du SIG en archéologie .....	88
2-3-3- La modélisation de l'évolution historique des villes .....	90
• Définition d'un modèle .....	90
• Les modèles en archéologie .....	90
• Les modèles spécifiques à la ville .....	93
2-4- CONCLUSIONS .....	97

## CHAPITRE 3- PRESENTATION DU TERRAIN D'APPLICATION : LA VILLE DE TOURS..... 98

3-1- PRESENTATION DU CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HISTORIQUE DE TOURS .....	98
3-1-1- Le contexte géomorphologique de Tours .....	98
• La plaine alluviale du val de Tours .....	99
- Le val de Tours .....	99
- La nature géologique du substratum .....	99
• Le modelé de la plaine alluviale .....	100
• L'évolution du trait de rive de la Loire .....	105
• Conclusion .....	106
3-1-2- La topographie historique de Tours .....	107
• 2 <sup>e</sup> siècle av. JC .....	108
• 1 <sup>er</sup> – 2 <sup>e</sup> siècle ap JC .....	108
- L'espace public .....	108
- Les limites de la ville ouverte .....	109
• 3 <sup>e</sup> – 4 <sup>e</sup> siècles .....	109
• 5 <sup>e</sup> – 8 <sup>e</sup> siècles .....	110
- La Cité, le groupe épiscopal .....	110
- Saint-martin, le groupe basilical .....	111
- La zone intermédiaire du groupe épiscopal et basilical .....	111
• 9 <sup>e</sup> – 11 <sup>e</sup> siècles .....	111
- La Cité .....	112
- Le castrum de Saint-Martin et son suburbium .....	112

- Le centre .....	113
• 12 <sup>e</sup> -15 <sup>e</sup> siècles .....	113
• 16 <sup>e</sup> -19 <sup>e</sup> siècles .....	114
• 20 <sup>e</sup> siècle : Le temps de la Reconstruction et de la Rénovation .....	114
• Conclusions .....	115
3-1-3- <i>Les questions historiques</i> .....	116
• Définition de l'espace urbanisé ancien .....	116
• Les questions historiques .....	117
3-2- PRESENTATION DU CONTEXTE DE LA RECHERCHE ARCHEOLOGIQUE DE TOURS .....	118
3-2-1- <i>Etat de l'activité archéologique à Tours</i> .....	118
3-2-2- <i>Etat des connaissances sur l'évaluation du potentiel archéologique du sous-sol</i> .....	119
• Un document d'évaluation du potentiel archéologique : « les archives du sol à Tours » .....	119
• Des études d'évaluation à l'échelle de l'îlot .....	119
• Une base de données sur la topographie historique à Tours : ToToPI .....	119
• Une base de données d'enregistrement des archives de fouilles : ArSol .....	120
• La carte des épaisseurs du dépôt archéologique .....	120
• Prise en compte de la qualité du dépôt archéologique .....	121
3-2-3- <i>Découpages en transects</i> .....	121
3-3- PRESENTATION GENERALE DES SITES ETUDIES A TOURS .....	123
3-3-1- <i>Site 16 – Abbaye Saint-Julien/Prosper Mérimée</i> .....	123
3-3-2- <i>Site 17 – Abbaye Marmoutier</i> .....	123
3-3-3- <i>Site 69 – Parking Anatole France</i> .....	124
3-3-4- <i>Site 72 – 3 rue des Tanneurs</i> .....	124
3-3-5- <i>Site 77 – 36, 38, 38 bis rue Mirabeau</i> .....	124
3-3-6- <i>Site BAZ - 7 rue de la Bazoché</i> .....	125
3-3-7- <i>Conclusion</i> .....	125
3-4- PRESENTATION DES SITES DE COMPARAISON .....	126
3-4-1- <i>Les sites de la ville de Lyon (69)</i> .....	126
• Présentation historique de Lyon .....	126
• Site L1015 – rue Mgr Lavarenne .....	129
• Site L040 – 28, rue Chapeau Rouge .....	130
• Site L105 – 10,12 rue Joliot Curie .....	130
• Site L025 – 25 rue Joliot Curie .....	130
• Site LTRI – 4bis, 6 rue des Fossés de Trion .....	130
3-4-2- <i>Site 5MA - Cinq-Mars-La-Pile (37)</i> .....	131
3-4-3- <i>Site STO - Stolpie en Pologne</i> .....	131
<b>CHAPITRE 4- EVALUATION DU POTENTIEL INFORMATIF A L'ECHELLE DE LA VILLE :</b>	
<b>L'EXEMPLE DE TOURS .....</b>	<b>132</b>
4-1- L'ACQUISITION DES DONNEES UTILES A L'EVALUATION A L'ECHELLE DE LA VILLE .....	133
4-1-1- <i>Les données archéologiques</i> .....	134
• Méthode d'acquisition .....	134
• Limites de la méthode .....	134
• Réalisation des logs archéologiques à l'échelle des sites .....	135
- L'épaisseur du dépôt archéologique .....	136
- Le découpage du dépôt archéologique .....	136
• Réalisation des logs archéologiques à l'échelle de la ville .....	139
- Hypothèse de travail sur la production du dépôt archéologique .....	140
- Etude des épaisseurs des tranches du dépôt archéologique d'une durée de 500 ans .....	143
- Modélisation graphique du sous-sol selon une durée fixe de 500 ans .....	147
• Bilan .....	148
4-1-2- <i>Les sources planimétriques</i> .....	150
• Présentation des sources planimétriques .....	150
• Commentaires .....	154
4-1-3- <i>Les données géotechniques et géologiques</i> .....	155
• Vérification des sondages acquis avant 1999 .....	155
• Acquisition de nouvelles informations issues des sondages géologiques et géotechniques de 1999 à 2005 .....	156
4-1-4- <i>Les informations sur les atteintes portées au sous-sol</i> .....	161
• Inventaire des destructions du sous-sol .....	161
• Analyse de la relation entre les surfaces fouillées et les surfaces détruites .....	163
4-1-5- <i>Les données issues de la prospection au PANDA à Tours</i> .....	165
• Mise en place d'un projet d'implantation des SP .....	165

• Mise en œuvre du projet : DICT et autorisation auprès des propriétaires .....	166
• Réalisation in-situ .....	168
• Enregistrements des données dans la base de données BaDoPan .....	171
• Les résultats : analyse descriptive des signaux .....	171
• Conclusions .....	175
4-1-6- <i>Bilan</i> .....	176
4-2- ANALYSE DES PROPRIETES MECANQUES DU SOUS-SOL POUR MODELISER L'HETEROGENEITE DU SOL-URBAIN .....	177
4-2-1- <i>Objectif et méthodes</i> .....	177
• L'échelle d'analyse .....	179
• Les paramètres d'étude des propriétés mécaniques du sol.....	180
- Les variables descriptives .....	180
- Les variables pour mesurer la variabilité des propriétés mécaniques.....	181
- Conclusion .....	183
• Le signal brut et les signaux consolidés .....	184
• La détection des UM selon le concept de l'entropie .....	185
- Définition de l'entropie.....	185
- Calcul d'un indice d'entropie.....	186
4-2-2- <i>Les tests d'analyse des propriétés mécaniques du sous-sol pour la distinction des Unités Mécaniques sur un pénétrogramme</i> .....	187
• TEST 1 : Découpage manuel des pénétrogrammes des SP réalisés dans les 5 transects.....	189
- Caractérisation qualitative des UM : estimation du bruit global d'un pénétrogramme .....	189
- Caractérisation statistique des UM.....	190
- Essais d'analyse factorielle pour l'étude de corrélation entre les 6 variables.....	191
- Relation entre les mesures de terrain et l'indice d'intensité d'occupation du sol.....	194
- Etude de la pente des UM .....	197
• TEST 2 : Détection d'UM de façon manuelle sur des signaux bruts et des signaux consolidés (SP16.32, 16.78 et 16.89 du site de Saint-Julien à Tours).....	198
• TEST 3 : Essai de détection d'UM de façon automatique en étudiant l'entropie des signaux .....	201
• TEST 4 : Détection d'UM en comparant un signal régularisé (Qc) et un indice d'entropie .....	202
4-2-3- <i>Bilan</i> .....	206
<b>CHAPITRE 5- EVALUATION DU POTENTIEL INFORMATIF A L'ECHELLE D'UN SITE ARCHEOLOGIQUE .....</b>	<b>208</b>
5-1- LES DONNEES UTILES A L'EVALUATION A L'ECHELLE D'UN SITE .....	208
5-1-1- <i>Site 16 – Abbaye Saint-Julien/Prosper Mérimée</i> .....	209
• Observations archéologiques .....	210
- Période 1 – La construction d'ouvrages d'art antique (1 <sup>er</sup> -2 <sup>e</sup> siècle).....	210
- Période 2 – La destruction/récupération des structures antiques et remblai massif (Contexte C1) (3 <sup>e</sup> - 4 <sup>e</sup> siècle) .....	211
- Période 3 – Des niveaux domestiques (Contexte C2) à la première phase de mise en culture du site (Contexte C6) (4 <sup>e</sup> – 9 <sup>e</sup> siècle).....	212
- Période 4 – La mise en culture générale du site (Contextes C7/C8) (9 <sup>e</sup> -12 <sup>e</sup> ? siècle).....	214
- Période 5 – Les structures qui scellent la mise en culture (12 <sup>e</sup> – 14 <sup>e</sup> siècle) .....	214
- Période 6 – L'occupation liée à la construction de l'infirmerie de l'abbaye de Saint-Julien (14 <sup>e</sup> – 17 <sup>e</sup> siècle).....	214
- Période 7 – La transformation de l'infirmerie et les jardins modernes (17 <sup>e</sup> -18 <sup>e</sup> siècle) .....	215
- Période 8 – Le collecteur d'eaux de pluie et le manège de la caserne militaire (19 <sup>e</sup> siècle).....	216
• Observations géotechniques (PANDA) .....	216
• Observations au géoendoscope .....	216
• Observations géophysiques.....	217
- Méthode radar et électrique.....	217
- Méthode magnétique.....	218
5-1-2- <i>Site 17 – Abbaye Marmoutier</i> .....	219
• Observations archéologiques .....	219
• Observations géotechniques (PANDA) .....	219
• Observations géophysiques.....	220
5-1-3- <i>Site 69 – Parking Anatole France</i> .....	221
• Observations archéologiques .....	221
- Période 1 - L'occupation antique en bord de rive (milieu 2 <sup>e</sup> s.).....	221
- Période 2 - Les aménagements médiévaux antérieurs au rempart médiéval (12 <sup>e</sup> - 14 <sup>e</sup> s.).....	221
- Période 3 - Les aménagements liés aux fortifications médiévales (14 <sup>e</sup> – 15 <sup>e</sup> s.).....	222
- Période 4 - L'enceinte moderne et le port Ragueneau (15 <sup>e</sup> – 16 <sup>e</sup> s.) .....	222
- Période 5 - L'abandon de l'enceinte moderne et l'aménagement des nouveaux quais (17 <sup>e</sup> – 18 <sup>e</sup> s.) .....	222
• Observations géotechniques (PANDA) .....	222

5-1-4- Site 72 – 3 rue des Tanneurs.....	224
• Observations archéologiques .....	224
• Observations géotechniques (PANDA) .....	224
5-1-5- Site 77 – 36, 38, 38bis rue Mirabeau.....	225
• Observations archéologiques .....	225
• Observations géotechniques (PANDA) .....	225
5-1-6- Site BAZ – 7 rue de la Bazoche.....	226
• Observations géotechniques (PANDA) .....	226
• Observations géophysiques.....	227
5-1-7- Site 5MA - Cinq-Mars-La-Pile (37).....	228
• Observations archéologiques .....	228
• Observations géotechniques (PANDA) .....	228
5-1-8- Site L1015 – Rue Mgr Lavarenne.....	230
• Observations géomorphologiques.....	230
• Observations archéologiques .....	232
• Observations géotechniques (PANDA) .....	233
• Observations au géoendoscope.....	236
Site L040 – 28 rue Chapeau Rouge.....	237
• Observations archéologiques .....	237
• Observations géotechniques (PANDA) .....	237
5-1-9- Site L105 – 10,12 rue Joliot Curie.....	238
• Observations archéologiques .....	238
• Observations géotechniques (PANDA) .....	238
5-1-10- Site L025 – 25 rue Joliot Curie.....	239
• Observations archéologiques .....	239
• Observations géotechniques (PANDA) .....	239
5-1-11- Site LTRI – 4 bis, 6 rue des Fossés de Trion .....	240
• Observations archéologiques .....	240
• Observations géotechniques (PANDA) .....	240
5-1-12- Site STO - Stolpie en Pologne.....	241
• Observations géotechniques (PANDA) .....	241
• Observations géophysiques.....	244
5-1-13- Bilan .....	245
5-2- LA MISE EN PLACE D'UN REFERENTIEL ARCHEOLOGICO-MECANIQUE POUR LA CARACTERISATION ET LA MESURE DE L'ÉPAISSEUR DE LA STRATIFICATION DES SITES .....	249
5-2-1- Mise en place d'un référentiel archéologico-mécanique : le cas du site de Saint-Julien à Tours..	250
• Réalisation de logs découpés en Unité Contextuelle.....	250
• Attribution des mesures pénétrométriques aux UC.....	251
• Analyses descriptives des UC de qualité « 2 ».....	251
- Les variables et les modalités retenues .....	251
- Description des types et sous-types fonctionnels des UC à partir de leurs propriétés mécaniques (résistance Qd et variabilité Qd) .....	254
- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leur position altimétrique.....	264
- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leur épaisseur.....	267
• Analyse statistique des UC de qualité « 2 » : analyse factorielle .....	270
- Le choix des données et des variables.....	270
- Présentation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	270
- Résultats des essais 1 et 2 .....	271
- Résultats de l'essai 3 .....	275
• Analyse des propriétés mécaniques des UC selon leur lithologie .....	281
- Les constituants dominants des UC .....	281
- Relation entre lithologie et fonction archéologique des UC.....	281
- Description des constituants dominants des UC à partir de leurs valeurs de résistance .....	284
- Description lithologie en fonction des variables retenues pour l'ACP de l'essai 3 : l'essai 3b.....	284
• Bilan .....	287
5-2-2- Applications sur les sites de comparaison.....	290
• Application sur le site 69 (Tours – Parking Anatole France).....	291
- A propos de la relation entre l'altimétrie moyenne et la datation des UC .....	291
- Fourchette de résistance Qd .....	291
- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leurs propriétés mécaniques.....	292
- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leur épaisseur.....	294
- Description des interprétations des UC à partir de l'analyse factorielle (6 variables).....	294
- Mise en relation des interprétations fonctionnelles des UC avec leur lithologie.....	297
• Application sur le site L1015 (Lyon – rue Mgr Lavarenne) .....	299

- A propos de la relation entre l'altimétrie moyenne et la datation des UC .....	299
- Fourchette de résistance .....	299
- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leurs propriétés mécaniques .....	300
- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leurs épaisseurs .....	302
- Description des interprétations des UC à partir de l'analyse factorielle (6 variables) .....	302
- Mise en relation des interprétations fonctionnelles des UC avec leur lithologie .....	305
• Analyse globale des interprétations fonctionnelles des sites étudiés .....	307
- Classification des interprétations fonctionnelles .....	307
5-2-3- Résultats et limites de la mise en place du référentiel archéologico-mécanique .....	310
• Distinction du dépôt archéologique et des niveaux naturels .....	310
• Caractérisation fonctionnelle du dépôt archéologique .....	312
- Propriétés mécaniques des UC .....	313
- Localisation géographique des UC .....	315
• Caractérisation lithologique du sous-sol .....	317
• Bilan .....	319
5-3- ESSAI DE MODELISATION DU DEPOT ARCHEOLOGIQUE A L'ECHELLE DU SITE .....	320
5-3-1- Analyse de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques du sous-sol .....	320
• Rappel sur les principes de l'analyse .....	320
• Analyse variographique à moyenne échelle .....	321
- Application sur des niveaux spécifiques du site 16 .....	322
- Application sur le site 69 .....	323
- Application sur le site L1015 .....	324
• Bilan .....	325
5-3-2- Réalisation de l'image mécanique du sous-sol : la méthode des « codes-barres » .....	325
• Choix des classes de résistance .....	326
• Confrontation des codes-barres avec les observations de terrain .....	328
5-3-3- Analyse du bruit et de la qualité d'un signal .....	329
• Démarche .....	329
• Résultats .....	331
5-4- LE COUPLAGE DES DONNEES GEOTECHNIQUES AUX DONNEES GEOPHYSIQUES .....	333
5-4-1- Observations sur le site de Saint-Julien à Tours .....	333
5-4-2- Observations sur le site du 7 rue de La Bazoche à Tours .....	334
5-4-3- Observations sur le site de Stolpie .....	335
• Confrontation avec les observations géophysiques et mécaniques : .....	335
5-5- BILAN .....	336
<b>CHAPITRE 6- DU POINT A LA VILLE : MODELISATION DU VOLUME DU SOL URBAIN .....</b>	<b>338</b>
6-1- LE POTENTIEL INFORMATIF A L'ECHELLE DU SITE POUR ANALYSER LE VOLUME DU SOL URBAIN A TOURS .....	339
6-1-1- Résultats de la confrontation du référentiel archéologico-mécanique avec les UM des SP du site 16 .....	339
6-1-2- Validation des hypothèses sur l'épaisseur du dépôt archéologique .....	340
6-2- ESSAI DE MODELISATION DE L'ÉPAISSEUR DU VOLUME DU SOL URBAIN A TOURS .....	342
6-2-1- Constitution d'une base de données à partir des données et des hypothèses de travail .....	342
6-2-2- Elaboration d'une carte des épaisseurs du dépôt archéologique .....	343
• Choix d'une méthode d'interpolation .....	343
• Analyse de la structuration spatiale de l'épaisseur du dépôt : analyse variographique de BDdepot2 .....	345
• Interpolation de l'épaisseur du dépôt archéologique .....	349
6-2-3- Elaboration d'une carte du toit du niveau naturel .....	350
• Analyse de la structuration spatiale du toit des alluvions : analyse variographique de BDdepot2 .....	350
• Interpolation du toit des alluvions .....	352
6-3- BILAN .....	353
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>354</b>
<b>TABLE DES FIGURES .....</b>	<b>358</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>362</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>364</b>

## Introduction

Ce sujet est né, dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol urbain, des réflexions entre l'archéologue (H. Galinié, Laboratoire Archéologie et Territoires - Université de Tours) et le géotechnicien (D. Breysse, Centre de Développement des Géosciences Appliquées - Université de Bordeaux 1) sur le problème de la caractérisation du sol en milieu urbain et sur la nécessité de développer des modes d'investigations du sous-sol adaptés aux questions de la recherche et à la politique de gestion du patrimoine.

Dans toutes les villes historiques, plusieurs mètres de matériaux séparent la surface actuelle du toit des couches géologiques. Que l'on qualifie ce dépôt d'archéologique ou d'anthropique, il constitue un volume qui correspond en étendue à l'espace urbanisé ancien et qui est plus ou moins épais, plus ou moins stratifié, plus ou moins bien conservé selon les lieux d'une même ville. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer aussi précisément que possible le potentiel archéologique du volume du sol urbain à diverses échelles : celle du site ou du chantier, celle de l'îlot, celle d'une ville.

La reconstruction des villes et le développement des opérations d'urbanisme après la Seconde Guerre mondiale ont engendré des destructions massives de ce volume de sol urbain entraînant la perte d'informations pour la connaissance de l'histoire des villes. Le développement de l'archéologie urbaine à partir des années 1960 et, surtout, la prise de conscience du phénomène d'« érosion de l'histoire » (HEIGHWAY 1972) favorisent la mise en place de la pratique de l'évaluation en milieu urbain dans certaines villes d'Europe. Ces préoccupations s'inscrivent depuis peu dans une logique de développement durable, le renouvellement et la création d'infrastructures nouvelles ne devant pas se faire au détriment du patrimoine archéologique. La mise en place du futur programme (2008 – 2010) de l'ANR « Villes Durables » rejoint cette logique.

L'évaluation du potentiel archéologique des villes en Europe, et particulièrement en France, est motivée par de nombreuses questions d'ordre scientifique liées à l'ampleur du phénomène urbain sur l'étendue du territoire national et liées à la durée d'existence des villes.

La thèse vise à répondre aux questions historiques concernant les villes par l'évaluation du potentiel informatif du sous-sol. Elle consiste à considérer le sol urbain dans sa diversité et sa complexité par une approche pluri-disciplinaire. Cette approche est avant tout archéologique car

le questionnement est d'ordre historique mais elle intègre la vision des géotechniciens pour poser un autre regard sur le caractère hétérogène du dépôt archéologique. Son apport est méthodologique et consiste à proposer une grille d'analyse des observations disponibles et utiles pour appréhender les modalités de formation de l'espace urbain, puis à exploiter leur potentiel informatif pour résoudre les objectifs de l'évaluation, notamment la reconnaissance et la caractérisation du dépôt archéologique ainsi que la modélisation de la ville en fonction de l'intensité de l'occupation humaine. L'étude propose alors de coupler les données archéologiques et les informations géologiques, géophysiques et géotechniques, à l'échelle de l'espace urbanisé ancien.

Des méthodes et des techniques dans le domaine de l'évaluation et du diagnostic ont été développées dès les années 1970. Cependant, leurs mises en œuvre peuvent être coûteuses, parfois destructrices. C'est dans cette perspective, qu'à partir des années 2000, à Tours, des travaux ont été lancés sur l'application de certaines techniques pour reconnaître et caractériser le dépôt archéologique : étude archéologique des constituants des couches, étude pédologique, étude micromorphologique, prospection géophysique. Il nous a paru intéressant d'utiliser les ressources du pénétromètre dynamique de type PANDA, utilisé couramment dans le Génie Civil, dont les prises de mesures accompagnées ou non d'essais endoscopiques peuvent être aisément répétées en raison de leur rapidité sur le terrain et de la maniabilité de l'outil (GALINIÉ 2003 ; LAURENT 2002). L'approche technique a été testée sur le site de Saint-Julien à Tours. Puis, en 2003, les travaux de DEA ont été orientés sur l'apport des méthodes et techniques d'évaluation à l'échelle de la ville (LAURENT 2003).

Je présenterai dans un premier chapitre l'objet de l'étude et l'état de la recherche sur la pratique de l'évaluation. Puis, pour résoudre les objectifs de l'évaluation, plusieurs points seront développés :

- un bilan sur les techniques d'évaluation et sur le potentiel informatif des sources disponibles aux archéologues. Il s'agit de présenter les avantages qu'offre l'emploi du pénétromètre dynamique léger (PANDA) d'un point de vue archéologique et les premiers résultats qui ont été obtenus en maîtrise (chapitre 2) ;

- une approche multi-échelle. Le but est d'appréhender le potentiel informatif des observations à l'échelle de la ville et à l'échelle du site qui sont en interaction (chapitre 2) ;

- un bilan sur les modes de représentation des données spécifiques au milieu urbain (chapitre 2) ;

- le choix de la ville de Tours, comme terrain d'application, jugé représentatif de l'ensemble des villes par sa formation, et aussi, pour des questions pratiques. A titre de comparaison, des sites ont été sélectionnés selon les questions à résoudre : pour la reconnaissance et la caractérisation du dépôt archéologique (Cinq-Mars-la-Pile (37), Lyon) et pour la question de la maille d'analyse (Stolpie (Pologne)) (chapitre 3) ;

- un découpage de la ville suivant l'intensité de l'occupation humaine (chapitre 4) ;

- l'apport du pénétromètre pour la mesure et la caractérisation interne du dépôt archéologique par l'appréciation de l'hétérogénéité du sous-sol et la mise en place d'un référentiel liant les données archéologiques et les données géotechniques à l'échelle de la ville et à l'échelle du site (chapitre 4 et 5) ;

- la mise en perspective des observations acquises à l'échelle du site par rapport aux hypothèses formulées à l'échelle de la ville de Tours avec une application sur la réalisation de la carte des épaisseurs du dépôt et du toit des alluvions (chapitre 6).

# **Chapitre 1- Etat de la recherche sur la pratique de l'évaluation en archéologie urbaine en France et en Europe du nord**

Ce premier chapitre présente l'objet d'étude, la problématique et le contexte de recherche dans lequel s'insèrent les travaux de thèse.

Dans un premier temps, j'établirai brièvement un état de l'art sur l'histoire des villes qui constitue l'objet d'étude. Dans un deuxième temps, une synthèse sur l'archéologie urbaine et ses enjeux sera exposée afin de mieux saisir le contexte dans lequel la pratique de l'évaluation a été mise en place. Dans un troisième temps, je présenterai la problématique de la thèse, les objectifs et un bilan sur la pratique de l'évaluation du potentiel archéologique en milieu urbain. Enfin, dans un quatrième temps, j'expliquerai en quoi le sol urbain constitue la clé d'entrée pour le sujet.

## **1-1- Etat des connaissances sur l'histoire des villes**

### 1-1-1- La ville comme objet d'étude

- « *La ville en soi* »

Il existe autant de définitions de la ville que de courants des disciplines qui l'appréhendent (sociologie, géographie, histoire) (BONIS 1994 ; NOIZET 2003). Cet objet complexe a d'abord été défini par des critères quantitatifs (taille, densité démographique) puis, à partir des années 1970-1980, les géographes et les archéologues ont travaillé sur la notion de fonction urbaine (politique, économique, religieuse) ainsi que sur la notion de centralité (ville dans un réseau d'habitat). (BIDDLE 1976 ; DI MÉO 1991 ; GALINIÉ 2000 ; LE GOFF 1998 ; LÉVY 1999 ; LEPETIT, PUMAIN 1993).

La définition retenue ici est celle de la « ville en soi » qui consiste à étudier la relation entre la ville et les habitants au travers de l'espace urbain. Cet objet d'étude est celui de l'archéologie urbaine qui consiste à documenter les aspects matériels d'une ville donc de l'espace urbain.

Il s'agit d'analyser les **composantes socio-spatiales** des villes définies par la « conjonction entre un espace propre, une temporalité propre et une composante sociale<sup>1</sup> propre » (GALINIÉ 2000 : 84). L'espace urbain est le lieu de réalisation des activités humaines. En partant du postulat qui considère l'espace comme « un construit social, et pas comme un donné », on cherche à révéler une organisation des sociétés à travers les objets structurants d'une ville (GALINIÉ 1999a : 13). Etudier « la ville en soi », c'est donc considérer que tout élément constitutif de l'espace urbain détient une valeur informative qui dépasse ses caractéristiques propres. Ceci nécessite, pour le contexte temporel, de s'affranchir des barrières chronologiques académiques.

On considère que la ville est définie par trois types de fonctions (GALINIÉ 2000 : 34-35) :

- les fonctions primaires ou banales qui sont nécessaires à la vie quotidienne des habitants ;
- les fonctions développées qui utilisent les ressources locales dont les situations dans un réseau d'échanges économiques permettent l'essor ;
- les fonctions supérieures ou statutaires qui inscrivent la ville en position de domination ou de subordination dans un réseau d'autorité

Ainsi, un élément constitutif d'une ville est un indicateur urbain qui détient une ou plusieurs fonction(s) urbaine(s) selon le niveau d'analyse choisi. Par exemple, on relie un atelier monétaire à la fonction développée d'une ville, et lorsqu'il devient royal, sa fonction devient supérieure.

#### • *Les sources d'informations disponibles*

Il faut rappeler brièvement que les sources disponibles aux archéologues pour étudier les composantes socio-spatiales sont :

- les données archéologiques qui correspondent aux traces matérielles, mobilières ou immobilières, conservées dans le sous-sol et témoignant d'une activité humaine spécifique ;
- les données issues des sciences de la terre (géologie, géophysique, géotechnique) qui précisent la nature et la constitution du sous-sol ;
- les données textuelles (Annales, actes, ordonnances...) produites à partir du Haut Moyen Age;
- les données planimétriques qui permettent de distinguer les éléments structurants d'une ville pour un moment donné (topographie historique) et des entités fonctionnelles (morphologie urbaine).

---

<sup>1</sup> Une composante sociale correspond aux individus, aux associations, aux communautés.

## 1-1-2- Les questions historiques concernant les villes en France et en Europe du Nord

On retiendra ici les ouvrages principaux qui traitent de l'histoire des villes européennes (BARLEY 1977 ; BENEVOLO 1993 ; BIGET, HERVÉ 1995 ; PELLETIER, DELFANTE 2000).

Le questionnement concernant l'histoire urbaine repose sur plusieurs phénomènes :

- les origines des villes (protohistoriques, antiques ou médiévales). Une ville médiévale d'héritage antique et une autre créée *ex-nihilo* possèdent-elles les mêmes caractéristiques topographiques ? La topographie chrétienne a-t-elle une influence sur le paysage urbain ? (BROGLIO, WARD-PERKINS 1999 ; DUBY 1980 ; GAUTHIER, PICARD 1987 ; HUBERT 1959 ; LAVEDAN 1960 ; LE GOFF 1989 ; PINOL *et al.* 1996) ;

- les phases de transformation de la ville. Schématiquement, les phases d'expansion connues des villes en Europe du Nord sont les 1<sup>er</sup> - 2<sup>e</sup> siècles, les 10<sup>e</sup> - 15<sup>e</sup> siècles et les 19<sup>e</sup> - 20<sup>e</sup> siècles. Elles sont liées au contexte de renforcement politique et économique. Les phases « négatives » (3<sup>e</sup> -4<sup>e</sup> siècles, 5<sup>e</sup> -10<sup>e</sup> siècles et 16<sup>e</sup> -17<sup>e</sup> siècles) sont des périodes caractérisées par l'absence de création urbaine et par un manque de dynamisme au sein des villes (BARLES, GALINIÉ, GUILLERME 1999 ; DEMOLON, GALINIÉ, VERHAEGHE 1994) ;

- les relations entre les sociétés et l'espace urbain (DI MÉO 1991 ; DURAND-DASTÈS *et al.* 1998 ; GALINIÉ 2000 ; LEPETIT, PUMAIN 1993).

Ces phénomènes ont une influence directe sur la distribution des composantes socio-spatiales qui conditionnent l'accumulation stratigraphique et la conservation du sous-sol. En effet, plus la durée et la densité d'occupation sont importantes, plus le sol urbain sera épais, hétérogène et perturbé (BARLES *et al.* 1999). Cet aspect est un point essentiel de la recherche qui consiste à restituer ces composantes par l'intermédiaire des caractéristiques du sous-sol. Ce point sera développé en dernière partie (1-4).

## 1-2- Le développement de l'archéologie urbaine en Europe et en France

L'état de la recherche en archéologie urbaine en Europe, et particulièrement en France, est dressé par des bilans successifs publiés en 1982, lors du colloque sur l'archéologie urbaine à Tours (BIDDLE 1982 ; CHAPELOT 1982 ; GALINIÉ 1982), en 1988 (GALINIÉ 1988)<sup>2</sup>, en 1989 (BRULET 1989), en 1994, dans le dossier des *Nouvelles de l'Archéologie n°55* (GARMY 1994 ; VERHAEGHE 1994), en 1995 (GARMY 1995), en 1999 (GALINIÉ 1999a ; SARFATIJ, MELLI 1999) puis en 2001 (DUFAY 2001 ; ROBERT *et al.* 2001). La partie 1-2-2- revient sur les enjeux en archéologie urbaine française.

### 1-2-1- La recherche en archéologie urbaine

L'archéologie urbaine a pour objectif de restituer la formation de la ville à travers les âges, de l'origine à l'époque contemporaine par une étude conjointe de la ville dans ses aspects physiques, des habitants dans la complexité de leur composition, de leurs activités et de leurs productions (BIDDLE, HUDSON, HEIGHWAY 1973 ; GALINIÉ 1982: 21). Elle trouve sa spécificité dans ses modes d'interrogation des sources (sources écrites, éléments du bâti et « archives du sol ») et développe à partir de là ses propres méthodes d'investigation (GALINIÉ 1991b : 242).

Comme le dit F. Verhaeghe, « depuis 1945 et surtout depuis 1970, l'archéologie urbaine est devenue une véritable sous-discipline de l'archéologie avec ses propres objectifs et ses propres problèmes » (VERHAEGHE 1994 : 46). Elle a apporté des connaissances sur l'émergence et la transformation de nombreuses villes. Au 19<sup>e</sup> siècle, seuls certains sites médiévaux majeurs désertés faisaient l'objet de recherches pour l'archéologie médiévale. Dans les villes « vivantes », l'étude était consacrée aux monuments visibles ou encore au substrat romain. L'archéologie urbaine prend forme lors de la reconstruction des villes et du développement des opérations d'urbanisme après la Seconde Guerre Mondiale. Ce n'est qu'à partir des années 1960, que l'archéologie se développe et que les études sont axées sur les phénomènes d'urbanisation, comme en Angleterre avec les recherches menées par M. Biddle à Winchester (BIDDLE 1969 ; BIDDLE 1970 ; BIDDLE 1977).

A partir des années 1960, on prend conscience que l'érosion du patrimoine archéologique s'est accélérée depuis la Seconde Guerre. En France, comme en Angleterre, ce phénomène est surtout observé pour le bâti en élévation et non pas pour ce qui est enfoui. En 1962, en France, la loi sur les secteurs sauvegardés dissocie nettement les deux ; en 1963, en

---

<sup>2</sup> L'article est signé en 1983

Angleterre, cette différence apparaît pour la première fois dans l'ouvrage *Traffic in Towns* publié par le *Ministry of Transport* (BUCHANAN 1963). Avec l'essor de l'archéologie urbaine, la notion d'érosion de l'histoire est alors introduite lors de la réalisation de la première évaluation du patrimoine archéologique urbain (HEIGHWAY 1972).

A partir des années 1970, et surtout des années 1980, l'archéologie urbaine connaît des transformations importantes autant pour les problématiques que pour les méthodes. Face à l'explosion des opérations d'urbanisme et donc, à la masse d'informations recueillies, il était urgent d'intervenir pour évaluer et sauvegarder le patrimoine archéologique des villes de façon stratégique. Les investigations ont alors été prises en charge par l'archéologie de sauvetage que l'on a rebaptisée archéologie préventive<sup>3</sup>. Les orientations de recherches sont alors précisées comme l'étude de l'émergence du monde (proto-)urbain et de la topographie primitive ainsi que l'analyse de l'infrastructure et de la culture matérielle urbaines. Ce développement s'est accompagné néanmoins de difficultés pratiques : disponibilité de secteurs pouvant être fouillés, coûts des interventions et gestion du patrimoine (inventaire, conservation).

Ainsi, peu à peu, l'archéologie « dans » la ville devient l'archéologie « de » la ville (GALINIÉ 1982 : 22). La ville est considérée comme un objet d'étude en soi et non plus un lieu d'étude. Toutefois, dans les décennies qui suivent, la pratique archéologique tend à se détourner de cette idée comme le soulignent les auteurs des articles publiés dans les *Nouvelles de l'Archéologie* n°55 (1994) ou B. Dufaÿ, dans un article plus récent (DUFAY 2001). En effet, les chercheurs rappellent que l'archéologie urbaine ne doit pas prendre une dimension purement économique : les recherches doivent être suivies et programmées par un organisme scientifique, et surtout la ville doit être considérée « dans toute sa richesse et sa complexité » (GARMY 1994 : 6).

### 1-2-2- Les enjeux de l'archéologie urbaine en France : analyse et gestion des archives du sol

Depuis les années 1970, en France, et comme dans les autres pays européens, il est difficile de concilier recherche scientifique et gestion du patrimoine, intervention archéologique et politique d'urbanisme. Dans les années 1980, les préoccupations se tournent vers celles d'une approche scientifique stratégique et raisonnée de l'archéologie urbaine sous l'impulsion des universitaires et des collectivités (ARCHÉOLOGIE-URBAINE 1982). Certains archéologues préconisent donc des choix et des moyens à employer pour prendre en compte à la fois le problème de recherche et de gestion du patrimoine.

---

<sup>3</sup> En France, l'archéologie préventive est principalement mise en pratique par un établissement public, l'INRAP (Institut National de Recherche Archéologiques Préventives) qui a remplacé en 2001 l'AFAN (Association des Fouilles Archéologiques Nationales).

Il a donc été proposé :

- de hiérarchiser les questions historiques à partir des données existantes : question de l'émergence des villes et de leur transformation dans la longue durée, étude sur les modes de production, de circulation et d'échanges des hommes, des produits et des techniques. Ceci nécessite de considérer la ville comme un objet en soi et d'adopter une échelle globale afin de rendre comparable chaque ville pour appréhender le fait urbain. En outre, il est préférable de faire un choix sur les sites et les villes à étudier : un échantillonnage de grandes, de moyennes et petites villes est suggéré ;

- de mettre au point une politique d'intervention adaptée aux projets d'aménagements urbains. Des méthodes d'investigations doivent être ajustées aux conditions de recherches, du projet d'aménagement à la publication, en passant par une phase importante de recensement des connaissances préalables à une fouille et une phase d'inventaire de surfaces disponibles et accessibles<sup>4</sup>. Ces phases sont celles de l'évaluation du potentiel archéologique. D'autres méthodes doivent être également développées lors de l'acquisition des informations comme celle de l'archéologie du bâti. Enfin, des moyens financiers et humains doivent être mis en oeuvre pour appliquer ces principes par la création d'équipes permanentes dans les villes étudiées et des partenariats avec les urbanistes et les promoteurs.

Les bilans successifs, des années 1980 jusqu'à aujourd'hui, sont plutôt négatifs et montrent l'incapacité des chercheurs à concrétiser ces propositions pour des raisons politiques (politique d'urbanisme et de recherche) et économiques.

En 2001, on estime qu'environ 350 villes connaissent une activité archéologique régulière dont une centaine de façon globale et donc plus poussée. Il s'agit notamment des grandes villes où les projets d'urbanisme sont nécessairement plus importants. On se trouve alors dans l'incapacité d'estimer « le nombre de villes qui ont durablement joué un rôle appréciable dans l'armature urbaine du pays depuis l'émergence des « protovilles » de l'Age du Fer jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle » (GARMY 1992), peut être 500 à 1500 (DUFAY 2001). Toutefois, un effort sur les petites et moyennes villes est observé à partir de la fin des années 1990. En effet, la considération de la ville comme un lieu de centralité dans un réseau régional est devenue une des problématiques développées.

En tout cas, on assiste à un effet pervers de l'archéologie de sauvetage et du manque réel de concertation de tous les acteurs du projet urbain, qui se traduit par l'acquisition d'une masse

---

<sup>4</sup> « il ne s'agit pas de juger du « risque » archéologique encouru sur la parcelle x pour mettre en oeuvre mécaniquement le « sauvetage » *ad hoc* mais bien de définir une stratégie de recherche dans laquelle pourra prendre place éventuellement, ou non, une fouille ... C'est la condition *sine qua non* d'une pratique scientifique de l'archéologie urbaine » (GARMY 1994 : 6)

d'information en différents points de la ville, difficilement utilisables pour compléter la vision globale de la ville. De plus, la pratique actuelle n'accorde que peu de temps et de moyens à la publication de l'ensemble des résultats et la recherche pour les acteurs de terrain (entre autres ceux de l'INRAP).

Ces constats s'expliquent par le cadre législatif actuel qui a fait le choix d'une pratique patrimoniale au détriment d'une pratique scientifique raisonnée telle qu'elle a été préconisée dans les années 1980. Malgré le renforcement de la protection du patrimoine archéologique urbain en Europe en 2000<sup>5</sup> et la réforme de l'archéologie préventive française en 2001<sup>6</sup> et 2003, la pratique des prescriptions de fouilles et de diagnostics par les Services Régionaux d'Archéologie est plutôt automatique et parfois déconnectée des prérogatives scientifiques<sup>7</sup> dans le cas de prescription systématique de sondages, parfois sans étude documentaire complète au préalable. On ne raisonne plus qu'en terme de volume et de surface, de coût au m<sup>2</sup>. Le sous-sol archéologique est alors considéré comme un « risque » et non pas comme une « valeur ajoutée » qu'il faudrait valoriser d'autant plus qu'il s'agit d'une ressource non-renouvelable (GALINIÉ 2003 : 447). C'est pourquoi la phase d'évaluation de la valeur informative du sol urbain reste une nécessité autant pour les archéologues que pour les aménageurs.

Enfin, la collaboration entre les différents organismes archéologiques (INRAP, collectivités territoriales, Universités) a permis de développer des programmes de recherches communs (le perfectionnement de la carte archéologique entre autre) et pluri-disciplinaires tel le GIS Sol Urbain. De plus, le partenariat entre les archéologues et les métiers de la construction est devenu possible comme le montrent des expériences à Lyon, à Marseille ou à Bordeaux.

Ces bilans montrent que la phase d'évaluation du potentiel informatif d'une ville est cruciale afin d'adapter des moyens et des techniques spécifiques lors des investigations archéologiques. C'est ce qui fait l'objet de la thèse.

---

<sup>5</sup> En s'appuyant sur la Convention de Malte de 1992, le Conseil de l'Europe a adopté (9 mars 2000), un « code européen de bonne pratique » concernant « l'archéologie et le projet urbain ». Il « vise à renforcer la protection du patrimoine archéologique urbain de l'Europe en facilitant la coopération entre les urbanistes, les archéologues et les promoteurs » (p3) (DUFAY 2001 : 3)

<sup>6</sup> La loi de 2001 affirme que « l'archéologie préventive dans sa totalité, du diagnostic à la publication des résultats des recherches conduites, relève de la recherche archéologique, qu'elle ne peut être scindée en une partie scientifique et une autre partie qui relèverait d'un secteur particulier du bâtiment et travaux publics ». Cela vaut reconnaissance de la dimension de service public de l'archéologie préventive, « avec tout ce que cela inclut dans l'égalité des traitements des citoyens, dans la disjonction entre l'importance des travaux et la capacité financière de l'aménageur, dans l'indépendance des acteurs archéologiques par rapport aux préoccupations d'ordre économique des aménageurs ». (ROBERT *et al.* 2001)

<sup>7</sup> « On leur [les aménageurs] tient en effet un discours digne des Shadocks : « un site est signalé ? Il faut faire un diagnostic pour mieux l'apprécier. Aucun site ? Il faut faire un diagnostic pour en être bien certain... » (DUFAY 2001 : 46)

### 1-3- Présentation de la problématique : apport de l'évaluation pour la connaissance de l'histoire des villes

La pratique de l'évaluation du patrimoine archéologique des villes a commencée en Grande-Bretagne, au tout début des années 1970 et s'est étendue dans plusieurs pays de l'Europe. Sa mise en place a été motivée par la nécessité de protéger ou d'étudier le sous-sol actuel lorsqu'il est soumis à un projet qui lui porte atteinte. En effet, le sous-sol conserve une multitude d'informations reflétant la succession des activités humaines au cours du temps. Les archéologues se trouvent alors face à une double question (GALINIÉ 1995: 202) :

- dans une approche globale du fait urbain, quel est le nombre des villes qui doit être soumis à étude ?

- dans une approche individuelle des villes, comment résoudre l'apparente contradiction entre les nécessités de la connaissance et celles de l'aménagement ?

Pour comprendre ce que l'évaluation peut apporter à la définition d'une problématique historique des villes, il est nécessaire, dans un premier temps, de revenir sur sa signification. Ensuite, après avoir présenté les objectifs de l'évaluation du potentiel archéologique, je reviendrai sur les pratiques, à la fois distinctes et complémentaires, qui ont été développées en Europe depuis les années 1970 : les enquêtes régionales ou nationales et les enquêtes monographiques.

#### 1-3-1- L'évaluation : une question de vocabulaire

L'emploi du mot « évaluation » peut revêtir des significations différentes et parfois détournées de son origine.

Souvent, l'évaluation du potentiel informatif consiste à estimer la quantité et la qualité des connaissances à disposition pour un objet étudié (site, ville). Cette étape intervient dans une phase préalable à la prescription de fouille sous forme d'analyses documentaires (sources écrites, archéologiques, géologiques, géotechniques, plan d'urbanisme...) Dans notre cas, **l'évaluation du potentiel archéologique** conserve sa définition originelle : il s'agit de la « confrontation du potentiel idéal, identifié essentiellement à partir de la topographie historique et des données archéologiques au potentiel réel, le résiduel, issu de la longue série des atteintes au sous-sol, le tout pondéré par des facteurs relatifs aux conditions de gisement et de conservation » (GARMY 1999 : 94).

Ce sens est trop souvent détourné par des archéologues, notamment en milieu préventif, qui entendent l'évaluation comme celle des coûts financiers des moyens d'intervention (SCHWIEN 2003) ou qui la restreignent à l'opération de diagnostic de terrain (principalement les sondages à la

pelle mécanique) (DUBOULOZ 2003 ; BRUN, MARCIGNY, VANMOERKERKE 2006a : 89). Ce fait est le témoin du manque de définition d'un vocabulaire commun par les archéologues comme il a été évoqué dans la partie précédente (1-2-2).

Enfin, il faut ajouter une dernière remarque sur cette question de vocabulaire. L'évaluation archéologique, par son caractère d'estimateur, permet de poser des hypothèses sur la nature et la forme de l'occupation humaine à un temps et un lieu donné. On devrait employer alors le mot « prévision » archéologique et non pas de « prédiction », comme il est couramment fait, car la prédiction est la traduction du mot anglais *prediction* et est de l'ordre de l'intuition ou de la divination, pas de l'activité scientifique.

### 1-3-2- Les objectifs de l'évaluation du potentiel archéologique d'une ville

L'évaluation consiste à définir le potentiel archéologique réel (Pr) à partir du potentiel idéal (Pi) et des destructions massives du dépôt archéologique (D), pondéré par un facteur complexe relatif à la qualité du dépôt (Q), déterminé en fonction de la topographie (pente), l'orographie (propriété du milieu à conserver les matériaux) et l'épaisseur du dépôt archéologique suivant la relation suivante (GARMY 1999 : 94) :  $Pr = (Pi - D)^Q$ .<sup>8</sup>

Pour résoudre cette équation, il faut :

- une mesure aussi précise que possible de l'épaisseur du dépôt archéologique
- une délimitation des transformations de l'espace urbanisé ancien
- des hypothèses sur les usages de l'espace aussi détaillée que possible
- un inventaire des destructions portées au sous-sol.

Cette étude s'attachera à proposer des solutions méthodologiques pour chacun de ces objectifs.

- *Une mesure aussi précise que possible de l'épaisseur du dépôt archéologique*

Lorsqu'il faut intervenir sur un site archéologique, un des premiers objectifs à résoudre est l'estimation de l'épaisseur de la stratification à étudier, et donc à « enlever » si on considère les préoccupations des aménageurs. En effet, le dépôt archéologique en milieu urbain est plus ou moins épais et plus ou moins stratifié selon les lieux étudiés. Il est le résultat des activités humaines qui se sont succédé dans la longue durée combinées à des processus naturels. Enfin, pour pouvoir le mesurer, il faut le distinguer du sol naturel.

---

<sup>8</sup> Cette formule est théorique et n'a pas été concrètement testée. Le plus difficile est de déterminer le facteur Q.

A l'échelle de la ville, la connaissance de l'épaisseur est importante. Obtenir une carte des épaisseurs du dépôt permet de les mettre en relation avec les éléments de la topographie historique et d'avoir une vision globale de l'intensité de l'occupation humaine. Une question posée est celle de la corrélation entre l'épaisseur du dépôt et la densité d'activités humaines. Pour restituer une carte des épaisseurs, il est nécessaire de posséder un nombre important d'informations et de choisir une méthode d'estimation de mesure (interpolation\*) adaptée.

- *Une délimitation des transformations de l'espace urbanisé ancien*

Dans la pratique archéologique, « la connaissance de l'évolution d'une ville passe par la mise en perspective des éléments individuels, maisons, lieux de culte, remparts, etc...dans l'ensemble de l'espace urbain, à chaque époque » (GALINIÉ 1989 : 67). Les états successifs de la ville permettent de délimiter l'**espace urbanisé ancien** qui ne correspond pas à nos actuels centres historiques (l'agglomération souvent délimitée par les remparts médiévaux et modernes). Il est défini par l'addition et la soustraction des zones d'occupation dense de la ville, des origines au milieu du 19<sup>e</sup> siècle. La restitution de l'espace urbanisé ancien s'appuie sur les plans de topographie historique élaborés pour des périodes pertinentes : phases d'extension et de rétraction.

En outre, sa forme n'a généralement pas de valeur historique, tant les variations spatiales sont nombreuses et complexes<sup>9</sup>. En revanche, « il définit un périmètre de sensibilité archéologique dans lequel la densité des archives du sol est élevée » (GALINIÉ 1989 : 67 ; GALINIÉ 1991a : 27 ; GALINIÉ 1992 : 141).

- *Des hypothèses sur les usages de l'espace aussi détaillée que possible*

L'évaluation, limitée par l'état des connaissances à un moment donné, consiste à spéculer à partir d'un constat sur l'ensemble de l'espace urbanisé aux différentes époques (GALINIÉ 1989 : 69). Pour ce faire, il est nécessaire, dans un premier temps, de rassembler les informations sur les usages de l'espace pour une compréhension de la topographie de manière diachronique. Elles sont issues des analyses stratigraphiques des sites archéologiques et des études documentaires. Le but ici est d'organiser ces observations suivant une grille d'analyse qu'il convient de mettre en place pour appréhender l'ensemble à l'échelle de la ville.

Dans un deuxième temps, ces informations, plus ou moins abondantes suivant les périodes étudiées, permettent de mesurer les lacunes existantes dans certaines zones des villes et

---

<sup>9</sup> Par exemple, lors de la rétraction urbaine, on ne retient que les zones dans lesquelles on suppose une activité humaine intense. Les espaces exclus par ce découpage ne peuvent être considérés exclusivement comme de l'abandon mais comme des zones faiblement occupées ou bien comme des zones dont les usages sont jusqu'ici imperceptibles par les archéologues.

pour des périodes données (notamment pour l'Antiquité tardive et le Haut Moyen Age dont les sources écrites sont plus rares).

Dans un troisième temps, on pose des hypothèses sur les usages du sol en un lieu et un temps  $t$ , à partir des informations recensées, en terme d'occupation ou d'abandon et de gain ou de rétraction. L'idéal est de découper la ville selon des zones fonctionnelles particulières (habitat, artisanat, funéraire...), de façon diachronique. Ce découpage en composantes socio-spatiales est le résultat d'une modélisation de l'espace selon l'échelle choisie (ville, îlot ou site). Ces composantes mises en relation avec l'épaisseur présumée du dépôt archéologique correspondent au potentiel archéologique idéal d'une ville (**Pi**).

- *l'inventaire des destructions portées au sous-sol.*

Un des points importants de l'évaluation consiste à établir un état de la conservation du sous-sol. Les archives du sol se conservent à condition qu'elles n'aient pas été détruites (BIDDLE, HUDSON, HEIGHWAY 1973). Le problème est de pouvoir distinguer ce qui a été partiellement ou totalement détruit. On sait qu'en ville, jusqu'en 1945, les destructions à l'échelle de l'espace urbanisé ancien ont toujours été partielles : « les constructions privées, médiévales ou modernes, même assorties de caves, atteignaient rarement le sol vierge » (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 39). Cependant, depuis la seconde guerre mondiale, les nouvelles techniques de construction engendrent des destructions massives des archives du sol. Dans les années 1960, les opérations sont des rénovations qui engendrent des destructions du bâti, une oblitération du parcellaire et une reconstruction totale de quartiers urbains. Depuis les années 1970, ces opérations d'urbanisme sont suivies par des actions de restructuration ou de réhabilitation qui semblent plus positives pour la conservation du sous-sol dans les centres historiques seulement (CHAPELOT 1982 : 30-31).

Il est donc nécessaire d'inventorier et de cartographier ces destructions (**D**) qui, soustraites du potentiel idéal, estimeront le potentiel réel (**Pr**). Ces résultats dépendent toutefois de la qualité du dépôt archéologique (**Q**).

En effet, à partir des années 1980, une nouvelle approche, prenant en compte la qualité du dépôt archéologique, a été développée par la mise en oeuvre d'études environnementales et de recherches historiques de socio-topographie. Il s'agit de subdiviser le potentiel archéologique en zones selon la nature du dépôt et le type d'usage qui s'y est développé. Évaluer la qualité du dépôt, c'est aussi évaluer la capacité du sous-sol à conserver les matières périssables qui permettent d'étudier dans des conditions favorables, vestiges et objets généralement disparus (GALINIÉ 1989 : 67).

M. Carver, dans *Underneath English Towns* (CARVER 1987), fait le bilan sur ce type d'approche. Ses travaux en Angleterre dans les années 1970 (CARVER 1980 ; CARVER 1981) et son enquête sur une quarantaine de villes de France (CARVER 1983) ont fondé son raisonnement sur la prise en compte des structures liées aux activités individuelles que les archéologues délaissent en faveur des édifices publics. Ses propositions consistent alors à inventorier et à cartographier ces destructions qui, confrontées au potentiel idéal et à la qualité du dépôt archéologique déterminent le potentiel réel à étudier. Ainsi, l'ensemble permettra de hiérarchiser des secteurs et de définir des modes d'intervention adaptés<sup>10</sup>.

Enfin, estimer la qualité du dépôt archéologique, c'est aussi comprendre les processus de formation du sol urbain qui dépendent directement de la succession des activités humaines. C'est un volet qui sera abordé dans la partie qui suit (1-4-2-).

### 1-3-3- Présentation des pratiques de l'évaluation archéologique des villes en Europe

Depuis, les années 1970, les objectifs de l'évaluation ont été suivis par deux pratiques : les études régionales et nationales et les études individuelles.

- *Etudes régionales, nationales*

Le but est d'évaluer globalement le potentiel archéologique à l'échelle du pays. Le problème réside dans la nécessité de définir ce qu'est une ville avant de pouvoir confronter les données.

- Les inventaires archéologiques

Les inventaires archéologiques systématiques recensent les sites d'un territoire ou d'une période ou encore des deux simultanément (RODIER 1994b: 6-7). En France, il existe plusieurs inventaires :

- l'inventaire archéologique de la France, mis en place en 1978, qui vise à répertorier les sites connus et les zones où des indices permettent d'en supposer l'existence, dans un but de gestion et de protection du patrimoine. Cet inventaire informatisé est un « outil de base pour les

---

<sup>10</sup> « la nature du dépôt archéologique, l'état de conservation de ce dépôt devraient nous conduire à définir des procédures d'intervention qui vont de la simple attestation d'existence par observation stratigraphique à la mise en œuvre de techniques de fouilles, d'enregistrement et de prélèvements beaucoup plus complexes, faisant appel à des équipes où des compétences dans les sciences de la terre et de la nature sont mises à contribution » (GALINIÉ 1989 : 239).

archéologues et la phase préparatoire à l'élaboration de documents d'évaluation et de gestion du sous-sol » (MAGNAN 1989 : 70) ;

- la *Carte archéologique de la Gaule* initié par M. Provost (PROVOST 1988-2001) qui n'est pas spécifiquement urbaine. Son utilisation reste limitée par le fait que son champ d'investigation est concentré chronologiquement entre l'Age du Fer et le Haut Moyen-Age, et surtout qu'elle ne propose pas de critique des interprétations (RODIER 1994b : 6-7) ;

- la carte archéologique de la Sous-Direction de l'Archéologie – DRACAR devenue PATRIARCHE - qui n'est pas un outil d'évaluation mais un document administratif de gestion et de recherche.

#### - Les enquêtes régionales et nationales

Les enquêtes nationales ont été réalisées en Grande-Bretagne (HEIGHWAY 1972) puis aux Pays-Bas (VAN ES 1982). Les chercheurs ont rencontré une première difficulté qu'a connue l'ensemble des pays européens : comment délimiter le corpus des villes anciennes ?

Ces recherches ont été aussi l'occasion de prendre conscience de l'ampleur du problème urbain concernant les modalités d'urbanisation ainsi que l'organisation des réseaux de villes et leurs hiérarchisations (RODIER 1994b : 7). Ainsi, les enquêtes se sont autant concentrées sur les villes principales que sur les petites villes (GALINIÉ 1994 : 17).

Des enquêtes régionales, présentées en séries monographiques, ont été conçues en Grande-Bretagne (HUGHES 1976 ; PENN 1980 ; EDDY, PETCHEY 1983), en Italie (BROGIOLO 1987), en Espagne (CASTELLS *et al.* 1991) et aux Pays-Bas (VERHAGEN 1995). En France, une enquête interrégionale a été lancée en 1990 (ATLAS... 1995) mais, limitée sur la topographie thématique, elle ne peut constituer un outil de gestion archéologique (LORANS 2002 : 64).

Pour réaliser ces études, des critères de sélection ont été définis en fonction du contexte historique de chaque pays et de façon à définir un corpus plutôt large (GALINIÉ 1984 ; GALINIÉ 1994). Ainsi, neuf cents villes ont été retenues en Grande-Bretagne et deux cents aux Pays-Bas. Dans l'enquête effectuée sur la région Centre en France (GALINIÉ, ROYO 1993: 4), les auteurs ont élaboré des grilles d'analyse, inspirées de la géographie, prenant en compte les fonctions que chaque ville remplit : les fonctions banales, développées et supérieures. Dans le cas de cet atlas des villes, les thèmes d'études retenus sont : les réseaux d'autorité, l'urbanisation, l'évolution propre des villes et la perception du fait urbain par les sociétés.

Ainsi, plusieurs types de classifications ont été réalisés en fonction des pays concernés. Leur point commun réside dans le fait qu'elles « présupposent que les villes remplissent un certain nombre de fonctions et que ce sont ces fonctions qui les placent dans un système hiérarchisé » (GALINIÉ, ROYO 1993).

- *Etudes Individuelles*

Dans les années 1970, une autre pratique a également été mise en place, l'évaluation individuelle. Elle consiste à étudier chaque ville, au cas par cas. En fait, elle prend place dans un contexte où, face aux destructions massives du sous-sol archéologique, il faut faire des choix stratégiques pour pouvoir sauvegarder le patrimoine, hiérarchiser les choix d'intervention et recueillir les informations nécessaires à la compréhension de la constitution de l'espace urbanisé ancien. Il ne s'agit donc pas d'accumuler systématiquement les données mais de sélectionner et hiérarchiser la documentation.

- Les études basées sur l'analyse topographique des villes

La première étude globale d'une ville concerne Londres (BIDDLE, HUDSON, HEIGHWAY 1973). C'est sur ce modèle que *Les archives du sol à Tours, survie et avenir de l'archéologie de la ville* (GALINIÉ, RANDOIN 1979a) a été réalisé pour Tours. S'ensuivent des travaux similaires, mais non-publiés, pour les villes de Chartres (JOLY 1979) et Saintes (GALINIÉ, BOUCARD 1980). A la fin des années 1970, la nécessité d'une politique nationale en matière d'archéologie a été reconnue par l'Etat et a abouti à l'organisation d'un colloque international d'archéologie urbaine par le Ministère de la Culture à Tours en 1980 (ARCHEOLOGIE URBAINE 1982). Un premier projet envisageant la création de centres interrégionaux d'archéologie urbaine s'est transformé par la Création du Centre national d'Archéologie Urbaine (CNAU)<sup>11</sup> installé à Tours en 1985. Dans le cadre de sa mission de recherche, le CNAU a mis en place plusieurs outils, un *bulletin bibliographique*, un *annuaire des opérations de terrain en milieu urbain* et des *documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France* (cf. *infra*).

Les évaluations individuelles ont également été développées dans les autres pays d'Europe du Nord-Ouest. En Suède, des monographies pour 70 villes historiques ont été publiées (VILLES SUEDOISES 1976-1985). Au Danemark, un programme semblable est engagé pour dix villes (SCHIORRING 1988). En Wallonie, des documents de gestion ont été réalisés pour treize

---

<sup>11</sup> <http://www.culture.gouv.fr/culture/cnau/fr/>

villes et suivent les mêmes objectifs que les documents d'évaluation de la France (BRULET, GHENNE-DUBOIS 1987).

Des enquêtes individuelles ont été réalisées en Grande-Bretagne (RODWELL 1975 ; ANDREWS 1984 ; OXLEY 2002) et en Italie (HUDSON 1981 ; GELICHI, ALBERTI, LIBRENTI 1999 ; CARDARELLI *et al.* 2002 ; GELICHI 2002 ; ORTALLI 2002).

Ces études présentent, en général, un état des connaissances sur les variations de l'espace urbanisé ancien au cours du temps. Elles définissent le potentiel archéologique (la qualité et les atteintes subies) du sous-sol.

- Les documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France (DEPAVF)<sup>12</sup>

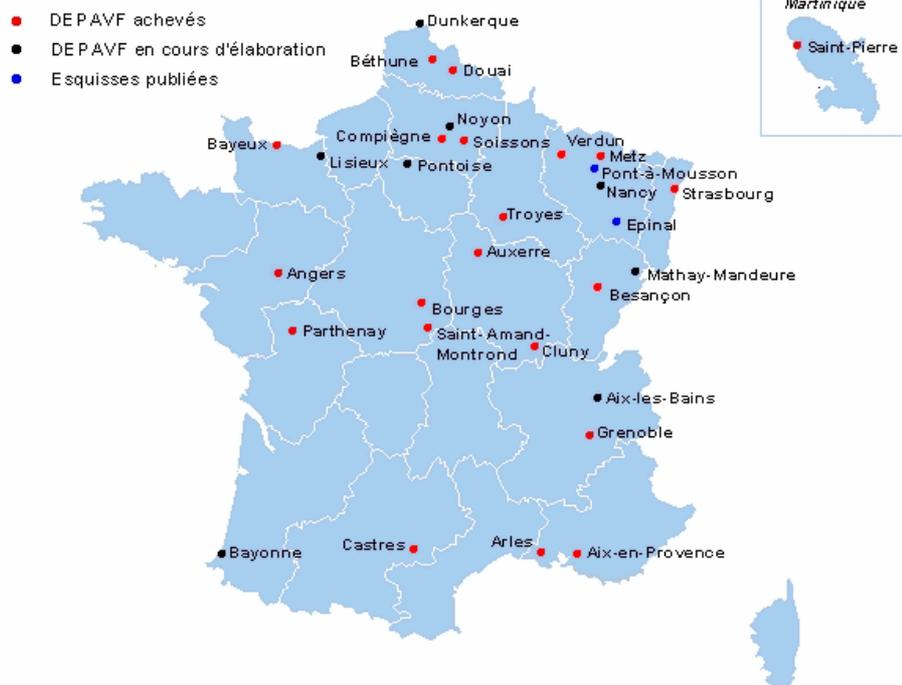
En s'inspirant d'études réalisées dans la lignée des travaux engagés après la parution du *Future of London'Past*, en 1973, le CNAU a mis en place l'élaboration de documents d'évaluation du patrimoine archéologique urbain dans des villes où des archéologues souhaitaient adopter ce type d'approche (GALINIÉ 1989 : 66-69). Plus qu'un outil de gestion, les documents d'évaluation se présentent comme un instrument de réflexion sur la ville. En effet, l'objectif est de « forger un outil susceptible de contribuer à une gestion plus raisonnée du patrimoine enfoui » (CNAU 1989: 2 ; MESQUI 1992 ; VERHAEGHE 1992).

Depuis, vingt et un documents d'évaluation du patrimoine archéologique urbain ont été publiés. Les villes étudiées se distinguent en fonction de leur statut administratif mais surtout en fonction de leurs origines (Fig. 1).

---

<sup>12</sup> Appelé aussi DEPAU pour Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain

## C.N.A.U. - études urbaines



Ville d'origine antique	Villes d'origine médiévale	Ville coloniale
Aix-en-Provence (NIN <i>et al.</i> 1994) Angers (COMTE, SIRAUDEAU 1990) Arles (SINTES 1990) Auxerre (SAPIN <i>et al.</i> 1998) Bayeux (DELACAMPAGNE 1992) Besançon (GUILHOT, GOY 1990) Bourges (TROADEC <i>et al.</i> 1996) Grenoble (MONTJOYE 1990) Metz (BRUNELLA <i>et al.</i> 1992) Soissons (ROUSSEL 2002) Strasbourg (SCHWIEN 1992) Troyes (LENOBLE, DEBORDE 1995) Verdun (GAMA 1997)	Béthune (DELOFFRE <i>et al.</i> 2001) Castres (CAMBON 1993) Cluny (ROLLIER 1994) Compiègne (COSTE <i>et al.</i> 2000) Douai (DEMOLON <i>et al.</i> 1990) Parthenay (CAVAILLÈS <i>et al.</i> 2000) Saint-Amand-Montrond (POULLE 1991)	Saint-Pierre-La-Martinique (GUILLAUME 1999)

Fig. 1- Localisation des villes ayant donné lieu à un document d'évaluation en fonction de leurs origines (source : CNAU)

Ceci permet d'orienter les questions concernant le phénomène d'urbanisation :

- existe-t-il des points communs entre les villes de même origine ? Ont-elles une évolution commune, ou encore, possèdent-elles des structures communes ?

- qu'est-ce qui peut différencier les villes selon leurs origines ? Par exemple, quelle est l'influence d'une occupation antique sur la topographie médiévale ?

Il s'agit ici de s'interroger sur les spécificités des activités humaines selon les périodes.

Le propos des DEPAVF est de mettre en perspective le potentiel idéal, c'est-à-dire l'ensemble des données de topographie historique que l'on peut recenser voire cartographier, et le potentiel réel, les informations actuelles sur l'état de conservation du sous-sol. Le but est de définir la nature de l'utilisation d'un site pour différentes périodes. Enfin, les conditions d'accès à certaines sources documentaires sont évalués (CNAU 1989 : 2). Pour que les résultats soient comparables d'une ville à l'autre, l'analyse procède en plusieurs étapes recensées dans le tableau suivant (Fig. 2) :

Documentation	Objectifs
Etat des connaissances sur les éléments de topographie historique	Fournir les bases de raisonnement sur les variations de l'espace urbanisé ancien
Recherche archéologique de terrain	Donner une image de l'activité archéologique et la qualité des observations
Etat de conservation du patrimoine enfoui	-Recenser les destructions massives et totales du sous-sol (ouvrages enterrés, caves) -Recenser l'épaisseur des sédiments archéologiques
Statuts des terrains	Faire le point sur l'accessibilité aux terrains selon les règlements d'urbanisme en vigueur

Fig. 2 - Tableau des étapes de présentation de la documentation et leurs objectifs

Dans chaque document, les données sont organisées selon une grille d'analyse qui permet de traiter tous les repères urbains comme la voirie ou l'habitat privé (Annexe 1).

Les observations sont cartographiées et homogénéisées par le CNAU (CNAU 1989 : 9). La série de plan présentée dans les DEPAVF comporte :

- un fond de plan de la voirie actuelle au 1 / 5000<sup>e</sup>
- un fond de plan avec le nom des rues utiles et des édifices principaux
- un plan des courbes de niveau, une série de plans topographiques par grandes périodes chronologiques
- un plan de la recherche archéologique de terrain
- un plan des cotes d'épaisseur des sédiments archéologiques
- un plan des dispositions réglementaires et un plan d'évaluation du potentiel archéologique.

Ces documents permettent donc de renseigner les 4 objectifs de l'évaluation globale de la ville présentée précédemment. Toutefois, deux questions sont posées :

- les villes possèdent-elles suffisamment d'informations sur l'épaisseur du dépôt archéologique, en nombre et en répartition spatiale, pour pouvoir reconstituer un modelé du toit du niveau naturel ?

- comment les auteurs considèrent la notion de qualité (capacité du sol à conserver les éléments) et d'état de conservation du dépôt archéologique ?

L'analyse des DEPAVF a permis d'y répondre ((LAURENT 2003 : 14-15). Les résultats sont variables d'une ville à l'autre (Annexe 2). Pour la première question, il en ressort que certaines observations (archéologiques ou géotechniques) n'ont pas atteint le niveau naturel, que le nombre de points où l'on a observé en totalité l'épaisseur est faible dans beaucoup de villes et que les informations sont irrégulièrement réparties dans l'espace. On constate que seule la ville de Douai propose une carte reposant sur une extrapolation linéaire. Ce type de modélisation ne peut être envisagé aussi finement pour les autres villes. Concernant la deuxième question, les observations sur la qualité diffèrent logiquement en fonction du contexte de conservation du sous-sol des villes : beaucoup ont connu des destructions dues aux guerres mondiales mais aussi à cause des creusements modernes et contemporains (caves, égouts). Les informations sur l'évaluation du potentiel se distribuent pour la plupart des villes comme suit : potentiel nul, potentiel pour quelques périodes d'occupation, potentiel pour toutes les périodes, potentiel inconnu.

B. Dufaÿ puis E. Lorans font un bilan concernant l'évolution souhaitable de ces études (DUFAÿ 2001 : 37-42 ; LORANS 2002 : 62-63). D'une part, l'utilisation de Système d'Information Géographique (SIG) permettra de confronter les données multiples par des analyses spatiales et leur mise à jour régulière. D'autre part, la réalisation d'une analyse morphologique permettra de mieux cerner l'évolution de la trame urbaine en confrontant les données de fouilles et les données planimétriques. Enfin, il est proposé de simplifier l'étude en modélisant les composantes socio-spatiales de la ville. Ces différents points seront développés dans le 2<sup>e</sup> chapitre.

Par ailleurs, des *Esquisses de topographie historique et d'évaluation archéologique* ont été conçues pour des villes de petite taille ou bien pour celles où la documentation archéologique est quasi absente (Pont-à-Mousson en 1996, Epinal en 1998). La démarche suit celle des documents d'évaluation.

Enfin, des études ont été réalisées à l'échelle du quartier dans la ville de Bourges (TROADEC 2001) et de Tours (GOBIN 2001 ; BOSSEAU 2002). Pour la ville de Bourges, elle est intégrée à un projet d'opération foncière par la municipalité. Les archéologues ont donc suivi la méthode proposée par les documents d'évaluation en considérant l'îlot comme objet d'étude et en le mettant directement en relation avec la ville (TROADEC 2001 : 20-21).

#### - Etudes pour la caractérisation des sols anthropiques et naturels

La reconnaissance du sol urbain est devenue le jeu de l'interdisciplinarité entre les sciences humaines et les sciences de la terre (sédimentologie, pédologie, micromorphologie, géophysique, mécanique des sols). La plupart du temps, l'attente de l'archéologue est un échange d'informations pour la réalisation de coupes stratigraphiques, leur lecture et leur interprétation (FERDIÈRE 1999: 5). Avec l'essor de la **géoarchéologie\*** dans les années 1980, des programmes pluridisciplinaires tels que les modes de formation du dépôt archéologique et sa caractérisation interne ont été développés. Une des difficultés est de trouver une définition commune de ce qu'est un sol. Pour le pédologue, le sol est constitué de couches successives, les horizons, qui sont le résultat de l'évolution des constituants du sol (DUCHAUFOR 1997). Pour l'archéologue, un sol est le résultat de l'évolution ou de la transformation de sédiments après leur mise en place qui dépendent directement ou indirectement des activités humaines (FONDRILLON 2001).

La caractérisation du sol urbain fait l'objet de différentes méthodes que l'on peut mettre en œuvre sur un site archéologique. Le postulat de départ est que le sol naturel se distingue du sol anthropique par sa composition. Le questionnement repose sur deux points directement liés:

- quel est l'effet de l'impact de l'homme sur les sédiments ?
- la constitution des couches archéologiques (fond sédimentaire et mobilier archéologique) témoigne-t-elle d'une activité humaine spécifique ?

Un des buts poursuivis ici est de proposer un protocole de reconnaissance et de caractérisation du sol urbain en croisant l'approche archéologique et mécanique.

- *Conclusion*

Les pratiques d'évaluation nationales et individuelles ont permis de lancer des études qui étaient préconisées dans les années 1980 : l'étude comparée d'un corpus de villes selon des grilles d'analyses liées aux fonctions urbaines, la production de documents d'évaluation et de cartes du potentiel archéologique disponibles aux archéologues et aux aménageurs malgré la politique d'intervention en ville qui tient peu compte de l'historicité de la ville. Le problème actuel est celui de l'actualisation des données et du choix du mode de publication (papier, électronique).

Le développement de la géoarchéologie a suscité celui de la prise en compte de la qualité et la caractérisation du dépôt archéologique. Ce dernier point constitue un volet important de la thèse puisqu'il consiste à utiliser le sol urbain comme clé d'entrée pour répondre aux objectifs de l'évaluation. Par ailleurs, l'apport des sciences de la terre (géologie, pédologie, mécanique des sols, écologie) permet de compléter les connaissances sur le potentiel informatif du sol urbain. C'est dans cette optique qu'il a été choisi d'aborder le sujet en confrontant la vision de l'archéologue avec celle du géotechnicien. Ce point est développé dans la partie qui suit.

## **1-4- Etudier le sol urbain pour la connaissance historique des villes**

Ce quatrième point consiste à montrer en quoi le sol urbain est une clé d'entrée pour traiter la question d'une évaluation complète de la ville. Je présenterai, dans un premier temps, les visions des archéologues et du géotechnicien sur les propriétés du sol urbain et la façon dont ils appréhendent son caractère hétérogène. Puis, dans un deuxième temps, je développerai la grille d'analyse qui sera employée pour l'exploitation des données retenues pour l'étude : la typologie fonctionnelle du dépôt archéologique.

### **1-4-1- Définition du sol urbain**

Le sol urbain, tantôt qualifié de « dépôt archéologique » ou de « dépôt anthropique » par les archéologues, de « remblai historique » par les géotechniciens ou bien de « poubellien » par les pédologues (BARLES, GUILLERME 2003), se différencie des autres sols du fait qu'il est épais et densément stratifié (GALINIÉ 1999b : 7). Son exhaussement résulte de mécanismes naturels et anthropiques : production et évacuation de déchets, importation de matériaux et de denrées et altération physique, chimique et/ou biologique. Ces mécanismes expliquent le caractère hétérogène que présente le sol des villes (GALINIÉ 1999b : 11 ; BREYSSE 1995 ; BREYSSE *et al.* 2002 ; BREYSSE 2003).

La variabilité du sol urbain résulte de la superposition d'une « variabilité naturelle » (liée en particulier à la géologie du site) et d'une « variabilité anthropique » qui influencent la réponse du milieu (BARLES *et al.* 1999 : 261). L'hétérogénéité est étudiée par les sciences humaines et les sciences de la terre selon différentes échelles d'analyse. Les approches retenues ici sont celles de l'archéologue et du géotechnicien qui sont présentées dans ce chapitre puis développées dans les chapitres suivants.

### **1-4-2- La formation du sol urbain vu par l'archéologue**

Le sol urbain est l'« ensemble du dépôt archéologique urbain compris entre les niveaux naturels et les couches que nous piétons actuellement » (GALINIÉ 1999b). Etudier le sol urbain, c'est s'interroger sur l'usage de l'espace de la ville de manière diachronique (GALINIÉ 2000).

La caractérisation du sol urbain passe par la compréhension de ses modes de constitution. En effet, l'archéologue considère que la nature des activités des habitants caractérise un sol. En milieu urbain, la variété et la densité de ces activités sont plus importantes qu'ailleurs. Les types de sols que l'on peut rencontrer peuvent être liés à la construction, à l'occupation, à la

destruction, à l'abandon, aux creusements et remblaiements systématiques ou encore à des apports naturels.

En outre, la production de sol est spontanée et systématique (GALINIÉ 1999b : 12-13) :

- la production spontanée est le résultat d'activités répétitives marquées par la production de déchets sur place, ou évacués à proximité immédiate. Ces activités peuvent être domestiques, artisanales ou liées à la construction ;

- la production systématique est liée à l'action de déblaiement et de remblaiement qui modifie la configuration de sol par soustraction ou addition.

La formation du sol urbain résulte de différents phénomènes qu'il convient de préciser.

- *Formation du sol urbain*

La formation des couches archéologiques a lieu après l'usage ou l'abandon d'un espace par les habitants et avant leur découverte lors de fouilles archéologiques (Fig. 3). Ces principes de formation ont été retenus à partir des réflexions conduites avec la collaboration de H. Galinié et M. Fondrillon, doctorante en archéologie (LAT). Ils reprennent ceux exposés par M.B. Schiffer (SCHIFFER 1987) qui propose un schéma théorique de la trajectoire des objets, où le *systemic context* correspond au contexte vivant dans lequel les matériaux ont été utilisés et où l'*archeological context* est défini comme le contexte dans lequel les objets disparaissent à la vue et à l'usage ; ce qu'il dénomme aussi la biosphère et la lithosphère.

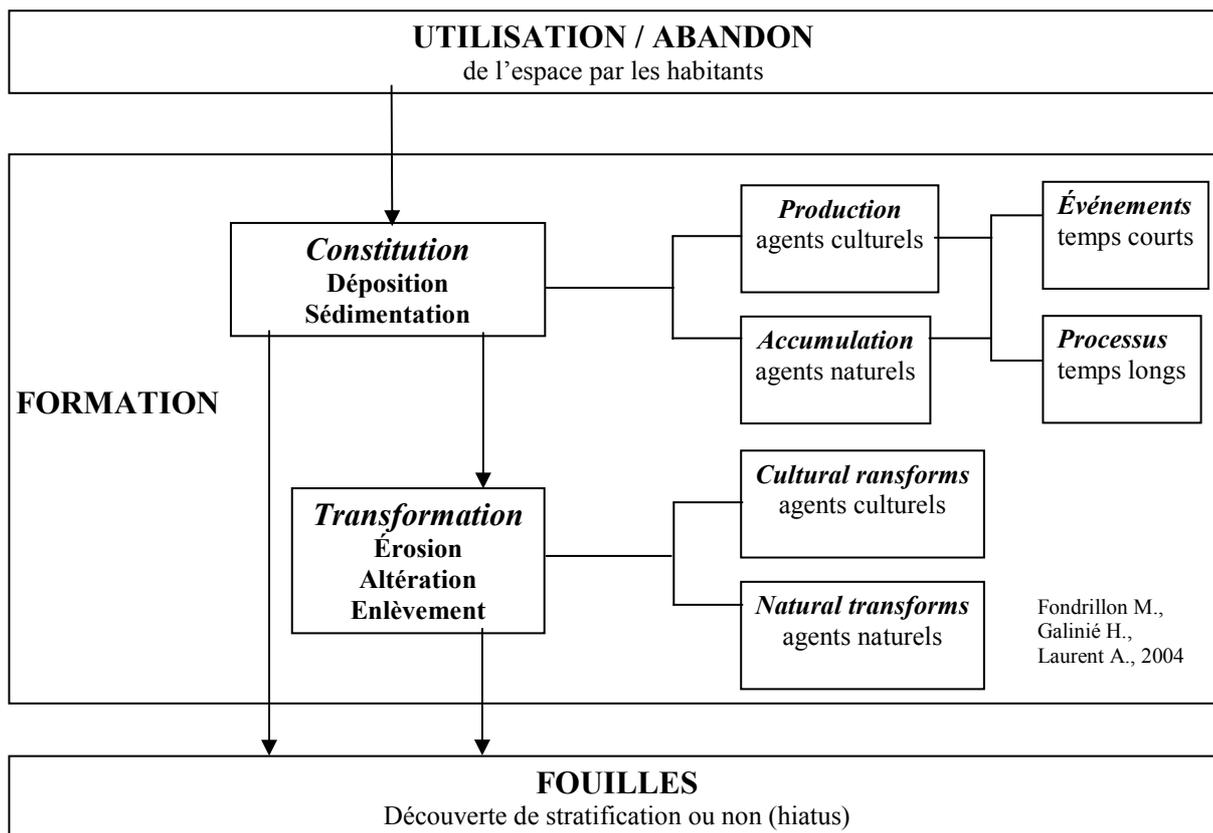


Fig. 3 – Schéma de la formation de la stratification des couches archéologiques

On considère que la formation de la stratification résulte d'une phase de constitution/sédimentation par production et accumulation de matières minérales et organiques, suivie, la plupart du temps, d'une phase de transformation post-dépositionnelle occasionnée par des agents naturels et culturels.

La phase de constitution comprend des temps de sédimentation liés :

- à l'apport de matériaux lors des activités humaines (remblai, construction, occupation extérieure et intérieure)
- à des apports naturels.

Cette phase permet d'archiver ces usages de courte durée (événements) qui engendrent des stratifications contrastées (construction, destruction, remblai, dépôt de crue, glissement de terrain) et ceux de longue durée (processus, épisodes) qui homogénéisent la stratification (occupation intérieure et extérieure, mise en culture, pacage).

La phase de transformation des sols débute dès leur formation par des agents naturels et/ou anthropiques (culturels) qui provoquent des modifications physiques (tassement, piétinement, labours, bêchage, ruissellement), chimiques (incorporation de matière organique, changement de PH, ruissellement), biologiques (bioturbation) et érosives (balayage,

décaissement). L'évolution post-dépositionnelle des sols et des objets archéologiques varie selon leur nature et leur condition de conservation.

- *Emprise du sol urbain*

L'emprise du sol urbain varie selon la ville et la période historique. Sa formation est rythmée entre des phases d'expansion et de rétraction (cf 1-1).

Actuellement, un cas particulier de rétraction urbaine est difficile à appréhender par les méthodes traditionnelles des archéologues. Il s'agit de la période des 4<sup>e</sup> /10<sup>e</sup> siècles qui est définie comme une période de déclin urbain et caractérisée par des niveaux de couleur sombre et, surtout, par une absence de stratification visible à l'œil (BARLES, GALINIÉ, GUILLERME 1999: 265). L'épaisseur de ces niveaux, appelés « Terres Noires » (*Dark Earth*) (GALINIÉ 2004 ; MACPHAIL, GALINIÉ, VERHAEGHE 2003 ; VERSLYPE, BRULET (dir.) 2004 ; YULE 1990), peut varier entre environ 0,20 et 1,80 m selon le site. Ils sont caractérisés par la présence de mobilier archéologique hétérogène distribué aléatoirement. Plusieurs interprétations sont alors proposées pour expliquer ce phénomène : terre de jardin, terre de culture, occupation en matériaux périssables, niveau d'abandon, effet de bioturbations (CAMMAS *et al.* 1995 ; COURTY *et al.* 1989 ; MACPHAIL 1994 ; BARLES *et al.* 1999 ; TERRES NOIRES 2000 ; GALINIÉ 2004). Les Terres Noires semblent être le résultat de la combinaison de phases de sédimentation et de phases d'altération.

Ainsi, cette problématique fait l'objet de recherche pluridisciplinaire entre l'archéologie et les sciences de la terre (pédologie, géologie, micro-morphologie). Elle est développée dans les années 1980 en Angleterre (COURTY *et al.* 1989) et n'est étudiée en France que dans le milieu des années 1990 (CAMMAS *et al.* 1995 ; TERRES NOIRES 2000 ; VERSLYPE, BRULET (dir.) 2004). On considère que l'appellation « Terres Noires » est un concept d'attente lorsqu'il est impossible d'interpréter ces niveaux (GALINIÉ 2004).

L'emprise du sol urbain n'est donc pas linéaire dans le temps. La production de sol est irrégulière autant dans la dimension verticale que dans la dimension horizontale : l'épaisseur du dépôt archéologique n'est pas uniforme à l'échelle de la ville.

- *Méthodes pour l'analyse de l'hétérogénéité du sol urbain*

L'objectif de la reconnaissance et de la caractérisation du sol urbain est d'identifier des couches « homogènes » qui reposent sur des propriétés qui leur sont spécifiques. Pour l'archéologue, une couche homogène est définie par son mode de constitution. Il dispose de la fouille pour pouvoir identifier ces zones homogènes et suit les principes de la stratigraphie

développés par E. Harris (HARRIS 1979a ; HARRIS 1979b) et les géologues : superposition, horizontalité, continuité et succession.

L'examen et l'enregistrement de la stratification se fait par l'intermédiaire de la description interprétative d'**Unités Stratigraphiques (US)\***, zones homogènes, variables en épaisseur et en étendue. La description-interprétation des US évoquée ici est celle mise en pratique par le Laboratoire Archéologie et Territoires à Tours (LAT).

L'US est considérée comme un élément autonome, distinct de ce qui l'entoure. Elle est intégrée dans des ensembles spatiaux (Sépulture, Fait, Mur, Structure) et temporels (Séquence, Ensemble, Phase, etc...) (CNAU 1987 ; CNAU 1988). Une US est définie par sa base dans laquelle sont inclus des constituants d'origine anthropique et/ou naturelle. La base, perceptible à l'œil, constitue la matrice sédimentaire de la couche et correspond au constituant dominant de la couche (par ex : limoneux, sableux, etc...). Une US peut être le résultat d'un événement ou de processus spontanés ou systématiques. Elle peut aussi s'être constituée en fonction de l'usage qui en a été fait et peut également résulter de facteurs post-dépositionnels. La texture de la base dépend de l'homogénéisation des constituants.

L'US est le témoin soit d'une activité, d'un usage particulier ou un événement naturel (interprétation) : « l'occupation ou l'usage d'un espace intérieur ou extérieur conduit à la formation de niveaux de sol par accumulation, accrétion d'éléments de provenances diverses constituant un ensemble stratigraphique plus ou moins homogènes » (BREYSSE *et al.* 2002 : 3-4). Les activités humaines sont fonctionnellement liées à un lieu et à un moment donné que l'on peut plus ou moins reconnaître (leur présentation détaillée sera faite dans la partie 1-4-4-). De ce fait, chaque US s'intègre dans un contexte fonctionnel qui la définit ou qu'elle contribue à définir (phase de construction, de démolition, etc...). Dans la pratique, plusieurs US sont réunies en **séquences** composant à leur tour des **agrégations** (Fig. 4). Ces regroupements sont à la fois fonctionnels et spatiaux. En outre, les agrégations équivalentes chronologiquement sont réunies par **phase**, à l'échelle du site. Ces phases prennent place dans des **périodes** qui correspondent aux contextes historiques dans lesquels les US se forment (un même bâtiment peut présenter plusieurs phases de construction). Ainsi, il convient de préciser le niveau d'analyse lors de l'interprétation de la stratigraphie. Si par exemple, on découvre un remblai lié à une construction en contexte intérieur, il faut enregistrer l'information utile selon le niveau d'interprétation choisi.

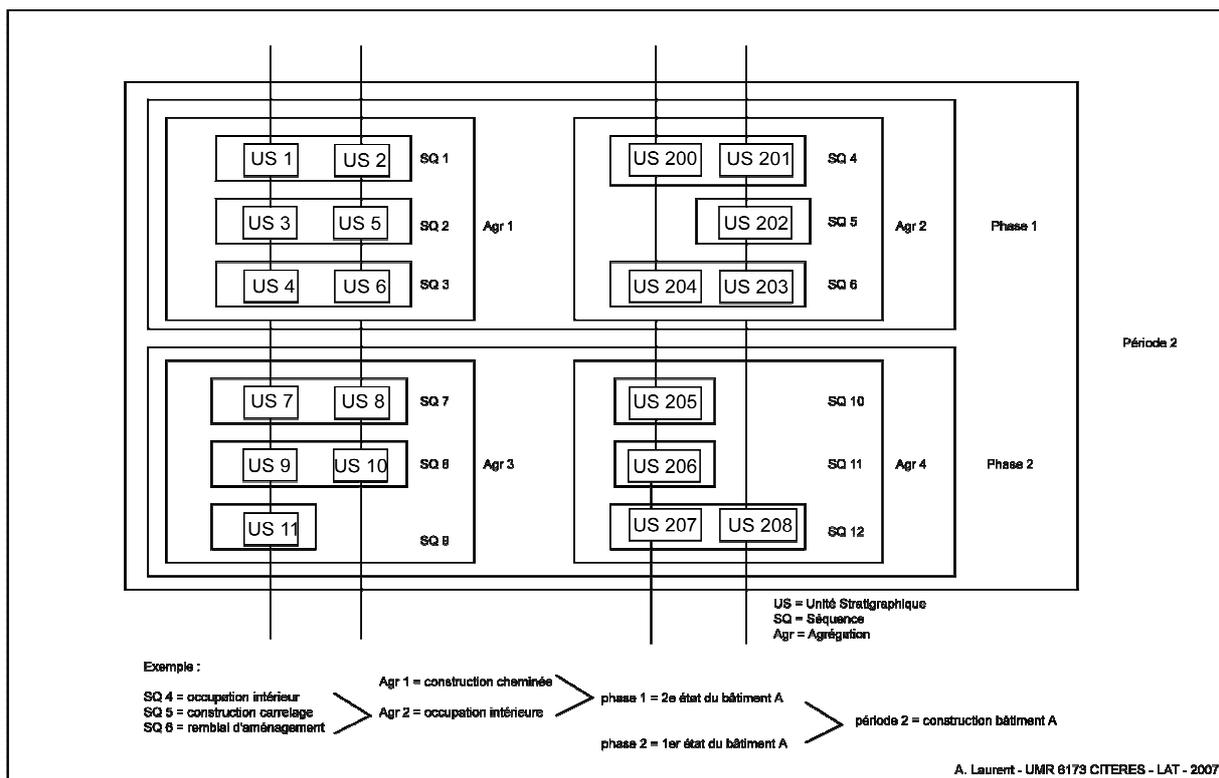


Fig. 4 – Schéma théorique d'un diagramme stratigraphique et les différents termes d'enregistrements

### 1-4-3- Les caractéristiques du sol urbain vu par le géotechnicien

La vision du géotechnicien du sol urbain est employée ici pour compléter celle de l'archéologue sur la notion de l'hétérogénéité. Le but est d'utiliser une technique employée traditionnellement en géotechnique (pénétrömètre dynamique léger) pour mesurer la compacité des couches archéologiques. Il s'agit de répondre à un double objectif, celui de la reconnaissance et de la caractérisation du dépôt archéologique. Cette technique originale sera présentée dans le chapitre suivant. Exposons en premier lieu les principes généraux de la géotechnique.

Le domaine d'étude de la géotechnique se limite à la tranche superficielle de la lithosphère (CORDARY 1994; PHILIPPONAT, HUBERT : 3). L'un des buts de la géotechnique est de mesurer le comportement d'un massif de sol soumis à différentes sollicitations et de vérifier que sa stabilité est assurée (PHILIPPONAT, HUBERT : 101). Un des objets d'étude est l'analyse des propriétés des sols et des roches en fonction des projets de constructions d'ouvrages.

Cette discipline prend ses origines à partir du 18<sup>e</sup> s., pour l'usage militaire et l'usage du génie civil, puis est développée au 19<sup>e</sup> s., à des fins hygiénistes : le sol urbain est alors considéré comme une source de risque (BARLES, GUILLERME 2003 : 38-51). On met ensuite en évidence son

pouvoir filtrant lors de l'apparition des réseaux d'assainissement qui, en fait, déplacent les problèmes à la sortie des villes.

La reconnaissance et l'identification des sols sont les enjeux usuels du géotechnicien. La caractérisation des sols se fait entre autres à l'aide d'analyses granulométriques et de mesures de la teneur en eau (porosité), de la densité et de la perméabilité des sols (HABIB 1978 : 187-191). Ces critères conditionnent la compacité d'un sol.

- *Définition du sol urbain par le géotechnicien*

Les géotechniciens considèrent le sol urbain comme étant un remblai déposé sur le sol naturel. Le sol urbain fait l'objet d'expertises par le génie civil pour les aménagements urbains. En effet, il est nécessaire d'évaluer la capacité d'un terrain à supporter la construction d'un ouvrage et de prendre connaissance du risque qu'il peut engendrer (DELAGE 1999 : 216-218 ; BREYSSE, KASTNER 2003 : 23-24). Pour le mécanicien du sol, le sol urbain est indubitablement un milieu hétérogène (BREYSSE, KASTNER *dir.* 2003).

La question est alors de savoir si les sols d'un site donné ont des propriétés variables d'un point à l'autre, et dans ce cas, s'il est utile d'en tenir compte dans les calculs (MAGNAN 1982 : 17). Enfin, aucune approche spécifique n'a été développée sur les propriétés géotechniques des sols urbains.

- *Les méthodes pour l'analyse de l'hétérogénéité du sol urbain*

Tout comme l'archéologue, le géotechnicien, pour analyser les propriétés mécaniques du sol urbain, doit identifier des zones homogènes du sous-sol.

Pour le géotechnicien, la couche homogène se distingue des couches voisines par un contraste en termes de propriétés physiques et mécaniques (nature minéralogique, granulométrie, teneur en eau, densité, résistance) (BREYSSE *et al.* 2002 : 5). La prospection géophysique et la prospection mécanique (pénétromètre, pressiomètre) mesurent ces caractères physiques et mécaniques (BREYSSE 1999 : 165-169 ; DENIS, MARTINAUD 2003). Les données mesurées peuvent être traitées par des outils de **géostatistique\*** qui permettent de quantifier la variabilité spatiale des propriétés du sol et de détecter des tranches homogènes du sous-sol (DABAS 1999 ; DE FOUQUET 2006 ; DELAGE 1999 ; MAGNAN 1982).

Les résultats obtenus ont une valeur informative pour l'archéologue sur la constitution lithologique du dépôt archéologique à partir de ses propriétés mécaniques. La thèse vise à compléter la vision de l'archéologue sur l'hétérogénéité du sol urbain. Concrètement, il s'agit d'utiliser une nouvelle technique, peu coûteuse et non destructrice (pénétrömètre dynamique léger) pour la reconnaissance (distinction du dépôt archéologique et des niveaux naturels) et la caractérisation fonctionnelle des couches archéologiques. C'est dans ce sens que la typologie fonctionnelle du dépôt archéologique sera étudiée.

#### 1-4-4- Typologie fonctionnelle du dépôt archéologique

Il a été choisi de travailler à partir d'une typologie fonctionnelle des couches archéologiques élaborée selon les principes de la stratigraphie et selon l'échelle d'analyse sélectionnée. La typologie a été établie en étroite collaboration avec M. Fondrillon, dont la thèse porte sur la caractérisation archéologique du sol urbain et l'interprétation fonctionnelle des terres noires entre Antiquité et Moyen-Age à Tours (FONDRILLON en cours).

Cette typologie est basée sur les modes d'enregistrements stratigraphiques suivis au LAT, sur notre propre expérience ainsi que sur celles d'archéologues<sup>13</sup> qui ont répondu à un questionnaire établi par M. Fondrillon. Elle permet d'appréhender différents points :

- la nature et l'origine des matériaux qui sont présents dans les couches archéologiques,
- la manifestation de ces couches dans la stratification (texture, structure),
- la modification qu'engendre leur formation in situ (action sur les couches antérieures, transformation post-dépositionnelle).

##### • *Définition de l'échelle d'analyse*

Il est indispensable de déterminer l'échelle d'analyse à laquelle étudier le corpus de données élaboré. Par tradition, les archéologues enregistrent les US par type : occupation extérieure, occupation intérieure, construction, destruction, remblai, abandon et naturel (LES CLEFS DU SOL 1976). Toutefois, ceci est jugé insatisfaisant pour beaucoup de cas.

En effet, le problème est que, suivant les conditions d'étude (fouille programmée ou préventive), le type d'une US correspond soit au contexte historique du site (échelle de la phase ou de la période), soit à l'activité humaine qui a conduit à la production de la couche. Ainsi, comme évoqué plus haut (1-4-2), une US correspondant à un remblai en contexte extérieur sera enregistrée « occupation extérieure » à l'échelle globale du site, ou bien « remblai » à l'échelle de

---

<sup>13</sup> F. Champagne, J.-P. Chimier, N. Fouillet et A.-M. Jouquand (I.N.R.A.P Tours) ainsi que A. Ferdière et E. Marot (L.A.T. )

l'activité humaine stricte. Sur le terrain, il est parfois difficile de trancher sur l'enregistrement final d'une US selon le niveau d'information que l'on veut retenir. On peut, par exemple, observer une couche de remblai constituée de matériaux de destruction afin de niveler le terrain lors d'une phase de construction d'un bâtiment. Ce type de couche nous renseigne à la fois sur l'origine des constituants, l'activité humaine et le contexte dans lequel l'US a été produite.

L'interprétation d'une couche est attribuée à sa dernière utilisation

Ainsi, la typologie fonctionnelle est constituée de deux niveaux d'interprétation archéologique : celles des « type fonctionnel » et celles des « sous-types fonctionnels ». Il est important ici de dissocier ces sous-types car si on peut les reconnaître sur le terrain, il est évident qu'ils diffèrent selon leur composition, leur texture, leur structure voire leur couleur.

La grille d'analyse est basée sur des postulats qualitatifs liés à l'expérience archéologique de terrain complétée par les critères étudiés par les géotechniciens : **l'épaisseur, la compacité et la variabilité interne** des couches archéologiques. Le postulat est que la compacité est liée à la structure, à la texture de la couche et à la taille des constituants. Par exemple, on considère qu'une couche aérée et fine sans éléments grossiers est définie par une compacité plutôt faible. La variabilité interne traduit le caractère hétérogène de ces couches en terme de constitution. On postule que la diversité en constituants d'une couche définit son degré d'hétérogénéité.

Enfin, cette grille a été adaptée aux sites qui ont été étudiés à Tours et à Lyon.

- *Typologie fonctionnelle*

Le tableau qui suit présente la typologie (Fig. 5).

Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel
Occupation extérieure	Circulation (cour, voirie)
	Mise en culture (jardins, champs)
	Pacage, pâturage
	Friche / terrain vague
Occupation intérieure	Occupation intérieure (circulation, piétinement, rejets domestiques dans un bâtiment ou sous-abris)
	Foyer (résidus de foyer en place)
Construction	Construction en pierre (mur, plot, palissade)
	Construction en matériau périssable
	Sol construit (Carrelage, mosaïque, dallage, béton de mortier ou d'argile)
	Terre battue
	Empierrement (y compris cailloutis)
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse
	Mise en œuvre (déchets de taille, préparation matériaux, radier, aire de gâchage)
Destruction	Destruction in situ
	Démantèlement / Récupération
	Dégradation lente / décomposition
Remblaiement/comblement d'aménagement	Obstruction
	Nivellement / aménagement (assainissement)
Remblaiement/comblement d'usage	Comblement usage (fosse)
	Dépotoir (tas)
Occupation indéterminée	Occupation indéterminée (impossible de distinguer l'int. de l'ext.)
Naturel anthropisé	Alluvions* fines anthropisées (dépotoir)
	Alluvions grossières anthropisées (dépotoir)
	Colluvions fines anthropisées
	Colluvions grossières anthropisées
Naturel	Alluvions fines (sable fin, limon, argile)
	Alluvions grossières (sable grossiers, galets)
	Colluvions fines
	Colluvions grossières
	Dépôt éolien
	Substrat* rocheux (calcaire, marne, tuffeau)

Fig. 5 – Typologie fonctionnelle des couches archéologiques

#### - Occupation extérieure

Parmi les couches d'occupation extérieure, on distingue :

- les couches de **circulation**. Elles concernent les niveaux de cour et de voirie. Ce sont les niveaux liés à l'usage extérieur sur un support souvent construit (empierrement, dallage, cailloutis). Leurs caractéristiques sont très proches des niveaux d'occupation intérieure : épaisseur moyenne (entre 5 et 20 cm), structure compactée, texture fine, incorporation et forte fragmentation des matériaux de nature variable par le piétinement des hommes et des animaux, redéposition limitée. Le postulat est que leur variabilité interne est faible ;

- les couches de **mise en culture**. Elles englobent les niveaux de jardins et de champs (pièces de culture) dont le sol a été brassé. Leurs traits communs sont une épaisseur de stratification généralement importante (supérieure à 30 cm), une structure plutôt aérée, une texture assez grossière et une absence de stratification interne, conséquentes du brassage par le bêchage régulier du sol et la bioturbation. Elles sont constituées d'apports en éléments domestiques, sous la forme de dépôts secondaires dont les matériaux sont issus des habitations à proximité, mélangés à des matériaux de construction des phases de mise en œuvre et de démantèlement antérieures. Dans le cas des champs, l'apport d'amendements, principalement organiques, leur donne une couleur plutôt sombre (brun à noir). Le brassage provoque une fragmentation et une redéposition des matériaux plutôt élevée : la variabilité interne est moyenne;

- les couches de **mise en herbe**. Y sont associés les niveaux de pacage et de pâturage qui répondent selon nous aux mêmes mécanismes de formation. Ces couches ont supporté de la végétation et sont donc caractérisées par une activité biologique importante. Elles peuvent aussi, dans le cas du pacage, avoir supporté le passage régulier des animaux et des hommes, qui leur confère ainsi une structure moins aérée que les niveaux de mise en culture. Leur épaisseur est assez importante (supérieure à 20 cm). Ces couches sont globalement pauvres en mobilier archéologique et d'une texture plutôt fine. Les matériaux y sont relativement fragmentés et redéposés ;

- les niveaux en **friche** ou de **terrain vague**. Ces dépôts sont caractérisés par une occupation humaine faible, voire inexistante. Ces couches sont produites par l'accumulation de matière organique (végétale) voire d'apports éoliens et ont subi des transformations par l'activité biologique. On peut y observer aussi des matériaux issus de l'érosion de matières présentes dans les murs et du ruissellement des sols. Leur épaisseur est donc moyenne (5 à 20 cm), leur structure est variable et leur texture est plutôt fine. La variabilité interne est faible.

#### - Occupation intérieure

Parmi les couches d'occupation intérieure, on observe :

- les couches d'**occupation intérieure** liées à l'usage du sol dans un bâtiment. Elles se forment principalement par apports de déchets liés à l'occupation de l'espace (*in situ* donc dépôts primaires), par dépôts de sédiments laissés par le passage répété des hommes (boue, poussières sous les chaussures) et par la perte d'objets en tout genre. Leur texture est donc généralement fine (limons et sables fins). Elles sont peu épaisses (inférieures à 3 cm) et leur structure est compactée (balayage et piétinement). Elles contiennent des matériaux fortement fragmentés. Toutefois, le taux de redéposition y est théoriquement limité. La nature des constituants dépend de l'usage de la

pièce, qu'on se situe par exemple dans une cuisine (rejets liés à la préparation des aliments, couleur foncée liée au taux de matière organique) ou dans une salle de « réception » (perte d'objets mobiliers, part importante de matière minérale) ;

- les couches de **foyers** dont il nous reste des résidus en place. Elles sont constituées de cendres, de charbons de bois et de déchets domestiques. L'épaisseur, la compacité et la variabilité interne de ces niveaux sont faibles.

#### - Construction

Parmi les couches de construction, on différencie :

- les couches de **construction en pierre**. Elles correspondent aux maçonneries en pierre souvent liées au mortier (murs, plots, palissades). La compacité et la variabilité interne sont très fortes ;

- les couches de **construction en matériau périssable**. Elles sont en terre ou en bois. La structure est moins indurée et l'épaisseur est plus variable que les couches de construction en pierre car elle dépend des conditions de conservation. Leur variabilité interne est plutôt faible ;

- les couches de **sol construit**. Ce sont les supports de circulation ou d'occupation intérieure. Ces niveaux, de faible épaisseur, sont très indurés et constitués de terre crue ou cuite (carrelage, mosaïque), de pierre (dallage) ou de mortier (« béton ») ;

- les couches de **terre battue**. Ces couches ont été aménagées par l'apport de terre que l'on bat sur place. Elles sont constituées d'une matrice sédimentaire fine (argileuse et limoneuse) compacte et pure, c'est-à-dire relativement peu fournie en mobilier archéologique. Elles sont produites dans un contexte d'occupation intérieure et sont de faible épaisseur (inférieure à 5 cm). Il est difficile de les distinguer de leur usage (piétinement et circulation intègrent les éléments de l'usage au support) ;

- les couches d'**empierrement**. On les rencontre dans les espaces extérieurs. Ce sont des recharges de graviers/cailloux<sup>14</sup> (constituants de taille comprise entre 0,2 et 5cm) et de pierres (taille supérieure à 5 cm) qui servent de support à la circulation. Il s'agit la plupart du temps de matériaux de construction (roches, terre cuite architecturale, mortier). Ces niveaux indurés, épais entre 5 et 20 cm sont le support de niveaux de circulation. Toutefois, il est difficile de les distinguer car le piétinement et les recharges successives incorporent des éléments liés à l'usage de la circulation au sein de l'élément construit ;

- les niveaux dont il nous reste **les négatifs** : tranchée de récupération, trou de poteau, fosse ;

---

<sup>14</sup> Appelées aussi « cailloutis » pour cette fraction de constituants.

- les couches de **mise en œuvre de matériaux**. Elles correspondent aux déchets de taille de divers éléments et à la préparation de matériaux en vue de construire (radier de sol construit ou de mur, aire de gâchage). Souvent, on observe dans ces niveaux des objets liés à la présence des ouvriers. La variabilité interne dépend donc des matériaux sélectionnés. Ce sont des niveaux plutôt compactés, d'épaisseur moyenne (5 à 20 cm).

#### - Destruction

Parmi les niveaux de destruction, on observe :

- les couches de **destruction *in situ***. Elles sont produites à l'occasion de la destruction massive et brutale d'un bâtiment (volontaire, incendie). En théorie, elles contiennent exclusivement des matériaux de construction, peu fragmentés. Ces niveaux sont indurés, plutôt épais (supérieur à 10 cm) et très hétérogènes ;

- les couches de **récupération/démantèlement**. Ces niveaux se distinguent des précédents par la destruction volontaire de structures construites en vue de trier et de récupérer certains composants. Ils sont constitués des restes issus du démantèlement et non réutilisables (mortier, enduits, éclats de roches, de terres cuites architecturales ou encore d'ardoises, donc généralement fragmentés). Ils ont les mêmes caractéristiques que ceux de la destruction *in situ* ;

- les couches de **dégradation lente/décomposition** de matériaux. Elles se forment par la déstructuration lente de matériaux de construction. Elles sont liées à l'abandon d'une structure, qu'il s'agisse d'un bâtiment maçonné ou d'une paroi en terre. Elles peuvent être remaniées par l'activité biologique si l'espace n'est pas rapidement réoccupé. Leur épaisseur est faible (5 à 10 cm) et leur structure est moyennement compactée. Elles contiennent peu de matériel domestique, excepté des constituants redéposés : la variabilité interne est faible.

#### - Remblais / comblements d'aménagement

Parmi les remblais d'aménagement, on distingue :

- les couches d'**obstruction**. Elles sont produites pour combler une structure en creux (fosses, fossés, fonds de cabane, ...) et scellent logiquement ses couches d'usage. Leur épaisseur est plutôt forte (supérieure à 10 cm). Leur constitution dépend de la couche originelle : leur compacité et leur variabilité interne sont donc variables ;

- les couches de **nivellement**. Ces remblais servent souvent à exhausser et à assainir un espace intérieur ou extérieur. Les matériaux sont également divers (sable, terre, charbons, matériaux de démolition ...). Il s'agit de dépôts secondaires qui contiennent une quantité

importante de mobilier redéposé. Elles possèdent les mêmes caractéristiques que la catégorie précédente ;

#### - Remblais / comblements liés à l'usage

Parmi les remblais d'usage, on différencie :

- les couches de **fosses-dépotoirs**. Ces structures en creux reçoivent les rejets domestiques issus des habitations dont ils dépendent ou de matériaux de destruction. Ces niveaux sont constitués d'une majorité de déchets domestiques mais selon la nature du comblement, la texture et la structure sont variables. Ils détiennent les mêmes caractéristiques que les remblais d'aménagement ;

- les couches de **dépotoirs**. Ils diffèrent des précédents par leur contexte de déposition. En effet, il s'agit de dépôts à même le sol (tas) et non plus contenus dans des structures en creux. Ils sont plus exposés aux transformations post-dépositionnelles que les ceux des fosses-dépotoirs. Leur composition est aussi très variable selon les contextes : les critères sont les mêmes que les autres catégories de remblais.

#### - Naturel anthropisé

On a distingué les niveaux naturels présentant des traces anthropiques des niveaux naturels stricts. Ces dépôts comprennent deux types (alluvions et colluvions) relevés sur les sites étudiés. On les a dissocié selon la taille de leur constituant principal, partant du postulat que la compacité augmente avec leur granulométrie :

- les **alluvions fines anthropisées**. Elles sont constituées d'argile et/ou de sables fins utilisés pour la circulation. En contexte de dépotoir en bord de berge, elles sont mêlées à des déchets domestiques ;

- les **alluvions grossières anthropisées**. La différence avec les niveaux précédents est que les constituants sont plus grossiers (sable grossiers à galets) ;

- les **colluvions fines anthropisées**. Elles comprennent les sédimentations fines formées par le transport d'éléments anthropiques sous la forme de dépôts de pente (colluvions). La composition de ces niveaux est dépendante de celle de la source sédimentaire initiale ;

- les **colluvions grossières anthropisées**. Les sédiments d'origine sont des éléments grossiers (sable grossier à galets).

On considère que l'ensemble de ces formations naturelles anthropisées ont une compacité moyenne à faible, une épaisseur variable et une variabilité interne très forte.

- Naturel

Pour ces dépôts, les agents, les mécanismes de transport et de déposition sont naturels. Il peut s'agir d'alluvions, de colluvions, de dépôts éoliens ou du substrat rocheux (roche calcaire à Tours). Ces niveaux ont les mêmes caractéristiques que les précédents sauf que l'action anthropique est absente. On retiendra donc les mêmes critères de description.

Pour finir, l'« **abandon** » a été volontairement enlevé de la typologie car il s'agit d'un contexte rarement rencontré en ville et il n'existe pas de description type puisqu'elle est associée à des contextes de destruction *in situ*, de dégradation ou de terrain vague.

Ainsi, **un des objectifs est de confronter les postulats sur la compacité, l'épaisseur et le degré d'hétérogénéité (variabilité interne) des types et sous-types fonctionnels aux données de terrain afin de valider le modèle.**

- *Postulat sur la typologie fonctionnelle du dépôt archéologique*

Un tableau récapitulatif présente les postulats retenus sur la compacité, l'épaisseur et la variabilité interne des interprétations fonctionnelles du dépôt archéologique (Fig. 6).

<u>POSTULAT</u>		<u>Légende :</u> + faible ++ moyenne +++ forte x possibilité							
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	COMPACITE	EPAISSEUR						VARIABILITE INTERNE
			<3cm	3cm<>5cm	5cm<>10cm	10cm<>20cm	20cm<>30cm	>30cm	
Occupation extérieure	Circulation (cour, voirie)	++			x	x			+
	Mise en culture (jardins, champs)	+ à ++						x	++
	Pacage, pâturage	+ à ++					x	x	++
	Friche / terrain vague	+ à ++			x	x			+
Occupation intérieure	Occupation intérieure	+ à ++	x						+
	Foyer	+	x						+
Construction	Const. en pierre	+++					x	x	+++
	Const. en matériau périssable	++		x	x	x	x	x	+
	Sol construit	+++	x	x					++
	Terre battue	+++	x	x					+
	Empierrement (y compris cailloutis)	+++			x	x			+++
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	0							0
	Mise en œuvre	++ à +++		x	x	x			++
Destruction	Destruction in situ	+++				x	x	x	+++
	Démantèlement / Récupération	+++			x	x	x	x	+++
	Dégradation lente / décomposition	++		x	x				+
Remblaiement/ Comblement d'aménagement	obstruction	+ à +++				x	x	x	+ à +++
	nivellement / aménagement	+ à +++				x	x	x	+ à +++
Remblaiement/ Comblement d'usage	comblement usage (fosse)	+ à +++				x	x	x	+ à +++
	dépotoir (tas)	+ à +++				x	x	x	+ à +++
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées (dépotoir)	++	x	x	x	x	x		+++
	alluvions grossières anthropisées (dépotoir)	+++	x	x	x	x	x		+++
	colluvions fines anthropisées	++	x	x	x	x	x	x	+++
	colluvions grossières anthropisées	+++	x	x	x	x	x	x	+++
Naturel	alluvions fines (sable fin, limon, argile)	++	x	x	x	x	x	x	+++
	alluvions grossières (sable grossiers, galets)	+++	x	x	x	x	x	x	+++
	Colluvions fines	++	x	x	x	x	x	x	+++
	colluvions grossières	+++	x	x	x	x	x	x	+++
	dépôt éolien	++	x	x	x	x	x	x	+++
	Substrat rocheux	+++	x	x	x	x	x	x	+++

Fig. 6 – Tableau des postulats sur la compacité, l'épaisseur et la variabilité interne des interprétations fonctionnelles du dépôt archéologique

## **1-5- Bilan**

L'étude consiste à considérer « la ville en soi » à travers les caractéristiques du sol urbain qui est le résultat de la production des activités humaines.

Les pratiques de l'évaluation du potentiel archéologique en Europe et particulièrement en France, permettent de renouveler des connaissances historiques des espaces urbains en montrant que la formation du volume de sol urbain est rythmée entre phases d'extension et de rétraction et en délimitant les composantes socio-spatiales qui se sont succédé dans la longue durée. Il est donc nécessaire, d'une part, d'adapter des méthodes et des techniques aux objectifs de l'évaluation et aux échelles d'analyse choisies (échelle de la ville, échelle du site), et d'autre part, de sélectionner les données utiles pour restituer ces composantes.

Il a été choisi de répondre aux objectifs de l'évaluation complète d'une ville en couplant les approches de l'archéologue et du géotechnicien sur l'analyse du sol urbain. L'étude consiste à distinguer le dépôt archéologique du niveau naturel dans un premier temps et à le découper en couches dites homogènes selon les points de vue dans un second temps. Il s'agit d'utiliser une technique originale qui mesure la compacité du sol et de confronter les résultats obtenus aux postulats formulés pour les interprétations fonctionnelles des couches archéologiques.

## **Chapitre 2- Présentation des méthodes et des techniques pour l'analyse du volume de sol urbain**

Ce second chapitre est consacré à la présentation des méthodes et des techniques utiles pour étudier le volume de sol urbain. Elle consiste à mettre en place une grille d'analyse qui pourrait être adaptée à toutes les villes historiques.

Pour pouvoir modéliser le sol urbain, il faut d'abord sélectionner des informations pertinentes adaptées aux échelles d'analyse imposées à ce type d'étude, celle de la ville et celle du site. Ces informations sont issues de différentes techniques d'investigations mais aussi d'études documentaires. C'est donc ce premier point qui sera abordé. Ensuite, je reviendrai sur le problème de l'échelle d'analyse qui induit la question de la représentativité des données. Les interactions entre l'échelle de la ville et celle du site sont perçues à travers une échelle intermédiaire, celle du transect. Enfin, je ferai le point sur l'aspect technique de la mise en œuvre des données en présentant les outils employés ici, les Systèmes d'Informations Géographiques et l'élaboration de modèle adapté aux objectifs de l'évaluation.

### **2-1- Les techniques d'évaluation du potentiel archéologique en milieu urbain**

Il existe plusieurs techniques d'investigation du sous-sol. Certaines sont mises en oeuvre directement par les archéologues comme les sondages à la pelle-mécanique ; d'autres sont réalisées par des géotechniciens et/ou des géologues (sondages géotechniques) et des géophysiciens (prospection géophysique). Dans ces dernier cas, il est possible pour les archéologues d'en exploiter les résultats.

Le souci est d'utiliser des techniques qui s'adaptent à la fois aux contraintes urbaines et aux objectifs de l'évaluation. Il s'agit, dans la plupart des situations, d'étudier le dépôt archéologique d'un site sur une faible surface mais une profondeur importante en tenant compte du problème de la sécurité des hommes et du bâti environnant, et de celui des réseaux enterrés. Enfin, l'idéal est d'avoir recours à des techniques peu ou pas destructrices afin de préserver les couches et les structures archéologiques. C'est dans cette optique qu'une nouvelle méthode de prospection géotechnique a été testée. Il s'agit de l'utilisation d'un pénétromètre dynamique léger (PANDA). L'objectif est de poursuivre les expériences mises au point dans des travaux précédents (LAURENT 2002 ; LAURENT 2003).

L'ensemble des techniques avait été présenté en DEA (LAURENT 2003 : 19-26). Aussi, j'ai choisi de reprendre leur présentation en l'alimentant de nouveaux éléments et de références bibliographiques.

### 2-1-1- Les sondages archéologiques

Les sondages à la pelle mécanique (et parfois manuels) en milieu urbain sont toujours destructeurs et font rarement l'objet de fouilles fines. On utilise ce type de sondage de façon systématique dans le cas de diagnostic et de fouilles préventives afin de détecter des vestiges, de caractériser la nature et la datation des occupations, de déterminer leur emprise et leur état de conservation (CNAU 2004a). Un des objectifs est d'atteindre le niveau naturel afin de mesurer l'épaisseur des dépôts stratifiés.

Deux types de sondages existent, le puits et la tranchée. Le puits est la technique la plus utilisée car elle évite une gestion de volumes de terres considérables, mais elle pose problème car il est difficile d'extrapoler les observations recueillies à l'échelle du site tant la variabilité potentielle des terrains est élevée (SCHWIEN 2003 : 40). Un autre problème est celui de la sécurité des personnes et du bâti environnant, puisque les parois du puits sont verticales. Pour minimiser le danger, les archéologues peuvent blinder les parois et doivent travailler par palier tous les 1,20 m. On en déduit que pour une certaine profondeur à atteindre, le trou d'ouverture doit être conséquent et donc très destructeur. Le puits ne pourra alors être effectué que sur des terrains disponibles possédant une surface importante, souvent situés en périphérie. La tranchée, elle, est difficilement réalisable en milieu urbain pour les raisons évoquées précédemment.

On peut regretter l'absence de réelles discussions sur l'emploi des sondages traditionnels en ville, hormis la table ronde de 2003 sur les diagnostics en milieu urbain (CNAU 2004a). Et pourtant, on peut s'interroger sur l'intérêt de ce type d'intervention en ville. En effet, sur une petite surface disponible, un sondage archéologique suffit pour détruire la totalité de la stratification, et on ne se contente alors que des observations de coupe. Sur une grande surface, les informations issues d'un sondage à la pelle mécanique sont jugées satisfaisantes pour orienter la fouille de niveaux spécifiques : ce sont souvent les niveaux du Haut Moyen Age (Terres Noires) qui sont évacués sans être étudiés en faveur des niveaux antiques.

Enfin, la réflexion sur la probabilité de détecter un site à l'aide des tranchées est faite plutôt à l'échelle des grands tracés (MARMET, BEST, TABBAGH 2002) ou bien, à l'échelle de zones à construire, donc dépourvues de contraintes immobilières (BRUN, MARCIGNY, VANMOERKERKE 2006b).

## 2-1-2- Les sondages géologiques et géotechniques

Dans la plupart des chantiers urbains, les aménageurs exécutent des sondages géologiques et géotechniques (FONQUERNIE 1989; COLLOQUE ENPC 1994; COLLOQUE 2000) pour décider du type de fondation en fonction de l'épaisseur et la qualité (nature et compacité) des niveaux archéologiques, des « remblais », et des niveaux naturels.

Pour la reconnaissance des sols, plusieurs méthodes sont utilisées (BELLAC 2005 ; FONQUERNIE 1989) :

- des sondages semi-destructifs au **carottier** ou à la **tarière** utilisés dans les matériaux meubles. Le carottier remonte des sections de sédiments. La tarière est une tige hélicoïdale métallique qui remonte les matériaux, appelés aussi « cuttings ». Comme les carottes, ces matériaux seront également étudiés en laboratoire ;

- des sondages destructifs par **rotopercussion**. Il s'agit d'utiliser un train de tiges rigides et creuses, qui assurent un transfert de rotation et de percussion créé par la machine, et le passage de fluides. Les fluides permettent la remontée des matériaux qui sont sous forme de boues. Les observations sont alors beaucoup plus approximatives que pour les premières. Il est intéressant alors d'utiliser les mesures des temps d'avancement des forages en fonction de la profondeur afin de détecter les changements de dureté du sol (MOUSSOUTEGUY 2002)<sup>15</sup>. Notons que l'on passe à la rotopercussion notamment lorsqu'on atteint le substratum ;

- des sondages destructifs à la main ou à la pelle-mécanique qui sont peu profonds. Ils sont utilisés pour contrôler l'état des fondations.

Beaucoup de sondages sont réalisés avec ces différentes méthodes mais la liste ici n'est pas exhaustive.

Pour l'étude des propriétés mécaniques du sol, des outils sont mis en œuvre sur place (FONQUERNIE 1989) :

- le **pressiomètre** est un moyen de mesure des propriétés des sols (raideur, pression limite) consistant à introduire une sonde gonflable dans un forage préalable ;

- le **pénétromètre dynamique** permet de mesurer la résistance à l'enfoncement des sols. Il s'agit d'enfoncer une tige par battage automatique ;

- le **pénétromètre statique** est une amélioration du pénétromètre dynamique. L'enfoncement se fait par pression, à l'aide d'un vérin. La résistance à l'enfoncement est la somme de la résistance de pointe et du frottement latéral du terrain sur les tiges ;

---

<sup>15</sup> On citera le procédé ENPASOL de la société Soletanche Bachy qui permet l'acquisition et le traitement en temps réel des paramètres de forage.

- **l'essai statique de chargement** mesure la déformabilité et l'effort de rupture du sol. Il est utilisé pour dimensionner des fondations. Cette technique est peu utilisée car elle est nécessite des moyens lourds.

Ces études géotechniques peuvent être complétées par des analyses en laboratoire.

Les rapports géotechniques sont accessibles aux archéologues mais leur consultation doit être faite avec précaution. D'une part, il est possible d'avoir des informations concernant l'épaisseur du dépôt archéologique à condition que le géotechnicien l'ait bien distingué des niveaux naturels. En effet, dans beaucoup de cas, les spécialistes prêtent plus d'attention aux formations profondes qui assureront la stabilité des fondations. Il arrive souvent qu'ils ne fassent pas de différenciation entre le « remblai » et les sols géologiques instables sous-jacents. D'autre part, il n'existe pas de descriptions normalisées des formations du sous-sol. Il faut alors avoir des connaissances géologiques et géotechniques préalables afin de comparer les données.

L'utilisation des sondages carottés dans des contextes archéologiques n'est pas récente. Aux Etats-Unis, de 1935 à 1955, des études associant des archéologues aux géologues, ont été faites pour étudier les relations entre les dépôts archéologiques et les dépôts sédimentaires du Mississippi (PRICE, HUNTER, MCMICHAEL 1964, STEIN 1986). Mais il s'agissait surtout de dater ces niveaux. Des chronologies ont même été établies pour la céramique à partir de la datation radiocarbone des échantillons.

A partir de 1955, sous l'influence des études écologiques, les sondages carottés sont utilisés pour l'étude environnementale des sites et pour des analyses biologiques et chimiques. A partir des années 1960, l'essor des chantiers de construction favorise la multiplication des sondages géologiques et géotechniques qui sont mis à la disposition des archéologues. Il est alors possible de faire des estimations sur l'étendue et l'épaisseur des dépôts archéologiques. C'est aussi à ce moment que les archéologues se concentrent sur la stratigraphie et les processus de formation du sol (chapitre 1). C'est dans cet optique qu'à partir des années 1980, des chercheurs anglais, dont ceux de l'actuel *Museum of London Archaeological Service*, se sont équipés de carottiers pour étudier leurs sites (CANTI, MEDDENS 1998) et ont réfléchi à la stratégie d'intervention avec la collaboration de géologues (BATES *et al.* 2000). Les auteurs soulignent les problèmes liés d'une part, à l'échantillonnage (maillage et quantité de sondages) et d'autre part, au caractère technique du carottage car les sédiments sont compactés lors de la percussion et il faut alors apporter une correction sur leur position stratigraphique.

En milieu urbain, la question est posée quand à l'utilisation des sondages carottés pour l'évaluation d'un site. Ils sont moins destructifs qu'une pelle mécanique mais n'apportent pas le même degré d'information qu'un relevé de section (CANTI, MEDDENS 1998 : 97). De plus, même s'ils sont intégrés dans le budget de recherche en archéologie préventive, ils restent assez coûteux (SCHWIEN 2003 : 41). L'idéal serait d'associer un archéologue et un géologue au géotechnicien pour relever et interpréter les échantillons (CNAU 2004a).

Enfin, cette source de données est valorisée dans certaines villes comme Paris (USSEGLIO-POLATERA 1980), Lyon (BOITTE, SOUYAT 1999 ; THIERRY 2003), Tours (BLIN 1998 ; TABERLY 1999 ; MARLET 2000), Bordeaux (BREYSSE *et al.* 2005) et Mexico (AUVINET, JUAREZ, VALDEZ 2005) pour élaborer des coupes représentatives et modéliser en 3D les formations superficielles. Les bases de données ainsi construites peuvent être très utiles aux archéologues.

### 2-1-3- Les prospections géophysiques

Certaines méthodes géophysiques ont fait leurs preuves en milieu urbain. La géophysique est une science qui étudie les propriétés physiques de la terre. Les méthodes géophysiques de surface sont dites volumiques parce qu'elles fournissent une mesure qui informe sur la nature d'un certain volume du terrain sous la surface (MARTINAUD 2004 : 97). Leurs principes et leurs applications sont présentés dans l'article d'A. Hesse (HESSE 2002) et dans l'ouvrage « La prospection » (DABAS *et al.* 2006).

Ce type de prospection est non-destructif et permet de reconstituer l'organisation spatiale d'un site et de révéler les structures du sol à partir de mesures ou d'images numériques (DABAS *et al.* 2006 : 167-168). En milieu urbain, les prospections géophysiques et mécaniques sont utilisées pour être, la plupart du temps, complétées par la fouille archéologique (ANDERSON, BRANDT, ORBONS 1994). Elles sont employées dans divers domaines d'investigation du sous-sol (applications pétrolières, minières ou de génie civil) (HESSE 1978: 1). La prospection électrique a été développée dans les années 1940 et la prospection magnétique dans les années 1950 (HESSE 1978: 3-5). Elles ont été mises en pratique pour la reconnaissance archéologique vers 1960 et ont alors engendré la création de laboratoires et de publications telles que la *Revue d'Archéométrie*, *Archaeological Prospection*.

La prospection géophysique en milieu urbain pose plusieurs problèmes qui sont liés à l'hétérogénéité du sous-sol et l'impossibilité d'utiliser certaines méthodes de prospection (DABAS, HESSE, TABBAGH 1995: 213-214 ; PANISSOD, DABAS 1999 : 223-225 ; DENIS, MARTINAUD 2003) :

- la surface du sol ne peut être directement touchée : sur dalles, bitumes, bétons...la méthode électrique n'est pas directement applicable parce qu'ils sont peu conducteurs ;

- l'environnement électromagnétique est perturbé : présence d'émetteurs actifs ou plus simplement de masses métalliques où des courants induits créent des champs secondaires. Les méthodes électromagnétiques, magnétiques et sismiques sont alors d'emploi délicat ;

- le volume dans lequel se fait la prospection étant généralement limité, on pourra avoir par exemple un effet de volumes complexes à des distances très faibles du point de mesure dans la correction topographique d'une prospection gravimétrique ;

- les surfaces prospectées, généralement petites, rendent l'interprétation d'autant moins fiable qu'elle porte sur un assemblage de cartes morcelées.

Néanmoins, d'autres méthodes semblent prometteuses pour la détection en milieu urbain (DABAS, HESSE, TABBAGH 1995 : 215-216; PANISSOD, DABAS 1999 : 225-230 ; TABBAGH 2002) :

- la prospection radar est une méthode rapide de mise en œuvre mais coûteuse. Elle permet de connaître l'extension verticale des structures. Il est possible d'obtenir une représentation en 3D des structures détectées comme sur un site en Italie (LEUCCI, NEGRI 2006) ;

- la méthode électrostatique permet d'éviter l'injection directe du courant dans le sol, contrairement à la méthode électrique. On obtient une image horizontale correspondant à la répartition latérale des structures présentes jusqu'à une certaine profondeur, dite d'investigation.

Des tests ont permis valider les résultats obtenus à partir de ces deux méthodes.

Les méthodes géophysiques sont parfois couplées à des méthodes dites ponctuelles comme la tarière à main, le pénétromètre dynamique ou la pelle-bêche qui sont utiles pour évaluer l'épaisseur du dépôt archéologique (MARTINAUD *et al.* 1999 : 44). Notons que des tests ont été réalisés dans des parcs et jardins (DAVID, TALIN D'EYZAC 2001), dans des milieux alluviaux (BATES, BATES 2000) ou tout simplement, dans un milieu non anthropisé afin de mesurer la corrélation entre les méthodes géophysiques et les méthodes géotechniques (BESSON *et al.* 2003).

#### 2-1-4- Une nouvelle méthode de prospection géotechnique en milieu urbain : l'utilisation du pénétromètre de type PANDA

L'application du Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur (PANDA) en milieu archéologique urbain a été réalisée dans le cadre de collaborations dans le GIS Sol urbain, à l'occasion de ma maîtrise et de mon DEA (LAURENT 2002 ; LAURENT 2003) sur le site de la fouille en cours de Saint-Julien à Tours. Cette collaboration a donné lieu à

une première publication dans la Revue française de Géotechnique (BREYSSE *et al.* 2002). Un deuxième article est paru à l'occasion d'un colloque d'archéométrie (Bordeaux, Avril 2003) dans la Revue d'Archéométrie (GALINIÉ *et al.* 2003b). Enfin, j'ai produit un encart lors de la réédition de l'ouvrage « La prospection » des « Collections Archéologiques » dirigée par A. Ferdière (LAURENT 2006). Je reprendrai donc le contenu de ces contributions pour présenter la méthode de travail, les premiers résultats obtenus et les perspectives d'étude.

- *Objectifs*

L'étude menée depuis 2000 tente de répondre à une double question :

1. Peut-on évaluer globalement l'épaisseur du dépôt archéologique, c'est-à-dire, peut-on distinguer le niveau anthropique du niveau naturel, ou encore préciser la hauteur du volume du sol urbain en un point donné ?
2. Peut-on ensuite caractériser finement les constituants de ce dépôt archéologique, ou subdiviser la hauteur totale en tranches distinctes ?

- *Principes du PANDA*

Le PANDA (Sol Solution©) est un type de pénétromètre dynamique léger qui offre les avantages d'être non destructif, rapide, peu onéreux, léger et adaptable à tout terrain. C'est un outil utilisé dans le Génie Civil pour contrôler le compactage des matériaux composant les ouvrages (chaussées, trottoirs, talus....) et pour évaluer la résistance d'un terrain avant construction.

Le principe du PANDA est de mesurer la résistance de pointe  $Q_d$ , en MPa (MégaPascal), sous l'effet de l'enfoncement d'une tige en acier de 50 cm. La tige est enfoncée au moyen de coups de marteau. Ainsi, le pas de mesure pénétrométrique est irrégulier (BREYSSE *et al.* 2002 : 48). L'intérêt du pénétromètre est de permettre une prospection fine des couches de faible résistance, par la maîtrise de l'énergie de battage, en modulant l'intensité des coups de marteau et par le contrôle du couple profondeur-résistance (MAQUAIRE *et al.* 2002 : 837). Les variations d'énergie liées au caractère manuel de la frappe n'ont aucune influence car la tête du train de tiges du pénétromètre est équipée d'un capteur de vitesse : on en déduit l'énergie cinétique fournie au dispositif. La résistance de pointe  $Q_d^*$  est calculée par la formule dite « des Hollandais ». L'application a été réalisée avec une pointe fixe d'une surface de 2 cm<sup>2</sup> (Pl. 1). Ainsi, à l'issue de chaque sondage pénétrométrique (SP), les données géotechniques sont traitées numériquement à l'aide d'un logiciel. On obtient alors des signaux (pénéetrogrammes) représentant la résistance de pointe en fonction de la profondeur (Pl. 1).

Les mesures pénétrométriques dépendent de plusieurs paramètres du sol :

- la granulométrie (distribution des tailles des constituants naturels et/ou anthropiques)
- la structure et la compacité (forme et degré d'assemblages des constituants naturels et/ou anthropiques)
- la teneur en eau.

Des études ont été faites pour estimer la contribution de la teneur en eau dans les propriétés mécaniques du sol avec l'utilisation d'un pénétromètre conique (TO, KAY 2005 ; DEXTER, CZYZ, GATE 2006). Ce point est crucial pour le contrôle de compacité des remblais. Ici, pour des raisons techniques, il a été impossible de prendre en compte ce paramètre lors de la réalisation de SP. Ce point est relativisé par le fait que le dépôt archéologique est un milieu bien drainé en contexte urbain. Il faut prendre le soin de ne pas réaliser des SP juste après un épisode pluvieux et de se renseigner sur les niveaux de nappes à certains endroits.

Pour répondre au double objectif, il était nécessaire de mettre en place des méthodes descriptives et statistiques liant les données géotechniques et archéologiques. Les études se sont concentrées sur l'analyse des propriétés mécaniques du dépôt archéologique et sur l'élaboration d'un référentiel archéologico-mécanique. Notons qu'il existe des référentiels mis au point par les géotechniciens qui concernent des sols particuliers (par exemple, les remblais de chaussées) mais aussi certaines formations géologiques dans des zones précises comme par exemple dans la vallée du Rhône<sup>16</sup>, dans les Alpes de Haute Provence (MAQUAIRE *et al.* 2002) ou bien en Vendée<sup>17</sup>.

#### • *Les premières applications sur un site archéologique*

L'expérience a été menée à Tours sur le site Saint-Julien/Square Prosper Mérimée qui a fait l'objet de fouilles programmées (2000-2003). Le site est situé dans un secteur de la ville où la connaissance archéologique est faible. La zone fouillée couvre une surface utile d'environ 230 m<sup>2</sup> et l'espace accessible aux reconnaissances non-destructives est beaucoup plus étendu (Pl. 2). L'étude de ce site devait répondre à plusieurs questions d'ordre historique qui seront développées par la suite (chapitre 5). La fouille a révélé la présence d'environ 7 m d'épaisseur de dépôt archéologique du début du 1<sup>er</sup> siècle ap JC à nos jours (de 44,3 à 51 m NGF\*) (GALINIÉ, LORANS 2000 ; GALINIÉ, LORANS, FONDRILLON 2001 ; GALINIÉ *et al.* 2002 ; GALINIÉ *et al.* 2003c).

Au cours de ces quatre années, des prospections géophysiques (radar, résistivité électrique, susceptibilité magnétique – M. Martinaud, C. David, E. Marmet) et géotechniques (PANDA, géoendoscope – P. Breul) ainsi que des études sur les constituants (FONDRILLON *en*

---

<sup>16</sup> Compagnie Nationale du Rhône

<sup>17</sup> Etude menée sur les argiles des marais vendéens, par des membres de l'UMR 6532, HydrASA, Université de Poitiers.

*cours* ; JAFFROT *en cours*), la micromorphologie (rapport Macphail) et la pédologie (P. Poupet, R. Harfouche) ont été mises en oeuvre pour la reconnaissance et la caractérisation du dépôt archéologique.

Dans le cadre de la maîtrise puis de la thèse, le PANDA a été expérimenté en réalisant 102 sondages pénétrométriques sur le terrain (Pl. 2). Afin de confronter les données archéologiques aux données géotechniques, une partie des SP ont été implantés en bord de coupe de façon à visualiser et relever ce qu'a traversé le PANDA. Toujours pour répondre au double objectif, différents tests ont été menés avec la collaboration de géotechniciens de l'Université de Bordeaux I (CDGA - D. Breysse, L. Houy, H. Niandou) et de Clermont-Ferrand (LERMES/CUST - P. Breul). Ces tests ont suscité la mise en place de nouvelles méthodes d'enregistrements de terrain et un traitement statistique spécifique qu'il convient de présenter.

- Mise en place d'un enregistrement adapté à l'échelle archéologique et géotechnique

La mise en oeuvre d'une méthode adaptée aux visions de l'archéologue et du géotechnicien a soulevé le problème des échelles d'analyse. En effet, l'échelle d'analyse de l'archéologue est d'ordre centrimétrique lorsqu'il enregistre une unité stratigraphique (US). Pour le géotechnicien, l'échelle d'analyse est, la plupart du temps, d'ordre décimétrique lorsqu'il reconnaît une Unité Mécanique (UM)\*. D'autre part, la description d'une US se fait le plus souvent à l'échelle macroscopique : elle prend en compte sa couleur, parfois sa texture, les constituants présents et leur état de conservation. Elle dépend de la rigueur d'enregistrement de l'archéologue. Les géotechniciens prennent en compte différents facteurs pour caractériser les UM : la texture, la teneur en eau et la porosité, la distribution granulaire.

A titre expérimental, pour confronter les relevés stratigraphiques aux pénétrogrammes, une unité intermédiaire aux US et aux UM a été créée: l'Unité Lithologique (UL)\* (Fig. 7). Une UL est caractérisée par sa texture, sa couleur et les constituants qui la composent. Par exemple, une UL peut être limono-sableuse brune foncée avec des pierres de tuffeau et terre cuite architecturale, de charbon et une porosité importante.

Unité de description	Echelle d'analyse	Caractéristiques de l'unité de description
US	D'ordre centimétrique	Couleur, texture, constituants grossiers, fonction archéologique
UM	D'ordre décimétrique	Résistance pénétrométrique A considérer : granulométrie, teneur en eau (porosité)
UL	D'ordre centimétrique, peut regrouper plusieurs US	Couleur, texture, constituants grossiers, granulométrie, porosité

Fig. 7 - Tableau des caractéristiques des unités stratigraphiques, unités mécaniques et unités lithologiques.

96 UL ont été enregistrées sur l'ensemble du site selon le protocole suivant :

-un relevé stratigraphique pour chaque section traversée par le pénétromètre, sur une bande de 30 cm de large encadrant le forage. Il comprend un dessin associé à une description lithologique (texture, porosité et couleur) de chaque UL. On y ajoute une observation de l'état d'humidité de la section lors de la description.

-une photographie numérique (en mode macro) de ces sections pour garder trace de la structure des UL et des US correspondantes.

La planche n°3 montre comment les données ont été comparées durant l'étude (Pl. 3).

Il faut néanmoins noter que le nombre d'UL enregistré est limité par le fait que de nombreux SP n'ont pas été implantés en bord de coupe (en 2000, avant le décapage). Le nombre d'enregistrements a pu dépendre des conditions climatiques (pluie) et de la fouille archéologique. Certains relevés sont incomplets car il n'était pas possible d'accéder techniquement aux coupes stratigraphiques.

La description lithologique peut être elle-même discutée. La détermination de la texture s'est faite à l'œil et au toucher de façon empirique en suivant les principes des pédologues. Le code de couleur Munsell n'a pas été utilisé. La porosité a été évaluée à partir d'un référentiel provenant du *Guide pour la description des sols* (BAIZE, JABIOL 1998). Il serait intéressant de procéder à des analyses de teneur en eau à partir de prélèvements. Seuls les constituants grossiers ont été pris en compte : pour parfaire l'étude, il serait nécessaire de réaliser une analyse granulométrique en laboratoire pour chaque UL.

## - Modélisation de l'hétérogénéité du site de Saint-Julien

Ce test a été présenté en maîtrise (LAURENT 2002 : 44 -50) et dans les articles de la *Revue Française de Géotechnique* et la *Revue d'Archéométrie*. La démarche, appliquée d'abord au site de Saint-Julien, sera affinée en confrontant les résultats d'un site à l'autre et, à une autre échelle, d'une ville à l'autre.

La grande quantité des données recueillies sur le site de Saint-Julien a été l'occasion pour le géotechnicien de mettre en oeuvre ses méthodes de modélisation de l'hétérogénéité des sols. Pour étudier la variabilité spatiale du site, il est nécessaire d'identifier des zones homogènes. La notion d'homogénéité est directement liée à l'échelle à laquelle on étudie les données : le problème est donc de déterminer à quelle épaisseur de sol on doit affecter les propriétés mesurées (BREYSSE *et al.* 2002 : 49). Ainsi, avant de choisir cette échelle d'analyse, il a fallu évaluer la variabilité spatiale du terrain à partir des signaux recueillis. Cette analyse se fait par le biais de la géostatistique, donc par l'application de la théorie des variables régionalisées (MATHERON 1970 : 4-5).

La théorie des variables régionalisées est fondée sur l'analyse des variogrammes qui traduisent le degré de corrélation spatiale des propriétés mesurées aux points de mesure en fonction de leur distance (DABAS 1999 : 23). Le variogramme est un graphe qui présente le demi-écart quadratique moyen de couples de points en fonction de leur distance, ici verticale.

Dans un premier temps, on a considéré le signal pénétrométrique comme la réalisation d'un processus aléatoire dont on analyse la structure. On a donc construit le variogramme expérimental d'ordre 0 pour chaque forage en appliquant la formule :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Qd(z_i + h) - Qd(z_i)]^2$$

où  $z_i$  et  $z_i + h$  sont les positions des mesures et  $Qd(z_i)$  est la valeur de résistance de pointe correspondant au point considéré. La variable  $h$  correspond à la distance entre deux mesures. La sommation est étendue à tous les couples de points  $(z_i, z_i + h)$  distants de  $h$ ,  $N(h)$  représentant l'effectif de tels couples de points (Fig. 8).

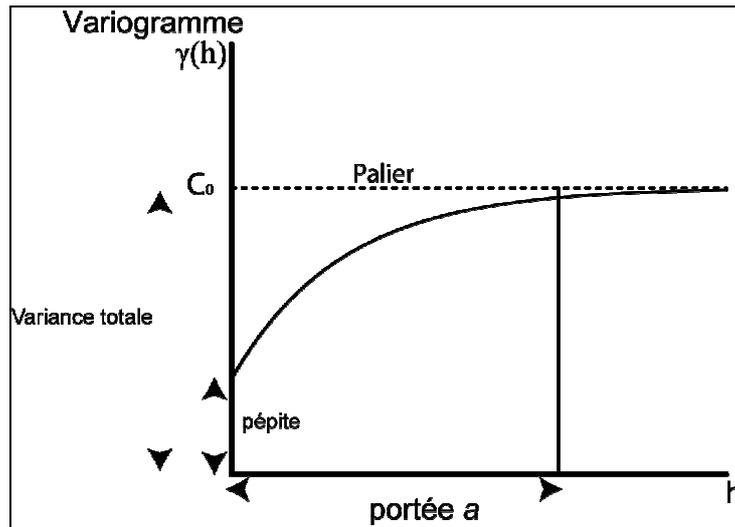


Fig. 8 - Variogramme théorique

La fonction  $\gamma(h)$  quantifie la perte progressive de corrélation spatiale d'un signal aléatoire structuré. Plus concrètement, elle représente la perte de corrélation moyenne entre deux points pris au hasard quand la distance  $h$  entre ces points augmente. Le variogramme est souvent une fonction croissante de  $h$  et peut se stabiliser autour d'une valeur finie pour les grandes valeurs de  $h$ . Elle correspond alors à la variance du signal ou « palier ». Si le variogramme montre une augmentation régulière, on est en présence d'un signal avec dérive (BREYSSE *et al.* 2002 : 49).

*A priori*, la variance des données croît avec la distance entre les points jusqu'à une distance  $a$  appelée « portée ». Au-delà de cette valeur, les valeurs sont complètement décorréées (DABAS 1999 : 23). La portée est une indication précieuse pour le choix des dimensions d'analyse (MAGNAN 1982).

En pratique, on a identifié cette valeur à partir d'un modèle de variogramme dont la forme correspond à celle des variogrammes obtenus pour chaque forage. Le modèle sphérique convenait à la forme observée : une croissance presque linéaire jusqu'à une certaine distance, puis une stabilisation. La tangente à l'origine rencontre la droite du palier à un point d'abscisse  $2 a / 3$ . Le modèle sphérique a pour équation :

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & h < a \\ C & h \geq a \end{cases}$$

où  $a$  est la portée (sur l'axe des abscisses) et  $C$  le palier (sur l'axe des ordonnées).

Souvent, la valeur que prend le variogramme quand  $h$  tend vers zéro n'est pas nulle du fait en particulier des bruits de mesure (variance de mesure). Ce phénomène est nommé « effet de pépité » qui traduit une variabilité du phénomène à une micro-échelle.

\* *Difficultés pratiques de la quantification de la variabilité spatiale (BREYSSE et al. 2002 : 49-50)*

L'analyse variographique est conditionnée par la fiabilité des mesures fournies par le pénétromètre. Elle dépend surtout des « valeurs accidentelles » perturbant localement les signaux de fond. Ces perturbations proviennent soit du dispositif lui-même ou soit d'un artefact archéologique (matériaux de construction, objets). Afin de limiter leur influence, on peut construire les variogrammes en plafonnant arbitrairement ces valeurs (ex : 5 MPa), ou encore, procéder à l'analyse des zones contenant peu de perturbations.

Un autre problème concerne le caractère non local de la mesure. On sait que la résistance de pointe résulte en fait des propriétés du terrain dans un certain volume autour de la base de la tige sauf lorsqu'il s'agit localement d'une perturbation du terrain (ex : caillou) (Fig. 9). En pratique, il a été choisi d'attribuer la valeur non locale de  $Q_d(z)$  à une zone d'environ 5 cm d'épaisseur.

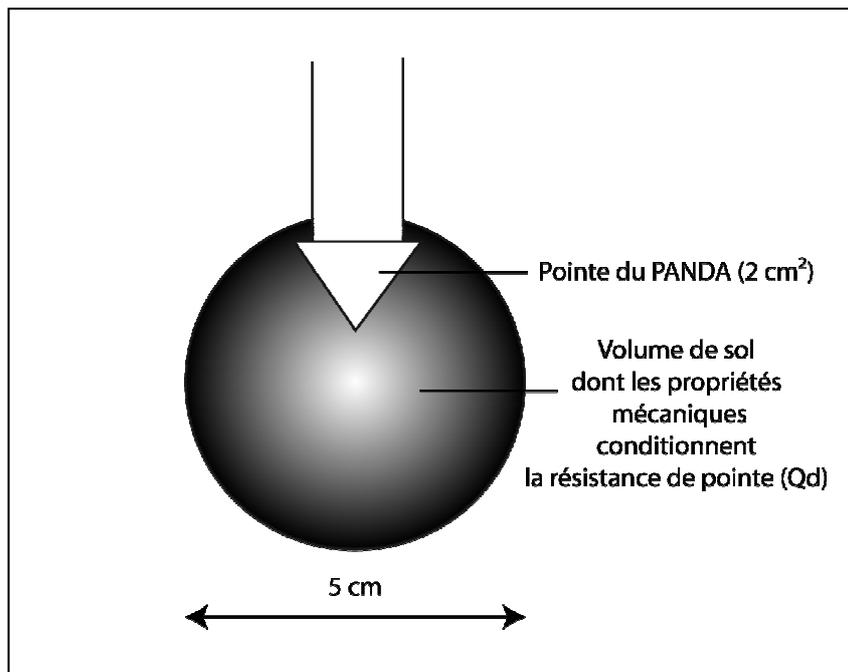


Fig. 9 – Schéma du procédé de mesure du PANDA

Enfin, il est important d'évaluer les effets de la dérive sur le signal. On sait que les propriétés du sol (densité, résistance mécanique) augmentent en général avec la profondeur, du fait de la consolidation sous l'effet des terrains des niveaux supérieurs. Dans ce cas, on construit un variogramme du signal que l'on a préalablement corrigé en éliminant cette dérive. En observant les signaux pénétrométriques, pour des valeurs inférieures à la cote 49,9 NGF (sous le remblai de surface), on note que le site ne présente pas de dérive manifeste ou systématique.

Devant ces difficultés pratiques et l'importance des irrégularités sur certains signaux, il a été choisi d'analyser la variabilité à moyenne échelle sur des zones peu perturbées.

*\* Analyse à moyenne échelle des propriétés mécaniques (BREYSSE et al. 2002 : 50-51)*

Cette analyse locale consiste à étudier l'ensemble des données, pour les SP n° 16.1 à 16.43, qui a été soumis à un découpage en tranches horizontales d'épaisseur égale à 50 cm. Pour chaque tranche, on a calculé les valeurs de la moyenne  $\text{moy}(Q_d)$ , de l'écart-type  $\sigma(Q_d)$  et du coefficient de variation ( $\text{c.v.}(Q_d) = \sigma(Q_d)/\text{moy}(Q_d)$ ), avant et après plafonnement des valeurs des pics à 5 MPa. Cette analyse a permis d'identifier la tranche du sol dans laquelle les perturbations locales sont les moins fréquentes. Cette tranche est comprise entre les cotes 48,3 et 47,8 NGF. A cette échelle, certains signaux ont présenté une dérive significative, dans ce cas, cette dérive a été éliminée avant l'analyse. Les variogrammes ainsi construits confirment l'existence d'une corrélation spatiale des mesures de l'ordre de 5 centimètres. Cette faible distance verticale peut s'expliquer par deux hypothèses :

- la corrélation est intrinsèque aux propriétés du sol dont elle traduit le caractère régionalisé à l'échelle centrimétrique.
- la corrélation est induite par le procédé de mesure lui-même illustré par le problème du caractère local de la mesure évoqué plus haut (Fig. 9).

Cette échelle d'ordre décimétrique semble être adaptée à l'étude de la variabilité des propriétés mécaniques du site puisqu'elle considère les variations des signaux comme des traces significatives de cette variabilité. La question est alors de voir si les relevés pénétrométriques des SP effectués sur un espace restreint portent une information utile pour la caractérisation archéologique du site.

- Représentation de la stratification du site de Saint-Julien par l'élaboration d'une image en « code-barres »

\* *Elaboration des images en code-barre*

Les géotechniciens se sont attachés à présenter leurs résultats sous une forme compatible aux attentes des archéologues. Ils ont mis en place une méthode qui vise à donner une image représentative des contrastes de propriétés jugés significatifs. La distribution statistique des valeurs de résistances Qd a permis de déterminer 4 classes de résistance moyenne. Ainsi, on a pu reconstituer les différentes sections étudiées sous la forme d'une **image dite « code-barre »**. L'élaboration du code-barre consiste à attribuer un code de couleur pour chaque valeur calculée sur un signal (moyenne tous les 5 cm) en fonction de son appartenance à une classe de résistance (< à 1MPa, entre 1 et 2 MPa, entre 2 et 4 MPa et > à 4MPa) (LAURENT 2002 : 51-52). Une programmation sous EXCEL permet de reconstituer la stratification de zone homogènes pour chaque section (Fig. 10).

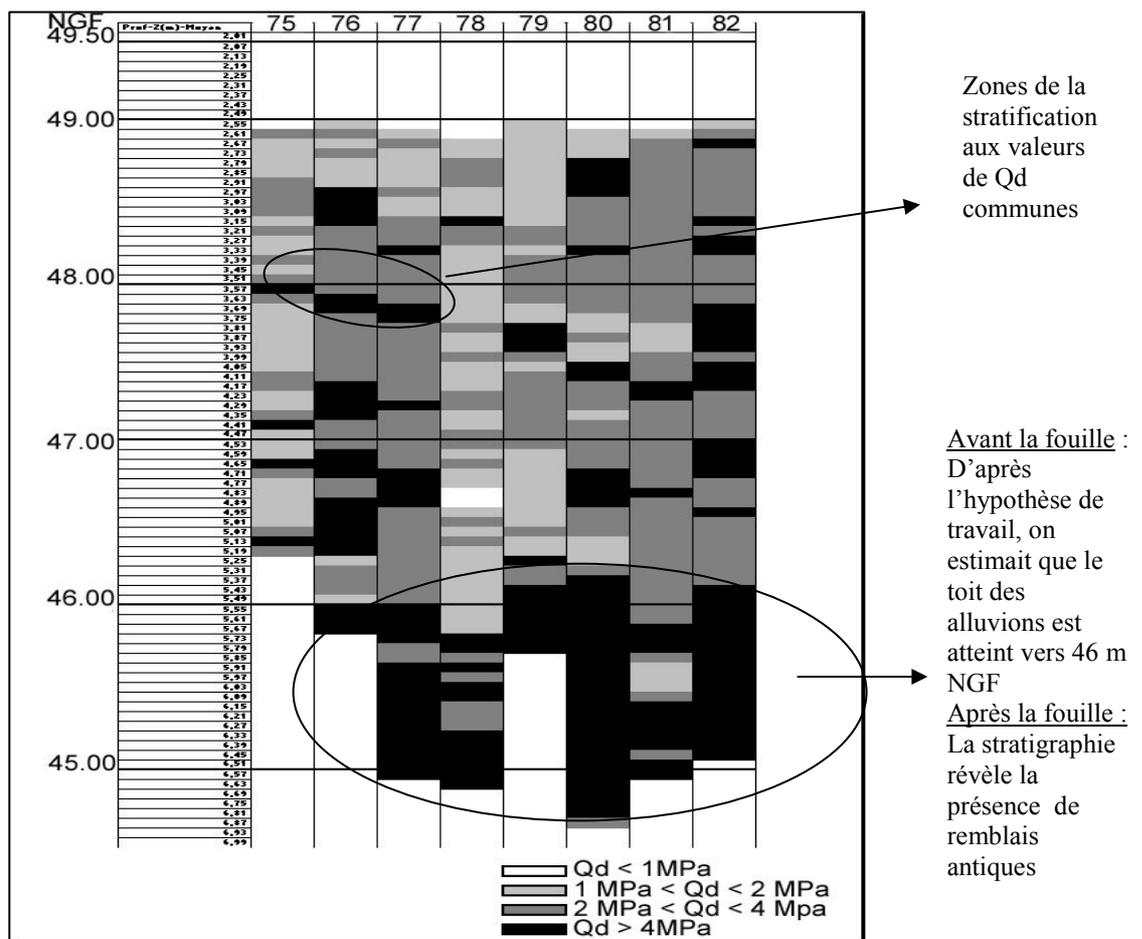


Fig. 10 - Représentation en code-barre de la stratification de la section 21.

L'interprétation de cette image ne peut se faire sans une appréciation archéologique. En effet, on remarque des zones voisines qui ont les mêmes valeurs de résistance : appartiennent-elles à la même couche archéologique ? (cf 5<sup>e</sup> chapitre).

Les premières observations montrent qu'il reste néanmoins difficile de distinguer la présence d'une pierre, occasionnant une anomalie sur le signal, d'un changement réel de constitution du sol. On peut toutefois travailler à l'échelle du site en tentant de distinguer les niveaux anthropiques des niveaux naturels.

#### *\* Estimation de la cote du toit des alluvions*

L'hypothèse de travail retenue est que le niveau naturel a été atteint par le pénétromètre lorsque nous constatons que la résistance apparente dépasse 4 MPa et croît dans l'ensemble à partir de cette valeur. A partir de la représentation en code-barre, des estimations de l'altitude du niveau naturel ont été proposées : elles varient entre 44,68 NGF et 46,57 NGF (LAURENT 2002 : 54-55). Ceci correspondait à la fourchette large attendue d'après la connaissance que l'on avait de la ville au début de la fouille (entre 45 et 47 m NGF).

Toutefois, la fouille a mis en évidence un positionnement du site sur la grève du fleuve où les premières installations ont été accompagnées de décaissement pour la fondation d'un pont de franchissement de la Loire et d'une structure monumentale interprétée comme une noria (1<sup>er</sup>-2<sup>e</sup> s.) Le toit des alluvions varie donc de 44,3 à 45 m NGF du nord vers le sud. Ensuite, ces structures perdent leur fonction et sont récupérées ; cette période est accompagnée d'un remblaiement massif dont la constitution est proche des sables alluviaux dont l'altitude maximale est à 47,7 m NGF (Fig. 10 et Annexe 3). La granulométrie de ces niveaux expliquerait les mesures élevées.

Ainsi, la méthode de représentation en code-barre peut s'adapter à la demande de l'archéologue car elle modélise la variabilité du site sur une échelle d'ordre centimétrique satisfaisante. La vision mécanique est utile à l'archéologie pour évaluer l'épaisseur du volume de sol urbain à condition d'avoir des connaissances préalables du terrain.

- Mise en place d'un référentiel archéologico-mécanique pour la caractérisation du sol sur le site de Saint-Julien

Pour que l'archéologue puisse interpréter plus finement les résultats et caractériser ce qui constitue le volume entre la surface actuelle et le toit des couches géologiques, il est nécessaire de créer un référentiel liant les données archéologiques aux données géotechniques. Des premiers tests ont été effectués durant les travaux de maîtrise (LAURENT 2002 : 56-72).

Ici, la démarche part des observations de terrain. Les unités lithologiques ont été étudiées en fonction de leur description. L'ensemble des descriptions lithologiques a été regroupé dans un tableau selon 24 faciès, reflétant l'ensemble de la stratification mise au jour sur le site de Saint-Julien (Fig. 11).

Un faciès lithologique est caractérisé par sa texture, sa porosité (évaluée selon le référentiel pédologique), sa couleur et des propriétés mécaniques qui lui sont propres. Un code a été donné pour chacun des faciès. Ce classement a été élaboré de façon empirique et est appelé à être simplifié : certains faciès ne se différencient que par leur couleur ou leur porosité. Cependant, il a été choisi de ne pas trop restreindre le nombre de faciès puisqu'il est possible de regrouper les faciès aux propriétés mécaniques communes si nécessaire.

Faciès	description lithologique
A	limono-sableux brun très sableux (porosité > 5%) + graviers + cailloux
B	limono-sableux brun sableux (2 % < porosité < 5 %) + graviers + cailloux
C	limono-sableux brun + graviers + cailloux
D	limoneux + graviers et cailloux T
E	limon + pierres
F	limon + pierres +cailloux + graviers
G	limono-sableux brun clair très sableux avec inclusions +T-CD-ardoise
H	limono-sableux brun clair sableux + T et/ou CD
I	limono-sableux brun clair
J	limono-sableux marron-bordeaux + inclusions charbons de bois
K	limon + charbons de bois
L	limon (2 % < porosité < 4 %)
M	limon + T
N	T jaune compact
O	T jaune pulvérulent
P	T jaune + mortier
Q	T blanc pulvérulent tassé
R	T + charbons de bois
S	T blocs
T	mortier compact ( souvent lié à construction)
U	mortier pulvérulent
V	sable
W	carreaux de terre cuite
X	ardoises compactées
	<i>T= Tuffeau, CD= Calcaire Dur</i>

Fig. 11 - Tableau des faciès lithologiques observés sur le site de Saint-Julien (LAURENT 2002 : Fig. 20).

Le questionnement peut se faire à différents niveaux :

- Les UL à faciès lithologique commun ont-elles les mêmes propriétés mécaniques ? La résistance d'un faciès lithologique est-elle la même selon la profondeur et l'endroit ?

- Chaque faciès lithologique possède-t-il des propriétés mécaniques spécifiques ? Si non, quels sont les faciès que l'on peut éventuellement regrouper ?

On a d'abord effectué des calculs pour différentes variables (z moyen, épaisseur moyenne, Qd moyen, écart-type, coefficient de variation, nombre de mesures) à partir du nombre d'UL appartenant à chaque faciès. 0

A partir de ces calculs, trois tests ont été réalisés. Ils sont résumés dans le tableau suivant (Fig. 12) :

TESTS	PRINCIPES	RESULTATS
Etude descriptive	Classification des faciès lithologiques en fonction de leur constituant dominant (limon, tuffeau...)	La classification n'est pas pertinente puisque les fourchettes de résistance des constituants dominants se chevauchent
Etude de la distribution statistique du Qd moyen	Classification des faciès lithologiques en fonction de la distribution cumulée croissante du Qd moyen des faciès	La classification n'est pas pertinente car il n'y a pas de corrélation avec la nature lithologique des faciès d'une part et la répartition spatiale des faciès d'autre part.
Etude du contexte fonctionnel des UL	Répartition et proportion des faciès lithologiques en fonction du contexte fonctionnel des UL correspondantes (occupation, destruction, remblai...)	Il n'existe pas de corrélation évidente entre un faciès lithologique et un contexte fonctionnel.

Fig. 12 - Tableau récapitulatif des premiers tests réalisés pour la constitution d'un référentiel archéologico-mécanique.

L'ensemble de ces résultats montre qu'il n'est pas possible de travailler à l'échelle de l'US pour caractériser finement le dépôt archéologique à l'aide du PANDA. On peut alors chercher à distinguer des assemblages d'US sur le signal, ce qui correspondrait à une échelle d'analyse inférieure du type de la séquence ou de la phase.

Cet assemblage traduit la notion d'activité qui correspond à une phase de formation ou de transformation de stratification conduisant à la production d'une ou plusieurs US. L'échelle d'analyse pour la caractérisation d'un dépôt archéologique reste donc à définir.

Les premiers résultats sont plutôt concluants pour estimer l'épaisseur du dépôt. Tandis qu'ils sont plutôt mitigés pour sa caractérisation interne : il est impossible de distinguer des US telles qu'on les enregistre sur le terrain (

Fig. 13). Il faut alors travailler à une autre échelle, celle qui prend en compte la nature même de la couche (assemblage de constituants) et le contexte dans lequel elle a été formée. En DEA, plusieurs pistes de travail ont été proposées ; la thèse a été l'occasion de les développer.

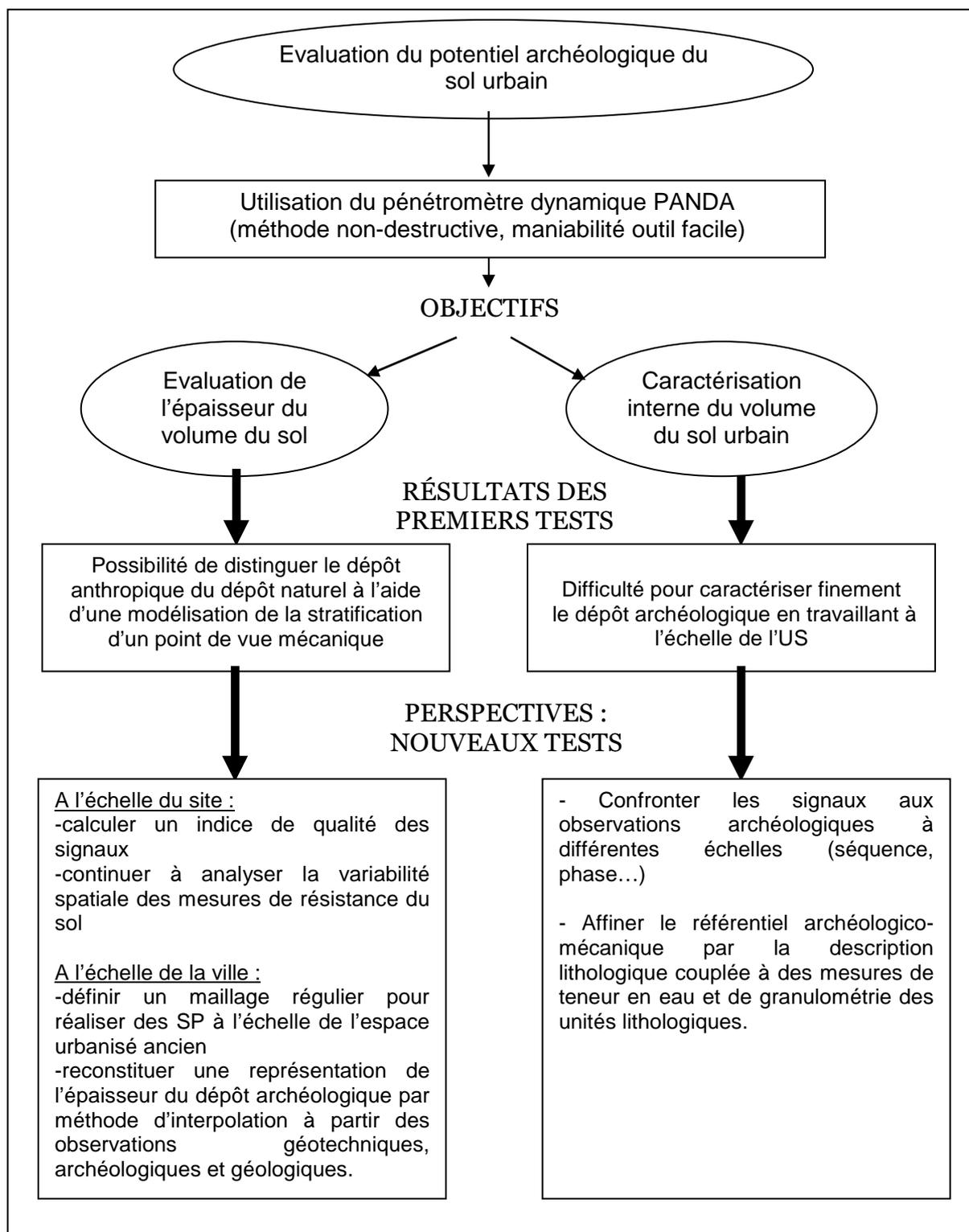


Fig. 13 - Schéma de synthèse des premiers résultats et des perspectives de l'utilisation du pénétromètre de type PANDA en milieu urbain (d'après LAURENT 2003)

- *Couplage au géoendoscope*

Il est possible de coupler un sondage au PANDA avec un essai au géoendoscope afin de caractériser le sous-sol (BREUL, GOURVES, HADDANI 2002) (Pl. 4). Il s'agit d'une sonde pouvant pénétrer dans une cavité de 16 à 22 mm de diamètre. Un travelling est réalisé lors de la descente de la caméra, le film est enregistré. Les images sont ensuite traitées à l'aide d'un logiciel afin de déterminer la granulométrie et la couleur des matériaux traversés (échelle de 5 mm). L'avantage est que cette méthode est non destructive et l'information sur les sédiments est assez fine. Elle est utilisée habituellement pour des études géotechniques. Des essais ont été effectués sur des sites archéologiques à Nancy (BREUL 2000b), à Ludres (BREUL 2000a), à Tours (BREUL 2001 ; BREUL, HADDANI 2002) et à Lyon (BREUL 2005).

Un référentiel est en cours de réalisation mais les premiers résultats semblent plutôt satisfaisants car il est possible de distinguer le dépôt archéologique des sols naturels. En effet, on peut distinguer sur les images des indices archéologiques (mortier, TCA, charbon, scories...) (Annexe 4).

Nous venons de voir que plusieurs techniques sont utilisées pour évaluer le potentiel archéologique du sous-sol. Les résultats obtenus apportent des informations sur l'épaisseur voire la caractérisation interne du volume de sol urbain. Néanmoins ces techniques ont certains inconvénients.

Les sondages à la pelle-mécanique réalisés systématiquement lors de diagnostics sont très destructeurs et limitent les investigations futures. Pour des raisons de sécurité et, souvent, pour des questions financières et/ou de calendrier, il est difficile d'obtenir des informations précises sur le dépôt archéologique tels la nature des différentes couches et leur datation. De plus, toujours pour les mêmes raisons, il arrive souvent que ces sondages n'atteignent pas le niveau naturel ; ce qui limite les estimations sur l'épaisseur du dépôt dans l'environnement immédiat du sondage.

Les sondages géotechniques doivent être eux étudiés avec précaution ; ils sont surtout utiles pour donner une mesure de l'épaisseur du dépôt mais rarement pour le caractériser. Certains sont difficilement exploitables s'ils n'ont pas de références géographiques assez précises. Ce type de sondage est rarement commandé lors de l'élaboration d'un diagnostic, et pourtant, lorsqu'elle existe, la collaboration de l'archéologue avec le géotechnicien ou le géologue peut s'avérer fructueuse.

Les méthodes géophysiques ne sont pas toutes adaptées au milieu urbain. Seuls les méthodes radar et électrostatique peuvent, pour l'instant, apporter des informations sur le sous-sol. Elles permettent de détecter des structures. Le volume étudié dépend de la surface traitée (écartement des électrodes) : le niveau naturel n'est pas toujours atteint si la surface est inférieure à l'épaisseur du dépôt. Ces méthodes sont aussi encore peu utilisées dans le cas des diagnostics à cause du coût et du temps d'investigation.

Enfin, la technique du pénétromètre dynamique léger (PANDA), qui offre l'avantage d'être non-destructrice, accessible à tout terrain et peu coûteuse doit faire encore ses preuves ; ce qui est un objectif de l'étude. Les premiers résultats ont montré qu'il est possible de mesurer l'épaisseur du dépôt archéologique en étudiant les propriétés mécaniques du sol. Cependant, la caractérisation interne reste plus difficile au premier abord. Le couplage avec le géoendoscope semble être un moyen pour résoudre ce dernier problème.

## **2-2- Le problème de la définition de l'échelle d'analyse pour l'évaluation du volume de sol urbain**

Les archéologues ont à leur disposition plusieurs sources de données qui peuvent répondre aux objectifs fixés pour l'évaluation. Elles sont issues des techniques présentées précédemment (sondages traditionnels, sondages géotechniques et prospection géophysique) mais aussi de divers documents (archives de fouilles, documents planimétriques et sources écrites). Le problème est qu'il est difficile de les appréhender selon l'échelle choisie (du site à la ville). En effet, une même source apporte un niveau d'information qui diffère selon l'échelle d'étude.

Je présenterai d'abord leurs caractéristiques et la façon dont on peut les exploiter. Les éléments qui retiendront mon attention constitueront la grille d'analyse qui sera appliquée au corpus choisi et présenté dans les chapitres 4 et 5. J'évoquerai ensuite les problèmes liés à l'échelle d'analyse et les solutions que l'on peut apporter.

### **2-2-1- Les données utiles à l'évaluation : le potentiel informatif en milieu urbain**

- *Les données archéologiques, historiques et planimétriques*

Plusieurs sources de données informent les archéologues sur les usages du sol à une période donnée : les archives du sol, les documents planimétriques, les sources architecturales et les sources écrites.

D'abord, les archives du sol sont enregistrées lors du diagnostic ou de la fouille d'un site archéologique. Les archéologues décrivent et interprètent les Unités Stratigraphiques observées sur le terrain ; ils produisent des plans et des coupes qui sont aussi utilisés à la post-fouille et archivés. Ils réalisent alors un rapport de fouille qui peut être consulté dans les Services Régionaux d'Archéologie. Pour répondre aux objectifs de l'évaluation, il est nécessaire de dépouiller ces différents documents en relevant la succession des activités humaines avec leur date, leur épaisseur de stratification et leurs cotes altimétriques, leur description et leur interprétation archéologique. Le problème est de conserver l'information qui soit représentative de l'histoire du site. En effet, la stratification est complexe et certains niveaux se révèlent être des anecdotes dans une vision plus globale. De plus, le nombre d'observations étant proportionnel à l'étendue du site, il faut synthétiser les informations. Par ailleurs, le degré de description-interprétation varie selon le type d'opération : un sondage de diagnostic permet de constituer éventuellement une coupe et des hypothèses sur le phasage du site, tandis qu'une fouille

programmée engendre la production de coupes et d'interprétations plus importantes et plus précises.

Ainsi, pour homogénéiser la collecte des informations utiles à l'évaluation, il faut créer un log\* ou plusieurs si nécessaire, représentatifs du site en s'appuyant sur le phasage proposé par le responsable d'opération. Il s'agit de **restituer une coupe stratigraphique du site en définissant pour chacune des couches, sa nature, sa fonction, sa date et ses cotes altimétriques inférieures et supérieures.**

Ensuite, les documents planimétriques sont accessibles dans les archives municipales, départementales ou nationales. Il s'agit de gravures et de plans anciens, de cadastres et de photographies aériennes. En ville, les plus anciennes peuvent dater des 14<sup>e</sup>-15<sup>e</sup> siècles (BISSON 1995). Ces sources peuvent être exploitées, avec les précautions d'usage, pour étudier l'évolution de la structure du tissu urbain, la trame viaire mais aussi pour restituer les composantes socio-spatiales. Les archéologues ont recours aux méthodes de la morphologie urbaine qui consistent à découper l'espace en unité de plan (GAUTHIEZ 1999 ; GAUTHIEZ, ZADORA-RIO, GALINIÉ 2003). Les travaux de ce type « partent de l'hypothèse que l'analyse systématique des évidences physiques que représente le matériel topographique peut, indépendamment des autres disciplines, mettre en évidence des faits et des processus historiques » (GAUTHIEZ 1999 : 17).

On se concentrera ici sur les transformations globales des usages du sol d'une ville, et donc des contrastes forts, en relevant la présence d'éléments topographiques qui « stabilisent » les espaces urbains (remparts, fossés, réseau hydrographique) et en dissociant les espaces densément bâtis de ceux qui semblent être libres (jardins, marécages).

Enfin, les archéologues peuvent aussi utiliser d'autres sources qui ne seront pas exploités directement dans cette étude : les sources architecturales et les sources écrites. Les sources architecturales, l'objet d'étude de l'archéologie du bâti, sont utiles pour obtenir des informations sur la nature, l'usage et la date du bâti enfoui ou en élévation. Elles sont aussi intéressantes pour poser des hypothèses sur les niveaux d'usage du sol (niveau de circulation en intérieur ou en extérieur). Les sources écrites apportent des indications sur les usages du sol en un lieu et une période donnée. Le problème est de localiser exactement ces indices. En outre, l'épaisseur du dépôt est rarement renseignée.

De telles publications (rapports, mémoires) seront utilisées pour alimenter et vérifier les hypothèses issues des autres sources.

- *Les données géotechniques et géologiques*

Comme il a été dit plus haut, les archéologues peuvent avoir recours aux données géotechniques et géologiques. Ces données sont accessibles dans les bureaux d'étude de géotechnique, lorsqu'ils l'autorisent, et sur le site du BGRM (<http://infoterre.brgm.fr>) qui met à disposition au public gratuitement la banque du sous-sol (BSS). La BSS répertorie obligatoirement tous les sondages géotechniques de plus de 9 m de profondeur. Le site permet de visualiser les sondages sur un plan et de télécharger les informations correspondantes lorsqu'elles existent.

Ces données sont localisables dans l'espace à des degrés divers : soit on possède les coordonnées ou bien un plan d'implantation. Elles peuvent nous informer sur l'épaisseur du dépôt archéologique avec, la plupart du temps, la mention des cotes altimétriques. Par contre, il est rare d'avoir une caractérisation fine du dépôt (sauf lorsqu'il y a une maçonnerie) et surtout impossible d'en avoir une datation. Il est aussi possible de repérer la présence d'anciens réseaux hydrographiques par la caractérisation de formations sédimentaires

Il a été choisi de s'inspirer des travaux effectués dans le service municipal d'archéologie de Lyon, au CDGA de l'Université de Bordeaux 1 et au LAT de l'Université de Tours qui ont mis au point des bases de données géologiques et géotechniques.

A Lyon, les archéologues du Service Municipal ont choisi d'utiliser les données du Service des Balmes de la ville qui recense les sondages géotechniques afin d'évaluer les risques géotechniques notamment pour les zones construites sur ou à proximité des collines (1<sup>er</sup>, 4<sup>e</sup>, 5<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> arrondissements). Ces données sont exploitées pour recueillir des informations sur la présence et l'épaisseur du dépôt archéologique (« remblais ») dans l'optique d'être réutilisés pour l'évaluation des sites qui feront l'objet de diagnostics et de fouilles. Ils ont alors mis au point une base de données sur Access afin d'homogénéiser la saisie des enregistrements (LE MER 2003). Les opérations et les sondages sont répertoriés et codés. Les informations concernant un sondage comportent plusieurs champs où l'on doit cocher la présence de « couches superficielles », de « terre végétale », de « remblais », d'« alluvions », de « couches géologiques » (sous-entendu le substratum), d'« eau ou d'humidité », de « vestiges archéologiques » et de « cavités ». Lorsque ces champs sont cochés, il faut alors en préciser l'épaisseur, la cote altimétrique en NGF inférieure et supérieure, la profondeur inférieure et supérieure et la nature ou la description. S'il y a plusieurs couches au sein du remblai, il faut remplir une fiche (une table) « détails\_rembais ». Il existe également des tables concernant les cavités et le mobilier.

Ces données ont été géoréférencées à l'aide d'un Système d'Information Géographique (cf infra) afin de pouvoir les localiser et faire des requêtes spatiales (BONNAMOUR 2004). Des sondages géotechniques provenant de la BSS ont été ajoutés à cette base de donnée géographique. Notons que la technique de sondage (sondage carotté, pressiomètre..) a été précisée afin d'estimer le degré de certitude de l'information. Les archéologues ont donc pour objectif d'utiliser ces informations pour réaliser des cartes des épaisseurs du dépôt archéologique ou réaliser des cartes de niveaux à des périodes choisies. Le problème est que ces données sont très irrégulièrement réparties dans la ville et que le relief est une contrainte importante à prendre en compte dans les calculs des estimations. Des coupes ont été restituées en dessin assisté par ordinateur (logiciel Adobe Illustrator ©) (Annexe 5).

A Bordeaux, une base de données vient également d'être mise au point dans le cadre du projet RIVIERA (Risques en Ville : Equipements, Réseaux, Archéologie) qui regroupe 5 partenaires (Université Bordeaux I (CDGA), BRGM, SRA Aquitaine, Ville de Pessac, Lyonnaise des eaux – Suez). L'objectif est de créer un outil d'aide à la gestion de l'aménagement urbain qui permet d'évaluer les risques géotechniques, géologiques, hydrogéologiques et archéologiques, et de renouveler les connaissances pour chacune de ces disciplines.

Les géotechniciens du CDGA ont dépouillé et enregistrés les données des rapports géologiques, géotechniques et hydrogéologiques des différents bureaux d'études et celles de la BSS en retenant différents critères : la nature (« stratigraphie »), la description lithologique et la position des formations (anthropiques et naturelles), les propriétés mécaniques et la présence de l'eau (BREYSSE, LANOT, PIETTE 2005 : 3). Le champ « stratigraphie » possède quatre occurrences qui sont « substratum », « argiles de décalcification », « quaternaire » et « remblais » Il existe aussi trois champs liés à la lithologie permettant de préciser, par exemple, si un sable est limoneux. Un quatrième champ a été créé pour affecter un indice de qualité de l'information sur la lithologie :

- « a » lorsque la description est tirée de l'essai lui-même (ex : pressiomètre)
- « b » lorsque la description est obtenue d'un sondage voisin de l'essai
- « c » lorsque la description est obtenue par interpolation sur une coupe
- « d » lorsque la description est obtenue par analyse statistique
- « e » lorsque la description résulte d'une expertise du site
- « f » lorsque la description n'est pas encore codée pour l'analyse

Enfin, il a été ajouté trois autres champs : « couleur » (porteuse d'information sur le plan géologique), « consistance ou altération » (intéressante pour le géotechnicien) et « perméabilité » (pour les applications hydrogéologiques et réseaux) (BREYSSE, LANOT, PIETTE 2005 : 6).

Notons qu'ont été ajoutées des informations provenant des sites archéologiques. Ce travail a permis d'enregistrer environ 10000 sondages sur l'agglomération de Bordeaux (500 km<sup>2</sup>) (BREYSSE *et al.* 2005 ; BREYSSE, LANOT, PIETTE 2005).

L'expérience de Tours sera présentée dans le chapitre suivant.

Ces études montrent la nécessité de structurer les données en fonction d'une problématique. En ce qui concerne la thèse, le but est de réaliser une base de données qui recueille des informations sur la nature, la lithologie, l'épaisseur et la qualité de l'information des formations rencontrées dans un sondage. Chaque sondage doit également être géoréférencé pour pouvoir l'exploiter.

- *Les informations sur les atteintes portées au sous-sol*

Les informations concernant les atteintes portées au sous-sol sont de différentes formes. Il est possible, dans un premier temps, de faire l'inventaire des surfaces qui ont fait l'objet de destruction/ reconstruction ou de construction. Ce type d'information est disponible dans les mairies des communes qui recensent les permis de construire ou de démolir. Cela devrait être le cas dans les SRA qui prennent connaissance de ces permis afin de déterminer s'il faut prescrire un diagnostic voire une fouille du site concerné. Certains documents, comme le recensement des zones souterraines ou des caves, ont été produits lors de la Seconde Guerre Mondiale pour protéger les habitants et peuvent compléter l'inventaire des destructions. Le souci est qu'ici est privilégiée la dimension horizontale du volume du sol urbain que l'on veut étudier. Ce qui intéresse l'archéologue, c'est également la dimension verticale pour estimer le potentiel archéologique de ce volume. En effet, il est nécessaire de connaître l'état de conservation du sous-sol afin d'adapter les recherches réalisées lors de diagnostics ou de fouilles. Ces documents ne détiennent pas tous des indications sur la profondeur atteinte par les travaux ; on peut seulement poser des hypothèses.

C'est pourquoi, dans un deuxième temps, des plans du potentiel archéologique ont été établis à l'échelle de l'espace urbanisé ancien. Il a été choisi, dans le cadre des documents d'évaluation (DEPAVF), de le représenter suivant 4 modalités : potentiel inconnu, potentiel nul, potentiel pour quelques périodes d'occupation, potentiel pour toutes les périodes (Annexe 2).

Les informations sur les atteintes portées au sous-sol permettent de pondérer le potentiel idéal estimé à partir des autres sources de données : on peut alors produire une carte du potentiel

archéologique d'une ville. L'objectif est d'intégrer ces indices dans l'analyse et la représentation du volume de sol urbain.

Les sources qui viennent d'être présentées seront exploitées dans cette étude. Les critères retenus pour enregistrer ces informations sont récapitulés dans le tableau qui suit (Fig. 14). J'y ai ajouté les informations concernant la mise en œuvre du pénétromètre dynamique de type PANDA, présenté dans la partie 2-1-4. Néanmoins, il reste à résoudre certaines questions avant d'entreprendre l'acquisition directe des données. Elles sont directement liées à l'échelle d'analyse choisie pour appréhender ces données. *A priori*, une même source de données apporte des informations différentes selon l'échelle à laquelle on travaille. Il convient donc d'aborder ces questions.

Sources / Objectifs	Archives du sol	Archéologie du bâti	Plans	Sources écrites	Sondages géologiques/ géotechniques	Sondage PANDA	Inventaire atteintes au sous-sol
Epaisseur du dépôt archéologique	Logs géoréférencés avec découpage par activité humaine (intepétation fonctionnelle) + épaisseur + cotes altimétriques + date	Vérification de niveau altimétrique	----	Vérification de niveau altimétrique	Logs géoréférencés avec épaisseur globale, cotes altimétriques	Logs géoréférencés avec épaisseur globale + cotes altimétriques + A l'aide référentiel archéologico-mécanique, essai de caractérisation interne et découpage par activités humaines	Hypothèse si on connaît la profondeur atteinte par le projet
Transformation espace urbanisé ancien		Relevés et études évolution des éléments topographiques	Relevés et études évolution des éléments topographiques importants	---	----		-----
Hypothèse sur les usages du sol		Détermination de zones d'activité humaines homogènes à un moment donné	Détermination de zones d'activité humaines homogènes à un moment donné	Détermination de zones d'activité humaines homogènes à un moment donné	Parfois notes sur présences structures, voire caractérisation interne du dépôt		-----
Destructions du sous-sol		Repérage caves + informations sur état de conservation globale	Zones bâties + caves	Zones bâties	Zones bâties + caves	Parfois caractérisation du milieu (humidité) + Repérages cavités	----

Fig. 14 -Tableau récapitulatif des informations à retenir pour répondre aux objectifs de l'évaluation à partir des sources disponibles aux archéologues

## 2-2-2- Le problème du choix de l'échelle d'analyse

L'originalité de l'étude repose sur l'interaction entre l'échelle de la ville et celle du site. En effet, les connaissances historiques et archéologiques à l'échelle de la ville aident à interpréter la stratigraphie étudiée à l'échelle d'un site ; les découvertes faites sur un site permettent, elles, de mettre à jour les connaissances de la ville. Si on s'intéresse à l'évaluation, une connaissance globale de la ville permet de valider, infirmer ou, en tout cas, préciser les hypothèses sur l'épaisseur du dépôt ou bien sur les usages du sol que l'on peut poser en travaillant sur un site. En retour, les données sur l'épaisseur ou la caractérisation interne du dépôt permettent d'ajuster les estimations faites à l'échelle de la ville.

Les sources mises à disposition pour l'évaluation doivent, pour certaines, être abordées différemment suivant l'échelle. Une activité humaine sur un site peut être une anecdote si on la considère à l'échelle urbaine. Par ailleurs, l'objectif est d'associer ces informations pour réaliser des estimations sur l'épaisseur du dépôt ou sur la présence d'activités humaines en un lieu donné. Il faut réfléchir sur la représentativité des données disponibles.

Puisque le problème du choix d'échelle d'analyse et la question de la représentativité sont très imbriqués, j'ai choisi de partir du constat de la répartition irrégulière des données dans l'espace. Ensuite, j'évoquerai la question de leur représentativité selon l'échelle choisie. Enfin, je présenterai une échelle intermédiaire entre l'échelle de la ville et l'échelle du site.

### • *La représentation des données en ville*

D'abord, il a été vu précédemment que les données sont représentées soit par des points (logs archéologiques et géotechniques) soit par des surfaces dont il est parfois difficile de déterminer les limites (zone par activité humaine, surfaces détruites). Le bilan que l'on peut faire à partir des DEPAVF suffit pour montrer que les données, considérées comme ponctuelles, sont irrégulièrement réparties à l'échelle de l'espace urbanisé ancien. Evidemment, on peut l'expliquer par l'accessibilité des terrains à construire donc à étudier. En effet, des plans d'urbanisme comme les plans de sauvegarde et de mise en valeur des villes protègent certains espaces. Cette irrégularité peut aussi provenir de la politique patrimoniale mise en pratique : certaines zones de la ville sont jugées prioritaires du point de vue historique, comme la présence de l'ensemble monumental d'une ville antique ou médiévale. Il existe donc des espaces qui ont des vides documentaires. Les archéologues ou les géotechniciens tentent alors de les restituer en extrapolant les résultats des sites voisins en faisant une « moyenne » des informations en reliant les sites. Un

des objectifs est d'estimer l'épaisseur du dépôt archéologique par interpolation\* à partir des points d'informations.

Plusieurs questions sont soulevées :

- peut-on réaliser une interpolation en reliant tous les points ? Existe-t-il des distances limites pour mettre en corrélation des points (10m, 100 m, 500m, 2 km ) ?
- doit-on utiliser des méthodes d'interpolation spécifique à ces données ?

La question de l'optimisation de la taille et de la forme du maillage de reconnaissance est une question posée par tous les types de prospections (géotechniques, géophysiques, pétrolière, minière). L'idéal serait de posséder un maillage régulier des informations. Sa résolution dépend de la taille du phénomène étudié.

On retrouve ce type de discussions pour le milieu rural dans le bilan d'une table-ronde présenté dans *Les Nouvelles de l'Archéologie*, n°104-105 (BRUN, MARCIGNY, VANMOERKERKE 2006b). Des expériences, comme celle de l'étude de l'usine Toyota (CLOTUCHE 2006) ont montré que l'usage de sondages en quinconces apportent moins d'informations que les sondages en tranchées continues car le maillage est trop rigide et passe à côté de nombreuses structures, si elle sont inférieures à la taille de la maille (ici, 22,50 m). L'article concernant la plaine crayeuse champenoise (ACHARD-COROMPT *et al.* 2006) présente un exemple illustrant la probabilité de détecter des vestiges selon l'emplacement des tranchées en quinconces. En milieu urbain, il est impossible, pour des raisons techniques et financières, de réaliser des fouilles suivant un maillage régulier. D'autant plus, que le choix de la maille est difficile à déterminer puisque la présence de vestiges est dense.

Pour résoudre cette question, il a été choisi d'implanter un maillage théorique pour réaliser des sondages géotechniques à l'aide du PANDA. L'objectif premier était d'obtenir des informations sur l'épaisseur du dépôt archéologique. Le projet a été élaboré pour la ville de Tours (LAURENT 2003 : 25-26).

Une première phase de réflexion s'imposait pour faire le choix de la maille d'analyse. J'ai choisi de suivre un maillage de 100m x 100m à l'échelle de l'espace urbanisé ancien. Ensuite, une deuxième phase a consisté à faire l'inventaire des surfaces disponibles pour réaliser les sondages au pénétromètre. Enfin, la troisième phase a permis de poser le maillage en fonction des surfaces disponibles. La mise en œuvre pratique sera présentée dans le 4<sup>e</sup> chapitre.

Concernant la méthode d'interpolation, il est nécessaire d'y réfléchir car elle doit être adaptée à chaque situation (ZANINETTI 2005). Nous verrons qu'il faut analyser la structuration spatiale des données avant de se lancer dans les calculs. Par ailleurs, pour résoudre la question de

la « distance limite », des tests sont envisagés pour proposer des estimations de l'épaisseur du dépôt archéologique en utilisant toutes les données de l'espace urbanisé ancien.

- *La représentativité des données*

Réfléchir sur la représentativité des données en milieu urbain, c'est s'interroger sur la nature et la densité des données à posséder pour réaliser une évaluation convenable de la ville.

La première question a été abordée par la présentation des sources d'informations en proposant de retenir les données utiles aux objectifs de l'étude (Fig. 14). Néanmoins, il apparaît que les informations retenues sont différentes selon l'échelle choisie. Cela concerne la constitution des logs archéologiques, et sans doute, l'interprétation des signaux pénétrométriques.

Les logs archéologiques à l'échelle du site seront très proches des coupes présentées dans les rapports. Si on veut comparer les sites entre eux, donc travailler à l'échelle de la ville, il faut utiliser une base de données commune afin de les rendre comparables. On peut alors constituer des logs en retenant les activités présentes et leurs cotes altimétriques suivant des dates définies au préalable afin de restituer des composantes socio-spatiales et des modelés du sous-sol par périodes.

Les signaux pénétrométriques seront étudiés pour mettre au point un référentiel archéologico-mécanique et distinguer le dépôt archéologique des sols naturels à l'échelle d'un site. Ces nouvelles informations seront alors utilisées pour interpréter les signaux des SP implantés suivant un maillage en ville.

Le problème de densité rejoint celui du maillage : plus, on souhaite obtenir un maillage serré de l'information, plus il faudra multiplier l'acquisition de données. Toutefois, il a été démontré que le nombre d'observations n'est pas proportionnel au degré de précision de l'information (HAGGETT 1973). Il est donc nécessaire de réfléchir sur les seuils.

La question de la représentativité est d'ordre statistique, il faut un nombre d'individus minimum (une trentaine d'après CHENORKIAN 1996); ce qui est donc possible avec les données qui existent en ville. On considère que les points d'observations représentent un échantillon de la ville<sup>18</sup>. A l'aide de test statistique, on peut quantifier par exemple la qualité de l'estimation de la moyenne des épaisseurs de la ville à partir de ces points (ORTON 2000).

---

<sup>18</sup> Il faut noter que les ouvrages qui traitent de l'échantillonnage concernent pour la plupart l'échelle du territoire ou l'échelle du site.

- *Échelle de la ville, échelle du site : découpage en transect.*

On ne peut évaluer le potentiel informatif d'une ville sans dissocier l'échelle globale de celle du site car elles sont en interaction. Il faut alors réfléchir sur la mise en point d'une échelle intermédiaire qui permet de passer de l'une à l'autre.

Il est donc proposé de découper une ville suivant des transects dans lesquels on pourra tester les méthodes proposées. Un **transect\*** est une « grande bande de terrain arbitrairement choisie dans un secteur géographique comme échantillon de celui-ci, et recoupant ses différentes unités paysagères » (DABAS *et al.* 2006 : 245). Ce découpage est couramment utilisé dans le cadre de la prospection pédestre mais aussi de la prospection géophysique. Pour l'implanter à l'échelle de l'espace urbanisé ancien, il faut passer par une phase d'observation de la topographie : l'idéal est de positionner des transects en fonction des problématiques historiques et de la répartition des données. En effet, il faut des connaissances historiques et archéologiques suffisantes afin de valider les résultats que l'on obtiendra à partir de cette méthodologie.

Plus clairement, une évaluation complète de la ville passerait par une analyse de ces transects en intégrant les connaissances générales de la topographie historique et celles plus précises qui sont issues des sources archéologiques mais aussi géologiques et géotechniques. On a donc un système circulaire où, dans un sens, les données des sites actualisent les observations générales de la ville et, dans l'autre sens, les observations à l'échelle de la ville aident à l'interprétation des données ponctuelles. Si on reprend les objectifs de l'évaluation, on obtient le schéma suivant (Fig. 15) :

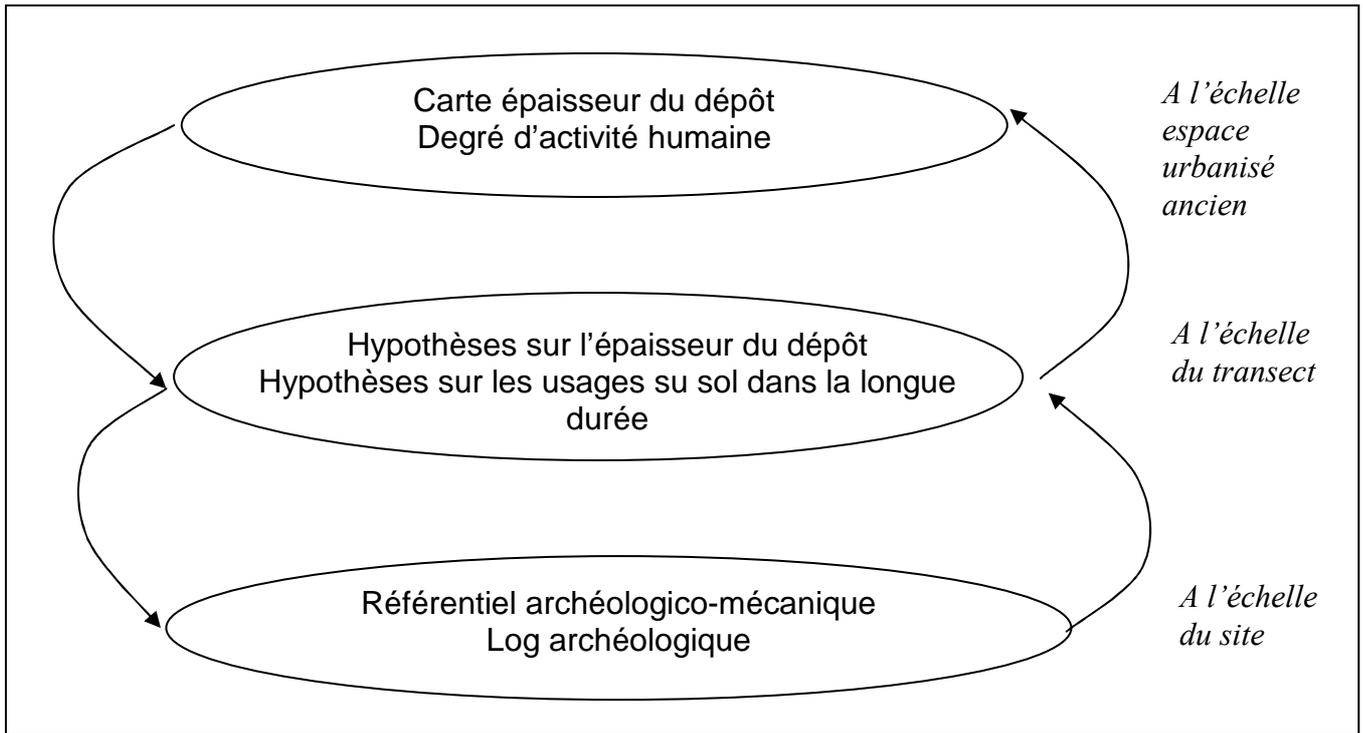


Fig. 15 -Schéma des objectifs principaux de la thèse en fonction des échelles d'analyse

Ainsi, l'évaluation du potentiel informatif d'une ville peut se faire par deux entrées : celle de l'échelle de la ville et celle du site. Les données utiles à l'évaluation doivent donc être appréhendées différemment selon l'échelle. Le principal problème à résoudre est la généralisation d'une donnée ponctuelle à l'échelle de la ville.

Afin de mieux percevoir les changements d'échelle, il est proposé de tester les méthodes d'acquisition de données ainsi que leur exploitation à une échelle intermédiaire, celle du transect.

## 2-3- Les outils pour représenter et modéliser le sol urbain

Dans le premier chapitre, nous avons vu que le sol urbain est le produit des activités humaines qui ont comme support « l'espace urbain ». Pour répondre aux objectifs de l'évaluation en ville, il est nécessaire d'obtenir des représentations de son potentiel archéologique. Il est possible de les réaliser à partir d'outils qui mettent en perspective des informations localisées dans l'espace. Les résultats ainsi obtenus sont le fruit de réflexions sur l'organisation des données et l'usage de modèles adaptés aux questions des archéologues. Avant de présenter les outils qui permettent d'obtenir des représentations du sol urbain, il faut revenir rapidement sur la vision qu'a l'archéologue de l'espace et ce qui a motivé l'utilisation de ces outils. Nous verrons ensuite que la modélisation de l'évolution historique des villes est toute récente et que la recherche actuelle en est encore au stade de la réflexion méthodologique et de la mise au point de modèles. C'est dans ce cadre de réflexion que les travaux de thèse s'inscrivent.

### 2-3-1- L'appréhension de l'espace par l'archéologie

« L'espace est constitutif de l'argumentaire archéologique, mais le plus souvent de manière implicite. » (BARGE *et al.* 2004 : 16). La place de l'espace dans la recherche archéologique a évolué durant ces dernières décennies sous l'influence d'historiens et de géographes.

#### • *La place de l'espace en archéologie*

Après la seconde guerre mondiale, plusieurs courants dont ceux issus de la géographie historique se sont succédés pour considérer, d'abord, que l'espace est seulement un cadre d'étude, fixe et immobile puis, à partir des années 1970, qu'il est un lieu de l'interaction entre les sociétés et l'environnement (HODDER, ORTON 1976 ; PUMAIN, SAINT-JULIEN 1997). Tout est alors « spatialisé » et surgit alors le concept de dynamique spatiale (CAROZZA 2005 : 1). On considère que « toute activité humaine est organisation ou du moins gestion de l'espace » (BOURIN 2002 : 496).

A partir des années 1970-1980, l'archéologie s'est distinguée de l'histoire et de la géographie par l'emploi d'échelles spatiales mais aussi temporelles adaptées à ces objets d'étude (habitat, ville, territoire).

Ainsi, on étudie et cartographie l'espace selon trois échelles de représentation (RODIER 2006 : 1):

- celle du site fouillé dont on possède des relevés et des plans et des enregistrements de terrain. On étudie la répartition spatiale des structures ou bien des artefacts ;

- « celles de la ville ou de communes rurales », qui sont constituées d'entités interprétées.

On produit des cartes de topographie historique ;

- « celles de la répartition des sites pour une période ou un type d'objet ». Il s'agit ici de cartes d'inventaire ou de répartition thématique.

M. Bourin précise que depuis les années 1970, avec la systématisation des prospections au sol, les problématiques ont évolué : « la question porte désormais non sur les zones mais sur les modes d'occupation, non sur la présence de l'habitat mais sur l'évolution de sa structure » (BOURIN 2002 : 502).

La spécificité de l'archéologie est aussi d'analyser l'espace dans la longue durée. « La prise en compte du temps ne porte plus seulement sur les successions ou les évolutions mais sur les transformations, les mutations, les héritages, les trajectoires. » (RODIER 2006 : 1).

- « *L'espace urbain* »

L'espace urbain, lui, est d'abord considéré comme une étendue, une surface, puis comme une zone composite (GALINIÉ 2000 : 41-42). En effet, les éléments constitutifs, regroupés selon leur nature, leur fonction forment des sous-ensembles de l'espace urbain qui est perçu comme le « support des activités humaines [...le...] lieu des réalisations, des actions, des enjeux, des rivalités. »

Les réflexions sur la ville sont nombreuses et soulèvent le problème de l'intégration du temps dans les analyses spatiales (LEPETIT, PUMAIN 1993 ; GALINIÉ 2000). « S'interroger sur les temporalités urbaines, c'est-à-dire sur les expressions du temps dans les villes et du temps des villes, revient à s'interroger aussi sur l'espace urbain, pris dans ses deux acceptions usuelles, à la fois de contenant et de contenu » (PUMAIN 1993 : 136).

C'est dans ce contexte de recherche qu'ont été développées les théories de l'auto-organisation pour étudier l'évolution urbaine. Ces théories consistent à étudier l'évolution des systèmes urbains « à partir des interactions entre l'échelle macroscopique des configurations urbaines, entre la dynamique rapide de la conjoncture et la dynamique lente des structures. » Jusque dans les années 1970, l'évolution des systèmes urbains était considérée comme linéaire. Puis, ont été mis en évidence des discontinuités de ces systèmes : les processus qui engendrent la formation et le renouvellement urbain n'ont ni les mêmes durées, ni les mêmes rythmes (LEPETIT, PUMAIN 1993). On y observe également des « bifurcations » (SANDERS 1993) qui font qu'à partir d'un même objet, il y a plusieurs évolutions possibles. En effet, les modèles d'auto-organisation mis au point « permettent ainsi de reconnaître à partir de règles de fonctionnement identiques, la

multiplicité des voies d'évolution possibles, et la parfaite originalité de la trajectoire suivie par tel système particulier » (LEPETIT, PUMAIN 1993 : 8).

L'archéologue a donc pour mission d'identifier ces discontinuités et ces bifurcations afin d'améliorer ses propres modèles (cf infra).

Pour répondre à leurs besoins, les archéologues ont mis au point des méthodes d'analyse spatiale en empruntant les concepts théoriques des géographes, et/ou en étudiant l'interaction entre les différentes sources d'informations (approche empirique). Ils ont recours à des outils, notamment les Systèmes d'Informations Géographiques, qui ont permis de mettre en corrélation les informations archéologiques.

### 2-3-2- Utilisation et utilité d'un SIG

- *Définition des Systèmes d'Information Géographiques (SIG)*

Les Systèmes d'Information Géographiques sont nés de la rencontre entre :

- la gestion de l'information géographique et notamment le dessin assisté par ordinateur (DAO), qui permet de représenter les données graphiquement
- les Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD) qui relient des données entre elles.

Un SIG est un outil qui permet de saisir des données géographiques sous forme numérique, de les stocker et de les analyser. Il est une abstraction du monde réel (DENÈGRE, SALGÉ 1996 ; MINIVIELLE, SOUIAH 2003). Son intérêt est qu'il peut prendre en charge différents modes de représentation spatiale des données (*raster* et vecteur) et gérer différentes géométries d'objets (point, ligne et polygone). L'avantage est qu'il ne s'agit pas de réaliser seulement des cartes mais plutôt de structurer les informations géographiques de façon à les interroger selon leurs thèmes ou leur échelle d'analyse. Enfin, il peut être accessible à différents utilisateurs (de l'administrateur au simple consultant).

Les premiers SIG ont fait leur apparition au Canada et aux USA vers les années 1964-1965, dès qu'il fut possible d'établir un lien entre géométrie des objets et les informations qui leurs sont associés. Différents domaines en sciences naturelles et en sciences humaines ont recours à cet outil et ont favorisé le développement de logiciels. Certains d'entre eux regroupent différents outils d'analyse spatiale (ARCGIS©, MAPINFO©) et permettent réellement le croisement des données ; d'autres se concentrent sur une méthode spécifique telle les méthodes d'interpolation (SURFER©, ISATIS©) ou bien, sont adaptés à des données spécifiques comme

pour les données raster (IDRISI©) ou les données géologiques (GDM© du BRGM). Au final, les SIG sont des outils de gestion et d'aide à la décision pour les disciplines ayant des données localisées. L'utilisation d'un SIG peut résulter d'un effet de mode mais son emploi raisonné permet de répondre à des questions précises et, surtout, en suscite de nouvelles.

Notons que plusieurs éléments entrent en compte pour concevoir un SIG. D'abord, il est nécessaire de réfléchir à la structuration des données et aux représentations graphiques selon l'échelle de travail : une ville pourra être représentée par un point ou un polygone selon l'échelle choisie. L'idéal est de passer par une modélisation de la conception même du SIG qui est appelé Modèle Conceptuel des Données (PIROT, VARET-VITU 2004 ; SAINT-GÉRAND 2005). Elle consiste à définir la géométrie, les attributs et les relations logiques (spatiales et temporelles) entre les objets étudiés. Ensuite, les données sont organisées dans une table dont les champs sont les attributs décrivant un type d'objet.

#### • *Application du SIG en archéologie*

Il est intéressant de s'appuyer sur les publications récentes qui font le point sur l'application des SIG en archéologie (BARGE *et al.* 2004 ; RODIER 2006 ; WEATHLEY, GILLINGS 2002). Ils sont utilisés pour réaliser des inventaires mais aussi des analyses spatiales.

D'abord, les SIG sont utilisés pour la constitution des inventaires à différentes échelles qui présentent un état de connaissance à un moment donné (BARGE *et al.* 2004 : 16 ; RODIER 2006 : 1) :

- traitement de la carte archéologique nationale du ministère de la culture (PATRIARCHE)

- cartes archéologiques départementales par les collectivités territoriales

- cartes archéologiques à l'échelle d'une ville ou d'un site en cours de réalisation.

La réflexion au sein du ministère de la culture (CNAU) sur l'informatisation des DEPAVF montre l'intérêt de ne plus figer les données archéologiques sur papier mais plutôt de les mettre en perspective afin de répondre aux interrogations des archéologues, notamment celles liées à l'évaluation (CNAU 2004b). En outre, l'objectif est de mettre à jour les données afin de renouveler constamment les connaissances sur une ville.

Par ailleurs, les archéologues éprouvent parfois la difficulté à faire la différence entre un inventaire exhaustif de données archéologiques et l'enregistrement de données utiles permettant de répondre à des problématiques particulières comme l'évaluation. Il est donc nécessaire d'élaborer au préalable une structure à l'enregistrement et à la sélection d'informations pour répondre aux objectifs archéologiques comme le préconisent les géomaticiens (THÉRIAULT,

CLARAMUNT 1999 : 80). Ainsi, il faut faire des choix autant sur le format des données que sur le contenu. L'élaboration des SIG à l'échelle de la ville est, entre autres, en cours de réalisation à Rennes, Paris, Reims, Tours, Lyon, Aix-en-Provence, Narbonne et à Bordeaux<sup>19</sup>.

Ensuite, un SIG offre plusieurs fonctionnalités qui permettent de mettre en évidence des liens géographiques entre des données diverses (attraction, répulsion, concentration, dispersion) et qui facilitent le changement d'échelle spatiale (BARGE *et al.* 2004 : 17-21). Les archéologues utilisent un SIG comme un outil d'analyse spatiale pour modéliser des processus dans un espace défini (attraction, flux, échange, distance-coût) à différentes échelles temporelles. Le problème est d'intégrer les échelles spatio-temporelles dans ces analyses spatiales (LEPETIT, PUMAIN 1993 ; FAUVET *et al.* 1998 :150-151 ; THÉRIAULT, CLARAMUNT 1999 : 68-69 ; BRUN, MARCIGNY, VANMOERKERKE 2006b).

Les premières analyses spatiales ont été conduites dans les années 1970 en Angleterre et concernent l'échelle régionale (CLARKE 1972, CLARKE 1977 ; HODDER, ORTON 1976). Aux Etats-Unis, l'analyse spatiale se concentre sur l'habitat (répartition spatiale des vestiges) (WHALLON 1973 ; WHALLON 1974) et sur le milieu urbain (COWGILL 1974). Mais comme le souligne F. Djindjian (DJINDJIAN 1991 : 4-5), les anglo-saxons ont employé des outils mathématiques sans vraiment les dominer et il faudra attendre les années 1980, pour que les outils statistiques soient mieux intégrés aux problématiques archéologiques.

En France, des analyses de ce type ont été développées à partir des années 1990 et plus récemment, dont les principales sont présentées dans deux publications (HISTOIRE & MESURE 2004 ; BERGER, BERTONCELLO, BRAEMER *et al.* 2005).

Des programmes archéologiques ont permis la réalisation d'études des dynamiques spatiales fondés sur des inventaires détaillés issus de la carte archéologique nationale et complétés par de la prospection systématique à l'échelle régionale (RODIER 2006 : 3). On citera le programme réalisé en vallée du Rhône, ARCHAEOMEDES (DURAND-DASTÈS *et al.* 1998 ; VAN DER LEEW, FAVORY, FICHES 2003), celui en Champagne-Ardenne (ACHARD-COROMPT *et al.* 2006), celui pour l'Atlas du Berry (BATARDY 2001) ou bien de l'Atlas de Touraine (ZADORA-RIO 2006).

Les analyses spatiales à l'échelle de la ville, hormis l'informatisation des DEPAVF, sont assez récentes. En effet, la réflexion a porté d'abord sur le problème de la gestion et l'informatisation des archives de fouilles (MAGNAN *et al.* 1986) ; le cas s'est présenté pour Lyon (BURNOUF 1994) et pour Tours (GALINIÉ *et al.* 2005). En fait, plusieurs organismes (INRAP, services municipaux ou départementaux et universités) peuvent intervenir sur des sites au sein

---

<sup>19</sup> Voir le groupe de travail du réseau ISA (Information Spatiale et Archéologie) sur la ville, <http://isa.univ-tours.fr/index.php>

d'une même ville. Il est alors difficile, pour des problèmes scientifiques et/ou politiques de mettre en commun les données de terrain. Toutefois, la mise en place de programmes de recherches (PCR ou ACR) ou de bilan, lors d'une publication ou d'une exposition (par exemple à Toulouse, à Besançon ou à Tours), sont l'occasion de mettre à jour la topographie historique d'une ville et permettent de répondre à des questions précises. Ces réalisations suscitent alors la mise en place de méthodes d'enregistrements spécifiques comme au sein de l'équipe du Laboratoire Archéologie et Territoires de l'Université de Tours à travers la réalisation du système ToToPI (Topographie de Tours Pré-Industriel) (RODIER 2000, GALINIÉ, RODIER 2002) et le CNAU.

L'ensemble des analyses spatiales nécessite l'emploi de modèles qui permettent de comparer les différentes sources d'informations, qui tiennent compte du « statut » même de l'information l'étude se penchera sur les contraintes à retenir pour étudier l'évolution historique des villes et notamment pour modéliser le sol urbain.

### 2-3-3- La modélisation de l'évolution historique des villes

Je présenterai les principaux modèles qui ont été mis au point en archéologie en général puis ceux qui concernent la ville. Il apparaît d'abord que peu d'études existent pour modéliser l'évolution historique des villes et encore moins sur le sous-sol. D'autre part, les archéologues sont confrontés au problème des biais d'échantillonnage mais, aussi, de la définition de paramètres pertinents pour construire leur modèle.

- *Définition d'un modèle*

On retient ici la définition formulée par F. Durnad-Dastès qui est adaptée à partir des propos du géographe, Peter Hagett : « le modèle est une représentation schématique de la réalité, élaborée en vue de comprendre et de la faire comprendre. Il a une double fonction, didactique et heuristique. » (BRUNET 2000 ; HAGETT 1973 ; DURAND-DASTÈS 2001 : 31 ; PUMAIN, SAINT-JULIEN 2001). R. Ferras ajoute que les modèles s'appuient sur des hypothèses de travail et qu'il ne s'agit pas d'une « généralisation-résumé » d'un phénomène (FERRAS 1993 : 10). Enfin, il faut retenir qu'un modèle doit être validé ultérieurement par son utilisation.

- *Les modèles en archéologie*

Il existe différents types de modèles qui varient « selon le degré d'abstraction » et qui sont empruntés à des disciplines diverses (mathématique, statistique, hydrologie, etc...) » (CHARTIER 1999 :1). Beaucoup d'entre eux utilisent des méthodes hypothético-déductives qui

induisent une confrontation avec la réalité (THÉRIAULT, CLARAMUNT 1999 : 70 ; DURAND-DASTÈS 2001 : 43). Ainsi, la critique d'un modèle tient à la prise en compte des écarts entre les données de départ et le modèle.

Lorsque l'on met au point un modèle, il faut évidemment décrire les données mais surtout être conscient des difficultés liées à l'acquisition : il faut différencier la présence/absence d'informations de la présence/absence de sites (ou artefacts si on travaille à l'échelle d'un site). Il faut aussi s'interroger sur la façon dont l'échantillonnage a été réalisé (inventaire, prospection intensive ou pas) et sur les biais de conservation des éléments (CAROZZA *et al.* 2005 : 106-107). Enfin, les archéologues sont confrontés au problème de la détermination d'indicateurs pour élaborer un modèle et à l'estimation du poids accordé à chacun des paramètres étudiés, dans le cas d'un modèle géométrique. En effet, il est important de choisir les paramètres qui sont les plus pertinents pour conditionner la présence de tel objet archéologique (de l'artefact au site) à tel endroit et à un moment donné. Des tests sont effectués pour d'abord évaluer la robustesse de chacun des paramètres et ensuite pour mesurer le degré de corrélation entre eux (vérification de l'indépendance). D'autres tests sont réalisés pour déterminer les seuils de ces indicateurs. Les modèles sont donc le résultat d'essais et d'erreurs. A l'échelle des territoires, les indicateurs concernent les sites :

- leur localisation géographique
- leur relation avec l'environnement en terme de distance et de hiérarchie
- leur nature (habitat, artisanat...)
- leur datation.

A l'échelle d'un site, ce sont les structures ou les artefacts qui portent ces informations.

A la lecture de certains articles dont celui de J.-M. Carozza (CAROZZA 2005), il apparaît que trois types de modèles sont utilisés en archéologie :

- des modèles descriptifs ou graphiques qui permettent d'obtenir une représentation des objets selon leur contexte d'étude ;
- des modèles quantitatifs qui permettent de calculer des indices à partir de critères spatiaux comme les analyses de hiérarchie du peuplement ;
- des modèles prédictifs qui proposent des estimations du potentiel archéologique selon les scénarios choisis (calculs de probabilité).

Cependant, P. Matarasso distingue deux catégories de modèles, ceux qui ont une finalité explicative et de compréhension pure, et ceux qui visent à comprendre « un phénomène complexe pour en modifier le cours pour la recherche d'une séquence de décisions adaptées à la poursuite d'un objectif » (MATARASSO 2000 : 180). Si on suit ce raisonnement, les deux premiers types (descriptifs et quantitatifs) appartiendraient à la première catégorie tandis que les modèles de type

prédictif appartient à la deuxième. Ceci illustre la complexité à établir une typologie des modèles.

D'autre part, la bibliographie montre que l'ensemble de ces modèles porte essentiellement sur l'échelle des territoires ; la ville est mise en relation avec d'autres sites comme un habitat rural. Cette échelle n'est pas celle qui sera développée ici. C'est pourquoi, je me concentrerai sur les modèles mis au point à l'échelle de la ville dans la partie suivante.

Je ne présenterai que les modèles prédictifs car ce sont ceux qui se rapprochent le plus aux objectifs de l'étude.

Un modèle prédictif consiste à effectuer des simulations vraisemblables de l'évolution d'un système ou d'un territoire afin de comparer plusieurs scénarios d'intervention (THÉRIAULT, CLARAMUNT 1999 : 70). Ce type de modèle a été expérimenté en archéologie dans les années 1950 pour étudier les « localisations préférentielles » des sites. Puis, à partir des années 1980, la prise de conscience des contraintes méthodologiques a remis en cause certains facteurs déterministes. La modélisation prédictive devient alors une composante importante de la recherche car elle permet de répondre aux objectifs de l'évaluation du potentiel archéologique d'un site ou d'un territoire (WARREN 1990b : 18 ; CAROZZA *et al.* 2005 : 106-107). L'élaboration de carte du potentiel devient ainsi une base importante de dialogue entre archéologues, aménageurs et collectivités territoriales (BERGER, BERTONCELLO, BRAEMER *et al.* 2005; VERHAGEN 2005).

Notons que les modèles prédictifs utilisent des modèles statistiques (probabilistes ou déterministes) pour pallier le manque d'information. Il faut, comme pour les autres modèles, déterminer les variables jugées déterminantes dans l'implantation d'un site. Une fois ces variables choisies, c'est la méthode statistique qui varie. Certaines sont basées sur les méthodes empiriques (KVAMME, KENNETH 1985 ; KHOLER, PARKER 1986 ; WARREN 1990b ; KRIER 2004). D'autres sont fondées sur des statistiques simples comme le Khi-2 (DAVTIAN 2003) ou des calculs de probabilités (théorie de Bayes) comme la méthode « Weights of Evidence » qui consiste à travailler que sur des sites relevés et à pondérer les variables retenues (VERHAGEN 2007). Il existe d'autres méthodes complexes comme la logique floue, la régression logistique (WARREN 1990a : 90) ou les systèmes multi-agents (TISSOT *et al.* 2005) qui permettent de calculer une estimation à partir de variables environnementales indépendantes mais en supposant posséder une connaissance totale du milieu étudié.

Néanmoins les modèles prédictifs ont aussi des limites liées aux contraintes méthodologiques mais aussi aux contraintes mathématiques (GODARD, LEGAY 1992 : 502). En effet, il est nécessaire qu'un objet soit « stable » pour en déterminer une loi caractéristique. Or nos objets archéologiques connaissent des trajectoires différentes dans le temps et dans l'espace. La

seule façon de détourner ce problème est d'utiliser des outils statistiques non-linéaires et en particulier, de mesurer l'influence des variables pour les pondérer dans le calcul de l'estimation. Enfin, « très peu de projets sont conduits jusqu'à l'étape de validation des sorties de modèles » (CAROZZA *et al.* 2005 : 107).

- *Les modèles spécifiques à la ville*

Pour modéliser l'évolution historique des villes, plusieurs points sont à résoudre :

- la représentation graphique des espaces fonctionnels définis à une période donnée (point, ligne, polygone) ;
- la représentation et la quantification des dynamiques spatiales de l'échelle de l'espace urbanisé ancien à celle du site, en passant par l'îlot. On prend alors en compte la dimension **horizontale** de la ville ;
- la représentation et la mesure de la succession et de l'intensité des activités humaines en un même lieu. Il s'agit ici de la dimension **verticale** de la ville ;
- la représentation et l'estimation du potentiel archéologique (présence ou absence d'activités humaines, présence ou absence d'information) en tenant compte des dynamiques spatiales. Elle **couple alors les dimensions horizontales et verticales** de la ville, soit le volume de sol urbain tel qu'on le définit.

L'étude tente d'apporter des éléments de réponses aux points énumérés ci-dessus. Néanmoins, le choix du corpus et le temps qui m'était imparti ont incité à développer des tests qui concernent les deux derniers points. Je me suis alors inspirée des quelques modèles, graphiques et prédictifs, n'existant que depuis une dizaine d'années, et qui vont être présentés ici.

Des géographes et des archéologues associés aux membres du CNAU se sont regroupés afin de modéliser la forme des villes et leur dynamique en utilisant des modèles géographiques fondés sur la chorématique et la chrono-chorématique (BOISSAVIT-CAMUS *et al.* 2005 ; RODIER, GALINIÉ 2006). La chorématique (BRUNET 1987) permet de décrire l'espace en le décomposant en éléments structurants appelés les chorèmes. « Les chorèmes analysent des phénomènes géographiques généralement sous l'angle de la diffusion, la rupture ou la domination, sans se soucier en premier lieu de la localisation parfaitement exacte de l'objet géographique (alors que la question première de la géographie est précisément où ?) » (FERRAS 1993 : 41). La chrono-chorématique (THÉRY 1990 ; GRATALOUP 1996) consiste à ajouter une épaisseur chronologique par la perception diachronique des archéologues (RODIER, GALINIÉ 2006). L'expérience a été réalisée sur quelques villes des Yvelines (DUFAY 2002) puis a été étendue à d'autres villes à partir

des DEPAVF (Annexe 6). L'objectif final est de comparer les processus de formation de l'ensemble. « Les critères de référence les plus robustes ont été définis à travers trois domaines : degré et nature de l'urbanité, taille relative, centralité. Ils sont fondés sur le postulat que le caractère urbain d'une agglomération s'évalue par les types de fonction qu'elle concentre, sa taille et l'attraction qu'elle exerce au sein d'un réseau d'habitats hiérarchisés. » (BOISSAVIT-CAMUS *et al.* 2005).

Toujours à l'échelle de la ville, d'autres travaux ont été développés depuis une dizaine d'années. Au Laboratoire Archéologie et Territoires de Tours, les archéologues ont mis au point le système ToToPI (Topographie de Tours Pré-industriel) (GALINIÉ, RODIER 2002). Il s'agit d'étudier les relations entre les éléments de la topographie de leur origine à nos jours. Pour cela, des bases de données spatio-temporelles et un SIG ont été élaborés à partir de différentes sources (Annexe 7) :

- les éléments matériels (sol, élévation),
- les mentions écrites,
- les représentations graphiques, vues, plans, photographies.

Chaque élément topographique est considéré comme une unité documentaire dont on connaît la date d'apparition et de disparition, le ou les usages, la taille et la géométrie. Un indice de certitude est affecté pour chacune de ces informations. Ces éléments topographiques appelés « entités fonctionnelles » (EF) possèdent une interprétation fonctionnelle à deux niveaux, signification d'usage et signification urbaine (Annexe 1) (GALINIÉ, RODIER, SALIGNY 2004 ; RODIER, SALIGNY 2007). Les auteurs ont alors proposé une modélisation de ces EF en se référant à la modélisation HBDS (*Hypergraph Based Data Structure*) (BOUILLÉ 1977). Ce type de modélisation « repose à la fois sur la théorie des graphes et hypergraphes ainsi que sur celle des ensembles » (GALINIÉ, RODIER, SALIGNY 2004 : 238). Ce modèle correspond à un système d'emboîtement où un objet simple, une Entité Spatiale (ES), est représenté par un objet géométrique. Les Entités Fonctionnelles (EF), considérées comme des objets complexes, sont composées d'une ou plusieurs ES à un moment donné et selon une fonctionnalité précise. Le système fait qu'une ES peut appartenir à une ou plusieurs EF (Annexe 8). Un premier test est en cours de réalisation dans le cadre de la thèse de B. Lefebvre (LEFEBVRE 2006) à l'échelle d'un quartier et permet de mettre en évidence les formations et les transformations des éléments topographiques étudiés.

D'autres modèles ont été élaborés à une autre échelle celle des réseaux de peuplement ; la ville est considérée comme un site en interaction avec d'autres lieux. On citera les modèles quantitatifs qui tentent d'analyser les dynamiques de construction des territoires et l'interaction

des hommes avec leur milieu environnemental (modèle centre-périphérie, modèle de diffusion, hiérarchie) et qui ont été développés depuis une dizaine d'années dans le cadre de collaborations d'archéologues, d'historiens et de géographes (DURAND-DASTÈS *et al.* 1998 ; VAN DER LEEW, FAVORY, FICHES 2003 ; BERGER *et al.* 2005, GARMY *et al.* 2005 ; THIVET *et al.* 2005 ; ACHARD-COROMPT *et al.* 2006). Ces projets intègrent des paramètres historiques, environnementaux et d'autres paramètres construits comme la « distance-coût » par exemple. L'élaboration de ces modèles suscite certaines réactions car ils comportent des contraintes méthodologiques (biais de prospection, d'échantillonnage, choix de l'échelle d'analyse) (COLLECTIF 2000). Certains de ces modèles se rapprochent vers des modèles de types prédictifs. Mais « ces modèles spatiaux bien que rigides, aident à penser. Leur portée prévisionnelle est souvent limitée et parfois dangereuse » (CHARTIER 1999 : 2).

On remarquera que la modélisation historique des villes se fait soit à l'échelle de ses éléments constitutifs soit à l'échelle d'un territoire (paroisse, région). Les modèles prédictifs existant pour la ville ne proposent que des estimations de la présence de site en horizontal et non pas en vertical. C'est-à-dire, que la modélisation du volume du sol urbain tel qu'il a été défini ici est quasi inexistante (Tours et Bordeaux).

A Tours, une étude sur la plaine alluviale a été réalisée entre 1998 et 2000 par des travaux universitaires en géologie (BLIN 1998 ; TABERLY 1999 ; études dirigées par N. Carcaud, Laboratoire des Sciences de l'environnement et de l'aménagement) et en archéologie (MARLET 2000), dans le cadre du PCR (Programme Commun de Recherche) de Loire moyenne. Une base de données a été établie à partir de sondages géotechniques, géologiques et archéologiques afin de restituer une carte des épaisseurs du dépôt archéologique et une carte du toit des alluvions (chapitre 3).

L'expérience à Lyon est actuellement testée dans le cadre de la thèse de S. Dominique (CDGA – Université Bordeaux I) (DOMINIQUE *en cours*) avec une dominante géologique et géotechnique. Cette thèse est réalisée dans le cadre du projet RIVIERA (Risques en Ville : Equipements, Réseaux, Archéologie).

Une première étape, présentée en partie 2-2-1, a consisté à élaborer une base de données de connaissance du sous-sol à partir d'environ 10000 sondages sur l'agglomération de Bordeaux en suivant une grille d'analyse commune (BREYSSE *et al.* 2005 ; BREYSSE, LANOT, PIETTE 2005).

La deuxième étape consistait à mettre au point un modèle en 3D qui permet de restituer :

- des coupes stratigraphiques selon différents critères (épaisseurs de différentes formations, caractéristiques mécaniques)

- des cartes des risques (calcul de la probabilité d'être dans une formation, calcul de l'erreur de l'estimation, calcul de la susceptibilité des réseaux d'assainissement à l'infiltration des eaux claires parasites)

Les premiers résultats concernant l'archéologie sont très encourageants. Une carte des épaisseurs du dépôt archéologique (appelé « anthroposol » dans le projet) peut être proposée à l'échelle de l'espace urbanisé ancien de Bordeaux. On estime que la distance de corrélation entre les points d'observations est de 500 mètres. Il est aussi possible de réaliser une carte du mur de l'anthroposol<sup>20</sup>. L'une des retombées archéologiques est l'étude de la localisation et de l'évolution des cours d'eau des rivières (Le Peugue et La Devèze) qui se jettent dans la Garonne. Les résultats ont permis de revoir les hypothèses des archéologues sur le réseau hydrographique fournis par le modèle (DOMINIQUE, MARACHE, REGALDO SAINT-BLANCARD *à soumettre*).

Nous sommes confrontés au problème de la représentation des éléments composant la ville et de leur évolution dans la longue durée. Les SIG permettent d'organiser et de structurer les données archéologiques localisées dont on connaît la nature, la fonction et la datation. Il est alors possible d'étudier, quantifier et représenter les dynamiques des données spatiales au sein de la ville mais aussi à l'échelle de réseaux de villes à l'aide de modèles qui sont mis au point à partir de critères descriptifs (localisation, nature, date) et de critères construits (distance, condition de localisation). Ces modèles pour la ville sont récents, peu développés (Tours et quelques collectivités) et s'intéressent plus à la dimension horizontale que verticale de la ville. L'étude s'inscrit dans ce mouvement et son originalité porte sur la prise en compte du potentiel informatif en 3 dimensions.

Un modèle de type prédictif, avec toutes les précautions qu'il faut prendre, semble être le mieux adapté pour l'évaluation du potentiel informatif d'une ville car il pourra proposer une estimation de la présence de site ou de structures archéologiques mais aussi de la qualité du dépôt. **L'étude repose essentiellement sur ce type de modèle et les tests seront orientés sur la détermination des paramètres discriminants, le calcul d'indices et l'estimation de l'épaisseur du dépôt archéologique.**

---

<sup>20</sup> Les géologues dissocient le mur de l'anthroposol du toit du niveau naturel. Pour eux, le toit du niveau naturel correspond à une restitution idéale qui ne prend pas en compte les phénomènes d'érosion lié à l'anthropisation. En archéologie, l'objet d'étude n'est pas le même alors on conservera le terme général de toit du niveau naturel.

## **2-4- Conclusions**

Un schéma récapitulatif reprend l'ensemble de la méthodologie proposée pour répondre aux objectifs de l'évaluation (Pl. 5). On retiendra que les spécificités de l'étude sont :

- la mise en œuvre de différentes sources de données,
- l'interaction entre l'échelle de la ville et l'échelle du site,
- la prise en compte des contraintes topographiques pour estimer l'épaisseur et caractériser le volume du sol urbain,
- la modélisation du volume du sol urbain en 3 dimensions.

## **Chapitre 3- Présentation du terrain d'application : la ville de Tours**

La ville de Tours a été choisie comme terrain d'application pour mettre en pratique les méthodes pour répondre aux objectifs de l'évaluation. On considère qu'elle est représentative du phénomène urbain observé en France et en Europe du Nord Ouest par ses modes de formations de l'antiquité à nos jours (origine antique, phases d'extension et de rétraction). Par ailleurs, elle a été sélectionnée pour des questions pratiques (disponibilité de la documentation et proximité pour tester le PANDA).

Par ailleurs, un corpus de comparaison a été constitué dans d'autres lieux afin de confronter les observations archéologiques et géotechniques à l'échelle du site (à Cinq-Mars-La-Pile (37) et à Lyon) et afin de comparer les résultats de la prospection au PANDA avec la prospection géophysique en milieu rural (Stolpie en Pologne).

Je présenterai l'état des connaissances sur le contexte géologique et le contexte historique de Tours, puis l'état de la recherche archéologique dans lequel s'insère l'étude. Enfin, j'aborderai les différents sites de comparaisons.

### **3-1- Présentation du contexte géologique et historique de Tours**

La zone d'étude concerne l'espace urbanisé ancien. Il convient d'abord de présenter la nature géologique et hydrographique des éléments et notamment, la Loire, qui structurent la ville de Tours. Ensuite, une synthèse sur la topographie historique sera présentée. Enfin, les principales questions en suspens seront abordées.

#### **3-1-1- Le contexte géomorphologique de Tours**

Il est nécessaire de faire un état des connaissances sur les caractéristiques physiques et géomorphologiques du site de Tours afin de comprendre les interactions entre les habitants de la ville et leur milieu. En effet, le questionnement repose sur l'effet de contrainte de l'un sur l'autre dans la longue durée. C'est ce qui fait d'ailleurs l'objet de recherches pluridisciplinaires dans le cadre du programme « Interaction hommes/milieus dans le bassin versant de la Loire (Fin du Tardiglaciaire – Epoque industrielle) » dirigé par J. Burnouf et M. Garcin, et notamment, celui du PCR sur la géoarchéologie de la Loire Moyenne (CARCAUD, GARCIN 2001 ; CARCAUD 2002). C'est dans cette optique que s'inscrit l'étude.

Il convient, d'abord, de présenter le contexte géographique et géologique de la plaine alluviale de Tours puis, ensuite, d'aborder les travaux de géologues et d'archéologues qui portent sur la définition du modelé de la plaine alluviale.

- *La plaine alluviale du val de Tours*

- Le val de Tours

La ville de Tours se trouve dans une plaine alluviale, le val de Tours. Elle est comprise entre les lits mineurs de la Loire et du Cher, à une vingtaine de kilomètres en amont de leur confluence (Pl. 6).

Un val est défini par deux unités morphodynamiques : un bourrelet de rive et une dépression latérale (DION 1934). Ici, le bourrelet de rive s'étend le long de la Loire et en arrière de ce bombement, une dépression latérale draine les affluents du fleuve. Leur confluence avec la Loire est alors bloquée par le bourrelet et tend à se concentrer dans les interstices laissés par ces bombements (NOIZET 2003 : 66). Cependant, la distinction entre ces deux unités n'est pas aussi nette dans le val de Tours du fait qu'il y a une succession plus complexe de microreliefs (NOIZET 2003 : 67).

La carte réalisée par l'ingénieur militaire Siette, au 17<sup>e</sup> siècle, permet de donner un aperçu de la ville concernant le réseau hydrographique et les aménagements réalisés, au moins depuis le Moyen Age (Pl. 7). D. Dubant, dans sa thèse, propose une restitution de cette carte que j'ai tenté de géoréférencier à l'aide d'un SIG (DUBANT 1993a, T2, pl.7 : 19 ; Pl. 8). H. Noizet en a également présenté une dans sa thèse (NOIZET 2003 : 67 ; Annexe 9).

Ainsi, la carte de Siette met en évidence une zone basse au sud de la ville, appelée « varenne », zone humide principalement exploitée en prairie. Dans les bandes dépressives coulent un réseau de « boires » qui sont des chenaux recevant les eaux des crues de la Loire d'est en ouest. On connaît aussi la présence d'un cours d'eau, la Dolve, réutilisé en fossé défensif au 17<sup>e</sup> siècle, ainsi que l'existence d'autres boires (CHEVALIER 1975, DUBANT 1987) qui, comme le **ruau\*** de l'Archevêque, se jettent dans le ruau Sainte-Anne. Ce dernier est orienté sud-nord et fait une liaison entre le Cher et la Loire. Il serait situé sur une faille (MACAIRE, MIGNOT 1979 ; DUBANT 1987 ; Pl.8, Annexe 10). En tout cas, son tracé rectiligne (BURNOUF, CARCAUD 1999 ; NOIZET 2003) laisse penser que ce cours a été forcé par les sociétés. Il est fermé en 1777.

- La nature géologique du substratum

La plaine alluviale commune à la Loire et au Cher est profondément entaillée dans un plateau crétacé recouvert de formations tertiaires très érodées (ALCAYDE *et al.* 1990, LABRUYÈRE

2002). A Tours, les alluvions du quaternaire (graveleuses, sableuses et argileuses) reposent sur du calcaire du crétacé.

Par ailleurs, le substratum du val de Tours (coteau de la Loire) est composé de haut en bas (Pl. 9, Annexe 11) :

- une formation détritique sablo-argileuse du Miocène (Tertiaire)
- le calcaire lacustre de Touraine du Ludien supérieur, Stampien (Tertiaire)
- les sables argileux de l'Eocène supérieur (Tertiaire)
- les argiles à silex et la craie Villedieu du Senonien (Secondaire)
- le tuffeau jaune du Turonien, dans lequel est établie la plaine alluviale (Secondaire).

A Tours, les sables alluviaux ainsi que les différents calcaires (lacustres, tuffeau) sont les matériaux utilisés préférentiellement dans les maçonneries depuis l'Antiquité (FONDRILLON 2001). Les analyses effectuées sur des prélèvements des sites 6 et 11 ont montré leur appartenance aux alluvions de la Loire et non du Cher (DUBANT 1993a : 119).

#### • *Le modèle de la plaine alluviale*

Plusieurs études ont été entreprises depuis le 18<sup>e</sup> siècle sur l'évolution de la plaine alluviale de Tours. Des hypothèses ont été posées sur la nature, la forme et l'épaisseur des alluvions et du substratum, avant et pendant l'occupation de Tours. Depuis, certaines d'entre-elles ont été remises en cause, notamment par les travaux en archéologie (GALINIÉ 1981 ; DUBANT 1987 ; DUBANT 1993a ; AUDIBERT 1998, MARLET 2000 ; NOIZET 2003) et en géologie (BURGÉAP 1993 ; BLIN 1998 ; TABERLY 1999 ; GAY-OVEJERO, MACAIRE, SEIGNE à paraître). H. Galinié, D. Dubant puis H. Noizet ont présenté l'historiographie dans leur thèse. Néanmoins, certains points sont repris ici car ils sont nécessaires à la compréhension de l'étude et fournissent des éléments de base aux analyses. Les sites archéologiques ainsi que les zones d'études énumérées dans cette partie sont présentés sur un plan pour faciliter la lecture (Pl. 10).

Dès le 18<sup>e</sup> siècle, les chercheurs ont proposé des hypothèses en présentant la plaine alluviale comme un milieu favorable pour l'implantation de Tours. Ils mettent en avant le fait que le sous-sol de Tours est constitué d'alluvions de la Loire et que l'homme produit une épaisseur non-négligeable de sol (DUVERGÉ 1774 : 9-10 ; CHEVALIER, CHARLOT 1858 : 120-133).

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, d'autres émettent l'hypothèse que la ville est installée sur une arête rocheuse (CHAUVIGNÉ 1909 : 5-6 ; LHÉRITIER 1922). R. Dion propose qu'à la place d'affleurements calcaires, il y a la présence de « monticules d'alluvions anciennes » (DION 1961) que l'on appelle des « montilles ». Pour lui, la ville serait construite sur trois « buttes », un à

l'emplacement de la cathédrale et de l'amphithéâtre, un autre, à l'emplacement de la basilique Saint-Martin et enfin, à l'emplacement de l'abbaye de Saint-Julien (DION 1978 : 202). C. Lelong considère que la butte de la cathédrale comme « un tertre naturel, chicot calcaire coiffé d'alluvions anciennes, mais empâté de sols détritiques sur une épaisseur de 5 m environ » (LELONG 1976). Il signale que le tertre de St Julien n'est pas naturel mais résulte d'une accumulation de sols détritiques sur 5 mètres environ de hauteur (entre 46,87 m et 51,39 m) (Annexe 12).

Les fouilles archéologiques menées depuis 1973 à Tours permettent d'apporter des preuves sur la constitution du sous-sol. H. Galinié fait déjà le point dans sa thèse (GALINIÉ 1981 : 36) : « l'ensemble de la ville antique et médiévale est située sur un vaste plateau dont l'étendue totale reste inconnue ; un minimum de 60 ha peut-être reconnu au vu de la dispersion des habitats inventoriés. Ce plateau est peut-être couronné à l'est par une légère éminence (la butte de la cathédrale). Il présente une faible inclinaison vers le sud-est au droit de la cathédrale... Les microreliefs qui peuvent être observés aujourd'hui sont anthropiques résultant de zones denses de peuplement et d'activités ». A propos de la cathédrale, il ajoute « les 45 m NGF relevés sur le site du château semblent infirmer l'hypothèse du chicot calcaire, avancée par Lelong et celle de la terrasse alluviale de Dion. En tout cas, elle réfute définitivement le sondage sur lequel s'appuie Lelong pour trouver à la tour de Guise, à 20 m des fouilles du site 3, le calcaire à 47 m. pour le reste, il est préférable de garder une prudente réserve, car il se peut que la butte se trouve à quelques dizaines de mètres plus au sud, que le site 3 soit localisé sur la berge du fleuve » (GALINIÉ 1981 : 39).

En 1993, les services techniques de la ville de Tours a demandé au BURGÉAP, un bureau d'étude, de réaliser une étude sur la variation de la nappe alluviale de la ville de Tours. En effet, les nouvelles constructions immobilières dans la ville sont confrontées à un problème technique qui est dû, en partie, à la faible profondeur de la nappe phréatique. Ce rapport nous apporte des informations concernant les alluvions à Tours (BURGÉAP 1993).

Les alluvions sont décrites comme « graveleuses, sableuses et argileuses ». Elles se trouvent sous quelques mètres de remblai au droit de la Ville de Tours et aux abords de la Loire. Leur épaisseur varie de 4 mètres dans le secteur de Saint-Pierre-des-Corps, jusqu'à 6-7 mètres dans certains secteurs de la ville, le long du Cher en particulier. Elles sont formées de niveaux limoneux au sommet (de perméabilité médiocre), la partie moyenne est argilo-sableuse et à la base, avec une répartition discontinue, on trouve des alluvions sableuses enrichies en graviers et galets (BURGÉAP 1993 : 2). La nappe alluviale s'étend de la rive droite de la Loire jusqu'au delà de la rive gauche du Cher sur une bande de 4,5 km de largeur environ. Une carte des épaisseurs de

l'ensemble alluvionnaire a été réalisée ; elle montre une épaisseur variable de ces alluvions (Annexe 13). Dans la zone d'étude, elle atteint 13 mètres dans le secteur de la place de Résistance.

En 1993, toujours, D.Dubant, dans sa thèse, a étudié l'évolution de la plaine alluviale au moins du 17<sup>e</sup> siècle à aujourd'hui, en comparant la carte de Siette vers 1619 (Pl. 7), la carte de *Tours et ses environs*, vers 1770 (Annexe 14 et 57) et le plan de Tours de 1843 (Annexe 15) (DUBANT 1993a, T2, pl.4, pl.7 et pl.11). Il apparaît que la topographie a peu changé entre le début du 17<sup>e</sup> s. et la moitié du 19<sup>e</sup> s. malgré les épisodes d'inondations (DUBANT 1993a : 67-71). On observe seulement de nouveaux aménagements humains (levées, routes, canal du duc de Berry).

Il présente également un plan du nivellement de la plaine alluviale au début du 20<sup>e</sup> siècle qui met en évidence les levées et l'espace urbanisé ancien (DUBANT 1993a, pl.16 : 39-42). Il propose aussi un modelé de la surface des sables alluviaux en plan (en données ponctuelles !) et en coupe (DUBANT 1993a, pl.17 : 43-44 ; DUBANT 1993a : pl.21 : 51-52). Cette coupe a d'ailleurs été actualisée par A.M. Jouquand, à partir de des résultats de fouille du site 14 (JOUQUAND 1996). L'ensemble de ces plans et coupes se retrouve en annexe (Annexe 16, 17, 18 et 19).

Enfin, il considère que le réseau des boires est situé, en partie, dans une zone basse, au sud-est de la ville urbanisée, sur un chenal fossile de la Loire (DUBANT 1993a, pl.73 : 155-156). En effet, il a étudié les traces d'un paléochenal sur les sites 023 (Palais des Congrès Vinci) et sur le site 11 (Nouvelle République). De plus, en étudiant les crues qui ont eu lieu entre 1504 et 1789, il a établi une carte des zones inondées qui permet de localiser plus précisément le réseau des boires (DUBANT 1993a, pl.77 : 163-164).

A partir de 1998, les résultats obtenus par les étudiants en géologie de l'Université d'Angers (BLIN 1998 ; TABERLY 1999) montrent que la plaine alluviale se surélève par l'accumulation de sédiments quand le fleuve se canalise le long du coteau nord (BLIN 1998 : 90). Cependant, la dénivellation maximale entre la zone haute et la zone basse de l'altitude des alluvions sur le bourrelet de rive dépasse à peine 2 mètres, ce qui veut dire qu'il n'y avait pas de points insubmersibles comme le proposait R. Dion (TABERLY 1999 : 28 ; MARLET 2000 : 15-16).

Un de leur objectif était de détecter la trace de paléochenaux par la géomorphologie. Plusieurs éléments sont utilisés pour poser des hypothèses de tracés :

- les surcreusements dans le substrat
- la présence d'incisions dans les corps alluviaux
- les épaisseurs d'argile déposées.

C. Blin a démontré que la Loire a migré du sud vers le nord en délaissant les anciens chenaux dans lesquels se sont accumulées les argiles à partir des estimations du toit du substratum et des épaisseurs des argiles.

D'abord, à partir des observations géologiques recueillies ponctuellement dans la plaine alluviale (issues de la banque de sous-sol du BRGM), une carte du toit du substratum et une carte des épaisseurs d'argiles ont été réalisées à l'aide du logiciel GDM (BRGM©) (Annexe 20 et 21). Le modelé du toit du substratum met alors en évidence des points hauts et bas interprétés comme des seuils\* et des mouilles\* qui laisse penser à un style en tresses (BLIN 1998 : 90-91). Il a été conclu que la Loire avait un tracé en tresses ou à méandres avant l'occupation de l'homme pour, ensuite, emprunter un chenal relativement rectiligne le long du coteau nord. L'hypothèse est que les « anciennes tresses » ont pu être occupées par des affluents comme le Cher ou le ruau de l'Archevêque.

D'autre part, grâce à la présence d'incisions et aux épaisseurs d'argile, 12 tracés de paléochenaux ont été proposés (BLIN 1998 : 88 ; TABERLY 1999 : 38-39) (Annexe 22). Ainsi, en période de crue, les bras de la Loire se remplissent d'eau. Au moment où ils s'assèchent, les argiles se déposent par décantation.

Notons, pour la suite de l'étude, que ces estimations sont présentées à l'échelle de la plaine alluviale. La comparaison de ces résultats avec les données archéologiques (échelle du site) doit être réalisée avec précautions.

Ensuite, en 2000, O. Marlet, dans le cadre de sa maîtrise sur les paléochenaux de Tours (MARLET 2000), a repris les travaux de C. Blin et C. Taberly en injectant des informations provenant des fouilles archéologiques pour affiner les estimations sur le toit du substratum mais surtout des alluvions (Annexe 23). Il a notamment étudié les paléochenaux découverts sur les sites 11, 023 et 024 de Tours (Annexe 24) et étudiés par D. Dubant (DUBANT 1993a) afin de les confronter aux observations géologiques. Les études palynologiques et archéologiques ont montré que leur remplissage a débuté à la même période (v 9000 BP) et est de la même nature ; les tronçons, au moins des sites 11 et 023, appartiendraient au même paléochenal (MARLET 2000 : 29). Cependant, C. Taberly les attribue à différents corps géologiques. Ces études montrent la difficulté d'appréhender le réseau hydrographique ancien seulement à partir de points d'observations.

Par ailleurs, il a réalisé un plan du réseau hydrographique à l'aide d'un SIG qui localise, entre autres, le ruau Ste Anne, le ruau de l'Archevêque et la Dolve (Annexe 25). Le problème est de pouvoir restituer l'emplacement des paléochenaux et le réseau des Boires dans l'espace urbanisé ancien.

En 2003, H. Noizet, avec ses travaux de thèse, apporte de nouveaux éléments sur la plaine alluviale en émettant des hypothèses sur des tracés de boires dans sa zone d'étude, le quartier de Saint Martin. Elle s'appuie sur les analyses morphologiques, faites à partir du cadastre

napoléonien, en étudiant l'orientation parcellaire, pour déterminer des entités qui auraient fixé le réseau viaire (GALINIÉ *et al.* 2003a).

Dans un premier temps, H. Noizet pose comme hypothèse que la forme mise en évidence, à proximité de l'enceinte du 14<sup>e</sup> s., est une boire (NOIZET 2003 : 552- 570, Annexe 112) (Annexe 26). Les sources écrites (CHEVALIER 1975) et archéologiques (DUBANT 1993a, pl.77 ; DE FILIPPO 2001<sup>21</sup>) sont favorables à son hypothèse et, lui permettent, de proposer que la boire « Saint Venant » aurait eu deux états. En effet, au début du 14<sup>e</sup> s., la boire est associée au système défensif de l'enceinte. Ainsi, elle est intégrée, en partie, à l'intérieur de la ville. Puis, vers le milieu du 14<sup>e</sup> s., la boire est repoussée vers le sud en faisant ressortir les eaux internes par l'intermédiaires de toux (conduites maçonnées, fermées par des grilles et prolongées par des chenaux de bois) vers la boire. De plus, les textes montrent que la boire Saint Venant est active au début du 11<sup>e</sup> s. et qu'elle devient une voie navigable au 15<sup>e</sup> s., en période de crue. En outre, elle a mis en évidence, à l'aide de sondages géotechniques et des données archéologiques, que la boire Saint Venant reprend la forme fossile du paléochenal, en tout cas, au niveau du site 11 et 69 (NOIZET 2003 : 567- 570).

Dans un deuxième temps, elle pose comme hypothèse qu'une autre forme, située au nord du *castrum* de Saint Martin, serait un paléochenal qui aurait été recreusé pour former un fossé défensif du *castrum* au 10<sup>e</sup> s. (NOIZET 2003 : 571-572 ; Annexe 27). Ce fossé servait d'égout aux 10<sup>e</sup> – 11<sup>e</sup> s. (d'après fouille du site 021) et est ensuite abandonné pour être rebouché avant la fin du Moyen Age. Par ailleurs, on observe une épaisseur importante d'argile de part et d'autre du *castrum* : peut-être que le recreusement d'un paléochenal plus ancien lors de l'aménagement du fossé expliquerait la disparition du dépôt argileux (NOIZET 2003 : 572).

H. Noizet pousse plus loin l'analyse en émettant une autre hypothèse sur le lien du fossé avec la Loire au niveau de la rue Maufumier : aux 10<sup>e</sup> – 11<sup>e</sup> s., la Loire alimenterait le fossé, puis à partir du 12<sup>e</sup> s., lors de sa désactivation, les eaux usées seraient évacuées vers la Loire. Peu de preuves corroborent ces hypothèses. Seules des fouilles dans ce secteur permettraient de les vérifier.

Pour finir, en 2006, à l'occasion de l'étude de l'amphithéâtre (J. Seigne et B. Lefebvre – LAT), des sondages carottés ont été réalisés pour connaître l'épaisseur du dépôt archéologique. L'amphithéâtre est situé sur un point haut de la ville (environ 57 m NGF) et les observations archéologiques estiment le sol de l'arène à 47,10 m NGF (DUBOIS, SAZERAT 1974 ; DUBOIS, SAZERAT 1977). Il apparaît que l'amphithéâtre antique est construit sur une butte. L'étude

---

<sup>21</sup> « les fouilles archéologiques menées à l'hôpital de Clocheville, dans un secteur qui se trouve entre les deux tracés de la forme proposée ci-dessus, confirment notre interprétation : en effet, la fouille a révélé que le site protohistorique se trouvait sur une sorte d'île, entre plusieurs boires » (NOIZET 2003 : 554)

géologique a pour objectif d'en caractériser la nature et l'origine, naturelle ou anthropique (GAY-OVEJERO, MACAIRE, SEIGNE à paraître).

Deux carottages ont été effectués par les géologues du GéEAC (Université de Tours) à l'intérieur de l'amphithéâtre à proximité de son mur d'enceinte (12 rue Général Meunier) et au niveau de l'arène (5 rue Manceau). Leurs descriptions ont été faites en relation étroite avec les archéologues. Les logs sont présentés en annexe (Annexe 28). Les résultats ont été croisés avec les observations archéologiques de l'abbé Sazerat et montrent que l'amphithéâtre a bien été fondé sur une butte naturelle dont le sommet se situerait au moins à 50,73 m voire 51,60, selon les observations de Sazerat. « Cette butte aurait été entaillée de façon à construire les différents gradins de l'amphithéâtre jusqu'à son arène située vers 47,10 m NGF » (GAY-OVEJERO, MACAIRE, SEIGNE à paraître). La butte d'origine fluviatile est interprétée par les géologues comme une montille.

Pour conclure, les travaux des géologues (DENIZOT 1935 ; GIGOUT, HOREMANS, RASPLUS 1972 ; MACAIRE 1981 ; RICHARD 1987) ont montré que les montilles pourraient comprendre « une phase de sédimentation pléniglaciaire, sans doute développée jusqu'au début du Tardiglaciaire alors que le niveau de la Loire était nettement plus élevé (3-4m) qu'aujourd'hui. » (GAY-OVEJERO, MACAIRE, SEIGNE à paraître).

#### • *L'évolution du trait de rive de la Loire*

Des gains dans le fleuve ont été attestés à différents endroits de la ville depuis le 1<sup>er</sup> s., vers le nord, et ont fait l'objet de recherches, notamment sur la partie ouest de la ville (GALINIÉ *et al.* 2004). Des historiens et des archéologues ont également réalisé des études sur la relation de la ville et ses habitants avec la Loire dans le cadre du PCR « Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges » (BABONAUX 1970 ; BOISSEUIL 1992 ; ASSELIN 1998, DUBANT 1993a ; AUDIBERT 1998, BOUQUET 1998 ; DURRENBERGER 1999 ; LAGADIC 1999 ; VANNIER 1999 ; GALINIÉ, RODIER 2001, MARLET 2000 ; SERIER 2002 ; NOIZET 2003 ; GALINIÉ *et al.* 2004 ; NOIZET, CARCAUD, GARCIN 2004). En effet, on se demande comment les groupes sociaux percevaient et géraient la Loire selon les périodes.

Ainsi, les sources archéologiques, écrites et planimétriques ont été mobilisées pour étudier l'évolution du trait de rive de la Loire. Il s'agit de repérer les vestiges ou les traces fixés dans le parcellaire qui peuvent être interprétés comme des aménagements de berge ou des ouvrages de franchissement. Ces indices localisés et datés, depuis l'antiquité jusqu'au 18<sup>e</sup> s., ont parfois été accompagnés d'un exhaussement artificiel du niveau de sol (remblais) (GALINIÉ *et al.* 2004 : 128). Certains d'entre eux sont réalisés suite à une modification du cours ou du régime du fleuve qui a, en fait, engendré la formation de grève sujette à inondation.

Les fouilles archéologiques des sites 06, 3, 4, 8 et 16 ont montré divers aménagements (terrassement, quais, ponts) sur les berges de la Loire. Les sources écrites et planimétriques nous renseignent sur d'autres aménagements (ponts, moulins, digues, ouvrages de dérivation) ainsi que sur l'emplacement des grèves de la Loire (GALINIÉ, RODIER 2001 ; GALINIÉ *et al.* 2004). Ainsi, des hypothèses sur le tracé de la rive de la Loire sont proposées et sont toujours en cours d'actualisation (Annexe 29). On observe d'abord des gains minimes à l'ouest et à l'est de la ville au 1<sup>er</sup> s., puis, aux 17<sup>e</sup>-18<sup>e</sup> s., au centre, lors des travaux d'urbanisme (construction de l'enceinte et du pont). Enfin, des gains plus importants ont été révélés pour la partie ouest de la ville entre le 9<sup>e</sup> et le 11<sup>e</sup> siècle (150 à 200 mètres). Il s'agit de l'accroissement de l'agglomération de Châteauneuf vers le nord puisque l'activité se concentrait dans cette zone ouverte vers l'extérieur (GALINIÉ *et al.* 2004 : 135).

### • Conclusion

Le sol naturel de Tours est composé d'alluvions récentes (sables et graviers), d'origine ligériennes, qui reposent sur des argiles d'une épaisseur variable dont le substrat est du calcaire du crétacé (craie).

On retiendra que plusieurs éléments structurent la plaine alluviale de Tours sur la longue durée (Pl. 11):

- au nord, la Loire, dont le tracé se fixe partiellement à la fin du Tardiglaciaire et s'artificialise lors de la construction de levées depuis les 11-12<sup>e</sup> s. le long du coteau nord (GALINIÉ dir. 2007) ;

- à l'extrême sud, le Cher, qui réutilise un ancien chenal de la Loire le long du coteau sud ;

- entre la Loire et le Cher, au sud de l'espace urbanisé de Tours, le ruau de l'Archevêque qui perdure jusqu'au 19<sup>e</sup> s. Son tracé a peut-être capturé un paléochenal ancien. Il est localisé dans la zone des Varennes, une zone humide, pour laquelle on ne possède pas encore d'étude spécifique ;

- au nord du ruau de l'Archevêque, la Dolve, réutilisée comme fossé défensif au 17<sup>e</sup> s. ;

- à l'ouest, le ruau Sainte-Anne, qui relie le Cher à la Loire et qui reçoit les eaux des différents ruaux ; son origine est incertaine (faille et/ou canal volontaire) faute d'analyses plus poussées. Il est situé à l'emplacement de l'actuel jardin botanique ;

- à l'est le canal du Berry construit entre 1809 et 1841 et démantelé en 1968 lors de la construction de l'autoroute A10 ;

- des paléochenaux, dans l'espace urbanisé ancien (début comblement vers 10000 BP - fin comblement vers 3400 BP), qui restent des zones humides à la Protohistoire. A partir de l'Antiquité, la construction d'ouvrages (temple, thermes) est adaptée à ce milieu (pieu en bois) ;

- une zone des boires au sud et à l'est de la ville, réutilisées comme dépotoir dès le Haut Empire et en fossés défensifs au Moyen Age ; elles se remplissent en cas de crue. Ce réseau de boires peut se superposer au tracé des paléochenaux (DUBANT 1992b : 139-141 ; NOIZET 2003 : 552-582). Notons, que d'après les traces observées, ce réseau peut présenter des méandres (MARLET 2000 : 30).

Ainsi, ces différents éléments ont conditionné l'implantation humaine depuis le 2<sup>e</sup> s. av. JC. En effet, la présence du fleuve et celle de zones humides représentent à la fois une ressource à exploiter et une contrainte pour les installations humaines (GALINIÉ dir. 2007) . En outre, des aménagements ont été construits pour se protéger et contrôler le cours du fleuve. Par ailleurs, des gains dans le fleuve du 1<sup>er</sup> au 18<sup>e</sup> s. ont été observés surtout dans l'ouest de la ville, zone mieux documentée.

Maintenant que le cadre géologique et hydrographique est posé, une synthèse sur la topographie historique de Tours est présentée afin de comprendre l'évolution spatio-temporelle des composantes socio-spatiales et de définir l'espace urbanisé ancien

### 3-1-2- La topographie historique de Tours

La topographie historique de Tours a été présentée à maintes reprises dans les principaux travaux universitaires (CHEVALIER 1975, GALINIÉ 1981, GALINIÉ, RANDOIN 1979a ; GALINIÉ 1981 ; PIÉTRI 1983 ; CHEVALIER 1985; MABIRE-LA-CAILLE 1988, PIÉTRI, BIARNE 1987 ; MABIRE-LA-CAILLE 1988 ; DUBANT 1993a ; GALINIÉ 2000, NOIZET 2003 ; FONDRILLON *en cours*), abordée dans les rapports de fouilles (cf 3-2) et révisée, encore tout récemment dans l'ouvrage, dirigé par H. Galinié, sur *Tours antique et médiéval, lieux de vie et temps de la ville* (GALINIÉ dir. 2007). Les chercheurs, historiens et archéologues, ont alors utilisé les sources archéologiques, les sources écrites et planimétriques disponibles pour restituer les données historiques et matérielles de la ville depuis, au moins l'Antiquité.

Je présenterai une synthèse de la topographie historique en gardant les informations utiles en faisant référence à ces différents travaux. L'objectif est de dégager les différentes

composantes de Tours à différentes périodes pour les cartographier, de noter les phases d'extension et de rétraction et, aussi, de repérer les éléments qui fixent le tissu urbain

- *2<sup>e</sup> siècle av. JC*

Le site de Tours a été occupé avant la conquête romaine dans sa partie ouest (Annexe 30). D'une part, un établissement gaulois a été découvert, en 2001, à l'Hôpital Clocheville (site 67). Ce site complexe, daté entre 180 et 120 av. JC, a révélé la présence d'activités artisanales, d'un secteur de production et d'une zone domestique, d'une voie, de fossés (défensif?) et beaucoup de céramique. Même si il n'a pas connu de postérité, le site pourrait correspondre à une agglomération gauloise (GALINIÉ dir. 2007). D'autre part, du mobilier de tradition gauloise a été retrouvé sur différents sites, notamment sur le site de la rue de la Victoire (site 06) et de Saint-Martin (site 7). La question d'une origine gauloise reste énigmatique : un hiatus de près de 2 siècles existe entre la fin d'occupation du site 67 et les premiers vestiges du Haut-Empire (v. 20 ap JC)

- *1<sup>er</sup> – 2<sup>e</sup> siècle ap JC*

Tours, *Caesarodunum*, est fondée dès le début du 1<sup>er</sup> siècle ap. JC. Elle devient le chef-lieu de la cité libre des Turons de la province Lyonnaise. C'est une ville ouverte dont la superficie est de l'ordre de 40 à 60 ha. La ville semble suivre un schéma orthogonal dont il reste peu de vestiges mais qui est adapté à la rive gauche du fleuve (GALINIÉ 1985 : 14-15) (Annexe 31). L'occupation est plus ou moins dense selon les lieux et les limites restent encore floues. Des aménagements sur la rive du fleuve ont été découverts ainsi que la présence d'un pont, daté vers 40-50, qui débouche, sur le centre civique au centre de la ville. En effet, les vestiges du pont antique (pieux, culée) ont été mis au jour lors des sécheresses dans le lit de la Loire en 2000 et 2003 (SEIGNE 2001 ; NEURY, SEIGNE 2003) puis à l'occasion de la fouille de l'abbaye de Saint-Julien en 2003 (site16 ; GALINIÉ *et al.* 2003c).

- L'espace public

L'emplacement du centre monumental, et notamment le *forum*, de Tours a fait l'objet de nombreuses suppositions. Il a d'abord été situé entre l'amphithéâtre et la Loire, dans la deuxième moitié du 1<sup>er</sup> s., à l'est de la ville, (PIÉTRI 1983 : 342), sous l'actuelle place Plumereau et l'église Saint-Pierre-Le-Puellier (MABIRE-LA-CAILLE 1988 : 271), puis, plutôt, au centre de la ville, là où ont été découverts un temple ainsi que des thermes monumentaux bâtis vers 70-80. De nouvelles hypothèses sur la localisation d'un forum ont été retenues depuis (GALINIÉ dir. 2007).

Par ailleurs, l'existence de plusieurs monuments (temples) est attestée par le réemploi de blocs architecturaux dans les fondations du *castrum* du Bas-Empire. (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 18 ; GALINIÉ 1985 : 15). D'autres thermes viennent d'ailleurs d'être réinterprétés comme édifice public sur le site du château (site 3).

#### - L'espace privé

Au centre de l'espace urbanisé, des maisons de faibles dimensions s'organisent suivant un parcellaire morcelé, tandis qu'à la périphérie, des *domus* plus vastes ont été découvertes (PIÉTRI 1983 : 343). Au début du 1<sup>er</sup> s., les bâtiments étaient construits en matériaux légers (bois, torchis, terre crue) reposant sur des solins de pierre. Puis, à partir des années 30, ils furent édifiés en pierre, ce qui a permis de fixer le paysage urbain (GALINIÉ dir. 2007). Les reconstructions et les modifications de plans des maisons privées témoignent d'une activité intense et régulière qui est à l'origine de l'exhaussement du dépôt archéologique, estimé entre 1 et 2,50 m (GALINIÉ 1985 : 16).

#### - Les limites de la ville ouverte

D'une part, les limites de la zone urbanisée sont définies par l'emplacement des nécropoles du 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> s. (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 19 ; PIÉTRI 1983 : 340-341) : à l'est, le long de l'axe principal est-ouest (rue Blanqui) ; au sud, à l'emplacement de la gare, sur une distance de 600 mètres. Par ailleurs, la ville est limitée au nord par le fleuve. Enfin, la limite ouest est difficile à déterminer faute d'indices ; on la situe au niveau de la rue de la Victoire (site 8).

#### • 3<sup>e</sup> – 4<sup>e</sup> siècles

A partir de 200, le phénomène d'urbanisation s'arrête et le processus de rétraction s'amorce au moment des troubles au sein de la Gaule. La brutalité de ces invasions n'apparaît pas clairement sur les sites qui ont été fouillés et est remise en cause. Nous possédons peu d'informations concernant la désertion successive des sites d'habitats<sup>22</sup> sauf dans la partie nord-est de la ville, la Cité. Cette zone haute semble être le lieu le mieux adapté à l'érection d'un système défensif. D'abord, l'amphithéâtre est fortifié au 3<sup>e</sup> s et des fossés défensifs sont creusés autour lors de la construction du *castrum* antique (GALINIÉ 1985 : 17). Ensuite, la ville est enceinte d'un rempart qui intègre l'amphithéâtre dès la fin du 4<sup>e</sup> s, sur une surface de 9 ha. Un nouveau pont est

---

<sup>22</sup> « Sont affecté de façon précoce, semble-t-il vers 180-200, les sites 8, 5, 08, 9, 02, 11. Le sont dans le courant du III<sup>e</sup> siècle, les sites 12, 10, 7,1. » (GALINIÉ 1997)  
Galinié H. - Tours de Grégoire, Tours des archives du sol, in: GAUTHIER, GALINIÉ 1997: 65-80)

construit en direction de ce *castrum* ; ce qui matérialise le déplacement vers l'est du centre de gravité de la ville (GALINIÉ dir. 2007).

C'est à partir du 4<sup>e</sup> s. que Tours se christianise avec la construction d'édifices religieux par les évêques. Le premier d'entre eux, Lidoire, édifie la première église dans la Cité (vers 337) et un lieu funéraire, à l'ouest, où il sera inhumé (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 21-22 ; PIÉTRI 1983 : 340-341). Par ailleurs, entre 364 et 388, Tours est promu au rang de la capitale de la III<sup>e</sup> Lyonnaise et devient la *civitas Turonorum* (GALINIÉ dir. 2007).

Le problème est que le statut administratif, qui met Tours parmi les villes les plus importantes de la Gaule, ne transparait pas dans les archives du sol. De plus, on ne peut réduire l'espace urbanisé à la Cité car sa capacité à accueillir des habitants semble faible. Il est donc utilisé comme refuge en cas de trouble. On ne peut imaginer que l'espace hors de la Cité, le *suburbium*, ait pu être totalement déserté (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 22 ; PIÉTRI 1983 : 348-350 ; GALINIÉ 1985 : 18-20) : la distance importante des nécropoles à la cité et la réoccupation du site de Saint-Pierre-Le-Puellier (site 1) par des établissements artisanaux sont des indices d'activités hors la Cité (Annexe 32). Par ailleurs, des niveaux de Terres Noires sont attestés dès le Bas-Empire sur les sites.

### • 5<sup>e</sup> - 8<sup>e</sup> siècles

Au 5<sup>e</sup> s., Tours devient le siège d'une métropole ecclésiastique. Durant les 5<sup>e</sup> -8<sup>e</sup> s., la ville est découpée en trois parties : la Cité, le monastère de Saint-Martin et le reste du *suburbium* (Annexe 33). Les sources archéologiques et les écrits de Grégoire de Tours, de la fin du 6<sup>e</sup> s., mettent en évidence l'effet de la christianisation avec la multiplication des édifices religieux aux abords de la Cité mais, surtout, autour de la basilique Saint-Martin. Les espaces intermédiaires, dans le *suburbium*, constituent des zones aux activités rurales (culture et vigne) (PIÉTRI, BIARNE 1987 : 28-39). C'est aussi à cette période que l'on observe sur chacun des sites la présence des Terres Noires interprétées comme des niveaux d'abandon, ou bien, avec le renouvellement des connaissances, comme des occupations de types domestiques ou agricoles (cf 1-4).

#### - La Cité, le groupe épiscopal

La Cité devient le lieu où résident les autorités comtale et épiscopale. Comme à l'Antiquité, les habitants sont de rang social plutôt aisé. Le groupe cathédral se développe par la construction des églises (Saint-Gervais-et-Saint-Protais et Sainte Marie) (MABIRE-LA-CAILLE 1988 : 277). A partir du 7<sup>e</sup> s., on observe des changements des modes de vie et de construction dans la partie nord-ouest de l'enceinte (site 3).

### - Saint-martin, le groupe basilical

Le groupe basilical se développe autour de la tombe de Saint-Martin avec la construction d'une basilique et d'édifices religieux annexes dans l'*atrium* (GALINIÉ 1997 : 69). A partir du 7<sup>e</sup> s., le monastère de Saint-Martin acquiert le statut de monastère royal et devient le centre d'un réseau de possessions et de revenus qui lui permet de s'affranchir des autorités religieuses et civiles locales (GALINIÉ dir. 2007). Au final, une forme « d'agglomération purement artificielle fondée sur les ressources du pèlerinage » se développe « sans base économique solide » (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 26). Il s'agit du *vicus christianorum* cité par Grégoire de Tours (PIÉTRI 1983 : 405 ; GALINIÉ 1997 : 72-73 ; NOIZET 2003 : 73-75).

### - La zone intermédiaire du groupe épiscopal et basilical

La zone située entre les deux pôles d'autorité de la ville, le *suburbium*, est encore la moins connue. On sait seulement que des communautés religieuses se concentrent à proximité des deux pôles. Le reste du suburbium semble être peu occupé hormis la construction de l'abbaye de Saint-Julien au 6<sup>e</sup> s., et la basilique Saint-Vincent, le long de deux voies principales parallèles à la Loire. Ainsi, les textes révèlent la présence de vigne et de mise en culture autour de l'abbaye (sources écrites).

Comme pour les 3<sup>e</sup>- 4<sup>e</sup> s., cette période est paradoxale car la ville cumule les fonctions administratives et religieuses mais n'incite pas à « la concentration d'une population dense ni la diversité d'activités caractéristiques de la vie urbaine » (GALINIÉ 1985 : 24). Ainsi, Tours, à partir du 6<sup>e</sup> siècle, apparaît comme une « ville sans vie urbaine » (GALINIÉ 1997 : 75 ; GALINIÉ 2000 : 23). Ces propos sont toutefois à nuancer car la connaissance archéologique est faible dans le centre et apporte un biais à l'analyse de ces périodes. Par ailleurs, les habitants sont difficiles à cerner : « les sociétés migrantes, installées depuis quelques décennies, peuvent avoir tenu une place éminente et sous-estimée » et apporter un autre mode de vie d'un point de vue économique (GALINIÉ 1997 : 75).

### • 9<sup>e</sup>- 11<sup>e</sup> siècles

Cette période est plus fournie en sources écrites, ce qui nous permet d'avoir une idée du paysage urbain, celui d'une ville bi-polaire (Annexes 34, 35 et 36).

La tradition veut que les raids scandinaves du 9<sup>e</sup> s. ralentissent la reprise urbaine dans l'ouest de la France au moins jusqu'à la moitié du 11<sup>e</sup> s. Or, même s'ils ont touché en partie la

ville, la croissance urbaine est observée à partir de la deuxième moitié du 9<sup>e</sup> s. notamment au niveau du pôle de Saint-Martin.

De nouveaux édifices religieux apparaissent au 9<sup>e</sup> s. puis au 10<sup>e</sup> s.<sup>23</sup> Il faut attendre le début du 12<sup>e</sup> s. pour qu'ils soient mentionnés en tant qu'églises paroissiales (GALINIÉ 1985 : 27). On a donc au total, 11 églises paroissiales dans le bourg de Saint-Martin contre 2 pour la Cité et 2 pour le centre, autour de Saint-Julien (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 32). Ce qui signifie que la densité de population est plus forte dans le bourg de Saint-Martin. Les hommes sont ainsi enterrés, à partir des 9<sup>e</sup> -10<sup>e</sup> s., à Saint-Martin (la nécropole étant réservée aux chanoines), vers l'an mil, à Saint-Pierre-le-Puellier et à Saint-Clément.

On sait également, par les sources écrites, qu'à partir du 9<sup>e</sup> s., la Cité est le lieu des résidences princières (angle nord-ouest de l'enceinte) tandis que Saint-Martin est celui d'un palais royal, dont la localisation est inconnue. La ville se développe autour de ces deux pôles ; le peu de voies de circulation s'organisent autour des deux axes principaux, parallèles à la Loire. Enfin, on ignore les conditions de franchissement du fleuve avant la construction du pont en 1034-1035 par Eudes II de Blois qui débouche sur l'extension à l'ouest de la cité, le bourg des Arcis.

#### - La Cité

Le rempart de la Cité est restauré dans la deuxième moitié du 9<sup>e</sup> s. avec la présence d'un réduit défensif dans l'angle nord-ouest (site 3) et le creusement d'un fossé au sud-est (site 6) sur l'emplacement de l'ancien, abandonné au 5<sup>e</sup> s (MABIRE-LA-CAILLE 1988 : 280). La Cité est encore un lieu de refuge lors des invasions scandinaves. Elle se divise en deux, de part et d'autre de la voie est-ouest : « au nord l'emprise publique, comtale puis plus tard royale, au sud l'emprise du chapitre cathédral » (GALINIÉ 1985 : 36).

Jusqu'en 1044, ce sont les comtes de Blois qui possèdent la cité de Tours et ceux-ci ne semblent pas vouloir développer la ville comme centre urbain. En 1044, la Touraine est annexée par le comte d'Anjou qui instaure alors une autorité politique stable qui permet d'activer le mouvement d'urbanisation dans cette zone de la ville : il s'agit de la naissance du bourg des Arcis.

#### - Le castrum de Saint-Martin et son suburbium

Dès le 9<sup>e</sup> s., un bourg se crée aux abords de la basilique Saint-Martin et la présence d'une résidence royale est attestée. Les raids ne semblent pas interrompre l'activité du bourg mais

---

<sup>23</sup>« au IX<sup>e</sup> siècle l'apparition de Saint-Hilaire à proximité de Saint-Martin, et de Saint-Etienne au pied de la cité. Au Xe siècle, Sainte-Marie-la-Pauvre, Saint-Pierre-du-Cimetière sont créées à proximité de Saint-Martin, Saint-Saturnin dans le centre, Saint-Pierre-hors-les-murs à l'est de la Cité. Au XI<sup>e</sup> siècle...il faut cependant attribuer à Saint-Pierre-du-Boile, à l'ouest du rempart de la cité, une date antérieure à 1080. » (GALINIE 1985 : 26-27)

on construit une fortification en bois entre 903-918 puis en pierre à la fin du 10<sup>e</sup> s., le *castrum Sancti Martini*. Dès le début du 11<sup>e</sup> s., il est appelée Châteauneuf. Le monastère occupe la partie sud du castrum tandis que des maisons et des boutiques, des laïcs, s'installent dans la partie nord. A l'extérieur du *castrum*, en direction de la Loire, le *suburbium* se développe (habitat et artisanat) avec des gains sur la berge. Ce pôle urbain dispose de l'immunité royale.

#### - Le centre

Les actes de donation, d'échanges et de concessions des 10<sup>e</sup> - 11<sup>e</sup> s. montrent que la zone comprise entre le pôle de Saint-Martin et le pôle de la Cité est une zone rurale composée de champs cultivés et de vignes (GALINIÉ 1985 : 33). Par ailleurs, l'abbaye de Saint-Julien est restaurée en 943 par l'évêque Téotolon qui lui donne des biens fonciers. Le *suburbium* de Saint-Julien se trouve alors en contact avec celui de Saint-Martin. Enfin, notons que les autres églises ne sont pas dévastées par les raids comme peuvent l'affirmer les textes médiévaux.

#### • 12<sup>e</sup>-15<sup>e</sup> siècles

C'est à partir de cette période que les sources écrites sont plus mobilisées que les sources archéologiques.

A partir du 12<sup>e</sup> s. et jusqu'au 14<sup>e</sup> s., on observe une croissance lente et régulière qui permet de joindre les deux agglomérations, la Cité et Châteauneuf (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 33) (Annexe 37). Toutefois, jusqu'au milieu du 14<sup>e</sup> s., « Tours n'a pas d'unité, ni dans l'espace ni dans le droit » (GALINIÉ 1985 : 41). En effet, la diversité des groupes sociaux ne permet pas un regroupement communautaire pour gérer la ville.

Au 12<sup>e</sup> s., le bourg des Arcis est muni d'une enceinte (MABIRE-LA-CAILLE 1988 : 286) et le rempart romain est détruit pour ouvrir la cathédrale vers l'« espace profane » : ceci favorise l'installation de commerçants (MABIRE-LA-CAILLE 1988 : 290).

Au centre, à partir du 13<sup>e</sup> s., des ordres mendiants s'installent (Jacobins, Cordeliers, Carmes et Augustins). Ainsi, aux 13<sup>e</sup> – 14<sup>e</sup> s., une quinzaine de paroisses desservent Tours dont 9 à Châteauneuf. On observe dès lors que le tissu urbain est plus dense dans la zone de Châteauneuf et son *suburbium*, et plus lâche au centre ainsi qu'à l'est.

Enfin, au 14<sup>e</sup> s., vers 1356, une enceinte englobe les deux agglomérations (56 ha) et favorise alors l'urbanisation du centre, qui s'accélère au 15<sup>e</sup> s. avec la présence du roi et la cour (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 34 ; GALINIÉ 1985 : 42-43) (Annexe 38). Un fossé défensif est creusé et est alimenté par les eaux du fleuve. Néanmoins, cette enceinte n'améliore pas le mode vie des habitants : elle est pour eux une contrainte du point de vue de l'hygiène et de la circulation.

En 1462, une municipalité est créée et réunit les habitants. Tours est devenue capitale du royaume. Ceci favorise la construction de lotissements, notamment dans le centre, en ouvrant de nouvelles rues (MABIRE-LA-CAILLE 1988 : 298-299).

- *16<sup>e</sup>-19<sup>e</sup> siècles*

Un nouveau rempart est construit pour doubler la superficie de la ville médiévale (170 ha) à partir de 1520 et est achevée durant le 17<sup>e</sup> s. Ce nouvel espace reste vide jusqu'au 19<sup>e</sup> s. En effet, les plans modernes montrent la part importante des espaces non-bâties (jardins, vergers et vignes) ainsi que des couvents qui s'implantent au 17<sup>e</sup> s (Annexe 39).

Au 18<sup>e</sup> s., le projet urbanistique de la route d'Espagne qui engendre la percée de la tranchée, la construction du pont principal (Pont Wilson) et de la rue Royale au centre, fait pivoter l'axe de développement de la ville du nord au sud. L'hôtel de ville est construit à l'entrée nord de la ville. Ainsi, « les quartiers anciens périssent et se paupérisent, alors que la population aisée migre au 19<sup>e</sup> s., soit vers de nouveaux quartiers localisés hors de l'enceinte, soit vers les zones gagnées au 16<sup>e</sup> s. » (GALINIÉ 1985 : 47).

Au 19<sup>e</sup> s. (Annexe 40), un plan d'alignement est proposé par Mr Walwein afin d'agrandir les rues étroites et d'aligner les rues tortueuses (CHEVALIER 1985 : 261). Ensuite, le chemin de fer est installé au sud de la ville et la place Jean Jaurès devient une place de prestige. Ce nouveau tissu urbain est fixé jusqu'en 1940, lors de la destruction de la seconde Guerre Mondiale.

- *20<sup>e</sup> siècle : Le temps de la Reconstruction et de la Rénovation*

En 1940, les bombardements de la Seconde Guerre Mondiale ont touché une partie du centre ville, le quartier commerçant de la rue Nationale et certains monuments historiques (CHEVEREAU 2003 : 17, 74). Puis, entre 1942 et 1944, ce sont les lignes de chemin de fer, les ponts et d'autres bâtiments qui sont touchés (Annexe 41). En 1948, le coefficient de destruction de la ville est de 52 % (CHEVEREAU 2003 : 21). Les chantiers de déblaiement commencèrent en 1940-1941 et finirent en 1946-1947. Les terrains ont été arasés puis nivelés ; ces aménagements ont aussi fortement endommagé le sous-sol.

A partir de 1942, plusieurs projets d'urbanisme ont été proposés par des architectes. Leur objectif était d'élargir les voies de circulation, contourner la ville avec des grands axes et la découper en zones d'habitats, de commerce et d'industrie (CHEVEREAU 2003 : 45-46). C'est à partir de 1949 que commence la reconstruction du centre-ville. Par ailleurs, les vieux quartiers

sont restaurés de façon à les intégrer au reste de la ville et à relancer les lieux de commerces et d'habitats.

- *Conclusions*

Il faut retenir que Tours suit le schéma général d'urbanisation connu pour les autres villes d'origine antique : ville ouverte du 1<sup>er</sup> au 3<sup>e</sup> siècle, rétraction au sein du castrum au cours des 3<sup>e</sup>-4<sup>e</sup> siècles, ville bi-polaire au Moyen Age. La difficulté encore aujourd'hui est de comprendre les modalités de transformations de l'espace urbanisé ancien pour la période antique et du Haut Moyen Age. Les éléments de la topographie historique montrent que Tours du Bas Empire à l'an Mil est « une ville sans vie urbaine » (GALINIÉ 2000 : 23). Sa stabilité au haut Moyen Age s'explique donc par deux faits : son rôle de place centrale au niveau politique et celui de centre religieux en liaison avec le culte de Saint Martin. Cette stabilité reste néanmoins en défaveur de l'économique.

Un essai de modélisation graphique par le biais de la chrono-chorématique (cf 2-3-3) est présenté dans l'article de Mappemonde (RODIER, GALINIÉ 2006). D'abord, les auteurs font le point sur la représentation des fonctions urbaines (banale, développées et supérieures) que revêtait Tours du 1<sup>er</sup> au 18<sup>e</sup> s. On observe donc qu'à partir des 10<sup>e</sup>-11<sup>e</sup> siècles Tours réunit réellement les 3 fonctions. Ensuite, ils font le point sur les héritages topographiques qui configurent Tours:

1- Les héritages de la ville classique sont faibles : deux voies parallèles le long du fleuve et l'hémicycle sud de l'amphithéâtre inclus dans le rempart du IV<sup>e</sup> siècle

2- L'enceinte de la Cité du IV<sup>e</sup> siècle s'impose comme un marqueur topographique jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle.

3 -La séparation entre les morts et les vivants, liée à la topographie chrétienne, s'impose comme une valeur pérenne du IV<sup>e</sup> au X<sup>e</sup> siècle.

4- L'enceinte de Châteauneuf du X<sup>e</sup> siècle matérialise ce double héritage par la bipolarisation de la ville médiévale.

5- Les ponts ne marquent pas le paysage, ils sont déplacés à plusieurs reprises et la rive du fleuve est stabilisée après de nombreux gains par la construction d'une levée au XIV<sup>e</sup> siècle.

6- Au sud, la zone inondable influe sur la morphologie urbaine jusqu'à la construction de l'enceinte du XVII<sup>e</sup> siècle qui joue le rôle de digue.

Enfin, ils présentent un schéma des transformations de Tours à l'aide des chorotypes (définis à partir des connaissances de la topographie historique) qui fera partie des éléments de base de la réflexion (Annexe 6).

### 3-1-3- Les questions historiques

- *Définition de l'espace urbanisé ancien*

L'espace urbanisé ancien est défini par l'addition ou la soustraction des zones d'occupation dense de la ville, de l'Antiquité au milieu du 19<sup>e</sup> siècle.

A Tours, il correspond à la compilation des espaces occupés depuis l'Antiquité. Ces espaces sont schématiquement représentés par des enveloppes dont certaines suivent le tracé des enceintes urbaines. Evidemment, elles ne mettent pas en évidence les occupations qui ont pu être temporaires ou celles qui sont isolées, comme pour le Bas Empire ou le Haut Moyen Age puisqu'il s'agit d'un modèle. Les surfaces significatives retenues sont :

- la ville ouverte du haut empire (105 ha)
- le castrum du Bas-Empire (9 ha)
- le castrum Saint-Martin (4 ha)
- le suburbium de Saint-Martin (8 ha)
- l'enceinte des Arcis(4 ha)
- l'enceinte du 14<sup>e</sup> siècle (56 ha)
- l'enceinte du 17<sup>e</sup> siècle (175 ha)

Donc, il a été choisi de faire un état de l'occupation vers 150 ap JC, vers 400, vers 950, vers 1250, vers 1350 et vers 1650 (Pl. 11).

L'espace urbanisé ancien a jusqu'ici été représenté comme un contour optimum de ces enveloppes mais on ne pouvait appréhender l'intensité de l'occupation. C'est pourquoi, les enveloppes ont été superposées avec la même couleur et la même transparence : on obtient alors une modélisation graphique de l'occupation sur la longue durée (Pl. 12) Si on part du postulat que l'épaisseur du dépôt archéologique témoigne de l'intensité de l'occupation, on peut poser l'hypothèse que les endroits les plus épais sont situés au niveau de Châteauneuf et de la Cité. Par contre, il est difficile de faire une corrélation entre l'épaisseur et la variété des activités humaines. En effet, par exemple, une zone peut être densément occupée mais garder toujours le même type d'activité et dans ce cas, produire le même type de couche archéologique.

L'espace urbanisé ancien tel qu'il est représenté donne une vision générale de la ville mais pour en réaliser une évaluation complète, il est nécessaire de préciser les modalités de formation de ces enveloppes et d'expliquer les phénomènes d'extension et de rétraction.

- *Les questions historiques*

Nous avons vu dans le premier chapitre que le questionnement historique repose sur l'étude des composantes socio-spatiales dans la longue durée : leur apparition, leur évolution et leur disparition. Un des buts est de définir celles qui structurent la ville de Tours à différentes périodes. Il faut donc faire l'inventaire du potentiel informatif des observations disponibles.

H. Galinié reprend les questions historiques à partir des sources disponibles à Tours (sources écrites, archéologiques et planimétriques). Le degré de précision des informations varie d'une source à l'autre en fonction des périodes mais il est possible de traiter certains thèmes (GALINIÉ 2000: 22-23) :

- à titre d'hypothèse, l'échec urbain relatif du Haut-Empire
- la rétraction urbaine du Bas-Empire et du haut Moyen Age
- la christianisation de l'espace urbain au haut Moyen Age
- le rôle du monastère de Saint-Martin dans le développement de la ville
- la renaissance carolingienne et son arrêt consécutif aux incursions scandinaves
- la reprise urbaine au 10<sup>e</sup>-11<sup>e</sup> siècle
- la prééminence permanente du rôle de chef-lieu administratif, aux plans civil et ecclésiastique.

D'autres questions, d'ordre plus anthropologique, sont également présentées et ont été récemment complétées (GALINIÉ dir. 2007):

- l'effet structurant de la relation des vivants à leurs morts, à l'échelle de la ville
- la relation dedans-dehors
- manières de vivre, manières d'habiter
- les formes de l'investissement, les rôles sociaux.
- l'identité des habitants

Pour étudier l'ensemble de ces questions et, donc définir les composantes de la ville, il faudrait procéder à une évaluation régulière et complète de l'espace urbanisé ancien. Ainsi, elle permettrait de renouveler les connaissances historiques. Le problème est que les sources traditionnellement utilisées pour l'étude historique d'une ville ne suffisent pas à résoudre ces questions. Il est donc nécessaire, dans un premier temps, de **renouveler les modes d'acquisition et de traitements des données**, et, dans un deuxième temps, **de développer de nouvelles techniques de reconnaissance du sol adaptées à l'accessibilité en milieu urbain et capables de caractériser finement les niveaux archéologiques**. C'est pourquoi, je me suis concentrée sur ces deux points.

Avant de présenter la mise en œuvre de nouvelles méthodes et techniques d'évaluation testées à Tours, il faut préciser le contexte de recherche dans lequel s'inscrit l'étude.

### **3-2- Présentation du contexte de la recherche archéologique de Tours**

Dans un premier temps, je présenterai l'état de l'activité archéologique à Tours et les travaux développés autour de l'évaluation : ce qui constitue une base de travail à l'étude. Puis dans un deuxième temps, je définirai les transects d'étude.

#### **3-2-1- Etat de l'activité archéologique à Tours**

Tours a connu une transformation de son paysage urbain dans les années 1950, lors de la reconstruction et, dans les années 1970, lors de nouveaux aménagements pour la rénovation du centre historique (LUSSAULT 1993; RODIER 1994b: 15-16).

Au lendemain de la guerre, « la sensibilité archéologique et historique représentait peu de chose face à la reconstruction » (CHEVEREAU 2003 : 74). Lorsqu'il y avait des découvertes, elles étaient aussitôt détruites en faveur des nouveaux bâtiments malgré l'entêtement de la Commission des sites et des paysages.

En 1973, le Laboratoire d'Archéologie Urbaine de Tours (LAUT) – depuis 1990, Laboratoire Archéologie et Territoire (LAT) – tente de suivre l'évolution de la ville, « avec pour objectif de ne pas laisser les travaux d'aménagement conditionner la recherche mais de mettre en place une véritable politique d'archéologie préventive » (RODIER 1994a : 20). Face aux problèmes de conservation du patrimoine, un Plan Permanent de Sauvegarde et de Mise en Valeur est établi dans le cadre de la mise en place d'un secteur sauvegardé à partir de 1977 (Annexe 42).

Depuis près d'une quarantaine d'années, des fouilles et des sondages ont été effectués à l'occasion de travaux urbains afin de mieux comprendre l'évolution topographique de la ville. Elles ont été réalisées par le LAU/LAUT et aussi, par l'AFAN/INRAP (Association pour les Fouilles Archéologiques Nationales / Institut National de recherches Archéologiques Préventives), pour les opérations préventives (Annexe 43). Les fouilles, les interventions (exemple : N°1) et les observations (exemple : N°001) ont leur propre numérotation. Ainsi, on observe un vide documentaire dans la partie centrale de la ville qui est dû à la politique d'aménagement et celle de la prescription de fouille.

### 3-2-2- Etat des connaissances sur l'évaluation du potentiel archéologique du sous-sol

- *Un document d'évaluation du potentiel archéologique : « les archives du sol à Tours »*

En suivant le modèle de *Future of London's Past* (BIDDLE, HUDSON, HEIGHWAY 1973), une étude d'évaluation a été entreprise et présentée dans *Les archives du sol à Tours, survie et avenir de l'archéologie de la ville* (GALINIÉ, RANDOIN 1979a). Elle permet de faire l'état des connaissances sur la topographie historique et d'énumérer les différentes hypothèses sur les usages du sol à partir des résultats de fouilles lorsque les sources écrites font défaut. Dans ce document, plusieurs plans ont été réalisés d'abord sur l'état de la topographie historique à différentes périodes, sur l'état de l'activité archéologique, et enfin, sur le recensement des terrains où le dépôt archéologique est détruit et inaccessible ainsi que les terrains où une menace de destruction est envisageable (Annexe 44).

Ce document a donc été établi dans l'optique de poser une véritable politique de prévision du « risque » archéologique et d'une hiérarchisation des questions historiques en tenant compte des politiques d'interventions du moment. Il n'a jamais été remis à jour tel quel. Seuls des travaux universitaires permettent d'alimenter les éléments de la topographie historique et de valider ou infirmer les hypothèses. Enfin, même si le document papier n'a pas été réédité, une base de données géographique a été mise au point : ToToPI (Topographie de Tours Pré-Industriel) par l'équipe du LAT.

- *Des études d'évaluation à l'échelle de l'îlot*

Deux études sur l'évaluation du potentiel archéologique ont été réalisées à l'échelle de l'îlot dans le secteur d'Anatole France (GOBIN 2001) et celui de la cité (BOSSEAU 2002). Ces études sont comparables à celles publiées dans les esquisses du CNAU. Elles permettent de faire un inventaire exhaustif des sources disponibles pour analyser la topographie historique et de proposer une carte du potentiel archéologique des secteurs (Annexe 45)

- *Une base de données sur la topographie historique à Tours : ToToPI*

Une base de données sur la topographie historique de la ville a été développée par le LAT, « ToToPI ». Elle permet de recenser les informations à l'échelle des valeurs urbaines au sein d'un SIG (Annexe 1).

En outre, un Modèle Numérique de Terrain de la topographie actuelle y est disponible. Il a été mis à jour par la réalisation de photos verticales de la ville. Le niveau actuel varie entre 45 et 57 m NGF. La zone la plus haute est localisée à l'emplacement du *castrum* antique.

- *Une base de données d'enregistrement des archives de fouilles : ArSol*

Une base de données d'enregistrement des données de fouilles a été mise en place par le LAT, « ArSol ». Elle a d'abord été conçue par E. Zadora-Rio pour la fouille de Rigny-Ussé (37) puis a été adaptée pour les fouilles du LAT de façon à conserver une cohérence des enregistrements. Cette base facilite l'étude stratigraphique d'un site, permet d'archiver les informations de terrain et offre la possibilité d'effectuer des analyses thématiques.

- *La carte des épaisseurs du dépôt archéologique*

Plusieurs études ont été réalisées sur l'évaluation de l'épaisseur du dépôt archéologique. L'examen de la stratification de la majorité des sites<sup>24</sup> montre que le niveau naturel (les sables alluviaux) a été atteint au cours des opérations archéologiques (BISSON, RODIER, THOMAS 1995 ; CHAMPAGNE 2002; CRIBELLIER, MASSAT 1996 ; DE FILIPPO 1998 ; DUBANT 1989a ; DUBANT 1989b ; DUBANT 1990 ; DUBANT 1991 ; DUBANT 1992a ; DUBANT 1992b, DUBANT 1993b ; FOUILLET *et al.* 2000 ; FOUILLET *et al.* 2003 ; FOUILLET 2005; FOUILLET, JOLY 2004 ; GALINIÉ 1974 ; GALINIÉ 1978 ; GALINIÉ 1979 ; GALINIÉ *et al.* 1982 ; GALINIÉ, LORANS 1980 ; GALINIÉ, LORANS 1981 ; GALINIÉ, KEMP, LORANS 1982 ; GALINIÉ *et al.* 2003c, GALINIÉ, RANDOIN 1979b ; JESSET, CHIMIER 2000 ; JOUQUAND 2000 ; JOUQUAND *et al.* 2002 ; LAURENT 2002 : 19 ; RODIER 1994c, THEUREAU 1992 ; TALIN D'EYZAC 1998). Il varie entre environ 44 et 47 m NGF (Annexe 46).

Plusieurs cartes d'estimation ont été proposées au cours des études géologiques et archéologiques de la plaine alluviale (cf 3-1-1) mais celle qui servira de base à l'étude est celle d'O. Marlet. Nous avons vu qu'il a réalisé une carte d'interpolation des épaisseurs du dépôt (Annexe 47) ainsi que du toit des alluvions (Annexe 23). Elle montre que l'épaisseur du dépôt archéologique est comprise entre 1 et 8 mètres.

Ces cartes ont été réalisées à l'aide du logiciel GDM du BRGM en utilisant la méthode du krigeage que je présenterai plus en détail dans le chapitre 6. Cependant, il n'y a pas eu

---

<sup>24</sup> Sites n° 1, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 23, 48, 60, 62, 64, 65, 66, 69, 72, 77, 016, 021, 023, 024, 025, 027, 032, 033, 063 et 069

d'analyse **géostatistique\*** au préalable de l'interpolation qui consiste à calculer la distance au-delà de laquelle les mesures ne sont plus en corrélation (cf analyse variographique, 2-1-4).

Ainsi, un des objectifs est d'améliorer cette carte, d'abord, en triant et en actualisant les données, et ensuite, en apportant une réflexion aux problèmes que posent l'emploi des méthodes d'interpolation pour modéliser l'épaisseur du dépôt ainsi que le toit des alluvions.

- *Prise en compte de la qualité du dépôt archéologique*

Ce thème a été peu développé à ce jour. Il a été d'abord abordé dans le but de caractériser les fonctions des dépôts au moment de la fouille à partir d'une grille de description (RANDOIN 1987) puis dans la thèse de D. Dubant (DUBANT 1993a). Ce type d'enregistrement stratigraphique a été utilisé notamment lors des fouilles du LAT. La qualité du dépôt fait aussi l'objet d'études spécialisées comme la caractérisation du sol urbain à partir de l'étude des constituants des couches (FONDRILLON *en cours*), l'étude de la taphonymie des ossements animaux ou l'étude des processus post-dépositionnels sur la céramique (JAFFROT *en cours*).

### 3-2-3- Découpages en transects

Pour répondre aux objectifs de l'évaluation à l'échelle de la ville et à l'échelle du site, et notamment pour la réalisation de la prospection géotechnique, des transects ont été sélectionnés selon les questions historiques et en tenant compte de la disponibilité des informations. En outre, les éléments de la topographie historique de Tours sont mieux connus à l'emplacement de la cité antique et médiévale, et dans le quartier de Saint-Martin (cf 3-2-1). Par contre, il y a un vide documentaire dans le centre de l'espace urbanisé ancien.

Il existe le problème de l'échantillonnage des connaissances qui doit être représentatif pour proposer une restitution des composantes de l'espace urbanisé ancien. L'échantillonnage dépend des surfaces disponibles pour l'acquisition de données et de la politique d'intervention archéologique. De plus, il est difficile de définir une maille d'étude théorique : suivant les questions historiques que l'on veut résoudre, de l'échelle de la ville à celle du site, elle est évidemment variable. Enfin, l'acquisition d'informations à partir des opérations archéologiques et des logs géotechniques est forcément rigide, c'est-à-dire que les observations sont conditionnées par la localisation du site.

Il a été choisi de tester une maille théorique de 100 m, au moins pour l'acquisition de nouvelles données, lors de la prospection géotechnique au PANDA. C'est pourquoi, dans un

premier temps, la ville a été découpée en 9 transects, orientés suivant la disponibilité des terrains pour réaliser la prospection au PANDA et en fonction de l'état des connaissances actuelles de la topographie historique (Pl. 14) Dans un deuxième temps, de façon pragmatique, l'étude a été concentrée sur les transects les mieux renseignés, les n°3, 5 et 8, et partiellement les n°7 et n°9 (Pl. 15). Schématiquement :

- le transect n°3 traverse la partie est du castrum de Saint-Martin et son suburbium
- le transect n°5 est dans la zone centrale décrite pour l'Antiquité et le Moyen Age
- les transects n°7, n°8 et n°9 sont dans la Cité antique et médiévale
- l'ensemble de ces transects traverse, au sud, la zone située entre les enceintes du 14<sup>e</sup> et du 17<sup>e</sup> siècles et, au nord, la zone des quais à l'extérieur de l'enceinte moderne.

Compte tenu du contexte historique, on s'attend donc à rencontrer une diversité des activités humaines plutôt concentrées dans la partie nord de l'espace urbanisé ancien, au sein de l'espace délimité au 14<sup>e</sup> s. Tandis que les niveaux situés au sud de l'enceinte du 14<sup>e</sup> siècle doivent être similaires de haut en bas : des marais, des prés et des jardins.

Pour donner une idée de l'épaisseur du dépôt archéologique, des coupes schématiques des transects n°3, n°5 et n°8 ont été restituées à partir de la carte des estimations de l'épaisseur du dépôt archéologique, du MNT actuel et des observations des sites concernés (Pl. 16). On observe une variation d'un transect à l'autre de l'épaisseur ainsi que du modelé. En effet, les zones liées au gain sur la Loire présentent une épaisseur importante du dépôt de 9 à 12 mètres, tandis que l'épaisseur varie entre 1 et 2 mètres dans la partie sud de la ville. Ainsi, ces observations corroborent les hypothèses historiques : le dépôt archéologique est plus épais dans la zone fortement urbanisée. Un des objectifs est d'affiner ces coupes (chapitre 6).

### 3-3- Présentation générale des sites étudiés à tours

Plusieurs sites archéologiques de la ville de Tours ont été retenus pour analyser le potentiel archéologique à l'échelle du site. Ils ont été fouillés par des archéologues du Laboratoire Archéologie et Territoire (site 16, 17 et du 7 rue de la Bazoche) et de l'INRAP (site 69, 72 et 77) et ont été mis à disposition pour expérimenter l'utilisation du PANDA, entre 2000 et 2005. Ces sites sont situés dans l'espace urbanisé ancien (Pl. 17).

Enfin, d'autres sites ont été prospectés au pénétromètre (site 64 et site 67) mais ne pourront être utilisés car les SP n'ont pas de relevés topographiques.

#### 3-3-1- Site 16 – Abbaye Saint-Julien/Prosper Mérimée

Le site 16 est considéré comme le site de référence des travaux de thèse pour résoudre le double-objectif de départ et l'expérimentation du PANDA d'un point de vue archéologique de 2000 à 2003. Il est situé dans l'ancienne abbaye de Saint-Julien, à proximité du Parking Prosper Mérimée

Ce site a fait l'objet d'une fouille programmée durant les étés 2000 à 2003 sous la direction d'H. Galinié et E. Lorans (LAT) (GALINIÉ, LORANS 2000 ; GALINIÉ, LORANS, FONDRILLON 2001 ; GALINIÉ *et al.* 2002 ; GALINIÉ *et al.* 2003c). Il a révélé une stratification de l'ordre de 7 mètres datée du 1<sup>er</sup> s. à nos jours : une occupation monumentale antique (noria et pont) en bord de Loire suivie d'une phase de remblaiement massif, des niveaux domestiques et des niveaux agricoles des 4<sup>e</sup> – 6<sup>e</sup> s. au 14<sup>e</sup> s., la construction de l'infirmerie de l'abbaye de Saint-Julien et de jardins entre les 14<sup>e</sup> -17<sup>e</sup> s. et la présence d'une caserne militaire et d'une école pour les 17<sup>e</sup> -19<sup>e</sup> s.

Au cours de ces quatre années, différentes méthodes ont été testées pour la reconnaissance et la caractérisation du dépôt archéologique (prospection géophysique, géotechnique, pédologique, micro-morphologique et étude des constituants ; cf 2-1-4). Ces travaux seront utilisés ici à titre de comparaison et pour valider certaines hypothèses.

#### 3-3-2- Site 17 – Abbaye Marmoutier

Le site 17 est situé dans l'enceinte de l'abbaye de Marmoutier. La fouille programmée a été effectuée durant les étés 2005-2006 sous la direction d'E. Lorans (LAT) (LORANS 2004 ; LORANS 2005). Des sondages ont été réalisés au sud et à l'ouest de l'ancienne église ainsi qu'à l'emplacement de la maison du grand prieur.

Par ailleurs, une campagne de prospection géophysique a été livrée sur les terrains sud en 2004.

Ce site sera utilisé à titre de comparaison pour l'élaboration du référentiel archéologico-mécanique.

### 3-3-3- Site 69 – Parking Anatole France

Le site 69 est localisé sur la place Anatole France Anatole France. La fouille de sauvetage a été réalisée du 19 Août au 25 Octobre 2002 sous la direction de N. Fouillet (INRAP) sur une surface d'étude de 2400 m<sup>2</sup> (FOUILLET *et al.* 2003), à l'occasion de la construction du parking. Elle a mis en évidence des niveaux du 1<sup>er</sup> s. à nos jours sur une épaisseur de 7 mètres environ : des gains sur la Loire entre le 1<sup>er</sup> et le 14<sup>e</sup> s., la construction de l'enceinte du 14<sup>e</sup> s. et l'aménagement de fossés défensifs.

Ce site sera exploité pour l'étude globale de la ville et pour la réalisation du référentiel archéologico-mécanique. Par ailleurs, deux carottages ont été effectués par les géologues du GéAC (I. Gay) et seront consultés dans cette étude.

### 3-3-4- Site 72 – 3 rue des Tanneurs

Le site 72 est localisé sur le site de la faculté des Tanneurs, à l'emplacement du projet de l'extension de l'Université de Tours (3000 m<sup>2</sup>). Un diagnostic a été réalisé les 19 et 20 Avril 2004 sous la direction de N. Fouillet (INRAP) (FOUILLET, JOLY 2004). Les 4 sondages ont révélé au moins 4 mètres de stratification du Moyen Age à nos jours : voierie et caves.

Les observations obtenues sur le site contribueront à la constitution du référentiel archéologico-mécanique ainsi qu'à l'évaluation à l'échelle de la ville

### 3-3-5- Site 77 – 36, 38, 38 bis rue Mirabeau

Le site 77 est situé dans la parcelle du 36, 38, 38 bis rue Mirabeau, à l'est de l'espace urbanisé ancien. Un diagnostic a été prescrit dans le cadre d'un projet de construction (962 m<sup>2</sup>). Il a été effectué le 19 mai 2005 sous la direction de N. Fouillet (INRAP) (FOUILLET 2005). 2 tranchées de 3 mètres de profondeur ont mis en évidence des remblais contemporains et des alluvions dès 2,5 m de profondeur.

Ces résultats seront consultés à titre de comparaison pour le référentiel.

### 3-3-6- Site BAZ - 7 rue de la Bazoche

En 2003-2004, les jardins et caves, situés au 7 rue de la Bazoche, ont été mis à disposition aux archéologues par les architectes responsables de la rénovation des bâtiments (cabinet Penneron / Tours). Le site est situé à proximité de l'amphithéâtre antique. Des relevés de bâti (J. Seigne, B. Lefebvre – LAT) ainsi qu'une prospection géophysique (A. Kermorvan – UMR 5189 / HISOMA, Antenne de Tours) ont pu être réalisés. Ce site n'a pas fait l'objet de prescription archéologique mais sera toutefois exploité dans la thèse, notamment sur le couplage du pénétrromètre et de la géophysique

### 3-3-7- Conclusion

Ces sites tourangeaux seront donc exploités de façon spécifique selon leurs ressources. En effet, les sites fouillés apporteront des observations sur la stratification plus précises et plus complètes que celles fournies par les diagnostics. L'ensemble des informations recueillies sera intégré à l'étude globale de la ville. Par ailleurs, la diversité des contextes archéologiques offre à cette étude la possibilité de renforcer le référentiel archéologico-mécanique. C'est pourquoi, il a été jugé utile de confronter les résultats entre les sites mais aussi avec d'autres terrains d'application dans d'autre ville ou des contextes ruraux.

### 3-4- Présentation des sites de comparaison

L'essentiel du sujet repose sur l'étude de la ville de Tours. Toutefois, l'occasion de travailler avec d'autres contextes urbains (Lyon) et ruraux (Cinq-Mars-La-Pile (37) ; Stolpie en Pologne) s'est présenté et a permis de constituer un corpus de sites de comparaison, essentiellement pour l'utilisation du pénétromètre et la constitution du référentiel archéologico-mécanique. Ces sites seront présentés plus en détail dans le 5<sup>e</sup> chapitre mais il convient d'exposer leur contexte d'étude.

#### 3-4-1- Les sites de la ville de Lyon (69)

Dans le cadre d'une collaboration avec le Service Archéologique Municipal de la ville de Lyon (dir. Anne Pariente) de 2004 à 2005, 5 sites ont été mis à disposition pour expérimenter le PANDA ainsi que le géoendoscope (P. Breul – LERMES/CUST) (Pl. 18). Les sites étudiés sont situés sur la rive droite de la Saône, sur ses berges et sur les hauteurs de colline de Fourvière. Seul, le site de la rue Mgr Lavarenne fera l'objet d'une analyse plus poussée.

La ville de Lyon est une ville d'origine antique qui présente des problématiques similaires à celle de la ville de Tours. L'objectif de la thèse est de constituer un référentiel propre à cette ville en suivant la méthodologie mise au point pour Tours.

- *Présentation historique de Lyon*

Le site de Lyon présente des traits morphogénétiques complexes car il a évolué dans la longue durée sous les effets du climat puis de l'homme.

La topographie de la ville est marquée par les variations quaternaires du climat (PELLETIER, ROSSIAUD 1990 : 13 ; BRAVARD, VÉROT-BOURRÉLY, FRANC 1995 ; ARLAUD *et al.* 2000 : 261-264). L'action érosive des glaciers a creusé de larges vallées et formées des buttes dont les pentes posent encore des problèmes de stabilité (colline de la Croix-Rousse et celle de Fourvière). La ville est traversée par le Rhône et la Saône dont la confluence a variée selon les périodes. Des hypothèses de tracé de la confluence ont été présentées depuis la fin du 19<sup>e</sup> s. par les archéologues et les géologues (ARLAUD *et al.* 2000 : 18). Les fouilles récentes, localisées notamment sur la Presqu'île ont permis d'éclaircir cette question (BRAVARD, VÉROT-BOURRÉLY, FRANC 1995 ; ARLAUD *et al.* 2000 : 186) (Fig. 16).

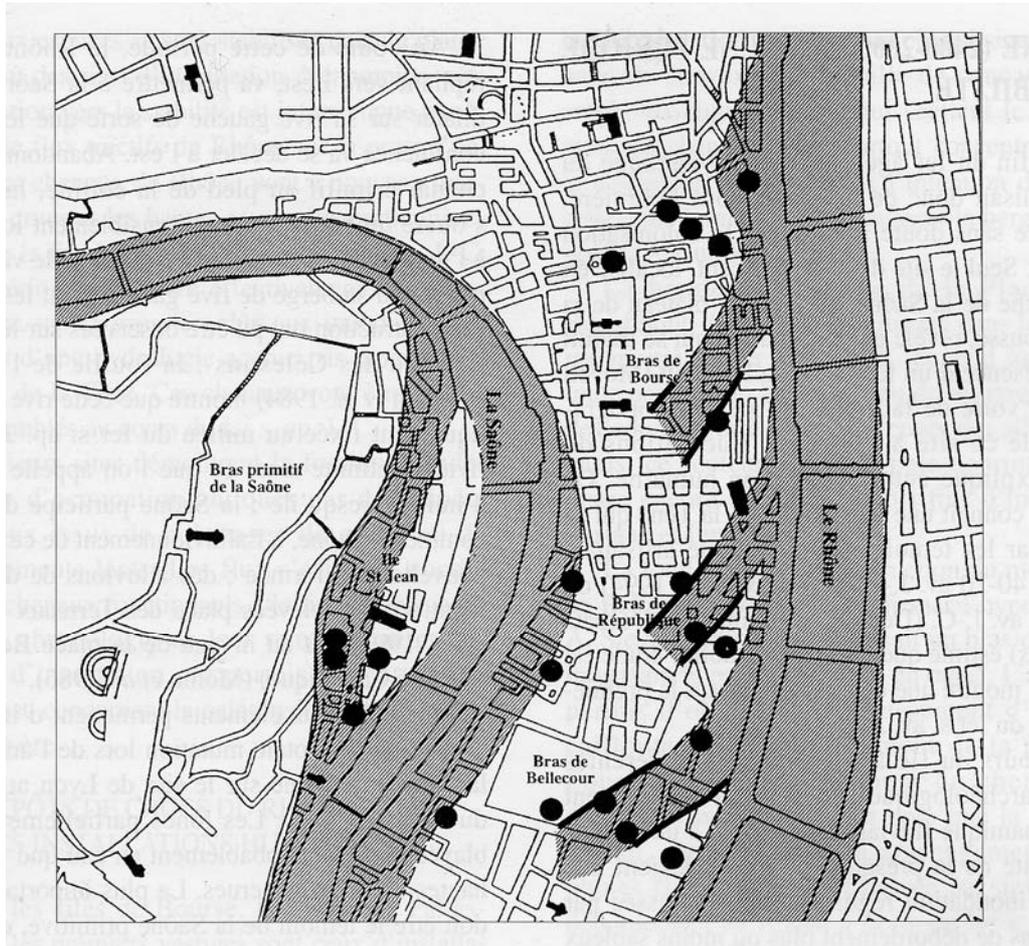


Fig. 16 – Restitution tracé de la confluence du Rhône et de la Saône à Lyon (BRAVARD 1995)

La colonie romaine de Lyon a été fondée en 43 av JC. Il y a peu de traces d’occupations gauloises (GOUDINEAU dir. 1989, PELLETIER, ROSSIAUD 1990: 23-25), mais on ne peut pas exclure la présence d’une occupation temporaire sur la Presqu’île (PELLETIER, ROSSIAUD 1990 : 101). Lyon devient un chef-lieu de la province Lyonnaise et capitale de la Gaule Chevelue. C’est à cette période que le sanctuaire des trois Gaules se construit, sur la pente méridionale de la colline de la Croix-Rousse en -12 av JC. Un amphithéâtre fédéral y est construit v. 19 ap JC.

Dès le 1<sup>er</sup> siècle, l’emprise de la colonie s’étend d’abord sur la Colline de Fourvière puis sur les rives de SAone et dans la presqu’île. Les bâtiments publics (théâtre, forum et odéon et sanctuaire) ainsi que des habitations sont construits sur la colline de Fourvière. Sur la presqu’île, dont la topographie était différente de l’actuelle (Fig. 17), deux quartiers se forment, les *Canabae* au sud et *Condate* au nord. Les *Canabae* est un quartier à la fois résidentiel et commerçant qui perdure jusqu’au Moyen Age (PELLETIER, ROSSIAUD 1990 : 122-123). Le quartier de *Condate* est situé juste au sud du sanctuaire des Trois Gaules et est constitué essentiellement d’habitations. L’emplacement de sa liaison avec la rive droite de la Saône est toujours inconnu. Sur la rive

gauche de la Saône s'est installé un quartier de potiers. Enfin, les ports étaient situés sur les 2 rives de la Saône (Saint Georges).

Les nécropoles sont localisées dans le secteur de Trion, de Choulans, Vaise, Saint-Georges, Saint-Clair et à la Croix-Rousse (PELLETIER, ROSSIAUD 1990 : 126).

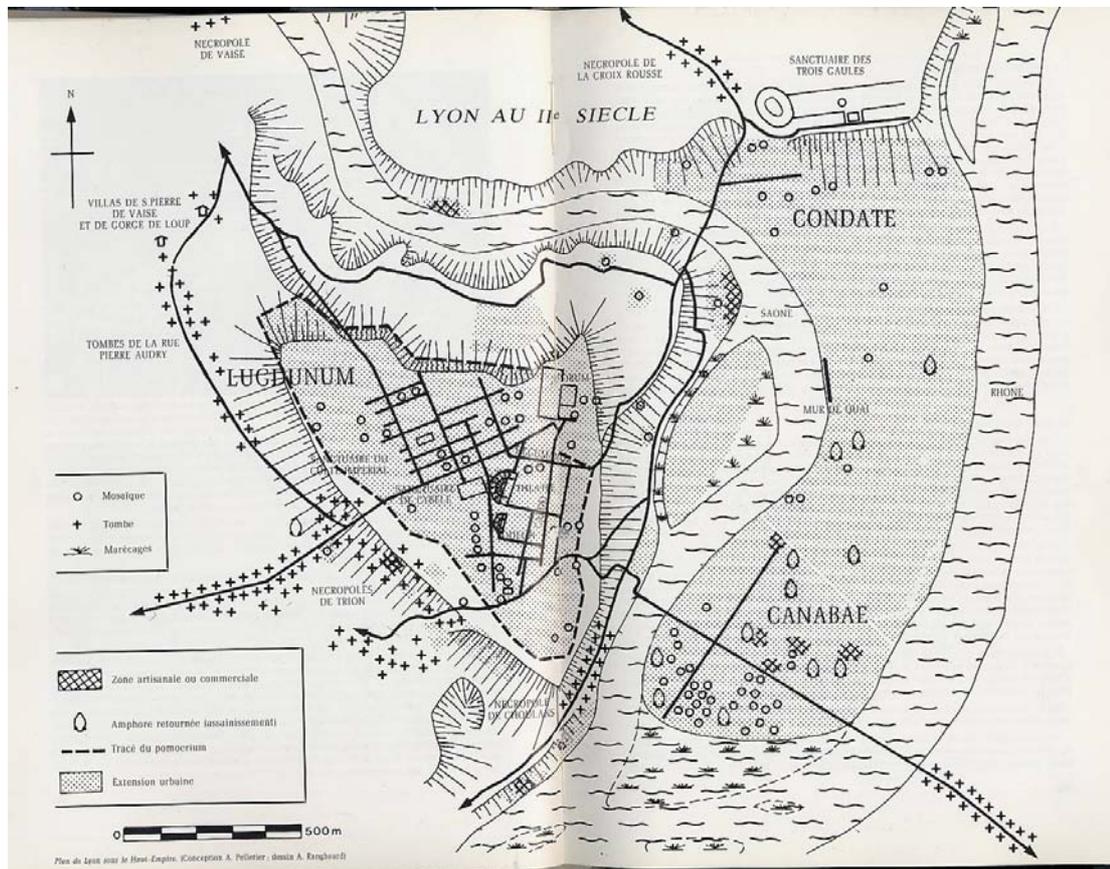


Fig. 17 – Lyon au 2<sup>e</sup> siècle (PELLETIER, ROSSIAUD 190 : Fig. 104)

A partir du 3<sup>e</sup> siècle, Lyon change de configuration. Vers 197, la bataille de Lyon et la prise de la ville amorce son déclin politique et économique. Elle devient chef de cité d'une province réduite (Lyonnaise Première) et perd la maîtrise des grands courants commerciaux. La colline de Fourvière est abandonnée progressivement au profit de la rive droite de la Saône (PELLETIER, ROSSIAUD 1990 : 227). L'hypothèse d'une ville enclose dans un rempart a été discutée. Toutefois, une restitution permet d'envisager une ville intra muros de 42 ha. Les périodes des 3<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> siècles sont peu documentées et le secteur le mieux connu est celui du quartier de Trion où perdure la nécropole.

Pour les 4<sup>e</sup> au 8<sup>e</sup> siècles, la topographie religieuse est la mieux connue. Aux 4<sup>e</sup>-5<sup>e</sup> siècle, un groupe cathédral est installé dans le centre de la cité au pied de la colline de Fourvière. Par

ailleurs, la périphérie de la ville haute est occupée par les nécropoles chrétiennes de Sainte-Irénée et de Saint-Just. Puis au 6<sup>e</sup> s., elles s'étendent à la ville basse à Saint-Laurent et à Saint-Nizier.

Ensuite, les textes révèlent, pour le 8<sup>e</sup> siècle, que Lyon est une ville à la marge de l'empire carolingien et est « rénovée » à partir du début du 9<sup>e</sup> s sous l'influence des évêques (PELLETIER, ROSSIAUD 1990 : 285). La ville devient alors importante d'un point de vue économique, intellectuel et religieux jusqu'à la fin du 10<sup>e</sup> s.

Or les observations archéologiques remettent en cause ce schéma de désertion de la ville. En effet, elles révèlent une occupation dense pour la période du Haut Moyen Age sur la rive droite de la Saône (BURNOUF, ARLAUD, BRAVARD *et al.* 1994) et dans le sud-ouest de la presqu'île (ARLAUD *et al.* 2000 : 266-267). La prise en compte des niveaux de « Terres Noires » sur les fouilles récentes a permis de renouveler ces connaissances. La ville se concentre donc de part et d'autre de la Saône.

A partir des 11<sup>e</sup>-12<sup>e</sup> s., des enceintes sont construites au bas de la Croix-Rousse, autour du chapitre cathédral. Un pont de pierre est construit sur la Saône dans la première moitié du 11<sup>e</sup> s. Par ailleurs, des paroisses se créent et de nouveaux édifices religieux se construisent sur Fourvière et à côté du groupe-cathédral. Le pouvoir est discuté entre l'archevêque et le comte de Forez.

Au 13<sup>e</sup> s., la ville s'urbanise notamment sur la presqu'île avec la construction du pont du Rhône et le développement du réseau viaire. Les ordres nouveaux s'y installent. Durant les 13<sup>e</sup>-14<sup>e</sup> s., le pouvoir est disputé entre l'église et la bourgeoisie marchande. En 1320, une chartre permet de la rendre autonome administrativement. Du 14<sup>e</sup> au 16<sup>e</sup> s., la ville se développe économiquement avec la présence des marchands, des foires et la venue des banquiers florentins (16<sup>e</sup> s.).

L'occupation de la ville du 11<sup>e</sup> au 18<sup>e</sup> siècle est essentiellement concentrée sur la rive droite de la Saône et la Presqu'île. Au 18<sup>e</sup> siècle, un projet d'urbanisme engendre l'extension de la Presqu'île vers le sud.

A partir de la moitié du 19<sup>e</sup> s. et au 20<sup>e</sup> siècle, d'autres chantiers d'urbanisme transforme la trame viaire de la Presqu'île et favorise l'expansion de la ville de part et d'autre des cours d'eau.

- *Site L1015 – rue Mgr Lavarenne*

Le site L1015 est localisé sur les berges de la Saône dans le centre de la ville de Lyon (5<sup>e</sup> arrondissement) au sud de la cathédrale St-Jean. La fouille de sauvetage programmé a été réalisée, dans le cadre de la construction du tunnel d'accès au parking, par une équipe du service

archéologique municipal de Lyon sous la direction d'E. Bernot (BERNOT et al. 2006). Elle s'est déroulée du 17 janvier au 29 juillet 2005. Environ 4 à 5 m d'épaisseur de dépôt archéologique a été observée de l'Antiquité à nos jours : occupation ténues pour les 1<sup>er</sup> – 4<sup>e</sup> s., une reprise de l'occupation aux 10<sup>e</sup>-11<sup>e</sup> s. (remblais, niveaux de rue, construction de bâtiments).

Ce site a fait l'objet d'une analyse géomorphologique (S. Gaillot / Université Lyon 2) et d'observations visuelles au géoendoscope qui seront couplées à l'étude des SP pour la constitution du référentiel.

- *Site L040 – 28, rue Chapeau Rouge*

Le site L040 est situé sur les hauteurs de Lyon, sur la rive droite de la Saône (quartier de Vaise – 9<sup>e</sup> arrondissement) à l'emplacement d'une école primaire. 4 sondages ont été réalisés lors du diagnostic en 2004 sous la direction de M. Monin, à l'occasion d'un projet de réfection de la cour d'école (MONIN, LASCOUX 2005). Le site a été occupé de l'antiquité à nos jours sur une épaisseur d'environ 1,5 mètres.

Les résultats issus des SP seront utilisés à titre de comparaison avec les sites Lyonnais.

- *Site L105 – 10,12 rue Joliot Curie*

Le site L105 est localisé sur la colline de Fourvière, dans le 5<sup>e</sup> arrondissement de Lyon (quartier du Point du Jour). Le diagnostic s'est déroulé du 24 au 26 février 2004, sous la direction d'E. Bernot (BERNOT 2004a). Il a révélé environ 1 m de stratification datée des 18<sup>e</sup> – 20<sup>e</sup> s. Ce site sera également utilisé pour compléter le référentiel archéologico-mécanique.

- *Site L025 – 25 rue Joliot Curie*

Le site L025 est situé à proximité du site L105 et a été diagnostiqué les 22 et 23 juin 2004 par E. Bernot (BERNOT 2004b), dans le cadre de travaux d'aménagement. Il révèle une stratification de remblais et de terres labourées datées du 20<sup>e</sup> siècle sur environ 0,75 m d'épaisseur. De même, ce site sera exploité pour le référentiel.

- *Site LTRI – 4bis, 6 rue des Fossés de Trion*

Le site LTRI est aussi situé dans le 5<sup>e</sup> arrondissement. Le diagnostic a eu lieu du 24 au 27 Mars 2003 par E. Bernot et C. Becker de l'équipe du SAM de Lyon (BERNOT, BECKER 2003). 3 sondages au mis au jour 3 à 4 mètres de remblais modernes et actuels ainsi qu'une maçonnerie qui pourrait plus ancien. Les observations sur le site compléteront l'analyse des autres sites.

### 3-4-2- Site 5MA - Cinq-Mars-La-Pile (37)

La fouille du site 5MA s'est déroulée du 20 juin au 31 juillet 2005, sous l'encadrement d'E. Marot et O. Marlet (LAT- Service archéologique départemental d'Indre-et-Loire) (MAROT, MARLET 2005). Le site se trouve à l'emplacement de la pile romaine (funéraire ?) dans la commune de Cinq-Mar-sLa-Pile (Pl. 19). Les observations montrent une occupation depuis la seconde moitié du 2<sup>e</sup>s. (pile) jusqu'au 20<sup>e</sup> s. entre 1 et 2 mètres d'épaisseur selon la zone étudié (relief très marqué). Les résultats sur des niveaux spécifiques, comparables à ceux rencontrés à Tours, seront intégrés ici.

### 3-4-3- Site STO - Stolpie en Pologne

Dans le cadre de l'ACI TTT (Théorie Terrain Technique), une collaboration avec des archéologues polonais (A. Buko) et des géophysiciens de l'Université de Paris 6 (A. TAbbagh, J. Thiesson) a conduit à une campagne de prospection géophysique et géotechnique du 20 au 29 Août 2004, à Stolpie, à 8 km à l'ouest de Chelm, au sud-est de la Pologne (Pl. 20). Les parcelles étudiées avaient déjà l'objet de prospection pédestre. L'objectif était de croiser ces différentes techniques d'un point de vue méthodologique (maillage, échantillonnage) et la détection de vestiges dans des parcelles situées à proximité du site de Stolpie. L'emploi du PANDA sera présenté avec le couplage de la prospection géophysique.

Ce chapitre a permis de démontrer que Tours possède un potentiel informatif suffisant pour tester les méthodes d'évaluation à l'échelle de la ville et à l'échelle du site. Des transects ont été sélectionnés pour tester le pénétromètre et pour restituer l'épaisseur du dépôt archéologique. Ainsi, un des objectifs est d'analyser la relation entre l'épaisseur et l'intensité des activités humaines.

Un corpus de 6 sites a été choisi pour résoudre les questions de l'évaluation à l'échelle du site : la reconnaissance et la caractérisation interne du dépôt archéologique. Ce corpus a été complété par 1 site en Indre-et-Loire et par 5 autres à Lyon.

Enfin, un site en milieu rural a été étudié pour la question du couplage des méthodes géophysiques et géotechniques

## **Chapitre 4- Evaluation du potentiel informatif à l'échelle de la ville : l'exemple de Tours**

Pour résoudre les objectifs de l'évaluation à l'échelle de la ville, il est nécessaire de réunir toutes les informations qui nous renseignent sur :

- l'épaisseur du dépôt archéologique
- le découpage interne du volume de sol urbain. Dans la dimension verticale, on se concentre sur les usages du sol et dans la dimension horizontale, on définit les limites des composantes socio-spatiales
- l'inventaire des destructions portées au sous-sol.

Je présenterai d'abord les informations utiles à l'évaluation qui ont été retenues pour la ville de Tours, puis j'aborderai les différentes approches qui ont été testées pour étudier le caractère hétérogène du sous-sol à partir des données géotechniques acquises au PANDA et des observations archéologiques.

#### **4-1- L'acquisition des données utiles à l'évaluation à l'échelle de la ville**

Pour répondre aux objectifs de l'évaluation à l'échelle de la ville, il convient de recueillir toutes les informations concernant l'épaisseur du dépôt archéologique et sa caractérisation interne lorsque c'est possible. Pour optimiser les résultats et réaliser une modélisation du volume du sol urbain, il faut que ces informations puissent être intégrées dans une base de données géographique. Pour cela, plusieurs critères de sélection ont été retenus :

- la localisation obligatoire des informations dans l'espace
- l'attribution d'un indice de qualité des informations
- l'utilisation de descripteurs communs (épaisseur totale du dépôt et/ou des activités humaines, cotes altimétriques, datation).

Pour Tours, j'ai choisi d'étudier plusieurs sources disponibles : les données archéologiques, les données planimétriques, les sondages géologiques et/ou géotechniques et l'inventaire des atteintes portées au sous-sol. Pour pouvoir acquérir les informations utiles, il a fallu mettre au point des méthodes adaptées à la nature de la source mais aussi aux questions historiques énoncées plus haut. Il faut noter que les sources écrites ne seront exploitées qu'à partir des travaux de seconde main.

Par ailleurs, avec la collaboration de géotechniciens (CDGA – Bordeaux I), il a été choisi de réaliser une prospection géotechnique à l'aide du pénétromètre PANDA. Le but ici est de vérifier si cette nouvelle source d'information est susceptible de répondre au double- objectif qui a été fixé : mesurer l'épaisseur du dépôt et le caractériser. Ainsi, une partie de la recherche a été consacrée à la préparation et la conduite de cette prospection mais aussi à l'exploitation des données pénétrométriques.

Enfin, il faut noter que la phase d'acquisition a été un élément important de l'étude car il a fallu consacrer beaucoup de temps à l'élaboration de la méthodologie, puisqu'il n'existe pas d'étude similaire antérieure à ces travaux.

Dans cette partie, je présenterai les différentes sources disponibles pour étudier la ville de Tours ainsi que la méthodologie employée pour recueillir les informations utiles à l'évaluation du potentiel informatif à l'échelle de la ville. Certaines informations ont été acquises à l'échelle de l'espace urbanisé ancien mais notre attention se portera sur l'analyse des transects choisis.

#### 4-1-1- Les données archéologiques

- *Méthode d'acquisition*

Pour pouvoir considérer les données archéologiques à l'échelle de la ville, chaque site fournira un ou quelques points suivant la complexité des résultats. Ces points correspondent à des logs. L'objectif est de reprendre chaque observation, diagnostic ou fouille afin de restituer une coupe représentative de chaque site. Etant donné que l'appréhension de ce type de source était difficile, la réalisation de ces logs s'est faite en deux étapes :

1 – La réalisation de **logs à l'échelle des sites** afin de faire le point sur d'éventuelles lacunes d'ordre historique. Chaque log est constitué à partir des relevés d'US (description et interprétation), ou de phases archéologiques le cas échéant. On a donc retenu l'interprétation fonctionnelle et chronologique de chaque activité humaine dont on peut mesurer l'épaisseur. Les activités humaines sont celles de la typologie fonctionnelle établie pour la thèse avec la collaboration de M. Fondrillon et présentée dans la première partie (cf 1-4).

2 – La réalisation de **logs à l'échelle de la ville** à partir de dates de référence afin de les rendre comparables à l'aide des logs à l'échelle des sites. Il a été choisi de retenir des périodes de 500 ans car un découpage plus fin aurait limité le nombre de logs. Pour chaque période, on a retenu les cotes altimétriques inférieures et supérieures des activités humaines correspondantes. L'objectif est, à partir de ces points d'observation, d'obtenir des niveaux altimétriques du sol la ville à un temps *t*. Les éléments d'observation ciblés ici sont les niveaux de circulation à l'extérieur et les niveaux de fondation ou de construction.

Cette méthode a été adaptée aux questions historiques de Tours et à la disponibilité des informations. La majorité des rapports d'étude des sites réalisés par le LAT ou l'INRAP a été consultée. De plus, ces recherches ont été facilitées, d'une part, par la constitution du SIG du système ToToPI mis au point par le LAT et d'autre part, par la réalisation de l'exposition « Tours antique et médiéval » (GALINIÉ dir. 2007) qui a mis à jour les connaissances historiques de la ville. Néanmoins, la collecte des informations a posé certains problèmes.

- *Limites de la méthode*

La documentation n'apporte pas le même type d'information selon que l'on consulte un rapport de diagnostic, de fouille préventive ou de fouille programmée. En général, les fouilles fournissent des informations plus complètes (relevés de coupes, description de terrain, datation) que les diagnostics en ce qui concerne la succession des activités humaines et leur datation. De

plus, les méthodes de fouilles et de relevés stratigraphiques ainsi que les normes de présentation ont évoluées depuis les premières fouilles des années 1970 à Tours. Il faut alors homogénéiser les informations afin de rendre comparable les logs archéologiques.

Par ailleurs, il s'avère que les références du NGF ont été changées à partir de 1969 à l'échelle nationale<sup>25</sup>. Pour Tours, les altimétries ont été augmentées de 21 cm en moyenne en raison de cette modification. Jusqu'en 1988, les relevés topographiques des fouilles n'ont pas pris en compte cette correction. Il faudrait alors corriger chacune des cotes des fouilles antérieures au site 12. Cependant, le réajustement du NGF n'est pas très régulier à l'échelle de l'espace urbanisé ancien. En effet, si on ajoute les erreurs de calage et de lecture dues aux outils de relevés (théodolite), il est difficile d'obtenir des cotes corrigées fiables. Il a donc été choisi ne pas modifier les relevés. En conséquence, il ne faut pas espérer une précision décimétrique du modèle du dépôt archéologique.

- *Réalisation des logs archéologiques à l'échelle des sites*

Cette première étape consiste à rendre compte des informations disponibles à partir des sites qui ont fait l'objet de fouille et d'observations. Il s'agit de restituer un ou plusieurs logs représentatifs de la stratification de chacun des sites en repérant les activités humaines dans la longue durée et la cote NGF du toit des alluvions, lorsqu'elle a été observée. Deux types d'informations doivent être relevés : l'épaisseur globale du dépôt archéologique et son découpage en fonction des phases archéologiques.

O. Marlet avait réalisé cet exercice pour la mesure de l'épaisseur du dépôt à partir des fouilles et des points de surveillance que l'on retrouve dans la couche « Paleopt » qu'il a constituée : 180 points d'observations localisés avec la cote du toit des alluvions et l'épaisseur du dépôt (MARLET 2000 : Figure 17a ; Annexe 48). Ces points d'observation ont été très utiles comme base de travail. Cependant, il a été choisi de ne pas prendre la totalité des points dans l'étude puisqu'on peut en observer plus d'une dizaine sur un même site (site 6, 11, 13, 12, 021 et 023). Ainsi, les données issues des sites et des observations ont été examinées à nouveau tandis que les 16 points concernant les sites qui ont fait l'objet de surveillance ont été conservés et seront introduits directement dans la base de données utile pour la modélisation du sous-sol.

Pour répondre aux objectifs, les relevés et les rapports des sites ont été repris pour constituer les logs archéologiques. Ainsi, 44 logs ont été constitués à partir de 30 sites (Pl. 21,

---

<sup>25</sup> Communication orale du géomètre, M de Baudreuil – GéoPlus, Tours.

Annexe 49), même si certains n'ont pas permis d'atteindre le niveau naturel. Il sont numérotés ainsi : « Log + n° site + n° d'ordre », comme par exemple, « Log16-1-1 ». Cette première étape a été assez difficile à réaliser car les informations étaient hétérogènes d'un site à l'autre : certains logs n'ont été élaborés qu'à partir d'un rapport sans coupe stratigraphique.

#### - L'épaisseur du dépôt archéologique

Il est possible d'estimer l'épaisseur du dépôt archéologique lorsqu'on possède la cote altimétrique du toit des alluvions à partir des logs archéologiques. Ainsi, une trentaine de logs sur 44 permettent de fournir ces informations et seront retenus pour la modélisation du sous-sol (Annexe 50). On observe que l'épaisseur varie entre 2 m et 7,2 m dans la zone d'étude (Pl. 22).

#### - Le découpage du dépôt archéologique

Chaque log est découpé selon des « passes » (ou tranche) qui correspondent aux activités humaines enregistrées sur le terrain à l'échelle de la phase archéologique (Annexe 51). Pour chaque passe, on a noté la description générale de l'activité humaine, la fonction archéologique et le type fonctionnel correspondant, déterminé à partir de la grille d'analyse de départ. Les données seront donc comparées en fonction des types fonctionnels. Par ailleurs, les altitudes maximale et minimale ont été reportées afin de calculer l'épaisseur des types fonctionnels ainsi qu'une date inférieure et supérieure, lorsque cela était possible. En outre, un indice de fiabilité a été attribué pour chaque passe : « 2 », pour les données fiables et « 1 » pour les données pour lesquelles il manque une information (fonction et/ou date). Ceci permettra éventuellement de revenir sur les points douteux. Enfin, les coordonnées géographiques ont été ajoutées afin d'exploiter les logs dans un SIG.

Le tableau comparatif suivant (Fig. 18) présente les caractéristiques liées à l'épaisseur des types fonctionnels enregistrés : le minimum et la maximum de l'épaisseur, sa moyenne, son écart-type et son coefficient de variation<sup>26</sup> (c.v.). On observe que l'épaisseur moyenne varie entre 0,15 et 0,85 mètres. Elle est faible pour les niveaux intérieurs et importante pour les niveaux extérieurs et les remblais. La faible variation des niveaux d'occupation indéterminée et des remblais d'usage est expliquée par leur occurrence (seulement 2 passes sur 208). Les niveaux de construction, de destruction et d'occupation extérieurs ont un c.v. supérieur à 0,9 : la variabilité de l'épaisseur est donc très hétérogène d'une passe à l'autre.

---

<sup>26</sup> Le coefficient de variation (c.v.) correspond au rapport de l'écart-type sur la moyenne.

Type fonctionnel	Min épaisseur	Max épaisseur	Moyenne épaisseur	Écart-type épaisseur	c.v. épaisseur	Nombre de "passes"
occ. indet.	0,6	0,65	0,63	0,02	0,04	2 (1%)
construction	0,04	1,63	0,32	0,42	1,31	21 (10,1%)
destruction	0,06	1,8	0,50	0,47	0,95	17 (8,2%)
Occ. extérieur	0,04	3,3	0,68	0,62	0,92	68 (32,7%)
Occ. intérieur	0,07	0,28	0,15	0,06	0,44	6 (2,9%)
remblai	0,05	3,1	0,70	0,58	0,83	92 (44,2%)
aménagement	0,8	0,9	0,85	0,05	0,06	2 (1%)
remblai usage						

Fig. 18 - Caractéristique de l'épaisseur des Types fonctionnels des logs étudiés (en mètre)

Ces résultats montrent la prépondérance des niveaux extérieurs et des remblais d'aménagements dans la formation du dépôt archéologique, toutes périodes confondues (plus de 75 % des passes). Au vu des connaissances préalables sur la formation du sol, il serait intéressant d'effectuer ce type d'analyse pour différentes périodes, mais certaines passes ne sont pas ou mal renseignées sur la date. La question sera traitée plutôt lors de la réalisation de logs à l'échelle de la ville.

En revanche, il est possible de travailler sur la durée d'usage des types fonctionnels à partir de ces logs, réalisés à l'échelle du site. En effet, on peut vérifier s'il existe une corrélation entre épaisseur et durée d'utilisation d'un type. Pour le vérifier, les passes qui ne possèdent pas de données chronologiques ont été éliminées (67 passes). Ensuite, la durée a été mesurée en soustrayant la date minimum de la date maximum (Annexe 52).

Ainsi, dans un premier temps, la distribution des épaisseurs moyennes de chaque type fonctionnel a été étudiée en fonction de classe de durée. Les classes de durées ont été numérotées comme suit : classe « 1 » pour une durée de 0 à 99 ans, classe « 2 » pour une durée de 100 à 199 ans, etc... (Pl. 23, Annexe 53). On observe que :

- les usages intérieurs et de destruction peuvent durer entre 0 et 200 ans
- les usages de construction durent entre 0 et 300 ans
- les usages de remblai d'usage entre 0 et 400 ans
- les usages de remblai d'aménagement varient entre 0 et 900 ans
- les usages extérieurs varient entre 0 et 1600 ans.

En conclusion, il faut noter que les activités humaines (niveau extérieur) qui perdurent sur plus de 12 siècles sont situées dans des zones de la ville qui ont été urbanisées dans l'antiquité et qui, ensuite, n'ont pas connu de changement fonctionnel ; il s'agit des sites 60 et 023 situés en périphérie de l'espace urbanisé ancien (durée de plus de 1600 ans) et du site 11, à la périphérie la ville médiévale (durée de 1200 ans).

Dans un deuxième temps, la relation entre la moyenne de l'épaisseur d'un type fonctionnel et sa durée a été analysée. Le nuage de points global montre qu'il n'y a pas de relation déterministe entre la moyenne de l'épaisseur d'un type fonctionnel et sa durée d'existence (Fig. 19). Cependant, si on retire les points qui ont une durée de plus de 1200 ans (représentés en gris), et qu'on ajuste un modèle linéaire au reste des points (en noir), on observe que plus les usages ont une longue durée, plus leur épaisseur augmente, avec un rapport de détermination de 72 %.

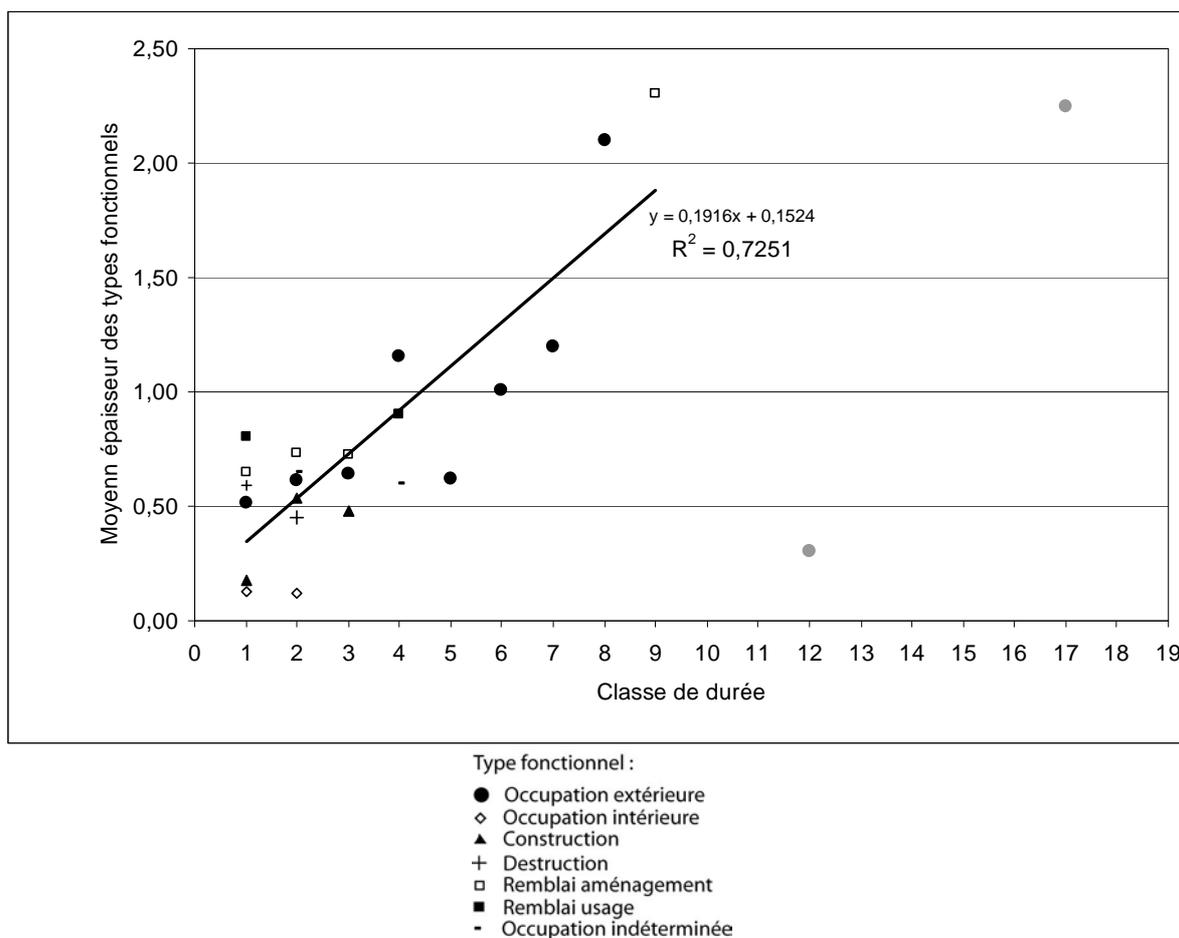


Fig. 19 - Représentation des épaisseurs moyennes des types fonctionnels en fonction de leur durée d'existence

On observe d'ailleurs la même relation pour les niveaux extérieurs avec un rapport de détermination de 65 % (en ne retenant que les ronds noirs) (Fig. 20).

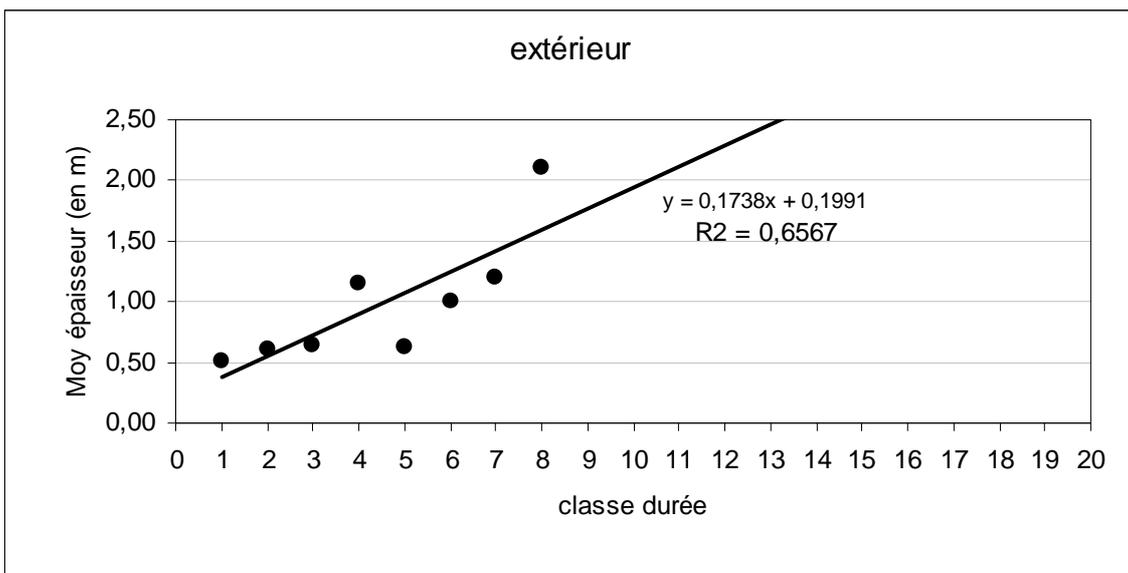


Fig. 20 – Représentation des épaisseurs du type « extérieur » en fonction de leur durée d'existence

Ces premiers points d'analyses concernaient la caractérisation du dépôt archéologique en fonction du facteur temps. Il est difficile d'étudier ces logs sans tenir compte de leur localisation puisque que la combinaison des facteurs temps et espace conditionne la production de sol. C'est pourquoi, il a été choisi de considérer ces deux dimensions pour réaliser et étudier des logs à l'échelle de la ville.

- *Réalisation des logs archéologiques à l'échelle de la ville*

Cette deuxième étape consiste à réaliser des logs à partir d'un paramètre fixe : le temps. Il s'agit de repérer l'activité humaine et estimer sa cote altimétrique selon les périodes retenues : vers 20 ap. JC, vers 500, vers 1500 et vers 2000. On entre alors dans une phase de modélisation de la ville.

Cette étape est délicate car il faut retenir les activités humaines significatives qui ont permis de fixer la topographie urbaine. Ainsi, certaines situations observées à l'échelle du site représentent un événement, soit un détail à l'échelle de la ville tels les niveaux intérieurs à des bâtiments qui varient d'une parcelle à l'autre. En outre, l'idéal est de repérer les niveaux extérieurs, ceux de circulation (jardins, voirie) qui stabilisent à un moment donné la surface de la ville et ceux qui sont temporaires comme ceux qui sont produits lors de la construction ou la récupération d'un édifice (remblai). Cette sélection aura donc pour conséquence de limiter l'approche fonctionnelle par rapport à celle qui a été faite à l'échelle des sites ; les types fonctionnels ne pourront pas être tous étudiés.

Concrètement, ces logs ont été constitués à partir de ceux formés à l'échelle des sites. Toutefois, lorsque des logs étaient finalement difficiles à transposer à l'échelle de la ville, les relevés stratigraphiques ont été à nouveau consultés. Ainsi, les 25 logs obtenus mettent en évidence une variation de la topographie au pas de 500 ans. Pour les dissocier de ceux mis en œuvre à l'échelle des sites, il ont été nommés ainsi : « mod + n°site ». Puis, pour chacune des « passes » de 500 ans, un numéro d'ordre est ajouté; par exemple, la passe du site 1 de 1500 à 2000 est numérotée « mod1-1 » (Pl. 24, Annexe 54).

Ces logs archéologiques ont été exploités, d'une part, pour vérifier **s'il existe un lien entre intensité d'occupation et épaisseur produite** et, d'autre part, pour proposer une représentation graphique du sous-sol en fonction des tranches de 500 ans. Ces études conduites à partir d'un modèle permettent de donner un aperçu du découpage du sous-sol.

#### - Hypothèse de travail sur la production du dépôt archéologique

L'hypothèse de travail, ici, est que **plus l'occupation humaine est intense, plus la production de sol est importante**. Aussi, il est nécessaire de présenter cette hypothèse sous forme de schéma en découpant la ville en fonction de la topographie historique marquante à l'échelle de la ville (cf 3-1-3), du nord vers le sud et de l'ouest vers l'est. On peut donc découper la ville en six espaces (Pl. 25) :

- l'espace situé au nord, le « front de Loire », correspond à l'espace gagné sur la Loire qui a occasionné des remblais importants de l'Antiquité au 17<sup>e</sup> siècle

- la « zone médiane » est comprise entre le « front de Loire » et « les franges de la ville » ; il s'agit de l'espace qui a été le plus urbanisé dans la longue durée

- les « franges de la ville », sont situées au sud de l'enceinte du 14<sup>e</sup> siècle et n'ont été occupées qu'aux 1<sup>er</sup>-2<sup>e</sup> siècles et à partir de 1850

- l'espace « ouest » comprend notamment le quartier de Saint-Martin et son suburbium pour la période médiévale

- le « centre » est l'espace où était certainement concentré le centre monumental antique puis, à la période médiévale, est une zone intermédiaire au quartier Saint-Martin et à la cité dont les activités humaines sont plutôt faibles et spécifiquement rurales (vignes)

- l'espace « est » comprend le secteur de la cité.

Neuf zones sont alors définies par leur appartenance à un espace orienté nord-sud et ouest-est ; on dira alors que la zone A correspond à l'espace situé sur le front de Loire à l'ouest, etc...(Fig.21).

Espaces	Ouest	Centre	Est
Front de Loire	Zone A	Zone B	Zone C
Zone médiane	Zone D	Zone E	Zone F
Franges de la ville	Zone G	Zone H	Zone I

Fig. 21 - Tableau de répartition des neuf zones en fonction des 6 espaces définis à l'échelle de l'espace urbanisé ancien

Dans un premier temps, l'intensité de l'occupation a été représentée pour toutes les périodes dans les neuf zones selon trois critères qualitatifs (

Fig. 22) :

- « 0 », lorsque l'occupation est nulle
- « + », lorsque l'occupation est faible
- « ++ », lorsque l'occupation est moyenne
- « +++ », lorsque l'occupation est forte.

Le tableau donne une lecture de la stratification par zones et par périodes. Pour cette étude, notons que l'intensité de l'occupation est qualitative et non quantitative ; les critères sont estimés par comparaison avec les autres en fonction des connaissances sur la ville. De plus, la démarche englobe les différentes activités humaines qui, on le sait (cf 1-4-4), ne produisent pas la même épaisseur de sol.

Temps			Zones								
			Front de Loire			Zone médiane			Franges de la ville		
			ouest	centre	est	ouest	centre	est	ouest	centre	est
Classe	Date	phases	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1500 - 2000	1850-2000	++	++	++	+++	+++	++	+++	+++	+++
		1500-1850	+++	+++	++	++	+++	++	+	+	+
2	1000-1500	1000-1500	++	++	0	+++	++	++	+	+	+
3	500-1000	500-1000	++	0	0	++	+	++	+	+	+
4	20-500	300-500	0	0	0	+	+	+++	+	+	+
		20-300	0	0	0	+++	+++	+++	+	+++	+

Fig. 22 - Tableau schématique de l'intensité de l'occupation en fonction des phases d'urbanisation et des zones de la ville

Dans un deuxième temps, il a été choisi de traduire ces croix par un chiffre qui correspond à un indice d'occupation afin de faire des calculs par période et par zone à partir de ces 3 critères : « 0 » pour l'occupation nulle, « 1 » pour la faible occupation, « 2 » pour l'occupation moyenne et « 3 » pour la forte occupation (Fig. 23). On obtient donc un indice qui permet de simplifier la vision de la stratification d'un point de vue spatial mais aussi temporel.

Temps			Zones								
			Front de Loire			Zone médiane			Franges de la ville		
			ouest	centre	est	ouest	centre	est	ouest	centre	est
Classe	Date	phases	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1500 -2000	1850-2000	2	3	2	3	3	2	3	3	3
		1500-1850	3	3	2	2	3	2	1	1	1
2	1000-1500	1000-1500	2	2	0	3	2	2	1	1	1
3	500-1000	500-1000	2	0	0	2	1	2	1	1	1
4	20-500	300-500	0	0	0	1	1	3	1	1	1
		20-300	0	0	0	3	3	3	1	3	1

Fig. 23 - Tableau des indices de l'intensité de l'occupation en fonction des phases d'urbanisation et des zones de la ville

La comparaison des classes de 500 ans avec le schéma de l'urbanisation connue pour la ville montre qu'il faut prendre des précautions car certaines périodes intègrent à la fois un phénomène d'extension et de rétraction de la ville. Dans le cas où une classe de 500 ans regroupe plusieurs phases historiques importantes, il s'agit de faire une moyenne de l'intensité de l'occupation (Fig.24).

Temps			Zones								
			Front de Loire			Zone médiane			Franges de la ville		
			ouest	centre	est	ouest	centre	est	ouest	centre	est
Classe	Date		A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	1500 à actuel		2,5	3	2	2,5	3	2	2	2	2
2	1000-1500		2	2	0	3	2	2	1	1	1
3	500-1000		2	0	0	2	1	2	1	1	1
4	20-500		0	0	0	2	2	3	1	2	1
<i>Total</i>			6,5	5	2	9,5	8	9	5	6	5

Fig. 24 - Tableau des indices de l'intensité de l'occupation en fonction des classes de 500 ans et des zones de la ville

Par ailleurs, un indice d'intensité d'occupation global est calculé pour chaque zone en additionnant les indices verticalement. Ce sont les zones D, E et F, situés dans la zone médiane, qui détiennent les indices d'intensité d'occupation les plus fort (indice de 8 à 9,5).

L'indice le plus faible concerne la zone C qui est située au nord de la Cité antique (indice 2). Enfin, les indices globaux des autres zones varient entre 5 et 6,5.

Dans un troisième temps, les indices d'occupation pour chaque période et l'indice total des zones ont été cartographiés (Pl. 26, Pl. 27, Pl. 28, Pl. 29 et Pl. 30).

La répartition de l'indice d'occupation reflète bien l'image de la ville dans la longue durée : une occupation plus importante autour du quartier Saint-Martin et de la Cité et plutôt

faible aux franges de la ville. Par ailleurs, on observe que l'indice d'occupation est plus faible pour la période du Haut Moyen Age, celle de 500 à 1000. Cet indice est à prendre avec précaution car il s'agit d'une période dont les usages sont plus difficiles à interpréter que les autres périodes (« Terres Noires ») et, l'intensité d'occupation a pu être sous-estimée.

L'objectif est donc de vérifier s'il y a une corrélation entre l'indice d'occupation et l'épaisseur de dépôt produite. C'est pourquoi, les épaisseurs du dépôt archéologique ont été étudiées en fonction des classes de 500 ans.

- Etude des épaisseurs des tranches du dépôt archéologique d'une durée de 500 ans

D'abord, il faut se pencher sur la répartition des épaisseurs des différentes tranches ou « passes » des logs en fonction de leur date. On observe que la variabilité des épaisseurs est importante pour les 4 classes ; le coefficient de variation des 3 dernières classes est même supérieur à 0.95 (Fig.25). La classe 3 (500 à 1000) est celle dont la fourchette des épaisseurs est la plus faible (entre 0 et 1,9 m) mais dont la variabilité interne est très forte. Les épaisseurs moyennes sont plus fortes pour les classes 1 (1500 à actuel) et 4 (0 et 500). Par ailleurs, on voit, à partir de la distribution des fréquences cumulées croissantes des épaisseurs (Fig. 26), que les classes 2 et 3 sont assez similaires : 50 % de leurs effectifs ont une épaisseur moyenne inférieure à 50 cm.

N°classe	Date	Min épaisseur	Max épaisseur	Moyenne épaisseur	Écart-type épaisseur	c.v.
1	1500 à 2000	0	4,7	1,85	1,16	0,63
2	1000 à 1500	0	3,05	0,62	0,84	1,35
3	500 à 1000	0	1,9	0,51	0,54	1,07
4	20 à 500	0	4,4	1,20	1,17	0,97
<i>Total</i>		<i>0</i>	<i>4,7</i>	<i>1,05</i>	<i>1,10</i>	<i>1,05</i>

Fig. 25 - Caractéristiques des épaisseurs en fonction de leur date à partir des 25 logs

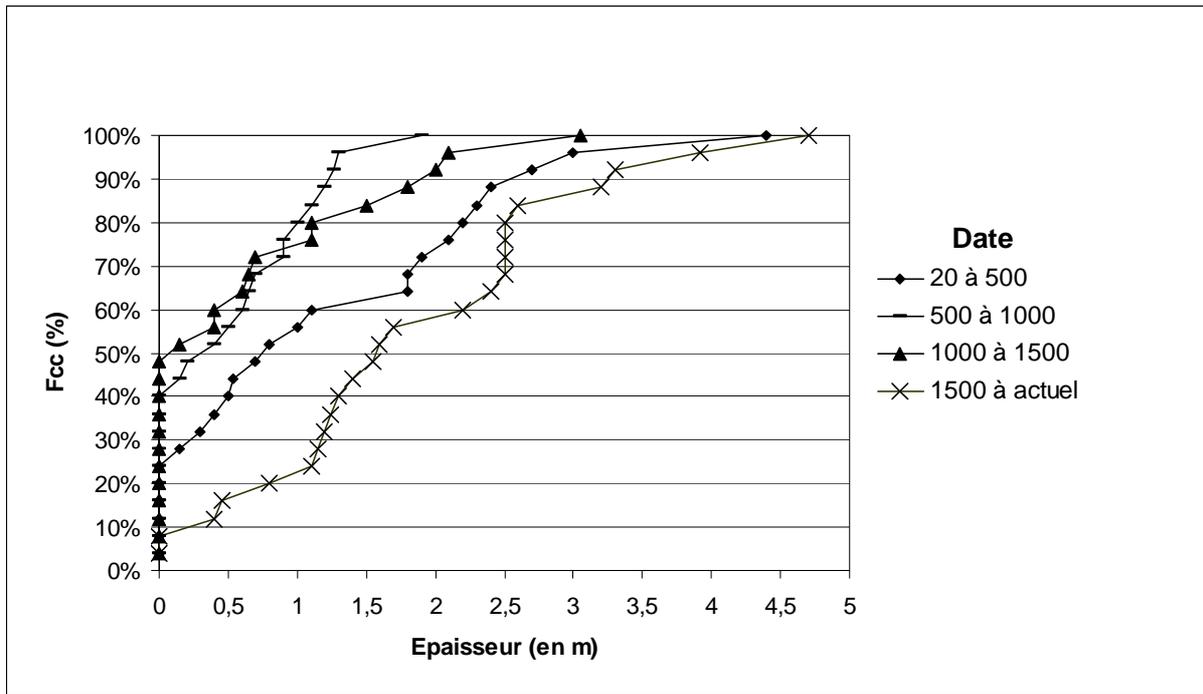


Fig. 26 - Représentation des fréquences cumulées croissantes des épaisseurs des passes en fonction de leur date

Ainsi, pour la ville de Tours, l'épaisseur de sol produite varie selon les périodes de 500 ans. Elle est plus importante pour la période antique et du tout début du Haut Moyen Age (0 à 500) et pour la période moderne et contemporaine (1500 à actuel) que les deux autres périodes.

Ensuite, pour comparer ces résultats avec les indices évalués pour l'hypothèse de travail, il convient de rapporter ces épaisseurs à l'échelle des 9 zones. Le problème est qu'il y a peu de points par zone Il faut alors admettre que ces points sont représentatifs de leur zone respective. Ainsi, une épaisseur moyenne totale et par classes pour chaque zone a été calculée à partir des points correspondants (Fig.27).

Zone	Date				indice	Moyenne épaisseur Totale / tranches	Indice Total
		Moyenne (épaisseur)	Écart-type (épaisseur)	c.v. (épaisseur)			
A	1500-2000	1,40	0	0	2,5	0,85	6,5
	1000-1500	2,00	0	0	2		
	500-1000	0	0	0	2		
	20-500	0	0	0	0		
B	1500-2000	1,65	0,85	0,52	3	1,43	5
	1000-1500	2,08	0,97	0,47	2		
	500-1000	0,45	0,45	1,00	0		
	20-500	1,55	1,15	0,74	0		
C	1500-2000	1,15	0	0	2	0,80	2
	1000-1500	0	0	0	0		
	500-1000	1,90	0	0	0		
	20-500	0,15	0	0	0		
D	1500-2000	2,74	1,33	0,49	2,5	1,39	9,5
	1000-1500	0,86	0,83	0,97	3		
	500-1000	0,48	0,53	1,10	2		
	20-500	1,49	1,08	0,73	2		
E	1500-2000	2,10	0,40	0,19	3	0,99	8
	1000-1500	0	0	0	2		
	500-1000	0,30	0,30	1,00	1		
	20-500	1,55	0,85	0,55	2		
F	1500-2000	1,25	1,02	0,82	2	1,28	9
	1000-1500	0,35	0,27	0,76	2		
	500-1000	0,55	0,41	0,75	2		
	20-500	2,97	1,01	0,34	3		
G	1500-2000	2,35	1,17	0,50	2	0,80	5
	1000-1500	0,25	0,26	1,04	1		
	500-1000	0,23	0,23	1,01	1		
	20-500	0,38	0,41	1,11	1		
H	1500-2000	1,77	0,62	0,35	2	0,90	6
	1000-1500	0,25	0,43	1,72	1		
	500-1000	0,39	0,44	1,12	1		
	20-500	1,18	0,60	0,51	2		
I	1500-2000	0,23	0,23	1,00	2	0,59	5
	1000-1500	0,90	0,90	1,00	1		
	500-1000	1,23	0,03	0,02	1		
	20-500	0	0	0	1		

Fig. 27- Tableau des épaisseurs et des indices de l'intensité de l'occupation en fonction des tranches de 500 ans et des zones

On observe une corrélation entre l'indice d'intensité d'occupation et l'épaisseur moyenne plus forte pour la tranche antique (20-500) (

Fig. 28). La tranche de 1500-2000 possède la même tendance que la tranche 20-500. Toutefois, la tendance est inversée pour la tranche de 500-1000 : plus l'indice augmente, plus l'épaisseur diminue. En outre, il n'existe pas de corrélation entre l'indice d'occupation et la variabilité des épaisseurs.

Puisqu'il s'agit d'un modèle réalisé à partir des logs d'observations, certaines périodes se retrouvent sans épaisseur de stratification. Or, un indice d'occupation a été affecté pour ces tranches. On observera donc une incohérence pour la zone A (tranche de 500 à 1000), la zone E (de 1000 à 1500) et la zone I (de 20 à 500). Ce type d'incohérence pourra être utile aux archéologues qui devront vérifier l'hypothèse d'une occupation dans ces zones pour ces périodes spécifiques lors de futurs diagnostics.

De même, le modèle propose un indice d'occupation nul pour certaines périodes, or les observations de terrain révèlent la présence de stratification pour les zones B et C (2 premières tranches). Ce sont des zones pour lesquelles le trait de rive a été modifié durant ces périodes. Il sera donc nécessaire d'ajuster le modèle pour ces cas particuliers.

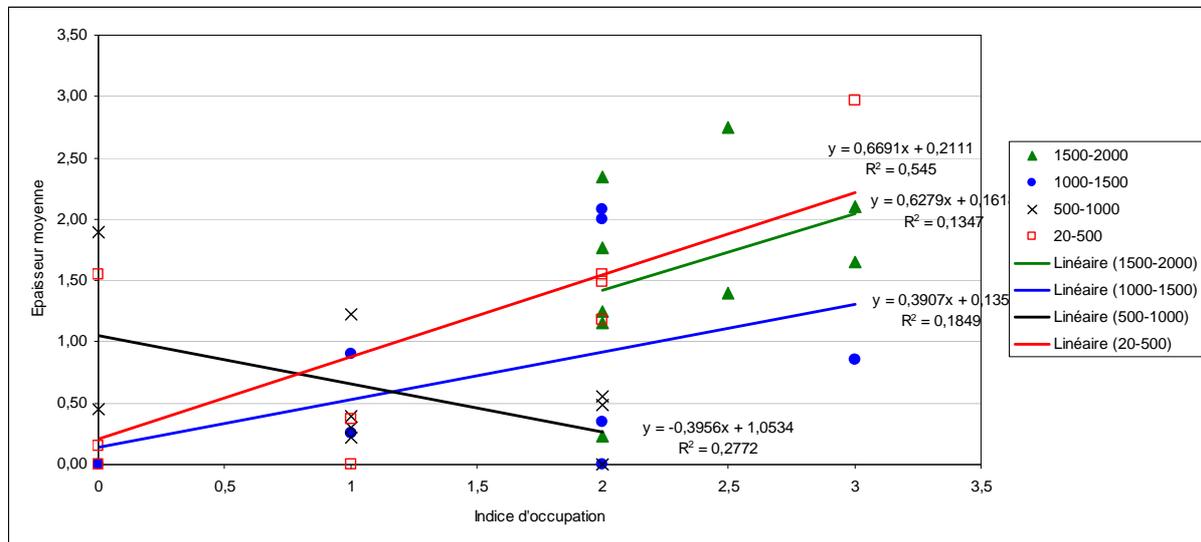


Fig. 28 - Distribution des épaisseurs moyenne en fonction des indices d'intensité d'occupation pour chaque tranche de 500 ans et pour chaque zone

On considère ici que la somme des régressions moyennes correspond à un **modèle de production globale de stratification**. Ainsi, pour chaque zone, on peut calculer une épaisseur totale à partir des équations des régressions et des indices d'intensité d'occupation. D'après le modèle de production globale de stratification, l'épaisseur totale estimée varie entre 3,1 et 5,4 m à l'échelle de l'espace urbanisée (Pl. 31).

Zone	Date	épaisseur moyenne	indice	Epaisseur totale	épaisseur modèle	épaisseur totale modèle
A	1500-2000	1,40	2,5	3,40	1,73	3,12
	1000-1500	2,00	2		0,92	
	500-1000	0,00	2		0,26	
	30-500	0,00	0		0,21	
B	1500-2000	1,65	3	5,73	2,05	4,23
	1000-1500	2,08	2		0,92	
	500-1000	0,45	0		1,05	
	30-500	1,55	0		0,21	
C	1500-2000	1,15	2	3,20	1,42	2,82
	1000-1500	0,00	0		0,14	
	500-1000	1,90	0		1,05	
	30-500	0,15	0		0,21	
D	1500-2000	2,74	2,5	5,57	1,73	4,85
	1000-1500	0,86	3		1,31	
	500-1000	0,48	2		0,26	
	30-500	1,49	2		1,55	
E	1500-2000	2,10	3	3,95	2,05	5,17
	1000-1500	0,00	2		0,92	
	500-1000	0,30	1		0,66	
	30-500	1,55	2		1,55	
F	1500-2000	1,25	2	5,11	1,42	4,81
	1000-1500	0,35	2		0,92	
	500-1000	0,55	2		0,26	
	30-500	2,97	3		2,22	
G	1500-2000	2,35	2	3,20	1,42	3,48
	1000-1500	0,25	1		0,53	
	500-1000	0,23	1		0,66	
	30-500	0,38	1		0,88	
H	1500-2000	1,77	2	3,59	1,42	4,15
	1000-1500	0,25	1		0,53	
	500-1000	0,39	1		0,66	
	30-500	1,18	2		1,55	
I	1500-2000	0,23	2	2,36	1,42	3,48
	1000-1500	0,90	1		0,53	
	500-1000	1,23	1		0,66	
	30-500	0,00	1		0,88	

Fig. 29 - Tableau des épaisseurs par tranche et totale par zone en fonction du modèle de production de stratification

L'objectif est de confronter ce modèle avec la carte des estimations de l'épaisseur du dépôt archéologique (chapitre 6).

#### - Modélisation graphique du sous-sol selon une durée fixe de 500 ans

L'objectif est de restituer des paléo-MNT pour la ville aux seuils de chaque classe de 500 ans, même si 25 points ne suffisent pas pour ce type de modélisation. On dispose déjà de la topographie actuelle (MNT). D'autre part, dans le chapitre 6, la restitution du modelé de la ville à ces origines fera l'objet d'une étude plus approfondie. Il reste donc à restituer le modelé du sous-sol de Tours vers 500, vers 1000 et vers 1500.

Pour résoudre ce problème, et puisqu'il s'agit d'un essai de restitution graphique, on a choisi d'affecter les cotes altimétriques et les épaisseurs moyennes de chaque tranche de 500 ans à des composantes de la ville, schématisées par des polygones dans le SIG. Il est alors possible de

calculer un volume pour chacune des zones (Fig. 30). Aussi, deux plans réalisés en 3D permettent de visualiser les résultats (Pl. 32 et Pl. 33). Certaines tranches n'apparaissent pas lorsque l'épaisseur moyenne est égale à 0. On voit que la zone médiane est celle dont les épaisseurs sont les plus importantes.

Zone	superficie (ha)	Vol. 1	Vol. 2	Vol. 3	Vol. 4
1	13,09	183279,08	261827,25	0	0
2	8,48	139856,22	176303,60	38142,61	131380,08
3	3,67	42169,65	0	69671,59	5500,39
4	50,38	1381000,00	433305,99	241845,20	750727,82
5	21,51	451646,63	0	64520,95	333358,22
6	19,81	247602,05	69328,57	108944,90	588302,46
7	34,78	817369,13	86954,16	79997,83	132170,33
8	28,22	499556,18	70558,78	110071,70	333037,46
9	54,34	124982,41	489061,60	668384,18	0

Fig. 30 - Estimation des volumes (en m3) du dépôt archéologique en fonction des zones et des tranches de 500 ans

#### • *Bilan*

Les études, à l'échelle de la ville, ont permis de mesurer la relation entre la production de sol et l'intensité des activités humaine. Globalement, pour les périodes antiques (20-500), du Bas Moyen Age (1000-1500) et modernes / contemporaines (1500-2000), plus l'occupation humaine est intense, plus l'épaisseur du dépôt archéologique est importante. Toutefois, dans le cas du Haut Moyen Age (500-1000), plus l'occupation humaine est intense, plus l'épaisseur est faible.

Ces différents résultats sont expliqués par le découpage spatial et temporel de la ville et surtout, par le faible nombre de points d'observation (25 logs). Par ailleurs, les analyses n'ont pas tenu compte de l'activité humaine qui est à l'origine de la production du dépôt archéologique et qui conditionne donc son épaisseur. En effet, les observations faites à partir des logs, à l'échelle du site, montrent des spécificités selon le type de dépôt. De plus, elles ont mis en évidence qu'une activité humaine peut produire une épaisseur de dépôt importante dans temps court (moins de 100 ans voire 50 ans) et produire une épaisseur faible dans un temps long. Il faudrait donc multiplier les points d'observations à l'échelle de la ville et faire des tests sur d'autres fourchettes chronologiques.

En tout cas, l'étude de ces questions montre la complexité de travailler sur la caractérisation interne du dépôt archéologique. Néanmoins, la constitution des logs archéologiques fournit une base de travail importante pour la thèse car ils pourront être, en partie, intégrés dans la base de données dans le but d'estimer l'épaisseur globale du dépôt archéologique.

Enfin, le modèle de production de stratification calculé à partir des indices d'intensité d'occupation sera confronté avec les estimations des épaisseurs du dépôt calculées à partir d'une méthode d'interpolation (chapitre 6).

#### 4-1-2- Les sources planimétriques

Les plans anciens doivent être consultés, avec toutes les précautions nécessaires, pour compléter les observations sur la topographie historique de Tours et, surtout, pour proposer un découpage de la ville en composantes socio-spatiales.

- *Présentation des sources planimétriques*

Les vues et les plans ont été présentés et commentés dans différentes publications (A PROPOS N°10 1991 ; BISSON 1995 ; PETITFRÈRE 1998), et repris dans les travaux universitaires axés sur la topographie de Tours ainsi que dans les documents de synthèse de fouille. Les représentations urbaines esquissées à partir des 15<sup>e</sup>-16<sup>e</sup> siècles peuvent comporter des détails utiles aux archéologues concernant l'occupation du sol. Néanmoins, il faut être conscient qu'à cette période, les artistes ont produit des images qui « révèlent des conceptions de la ville et des perceptions de l'espace urbain que les sociétés citadines, aidées par les progrès de la cartographie, généraient, ou voulaient imposer » (BISSON 1995 : 10). A partir du 19<sup>e</sup> siècle, les plans deviennent plus précis pour des besoins techniques mais aussi pour des questions touristiques.

Je présenterai, dans le tableau qui suit, les vues et les plans qui pourront être utiles pour compléter les hypothèses sur les usages du sol à différentes périodes (Fig. 31).

Les plans-terriers de la deuxième moitié du XVII<sup>e</sup> siècle, de l'abbaye de Saint-Martin et de Saint-Julien, ont été exploités dans des travaux universitaires récents (MALOCHET 2000 ; GOBIN 2001 ; BOSSEAU 2002 ; NOIZET 2003) (Annexe 55). Je reprendrai les cartes qui ont été réalisées lors de ces travaux et qui représentent les fiefs et les paroisses de Tours.

Enfin, les études morphologiques menées par F. Ben Nejma (BEN NEJMA 1992) et G. Chouquer (GALINIÉ *et al.* 2003a) sur le cadastre napoléonien de 1836 puis l'étude menée par X. Rodier (GALINIÉ, RODIER 2002) sur l'orientation du parcellaire seront utiles pour déterminer les zones d'activités humaines à l'échelle de la ville.

Type source	Source	Observations	Critique Source	Archive
Vue (Annexe 56)	Vue cavalière, publié en 1553 dans <i>L'épitome</i> de Guérout à partir du bois gravé par Balthazar Arnoullet, réédité en 1564 par Jean d'Orgerolles	Vue du nord - présence îles dont celle de Saint-Jacques, activité fluviale - enceinte du 14e s. - ruau Saint-Anne et ruau de l'Archevêque - zone intra-muros densément construite - zone extra-muros occupée entre prés, cours d'eau et habitats le long des voies	Représentation urbaine schématique et stéréotypée difficile à exploiter  A PROPOS N°10 1991, BISSON 1995 ; PETITFRÈRE 1998 : Estampe qui met en valeur les édifices importants de la ville (remparts et édifices religieux) reflétant « la bonne ville ». La ville est présentée comme une île "dans une ambiance aquatique".	Bibliothèque Municipale de Tours
Plan topographique (PI. 7)	<i>Carte particulière de Tours avec le paysage mis en relief</i> , Plume et lavis par René Siette (ingénieur militaire), 1619	Vue du sud et présence d'une échelle. ○ La Loire et ses îles ○ voies principales ○ enceintes urbaines (3 <sup>e</sup> s., 14 <sup>e</sup> s. et projet du 17 <sup>e</sup> s.) ○ plaine inondable du Cher (Les Varennes)	Plan exploitable car présence d'un carroyage et document militaire de défense (BISSON 1995 ; NOIZET 2003 : 155)  H. Noizet a refait une carte à partir du document (NOIZET 2003 : annexe 7).	Bibliothèque Nationale, Paris

Type source	Source	Observations	Critique Source	Archive
Plan topographique (Annexe 57)	<i>Tours et ses environs</i> , Plume et lavis, attribué à Tonon de Rochefou, entre 1675 et 1679	<p>Plan géométral, présence d'une échelle</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rempart antique</li> <li>- rempart 14<sup>e</sup> s. juste avant son démantèlement et assèchements des fossés</li> <li>- rempart 17<sup>e</sup> s. bastionné avec un mail et un fossé</li> <li>- présence de terrains vagues, de jardins dans l'espace situé entre la ville médiévale et la nouvelle enceinte</li> <li>- édifices religieux et politiques mis en valeur</li> <li>- ruau Saint-Anne et ruau de l'Archevêque</li> <li>- chemins dans les Varennes</li> <li>- occupations des îles</li> </ul>	Plan exploitable car relevés soigné des fortifications et du tissu urbain (A PROPOS N°10 1991, BISSON 1995 : 64).	Bibliothèque Municipale de Tours
Plan topographique (Annexe 58)	<i>Plan de Tours</i> , Plume et lavis, extrait de l'Atlas Trudaine (intendant général des Finances), vers 1755	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ enceinte du 17<sup>e</sup> s.</li> <li>○ zone bâtie et zone de jardins en intra-muros</li> <li>○ présence rue de Grandmont</li> <li>○ île Saint-Jacques</li> </ul>	Lié aux travaux du percement d'un axe nord-sud dans Tours, pour le nouveau tracé de la Route d'Espagne (BISSON 1995 : 80)	Archives Nationales, Paris

Type source	Source	Observations	Critique Source	Archive
Plan topographique (Annexe 59)	<i>Passage de la Route d'Espagne dans la ville de Tours</i> , Plan aquarellé attribué à Mathieu de Bayeux, vers 1756	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ axe nord-sud mis en évidence</li> <li>○ construction du Pont Neuf</li> <li>○ suppression île Saint-Jacques</li> <li>○ distinction entre zone bâtie et zone en jardins</li> </ul>	Projet pour être soumis au roi Louis XV en complément des travaux fait pour la rue de Grandmont, à prendre avec des précautions (BISSON 1995 : 81)	Bibliothèque Municipale de Tours
Vue (Annexe60)	<i>Vue de Tours en Ballon</i> , lithographie rehaussé de blanc par Jules Arnout, vers 1855, extrait <i>Excursions aériennes</i> , A. Gatineau ed.	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ enceinte antique</li> <li>○ enceinte du 17<sup>e</sup> s. et son mail</li> <li>○ espaces bâtis</li> <li>○ espaces libres au sud-est de la ville</li> <li>○ Ponts et Loire naviguée</li> <li>○ Gare de la Cie du Paris-Orléans</li> <li>○ Urbanisation le long de la rue de Grandmont</li> </ul>	Vue aérienne donne précisions topographiques importantes. Vue présentée dans un album destinés aux voyageurs (voyages facilités par le développement des chemins de fer) (A PROPOS N°10 1991)	Bibliothèque Municipale de Tours
Plan parcellaire	<i>Plan parcellaire de Tours</i> , vers 1785, réalisé à la plume et au lavis	Tours dans les limites de l'enceinte 17 <sup>e</sup> s. Echelle au 1/1000 <sup>e</sup>	Document doit être inachevé car il manque la partie Sud-ouest du quartier Saint-Martin (NOIZET 2003 : 158)	Archives départementales (37)
Plan parcellaire (Annexe 40)	<i>Cadastre Napoléonien</i> , 1811 puis 1835-1836		Etudié par Fayçal Ben Nejma (BEN NEJMA 1992) pour analyse morphologique.	Archives départementales (37) Version numérisée (LAT – ToToPI)

Fig. 31 – Tableau des sources planimétriques utiles à l'évaluation du potentiel informatif de la ville de Tours

- *Commentaires*

H. Galinié fait un bilan des informations que l'on peut tirer des sources planimétriques (GALINIÉ 2000 : 21):

- pas de trace de la structure de la ville du Haut-Empire dans le parcellaire
- la prégnance du rempart du Bas Empire
- la coupure entre dedans-dehors, entre cité et abords
- trace des enclos canoniaux médiévaux du chapitre de la cathédrale et de celui de Saint-Martin
- gains sur la rive de la Loire
- rôle d'un bras fossile de la Loire dans les délimitations de l'espace urbanisé
- espace urbain divisé en trois parties (cité, centre flou de Saint-Julien et *castrum* de Saint-Martin)
- vraisemblables opérations d'organisation, voire de planification de l'espace
- anomalies énigmatiques.

L'intérêt de l'étude est la possibilité de détecter des contrastes forts suivant les usages du sol à une période choisie. Deux points seront notamment exploités :

- Le premier point est que ces plans révèlent une opposition entre les zones situées à l'extérieur de l'enceinte du 14<sup>e</sup> (champs, zones inondables ou marécageuses) et celle située *intra-muros* (bâti dominant). Ainsi, lors de la construction de l'enceinte du 17<sup>e</sup> siècle, ces zones « rurales » sont intégrées à la ville mais ne changent pas d'usage avant la fin du 18<sup>e</sup> siècle. Donc, on peut poser comme hypothèse que cette partie sud de la ville, constituée essentiellement de niveaux de jardin ou de zones de culture de l'antiquité au 18<sup>e</sup> siècle, possède une stratification beaucoup plus homogène que celle située à l'intérieur des enceintes antiques et médiévales ;

- Le deuxième point concerne l'évolution spatiale et temporelle des comblements/creusements des fossés défensifs. En croisant ces observations avec les données issues des fouilles, le creusement/comblement de ces structures engendre une production de dépôt archéologique importante qu'il ne faudra pas négliger dans la réalisation de cartes d'estimation du dépôt archéologique.

#### 4-1-3- Les données géotechniques et géologiques

Il a été vu, dans le 2<sup>e</sup> chapitre, que les sondages géologiques et/ou géotechniques réalisés en ville, lors de travaux d'aménagement, apportent des informations sur la constitution du sous-sol et peuvent être une source d'information pour évaluer le potentiel informatif.

Ainsi, les sondages géologiques et géotechniques retenus pour les travaux des géographes (BLIN 1998 ; TABERLY 1999) ainsi que ceux repris par O. Marlet dans sa maîtrise (MARLET 2000) seront utilisés pour l'étude de Tours. Ces sondages s'arrêtent pour l'année 1999. C'est pourquoi, la liste a été complétée avec ceux compris entre la fin de 1999 et le printemps 2005, réalisés par les mêmes bureaux d'études.

- *Vérification des sondages acquis avant 1999*

Avant d'exploiter les sondages géoréférencés par les géographes, il a été choisi de les vérifier et éventuellement de les enlever s'ils s'avéraient être incohérents avec les connaissances actuelles (topographie actuelle et observations archéologiques) et d'un point de vue technique (mélange du remblai et des alluvions). On observe aussi, par exemple, que certaines formations ont été interprétées par les géotechniciens comme de la tourbe alors qu'elles correspondent aux comblements des fossés défensifs que l'on intègre dans les niveaux appartenant au dépôt archéologique.

Pour la vérification, deux fichiers ont été utilisés :

- « SONDAGES\_CORRIGER.xls », le tableau des enregistrements des sondages géologiques étudiés par les géographes (Annexe 61)
- « carottesOM.tab », les données géologiques géoréférencées retenues par O. Marlet pour sa maîtrise, qui permet de contrôler la base de données des géographes (Annexe 62).

L'objectif était d'obtenir un fichier de points d'observations géologiques qui possèdent une valeur de l'épaisseur du dépôt et leurs coordonnées X, Y et Z. A l'aide de ces deux fichiers, la couche « sond\_corr\_AL\_selec » a été créée dans le SIG en tenant compte des limites de la zone d'étude. D'abord, un tri des sondages de la couche « carottesOM » a été effectué à l'aide de « SONDAGES\_CORRIGER », en enlevant 12 sondages dont 9 ne possédant pas d'informations sur la présence de « remblais » dans la description géologique (Annexe 63) et 3 provenant des sites archéologiques intégrés dans la base en 1999 (site 11, 023 et 024). Ensuite, lors d'une deuxième vérification occasionnée par la constitution de la base de données utilisée pour les calculs d'estimation de l'épaisseur du dépôt archéologique, 8 sondages ont été éliminés. En effet,

d'après les observations issues de fouilles ou de l'analyse de la topographie actuelle, l'épaisseur du dépôt archéologique a été sous-estimée. Enfin, des corrections ont été faites sur 4 autres sondages concernant la cote altimétrique du toit des alluvions.

Au final, dans la zone étudiée, 65 sondages géologiques ont été retenus sur les 85 enregistrés par les géographes.

- *Acquisition de nouvelles informations issues des sondages géologiques et géotechniques de 1999 à 2005*

Des informations géotechniques récentes ont été récoltées auprès des bureaux d'études du sol. A Tours, il s'agit de CEBTP et SOLEN (anciennement SOPENA) qui appartiennent maintenant au groupe GINGER. D'autres bureaux d'étude ont été sollicités ; seules les agences SOCOTEC (Tours) et Géotech (Orléans) ont répondu et possèdent quelques informations qui m'ont permis de compléter la liste.

Pour chaque sondage, les résultats sont présentés sur une fiche. Un log est constitué à partir des interprétations des prélèvements. Les mesures de résistance et celles des temps d'avancement figurent en parallèle avec les différentes formations. Ces informations n'ont pas été retenues mais il est possible de retourner à la source.

Ce qui est important ici est la méthode qui a été utilisée pour reconnaître les remblais et les alluvions. Lorsqu'un sondage n'est réalisé que par rotopercussion, il y a un risque fort que les remblais ne soient pas distingués des alluvions. Enfin, ce qui est intéressant est la nature et l'épaisseur des différentes formations. Les géographes puis O. Marlet avaient pris le parti de différencier le substratum, les alluvions et le remblai afin de réaliser des cartes du toit du substratum, du toit des alluvions et des épaisseurs du dépôt archéologique (cf cartes en annexe). Ce principe a donc été suivi afin de comparer les données.

Toutefois, la localisation précise des sondages a posé problème car leurs coordonnées géographiques (X, Y) sont très rarement mentionnées. La coordonnée Z d'origine n'est pas toujours absolue, il faut donc se reporter à un plan des cotes altimétriques de la ville : la mesure devient alors moins fiable.

Etant donné que la qualité de l'information varie d'un sondage à l'autre, les sondages récemment acquis ont été classés suivant plusieurs critères, la présence de l'altitude d'origine (Z), la présence d'un plan de localisation et la distinction entre les remblais et les alluvions ; un code est alors affecté (Fig. 32).

Code classe	Présence du Z à l'origine	Présence d'un plan de localisation	Distinction entre les remblais et les alluvions
A	X	X	X
B		X	X
C	X		X
D			X
E	X	X	
F		X	
G	X		
H			

Fig. 32 – Tableau de classification des sondages en fonction de la présence des informations géographiques et la qualité de l'observation.

Afin d'homogénéiser la saisie des informations et de faciliter les requêtes, une base de données a été créée sur 4<sup>e</sup> Dimension : « BDgeotech ». Ceci est nécessaire car les sondages difficiles à localiser (classes C, D, G, H) peuvent apporter des informations intéressantes et pourront être utilisés pour critiquer les résultats concernant la variation des épaisseurs des remblais et des alluvions. Notons que la base « BDgeotech » est inspirée de certains éléments de description présents dans les bases de Lyon et Bordeaux (cf 2-2-1)

La structure de BDgeotech est organisée suivant trois tables (Fig. 33) :

- table SITE
- table SONDAGE
- table FORMATIONS

Chaque table est composée de différents champs.

La table SITE est renseignée par le nom de la ville, le nom du site (qui est son identifiant), le numéro de site (s'il s'agit d'un site archéologique) et son adresse.

La table SONDAGE est composée du nom du site correspondant, le numéro de sondage (qui est son identifiant), le numéro d'enregistrement (donné par les géotechniciens), le niveau d'analyse (classe définie ci-dessus), l'outil principal utilisé pour le sondage, le bureau d'étude (Solen ou CEBTP) et l'année de réalisation de sondage.

La table FORMATIONS est constituée du numéro de sondage correspondant, le numéro de formation (qui est son identifiant), la nature de la formation (remblai, alluvion ou substratum), le constituant dominant, la texture lié au constituant dominant, les autres constituants, la couleur, l'épaisseur, le Z maxi et le Z mini.

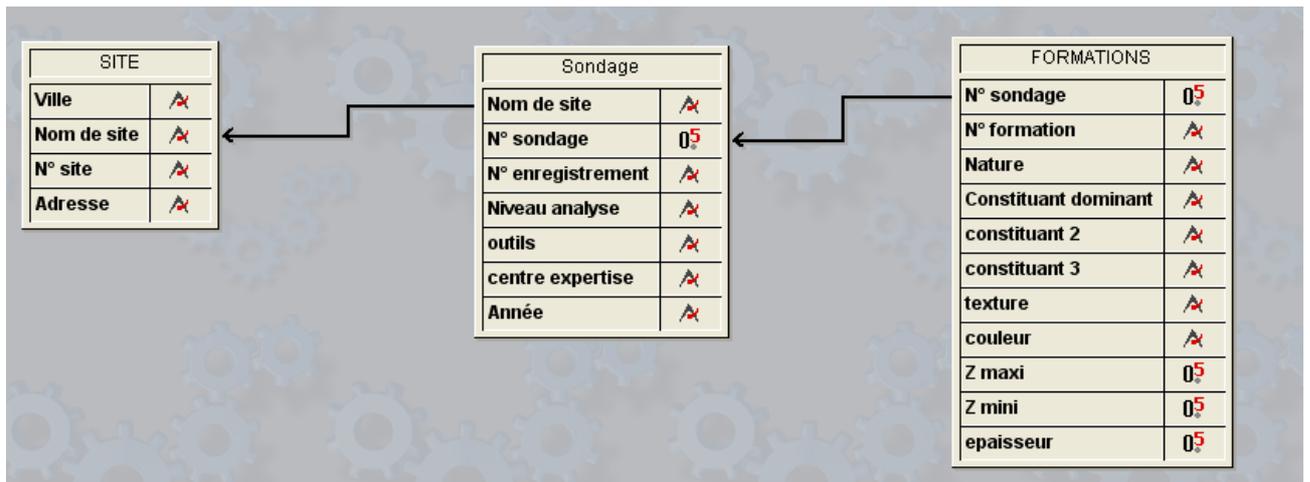


Fig. 33 - Structure de la base de données « BDgeotech » réalisée avec 4° Dimension

Ainsi, 44 sondages ont été enregistrés pour 16 sites dans la base BDgeotech par soucis d'exhaustivité (Fig. 34, Annexe 64). Seuls 15 sondages seront retenus pour constituer la base de données pour la modélisation de l'épaisseur du dépôt et du toit des alluvions (Fig. 34, en gras). En effet, ceux-ci ont été sélectionnés car ils sont géoréférencés et sont considérés comme fiables (description, mode d'acquisition). A noter, qu'une erreur de manipulation a engendré l'oubli du n°4 qui est en fait fiable.

Enfin, en 2006, deux sondages carottés ont été réalisés par les géologues de l'université (GéAC) avec la collaboration d'archéologues du LAT à l'intérieur de l'amphithéâtre antique (Annexe 28). Ils ont été également intégrés dans le SIG.

SITE	N° sondage	référence	code	outil principal	centre expertise	année
<b>Cinemas studio</b>	<b>1</b>	SP1	B	pressiometre	CEBTP	2001
<b>Cinemas studio</b>	<b>2</b>	SP4	B	pressiometre	CEBTP	2001
<b>musee des beaux arts</b>	<b>3</b>	SP1	A	tarière	CEBTP	2002
Ecole Saint-Martin	4	T2	B	tarière	CEBTP	2001
<b>Clinique Saint-Gatien</b>	<b>5</b>	F1	B	tubage	SOLEN	2002
rue Giraudeau	6	SP2	C	rotopercussion	SOLEN	2000
<b>Les glycines</b>	<b>7</b>	SP2	D	rotopercussion	SOLEN	1999
<b>Descartes</b>	<b>8</b>	SP1	A	carotte	SOLEN	1999
Descartes	9	SP2	A	carotte	SOLEN	1999
<b>Descartes</b>	<b>10</b>	SP3	A	carotte	SOLEN	1999
Descartes	11	SP7	C	tarière	SOLEN	2000
Descartes	12	SP8	C	carotte	SOLEN	2000
Descartes	13	SD9	C	tarière	SOLEN	2000
Descartes	14	SD4	E	rotopercussion	SOLEN	1999
Descartes	15	SP5	A	rotopercussion	SOLEN	1999
Descartes	16	SD6	G	rotopercussion	SOLEN	1999
<b>Descartes</b>	<b>17</b>	SP1	B	tarière	SOLEN	2004
Descartes	18	SP2	B	tarière	SOLEN	2004
Carre de verre	19	SP1	C	tarière	SOLEN	2004
Carre de verre	20	SP2	C	tarière	SOLEN	2004
Kiosque - Parc Mirabeau	21	SP1	D	rotopercussion	SOLEN	2001
Parking Anatole France	22	SP2	C	tarière	SOLEN	1999
Parking Anatole France	23	SP3	C	tarière	SOLEN	1999
Parking Anatole France	24	SD4	C	tarière	SOLEN	1999
Parking Anatole France	25	ST6	C	tarière	SOLEN	1999
<b>CNR</b>	<b>26</b>	SD1	A	pressiometre	CEBTP	2004
CNR	27	T2	E	tarière	CEBTP	2004
CNR	28	SD3	E	pressiometre	CEBTP	2004
Tanneurs	29	SD1	E	pressiometre	CEBTP	2004
<b>Tanneurs</b>	<b>30</b>	SD2	A	pressiometre	CEBTP	2004
Tanneurs	31	SD3	E	pressiometre	CEBTP	2004
Grand optical	32	SP2	D	rotopercussion	SOLEN	1999
Clinique Saint-Gatien	33	SP1	C	rotopercussion	SOLEN	2001
Rue Dabilly	34	SP1	D	tarière	SOLEN	2004
Tour de Guise	35	SP1	G	rotopercussion	SOLEN	2001
<b>Clinique Saint-Gatien</b>	<b>36</b>	F2	B	carotte	SOLEN	2002
<b>Clinique Saint-Gatien</b>	<b>37</b>	F3	B	tubage	SOLEN	2002
Clinique Saint-Gatien	38	F4	B	tubage	SOLEN	2002
Clinique Saint-Gatien	39	F5	B	tubage	SOLEN	2002
<b>Clinique Saint-Gatien</b>	<b>40</b>	F6	B	tubage	SOLEN	2002
Clinique Saint-Gatien	41	F7	B	tubage	SOLEN	2002
Clinique Saint-Gatien	42	F8	B	tubage	SOLEN	2002
<b>rue Mirabeau</b>	<b>43</b>	SP2	B	pressiometre	Egsol	2005
<b>rue Mirabeau</b>	<b>44</b>	SP3	B	pressiometre	Egsol	2005

Fig. 34 – Tableau des sondages répertoriés dans la zone d'étude entre 1999 et 2005 pour Tours (en gras, ceux retenus pour l'étude)

Ainsi, la vérification des anciens logs ainsi que l'acquisition de nouvelles informations issues des sondages géotechniques et géologiques ont permis de retenir **82 points d'observations** (65 + 15 + 2) à l'échelle de l'espace urbanisé ancien avec une indication de l'épaisseur du dépôt archéologique et la cote du toit des alluvions (Pl. 34). Ces points seront intégrés dans la base finale dédiée à la modélisation du volume du sol urbain.

#### 4-1-4- Les informations sur les atteintes portées au sous-sol

Nous avons vu dans le premier chapitre que, pour estimer l'état de conservation du sous-sol, il faut réaliser un inventaire des destructions. Elles ont été engendrées partiellement par la succession de construction dans la longue durée. Mais, à partir de la Reconstruction, dès 1945, des surfaces sont totalement détruites. A Tours, la Reconstruction touche la partie centrale qui est profondément remodelée. Puis à partir des années 1960, deux secteurs ont été définis à l'ouest, le secteur de restauration et celui de la Rénovation-Réhabilitation (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 39) (Annexe 65). Ces projets rendent certaines surfaces inaccessibles aux archéologues et endommagent pour certains la totalité du dépôt.

A partir de 1977, le secteur sauvegardé est mis en place et protège les quartiers qui ont un intérêt historique, culturel et esthétique ; ce qui repousse les travaux d'aménagement à la périphérie. Ainsi, Tours est muni d'un plan de sauvegarde et de mise en valeur (PSMV) (BOILLE 1977) qui est mis à jour en 1995 (CONAUT 1998). Les quartiers ainsi régis par le PSMV ne sont pas soumis au plan d'occupation du sol (POS).

Je présenterai donc l'état des connaissances sur les surfaces détruites à Tours puis j'analyserai la part de nos connaissances sur l'ensemble de la ville à travers la relation entre les surfaces fouillées et les surfaces détruites.

##### • *Inventaire des destructions du sous-sol*

A Tours, plusieurs inventaires ont été effectués à l'échelle de l'espace urbanisé ancien. D'abord, en 1978, une enquête a été réalisée et publiée dans *Les archives du sol* (GALINIÉ, RANDOIN 1979a). Il était déjà difficile, par manque de moyens, d'inventorier les destructions partielles dues aux caves ou aux substructions. Néanmoins, « la zone d'occupation dense de Tours au Moyen Age ainsi que les immeubles protégés donnent une idée approximative de la superficie où les caves de maisons médiévales et modernes ont provoqué des bouleversements » (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 40). Les destructions massives, elles, ont été répertoriées. Beaucoup de secteurs sont alors rendus inaccessibles. En outre, dans cette publication, ont été élaborés un plan des principales destructions du sous-sol et des menaces ainsi qu'un plan des sites inaccessibles (Annexe 66)

Ensuite, en 1986, les données ont été réactualisées par les membres du LAT. D'abord, un point a été fait sur la réalisation ou non des destructions prévues et prévisibles en 1978. Puis, une liste du maintien ou pas des menaces prévues et prévisibles en 1978 a été faite. L'ensemble a été cartographié avec l'ajout des surfaces détruites non mentionnées dans l'ancien inventaire (Annexe 67)

Enfin, les observations de 1978 et 1986 ont été intégrées dans le SIG ToToPI et ont été mises à jour (Pl. 35). Globalement, les gros travaux d'aménagements depuis ces vingt dernières années y sont répertoriés. Cependant, il aurait fallu plus de temps pour obtenir une liste exhaustive des surfaces qui ont été détruites depuis 1986. En effet, le problème est que les permis de construire et les permis de détruire, archivés au Service de l'Urbanisme de la ville de Tours, n'ont pas été classés par zones géographiques et ne sont pas informatisés. Il était difficile de dépouiller quasiment 20 ans d'archives. Il a donc été choisi de s'atteler aux plus récents, de 2000 à 2005 et de mettre à jour cet inventaire à partir des surfaces étudiées lors d'interventions archéologiques. Ainsi, la somme des surfaces détruites représente 32.7 ha dans la zone d'étude (235 ha) soit 14 % de cet espace.

Depuis le 19<sup>e</sup> siècle, les destructions ont atteint les niveaux antiques et médiévaux à différents lieux de la ville. Les observations et les hypothèses notées dans *Les archives du sol* (GALINIÉ, RANDOIN 1979a : 40-41) ont été reprises puis complétées avec celles qui sont notables pour les vingt-cinq dernières années (Fig. 35).

Période destructions	Observations-Hypothèses
19 <sup>e</sup> siècle -1945	-Destructions massives au niveau du théâtre (suppression couvent de s Cordeliers), de l'Hôtel de Ville, du Palais de Justice puis de la Poste (habitat antique touché). -Destructions aux limites sud et est de l'enceinte des 16 <sup>e</sup> -17 <sup>e</sup> s. de niveaux pré-romains ( ?) et des quartiers périphériques de la ville ouverte des 1 <sup>er</sup> -2 <sup>e</sup> s. -Destructions de cimetières par la Gare du Canal et la Gare des Chemins de Fer.
1945 – 1960 (Reconstruction)	- Destructions du centre de la ville antique et médiévale (le centre monumental antique ; la zone agricole ( ?) autour de l'abbaye de Saint-Julien pour les 4 <sup>e</sup> -9 <sup>e</sup> s. ; le rempart est du castrum de Saint-martin et la zone extérieure ; les paroisses de Saint-Hilaire, Notre-Dame-de-l'Ecrignole et Saint-Saturnin
1960-1980 (Rénovation- Réhabilitation) à aujourd'hui	- destructions des niveaux du Bas Moyen Age de part et d'autre de la rue des Tanneurs ; de l'éventualité d'un port antique, des quartiers artisanaux au bord de la Loire ; d'une partie de l'enceinte du 14 <sup>e</sup> s. et le couvent des Carmes ; du nord au sud, niveaux antiques (habitat, commerce ?) et médiévaux (abandons ?) ; des paroisses (Saint-Pierre-Le-Puellier, Notre-Dame-la-Riche et Saint-Clément) - destructions des zones entourant l'amphithéâtre au nord et au sud

Fig. 35 – Tableau de l'impact des principales destructions sur le sous-sol de Tours du 19<sup>e</sup> s. à aujourd'hui

- *Analyse de la relation entre les surfaces fouillées et les surfaces détruites*

La mise à jour de l'inventaire des surfaces qui ont été détruites permet d'estimer la part de l'activité archéologique lors des travaux d'aménagement. Il convient de dissocier les interventions archéologiques, qui englobent diagnostics et fouilles des sites, des fouilles réelles des sites qui, elles, participent réellement au renouvellement des connaissances historiques de la ville et donc contribuent à l'évaluation de son potentiel informatif. Les estimations ont été faites à l'occasion de l'ouvrage de synthèse publié à l'issue de l'exposition avec la collaboration de X. Rodier (GALINIÉ dir. 2007).

Il est intéressant de comparer les résultats selon les espaces choisis, soit l'espace urbanisé ancien soit les espaces occupés à différentes périodes. Pour chaque espace, on a calculé la part de la surface fouillée (S3) par rapport à la surface totale, par rapport à la surface détruite (S1) et par rapport à la surface détruite avec intervention (S2). La figure qui suit reprend tous ces calculs (Fig. 36) :

espace	surface (en hectare)	S1	S2	S3	S3/espace	S3/S1	S3/S2
		surface détruite (ha)	surface détruite avec intervention (ha)	surface fouillée (ha)	% fouillée de la surface de l'espace	% fouillée de la surface détruite	% fouillée de la surface détruite avec intervention
<b>ville ouverte</b>	<b>105</b>	20,00	6,00	1,20	<b>1,1</b>	<b>6,0</b>	<b>20,0</b>
<b>cité (castrum)</b>	<b>9</b>	1,20	0,40	0,15	<b>1,7</b>	<b>12,5</b>	<b>37,5</b>
<b>Saint-Martin (castrum + suburbium)</b>	<b>12</b>	0,70	0,12	0,07	<b>0,6</b>	<b>10,0</b>	<b>58,3</b>
<b>espace central</b>	<b>23</b>	6,00	0,70	0,30	<b>1,3</b>	<b>5,0</b>	<b>42,9</b>
<b>ville double</b>	<b>45</b>	10,50	1,50	0,70	<b>1,6</b>	<b>6,7</b>	<b>46,7</b>
<b>enceinte 14e</b>	<b>56</b>	14,00	2,80	0,90	<b>1,6</b>	<b>6,4</b>	<b>32,1</b>
<b>enceinte 17e</b>	<b>175</b>	31,40	7,60	1,70	<b>1,0</b>	<b>5,4</b>	<b>22,4</b>
<b>espace urbanisé ancien</b>	<b>130</b>	28,30	6,10	1,70	<b>1,3</b>	<b>6,0</b>	<b>27,9</b>

Fig. 36 – Tableau des estimations des surfaces fouillées en fonction des espaces étudiés et des surfaces détruites

Dans la zone comprise dans l'enceinte du 17<sup>e</sup> siècle (175 ha), l'emprise des aménagements qui ont donné lieu à une intervention archéologique correspond à 7,6 ha. Il y a donc tout juste 1/4 de ces aménagements qui ont fait l'objet d'une intervention (24,2%).

Pour l'espace urbanisé ancien (130 ha), l'ensemble des surfaces fouillées est estimé à 1,7 ha. On observe que seulement 1,3% de l'espace urbanisé ancien a été fouillé. Ces 1,3%

correspondent à 6 % de l'ensemble des surfaces aménagées et 27,9% des surfaces aménagées qui ont eu des interventions archéologiques. Cela signifie que les interventions archéologiques ne portent globalement que sur 27,9% de l'emprise des destructions qui sont à leur origine.

Cependant, il n'a pas été distingué dans ce calcul, le type des opérations archéologiques (observation, diagnostic, fouille) et si l'on s'en tient au centre géographique de l'espace urbanisé ancien (par addition des espaces de référence Cité, Saint-Martin, espace central, ville double) où ont eu lieu en majorité les fouilles, la surface fouillée représente alors 37,5% à 58,3% de la surface des opérations d'aménagement.

Il ne faut pas pour autant en conclure que la totalité de ces espaces de référence est la mieux documentée. En effet, cette distinction est également présente dans le rapport surface fouillée/surface détruite mais uniquement pour la Cité et Saint-Martin à 12,5% et 10% contre une proportion globale de 6%. La valeur pour la ville double n'est que de 6,7% et, pour l'espace central, c'est la plus faible avec 5%. Cela met en évidence que bien que les interventions archéologiques dans l'espace central représentent 42,9% de la surface des opérations associées, c'est malgré tout cet espace qui est le plus détruit et pour lequel les occasions de fouille sont les plus faibles.

Sans entrer dans le détail, opération par opération, ces indicateurs, globaux et par espace, montrent la part de la connaissance du dépôt archéologique par rapport à son état quantitatif de conservation. Ils peuvent être directement utiles à l'évaluation du potentiel archéologique et à la programmation de la recherche sur la ville.

#### 4-1-5- Les données issues de la prospection au PANDA à Tours

Cette partie est consacrée à la présentation de la démarche que j'ai suivie lors de la réalisation de sondages au pénétromètre (SP) suivant un maillage régulier dans le centre-ville de Tours, de la préparation du projet à l'enregistrement des données pénétrométriques dans la base de données « BaDoPan ». Suite aux réflexions concernant le problème du choix de l'échelle d'analyse (cf 2-2-2), j'ai choisi de me concentrer sur les transects définis plus hauts plutôt que sur l'ensemble de l'espace urbanisé ancien. Cette décision a été motivée par l'échéance de l'exercice, et surtout, par la procédure qu'il faut mettre en place avant de pouvoir réaliser les SP.

- *Mise en place d'un projet d'implantation des SP*

Un plan d'implantation de sondages au pénétromètre a été établi en suivant un maillage régulier pour la ville de Tours (LAURENT 2003 : 25) : la maille de 100 m a été retenue pour cette étude. Ce maillage théorique a été orienté en fonction des surfaces disponibles (jardins privés et publics) sélectionnées (Pl. 36). L'utilisation d'un maillage régulier permettrait de réaliser une interpolation plus efficace des données, seulement, la localisation des points est conditionnée par différentes contraintes. D'abord, certains points du plan ne sont pas localisés sur une surface propice à l'étude. Dans ce cas, il faut repérer la surface la plus proche d'un point théorique pour réaliser un SP. Ensuite, il faut s'informer sur la présence des réseaux enterrés auprès de la ville et des propriétaires. Enfin, il faut obtenir une autorisation d'accès au terrain. Avant de présenter ces étapes, quelques remarques sont à apporter sur le mode d'enregistrement des données, même s'il sera présenté plus en détail à la suite.

Au départ, un numéro de projet de SP a été affecté à chacun des points en sachant que l'idéal est de multiplier les sondages sur un même lieu. Ainsi, le numéro de projet de SP sera considéré comme étant le numéro de lieu dans lequel pourront être réalisés des SP à faible distance (inférieure à 5m). Le numéro de projet sera donc plus lisible pour s'informer sur la présence de réseaux enterrés.

Ensuite, la phase de projet a été dissociée de celle de la réalisation des SP dans l'enregistrement des données. Donc, dans un premier temps, un numéro de projet de SP a été attribué de 1 à n. Puis, dans un deuxième temps, les lieux sondés (appelés SITES dans la base de données BadoPan) ont été enregistrés en fonction d'un code composé de la lettre « T » comme Tours et du numéro de projet (puisque'il y a d'autres villes étudiées). Ainsi, le numéro de projet n°1 devient le site n°T1 avec ce mode d'enregistrement. Par ailleurs, les SP réalisés seront

enregistrés en associant le code du site correspondant et son numéro de réalisation ; le 1<sup>er</sup> SP exécuté sur le lieu T1 sera alors numéroté « T1.1 ».

- *Mise en œuvre du projet : DICT et autorisation auprès des propriétaires*

La phase de mise en œuvre du projet s'est déroulée en plusieurs étapes qui alternent entre la proposition de l'implantation théorique de sondages au pénétromètre et leurs réajustements.

La première étape était de réaliser des Déclarations d'Intention de Commencement de Travaux (DICT) pour s'informer sur la présence de réseaux enterrés dans les zones sélectionnées afin de ne pas les endommager mais aussi pour assurer ma protection (physique et juridique). Les réseaux enterrés peuvent être des câbles électriques, des canalisations de gaz ou d'eau.

Ainsi, dès que le plan d'implantation des projets de SP est établi, il faut passer par plusieurs points. Il s'agit, d'abord, d'envoyer une DICT (Décret n° 91-1147 du 14.10.1991) aux différents services exploitants des réseaux enterrés qui sont concernés par la zone d'étude. D'après ce décret, le formulaire doit être reçu par les exploitants au moins dix jours avant la date de début des travaux. Les exploitants disposent de 9 jours à partir de la date de réception de la déclaration pour faire parvenir leur réponse. Sans réponse de ce délai, il est possible d'entreprendre les travaux 3 jours après l'envoi d'un rappel, à tous les exploitants concernés, en confirmant l'intention.

En outre, si un exploitant envoie une réponse positive, il faut le contacter afin de pouvoir consulter les plans de son réseau. Lors de la consultation des plans, il faut s'assurer de la précision de localisation des ouvrages afin de limiter les risques. Dans ce cas, il faut revoir l'implantation de certains SP. Il s'avère, en fait, que les plans sont produits avant la pose des réseaux : il faut donc réellement prendre des précautions sur le terrain. De plus, les services consultés possèdent rarement les informations concernant les terrains privés. Ainsi, le temps de consultation et du repérage in-situ avec les spécialistes mais aussi, les propriétaires (dans le cas où ils connaissent très bien leur réseau privé !), n'a pas été des moindres dans la phase accordée pour l'acquisition des données.

A Tours, la zone d'étude est exploitée par 9 services : EDF, GDF, FRANCE TELECOM, Service des Eaux de la ville de Tours, Service Eclairage Public de la ville de Tours,

Service Signalisation Tricolore de la ville de Tours, Service Parcs et Jardins de la ville de Tours, Service Assainissement de la communauté de commune (Tour(s)-plus) et Chauffage DALKIA.<sup>27</sup>

La deuxième étape a consisté à réviser le plan d'implantation des SP et la stratégie de la campagne de prospection géotechnique.

Il convient d'abord de revenir sur les origines de cette deuxième étape. En effet, après avoir obtenu des renseignements auprès des services possédant des réseaux enterrés par l'intermédiaire d'une première Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT n°001), il était certain qu'il était trop dangereux de travailler sur les trottoirs et les chaussées.

Cette première DICT concernait les SP théoriques compris dans la zone définie entre la rue Nationale et la rue Mirabeau, et, entre l'avenue André Malraux et le boulevard Heurteloup. Elle comprenait donc environ 60 SP implantés en fonction du maillage théorique défini en DEA. La consultation des plans de réseaux a permis de prendre conscience de la densité des réseaux sous la voirie, et du danger qu'ils présentent. Ceci justifie le choix de travailler uniquement sur des jardins.

Par ailleurs, le nombre de sondages a paru trop important à traiter. Donc, il a été décidé de se focaliser sur les transects définis pour l'étude.

Toutefois, la première DICT avait fourni beaucoup d'informations sur les réseaux. C'est pourquoi les lieux en projet ont été reconduits pour ceux qui sont situés dans les transects n° 3, n°5, n°7 (pour le château), n°8 et n°9 (pour le parc Mirabeau). Les SP de chaque transect ont été implantés en fonction des surfaces disponibles et vides de réseaux enterrés en suivant autant que possible la grille de départ. Au total, 7 DICT ont été réalisés à partir du 17/06/2004 (DICT n°001) au 01/12/2005 (DICT N°007). Le plan d'implantation des projets de SP a été réajusté plusieurs fois. (Pl. 37, Annexe 68).

Enfin, la troisième étape consistait à demander l'autorisation d'accès aux terrains privés et publics (Annexe 69).

En ce qui concerne l'accès aux jardins privés, il s'agit d'envoyer une demande aux propriétaires. La phase de négociation n'est pas, non plus, négligeable lorsqu'il s'agit de discuter avec les responsables des syndicats qui gèrent les co-propriétés. Il y a donc eu des refus d'accès à des cours privées.

---

<sup>27</sup> Tous ces renseignements ont été donnés par Mr Haie, responsable du service Voirie de la municipalité de Tours, que je remercie chaleureusement.

Pour les jardins appartenant à la ville, l'autorisation est facilitée par la Convention entre l'Université, le CNRS et la Ville de Tours.

- *Réalisation in-situ*

La prospection au PANDA s'est déroulée entre le 16 Octobre 2004 et le 1<sup>er</sup> février 2006 avec l'aide précieuse d'étudiants<sup>28</sup> en archéologie et, dans quelques cas, de locataire (Mr Dufour, 16 rue Montaigne) ou des techniciens de la ville (jardiniers). Cette période d'acquisition sur le terrain a été entrecoupée par l'envoi des différentes DICT. Durant cette période, **sur 43 projets, 29 lieux ont été étudiés et 97 SP ont été effectués** (Fig. 37, Pl. 38).

---

<sup>28</sup> Julien Babillot, Benoît Pescher, Nicolas Poirier, Mélanie Fondrillon, Emmanuel Marot, Bastien Lefebvre, Gabriel Rocque, Tristan Moriceau, Jean-Roc Morreale, Flore Marteau, Delphine Henri, Benoît Jamet, Florian Marie, Louis De Weyer que je remercie pour leur aide.

N° projet	N° site BADOPAN	Adresse	Nombre de SP	justification pour non-exécution
1	T1	cloître St Julien	2	
2		parking Prosper Mérimée	0	enrobé, réseaux trop dangereux
3	T3	jardin de Beaune Semblançay	5	
4		41, rue Voltaire	0	pas autorisation
5		rue Jules Favre	0	enrobé, réseaux trop dangereux
6	T6	57 rue Voltaire	6	
7		3,5 ou 7 rue de la Scellerie	0	enrobé, réseaux trop dangereux
8	T8	20 rue Emile Zola	3	
9	T9	Lycée Descartes	1	
10	T10	Hôtel du gd commandement	2	
11		10, rue Victor Laloux	0	pas de réponses
12		30 rue de la Préfecure	0	réseaux
13		rue Albert thomas (Police)	0	enrobé, réseaux trop dangereux
14		38, rue Albert Thomas	0	pas de réponse
15	T15	lycée Paul Louis Courier	4	
16		12, rue de la Bazoche	0	pavés, réseaux
17	T17	12 rue Général Meusnier	4	
18	T18	8 rue Manceau	2	
19	T19	jardins des beaux arts	3	
20	T20	fac musicologie	2	
21	T21	13 rue des Ursulines	6	
22	T22	conservatoire régional	3	
23	T23	25 rue Traversière	2	
24	T24	place François Sicard	2	
25	T25	Parc Mirabeau	3	
26	T26	place de la Lamproie	5	
27	T27	8 rue Paul Louis Courier	6	
28		15, pl. Châteauneuf	0	réseaux trop dangereux
29	T29	Tour Charlemagne	5	
30	T30	7 rue de Baleschoux	2	
31		place du 14 Juillet	0	réseaux trop dangereux
32	T32	3 rue de Sully	2	
33	T33	36 rue Clocheville	3	
34	T34	26 rue Clocheville	3	
35	T35	château	6	
36	T36	square Sourdillon	3	
37	T37	17 rue des Minimes	3	
38	T38	24 rue de la Préfecture	4	
39	T39	16 rue Albert Thomas	3	
40		1 rue Barbès	0	pas de réponse
41	T41	16 rue Montaigne	2	
42		jardin Conseil Général	0	abandonné, hors transect
43		square de la Préfecture	0	abandonnée, hors transect
TOTAL			97	

Fig. 37 – Tableau récapitulatif du nombre de SP enregistrés dans la base BaDoPAN.

Après avoir rigoureusement consulté les plans de réseaux et repéré des indices de réseaux sur le terrain (bouches à clé, espace entre les lampadaires, système d'arrosage), il est possible de réaliser les SP.

L'exécution d'un SP prend parfois jusqu'à 2 heures pour une profondeur d'environ 6m, à deux personnes. Il faut compter le temps d'extraction. Sur la plupart des lieux, seuls deux ou trois SP ont été réalisés. On retrouvera une fiche pour chacun des lieux avec la position des SP et leurs conditions de réalisation (Annexe 70).

L'arrêt d'un SP est occasionné soit par un refus, lorsqu'il est impossible d'enfoncer plus loin la tige et le boîtier d'enregistrement des mesures émet un bip, soit par un arrêt volontaire, lorsque j'ai considéré que la profondeur était suffisante, soit pour des raisons techniques, autres que le refus (tiges cassées, aléas du climat, conditions d'accès au site). Le refus est important pour l'interprétation du signal car il peut s'agir d'une structure archéologique (maçonnerie) ou bien, de niveaux particuliers tel des remblais très caillouteux ou un sol très sableux (d'après les géotechniciens et l'expérience sur les sites archéologiques).

Des relevés topographiques sont réalisés afin de géoréférencer les SP par la suite (par triangulation ou tachéomètre). Ainsi, les cotes altimétriques sont issues des relevés au tachéomètre lorsque le cas s'est présenté ou des valeurs du MNT qui est satisfaisant pour le centre-ville.

Par ailleurs, il faut noter que 2 SP ont été faits directement dans des caves, au 24 rue Clocheville (n° T34) et au 12 rue Général Meusnier (n° T17). Pour le premier, il n'y avait pas le choix car la cave se prolonge sous le jardin ; pour le deuxième, cela était pratique car la cote altimétrique du jardin est très haute (56,84 m NGF) et il aurait fallu réaliser un SP d'environ 10m de profondeur. D'autres ont été exécutés à la fois dans les jardins et les caves au 20 rue Emile Zola (N° T8) et au 80 rue Manceau (N° T18). Le repérage topographique est donc moins fiable.

- *Enregistrements des données dans la base de données BaDoPan*

Concernant l'enregistrement, la base de données BaDoPAN, mise au point en maîtrise, a été reprise. Cette base de donnée permet, dans un premier temps, d'archiver les informations concernant la réalisation des SP et de faire des requêtes thématiques. Elle doit, dans un deuxième temps, être utilisée pour croiser les observations issues des analyses qui seront présentées par la suite. Durant la thèse, certaines modifications ont été apportées à cette base (LAURENT 2002 : 41 ; Pl. 39, Annexe 71) :

- changement du nom de la table « forage » par « SP »
  - changement du champ « forage » par « SP »
  - ajout de l'estimation du niveau piézométrique sur les sites lorsqu'on possède l'information ; champ « piézo »
  - suppression du nombre de tiges « nb de tiges » car cela est inutile.
- Ainsi, les tables SITES, SP et PHOTOS ont été mises à jour.

- *Les résultats : analyse descriptive des signaux*

Les pénétrogrammes sont présentés dans le volume des planches (Pl. 40). Avant de se lancer dans l'analyse des propriétés mécaniques des pénétrogrammes, il convient de faire ressortir certains points.

D'abord, sur 97 SP, 47 ont été arrêtés volontairement, 1 autre pour des raisons techniques et 49 ont été stoppés par un refus. Il est intéressant de voir d'ailleurs que les SP du transect 3, situés au nord de l'enceinte du 14<sup>e</sup> s., n'ont occasionné que des refus. Ainsi, un des objectifs est de déterminer si le refus résulte de la présence d'un artefact archéologique ou bien d'une formation naturelle. Si on suit le postulat que le toit des alluvions est situé entre 45 et 47 m NGF dans la zone d'étude, on peut poser l'hypothèse que les refus situés à une cote supérieure à 47 m NGF sont provoqués par un artefact archéologique. En outre, si on cartographie les SP en fonction de cette hypothèse, on observe que les refus dus à un artefact sont situés à l'intérieur de l'enceinte du 14<sup>e</sup> s., c'est-à-dire, dans la zone la plus densément occupée dans la longue durée (Pl. 41).

Ensuite, sans pousser trop loin l'analyse, les signaux présentent des contrastes forts. Au total, sur les 97 SP, il y a 52712 mesures brutes (ou coups de marteau) qui varient entre 0,11 et 71,78 MPa (Annexe 72). La moyenne de résistance est environ de 6 MPa ; on retrouvera les statistiques descriptives dans le tableau qui suit (Fig. 38).

Qd(en MPa)	
Moyenne	5,98
Erreur-type	0,02
Médiane	4,62
Mode	2,27
Écart-type	5,02
Variance de l'échantillon	25,19
Kurtosis (Coefficient d'aplatissement)	9,32
Coefficient d'asymétrie	2,36
Plage	71,78
Minimum	0,11
Maximum	71,89
Somme	315298,18
Nombre d'échantillons	52712,00
Niveau de confiance(95,0%)	0,04

Fig. 38- Résultats des statistiques descriptives des mesures brutes des 97 SP

Si on fait une distribution cumulée de l'ensemble des mesures brutes (Fig. 39), on observe que :

- 50 % des valeurs de résistance sont inférieures à 4,6 MPa
- 85% des valeurs de résistance sont inférieures à 10 MPa
- 98% des valeurs de résistance sont inférieures à 20 MPa

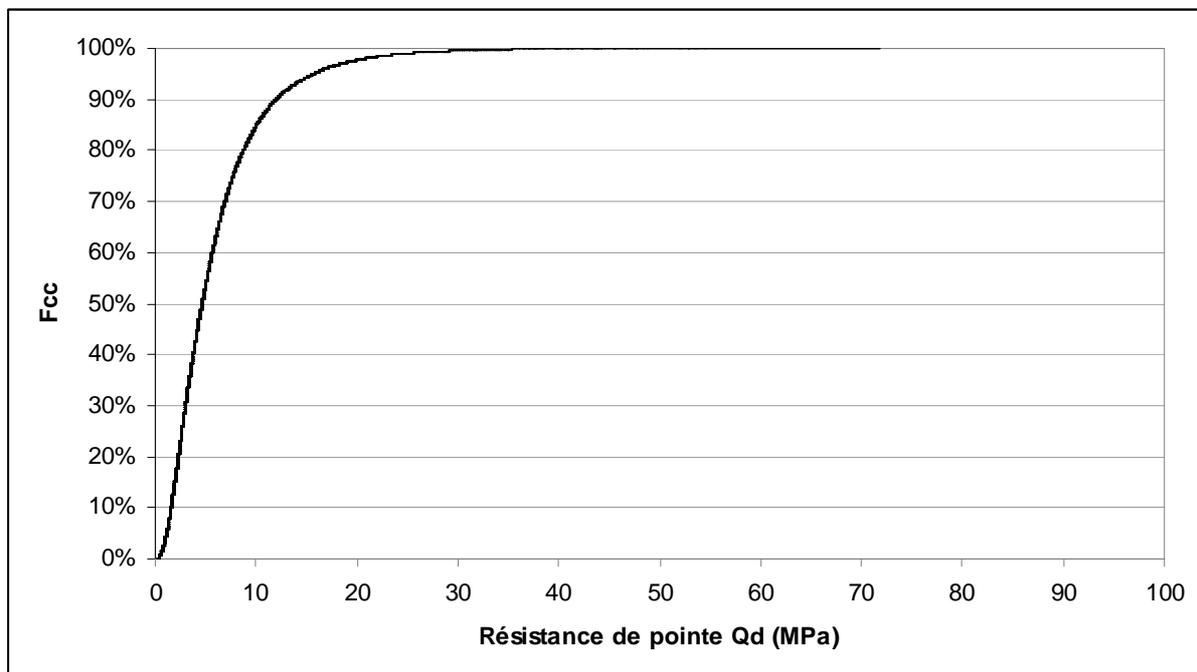


Fig. 39- Distribution des fréquences cumulées relatives des valeurs de résistances brutes

Durant les travaux de maîtrise, avec les géotechniciens, nous avons posé l'hypothèse que lorsque les mesures atteignent des valeurs supérieures à 4 MPa et augmentent à partir d'une certaine profondeur (pour la ville, entre 45 et 47 m NGF), on aurait atteint les sables alluviaux (LAURENT 2002). En outre, des hypothèses sur la cote du toit des alluvions sont proposées à partir des pénétrogrammes en tenant compte de l'hypothèse de départ mais aussi, en fonction des informations dans un voisinage proche ainsi qu'en fonction de l'expérience de terrain. Aussi, pour simplifier la lecture, il a été choisi de faire un tableau de synthèse par lieu d'étude (N° site BADOPAN) plutôt que par SP (Fig. 40). Ainsi, ce tableau présente, pour chaque lieu, la cote du toit des alluvions déterminée à partir des conditions présentées ci-dessus, l'estimation de l'épaisseur du dépôt archéologique et un indice de fiabilité : 2 pour une estimation convenable, 1 pour une estimation douteuse et 0 lorsqu'il était vraiment impossible de proposer une valeur. Ainsi, lorsqu'il existe une contradiction avec l'hypothèse de départ et qu'il n'y a pas d'autres preuves, l'indice de fiabilité est de 1. Enfin, ces estimations ont été cartographiées afin d'analyser leur répartition spatiale (Pl. 42).

Lieu SP	Hypothèse cote alluvion	Epaisseur estimée du dépôt (m)	Indice fiabilité
T1	45,00	4,80	1
T10	44,50	3,41	2
T15	45,50	7,96	1
T17	51,00	1,50	2
T18	50,00	4,70	2
T19	48,00	4,67	1
T20	45,50	3,90	2
T21	45,00	3,00	2
T22	44,50	3,35	2
T23	46	2,4	2
T24	?	?	0
T25	45,00	3,35	2
T26	46,00	5,90	2
T27	46,50	5,00	2
T29	47,50	2,48	1
T3	45,00	7,20	2
T30	46,70	4,70	2
T32	45,00	5,80	2
T33	47,00	3,80	1
T34	45,00	3,50	2
T35	45,00	3,87	2
T36	45,50	5,50	2
T37	44,30	4,10	2
T38	45,50	3,65	2
T39	?	?	0
T41	47,50	4,75	2
T6	45,00	6,85	0
T8	46,4	5,1	2
T9	45,00	3,25	0

Fig. 40 - Tableau des hypothèses sur la cote du toit des alluvions pour chacun des lieux prospectés au PANDA

On observe que le toit des alluvions est plus élevé dans le quartier de la Cité, notamment à l'emplacement de l'amphithéâtre (estimation donnée par logs géologiques) et à l'emplacement de la basilique Saint-Martin. Evidemment, ces hypothèses restent à valider par la constitution d'un référentiel archéologico-mécanique présenté dans le 5<sup>e</sup> chapitre. Enfin, l'analyse plus poussée des propriétés mécaniques sera présentée dans la partie suivante.

- *Conclusions*

Le schéma qui suit récapitule la démarche suivie pour de la réalisation de la prospection géotechnique au PANDA à Tours (Fig. 41).

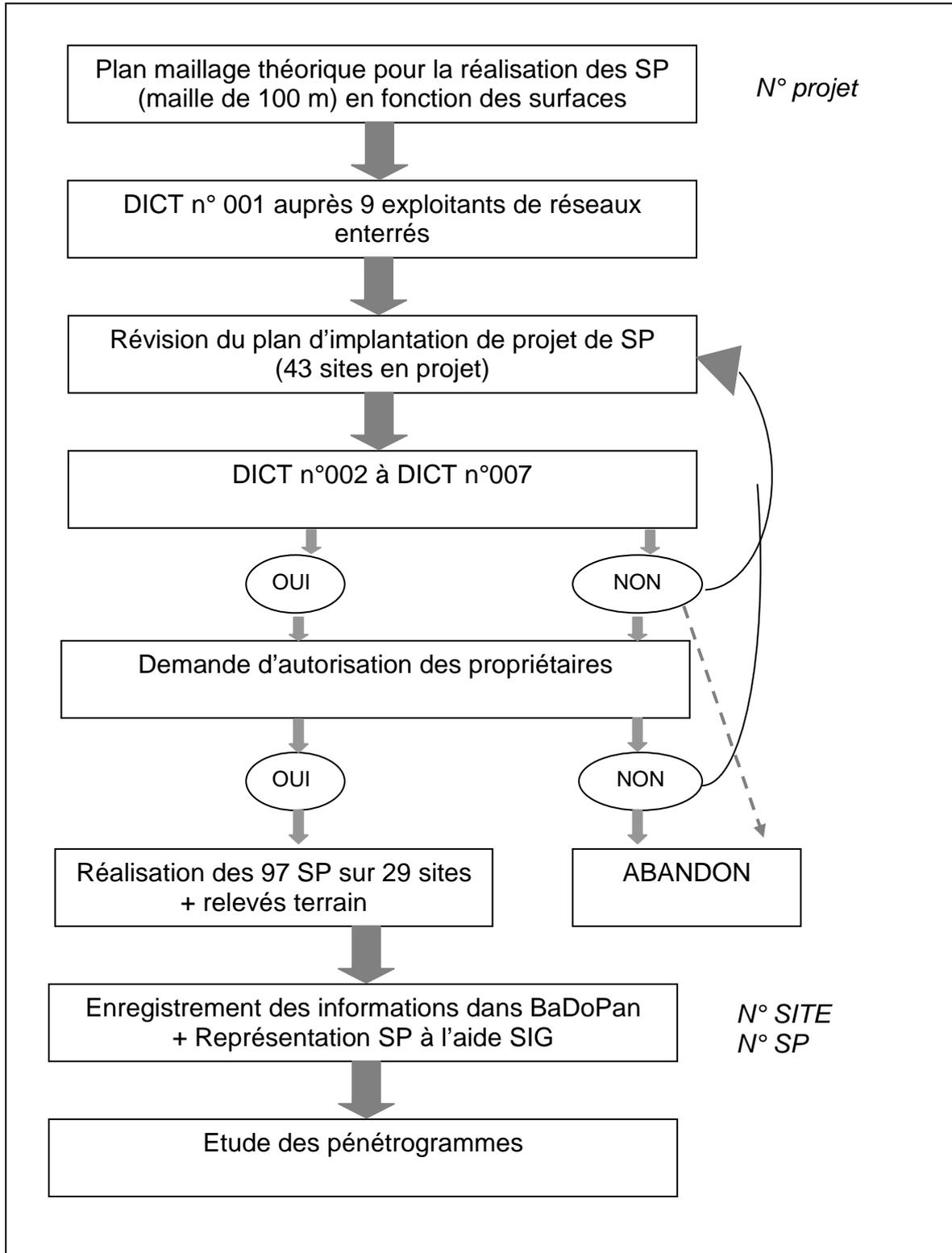


Fig. 41 - Schéma récapitulatif des étapes de l'acquisition des données pénétrométriques utiles à l'évaluation à l'échelle de la ville

#### 4-1-6- Bilan

L'acquisition des données utiles pour l'évaluation du potentiel informatif de Tours a été réalisée sur l'ensemble de l'espace d'étude afin d'optimiser l'analyse des transects sélectionnés. Malgré les difficultés méthodologiques rencontrées au cours de cette phase de travail, il a été possible de recueillir des informations sur l'épaisseur du dépôt archéologique et son découpage interne à partir des sources archéologiques, planimétriques et géologiques/géotechniques. Par ailleurs, les premières observations sur les pénétrogrammes montrent des ressemblances ou des contrastes forts horizontalement mais aussi verticalement (Pl. 43).

Il est donc nécessaire de les analyser plus précisément afin de répondre, au moins au premier objectif, celui de distinguer le dépôt archéologique du dépôt naturel.

L'ensemble des informations retenues dans la zone d'étude et pour ces transects est présenté dans le tableau suivant (Fig. 42, Pl. 44).

Transect Information	Transect 3	Transect 5	Transect 7	Transect 8	Transect 9	Total transects	Total sur Espace d'étude
<b>Nombre de logs archéologiques (échelle site)</b>	9	6	3	4	1	23	40
<b>Nombre d'observations archéologiques (d'après O. Marlet)</b>	0	3	1	2	0	6	16
<b>Nombre de logs géotechniques/géologique</b>	13	19	13	12	1	58	82
<b>Surface détruite / % par rapport espace total</b>	3,6 ha / 11%	4,4 ha / 13,4%	1,5 ha / 4,6%	1,1 ha / 3,4%	1,9 ha / 5,8%	12,5 ha / 38,2 %	32,7 ha
<b>Nombre de lieux de SP en projet</b>	10	14	2	14	1	41	43
<b>Nombre de SP effectués</b>	29	26	10	29	3	97	97

Fig. 42 - Tableau de synthèse des informations utiles à l'évaluation du potentiel informatif de Tours à l'échelle des transects

Ces données seront exploitées d'abord, pour étudier les propriétés mécaniques du sous-sol en milieu urbain, puis, pour modéliser le volume du sol urbain à partir de l'élaboration d'une carte d'estimation des épaisseurs du dépôt archéologique et de l'analyse des composantes socio-spatiales.

## 4-2- Analyse des propriétés mécaniques du sous-sol pour modéliser l'hétérogénéité du sol-urbain

Depuis 2002-2003, des tests concernant l'analyse des propriétés mécaniques du sous-sol mesurées au PANDA, ont été réalisés en étroite collaboration avec les géotechniciens. Le but est d'étudier l'hétérogénéité du sol urbain à partir de la variabilité de la résistance de pointe observée sur les pénétrogrammes. L'originalité est que ce type de traitement de signal a été adapté à la vision de l'archéologue.

L'analyse de signal peut constituer une étude en soi et est développée dans différentes disciplines des sciences de la terre. En outre, les tests qui seront présentés sont ceux qui ont été conduits, d'un point de vue géotechnique, dans le cadre de la thèse de Laurent Houy (CDGA – Bordeaux I) (HOUY 2005). Ses travaux portent sur l'étude de la variabilité des sols et des risques liés à l'interaction sol-ouvrage. L. Houy a réalisé cette étude sur des trois sites différents : un site naturel (Campus de Talence), un site « anthropique de type archéologique » (Saint-Julien à Tours, site 16) et un sol artificiel sur le site de Champcueil.

Les tests qui nous intéressent concernent le site de Saint-Julien que je présenterai plus en détail dans le chapitre suivant. Ainsi, l'analyse de la variabilité spatiale du dépôt archéologique a porté sur des SP sélectionnés sur le site. Pour les besoins de l'étude, j'ai étendu cette analyse aux SP réalisés dans les cinq transects.

Je présenterai d'abord l'objectif principal de ces analyses. Ensuite, je ferai la synthèse des tests qui ont été réalisés dans le cadre de la thèse de L. Houy et de mes propres travaux.

### 4-2-1- Objectif et méthodes

L'objectif principal est d'établir et de valider des critères objectifs pouvant être utilisés pour distinguer automatiquement des couches aux propriétés mécaniques homogènes sur un pénétrogramme (signal). L'hypothèse est que ces couches homogènes correspondent à une activité humaine spécifique.

Pour répondre à cet objectif, il faut résoudre plusieurs points :

1 - **identifier des zones aux caractéristiques mécaniques homogènes**, que l'on appellera « zones stationnaires » ou « Unités Mécaniques » (UM). Ainsi, on considère que l'on change d'UM lorsque l'allure du signal change (valeur moyenne de résistance de pointe et variabilité interne) (Fig. 43). Concrètement, il faut détecter deux phénomènes sur un signal : des points de transition et des zones, définies par 2 points de transition ;

2 - définir une échelle d'analyse adaptée à la vision de l'archéologue ;

3 - **caractériser les différences entre les zones homogènes** à partir de paramètres statistiques. On considère que le signal d'un SP est constitué de deux composantes : un signal structuré qui reflète la variabilité intrinsèque du sol défini par sa variance et sa longueur de corrélation et un signal aléatoire ou « bruit », qui dépend de la mesure et des conditions dans laquelle celle-ci est réalisée ;

4 – **détecter les zones bruitées** qui a un double emploi, celui de mesurer la qualité du signal et l'autre de détecter des zones suspectes qu'il faut interpréter d'un point de vue archéologique. Les bruits sont interprétés soit comme des anomalies qui ne sont pas significatives pour interpréter la stratigraphie (artefacts ponctuels de type cailloux), soit comme des éléments significatifs comme les maçonneries. Le bruit sera analysé plus précisément dans le chapitre 5 puisqu'il est à mettre en relation avec le référentiel archéologico-mécanique. Dans cette partie, les tests seront basés sur l'identification des UM.

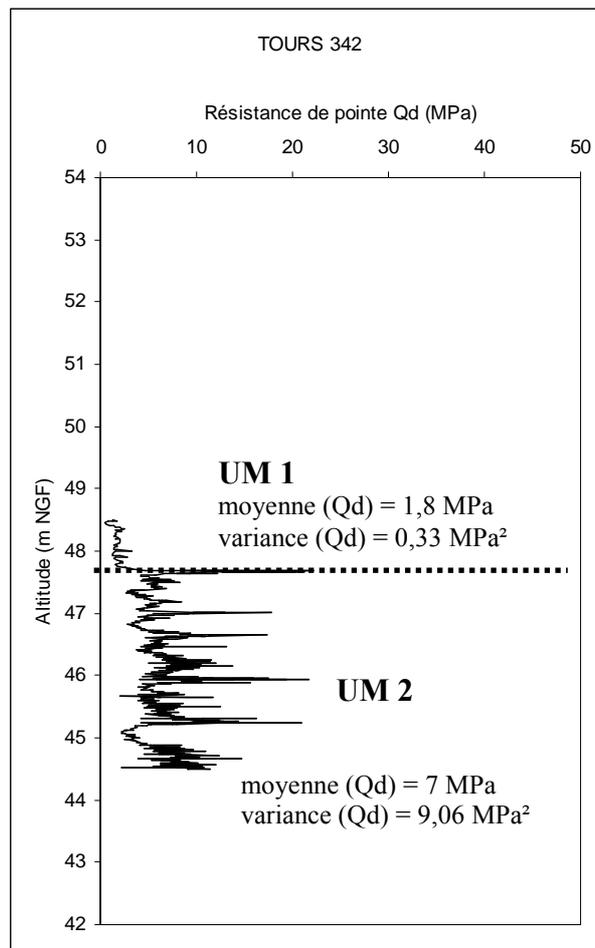


Fig. 43 - Hypothèse du découpage du signal du SP T342 en Unité Mécanique

- *L'échelle d'analyse*

Le géotechnicien et l'archéologue n'analysent pas un signal à la même échelle selon leurs propres objectifs. L'échelle est d'ordre décimétrique si on étudie globalement le dépôt archéologique, notamment si on veut le dissocier du niveau naturel. L'échelle est d'ordre centimétrique, si on s'attache à découper le dépôt en couches distinctes. Ainsi, l'étude de la variabilité d'un signal a été réalisée à plusieurs échelles (5, 10, 25 et 50 cm).

Les travaux de maîtrise ont montré qu'il est impossible de distinguer les Unités Stratigraphiques sur un pénétrogramme (proche de 5 cm). C'est pourquoi il a été décidé de travailler à l'échelle de l'agrégation archéologique qui consiste à regrouper les US selon leur fonction et leur date (> 5 cm). Donc, en reprenant le double-objectif, deux hypothèses de travail ont été définies:

- le dépôt archéologique possède un signal différent du sol naturel ;
- les activités humaines (agrégation archéologique) se distinguent par leurs propriétés mécaniques.

Deux démarches sont suivies pour vérifier ces hypothèses :

- 1 - à partir des données géotechniques, en étudiant les propriétés mécaniques du sous-sol ;
- 2 - à partir des données archéologiques pour réaliser un référentiel archéologico-mécanique.

Les tests s'inscrivent dans cette première démarche.

En conclusion, ces tests, débutés dans le cadre de la thèse de L. Houy et de la maîtrise en 2002, traiteront le signal à une échelle proche de l'US, de l'ordre de 5 – 10 cm et à une échelle moins fine, proche des agrégations, de l'ordre de 25 – 50 cm.

- *Les paramètres d'étude des propriétés mécaniques du sol*

Plusieurs paramètres ont été retenus pour les tests qui consistent à étudier les UM définies, de façon manuelle ou automatique, sur un pénétrogramme: les uns pour effectuer des statistiques descriptives et les autres pour mesurer la variabilité des propriétés mécaniques.

- Les variables descriptives

Les propriétés mécaniques des UM sont étudiées à l'aide de différentes variables descriptives (Fig. 44). D'abord, il y a celles qui sont liées à la résistance de pointe (Qd) comme la **moyenne** et la **médiane** (en MPa) qui seront calculées à partir des données brutes. La médiane est un indicateur plus robuste que la moyenne car le poids des faibles et fortes valeurs est moins important dans le calcul. Ensuite, il y a des variables liées à la position altimétrique d'une UM : la **moyenne de Z** (en m NGF), l'**épaisseur** calculée à partir du maximum et du minimum du Z et la **profondeur moyenne** qui est la différence entre le Z de départ du SP et la moyenne de Z.

Un des objectifs est de vérifier si des UM sont spécifiques à une profondeur. Dans ce cas, la question est de voir si elles correspondent à une activité humaine spécifique.

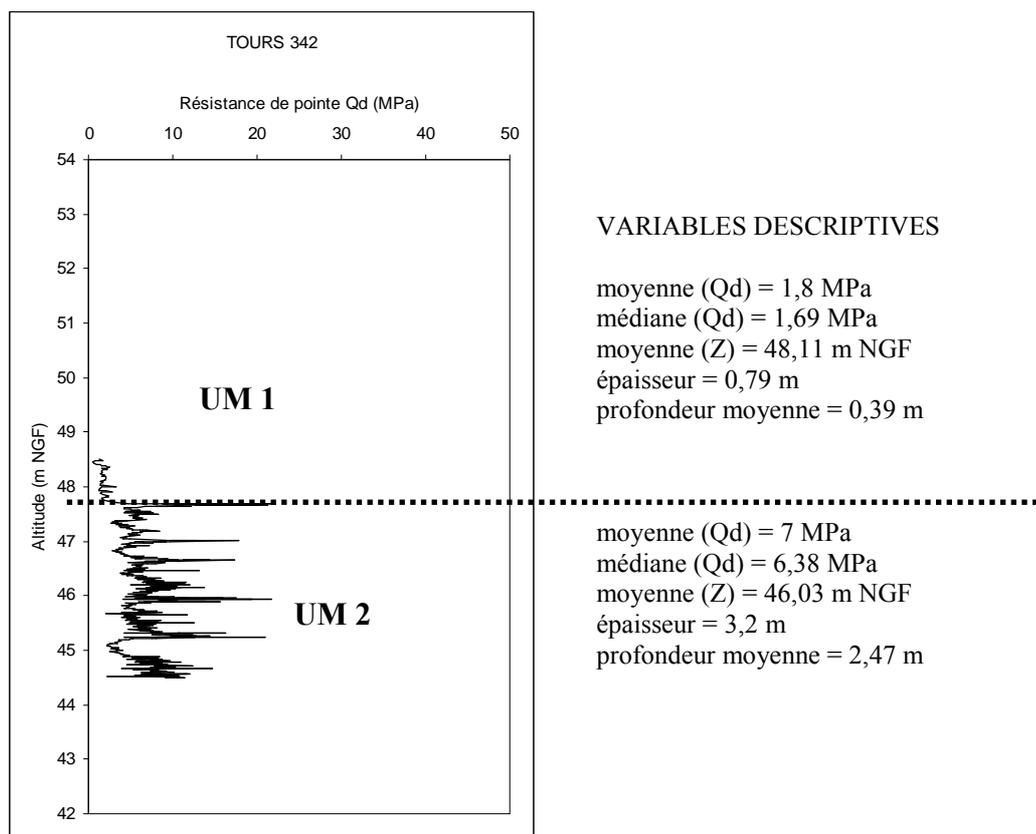


Fig. 44 – Variables descriptives des UM du signal du SP T342 (découpage manuel)

## - Les variables pour mesurer la variabilité des propriétés mécaniques

Il existe plusieurs paramètres pour étudier la variabilité des propriétés mécaniques du sous-sol (Fig. 46). L. Houy les a exposés dans sa thèse (HOUY 2005 : 23-27).

On utilise traditionnellement l'indice de dispersion, le **coefficient de variation** (c.v.(X)), qui est le rapport entre l'écart-type de la population ( $\sigma(X)$ ) et son espérance mathématique (moy(X)) :

$$\text{c.v.}(X) = \frac{\sigma(X)}{\text{moy}(X)}$$

Ici, un coefficient de variation fort (proche de 1) signifie que la dispersion de la variabilité du sol est importante. Son emploi est délicat car il est « difficile de lier directement le coefficient de variation à un type de sol » (HOUY 2005 : 24).

De même, la distribution statistique de la variabilité des mesures de résistance ne peut être exploitée car elle est spécifique à chaque site (ELKATEB, CHALTURNYK, ROBERTSON 2003).

Enfin, il est possible d'utiliser la **fonction d'autocovariance** et d'autocorrélation qui consiste à prendre en compte la dépendance spatiale des mesures de résistances. Sans entrer dans les détails, le calcul d'un coefficient d'autocorrélation pose problème car il ne permet pas de dissocier la variabilité intrinsèque du sol de celle liée aux erreurs de mesures (frottement, problème technique).

Il est toutefois possible de mesurer la variabilité intrinsèque de la résistance du sol si on enlève l'« effet de dérive » à la valeur mesurée (HOUY 2005 : 22). La **dérive** est une variation déterministe qui correspond à « l'ensemble des phénomènes qui ont influencé la formation du sol sur de longues périodes » (HOUY 2005 : 22). Il s'agit notamment des effets liés à la pression de confinement avec la profondeur. On peut donc décomposer la variable aléatoire  $X'$  (mesure de terrain) en une composante aléatoire  $X$  de moyenne nulle ( $E[X(z)] = 0$ ) et en une seconde composante, la dérive locale  $t(z)$  (variation spatiale déterministe) :

$$X'(z) = X(z) + t(z)$$

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la dérive. L. Houy a choisi d'en suivre une qui minimise les erreurs d'estimation de la dérive en étudiant la régression linéaire entre la variable explicative ( $z$ ) et la variable expliquée ( $X'$ ), et en utilisant la méthode des moindres carrés (HOUY 2005 : 22). La dérive  $t(z)$  a pour équation :

$$t(z) = \sum_{j=1}^n \alpha_j z_j + \alpha_0$$

où  $z_j$  désigne la variable explicative,  $n$  le nombre de variables explicatives,  $\alpha_j$  et  $\alpha_0$  les coefficients de la fonction.

La dérive est obtenue en réalisant un ajustement linéaire des valeurs mesurées sur le terrain ( $X' = Q_d$ ). Il a été choisi de n'affecter une correction de dérive seulement si le rapport de détermination ( $R^2$ ) de la fonction est supérieur à 0,5 (HOUY 2005 : 23). En effet, si il y a une corrélation entre la valeur de  $Q_d$  et la profondeur  $z$ , alors il y a un effet de contrainte du sol. Ainsi, pour obtenir un  $Q_d$  corrigé, on soustrait les valeurs de la dérive  $t(z)$  aux valeurs de terrain ( $X'$ ) (Fig. 45).

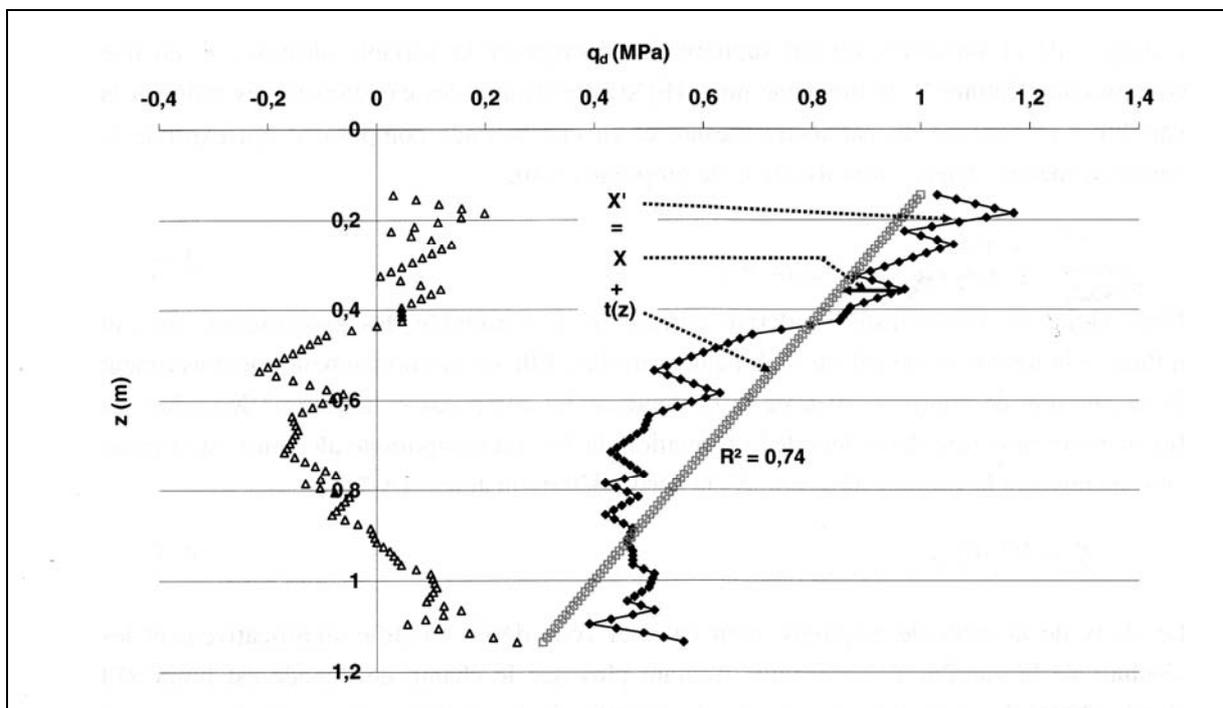


Fig. 45 – Signal brut ( $X'$ ), dérive  $t(z)$  et fluctuation du paramètre géotechnique (triangle) (HOUY 2005 : Figure A-6)

Un autre paramètre retenu est la **longueur de corrélation** qui correspond à la portée du semi-variogramme (cf 2-1-4). Elle est définie comme la distance de corrélation spatiale entre des mesures. On avait, par exemple, observé sur les pénétrogrammes issus du site de Saint-Julien que la distance de corrélation est de 5 cm, c'est-à-dire, qu'au-delà de 5 cm, les valeurs de  $Q_d(z)$  ne sont plus liées et qu'en deçà, elles sont corrélées (BREYSSE *et al.* 2002).

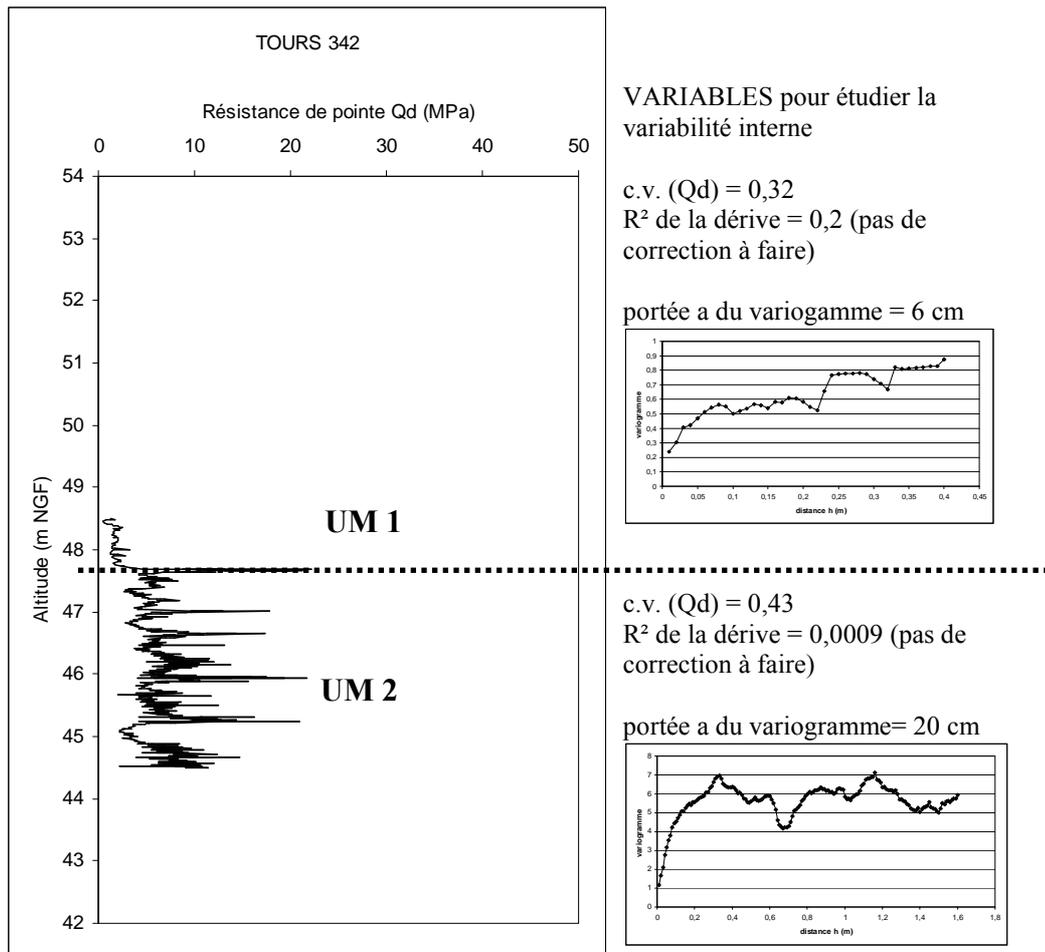


Fig. 46 – Variables pour analyser la variabilité interne des UM du signal du SP T342

- Conclusion

Six variables ont été retenues pour l'étude des UM (Fig. 47) :

Variables	Code dans les tests
Moyenne de la résistance Qd	Moy (Qd)
Médiane de la résistance Qd	Médiane (Qd)
Coefficient de variation Qd	c.v. (Qd)
Moyenne de Z	Z moyen
épaisseur	épaisseur
Profondeur moyenne	Prof. moy.

Fig. 47 - Liste des variables retenues pour l'étude des UM

Par ailleurs, la fonction de la dérive  $t(z)$  définie ci-dessus est celle qui sera utilisée ici.

- *Le signal brut et les signaux consolidés*

Pour optimiser la détection des UM, il est utile de travailler sur un signal consolidé, plutôt que sur le signal brut Qd. Plusieurs signaux consolidés peuvent être employés dans les tests (Pl. 45):

- Le **signal « régularisé » Qc** est calculé à partir d'une estimation par interpolation linéaire à partir du Qd. Le choix de l'intervalle de mesure doit être « suffisamment petit pour observer les variations les plus fines, et suffisamment grand pour limiter le nombre de points estimés par interpolation linéaire » (HOUY 2005 : 42). Le pas est régulier et déterminé à partir de l'étude de la structure de la variabilité spatiale du sol en profondeur (BREYSSE *et al.* 2002). Ainsi, l'analyse variographique effectuée sur les SP du site 16 a révélé une longueur de corrélation d'ordre centimétrique. Nous avons choisi de régulariser le signal avec un pas de 1 cm ;

- Les signaux des mesures calculées à partir de **moyennes mobiles (ou glissantes) du Qc (Qcm)**. On calcule une valeur de résistance moyenne des valeurs de Qcm selon un pas déterminé et glissant. Les pas sélectionnés sont les moyennes sur 10 cm (soient 10 valeurs de Qc continues), sur 20 cm et sur 50 cm;

- Le **signal normalisé Q'** calculé à partir du Qd selon le principe de l'effet de contrainte verticale (UZIELLI 2004 : 17-19 ; UZIELLI, VANNUCCHI, PHOON 2005 : 4). La normalisation a aussi pour objectif d'atténuer les effets « structuraux » de la profondeur. Le modèle théorique retenu est celui de Robertson et Wride qui propose un calcul normalisé de la résistance mesuré par un pénétromètre conique (CPT) (ROBERTSON, WRIDE 1998) d'après la formule suivante :

$$Q' = \left( \frac{Qd - \sigma_{vo}}{P_a} \right) \cdot \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n$$

où :

- Qd est la mesure de résistance en MPa ;

- $\sigma_{vo}$  et  $\sigma'_{vo}$  sont respectivement la contrainte totale et la contrainte effective verticale du sol en place (en MPa). Elles résultent du poids du sol au-dessus du point considéré et sont égales si on est au-dessus de la nappe. Pour un poids volumique  $\gamma = 18,3 \text{ KN/m}^3$ , on a  $\sigma_{vo} = \gamma \cdot z$ , soit  $\sigma_{vo} = 0,0183 \cdot z \text{ MPa}$ ;

- $P_a$  est la pression atmosphérique de référence dans la même unité que  $\sigma'_{vo}$  et est égale à 0,101325 MPa ;

-  $n$  est un indice de contrainte (ici pour des sols intermédiaires,  $n = 0,7$ ). Si la profondeur

$z$  atteinte est inférieure à 2,6 mètres, l'indice de correction  $\left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}\right)^n$  est plafonné à 1,7.

Il faut noter qu'ici, on a choisi de le calculer à partir du  $Q_c$ .

Les signaux  $Q_c$  et  $Q_{cm}$  ont l'avantage d'atténuer les fortes et faibles valeurs de résistance qui augmentent les valeurs des moyennes et variance de résistance de pointe. Toutefois, il a été choisi d'utiliser autant le signal brut que les signaux consolidés dans certains tests et dans les études qui suivront (Chapitre 5).

#### • La détection des UM selon le concept de l'entropie

Il existe plusieurs techniques pour identifier des zones statistiquement homogènes (HOUY 2005 : 27) (test de Bartlett, méthode de Bartlett modifiée, méthode d'Huijzer et emploi de la fenêtre mobile). L. Houy a décidé de s'appuyer sur celle développée par Denis et Cremoux (DENIS, CRÉMOUX 2000) basée sur le concept de l'entropie.

Le concept d'entropie « permet de localiser les zones stationnaires à l'intérieur d'un signal non-stationnaire » (HOUY 2005 : 46). En effet, les développements théoriques (DENIS, CRÉMOUX 2000) permettent d'« estimer la structure des zones stationnaires d'un signal par le calcul d'une portée  $a$  (équivalente à la portée d'un variogramme gaussien) » (HOUY 2005 : 46). Ce type de traitement est intéressant car il peut être utilisé sur des signaux présentant une dérive ; ce qui est souvent le cas avec ceux issus du PANDA.

#### - Définition de l'entropie

L'**entropie\*** est une quantité qui désigne la part de désordre, de dégradation ou de hasard que comporte tout système d'énergie ou d'information.

On calcule l'entropie d'un pénétrogramme à partir d'une fonction  $L(z)$  qui « correspond à la fonction cumulée de la différence absolue entre la variable aléatoire  $X_i$  et  $X_{i+1}$  respectivement à la profondeur  $z$  et  $z+\Delta z$ , avec  $\Delta z$  la distance entre les deux points » (HOUY 2005 : 47) :

$$L(z) = \sum_0^z |X(z + \Delta z) - X(z)| \quad \forall \Delta z$$

Son espérance mathématique simplifiée ( $E[L(z)]$ ) est notée :

$$E[L(z)] = z \cdot m_{|X'|} \quad \forall \Delta z$$

avec  $m_{|X'|}$ , la moyenne de la variable étudiée

Pour cette étude, on en déduit que la fonction  $L(z)$  est en moyenne une fonction linéaire de  $z$ , de pente  $m_{|Qd'|}$ . Ainsi, l'entropie  $H(z)$  correspond à la pente de la fonction  $L(z)$  selon la relation <sup>29</sup>:

$$H(z) = \frac{dL(z)}{dz} = m_{|Qd'|} \quad \forall z$$

Pour chaque SP, le but est d'analyser cette fonction  $L(z)$ , soit le cumul des écarts entre chaque mesure de résistance. En partant du constat qu'une zone « homogène » se caractérise par une valeur moyenne et une certaine dispersion, le changement de zone homogène sera révélé sur le signal de l'entropie  $L(z)$ . Concrètement, lorsque l'écart des mesures varie en fonction de la profondeur, on change d'unité mécanique. Alors, lorsque le tracé de la fonction  $L(z)$  change de tendance, cela correspond à un point de transition d'une UM (Pl. 46).

Cependant, il faut définir des seuils à partir duquel on considère que la variation est significative puisqu'une UM a sa propre variabilité. C'est pourquoi plusieurs tests ont été développés autour de l'analyse de l'entropie d'un pénétrogramme.

#### - Calcul d'un indice d'entropie

Nous avons choisi de mettre au point un indice d'entropie qui consiste à employer une fenêtre mobile d'une taille constante, subdivisée en deux fenêtres (gauche et droite) qui contiennent un nombre de valeurs choisies. L'indice de l'entropie (IE) suit la formule suivante :

$$IE = \frac{M_{xc}(n) - (M_{xg}(n) + M_{xd}(n))}{M_{xc}(n)}$$

où  $M_{xc}(n)$  correspond à la moyenne des valeurs de la fenêtre constante,  $M_{xg}(n)$  correspond à la moyenne des valeurs de la fenêtre de gauche dont on définit la longueur et  $M_{xd}(n)$  correspond à la moyenne des valeurs de la fenêtre de droite dont on définit la longueur.

Il faut donc au préalable définir la taille d'une fenêtre constante ( $fc$ ) selon l'échelle de l'archéologue (5, 10 ou 25 cm) et du géotechnicien (25, 50 cm). Il existe 3 variantes pour le calcul de l'indice (Fig. 48). Dans le cas où la fenêtre constante est de 5 cm (soient 5 valeurs de  $Qc$  à prendre en compte dans le calcul), les variantes se distinguent par la position des fenêtres gauche

<sup>29</sup> Ici  $d$  signifie mathématiquement la dérivée

et droite. Dans la première variante du calcul de l'indice, la moyenne de la fenêtre de gauche prend en compte les deux premières valeurs et celle de la fenêtre de droite, les trois dernières valeurs. Dans la deuxième variante, la moyenne de la fenêtre gauche est calculée à partir des deux premières valeurs et celle de droite, à partir des deux dernières valeurs. Enfin, la troisième variante fait que la moyenne de la fenêtre de gauche est calculée à partir des trois premières valeurs et celle de droite, à partir des trois dernières valeurs ; la valeur du milieu sera donc prise en compte deux fois dans le calcul.

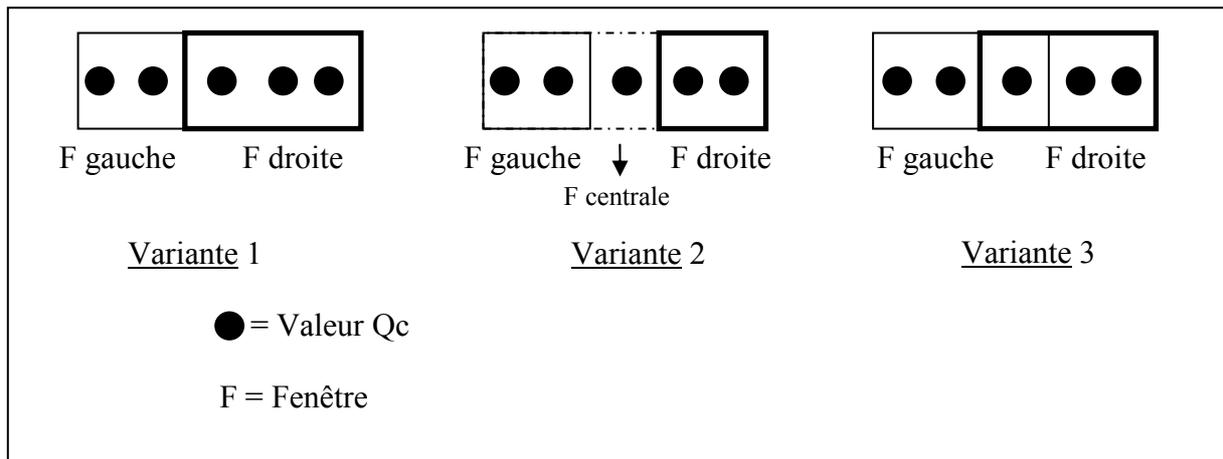


Fig. 48 - Schéma des trois variantes du calcul de l'indice avec une fenêtre constante de 5 cm

L'indice d'entropie permet de repérer les limites des UM en partant du principe que lorsque l'indice est égal ou très proche de -1, l'entropie (agitation du signal) est faible (Pl. 47). L'hypothèse est que les valeurs les plus éloignées de -1 correspondent aux points de transition d'une UM. Il est donc nécessaire de définir les seuils d'indice (indice maximal et minimal) qui rendent significatifs le découpage d'un signal en UM.

#### 4-2-2- Les tests d'analyse des propriétés mécaniques du sous-sol pour la distinction des Unités Mécaniques sur un pénétrogramme

Le constat est que des zones dites homogènes se distinguent visuellement sur un pénétrogramme. Cependant, il y a des problèmes à deux niveaux : celui lié au repérage des zones homogènes statistiquement significatives et celui lié à la définition précise des points de transition. Les tests ont alors été réalisés de façon à prendre en compte ces deux problèmes.

Ainsi, différents tests ont été effectués sur des signaux sélectionnés sur le site de Saint-Julien à Tours (SP 16.32, 16.78 et 16.89) et sur les lieux prospectés en ville. La détection d'Unité Mécanique a été effectuée de façon manuelle puis de façon automatique.

Pour chacun des tests, il a fallu passer par certaines étapes énumérées ici :

- Traitement du signal brut (Qd) en signal régularisé (Qc)
- Calcul à partir du signal régularisé (Qc) de valeurs normalisées (Q')
- Calcul à partir du signal régularisé (Qc) de moyennes mobiles (Qcm tous les 10, 20 ou 50 cm)
- Etude de l'entropie et calcul d'un indice d'entropie
- Définition de seuils pour automatiser la détection d'UM

Quatre approches méthodologiques ont été suivies pour identifier les UM. Nous allons les décrire et en comparer l'efficacité.

Le premier test consiste à étudier les signaux bruts de 95 SP réalisés à Tours lors de la prospection géotechnique. Dans un premier temps, les UM sont définies manuellement et sont décrites selon différents critères : le bruit de mesure, le Qd moyen, la médiane Qd, le c.v. Qd, le Z moyen, la profondeur moyenne et l'épaisseur. Dans un deuxième temps, la relation des mesures de terrain avec l'indice d'intensité d'occupation est étudiée à partir des zones de la ville définies plus haut (4-1-1). Dans un troisième temps, on analyse la tendance des UM afin de les rendre comparables.

Le deuxième test correspond à la détection manuelle des UM à partir de la fonction de l'entropie  $L(z)$  calculée pour les signaux bruts et les signaux régularisés (Qc, Qcm et Q') des SP 16.32, 16.78 et 16.89. Il s'agit de relever les points d'inflexion sur la courbe de  $L(z)$  et de comparer les résultats.

Le troisième test consiste à détecter automatiquement des UM à partir de la fonction de l'entropie calculée à partir des signaux régularisés (Qc) des SP 16.32, 16.78 et 16.89. Le traitement est réalisé à partir d'un programme mis au point par L. Houy.

Le quatrième test permet d'analyser l'indice d'entropie calculé à partir des signaux régularisés des SP 16.32, 16.78, 16.89, T231 et T356. Il porte sur les 3 variantes de calcul selon 3 échelles (5, 11 et 25 cm). L'objectif est de retenir les seuils d'indice qui rendent significatives les UM visibles sur le signal régularisé Qc.

Un tableau récapitulatif présente ces différents tests (Fig. 49).

TEST	6 variables	Signal brut (Qd)	Signal régularisé (Qc)	Signal normalisé (Q')	Moyenne mobile	Entropie	Indice d'entropie
Test 1	x	x					
Test 2		x	x	x	x	x	
Test 3			x			x	
Test 4			x			x	x

Fig. 49 -Tableau récapitulatif des tests pour la détection des UM en fonction du type de signal et de l'étude de l'entropie

• *TEST 1 : Découpage manuel des pénétrogrammes des SP réalisés dans les 5 transects*

Ce premier test consiste à découper manuellement à une échelle décimétrique les pénétrogrammes des SP réalisés sur les 5 transects à Tours en zones dites « homogènes », les UM, suivant plusieurs critères descriptifs :

- une zone homogène est définie par une valeur de résistance moyenne et par une variance
- les pics ou les creux ponctuels sont intégrés à la zone homogène et ne présument pas d'un changement de zone.

On suit ici une approche empirique de la lecture du signal. L'objectif final est de mettre en évidence des « signaux-type » qu'il faudra ensuite interpréter à l'aide des connaissances archéologiques.

Ainsi, 95 pénétrogrammes ont été découpés en 238 UM<sup>30</sup> selon les critères de départ en relevant leur cote altimétrique minimale (les SP 172 et 173 n'ont pas été intégrés car impossibles à exploiter) (Annexe 73 ; Pl.40). Puis, les UM ont été caractérisés qualitativement et quantitativement. Enfin, les UM seront numérotées comme suit ; « N°SP.n°ordre » ; la première UM du SP T11 sera donc nommée « 11.1 ».

- Caractérisation qualitative des UM : estimation du bruit global d'un pénétrogramme

Il a été choisi de définir qualitativement si un pénétrogramme est globalement bruité ou pas. Pour cela, il faut compter le nombre d'UM dont les valeurs paraissent bruitées ou pas pour chacun des SP. Une UM est dite bruitée si il y a beaucoup de pics ou de creux sans que l'on puisse dire aujourd'hui si le bruit est lié à la prise de mesure (frottement) ou si elle constitue la signature d'un sol anthropique ou naturel. Cette question sera à résoudre plus tard.

Pour « homogénéiser » la description de cette variable, un indice de bruit global du signal a été affecté suivant ce principe :

- l'indice de bruit global « 1 » correspond à « pas de bruit » lorsqu'il n'y a pas de zones bruitées
- l'indice de bruit global « 2 » correspond à « peu de bruit » lorsque le nombre d'UM non bruitées est supérieur ou égal à celui d'UM bruitées

---

<sup>30</sup> Soit environ 2,5 UM par pénétrogramme en moyenne.

- l'indice de bruit global « 3 » correspond à « beaucoup de bruit » lorsque le nombre d'UM non bruitées est inférieur à celui d'UM bruitées.

L'exemple suivant montre que le SP T342 est découpé en 2 UM, une « non-bruitée » et une autre « bruitée ». Le graphique montre l'échelle à laquelle les UM ont été déterminées.

Ainsi, selon le principe défini précédemment, on en déduit que le signal est globalement peu bruité (indice 2) (Fig. 50).

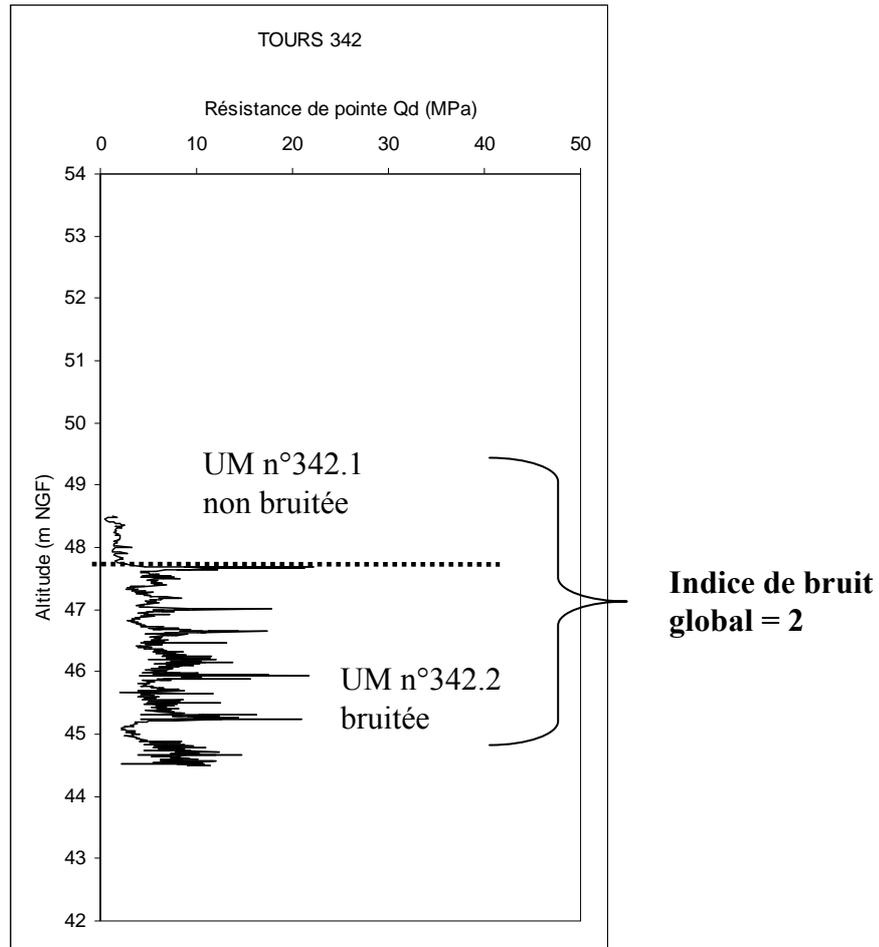


Fig. 50 - Exemple d'UM bruitées et non bruitées sur le signal du SP T342

Ainsi, sur les 95 SP étudiés, 24 SP ne sont pas globalement bruités (indice 1), 49 SP qui sont peu bruités (indice 2) et 22 SP qui sont beaucoup bruités (indice 3) (Pl. 48) : 76% des SP sont pas ou peu bruités.

#### - Caractérisation statistique des UM

On a ensuite calculé pour chaque UM 6 variables représentatives : la moyenne du  $Q_d$  ( $Q_d$  moyen), son écart-type et son coefficient de variation (c.v.  $Q_d$ ), la médiane du  $Q_d$  (médiane

Qd), la moyenne de la profondeur (moy z), l'épaisseur à partir des données brutes. L'ensemble des résultats est présenté dans l'annexe 74.

On observe que la moyenne de Qd varie entre 0,4 et 26 MPa ; 50 % des UM ont une valeur inférieure à 5 MPa (Annexe 75). Par ailleurs, la médiane de Qd varie entre 0,2 et 26 MPa ; 50% des UM ont une valeur inférieure à 4 MPa (Annexe 75). Ainsi, les fourchettes de résistance sont similaires pour le Qd moyen et la médiane de Qd.

Enfin, la distribution du coefficient de variation montre qu'il varie entre 0,15 et 2 (Annexe 75), avec 95 % des effectifs qui ont un c.v. inférieur à 1.

Deux questions sont alors posées :

- existe-t-il une corrélation entre la résistance de pointe des UM, leur variabilité intrinsèque, leur épaisseur, et leur position stratigraphique (profondeur moyenne et Z moyen) ?
- existe-t-il une corrélation entre ces variables et l'indice d'intensité d'occupation humaine ?

On observe déjà qu'il n'y a pas de corrélation entre l'épaisseur d'une UM et son coefficient de variation (Qd) (Annexe 76). Or, on pouvait penser que plus une UM est épaisse, plus la probabilité qu'elle soit hétérogène est importante.

L'étude de la corrélation avec la position géographique stricte (coordonnées X et Y) ne sera pas exploitée ici car les SP sont réparties selon les 5 transects. Par contre, il a été choisi d'affecter pour chaque UM le code de la zone historique correspondante qui a été définie dans la partie précédente (Pl. 49 et Annexe 74). Ceci permet d'avoir une approche spatiale sur l'analyse des corrélations.

Pour résoudre la première question, des essais d'analyse factorielle ont été réalisés. La deuxième question sera traitée différemment puisque les valeurs d'indices d'intensité d'occupation sont peu variables et introduisent nécessairement un biais à une analyse factorielle.

- Essais d'analyse factorielle pour l'étude de corrélation entre les 6 variables

Puisqu'il est difficile d'étudier les variables deux à deux, il est préférable de réaliser une analyse factorielle qui fournira des représentations visuelles approchées d'un nuage de points situé dans un espace multidimensionnel (MORINEAU, ALUJA-BANET 1998 ; LEBART, MORINEAU, PIRON 2000).

Les variables sont quantitatives donc l'Analyse des Composantes Principales\* est la méthode adaptée à l'étude. L'ACP est une technique de description statistique permettant de représenter les liaisons entre les variables et les similitudes entre les individus.

Etant donné que les valeurs sont de différentes natures (résistance, épaisseur, profondeur moyenne, altimétrie), il faut que les variables aient le même poids dans le calcul de la distance entre les individus. Par ailleurs, il a été choisi d'intégrer la variable « zone » comme un élément illustratif à l'analyse.

Enfin, une ACP normée sera effectuée et les variables seront « centrées réduites » (LEBART, MORINEAU, PIRON 2000 : 36-37).

Deux essais d'ACP ont été réalisés pour étudier la corrélation entre ces variables (Fig. 51). De plus, ces essais permettent de déterminer la variable la plus discriminante entre le Qd moyen ou la médiane du Qd. L'analyse factorielle a été effectuée à l'aide du logiciel SPAD.

ESSAI	Qd moyen	Médiane Qd	c.v.	Moy (Z)	Profondeur Moyenne	Epaisseur	Zone (cf 4-1)
1a	x		x	x	x	x	illustrative
1b		x	x	x	x	x	illustrative

Fig. 51 - Tableau récapitulatif des essais d'ACP réalisés pour les 238 UM

Lorsqu'on met en œuvre une ACP, il faut analyser plusieurs points :

- la matrice de corrélation des variables
- l'analyse de l'inertie des facteurs
- l'analyse de la distribution des individus en fonction des facteurs.

D'abord, une matrice des corrélations a été calculée pour chaque essai. Elle nous fournit des informations sur les associations entre les variables actives. Si la matrice des valeurs-tests<sup>31</sup> des corrélations montre que la plupart des variables sont significativement corrélées entre elles (MORINEAU, ALUJA-BANET 1998 : 49), on peut projeter ces variables en fonction des axes factoriels sur un graphique : le cercle des corrélations. Les variables fortement corrélées avec un axe contribuent à la définition de cet axe.

<sup>31</sup> La valeur-test mesure l'écart entre la proportion dans la classe et la proportion générale, en nombre d'écart-types d'une loi normale centrée réduite. La valeur absolue de la valeur-test est l'analogue de la valeur absolue d'une variable normale centrée réduite. « Dans le cadre des tests statistiques, on dira qu'elle est significative au seuil usuel 5% si elle dépasse la valeur 1,96 : l'hypothèse « nulle » est rejetée et la moyenne ou la proportion d'une variable sur la population globale et celle d'une classe diffèrent significativement (LEBART, MORINEAU, PIRON 2000 : 184). Ici, lorsque la valeur-test est comprise entre -2 et 2, il n'y a pas de corrélation entre les variables.

L'inertie d'un facteur est la variance des coordonnées des individus sur l'axe correspondant. « C'est un indice de dispersion du nuage des individus dans la direction définie par l'axe » (LEBART, MORINEAU, PIRON 2000 : 54). Plus la variance est importante, plus le nuage de points est étendu. De ce fait, c'est le premier facteur qui possède la plus grande variance. Dans une analyse normée, la somme des inerties est égale au nombre de variables et l'inertie moyenne est égale à 1. Les axes retenus sont ceux qui ont une inertie supérieure à la moyenne. Les pourcentages d'inertie des axes définissent la part qu'ils ont dans la variance totale. Pour l'ensemble des essais, ce sont les deux ou trois premiers axes qui ont une inertie supérieure à 1.

Enfin, l'objectif final est d'étudier la distribution des individus en fonction de ces axes factoriels. Ceux qui sont les plus éloignés sont ceux qui contribuent le plus à la formation des facteurs.

Ainsi, l'étude de la matrice des corrélations et leur valeur-test ainsi que les cercles des corrélations des essais 1a et 1b suffisent pour montrer qu'il n'y a pas de différence selon que l'on utilise la médiane ou la moyenne de Qd (Annexe 77). D'autre part, la part d'explication des facteurs dans la distribution spatiale des données est quasiment similaire (Fig. 52). La médiane peut donc être retenue pour ce type d'analyse car elle est plus robuste que la moyenne.

N° essai	Type d'essai	Axe 1	Axe2	Axe 3
Essai1a	Variables avec classe moy(Qd)	Moy (Z) opposée à prof. moy. (39,7 %)	moy(Qd) opposée à épaisseur (25,5%)	c.v. (Qd) (18,8%)
<b>Essai1b</b>	Variables avec classe médiane (Qd)	Moy (Z) opposée à prof. moy. (41,1 %)	médiane(Qd) opposée à épaisseur (24,3 %)	c.v. (Qd) (17,1 %)

Fig. 52 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes (ou facteurs) 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données pour les essais 1a et 1b.

L'essai 1b montre que le premier axe factoriel est expliqué par la position altimétrique des UM, le deuxième axe par une opposition entre la médiane de Qd et l'épaisseur des UM et le troisième axe par le coefficient de variation du Qd.

L'analyse de la projection des modalités de la variable illustrative « Zone » (Fig. 53) donne une image synthétique de la répartition des UM dans les deux premiers plans factoriels. En effet, on peut regrouper d'une part, les zones D, E et F dont les UM sont les moins profondes et

les plus hétérogènes d'un point de vue mécanique (c.v fort), et d'autre part, les zones G, C et H dont les UM ont un c.v. moyen et une profondeur importante.

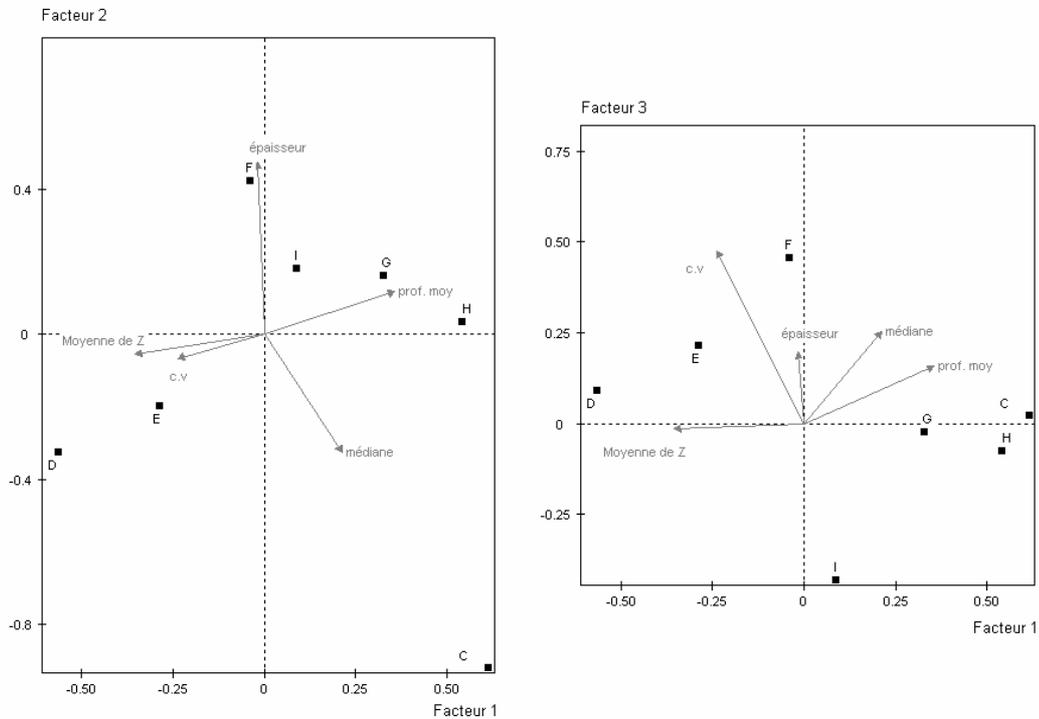


Fig. 53 - Projection des zones dans les deux premiers plans factoriels pour l'essai 1b

- Relation entre les mesures de terrain et l'indice d'intensité d'occupation du sol

La deuxième question à résoudre est la relation entre les variables caractérisant une UM et son indice d'intensité d'occupation du sol.

D'abord, les SP sont réparties dans les 9 zones définies auparavant (Pl. 49). Il est alors possible d'affecter un indice d'intensité d'occupation du sol pour chaque UM à partir du modèle géométrique établi précédemment. Concrètement, il est choisi en prenant en compte le Z moyen d'une UM et, les Z maximum et minimum moyens calculés pour les tranches de 500 ans pour les 9 zones. Un schéma illustre la démarche à partir d'un exemple (Fig. 54). Il faut noter que l'indice d'intensité d'occupation qui est égal à 0 correspond aux UM de niveau naturel d'après le modèle.

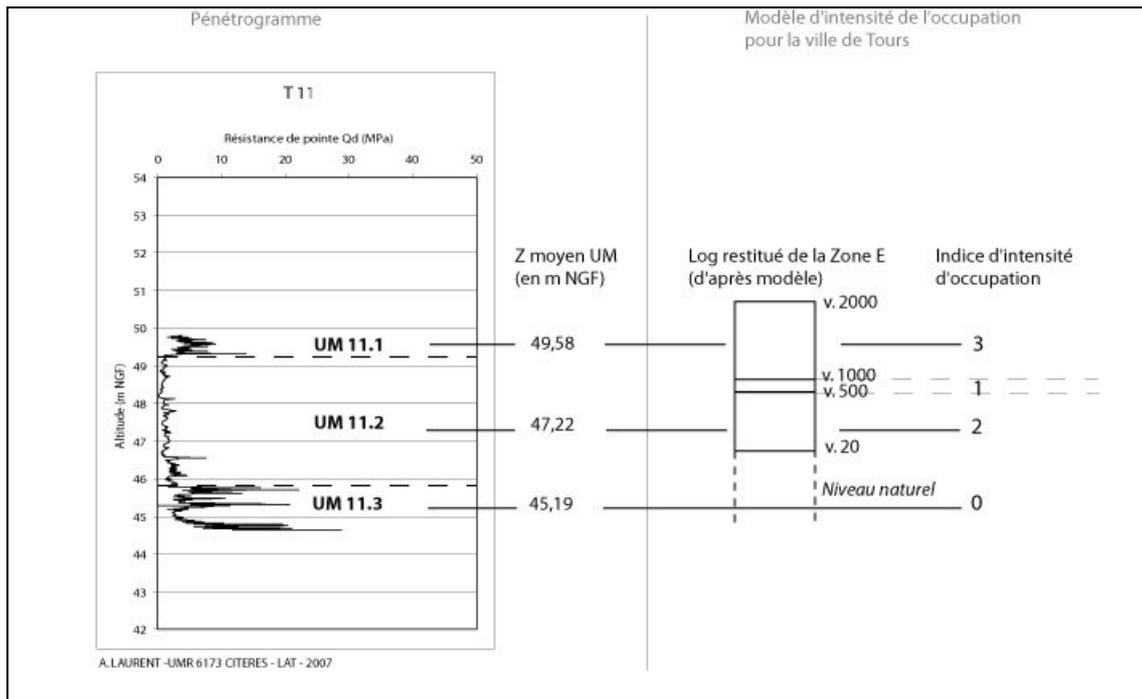


Fig. 54 - Schéma des correspondances entre les UM et l'indice d'intensité de l'occupation pour le SP T11

Ensuite, il faut étudier la corrélation entre ces indices et les valeurs de résistance correspondantes (médiane Qd) puis entre ces indices et l'indice de dispersion (c.v. Qd) correspondant par nuages de points (Fig. 55).

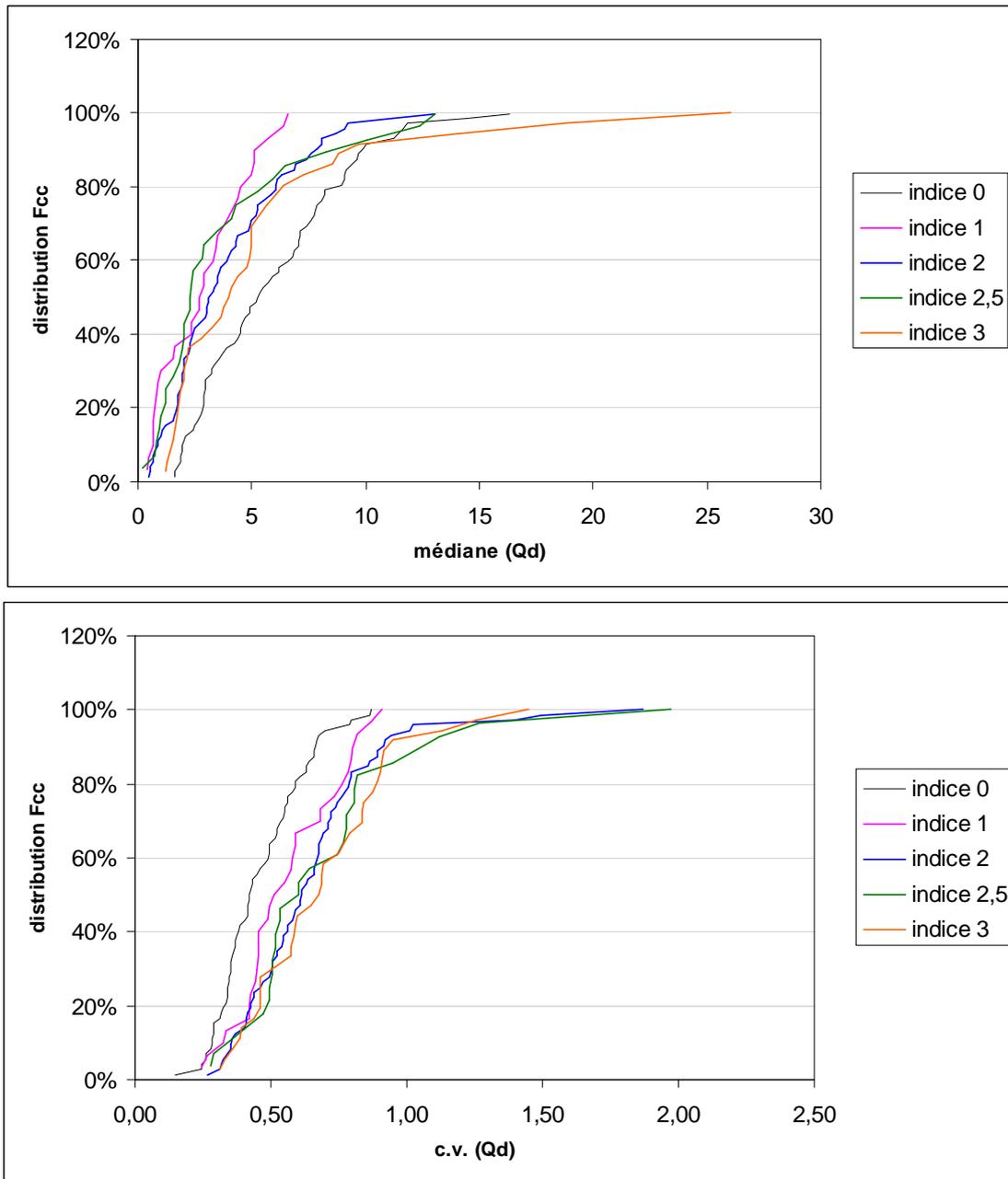


Fig. 55 – Distribution de la fréquence cumulée croissante de la médiane (Qd) et du c.v. (Qd) des UM en fonction des indices d'occupation

Les distributions de la médiane de Qd par indice d'intensité d'occupation s'intercalent, il n'existe pas de corrélation entre la résistance de pointe d'une UM et l'indice d'intensité d'occupation. Par contre, les distributions du c.v. (Qd) ne se recoupent pas pour les faibles indices (indice 0, indice 1 et indice > 2) : il existe une corrélation entre la variabilité de la résistance de pointe d'une UM et l'indice d'intensité d'occupation. Dans ce cas, l'hypothèse retenue est que plus le signal d'une UM est variable (agité), plus l'intensité de l'occupation est importante.

## - Etude de la pente des UM

Une autre piste de travail a été lancée sur l'étude de la tendance ou dérive d'une UM. Elle correspond au sens de la pente du signal correspondant. Il y a donc trois possibilités de tendance : celle qui augmente en profondeur, celle qui se stabilise et celle qui diminue en profondeur. Ces possibilités sont illustrées dans la figure qui suit (Fig. 56) :

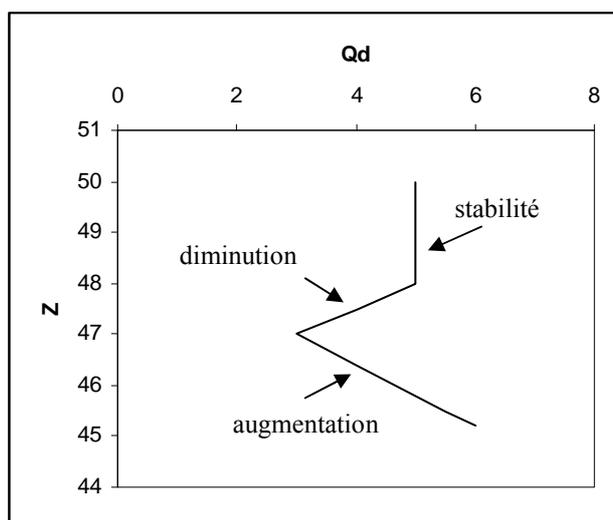


Fig. 56 - Schéma théorique des tendances des UM

Il est possible d'estimer la pente si on ajuste un modèle linéaire (de type  $y = ax + b$ ) pour les valeurs de résistance de pointe appartenant à chaque UM (ch schéma théorique) : ce qui correspond au calcul de l'effet de dérive. Le calcul de la pente « a » a été automatisé sur Excel à partir de la formule suivante<sup>32</sup>, avec les variables Qd et Z (Annexe 78):

$$a = [(Moy (Qd*Z)) - (Moy Qd * Moy Z)] / Var Z, \text{ où } Var \text{ correspond à la variance.}$$

Il faut faire attention car le calcul porte sur la cote altimétrique et non pas sur la profondeur. Ainsi, lorsque le signal est stable, la pente est proche de 0. Donc lorsque a est compris entre -0,1 et 0,1, il a été choisi que le signal ne varie pas. Par ailleurs, si  $a < -0,1$ , le signal augmente, et si  $a > 0,1$ , le signal diminue. Ainsi, 70% des UM ont un signal qui augmente vers la profondeur, 25% des UM avec un signal qui diminue et 5% des UM dont le signal reste stable.

Par ailleurs, le rapport de détermination  $R^2$  a été calculé : seules 27 UM sur 238 (11%) ont un effet de dérive qu'il faudrait corriger ( $R^2 > 0,5$ ). Ainsi, le découpage manuel montre que 89 % des UM ont un signal qui n'a pas d'effet de contrainte du sol. L'étude de la pente n'a pas été

<sup>32</sup> Le tableau croisé dynamique sur Excel ne permet pas de calculer directement la formule de régression linéaire.

poussée plus loin car la détection des UM doit être optimisée par l'emploi de paramètres systématiques et objectifs.

Ainsi, ce test a permis d'avoir une vision globale du problème de la détection des Unités Mécaniques sur un signal. En outre, il permet de poser une base de travail à partir de laquelle il sera réalisé de nouveaux tests pour détecter automatiquement les limites des UM. Il s'agit d'étudier les seuils des paramètres retenus (moyenne, variabilité) afin d'affirmer si une UM est significativement homogène d'un point de vue statistique.

Avant de se lancer dans ces nouveaux tests, il a fallu en réaliser un autre pour répondre à une autre question : est-il préférable de détecter des UM à partir du signal brut ou d'un signal corrigé ?

- *TEST 2 : Détection d'UM de façon manuelle sur des signaux bruts et des signaux consolidés (SP16.32, 16.78 et 16.89 du site de Saint-Julien à Tours).*

Ce test consiste à détecter de façon manuelle, donc subjective, des points de transition des Unités Mécaniques en étudiant la fonction de l'entropie  $L(z)$  à partir du signal brut et des signaux consolidés.

Dans un premier temps, on a calculé les écarts absolus entre les valeurs du  $Q_d$ , du  $Q_c$ , du  $Q_{cm}$  (10, 20 et 50 cm) et du  $Q'$  pour les SP 16.32, 16.78 et 16.89 (Pl. 50, Annexe 79). Dans un deuxième temps, la distribution cumulée croissante de ces écarts a été tracée ( $L(z)$ ) afin de relever manuellement les points de transition pour chacun des signaux (Annexe 80). Concrètement, les points d'inflexion du tracé de la fonction de l'entropie ont été relevés manuellement en travaillant à une échelle comparable d'un type de signal à l'autre.

Le but est de retenir la profondeur de ces points de transition qui indiquent les changements d'Unité Mécanique. Les trois figures qui suivent présentent la confrontation des points de transitions identifiés selon les méthodes pour les trois SP étudiés (Pl. 51, PL. 52 et Pl. 53). Chaque méthode est représentée par une ligne verticale avec des points qui correspondent aux transitions retenues. Puis, pour faciliter le mode de lecture, ces lignes verticales ont été superposées au signal brut du SP.

On observe que la position des points de transition varie d'une méthode à l'autre sur les trois SP. Si on les compare avec le signal brut, on voit que des zones détectées peuvent paraître

anecdотiques sur un signal comme par exemple, dans la zone basse du SP16.78 (entre 2,5 et 3 m de profondeur). Par ailleurs, les résultats du  $Q_c$ , du  $Q_{cm}$  de 10 cm et du  $Q_d'$  présentent des découpages les plus proches de celui du  $Q_d$  brut, notamment pour le SP 16.89.

Ensuite, il est utile de se pencher sur l'étude des moyennes mobiles. En effet, 3 échelles d'analyse ont été employées : 10 cm, 20 cm et 50 cm. Or, un signal peut être structuré différemment selon les formations traversées : des UM peuvent être homogènes sur 10, 20 ou 50 cm. Ainsi, l'échelle d'étude des propriétés mécaniques peut varier d'un SP à l'autre. Concrètement, dans le cas où un signal possède une portée égale à 20 cm<sup>33</sup>, l'emploi des différentes moyennes mobiles peut apporter des biais à l'étude (Fig. 57) :

- le signal calculé à partir d'une moyenne mobile de 10 cm peut introduire un bruit de mesure qui n'est pas significatif mais qui est très proche du signal du  $Q_c$
- le signal calculé à partir d'une moyenne mobile de 20 cm permet de rester proche de l'allure générale du signal du  $Q_c$
- le signal calculé à partir d'une moyenne mobile de 50 cm lisse le signal du  $Q_c$  et atténue donc les faibles et fortes valeurs.

En comparant la distribution de la fonction de l'entropie de  $L(z)$  à partir de ces trois signaux corrigés avec le signal du  $Q_c$  théorique (Fig. 58), on observe que l'emploi de la moyenne mobile de 10 cm met en évidence deux points de transition au sein de chaque UM ; celui de la moyenne mobile de 20 cm met en évidence des points de transition situés au centre de chaque UM ; celui de la moyenne mobile de 50 cm ne fait pas apparaître non plus les UM.

Même si le  $Q_{cm}$  de 10 cm est satisfaisant dans le cas des 3 SP, l'utilisation d'un signal corrigé issu du calcul de moyennes mobiles reste difficile d'emploi. Ce type de correction sera mis de côté pour le reste des traitements.

---

<sup>33</sup> Ici, il y a donc une UM tous les 20 cm.

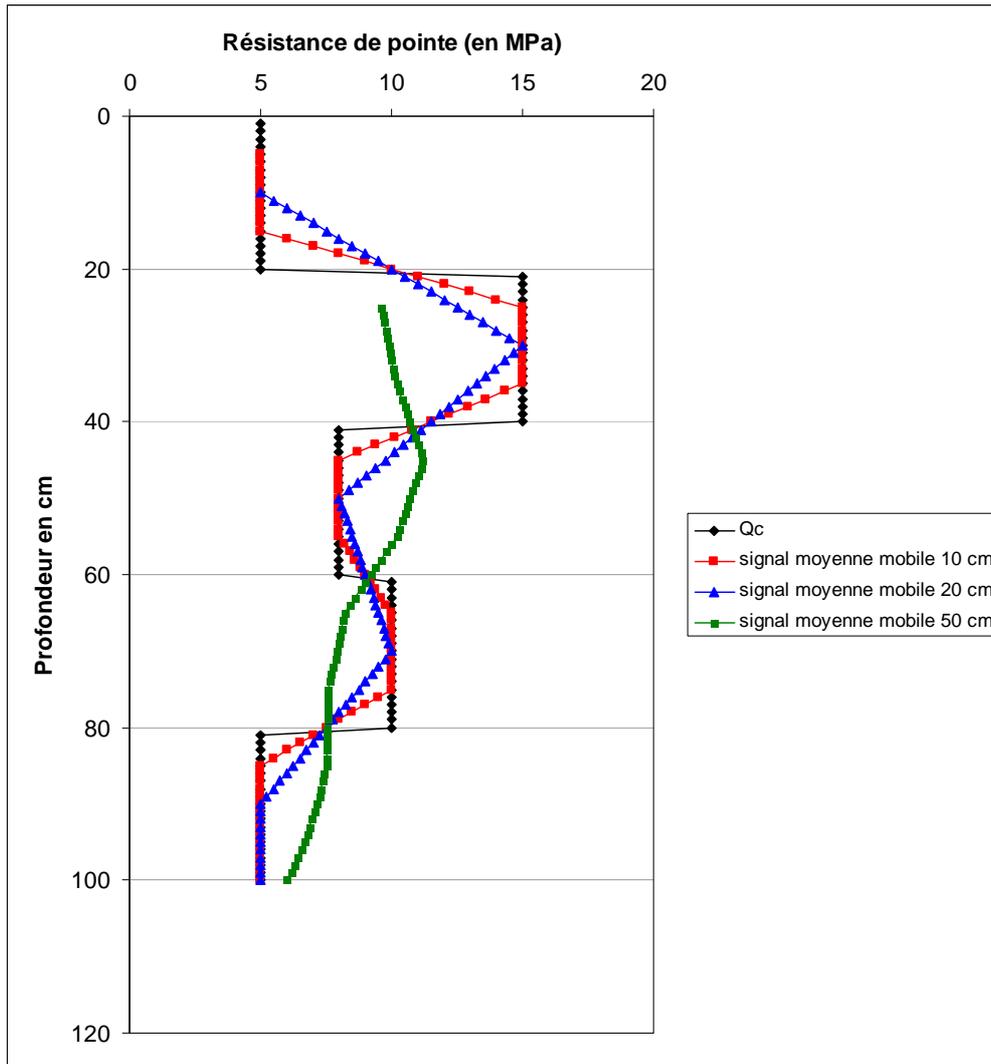


Fig. 57 - Comparaison d'un signal théorique  $Q_c$  (longueur de corrélation 20 cm) et des signaux obtenus à partir du calcul des moyennes mobiles de 10, 20 et 50 cm.

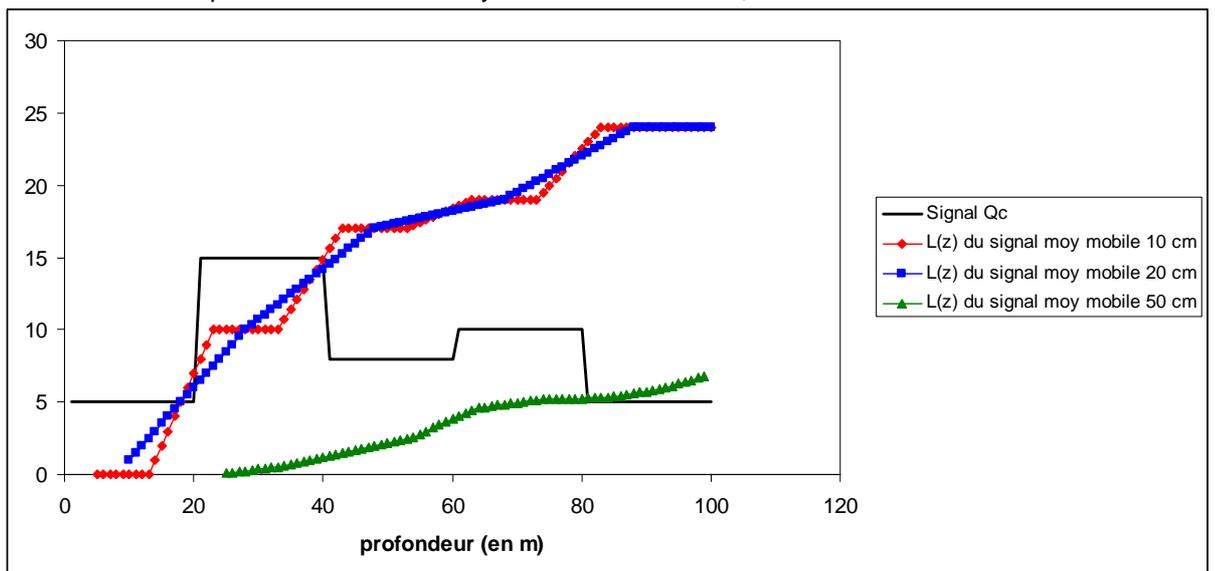


Fig. 58 - Comparaison d'un signal théorique  $Q_c$  (longueur de corrélation 20 cm) et de la fonction  $L(z)$  obtenus à partir du calcul des moyennes mobiles de 10, 20 et 50 cm.

Pour conclure, les signaux régularisés et normalisés sont ceux qui sont les plus satisfaisants pour détecter des UM. Ce test révèle toutefois la complexité de l'étude du découpage interne du dépôt archéologique. Il faudrait donc automatiser la recherche des points d'inflexion et faire un test sur un découpage à une échelle moins fine du signal.

- *TEST 3 : Essai de détection d'UM de façon automatique en étudiant l'entropie des signaux*

Ce troisième test consiste à étudier l'entropie de façon automatique d'un signal régularisé. L. Houy a mis au point un programme qui permet d'automatiser la recherche d'UM à partir de  $L(z)$ . Le but de ce programme est de relever les points de rupture sur la distribution de la cumulée de la dérivée, soit  $L(z)$ , calculée à partir du signal régularisé ( $Q_c$ ). Les abscisses des limites des zones homogènes sont détectées en calculant la qualité d'un ajustement linéaire sur la courbe d'entropie. La qualité de la régression est minimale au droit de la limite recherchée. Il faut cependant définir des paramètres au préalable pour l'automatisation des processus:

- le nombre de points minimum et maximum qui appartient à une UM
- un coefficient de corrélation minimum qui sert de seuil de détection.

Enfin, il faut noter que ce type d'analyse est associé à la définition de la qualité du signal par la quantification du bruit de mesure. Ceci sera étudié plus en détail dans le chapitre 5.

Ce test a été réalisé sur les SP 16.32, 16.78 et 16.89. On a choisi de prendre au minimum 3 points de valeurs lissées et un maximum de 40 pour définir une UM. Ceci induit qu'une UM peut avoir une épaisseur qui varie entre 3 et 40 cm. Par ailleurs, le coefficient de corrélation de l'ajustement linéaire est de 0,9<sup>34</sup>. Ainsi, lorsqu'il se situe en dessous de 0,9, on considère qu'il ne s'agit pas d'une zone stationnaire statistiquement significative (Pl. 54).

Lorsque les points de rupture sont ainsi définis, il suffit de les confronter au signal régularisé ( $Q_c$ ) afin de vérifier s'ils correspondent à des points de transition d'UM jugés significatifs (Pl. 55).

L'emploi de la fonction  $L(z)$  pour détecter des UM propose un découpage plus précis que celui défini manuellement (Pl. 50). Ce test offre l'avantage d'être plus objectif que le test n°2. Toutefois, il est nécessaire de continuer l'expérience suivant d'autres paramètres : par exemple, un nombre de points qui varie entre 3 et 100 (pour une échelle d'ordre décimétrique) et un coefficient de corrélation de 0,95.

---

<sup>34</sup> NB : Un coefficient de corrélation d'un ajustement linéaire,  $r = 0,9$ , correspond à un rapport de détermination  $R^2 = 0,81$

• **TEST 4 : Détection d'UM en comparant un signal régularisé (Qc) et un indice d'entropie**

Pour ce quatrième test, il a été choisi de suivre la procédure suivante :

1 – Le calcul d'un indice d'entropie pour détecter les limites des UM, à partir des valeurs du Qc.

2 – Une superposition graphique du signal lissé (tous les 1 cm) et des limites des UM déduites de l'étude des indices d'entropie. Cette confrontation doit permettre de retenir un indice maximal et minimal qui rendent significatif les limites des UM.

Ainsi, les tests ont porté sur les trois variantes de calcul de l'indice et selon 3 tailles de fenêtre constante : 5 cm, 11 cm et 25 cm. En ce qui concerne la 2<sup>e</sup> variante, il y a plusieurs possibilités lorsque l'on choisit les fenêtres constantes de 11 et 25 cm. L'ensemble des possibilités est présenté dans le tableau suivant (Fig. 59) :

NB valeurs Qc	Variante 1 		Variante 2 			Variante 3 	
	Fenêtre gauche	Fenêtre droite	Fenêtre gauche	Fenêtre centrale	Fenêtre droite	Fenêtre gauche	Fenêtre droite
5 cm	2	3	2	1	2	3	3
11 cm	5	6	5	1	5	6	6
			4	3	4		
			3	5	3		
			2	7	2		
25 cm	12	13	12	1	12	13	13
			11	3	11		
			10	5	10		
			9	7	9		
			8	9	8		
			7	11	7		
			6	13	6		
			5	15	5		
4	17	4					
			3	19	3		

Fig. 59 -Tableau récapitulatif du nombre de valeurs retenues dans le calcul des indices d'entropie selon les 3 variantes

Concrètement, les signaux bruts (Qd) des SP 16.32, 16.78, 16.89, T231 et T356 ont été repris pour calculer d'abord un signal régularisé (Qc). Pour faciliter les comparaisons, les mesures ont été retenues sur les quatre premiers mètres de profondeur.

Ensuite, la première étape de la procédure a été suivie pour calculer l'indice d'entropie selon les trois variantes et les trois fenêtres constantes (5, 11 et 25 cm) (Annexes 81, 82 et 83).

Concernant la variante 2 du calcul de l'indice, l'analyse a été axée sur la première possibilité qui consiste à garder 1 point pour la fenêtre centrale.

Enfin, pour la deuxième étape, des indices maximaux et minimaux ont été retenus pour chacun des SP et ont été comparés : des points de transitions des UM sont alors déduits à partir de ces indices. Ainsi, ces points de transition sont superposés avec le signal corrigé afin de les critiquer (Pl. 56).

Pour illustrer ces étapes, l'exemple du SP 16.32 sera exploité ici (Fig. 60).

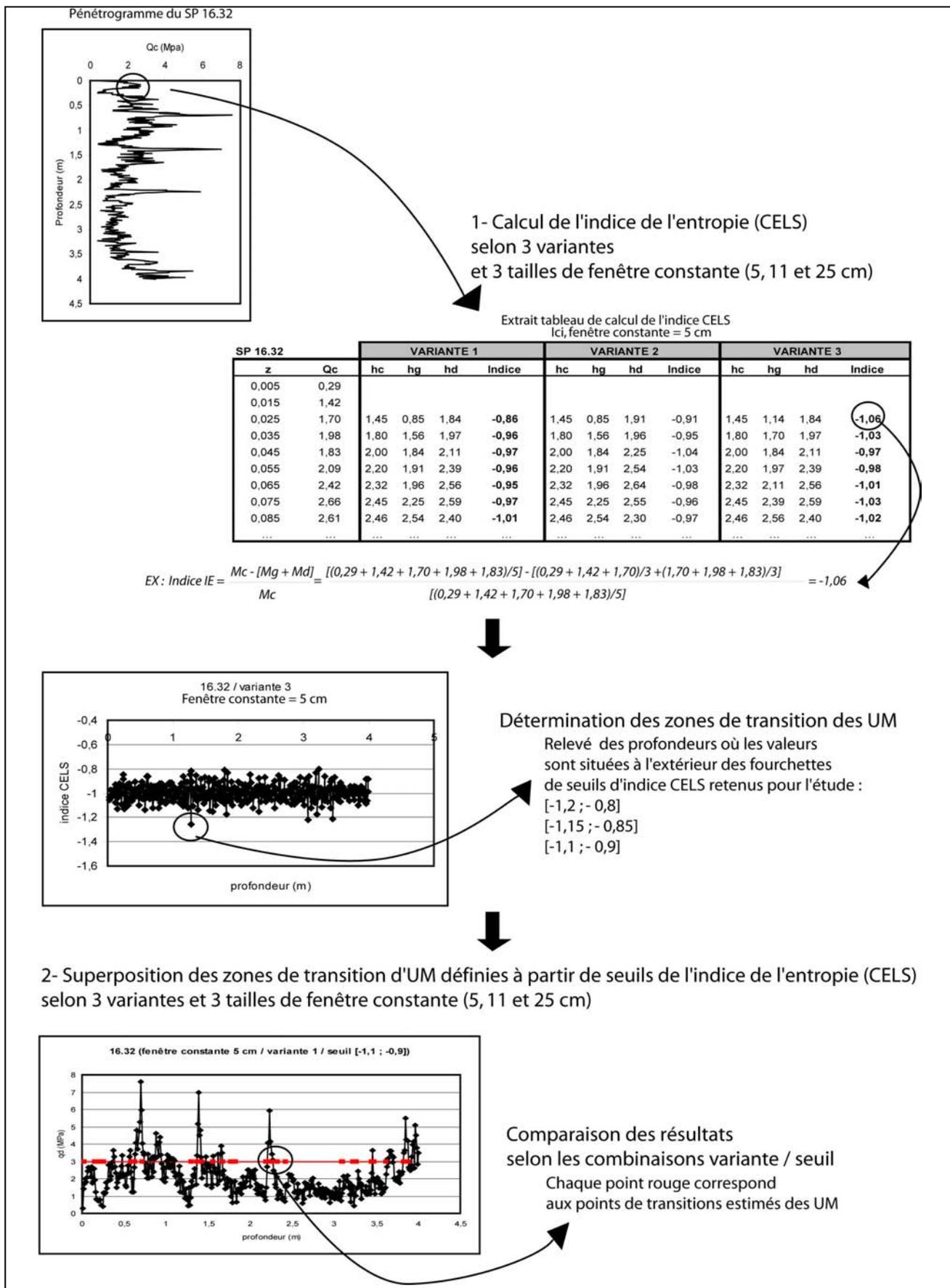


Fig. 60 - Schéma explicatif de la démarche du test n°4

La distribution des indices d'entropie selon les 3 variantes et les 3 tailles de fenêtre montre qu'ils sont situés en moyenne entre  $-1,2$  et  $-0,8$ . Lorsque l'indice est proche de  $-1$ , on considère que l'entropie, ou l'agitation, est faible. Ainsi, l'hypothèse est que les valeurs les plus éloignées de  $-1$  correspondent aux points de transition entre les UM. En effet, lorsque l'agitation est importante, cela s'explique par un changement des propriétés du signal (résistance, variabilité) d'où un changement d'UM. En outre, pour automatiser la détection de ces points de transition, il a été choisi de se fixer des seuils d'indices. 3 fourchettes d'indices ont été sélectionnées :  $[-1,2 ; -0,8]$ ,  $[-1,15 ; -0,85]$  et  $[-1,1 ; -0,9]$ . On suppose que les valeurs d'indice situées à l'extérieur de ces fourchettes constituent des points de transition d'UM.

Pour valider ces points de transition retenus pour chaque variante de calcul et chaque taille de fenêtre centrale, ils sont superposés avec le signal corrigé. On utilise à titre de comparaison le découpage manuel en UM des SP 16.32, 16.78, 16.89 (Pl. 50) et des SP T231 et T356 (Pl. 57).

Globalement, le calcul de l'indice à partir de la variante 2 est le moins satisfaisant pour détecter des UM sauf pour le SP 16.32 pour une fenêtre constante de 11 et 25 cm. Il apparaît que, pour les SP 16.89 et T356, il est difficile avec ces variantes et fenêtres constantes choisies d'obtenir un découpage convenable. Par contre, les combinaisons à retenir sont l'emploi de la variante 3 pour le calcul de l'indice à une échelle de 11 et 25 cm. Plus précisément, la fourchette d'indice  $[-1,2 ; -0,8]$  pour les SP 16.78 et T231 permet de détecter au mieux les limites d'UM proposées par le découpage manuel. Une autre combinaison, celle de la variante n°1, à une échelle de 11 cm et une fourchette d'indice  $[-1,1 ; -0,9]$  convient au SP 16.78.

En conclusion, ce sont les variantes 1 et 3 qui sont les mieux adaptées pour cette approche. Toutefois, il sera important d'affiner les fourchettes de seuils d'indice pour optimiser les résultats. Enfin, la fenêtre constante de 5 cm ne semble pas convenir pour détecter des changements de structure du signal et on peut l'expliquer par la taille de la fenêtre centrale qui est trop fine. Cette observation rejoint les résultats obtenus lors de la maîtrise : la difficulté de détecter des US sur un pénétrogramme. Ceci motive l'emploi d'une échelle moins fine pour la constitution d'un référentiel.

#### 4-2-3- Bilan

Pour conclure sur l'apport des 4 approches pour mesurer le degré d'hétérogénéité par l'intermédiaire de la reconnaissance de zones dites « homogènes », les résultats sont confrontés à partir du SP 16.78 (Pl. 58).

Le premier test propose un découpage manuel du signal brut en 2 UM. L'échelle est ici d'ordre décimétrique.

Le deuxième test présente un découpage du signal brut en plusieurs UM à partir de l'étude de la fonction de l'entropie  $L(z)$  et de la définition subjective des points de transition des zones homogènes. L'emploi du signal régularisé  $Q_c$  et du signal normalisé  $Q'$  est le mieux adapté pour mettre en évidence des UM à l'échelle centrimétrique.

Le troisième test permet d'automatiser la recherche des points de transition des UM à partir de la fonction de l'entropie  $L(z)$  et du choix de paramètres liés à l'échelle d'analyse (une UM homogène a une épaisseur de 3 à 40 cm) et la tendance de la fonction (le coefficient de corrélation est égal à 0,9). Comme pour le deuxième test, l'échelle est d'ordre centimétrique et le nombre d'UM est important. Il a l'avantage de rendre plus objectif le découpage en UM que le deuxième test.

Le quatrième test consiste à étudier un indice d'entropie locale calculé selon 3 variantes et 3 échelles différentes (5, 11 et 25 cm). Des seuils d'indice ont été retenus. Toutefois, il est difficile de déterminer la combinaison de paramètres idéale puisque les résultats sont variables d'un SP à l'autre. Il en ressort toutefois que le calcul de l'indice selon la 2<sup>e</sup> variante est à éliminer pour la suite et que l'échelle de 5 cm n'est pas satisfaisante. Pour le SP 16.78, c'est la 3<sup>e</sup> variante à l'échelle de 11 et 25 cm qui permet de mettre en évidence des UM proches de celles définies dans le premier test.

Pour de prochains tests, il est recommandé de travailler plutôt à partir du signal régularisé ( $Q_c$ ). Le premier objectif est de mettre en relation les UM avec les observations archéologiques pour déterminer l'échelle d'analyse la mieux adaptée. Le deuxième objectif est de poursuivre l'automatisation de la détection des UM par l'analyse du concept de l'entropie en testant d'autres paramètres.

Pour conclure, il a été possible de sélectionner des informations utiles à l'évaluation à l'échelle de la ville de Tours à partir de différentes sources (archéologiques, planimétriques, géotechniques et géologiques). L'ensemble des points d'observations constitue une base pour étudier l'épaisseur du dépôt archéologique et le toit du niveau naturel.

Par ailleurs, ils ont permis de proposer plusieurs modèles :

- la répartition de l'intensité de l'occupation selon des zones prédéfinies et selon des tranches de 500 ans

- l'hypothèse de la production de stratification à partir d'un indice d'intensité de l'occupation et des types fonctionnels

- le découpage du sous-sol en zones dites « homogènes », les unités mécaniques selon différents tests qui concernent l'étude des propriétés mécaniques du sous-sol. On a démontré qu'il n'y a pas de corrélation entre la résistance de pointe  $Q_d$  des UM et l'intensité de l'occupation humaine. Néanmoins, il existe une relation entre la variabilité interne des UM à l'échelle décimétrique et l'intensité de l'occupation. Les résultats montrent qu'il est nécessaire d'approfondir les analyses échelle proche de 20 - 25 cm afin de pouvoir mettre en relation les UM et les observations archéologiques.

L'ensemble de ces résultats sera éclairé par l'étude du potentiel informatif à l'échelle du site.



UNIVERSITE FRANCOIS RABELAIS  
TOURS

Ecole doctorale : Science de l'Homme et  
des Sociétés

Année Universitaire : 2006-2007

**THESE POUR OBTENIR LE GRADE DE  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TOURS**

Discipline : Histoire

Présentée et soutenue publiquement

par :

Amélie LAURENT

le 7 décembre 2007

**Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain**

Volume de texte (2)

-----

Directeur de thèse :

Henri GALINIÉ

-----

**JURY :**

- |           |         |                                |   |
|-----------|---------|--------------------------------|---|
| - BREYSSE | Denys   | professeur                     | Université Bordeaux 1                                 |
| - BRULET  | Raymond | professeur (rapporteur)        | Université Catholique de Louvain                      |
| - DENIS   | Alain   | professeur (rapporteur)        | Université Bordeaux 1                                 |
| - GALINIÉ | Henri   | directeur de recherche au CNRS | UMR 6173 CITERES                                      |
| - GARMY   | Pierre  | conservateur du Patrimoine     | UMR 5140 Archéologie des<br>Sociétés méditerranéennes |

## **Chapitre 5- Evaluation du potentiel informatif à l'échelle d'un site archéologique**

Le 5<sup>e</sup> chapitre vise à exploiter le potentiel informatif des différentes sources de données à l'échelle du site. Le site de l'abbaye de Saint-Julien sera ici le site de référence pour les analyses. Depuis 2002, plusieurs tests ont été développés à partir des mesures pénétrométriques et des données de terrain (cf 2-1-4). Le but est de reprendre certains de ces tests et de les appliquer sur certains sites de comparaisons en fonction de la disponibilité des informations archéologiques et des conditions de réalisation de la prospection géotechnique au PANDA.

Plusieurs points seront traités dans cette étude : la mise en place du référentiel liant les données géotechniques aux données archéologiques, l'essai de modélisation du dépôt archéologique à l'échelle du site à partir de la méthode des « code-barres » et la confrontation de la méthode géotechnique avec les méthodes géophysiques.

Avant d'aborder ces différents points, l'ensemble du corpus mis en œuvre sera présenté pour chacun des sites retenus. Ce corpus est constitué essentiellement des données archéologiques et pénétrométriques, complétées selon les cas par les observations géomorphologiques, pédologiques et/ou micromorphologiques ainsi que par celles issues de l'utilisation du géoendoscope et de la prospection géophysique.

### **5-1- Les données utiles à l'évaluation à l'échelle d'un site**

Pour évaluer le potentiel archéologique d'un site à partir des données de terrain, plusieurs sources d'informations sont disponibles : les observations géomorphologiques, pédologiques et/ou micro-morphologiques, les observations archéologiques, les observations géotechniques (PANDA et autres techniques), les observations visuelles au géo-endoscope et les observations géophysiques.

D'abord, les observations géomorphologiques, pédologiques et/ou micromorphologiques apportent des indications sur la nature du sol géologique mais aussi sur les processus de formation du sous-sol, qu'il soit naturel ou anthropique. Elles seront utiles ici pour la constitution du référentiel archéologico-mécanique. Les études de spécialistes seront exploitées pour certains sites de Tours (site 16 et 69) et de Lyon (site L1015). Enfin, pour des questions pratiques, elles pourront être intégrées directement à la présentation des données archéologiques.

Les observations archéologiques utiles à l'évaluation d'un site correspondent aux relevés de coupe stratigraphique et aux enregistrements de terrain. Ces données sont accessibles dans les

rapports de fouilles ou de diagnostics et, notamment pour les sites étudiés par le LAT, consultables dans la base de données « ArSol ».

Les observations géotechniques présentées dans cette étude sont issues de la prospection au PANDA qui s'est déroulée de 2000 à 2005. Dans le cadre de la thèse, cette phase d'acquisition de données expérimentale a pris une part importante. Cette phase est constituée à la fois de la réalisation de SP in-situ<sup>35</sup> mais aussi des relevés de coupes lorsque cela était possible. Il faut noter que dans le cas où les SP ont été exécutés en cours de fouille ou après la fouille, la plupart ont été implantés en bord de coupe, de façon à visualiser ce qu'a traversé le PANDA. Si ce n'est pas le cas ; les relevés de coupes les plus proches seront alors utilisés pour la constitution du référentiel. Les observations sont alors moins fiables.

Par ailleurs, la prospection au géoendoscope a été mise en œuvre sur le site 16 – Saint-Julien à Tours et sur le site L1015 – Rue Mgr Lavarenne à Lyon. Les interprétations sont le résultat de la confrontation des images et du signal pénétrométrique. Ce type de prospection est exploratoire sur les sites archéologiques et sera présenté pour les deux sites.

Enfin, les observations géophysiques (électriques et magnétiques), obtenues sur les sites de Tours (site 16 et BAZ) et à Stolpie en Pologne (site STO), seront exploitées dans le cadre d'une réflexion sur le couplage avec la géotechnique. Cette réflexion concerne l'échelle d'analyse horizontale (maille d'étude) et verticale (volume du sous-sol étudié).

#### 5-1-1- Site 16 – Abbaye Saint-Julien/Prosper Mérimée

Le site a déjà été présenté dans la deuxième partie (2-1-4). Il est situé dans la partie centrale de la ville et du front de la Loire (Pl. 59). Il est positionné dans une partie de la ville pour laquelle les connaissances archéologiques et historiques sont faibles. Toutefois, les résultats des fouilles programmées de 2000 à 2003 ont permis d'apporter de nouveaux éléments notamment pour les périodes antiques et du Haut Moyen Age (GALINIÉ, LORANS 2000 ; GALINIÉ, LORANS, FONDRILLON 2001 ; GALINIÉ *et al.* 2002 ; GALINIÉ *et al.* 2003c).

---

<sup>35</sup> La prospection a été réalisée avec l'aide précieuse d'étudiants (J. Babillot, M. Fondrillon, E. Marot, B. Lefebvre, N. Poirier, G. Rocque...et certains fouilleurs de Saint-Julien) et des archéologues (à Tours, N. Fouillet, S. David ; à Lyon, G. Bonnamour, E. Bernot, E. Hoffmann, P. Breul).

Le site 16 est localisé sur les berges de la Loire à l'Antiquité. Les alluvions de la Loire ont été observées vers 44,3 m NGF à l'emplacement d'un aménagement de rive antique (cf Annexe 84, section 12).

Durant les 4 campagnes, l'emprise de la fouille s'est réduite en profondeur pour des raisons de sécurité. Ainsi, les niveaux antiques ont été étudiés dans des sondages à la pelle mécanique (sondages n°1 et 2) ainsi qu'à la pioche (sondages n°3 et n°4).

- *Observations archéologiques*

8 périodes constituées de plusieurs agrégations ont été distinguées à partir des données de terrain. La présentation sera chronologique et intégrera à la fois, les nouvelles interprétations développées en 2006-2007 dans le cadre de travaux de post-fouille (publication en cours de réalisation, sous la direction d'H. Galinié) et les résultats publiés dans les rapports (GALINIÉ, LORANS 2000 ; GALINIÉ, LORANS, FONDRILLON 2001 ; GALINIÉ *et al.* 2002 ; GALINIÉ *et al.* 2003c). D'autre part, les niveaux situés entre les 3<sup>e</sup> et 12<sup>e</sup> siècles ont été intégrés dans des ensembles appelés « contexte ». Ces contextes sont parfois difficiles à interpréter et difficiles à replacer en chronologie relative. Les études en cours sur la constitution du sol permettront d'éclaircir ces interprétations (FONDRILLON 2007 ; JAFFROT *en cours*).

Les diagrammes stratigraphiques utilisés (US et agrégations) correspondent aux versions de décembre 2006 (Annexe 85). Enfin, la présentation sera axée sur les agrégations étudiées pour le référentiel archéologico-mécanique (Annexe 86); elles sont notées « **Agr** ». La numérotation des agrégations a été modifiée récemment : l'ancienne numérotation sera employée pour le traitement des données mais les coupes ont été mises à jour. On utilisera également « STR » pour énumérer une « structure » et « F » pour un « Fait ».

- Période 1 – La construction d'ouvrages d'art antique (1<sup>er</sup> -2<sup>e</sup> siècle)

La période 1 correspond à une opération d'urbanisme menée vers 40-50 ap JC : la construction d'un pont à l'est (STR18) et d'un aqueduc à l'ouest (STR19) (Annexe 87). Le premier aménagement est un remblaiement de la berge associé à un enrochement sur les alluvions de la Loire pour établir un caisson de la culée du pont. A l'ouest, un sondage a révélé la présence d'une maçonnerie (M20, 1<sup>er</sup> état STR19) que la constitution et l'architecture permettent d'interpréter comme un aqueduc. L'hypothèse est que cet aqueduc a été alimenté soit par un point de captage dans le coteau au nord de la Loire, soit par une noria qui peut être localisée à quelques mètres de l'emprise du site.

Le pont est consolidé par le renforcement de la culée vers le nord (**M27**) (**Agr2.48**) en même temps que l'aménagement de rive est-ouest (**M26**) (2<sup>e</sup> état STR18) (**Agr2.53**). La fondation de ces maçonneries s'accompagne de remblais. Ceux associés à M26 sont des couches limoneuses grises avec du bois et du charbon de bois (**Agr 2.46**) puis des niveaux argileux verdâtres avec des blocs de meulière et de calcaire dur (**Agr 2.44**) (3<sup>e</sup> état STR18). Enfin, une nouvelle maçonnerie de consolidation de la culée est construite (M25) et est accompagnée d'un remblaiement limono-sableux brun au sud de M26 (**Agr 1.32** et **Agr 2.42**) (4<sup>e</sup> état STR18).

Parallèlement, M20 est consolidée par le bouchage des arcades avec la construction de **M23**, au sud (**Agr1.34**) et de M24, au nord (2<sup>e</sup> état STR19).

Cette période est datée des 1<sup>er</sup> - 2<sup>e</sup> siècles ; l'analyse de la céramique est en cours (*BEBIEN en cours*).

#### - Période 2 – La destruction/récupération des structures antiques et remblai massif (Contexte C1) (3<sup>e</sup> - 4<sup>e</sup> siècle)

Lors de la période 2, les structures 18 et 19 sont détruites et récupérées en grande partie. Cette activité est suivie d'un remblaiement systématique du site gagnant dans le fleuve, le contexte C1. Il faut noter que C1 n'a pas été fouillé dans sa totalité.

A l'est, à partir de 45,50 NGF environ jusqu'à 46,90 NGF environ, ces remblais sont hétérogènes (Annexe 84) :

- à l'ouest de M27, l'US 1798, équivalente à 1812 (**Agr 1.31**) est une couche limono-sableuse brune hétérogène composée de déchets de matériaux de construction.

- entre M22 et M25 (après la récupération de M27), il y a une succession de couches de terre limoneuses, argileuses et charbonneuses (US 2673, 2674, 2675, 2676, 2677) (**Agr 2.40**) (datées des 1<sup>er</sup>-2<sup>e</sup> siècle?) puis des couches de sable ocre (terre crue déstructurée) qui reposent contre M21 (daté des 3<sup>e</sup>-4<sup>e</sup> siècle?) (US 2546, 2555, 2613, 2559, 2656, 2650, 2651, 2653, 2670) (**Agr 2.38**).

A l'ouest, de 45,60 (limite de fouille) à 47,50 NGF, des remblais ont été mis au jour. La phase de remblaiement doit être contemporaine du remblaiement massif distingué en zone 2 (**Agr 2.38** et **Agr 2.40**):

- dans le sondage n° 4 (zone 1, secteur4), des couches de remblais divers (tuffeau, sable) ont été fouillées sur M20 et contre M20. Ceci a permis de mettre au jour les quatre assises de blocs de calcaire dur. Le fond du remblai semble s'arrêter à 45,56 NGF. Ce niveau correspond au niveau d'insertion primitif de M20. La fouille s'est arrêtée sur ce niveau. Les observations sur la céramique montrent que ces couches sont datables du 1<sup>er</sup>/2<sup>e</sup> s.

- dans le secteur 4, dans la partie haute du remblai massif, on a également observé des couches de terre crue déstructurée ocre.

L'épaisseur de ce remblai massif conservé est estimé entre 1,50 m et 2 m (Annexe 84, section 2). L'étude de la céramique est aussi en cours (BEBIEN *en cours*) mais on estime que ces niveaux sont datés des 2<sup>e</sup>-4<sup>e</sup> siècles.

Par ailleurs, durant la période 2, le mur M23, **F182**, s'est écroulé sur les remblais C1 (**Agr1.29**). Le blocage est constitué de lits de mortier ainsi que de blocs de calcaire dur, de meulière et de tuffeau. Cette agrégation est suivie d'une nouvelle phase de destruction/récupération de la structure 19. Ces couches sont assez sableuses et composées de déchets de matériaux de construction (**Agr1.28**).

- Période 3 – Des niveaux domestiques (Contexte C2) à la première phase de mise en culture du site (Contexte C6) (4<sup>e</sup> – 9<sup>e</sup> siècle)

La période 3 est constituée de différents contextes dont la datation est estimée entre les 4<sup>e</sup> et le 9<sup>e</sup> siècles.

Le contexte C2 est difficile à interpréter : remblais ou occupation domestique. La fonction retenue pour l'étude est le remblai. Il s'agit de niveaux bruns constitués de déchets de matériaux de construction et du mobilier (**Agr2.37**). Par ailleurs, une structure en creux (fossé ?) comblée d'un sédiment brun plus clair et plus sableux (F271) a été fouillée (**Agr2.36**).

Le contexte C3 correspond à des structures liées à l'activité de combustion liée au traitement du charbon et de cendre, localisées à l'extrême est du site et datées des 8<sup>e</sup> -10<sup>e</sup> s (Annexe 88). Sur une épaisseur d'environ 1,20m, de 46,90 à 48,10 NGF, plusieurs faits se sont succédés en se décalant vers l'est :

- F270 et F265 (STR16 état 1) (**Agr2.34**). Ces faits sont caractérisés par la présence de quelques déchets de matériaux de construction et de la céramique majoritairement antique. F265 est notamment riche en mobilier métallique. Notons qu'ils comblent un creusement réalisé dans les niveaux du remblaiement massif (Contexte 1)

- l'installation de F264 sur F270 et F265 (STR16 état 2) (**Agr2.33**). Son bord est très net (coupe remblais antiques ocres). Il possède le même profil que les deux premiers. Quelques tessons permettent de dater ces niveaux des 8-10<sup>e</sup> siècles

- F257 est situé sur F264 (**Agr2.31**). Ces bords ne sont pas aussi nets que les structures excavées antérieures. Il est lui aussi constitué d'un sédiment fin limoneux noir et de céramique quasi antique (Bas-Empire). Il apparaît alors que les niveaux sont disposés en tas

- F249 (STR12) (**Agr2.23, Agr2.24**), fouillé au départ comme un fond de cabane, possède les mêmes caractéristiques que F257.

Les abords de ces structures se sont exhaussés au fur et à mesure de leur formation. Il s'agit de couches brunes limono-sableuses avec des déchets de taille de matériaux de construction et du mobilier plus ou moins fragmentés qui sont difficilement interprétables (niveaux mis en herbe ? niveaux de pacage ? niveaux brassés ?) et qui sont datés des 8/9<sup>e</sup> s. (secteurs 3 et 9) et des 9/10<sup>e</sup> s. (secteurs 2 et 8) par du mobilier céramique intrusif (**Agr229** et **230**). Elles sont aussi associées à la structure 14 (Contexte C4).

Le contexte C4 correspond à une aire empierrée (STR14) et à ses abords. Les niveaux constituant la structure 14 ont été fouillés dans la partie centrale du site (**Agr 226, Agr 255**). Sur une épaisseur d'environ 55 cm, ces couches sont constituées essentiellement de déchets de taille de matériaux de construction (pierres et cailloux de TCA, mortier, silex, calcaire dur) et de mobilier redéposé. Le mobilier datant est en faible quantité mais permet d'attribuer ces niveaux du 8<sup>e</sup> au 11<sup>e</sup> siècle. Les abords de la structure 14 sont des niveaux limono-sableux bruns avec quelques éléments de matériaux de construction et sont interprétés comme des niveaux mis en herbe (**Agr225, Agr229**).

Le contexte 5 correspond à une première phase de niveaux agricoles qui a été reconnue dans les secteurs 1 et 4 par l'analyse des constituants et par les observations pédologiques (POUPET, HARFOUCHE 2002 ; Annexe 89).

Sur environ 50 cm d'épaisseur, les pédologues ont distingué des horizons appartenant à 2 paléosols, interprétés comme des niveaux agricoles ; ils ont donc été repris pour découper le contexte C5 en 4 agrégations (**Agr123, Agr161, Agr153 et Agr154**). Les secteurs ont été fouillés par passes mécaniques, d'environ 5 cm d'épaisseur. Les couches sont des niveaux bruns limono-sableux avec des éléments de construction de taille diverses et du mobilier redéposé et intrusif. Aucune stratification archéologique n'a été observée mais l'étude pédologique a révélé la présence de sols formés à partir d'apports extérieurs de sédiments et à partir de la déstructuration des éléments de construction antiques. Ils se différencient les uns des autres par leur teneur en matière organique qui est plus ou moins évoluée selon le temps d'arrêt entre chaque apport.

Un pendage a également été observé vers le nord (décalage de 30 cm du sud au nord de la fouille).

D'après un premier examen de la céramique, C5 serait daté des 6-9<sup>e</sup> siècles.

Le contexte 6 n'est pas étudié ici. Il correspond à un dépôt de type domestique induré verdâtre – jaunâtre interprétés, par la micromorphologie (MACPHAIL 2003) comme des déchets de pots de nuits et des niveaux de terre piétinés.

- Période 4 – La mise en culture générale du site (Contextes C7/C8) (9<sup>e</sup> -12<sup>e</sup> ? siècle)

Le contexte C7 correspond à une deuxième phase de mise en culture (Annexe 84, sections 2 et 10). C7 a été découpé en 3 agrégations (**Agr1.21**, **Agr1.45** et **Agr1.46**) suivant les observations des pédologues qui ont observé aussi 2 séquences appartenant à un troisième paléosol dans la coupe n°10 (POUPET, HARFOUCHE 2001). L'ensemble, épais de 65 cm, a été aussi fouillé par passes mécaniques. Il s'agit de niveaux limono-sableux bruns foncés avec des éléments de déchets de taille de matériaux et la présence de céramique redéposée. La fourchette minimale de datation proposée est du 9<sup>e</sup> -12<sup>e</sup> s.

- Période 5 – Les structures qui scellent la mise en culture (12<sup>e</sup> – 14<sup>e</sup> siècle)

Durant la période 5, plusieurs structures scellent la deuxième mise en culture du site (Annexe 90). Ces structures sont :

- un bâtiment maçonné à la fonction indéterminée (STR9)
- le mur de clôture oriental de l'abbaye M12 (**Agr1.16**), édifié aux 11<sup>e</sup>-12<sup>e</sup> s.
- des terrasses délimitées par M18 et M11, STR11 (**Agr2.21**)
- une construction en matériau léger, STR10, des 13<sup>e</sup> -14<sup>e</sup> s.
- une aire de circulation empierrée de 20 cm d'épaisseur, STR13 (**Agr2.20**), daté des 12<sup>e</sup> -13<sup>e</sup> s. et situé sur l'ancien empièchement STR14
- des niveaux extérieurs contemporains des STR10 et STR11, de type pacage (niveaux bruns limoneux homogènes) du 13<sup>e</sup> s. (**Agr1.42**, **Agr2.19**).

- Période 6 – L'occupation liée à la construction de l'infirmerie de l'abbaye de Saint-Julien (14<sup>e</sup> – 17<sup>e</sup> siècle)

La période 6 correspond l'occupation intérieure et extérieure de l'infirmerie de l'abbaye de Saint-Julien (STR4) (Annexe 91).

Le 1<sup>er</sup> état de l'infirmerie correspond à la construction des murs M7, M8 et M19 (**Agr1.13**) et à son occupation intérieure (**Agr1.41**). Les niveaux intérieurs sont fins, bruns foncés, d'aspect gras et compact. Ils s'intercalent avec des niveaux des remblais de recharge de sols. L'occupation extérieure contemporaine à ce 1<sup>er</sup> état correspond à des jardins de constitution

homogène et brassée des 14<sup>e</sup> – 15<sup>e</sup> s. (niveaux limono-sableux avec beaucoup de mobilier d'origine domestique) (**Agr 2.16** et **Agr 2.17**).

Le 2<sup>e</sup> état de l'infirmerie est composé d'une phase de destruction du mur M19 et d'un aménagement extérieur (**Agr2.15**), de la construction du mur oriental M9 et ses contreforts (**Agr1.12**, **Agr2.14**) et à son occupation intérieure (**Agr1.12** et **Agr1.11**). La construction de M9 est suivie d'un remblaiement intérieur (Agr1.12) (tuffeau, mortier) pour construire le lit de pose du carrelage qui a été récupéré en grande partie au centre et au sud. Il est recouvert de niveaux intérieurs et de remblais intercalés datés des 16<sup>e</sup> -17<sup>e</sup> s. (Agr1.11). L'espace délimité par M7 (au sud) et M11 (à l'est), dont l'extension totale demeure inconnue devait faire partie de l'infirmerie. Par ailleurs, des niveaux extérieurs contemporains de ce 2<sup>e</sup> état ont été fouillés à l'est. Ce sont des jardins bruns homogènes, sans stratification apparente avec du mobilier domestique (**Agr2.13**, **Agr2.12** et **Agr2.11**). Ce 2<sup>e</sup> état de la structure 4 est daté des 16<sup>e</sup> -17<sup>e</sup> s.

- Période 7 – La transformation de l'infirmerie et les jardins modernes (17<sup>e</sup> -18<sup>e</sup> siècle)

La période 7 est liée à la destruction de l'infirmerie et à la formation de niveaux de jardins.

Des niveaux liés à la destruction du bâtiment (entre 1739 et 1761) ont été mis au jour sur le site (**Agr1.10**, **Agr2.10**). Il sont constitués d'éléments de construction et sont datés des 17<sup>e</sup> - 18<sup>e</sup> s.

Ces niveaux de démolition sont ensuite recouverts par des couches de jardins et cours successives qui ont été dissociés (Annexe 84, section 2, 6 et 21):

- l'occupation extérieure W (**Agr1.9**, **Agr2.9**) est représentée par une couche de terre brune homogène et brassée entre 10 et 20 cm d'épaisseur. Elle est datée entre le 17<sup>e</sup> et le 18<sup>e</sup> s. ;

- l'occupation extérieure X (**Agr1.7**, **Agr2.8**) est constituée de surfaces de circulation au sud (tuffeau et mortier pulvérulent, recharge de sable et mobilier à plat) et d'un espace de jardin au nord (50 cm d'épaisseur). Elle est datée entre le 18<sup>e</sup> et le 19<sup>e</sup> s. ;

- l'occupation extérieure Y (**Agr1.6**, **Agr2.7**) correspond à des jardins épais de 20-30 cm (niveaux bruns également brassés) et datés des 18<sup>e</sup> -19<sup>e</sup> s. ;

- une fosse de récupération d'une structure bâtie (F110) (**Agr1.03**) comblée de matériaux de destruction et datée du 19<sup>e</sup> s.

- une structure non identifiée (STR5) constituée de deux alignements de fosses

- l'occupation Z est représentée par deux niveaux extérieurs damés par la circulation du 19<sup>e</sup> s.

- Période 8 – Le collecteur d’eaux de pluie et le manège de la caserne militaire (19<sup>e</sup> siècle)

La période 8, non-étudiée ici, correspond à la construction et l’utilisation d’un collecteur d’eaux de pluie (STR1) ainsi qu’à la formation du manège de la Caserne de Passage du début du 19<sup>e</sup> s. (STR2) et à un bâtiment associé (STR6).

• *Observations géotechniques (PANDA)*

102 SP ont été implantés sur le terrain (42 en 2000, 36 en 2001, 17 en 2002 et 7 en 2003) (Pl. 60, Annexe 92). Parmi eux, 36 SP ont été arrêtés à cause d’un refus, 65 volontairement et 1 pour des raisons techniques. La majorité des SP sont situés dans l’emprise de la fouille et à proximité d’une coupe. En outre, leur cote altimétrique maximale varie selon leur date de réalisation.

Les pénétrogrammes sont présentés en annexe (Annexe 93). De plus, les relevés de terrain spécifiques à la méthode par la description d’UL (Unité Lithologique) sont les mêmes que ceux employés pour la maîtrise. Il s’agit de log restitué et découpé par UL (cf partie 2) (Annexe 94). Les photos de ces logs sont jointes également aux annexes (Annexe 95). L’ensemble de ces informations est enregistré dans la base BaDoPAN.

Les SP traversent des niveaux des périodes 1 à 7. Par ailleurs, étant donné que la cote du toit des alluvions est estimée entre 44,3 à 45 m NGF, l’attention sera portée sur les 22 SP qui ont atteint cette profondeur (en gris Annexe 92).

• *Observations au géoendoscope*

Sur le site de Saint-Julien, les essais au géoendoscope ont été réalisés par P. Breul et Y. Haddani (LERMES/CUST – Université Clermont-Ferrand) les 13 -14 juin 2000 et les 15-16 novembre 2001 (BREUL 2001; BREUL, HADDANI 2002). 20 essais ont pu être effectués à la suite des sondages au pénétromètre (Pl. 61). Il a été impossible d’en réaliser deux autres pour des raisons techniques (n°16.6 et n°16.8). Durant la deuxième campagne, en 2001, il a fallu refaire des sondages au pénétromètre auprès de ceux déjà existant car ces derniers étaient bouchés (n°16.56, n°16.75, n°16.76 et n°16.77).

La numérotation des essais au géoendoscope correspond à celle des SP. L’ensemble de leurs caractéristiques est présenté en annexe (Annexe 96).

Les résultats obtenus ne sont pas tous exploitables car la qualité de certaines images n'est pas bonne. L'analyse des données recueillies permet de distinguer différentes couches dont l'épaisseur peut varier de 20 cm à 3 m pour chacun des forages. On peut alors confronter les deux découpages que proposent l'analyse mécanique et l'analyse visuelle. Dans les rapports, P. Breul présente un découpage du signal en zone qu'il considère homogène en fonction de leur fourchette de résistance. Il confronte alors ces zones avec celles détectées par la vidéo. Les couches reconnues par l'endoscope se distinguent par leur couleur, leur luminosité et leur granulométrie.

A partir de ces différentes observations et sans connaissance des résultats de terrain, il a proposé des estimations de la cote du toit des alluvions de la Loire qui varient entre 46 et 47 NGF (Annexe 96). Or, lors de la fouille, le toit des alluvions a été vu à 44,3 m NGF dans la partie nord-est du site. Il est estimé vers 45 m NGF sur le reste du site. Donc si compare ces hypothèses avec les résultats de terrain, on en déduit que seul l'essai à l'endoscope des SP n°16.32 a atteint les alluvions. Les niveaux estimés naturels sont en fait des remblais antiques sableux

Par ailleurs, ces observations nous renseignent également sur la constitution du dépôt anthropique. L'objectif est de comparer les données enregistrées sur le terrain avec les observations issues de l'utilisation de l'endoscope. Evidemment, il faut prendre des précautions car les SP sont situés en dehors de la fouille et en bord de coupe : on peut alors envisager des incohérences entre les deux enregistrements d'un point de vue sédimentaire et topographique. Le détail de la confrontation des essais et des données de terrain est présenté en annexe (Annexe 97).

- *Observations géophysiques*

Durant les 4 campagnes, des expériences de prospection géophysique ont été effectuées sur le site afin de participer à la caractérisation du dépôt archéologique, notamment des niveaux de Terres Noires, interprétés sur le site comme des niveaux mis en culture à l'ouest, une occupation domestique et une zone de circulation empierrée à l'est.

- Méthode radar et électrique

En 2000, les mesures issues de la prospection radar (C. Panissod / Université Paris 6) et la prospection électrique (R. Deshayes, M. Frappa, M. Martinaud / CDGA – Université Bordeaux 1 ; C. David / INRAP), réalisées avant l'ouverture de la fouille, ont mis en évidence la couche superficielle de remblais liés destructions de la seconde guerre mondiale, masquant alors les

structures sous-jacentes. Il aurait été préférable d'effectuer la prospection après le décapage de ces remblais récents.

En 2001, la prospection électrique suivant une maille fine (10 cm) a été menée en zone 2 sur une surface variant de 48,9 m NGF au nord à 50 m NGF au sud.

En 2002 puis en 2003, la prospection électrique a été à nouveau expérimentée dans les deux zones avec 4 écartements d'électrodes (10, 20, 36 et 63 cm).

En zone 1, elle a mis en évidence une anomalie résistante sur les images qui correspond à la maçonnerie M20 (STR18) appartenant à l'aqueduc antique (Annexe 98). A partir de 48 m NGF, la partie écroulée du mur M23 (F182) a également été détectée. Toutefois, la maçonnerie M24, au nord, n'est pas visible. Par ailleurs, dans la partie nord, l'anomalie conductrice correspond au comblement d'une dépression remplie de matière fécale et de dépôt issue de la déstructuration de terre crue (STR15 – Contexte 6) et, dans la partie sud, les mesures plus hétérogènes correspondent aux niveaux agricoles puis aux niveaux de destruction/récupération antiques (sous 48 m NGF).

En zone 2, les images montrent que la résistivité diminue quand la profondeur augmente. Les anomalies conductrices ou résistantes sont difficilement interprétables (Annexe 99). Toutefois, ce phénomène révèle la présence de niveaux à la granulométrie hétérogène qui correspond aux observations archéologiques (contextes C2, C3, C4).

#### - Méthode magnétique

La méthode magnétique<sup>36</sup> a été testée en 2001 (C. David) et en 2002 (E. Marmet / Université Paris) afin d'étudier les propriétés des niveaux agricoles. Les résultats révèlent l'hétérogénéité magnétique des niveaux mis en culture (Contexte 7) (Annexe 100). Par ailleurs, la maçonnerie M20 apparaît nettement sur l'image alors que ce n'est pas le cas pour M23.

En conclusion, les méthodes électrique et magnétique ont été testées pour étudier les propriétés des niveaux du Haut Moyen Age et pour détecter des structures difficilement visibles lors de la fouille (fosses, construction en terre crue..). Les résultats montrent bien le caractère hétérogène de ces niveaux. Certaines maçonneries apparaissent nettement sur les images géophysiques. Cependant, les anomalies détectées ne semblent pas avoir d'explication archéologique, notamment en zone 2.

---

<sup>36</sup> Mesures de susceptibilités magnétiques mesurées avec le Kappameter GEOFYZIKA et le MS2 BARTINGTON sur une maille de 10 x 10 cm.

## 5-1-2- Site 17 – Abbaye Marmoutier

Le site 17 est situé au nord de l'espace urbanisé ancien de Tours, sur la rive droite de la Loire. Les observations utiles à l'étude concernent le deuxième sondage archéologique, réalisé en 2005 (LORANS 2005) (Pl. 62).

Le toit des alluvions de la Loire est apparu vers 47 m NGF dans la partie sud de l'enceinte de l'abbaye de Marmoutier.

### • Observations archéologiques

En 2005, deux sondages à la pelle mécanique ont été implantés dans les terrains au sud, à partir des anomalies détectées par la géophysique. Par ailleurs, des travaux de relevés de bâtis et de coupes ont été réalisés à l'emplacement de l'église abbatiale et de la maison du Grand Prieur.

Le premier sondage a mis en évidence un chemin daté du 18<sup>e</sup> s. Le deuxième sondage a révélé stratigraphiquement (Annexe 101):

- des sables alluviaux de la Loire (toit à 47,28 m NGF) (US 2507, 2512)
- une fosse à la fonction indéterminée, comblée notamment de charbons de bois (US 2003)
- des remblais limoneux du 19<sup>e</sup> s. (US 2007, 2009).

Ces sondages n'ont pas mis en évidence une occupation antérieure au 18<sup>e</sup> s. Or l'hypothèse d'un cimetière habité à la fin du 11<sup>e</sup> s. avait été avancée (LORANS 2004). Il y a donc deux nouvelles pistes de travail à exploiter : soit les sables alluviaux recouvrent des niveaux plus anciens, soit ce secteur n'est utilisé comme jardins ou vergers qu'à partir des périodes modernes (LORANS 2005 : 26). Des carottages profonds permettraient de les vérifier.

### • Observations géotechniques (PANDA)

6 SP ont été réalisés en bord de coupe du deuxième sondage (Pl. 63, Annexe 102) ainsi qu'à l'intérieur de la fouille après l'étude archéologique (Fig. 61).

NUM SP	X	Y	Z max	Z mini
17.1	477859,23	268276,91	48,565	47,321
17.2	477860,01	268277,30	48,602	45,092
17.3	477856,75	268276,95	48,643	45,138
17.4	477860,15	268274,15	47,391	44,889
17.5	477860,34	268273,04	47,339	44,835
17.6	477861,21	268276,39	47,448	45,697

Fig. 61- Tableau des caractéristiques des 6 SP du site 17

Tous les SP ont été arrêtés volontairement car l'objectif est de travailler à partir des coupes de façon à visualiser ce que traverse le pénétromètre. Ainsi, des relevés lithologiques ont été constitués pour chacun des SP (Annexe 103).

La limite entre le dépôt anthropique (remblais) et les sables alluviaux est représentée en pointillés lorsqu'elle a été observée en coupe.

Le premier constat est que les remblais ne se distinguent pas nettement des sables alluviaux sur un signal. Ces deux formations sont hétérogènes. La fouille a révélé que le toit des alluvions suit un pendage vers le sud-est.

- *Observations géophysiques*

La parcelle concernée par le sondage n°2 a fait partie de la campagne de prospection électrique et magnétique (Annexe 104). Une anomalie électrique y a été repérée et interprétée comme une structure maçonnée. De plus, des anomalies magnétiques linéaires, pouvant correspondre à des traces de combustion, ont été localisées.

Le problème est qu'il y a eu un problème de calage en plan des anomalies géophysiques par rapport aux sondages. Il est donc difficile de les mettre en relation avec les données archéologiques.

### 5-1-3- Site 69 – Parking Anatole France

Le site 69 est localisé sur la place Anatole France, à l'emplacement du nouveau Parking Anatole France, dans la zone centrale de la ville et l'espace du front de Loire (Pl. 64).

Le site avait fait l'objet de sondages d'évaluation en novembre 2001 et mai-juin 2002 afin d'estimer l'épaisseur du dépôt archéologique (environ 5m). A partir d'août 2002, la fouille de sauvetage a été menée sur un terrain délimité par des parois moulées. L'opération a été découpée en 3 phases d'intervention mêlant décapage, fouille rapide et relevés. Enfin, il n'a pas été possible d'intervenir dans les angles à cause de la présence de butons.

L'étude des carottes géologiques révèle que le substrat crétacé, très altéré (argile blanchâtre) est situé vers environ 43 m NGF (FOUILLET *et al.* 2003 : 32) (Annexe 105). Le niveau du toit des alluvions varie de 44 à 43 m NGF du sud vers le nord.

#### • *Observations archéologiques*

L'analyse des observations archéologiques a permis de proposer un découpage chronologique en 5 périodes (FOUILLET *et al.* 2003 ; GALINIÉ dir. 2007). On retrouvera les sections principales en annexe (Annexe 106).

##### - Période 1 - L'occupation antique en bord de rive (milieu 2<sup>e</sup> s.)

Une forte concentration de matériel antique (v. 175) (céramique, ossement), mêlée aux graviers alluvionnaires (US 1033, 3033, 4022 et 5163) témoigne d'une utilisation du bord de berge en dépotoir. Le trait de rive serait donc situé au sud de l'emprise du site ; les observations géologiques confortent cette idée.

##### - Période 2 - Les aménagements médiévaux antérieurs au rempart médiéval (12<sup>e</sup>- 14<sup>e</sup> s.)

Cette période est marquée par un gain des terres sur le fleuve, par la présence de remblais. Elle correspond à des niveaux extérieurs constitués de peu de mobilier ainsi que de murs de propriétés et/ou terrasses. Des fosses ont également creusé les niveaux naturels argileux (US 5162).

Ainsi, ces éléments révèlent que cette zone de la ville est peu habitée et destinée à la culture et aux jardins jusqu'au 14<sup>e</sup> s.

- Période 3 - Les aménagements liés aux fortifications médiévales (14<sup>e</sup> – 15<sup>e</sup> s.)

La période 3 correspond à la construction de l'enceinte entre 1358 et 1368. Elle est protégée au nord par un « grand fossé » d'environ 15 m de large (F522) et un talus au nord. Le grand fossé est alimenté par les eaux de la Loire ; il reste 1,5 m de niveaux de comblement.

Un deuxième état de ce fossé défensif recréuse le premier dans le but de le curer, dans le courant du 15<sup>e</sup> s (F502). Ceci conduit à la reconstruction du talus défensif (F504). Le front de Loire est aussi réaménagé sur 11,5 m de large et un dénivelé de 4 m (F406). D'abord interprété comme un « rerefossé »<sup>37</sup>, il s'agit plutôt d'un creusement lié aux curages du rivage pour amener un courant régulier au pied de la ville.

- Période 4 - L'enceinte moderne et le port Ragueneau (15<sup>e</sup> – 16<sup>e</sup> s.)

Cette période correspond à la fin du comblement du grand fossé F502 comme dépotoir (traces de nombreux matériaux périssables) et de l'aménagement F406 : le site est remblayé en direction de la Loire.

L'enceinte est percée, au 15<sup>e</sup> s., par la porte Ragueneau qui mène vers le port Ragueneau dont il ne reste pas de trace car il a été détruit par les aménagements des 16<sup>e</sup> – 17<sup>e</sup>

A la fin du 16<sup>e</sup> s., une nouvelle enceinte est construite et la rue Ragueneau est pavée.

- Période 5 - L'abandon de l'enceinte moderne et l'aménagement des nouveaux quais (17<sup>e</sup> – 18<sup>e</sup> s.)

A la fin du 17<sup>e</sup> s., le rempart perd son caractère défensif. Les quais sont réaménagés et élargis : ces travaux engendrent des remblais massifs jusqu'à la limite actuelle. Au 18<sup>e</sup> s., le site devient la Place Royale qui constitue une entrée principale de la ville.

• *Observations géotechniques (PANDA)*

En septembre 2002, 14 SP ont été implantés le long de la section nord-sud n°2 (10 SP) et le long de la section nord-sud n°4 (3 SP) (Pl. 65) après la fouille (Fig. 62). Le SP69.03 ne sera pas exploité car la coupe s'est effondrée en cours de battage et il faudra prendre des précautions pour le SP69.05 car les tiges se sont cassées à la fin du battage.

---

<sup>37</sup> Un deuxième fossé

NUM SP	X	Y	Z max	Z mini	Type d'arrêt
69.01	475413,506	267619,446	45,74	44,08	volontaire
69.02	475413,506	267618,529	45,74	44,31	volontaire
69.03	475413,506	267617,612	45,70	45,33	technique
69.04	475413,621	267617,498	45,69	44,19	volontaire
69.05	475367,450	267599,740	49,14	45,15	refus
69.06	475366,075	267601,458	49,09	45,04	volontaire
69.07	475365,503	267603,406	49,07	44,92	volontaire
69.08	475365,273	267605,354	49,25	45,08	volontaire
69.09	475364,815	267607,416	49,35	45,10	volontaire
69.10	475364,471	267609,478	49,24	45,04	volontaire
69.11	475365,732	267612,686	47,81	44,91	volontaire
69.12	475365,273	267615,665	47,84	44,69	volontaire
69.13	475364,701	267618,758	47,91	44,91	volontaire
69.14	475364,242	267621,622	47,81	44,61	volontaire

Fig. 62 - Tableau des caractéristiques des 14 SP du site 69

Les pénétrogrammes peuvent être mis en correspondance avec le relevé archéologique de ces coupes (Annexe 107). Par ailleurs, des relevés lithologiques ont été effectués seulement pour les SP 69.01, 69.02, 69.04 à partir de la section n°2 et les SP69.05 et 69.06 (Annexe 108) car la section n°2 était trop instable.

Les SP ont traversé les niveaux de l'ensemble des périodes.

Les niveaux naturels se distinguent des niveaux anthropiques par leur résistance (entre 5 MPa et 30 MPa) et la variabilité du signal.

#### 5-1-4- Site 72 – 3 rue des Tanneurs

Le site 72 est localisé dans la partie ouest du front de la Loire à Tours (Pl. 66). Le projet de construction d'un bâtiment universitaire était limité à 3,4 mètres de profondeur mais 4 sondages à la pelle mécanique ont pu atteindre 4 mètres. Pour des raisons de sécurité (découvertes de caves), il a été impossible de faire des relevés précis dans les tranchées.

Les graviers alluvionnaires de la Loire ont été observées vers 46,2 m NGF (FOUILLET, JOLY 2004). Ils témoignent d'une sédimentation de fond de chenal et du positionnement plus au sud du trait de rive au moment de leur dépôt.

##### • *Observations archéologiques*

Le diagnostic a révélé la présence de caves, comblées seulement à la fin du 20<sup>e</sup> s., lors de la construction de l'université, pour le 1<sup>er</sup>, le 3<sup>e</sup> et le 4<sup>e</sup> sondage sur environ 3,5 m d'épaisseur (entre 50,2 et 46,7 m NGF). Le 2<sup>e</sup> sondage a mis en évidence une voie pavée, mise en place à la fin du Moyen Age (d'après les plans anciens) et qui repose sur des remblais non-datés.

L'ensemble repose sur le comblement (médiéval ?) d'une fosse ou d'un paléochenal (dépôt organiques) entre 46,7 et 46,2 m NGF.

##### • *Observations géotechniques (PANDA)*

10 SP ont été réalisés dans l'emprise du site, avant le diagnostic mais à proximité de l'emplacement des sondages n°2 et 3 (Pl. 67, Annexes 109 et 110) (Fig. 63). Puisqu'aucun relevé n'a pu être effectué, les résultats seront exploités pour l'étude de la distinction du dépôt archéologique du dépôt naturel.

NUM_SP	X	Y	Z max	Z mini	type arrêt
72.01	474998,08	267576,02	50,26	46,83	volontaire
72.02	474997,17	267580,61	50,26	46,21	volontaire
72.03	474996,14	267586,22	50,26	49,30	refus
72.04	474995,22	267591,26	50,26	46,06	volontaire
72.05	474995,22	267586,11	50,26	49,23	refus
72.06	474993,27	267585,76	50,26	48,86	refus
72.07	475012,86	267578,89	50,26	46,25	volontaire
72.08	475011,83	267584,62	50,26	47,08	refus
72.09	475010,92	267589,54	50,26	48,49	refus
72.10	475010,00	267594,13	50,26	46,16	volontaire

Fig. 63 -Tableau des caractéristiques des 10 SP du site 72

### 5-1-5- Site 77 – 36, 38, 38bis rue Mirabeau

Le site 77 est localisé dans la partie est et centrale de la ville de Tours (Pl. 68). Deux sondages à la pelle mécanique ont été réalisés dans la parcelle à bâtir et ont été limités à 3 mètres de profondeur (FOUILLET 2005). Comme pour le site 72, les archéologues n'ont pas pu accéder à l'intérieur des sondages mais il est possible de donner une estimation de l'épaisseur des niveaux archéologiques (2,7 m).

D'après les sondages géotechniques, le toit du calcaire est situé à 44 m NGF et est surmonté d'alluvions de débordement de la Loire et/ou du Cher.

#### • *Observations archéologiques*

Le premier sondage a mis en évidence une alternance entre niveaux anthropiques et naturels (Annexe 111) :

- sous 45,9 m NGF, des sables alluviaux
- entre 45,9 et 46,3 m environ, un niveau sableux brun (remblai ?)
- entre 46,3 et 46,8 m environ, des sables alluviaux
- entre 46,8 et 49,3 m environ, un niveau sableux brun (remblai des 18<sup>e</sup> -19<sup>e</sup> s.).

Le deuxième sondage est occupé par une cave moderne.

#### • *Observations géotechniques (PANDA)*

Un seul SP a été réalisé à proximité du premier sondage (Fig. 64, Pl. 69, Annexe 112). Aucun relevé n'a été fait mais les mesures seront comparées avec les observations archéologiques.

NUM SP	X	Y	Z max	Z mini
77.1	476476,8	267570,48	49,5	44,5

Fig. 64 -Tableau des caractéristiques des 10 SP du site 72

### 5-1-6- Site BAZ – 7 rue de la Bazoche

Le site BAZ est localisé sur la partie est de l'amphithéâtre antique de Tours. Comme il a été dit en partie 3-3, ce site n'a pas fait l'objet de prescriptions archéologiques (Pl. 70). Il a été toutefois mis à la disposition des archéologues pour effectuer des relevés dans les caves des habitations et d'une chapelle qui ont été fondées sur des structures constituant l'amphithéâtre (J. Seigne, B. Lefebvre – LAT).

Cela a été l'occasion de coupler la prospection géotechnique au PANDA avec la géophysique en 2003 et 2004 sur le jardin et la cour de la parcelle. D'après les plans de restitution de l'amphithéâtre, ces terrains seraient situés à la fois sur son bord interne et externe. La question est de savoir si on peut dissocier des espaces d'un point de vue mécanique et géophysique.

#### • Observations géotechniques (PANDA)

En 2003, 16 SP ont été implantés dans la zone en herbe du terrain en suivant un maillage de 3 mètres et en affinant tous les mètres si besoin (Pl. 71, Annexe 113) (Fig. 65). En 2004, 10 SP ont été exécutés à l'est du jardin, en relation avec la zone prospectée avec la géophysique. Au total, 15 SP ont été arrêtés par refus et 11 volontairement.

NUM SP	X	Y	Z maxi	Z mini	date	Type d'arrêt
BAZ.1	476239,50	267517,66	53,35	49,37	28/06/03	volontaire
BAZ.2	476242,52	267518,05	53,53	49,80	28/06/03	volontaire
BAZ.3	476245,37	267518,53	53,47	52,49	28/06/03	refus
BAZ.4	476244,39	267518,34	53,50	50,69	28/06/03	volontaire
BAZ.5	476246,34	267518,79	53,46	51,69	28/06/03	refus
BAZ.6	476247,35	267518,94	53,44	50,30	28/06/03	volontaire
BAZ.7	476248,28	267519,00	53,44	52,62	28/06/03	refus
BAZ.8	476249,37	267517,88	53,45	50,80	05/07/03	refus
BAZ.9	476250,41	267517,88	53,44	47,71	05/07/03	refus
BAZ.10	476253,24	267519,72	53,34	46,69	05/07/03	volontaire
BAZ.11	476245,80	267519,57	53,44	50,43	05/07/03	volontaire
BAZ.12	476245,72	267520,75	53,41	50,46	23/08/03	volontaire
BAZ.13	476245,20	267519,74	53,49	52,38	23/08/03	refus
BAZ.14	476246,22	267519,80	53,48	50,47	23/08/03	volontaire
BAZ.15	476245,42	267517,74	53,52	51,90	23/08/03	refus
BAZ.16	476244,82	267521,68	53,33	51,30	23/08/03	refus
BAZ.19	476272,15	267519,63	53,31	49,87	17/09/04	refus
BAZ.20	476268,14	267519,76	53,37	52,43	17/09/04	refus
BAZ.21	476264,16	267519,89	53,44	51,69	17/09/04	refus
BAZ.22	476260,14	267519,98	53,49	50,25	17/09/04	refus
BAZ.23	476256,54	267520,21	53,54	50,16	17/09/04	refus
BAZ.24	476271,98	267521,86	53,16	49,16	17/09/04	volontaire
BAZ.25	476268,18	267522,01	53,20	50,48	17/09/04	refus
BAZ.26	476264,20	267522,10	53,17	49,17	17/09/04	volontaire
BAZ.27	476272,30	267523,70	53,07	48,96	17/09/04	volontaire
BAZ.28	476268,34	267524,16	53,01	49,63	17/09/04	refus

Fig. 65 - Tableau des caractéristiques des 26 SP du site BAZ

- *Observations géophysiques*

La prospection géophysique a été menée par A. Kermorvan (UMR 5189 / HISOMA, Antenne de Tours) le 29 avril 2004 pour la méthode électrique et le 19 mai 2004 pour la méthode électro-magnétique.

La méthode de résistivité électrique a été réalisée selon une maille de 2,25 m (Annexe 114). Elle révèle des niveaux plus conducteurs dans la partie est de la zone étudiée suivant un axe sud-ouest / nord-est.

La méthode de résistivité électro-magnétique, selon une maille de 1 mètre, révèle des anomalies dans la partie ouest et à l'est du terrain (Annexe 115). Il est difficile d'interpréter ces résultats puisque le sol actuel est hétérogène (pavés à l'ouest et cour gravillonneuse à l'est).

### 5-1-7- Site 5MA - Cinq-Mars-La-Pile (37)

Le site 5MA est situé dans commune de Cinq-Mars-La-Pile (37) à l'emplacement de la pile (funéraire ?) antique (Pl. 72). La fouille de sauvetage programmée a été réalisée à l'occasion d'un projet de valorisation touristique du site. Cela a été donc l'occasion de déterminer la fonction et la datation de la pile ainsi que de bâtiments monumentaux à partir de sondages archéologiques (MAROT, MARLET 2005). La pile est située sur la terrasse « basse », au devant de la terrasse « haute ». Les observations des géologues révèlent que le terrain originel était bien en pente avec un micro-relief, propice à l'installation de la pile et des bâtiments annexes (substrat calcaire et argiles à silex).

#### • *Observations archéologiques*

Les vestiges les plus anciens sont antiques (Annexe 116). Lors d'une phase de terrassement du site, le substrat rocheux a été mis à nu et des murs de soutènement ont été construits pour consolider la terrasse haute (vers seconde moitié du 2<sup>e</sup> s. / début 3<sup>e</sup> s. ?) et faciliter la construction d'une structure sur podium (structure 2). Cette structure est comblée de remblais de craie blanche pulvérulente, issue de la taille du coteau et d'un niveau limono-argileux jaunâtre. Sur ce podium est fondé un édifice semi-excavé (structure 3) auquel il est difficile d'attribuer une fonction. Ces structures sont ensuite détruites et érodées à une date inconnue.

Le site continue à être pillé et est certainement aménagé en zone agricole dès le Haut Moyen Age et le sud de la terrasse basse devient une carrière au 19<sup>e</sup> s.

#### • *Observations géotechniques (PANDA)*

Durant la fouille, 9 SP ont été réalisés en juillet selon un pas de 3 mètres (Fig. 66, Pl. 73). Ils ont tous été arrêtés par un refus.

Deux SP ont été faits en bord d'un sondage afin de visualiser ce que traverse le pénétromètre (coin sud-ouest de la structure 2). Sept autres ont été effectués dans la fouille du nord vers le sud, le long des sections 5 et 11, dans l'alignement des deux premiers, afin de voir si on observe les mêmes propriétés mécaniques (Annexes 117 et 118). Toutefois, il est difficile d'extrapoler des observations sur ce site qui a un relief très marqué.

NUM SP	X	Y	Z maxi	Z mini	position
5MA.1	459618,54	263265,73	64,34	61,49	En bord de coupe
5MA.2	459612,42	263278,93	67,82	65,81	Dans la fouille
5MA.3	459613,30	263276,24	67,07	66,64	Dans la fouille
5MA.4	459613,13	263276,84	67,14	66,18	Dans la fouille
5MA.5	459614,93	263273,61	66,59	66,12	Dans la fouille
5MA.6	459615,53	263272,82	66,27	65,16	Dans la fouille
5MA.7	459616,87	263270,93	65,76	65,21	Dans la fouille
5MA.8	459617,10	263271,23	65,73	64,64	Dans la fouille
5MA.9	459617,56	263267,70	65,02	64,16	En bord de coupe

Fig. 66 - Tableau des caractéristiques des 9 SP du site 5MA

Les SP 5MA.9 et 5MA.1 ont donc été implantés en bord de coupe pour faire un relevé lithologique (Annexe 119). Le sondage n°9 s'est arrêté dans le substrat l'US 2003 (argile à silex). Ici, l'US 2003 est comprise entre 64,85 NGF et 64,16 NGF.

Le SP 5MA.1, a traversé les remblais liés à la construction du mur M02 et a atteint le substrat rocheux (tuffeau) à partir de la cote 62,15. Le refus a donc été occasionné dans cette formation.

D'après les observations de terrain, les niveaux traversés par les SP 5MA.2, 5MA.4, 5MA.3, 5MA.5, 5MA.6, 5MA.8 et 5MA.7 sont des formations géologiques. Le niveau supérieur dont on ne connaît pas l'épaisseur correspond à l'US 2003, de la marne calcaire et argile à silex avec perrons. Le niveau inférieur qui a été vu plus au sud des sondages, est l'US 2048, du tuffeau friable (le substrat rocheux). Il est difficile d'estimer l'épaisseur de ces deux formations car la pente vers le sud est importante, il faut donc tenir compte des effets d'érosion et de colluvionnement.

On ne sait pas alors si les sondages réalisés dans la fouille ont atteint le tuffeau (voir pénétrogrammes). De plus, l'US 2003 contient beaucoup de pierres de silex qui augmentent la probabilité de provoquer des refus. Les signaux présentent de fortes valeurs de résistance et la variabilité est importante.

Au nord du dernier sondage à la pelle mécanique, le tuffeau atteint 65 m NGF. Le SP 5MA.8 est situé à proximité. On peut alors poser l'hypothèse que le PANDA a traversé le tuffeau au moins à partir de 65 m NGF.

## 5-1-8- Site L1015 – Rue Mgr Lavarenne

Le site de Mgr Lavarenne et de l'avenue Adolphe Max est localisé sur les berges de la Saône dans le centre de la ville de Lyon (5<sup>e</sup> arrondissement) au sud de la cathédrale St-Jean (Pl. 74).

Il est situé « entre l'ancien lit de la Saône dont le tracé est localisé au pied de la colline de Fourvière, et le cours de la nouvelle Saône plus à l'est. Ces deux bras délimitent alors l'île Saint-Jean. Dans sa partie sud, le site se trouve également, dès la fin du II<sup>e</sup> siècle ou le début du I<sup>er</sup> siècle av. J.-C., à proximité de l'ancienne confluence entre la Saône et le Rhône dont la localisation a pu être confirmée à l'occasion des fouilles de la place Benoît Crépu. » (BERNOT *et al.* 2006: 163)

L'opération de sauvetage fait suite à la fouille du parking Saint-Georges (place Benoît Crépu) qui s'est déroulée entre 2000 et 2004 (INRAP) (AYALA 2005). Un diagnostic avait été réalisé en 2002 dans la rue Mgr Lavarenne (AYALA *et al.* 2003). Ces observations couplées à celles obtenues sur les sites voisins (av. Adolphe Max, îlot Clément V, place Benoît Crépu, rue Tramassac) (ARLAUD 1994, MONNOYEUR-ROUSSEL *et al.* 1992, VILLEDIEU 1990) ont permis d'estimer un potentiel archéologique couvrant les périodes historiques sur environ 4 m d'épaisseur (BERNOT *et al.* 2006 : 14-15).

L'emprise s'étend sur une longueur de 150 m sur environ 4,5 m de large. La profondeur d'investigation était limitée par les contraintes d'aménagement : elle varie entre 5,5 m au sud et 0,4 m à l'extrémité nord. D'autre part, de nombreuses contraintes techniques (parois moulées, butons) ont perturbé l'accès de la pelle mécanique mais aussi les relevés de certaines coupes. La fouille a été réalisée lors de 3 phases d'environ 2 mois chacune, du sud vers le nord.

### • *Observations géomorphologiques*

Des sondages géotechniques ont été effectués préalablement au chantier de construction du Parking (VÉROT-BOURRÉLY 2001) afin de compléter les informations obtenues lors des sondages archéologiques sur la place Benoît Crépu (AYALA *et al.* 1998)<sup>38</sup>. Notons que la place est située dans une zone de confluence de la Saône et du Rhône avant notre ère. Ensuite les cours d'eau se déplaçant vers l'est, la Saône s'est ouvert un nouveau lit au cours de l'époque gallo-romaine (quasiment identique au tracé actuel) : la place est probablement située à la confluence de la Saône primitive et de la nouvelle Saône, juste au sud de l'île « caillouteuse » de Saint-Jean. Enfin, l'ancien bras de la Saône se comble d'abord naturellement puis s'accélère par l'influence anthropique durant les 1<sup>er</sup> -3<sup>e</sup> siècles ap. JC (VÉROT-BOURRÉLY 2001 : 7). Malgré les

---

<sup>38</sup> Le site L1015 (rampe d'accès du Parking) est donc situé au nord de la place Crépu

remblaiements, la zone étudiée est alors sujette à des inondations et à des crues jusqu'à la fin de la période moderne.

9 sondages carottés (diamètre de 10 cm) ont été implantés sur une profondeur d'au moins 10 m (Annexe 120). Le rapport présente chacun des sondages sous forme de logs ainsi que des coupes restituées à partir de ces derniers.

L'étude de ces sondages carottés sur la place Benoît Crépu montre, de bas en haut (VÉROT-BOURRELY 2001 : 10, 36) :

- la présence de sédiments du socle (arène granitique) fossilisant le substrat granito-gneissique (anatexite) et peut-être colluvions depuis le versant oriental du plateau de Fourvière (cote minimale observée à 136,2 m NGF)

- des « alluvions stériles » mises en place essentiellement par la Saône (cote minimale observée entre 148,75 et 153,9 m NGF selon les sondages)

- des « alluvions sous influence anthropique » correspondant à une occupation et/ou fréquentation du site sous influence alluviale (cote minimale entre 153,7 et 160 m NGF)

- des niveaux anthropiques (cote minimale entre 156,5 et 163,2 m NGF).

Le dépôt archéologique varie entre 6 à 14 m d'ouest en est (vers les berges de la Saône actuelle).

Par ailleurs, une analyse géomorphologique a été réalisée durant la fouille du site de Lavarenne par Stéphane Gaillot (LRGE, Université Lyon 2). Des prélèvements pour analyse granulométrique ainsi que des relevés et photos ont été effectués sur 7 coupes stratigraphiques et 3 carottes à la tarière (Annexe 121). Les observations permettent de caractériser les niveaux naturels et anthropiques. On peut alors restituer la formation stratigraphique du site, successivement (GAILLOT 2006 : 33) :

- un banc de galets, « caractéristique de la charge de fond d'un cours d'eau, dont le sommet atteint 161,5 à 162 m NGF au sud (phase 1), 163 m au nord (phase 2), qui témoigne de la confluence de la Saône et du Rhône au Premier Age du Fer »

- des sédiments fins mis en place depuis la Saône (entre 1 et 1,5 m d'épaisseur) qui témoignent de « la transformation du milieu, devenant terrestre, de plaine alluviale » et « de la baisse d'influence du Rhône ». On peut y distinguer deux dépôts successifs : d'abord, des dépôts à pendage orientés vers l'ouest (influence de la Saône primitive) et datés des 5<sup>e</sup>. av. JC -1<sup>er</sup> ap JC, et ensuite, des dépôts moins épais à pendage nul ou vers l'est (mise en place de la Saône nouvelle) et datés des 1<sup>er</sup>- 3<sup>e</sup> ap JC.

- des « remblais, dominants et des lentilles de « sables » significatives de débordement de la Saône nouvelle (cf. pendages nets vers l'est) » à environ 163,5 m à partir des 10<sup>e</sup>-12<sup>e</sup> s.

### • *Observations archéologiques*

Les coupes de références sont en annexe (Annexe 122).

Le niveau naturel (alluvions fines (sable, argile) sur alluvions grossières (galets)) a été atteint durant les 2 premières phases. Le toit du banc de galets « caractéristique de la charge de fond du cours d'eau » est à environ 162 m NGF (BERNOT *et al.* 2006 : 12). Des niveaux d'alluvions anthropisées (dépotoir en bord de Saône) ont été également mis au jour.

Peu de vestiges antiques ont été découverts. Néanmoins, il a été mis en évidence une fréquentation du site dès le 1<sup>er</sup> siècle ap. JC. Des traces d'occupations durables apparaissent à la fin du 1<sup>er</sup> s. – début 2<sup>e</sup> s. Au cours du 3<sup>e</sup> s., on observe une distinction entre le sud du site, constructions en matériaux périssables sujettes à des crues de la Saône, et le nord du site où l'occupation se densifie. Des indices d'urbanisation (niveau de circulation, égouts) confortent les observations faites sur les sites avoisinants. Au 4<sup>e</sup> s., le site est recouvert de remblais, de niveaux de démolition et de dépotoir (activité de pelleterie). Les constructions ainsi que l'égout sont abandonnés durant cette période. Enfin, deux ensembles bâtis dans la partie méridionale ont été fouillés mais difficilement datés.

Il n'y a pas de trace d'occupation du haut Moyen Age (5<sup>e</sup> - 10<sup>e</sup> siècles) que les archéologues interprètent comme un abandon du site ou bien comme le résultat de destructions postérieures (BERNOT *et al.* 2006 : 166).

Aux 10<sup>e</sup> - 11<sup>e</sup> s., l'occupation reprend (BERNOT *et al.* 2006 : 166) :

- dans la partie méridionale, des traces de fréquentation régulière ainsi que des constructions en matériaux légers
- des rehaussements successifs des berges du fleuve (env. 2m), intercalés avec des empierrements mais aussi des niveaux de crues
- des niveaux de « Terres Noires » au nord des berges correspondant à des remblais avec la présence de fosses et un fossé nord-sud.
- des niveaux de circulation (cailloutis) dans la partie nord
- une zone funéraire à mettre en relation avec l'ancienne nécropole de l'église St-Pierre-le-Vieux (à l'ouest de la fouille) et la construction du mur de clôture.

Au 12<sup>e</sup> s., des remblais d'aménagement – nivellement ont été fouillés sur l'ensemble du site : « Ces rehaussements témoignent encore une fois de la volonté constante de se protéger des caprices de la Saône ». On a découvert aussi :

- des niveaux de circulation attribuables à l'ancien tracé de la rue Mgr Lavarenne ou, au moins, au tracé rectifié de cette rue

- la rue Talaru (aujourd'hui disparue), perpendiculaire à la rue Lavarenne et longeant l'église Saint-Pierre-le-Vieux au sud

- un bâtiment à l'intersection des deux rues

- un bâtiment à l'extrémité nord du site, abandonné à la fin du 12<sup>e</sup> s.

Le 13<sup>e</sup> s. est marqué par la construction d'une enceinte canoniale autour du groupe épiscopal. Sur le site, le rempart sud de l'enceinte a été fouillé. L'extérieur de l'enceinte est caractérisé par des niveaux de rue régulièrement rehaussés et entretenus (BERNOT *et al.* 2006: 168). La trame urbaine du 13<sup>e</sup> s. fixera le parcellaire au moins jusqu'au 19<sup>e</sup> s.

« Durant la fin du Moyen Age et au début de l'époque moderne, l'occupation perdue dans les maisons héritées du 13<sup>e</sup> s » (BERNOT *et al.* 2006 : 169). Les anciens plans montrent que la rue Mgr Lavarenne est conservée jusqu'au 18<sup>e</sup> s. ; toutefois, aucun niveau de rue des 15<sup>e</sup>-16<sup>e</sup> s. n'a été reconnu sur le site.

L'enceinte canoniale est abandonnée et détruite dès la fin du 16<sup>e</sup> s. et au 17<sup>e</sup> s. La fouille n'a pas permis de découvrir ces niveaux de destructions car ils ont été enlevés lors de travaux de voirie postérieurs. Cependant, des immeubles construits au 16<sup>e</sup>-17<sup>e</sup> s. le long du bord ouest de la rue ont été étudiés (BERNOT *et al.* 2006: 172-173).

A la fin du 18<sup>e</sup> ou au début du 19<sup>e</sup> s., les rues et les immeubles sont réaménagés. Dans la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> s., des travaux de nivellement, d'assainissement et d'alignement des rues sont réalisés dans le cadre de la restructuration des abords de la cathédrale Saint-Jean.

#### • *Observations géotechniques (PANDA)*

Le site de Lavarenne a été mis à disposition durant les 3 phases successives de fouilles pour réaliser des SP (PANDA) pour compléter le référentiel archéologico-mécanique et pour évaluer le potentiel informatif du site. L'étude a été couplée à la réalisation d'essais au géoendoscope avec la collaboration de Pierre Breul (LERMES/CUST – Université Clermont-Ferrand).

La réalisation des SP et essais au géoendoscope a été conditionnée par les contraintes techniques de l'opération. D'autre part, nous avons tenté de les implanter dans des zones

susceptibles d'être fouillées et relevées (en bord de coupe ou au préalable de la fouille) (Pl. 75, Annexe 123). Ainsi, 41 SP et 32 essais géoendoscopiques ont été effectués durant les 3 phases (

Fig. 67, Annexe 124). Certains ont occasionné des refus (entre 20 cm et 4,15 m de profondeur). Comme l'a constaté P. Breul (BREUL 2005), les valeurs de résistance du dépôt archéologique sont très variables et certains niveaux présentent une variabilité interne plus importante que celle des niveaux naturels.

Il n'a été possible de faire que 2 relevés lithologiques car peu de coupes étaient disponibles (SP L1015.1 et L1015.197) (Annexe 125). Toutefois, les relevés présentés dans le rapport pourront être utilisés comme référence pour confronter les pénétrogrammes aux données de terrain.

NUM SP	X	Y	Z maxi	Z mini	Type arrêt
L1015.1	793713,89	87352,96	162,91	161,88	volontaire
L1015.41	793717,27	87363,23	164,62	163,50	refus
L1015.42	793718,59	87362,44	164,96	162,18	volontaire
L1015.43	793719,02	87362,23	164,87	161,78	volontaire
L1015.44	793717,25	87363,63	164,61	163,31	refus
L1015.45	793717,11	87363,90	164,62	162,41	refus
L1015.51	793718,35	87366,95	165,04	162,26	refus
L1015.53	793720,60	87365,66	164,94	164,69	refus
L1015.54	793720,70	87366,20	165,00	164,02	refus
L1015.55	793720,77	87365,98	165,00	164,83	refus
L1015.56	793720,55	87365,55	164,94	164,78	refus
L1015.61	793720,67	87370,18	165,10	164,95	refus
L1015.62	793720,25	87369,81	164,34	164,08	refus
L1015.63	793719,54	87369,79	164,26	162,08	volontaire
L1015.64	793721,44	87369,27	165,05	163,38	refus
L1015.65	793720,28	87369,52	164,24	163,86	refus
L1015.66	793720,29	87369,32	164,17	163,85	refus
L1015.67	793719,27	87368,49	164,22	162,17	volontaire
L1015.122	793725,12	87390,52	165,08	160,93	volontaire
L1015.133	793726,88	87393,91	163,61	162,55	volontaire
L1015.140	793728,94	87399,85	163,60	160,53	volontaire
L1015.158	793729,59	87401,85	163,56	160,36	volontaire
L1015.159	793730,28	87403,94	163,54	162,54	volontaire
L1015.191	793734,25	87415,05	165,60	165,41	refus
L1015.192	793734,00	87413,87	165,60	163,82	refus
L1015.193	793734,23	87414,85	165,63	162,96	volontaire
L1015.194	793733,66	87413,14	165,61	165,32	refus
L1015.195	793733,65	87413,04	165,61	162,60	refus
L1015.196	793738,35	87414,42	165,86	164,00	refus
L1015.197	793734,98	87409,00	165,56	160,56	volontaire
L1015.211	793738,98	87425,41	164,49	160,37	volontaire
L1015.212	793739,24	87426,25	164,49	163,84	refus
L1015.213	793739,29	87426,66	164,49	164,00	refus
L1015.214	793739,15	87426,00	164,49	163,50	refus
L1015.215	793742,00	87425,44	164,68	162,61	refus
L1015.221	793741,74	87428,14	165,81	162,84	volontaire
L1015.231	793742,64	87432,94	165,87	163,43	volontaire
L1015.232	793743,26	87434,54	165,96	165,78	refus
L1015.233	793743,86	87434,58	165,93	165,72	refus
L1015.251	793747,29	87442,42	167,63	165,20	refus
L1015.252	793749,33	87441,12	166,50	165,74	refus

Fig. 67 - Tableau des caractéristiques des 41 SP du site L1015

- *Observations au géoendoscope*

L'objectif était de tester le couplage des techniques dans un contexte archéologique et de compléter le référentiel que met en place P. Breul (BREUL 2005).

Pour chacun des SP étudiés, une confrontation des données de terrain avec les observations issues de l'analyse géoendoscopique a été faite à partir de schéma récapitulatif et du tableau de synthèse des essais. L'exemple du SPL1015.1 est présenté en annexe (Annexe 126) et les confrontations des autres SP sont dans le CD-Rom.

Plusieurs remarques peuvent être faites :

- pour les SP n° L1015.42, L1015.43, L1015.42, L1015.64 et L1015.67, la cote estimée du toit du niveau naturel par la caractérisation géoendoscopique est supérieure à celle observée sur le terrain. Ceci semble être dû à des problèmes liés à la qualité des images ou alors, à une absence d'indices anthropiques sur l'image ;

- pour les essais des deux dernières phases d'intervention, nous avons pas ou peu d'informations archéologiques qui permettent de critiquer objectivement les observations. Néanmoins, les résultats de l'analyse géomorphologique permettent de les valider ;

- la présence de la nappe permet, au détriment de la qualité de l'image, de poser des hypothèses sur la présence des galets alluviaux.

On peut alors réaliser un plan récapitulatif des cotes du toit du niveau naturel ainsi que le toit du niveau des alluvions grossières (Pl. 76).

## Site L040 – 28 rue Chapeau Rouge

Le site, situé au 28 rue Chapeau Rouge, à Vaise, a fait l'objet d'un diagnostic en 2004 (MONIN, LASCOUX 2005) à l'occasion d'un projet de réfection d'une cour de récréation et de l'extension d'un bâtiment scolaire (Pl. 77). Il est localisé à proximité immédiate de la voie romaine de l'Océan et d'une carrière d'extraction de gneiss antique (site du 47 rue Chapeau Rouge) sous-jacente à un ensemble funéraire et un atelier de potiers. Cet ensemble funéraire s'étend après l'abandon de l'atelier à la fin du 1<sup>er</sup> s. et perdure jusqu'au 7<sup>e</sup> s.

### • *Observations archéologiques*

4 sondages à la pelle mécanique ont été réalisés sur le site, dont un dans la cour basse. Les trois de la cour haute qui présente une topographie fortement marquée (7,8°), de l'est vers l'ouest. Stratigraphiquement, il a été observé (MONIN, LASCOUX 2005 : 3) (Annexe 127) :

- une couche d'éclats de gneiss liée à l'abandon d'une carrière d'extraction antique
- des couches sablo-limoneuses mêlées à des galets gallo-romains liées à une phase d'érosion du site
- 3 sépultures du Haut Moyen Age et un remblai qui les scelle
- des couches liés à l'aménagement de la cour d'école
- des fosses de plantation et/ou d'arrachage d'arbres contemporains.

### • *Observations géotechniques (PANDA)*

5 SP ont été exécutés dans la cour haute avant l'ouverture des sondages (Fig. 68, Pl. 78, Annexes 128) selon une maille de 5 mètres. Ils ont été réalisés avec beaucoup de difficulté, tant le sous-sol était compact (galets), ce qui a occasionné des frottements importants. Par ailleurs, ils ne sont pas situés directement au bord de coupe et aucun relevé lithologique n'a été effectué.

Les observations issues du pénétromètre seront confrontées avec les données stratigraphiques, au moins pour l'étude de la mesure du dépôt archéologique.

NUM_SP	X	Y	Z max	Z mini
L040.1	792254,27	88661,51	184	180,54
L040.2	792249,46	88662,54	183,15	179,64
L040.3	792244,30	88663,69	182,6	180,09
L040.4	792239,49	88664,83	182,1	178,10
L040.5	792245,68	88668,84	182,6	179,15

Fig. 68 - Tableau des caractéristiques des 5 SP du site L040

### 5-1-9- Site L105 – 10,12 rue Joliot Curie

Le site L105 est situé dans une parcelle du quartier du Point du Jour, sur les hauteurs de la colline de Fouvière à Lyon aux alentours de 275 m NGF (Pl. 79). Dans ce quartier, des vestiges antiques ont été découverts et concernent notamment les aqueducs de la Brévenne et de l'Yseron. Par ailleurs, des structures funéraires (incinérations et inhumations) des 1<sup>er</sup> - 3<sup>e</sup> s. ont été mises au jour aux abords de la voie d'Aquitaine qui pourrait correspondre, entre autres à la rue Joliot Curie. Toutefois, cette voie n'a pas été reconnue dans ce quartier. Les périodes suivantes sont peu renseignées et l'occupation semble être celle d'une zone rurale jusqu'à récemment.

3 sondages à la pelle mécanique ont été réalisés en février 2004 sur une profondeur d'environ 1 mètre. Le toit du niveau naturel est situé vers 273,4 m NGF (BERNOT 2004a).

#### • Observations archéologiques

Le sondage n°1 est situé dans la partie extérieure et intérieure d'un bâtiment contemporain. A l'extérieur, 35 cm de remblais des 18<sup>e</sup> - 19<sup>e</sup> s reposent sur le niveau naturel. A l'intérieur, on a observé 75 cm de remblais liés à la construction de l'habitat, situés directement sur les alluvions du villafranchien.

Les sondages n°2 et 3 ont livrés les mêmes informations :

- entre 20 et 40 cm de remblais datés des 18<sup>e</sup> - 20 e s.
- entre 20 et 60 cm d'alluvions gravelo-argileuse
- un niveau d'alluvion fluviatiles du Villafranchien (gros galets de quartzite et argile)

(cote altimétrique du toit vers 272,4 m NGF)

#### • Observations géotechniques (PANDA)

En avril 2004, 5 SP ont été implantés en bord de coupe des sondages dont 3 pour le sondage n°2 et 2 pour le sondage n°1, après l'intervention des archéologues (Fig. 69, Pl. 80, Annexe 129). Des descriptions lithologiques ont été relevées pour les 5 SP (Annexe 130). Les SP pourront donc être exploités pour le référentiel archéologico-mécanique produit pour la ville de Lyon.

Num SP	X	Y	Z maxi	Z mini	Type arrêt
L105.1	791303,94	87009,33	272,25	270,86	refus
L105.2	791304,97	87003,72	272,95	272,58	volontaire
L105.3	791304,97	87004,06	272,95	272,25	refus
L105.4	791311,27	87030,30	273,84	272,81	refus
L105.5	791312,18	87025,94	273,80	273,14	refus

Fig. 69 - Tableau des caractéristiques des 5 SP du site L105

## 5-1-10- Site L025 – 25 rue Joliot Curie

Le site L025 est situé dans la même rue que le site L105. Il s'agit d'une cour et d'un jardin qui doit être bâti (Pl. 81).

En juin 2004, 3 sondages archéologiques ont été implantés, 2 dans le jardin (n°1 et 2) et le dernier ans la cour (n°3). Des dépôts éoliens sont apparus à la cote d'environ 271,6 m NGF et le toit des alluvions fluviatiles villafranchiennes est situé vers 271 m NGF (BERNOT 2004b).

### • Observations archéologiques

Les deux premiers sondages ont révélé de haut en bas (Annexe 131) :

- entre 0,2 et 0,3 m de terre végétale
- entre 0,15 et 0,4 m de limons perturbés (labours) et des remblais des 19<sup>e</sup> -20<sup>e</sup> s.
- jusqu'à 0,9 m de limons jaunes (dépôt éoliens)
- des galets de quartzite mêlés à de l'argile ocre (alluvions Villafranchien)

Le troisième sondage a montré une succession de remblais liés à la construction de la cour sur 30 cm reposant sur une couche de limons jaunes (dépôts éoliens) qui pouvaient atteindre jusqu'à 80 cm d'épaisseur. Ces dépôts éoliens sont disposés sur les alluvions du Villafranchien.

### • Observations géotechniques (PANDA)

Lors de l'intervention archéologique, 2 SP ont été exécutés le long de la section du sondage n°1 et 1 autre SP au bord de coupe du sondage n°3 (Fig. 70, Pl. 82, Annexe 132). Des relevés lithologiques ont aussi été réalisés pour les 3 SP (Annexe 133).

Num SP	X	Y	Z maxi	Z mini	Type arrêt
L025.1	791200,25	86960,53	272,45	271,33	volontaire
L025.2	791197,62	86965,57	272,36	271,31	volontaire
L025.3	791189,37	86984,93	271,95	271,05	refus

Fig. 70 - Tableau des caractéristiques des 3 SP du site L025

Comme pour le site L105, les SP seront utilisés pour le référentiel archéologico-mécanique de Lyon.

### 5-1-11- Site LTRI – 4 bis, 6 rue des Fossés de Trion

Le site LTRI est situé à proximité du quartier du Point du Jour, dans le quartier de Trion (Pl. 83). Le terrain est localisé au cœur d'une nécropole antique dont les vestiges sont régulièrement mis au jour sur les sites voisins (BERNOT, BECKER 2003 : 4) et à proximité de zones artisanales antiques. Durant le Moyen Age, le quartier garde sa vocation funéraire et se dote d'une enceinte, dont la rue des Fossés de Trion constitue le fossé occidental. A l'époque moderne, le quartier est faiblement urbanisé.

3 sondages à la pelle mécanique ont été effectués en Mars 2003 dans le cadre du projet de construction d'un centre social de la Ville de Lyon. Le toit du niveau naturel (loess) a été découvert à 260,5 m NGF.

#### • *Observations archéologiques*

Les trois sondages ont mis en évidence des remaniements du sous-sol (entre 2 et 3 m d'épaisseur) pour les périodes modernes et contemporaines. Ainsi, aucun vestige antique ou médiéval n'a été mis au jour. Le sondage n°3 a seulement révélé une maçonnerie (US 30), orientée nord-sud, dont il est difficile de donner une datation.

#### • *Observations géotechniques (PANDA)*

En juin 2004, 5 SP ont été implantés à proximité du sondage n°3 qui avait été rebouché. L'objectif était de repérer la maçonnerie (US 30) dont l'arase est situé vers 263 m NGF, et d'en connaître l'étendue (Fig. 71, Pl. 84, Annexe 134). Les pénétrogrammes montrent des refus à différentes altitudes et seul le SP LTRI.3 semble indiquer la présence du mur. Toutefois, on peut envisager différents niveaux d'arase du mur.

Num SP	X	Y	Z maxi	Z mini	Type arrêt
LTRI.1	792621,58	87162,97	263,9	262,59	refus
LTRI.2	792621,23	87161,02	263,9	262,71	refus
LTRI.5	792620,66	87158,84	263,9	261,86	volontaire
LTRI.3	792622,38	87167,44	263,9	262,95	refus
LTRI.4	792622,15	87167,44	263,9	262,37	refus

Fig. 71 - Tableau des caractéristiques des 5 SP du site LTRI

### 5-1-12- Site STO - Stolpie en Pologne

Le site STO est localisé à Stolpie près de Chelm, capitale de la Russie de l'ouest au Moyen Age (Pl. 20). Ce site est caractérisé par la présence d'une tour carrée « byzantine », antérieure à la fondation de Chelm, ainsi qu'une enceinte quadrangulaire de 20 mètres de côté.

Il a été étudié en 2004 dans le cadre de recherches menées par des archéologues et des géophysiciens sur le couplage de méthodes de prospection (ACI TTT Dynamique des paysages<sup>39</sup>). En avril 2004, les archéologues (dir. A. Buko et E. Zadora-Rio) ont réalisé une prospection pédestre de parcelles à proximité d'un site fortifié. Un carroyage de 30 x 30 mètres a alors été implanté (Pl. 85).

En Aout 2004, le site fortifié a été fouillé par l'équipe universitaire polonaise de Varsovie sous la direction d'A. Buko. Dans le même temps, les géophysiciens de l'Université de Paris 6 (A. Tabbagh et J. Thiesson) ont effectué une prospection géophysique (magnétique) en suivant la maille de 30 x 30 m. Toutefois, il faut noter qu'il a été implanté avec une erreur d'orientation depuis l'origine en Août (angle d'environ 8° vers le sud). Le point d'origine (x=0, y=0) a été situé au coin des carrés 128, 132, 125 et 133 ; l'axe des x étant dirigé vers l'ouest et l'axe des y vers le sud (Annexe 135).

Par ailleurs, on observe une pente de l'est vers l'ouest d'environ 1,6° sur ces parcelles. La dénivellation n'est pas régulière.

Ce programme a donc été l'occasion de réaliser des sondages au pénétromètre dans l'objectif de les coupler aux résultats géophysiques mais aussi celui de réfléchir sur le choix de la maille d'analyse.

#### • *Observations géotechniques (PANDA)*

Suivant les conditions d'étude, 18 SP ont été réalisés sur la surface prospectée (LAURENT 2007 (sous presse)) (Fig. 72, Pl. 86). Le SP STO.5 est situé sur l'origine.

Du nord vers le sud, des numéros de transects ont été attribués pour les axes du carroyage afin de faciliter l'étude:

- le transect 1 correspond à l'axe  $x = -30$
- le transect 2 correspond à l'axe  $x = 0$
- le transect 2 correspond à l'axe  $x = 30$

---

<sup>39</sup> Le programme de l'ACI Théorie, Terrain, Technique – Dynamique des paysages a été développé de 2002 à 2005. Il s'agit de restituer les dynamiques des paysages et des habitats dans la longue durée dans différents pays d'Europe (France, Angleterre, Belgique, Pologne) d'un point de vue historique et méthodologique (évaluation du potentiel archéologique). Ceci a nécessité la définition de descripteurs communs pour rendre comparables les observations de terrain.

Les SP implantés sur les transects 2 et 3 sont espacés de 30 m ; les forages situés sur le transect 3 sont espacés de 10 m . Ces derniers ont été réalisés après l'observation d'une anomalie détectée par prospection magnétique.

Des premières observations peuvent être faites sur l'allure générale des pénétrogrammes (Annexe 136) en suivant ces critères :

- la comparaison entre les sondages est réalisée suivant leur transect associé. Elle se fait donc d'ouest en est ;

- la nature de terrain en surface est mentionnée afin de voir si un type de culture produit un sol particulier (sur les 30 premiers centimètres) ;

- il est intéressant de mentionner si un SP a été arrêté volontairement ou bien si l'arrêt est dû à un refus. Il y a refus lorsque les tiges se bloquent au cours du sondage et, en principe, les valeurs de résistance sont élevées. Il s'agit ensuite de tenter de caractériser ce qui a occasionné ce type d'arrêt (pierre, niveaux naturels très compacts) ;

- enfin, sans pousser très loin l'analyse des signaux, il est possible de distinguer des zones homogènes (zones avec peu de variations de résistance).

Transect	N° SP (sondage pénétrométrique)	Nature du terrain	Type d'arrêt	Description des pénétrogrammes
1	STO.16	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	-Les signaux ont la même allure jusqu'à 1 m. -Entre 1 et 1,5 m, ils sont différents. Le n° 15 (situé à l'emplacement de l'anomalie magnétique) est très peu résistant (- de 1 MPa).
	STO.15	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	
	STO.17	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	
2	STO.18	Herbe, à la limite de la zone moissonnée	Volontaire	-Pour tous les SP, jusqu'à 0,60 cm au minimum, les valeurs ne dépassent pas 5 MPa et augmentent en descendant  -On peut regrouper les SP en fonction de leur allure générale: *1=4=5 *2=3 *18=12 *8
	STO.12	Culture de pomme de terre	Volontaire	
	STO.1	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	
	STO.2	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	
	STO.8	Terre après hersage/semis	Refus	
	STO.3	Terre après hersage/semis	Volontaire	
	STO.4	Culture de luzerne	Volontaire	
3	STO.11	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	-Pour tous les SP, jusqu'au moins 0,90 m, les valeurs ne dépassent pas 5 MPa et l'allure des signaux est la même.  Au delà de 1 m, les signaux sont beaucoup plus hétérogènes
	STO.10	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	
	STO.9	Après hersage / semis	Volontaire	
	STO.6	Après hersage / semis	Volontaire	
-	STO.7	Après la moisson, terre non-labourée	Volontaire	Jusqu'à 0,5 m, niveau homogène et de faible résistance. Ensuite très hétérogène
-	STO.13	Herbe en limite de parcelle	Volontaire	Ne dépasse pas 5 MPa mais assez hétérogène
-	STO.14	Terre après semis	Volontaire	Dépasse 5MPa à partir de 2,7 m. Zone homogène entre 1,5 et 2,5 m

Fig. 72 - Tableau des caractéristiques des 18 SP du site STO

- *Observations géophysiques*

La prospection géophysique avait pour but de détecter des vestiges archéologiques. La prospection magnétique<sup>40</sup> a été réalisée avec une distance entre les profils d'1 m, et une mesure toutes les 0.2 s (THIESSON, TABBAGH 2005). Le capteur inférieur se trouvait à 60 cm au dessus du sol et le capteur supérieur 60 cm plus haut. La forme particulière de la zone reconnue s'explique par la présence de grillages métalliques indiquant le parcellaire.

Des anomalies de différentes natures ont été détectées sur le site (Annexe 137):

- 3 anomalies (en violet) sont liées à la présence sur le site de deux pylônes électriques en béton armé présentant de grande quantité de métal et un ancien sondage pétrolier maintenant bouché et probablement chemisé en tête de puit avec de l'acier

- des anomalies linéaires (en bleu) parallèles entre elles et dans la direction de la pente, interprétées comme un système de drainage non datable. Elles peuvent aussi correspondre aux labours actuels qui sont orientés de la même manière.

- des anomalies dont l'origine est probablement archéologique (en rouge).

L'anomalie notée A semble bien corrélée avec une zone de forte concentration en matériel ramassé par prospection pédestre. La fouille au droit de l'anomalie a mis à jour un important dépôt de céramique ainsi qu'un habitat. La profondeur de cette anomalie est estimée à 50 cm sous la surface. Par ailleurs, en transformant le signal magnétique en mesure de susceptibilité magnétique, on peut exclure pour cette anomalie une interprétation de type poterie ou métallurgie (THIESSON, TABBAGH 2005 : 3).

---

<sup>40</sup> Le matériel utilisé est un gradiomètre à césium G858 de la société Geometrics.

### 5-1-13- Bilan

D'abord, les observations géomorphologiques et archéologiques des sites montrent qu'il existe des différences de formation du dépôt archéologique d'un site à l'autre et d'une ville à l'autre. Aussi, le substrat rocheux ainsi que les alluvions fluviales ont une part importante dans la constitution du dépôt. Pour les sites tourangeaux et d'Indre-et-Loire, il s'agit de calcaire dur ou tendre et lacustre ainsi que d'argiles, limons, sables fins et graviers de la Loire, et du Cher dans certains cas. Pour les sites Lyonnais, ils correspondent aux galets du Villafranchien, de calcaire dur et aux argiles, limons et sables fins et graviers de la Saône et du Rhône.

On retrouvera dans le tableau qui suit les différents types d'analyses qui ont été réalisés sur les sites retenus à Tours (Fig. 73) :

LIEU	SITE	POTENTIEL INFORMATIF						OBJECTIFS			
		Observations archéologiques	PANDA	Prospection géophysique	Etudes géologiques	endoscope	Profondeur explorée	Observation sur épaisseur du dépôt	Référentiel archéologico-mécanique	Modélisation hétérogénéité du dépôt	Couplage géophysique/géotechnique
Tours (37)	16	X	X	X	X	X	2 à 7 m	X	X	X	X
	17	X	X				3 à 4 m	X	X		
	69	X	X		X		3 à 4 m	X	X	X	
	72	X	X				3 à 4 m	X			
	77	X	X				4 m	X			
	BAZ		X	X			1 à 4 m				X
Cinq-Mars-La-Pile (37)	5MA	X	X				1 à 3 m	X	X		
Lyon (69)	L1015	X	X		X	X	1 à 4 m	X	X	X	
	L040	X	X				2 m	X			
	L105	X	X				1 m	X	X		
	L025	X	X				1 m	X	X		
	LTRI	X	X				1 m	X			
Pologne	STO	X	X	X			1 m				X

Fig. 73 - Tableau de synthèse des observations retenues pour l'évaluation du potentiel informatif à l'échelle d'un site

Au total, entre les années 2000 et 2005, 236 SP ont été réalisés. En milieu urbain, il y a 159 SP à Tours sur 6 sites et 50 SP à Lyon sur 6 sites.

Toutefois, les SP n'ont pas le même niveau d'analyse suivant les conditions de leur réalisation. On les classera ainsi (Fig. 74):

- condition 1 : SP en bord de coupe + relevés et description lithologique des coupes
- condition 2 : SP en bord de coupe + relevés de coupe lors de la fouille
- condition 3 : SP dans la fouille + enregistrements stratigraphiques
- condition 4 : SP sans enregistrements stratigraphiques in-situ

VILLE	N° site	SITE	Nombre SP	Observations	Niveau
Tours	16	Saint-Julien	100	Une partie en bord de coupe	1, 2 et 4
Tours	17	Marmoutier	6	En bord de coupe	1 et 2
Tours	69	Place Anatole France	14	En bord de coupe	1 et 2
Tours	72	3 rue Tanneurs	10	En bord de coupe	2
Tours	77	36, 38, 38bis rue Mirabeau	1	En bord de coupe	3
Tours	BAZ	7 rue Bazoche	28	Sans vérifications / prospection géophysique	4
Cinq-Mars-la-Pile (37)	5MA	Pile	9	En bord de coupe	1 et 2
Lyon	L 1015	Lavarenne	35	Dans la fouille et quelques uns en bord de coupe	1 et 2
Lyon	L040	Chapeau Rouge	5	Avant la fouille / pressiomètre	3
Lyon	L105	10-12 rue Joliot Curie	5	En bord de coupe	1
Lyon	L025	25 rue Joliot Curie	3	En bord de coupe	1
Lyon	LTRI	Fossés de Trion	5	Après fouille	2
Stolpie (Pologne)	STO	Stolpie	18	Sans vérification/ prospection géophysique	4

Fig. 74 - Tableau des conditions d'études des SP des sites étudiés

Les niveaux d'analyse sont également liés aux objectifs de départ (évaluation de l'épaisseur du dépôt et/ou constitution du référentiel archéologico-mécanique). De ce fait, les SP des conditions 1 et 2 pourront répondre au double-objectif, ceux de la condition 3 le pourront aussi mais ils seront moins fiables puisqu'il faut reconstituer des logs archéologiques par

extrapolation. Les SP de la condition 4 seront exploités en les couplant aux observations géophysiques si elles existent.

Ainsi, plusieurs approches ont été suivies pour résoudre ce double-objectif. Dans un premier temps, un référentiel archéologico-mécanique a été mis en place. Dans un deuxième temps, le dépôt archéologique des sites a été modélisé à partir de ses propriétés mécaniques puis est représenté à l'aide de la méthode des « codes-barres ». Enfin, dans un troisième temps, le problème de la maille d'étude d'un site est abordé dans le cadre du couplage de la géophysique et la géotechnique.

## 5-2- La mise en place d'un référentiel archéologico-mécanique pour la caractérisation et la mesure de l'épaisseur de la stratification des sites

Sur les sites retenus, des SP ont été réalisés afin de répondre au double-objectif lié à l'évaluation du potentiel archéologique d'un site : la distinction entre le dépôt archéologique et les niveaux naturels, et la caractérisation interne de ce dépôt. Concrètement, le **but est de distinguer les formations archéologiques et naturelles directement sur un pénétrogramme**. C'est pourquoi il est nécessaire de créer un référentiel liant les données archéologiques aux données géotechniques.

Afin de confronter les observations archéologiques aux pénétrogrammes, une méthode de description intermédiaire avait été mise en place en maîtrise. Elle est toujours en vigueur si les conditions d'exécution des sondages pénétrométriques permettent le relevé des coupes traversées par le PANDA. Ce relevé consiste en la définition d'unités lithologiques (UL) caractérisées par la texture, la couleur, les constituants et la porosité. Ainsi, les premiers résultats obtenus lors de la maîtrise ont montré qu'il est difficile de distinguer des matériaux particuliers puisque leur résistance est variable suivant le contexte archéologique (période et fonction). De ce fait, il est difficile de reconnaître les US sur un signal.

Ici, une nouvelle échelle d'analyse sera employée : il a été choisi de se concentrer sur le caractère fonctionnel des observations de terrain (**échelle de l'agrégation archéologique**) puis de faire simplement une synthèse sur la nature même des couches (UL).

L'étude sera présentée en 3 temps. Dans un premier temps, la méthodologie sera développée à partir du site le mieux documenté du corpus, le site 16 à Tours. Puis, dans un deuxième temps, la démarche retenue sera appliquée sur des sites de comparaison à Tours (site 69) et à Lyon (site L1015). Cette partie sera plutôt descriptive. Enfin, dans un troisième temps, un **bilan** sera exposé suivant les objectifs de départ. Ainsi, les **résultats principaux seront confrontés aux postulats** présentés dans la première partie.

### 5-2-1- Mise en place d'un référentiel archéologico-mécanique : le cas du site de Saint-Julien à Tours

Afin de vérifier s'il est possible de distinguer les usages du sol sur un pénétrogramme, il a été proposé de travailler à une résolution moins fine que l'US, celle de l'agrégation ou la phase archéologique.

En maîtrise, un système intermédiaire aux données archéologiques et géotechniques en maîtrise avait été mis en place (Pl. 3). Pour l'adapter au nouvel objectif, une nouvelle unité intermédiaire a été créée : l'Unité Contextuelle (UC). Elle correspond à l'unité lithologique en y intégrant le temps et la fonction archéologique selon la typologie fonctionnelle présentée dans la partie 1-4 (Pl. 87).

#### • *Réalisation de logs découpés en Unité Contextuelle*

Pour le site de Saint-Julien à Tours, les US ont été regroupées par agrégation dont le critère correspond à une **interprétation archéologique particulière** (ex : remblai, construction, niveaux agricoles...) à une **période donnée** et dans **une zone de fouille spécifique**. Le diagramme stratigraphique montre que les agrégations des deux premières campagnes de fouilles sont beaucoup plus globales (du 14<sup>e</sup> au 19<sup>e</sup> siècle) que celles des dernières campagnes. Ceci s'explique par le fait que les niveaux antiques jusqu'au 14<sup>e</sup> siècle ont présenté une stratification plus complexe (difficulté d'interprétation et de datation), qui a obligé les archéologues à être prudents sur l'enregistrement stratigraphique. Ainsi, les agrégations ont été multipliées afin de faciliter l'analyse des données. Ayant participé à l'enregistrement sur le terrain, j'ai pu m'affranchir de ces problèmes et j'ai tenté d'homogénéiser ce découpage par l'intermédiaire de l'affectation des UC.

Des logs ont été réalisés pour 60 SP en y reportant les UC et les agrégations correspondantes (Annexe 138). De ce fait, une même agrégation peut se retrouver sur plusieurs logs. Une UC est numérotée comme suit : « UC n°site.n°SP.n°UC » (ex : UC 16.32.1). Un indice de qualité de l'information a été attribué à chaque UC :

-« 2 » correspond aux informations qui sont fiables car on possède un relevé de coupe à proximité d'un SP et parfois d'un relevé lithologique.

-« 1 » correspond au cas où la fouille a été interrompue dans une zone où se situe un SP mais une extrapolation est possible car la zone voisine a été fouillée et des relevés de coupes ont été réalisés. Les informations sont donc à prendre avec précaution.

-« 0 » correspond au cas où il est difficile d'extrapoler. Il s'agit majoritairement des niveaux situés sous le remblaiement massif antique. Il s'agit des niveaux d'occupation indéterminée.

Il faut noter que certaines UC correspondent aux UL relevées pour les travaux de maîtrise. Toutefois, certaines UL ont été redécoupées en fonction de la date. Concrètement, une UL peut regrouper des US appartenant à des agrégations successives. Pour homogénéiser le découpage du sol en fonction de la datation, il a donc fallu revoir certains enregistrements (Pl. 88).

- *Attribution des mesures pénétrométriques aux UC*

Pour chaque UC, les mesures brutes et lissées (mesures tous les 1 cm) correspondantes ont été reprises en les calant en NGF. On dispose de 26228 points bruts (ou coups de marteau). Un des problèmes a été de choisir entre l'emploi des valeurs brutes et régularisées pour la constitution du référentiel (les valeurs régularisées atténuent les fortes et faibles valeurs). Les premières analyses ont été effectuées pour les deux types de valeurs afin de confronter les résultats (Annexe 139).

Ensuite, l'étude a été concentrée sur les UC de qualité « 2 » afin de voir si les UC équivalentes possèdent les mêmes propriétés mécaniques d'un SP à l'autre. Cette démarche permettra de montrer si des contrastes mécaniques apparaissent entre UC aux fonctions archéologiques différentes. Ainsi, 482 UC de qualité « 2 » ont été constituées à partir de 11513 mesures brutes et 480 UC, à partir de 8955 mesures régularisées.

- *Analyses descriptives des UC de qualité « 2 »*

- Les variables et les modalités retenues

A partir du tableau des valeurs brutes et lissées, on obtient un tableau de synthèse présentant, pour chaque UC, différentes variables (Pl. 89) :

- le type fonctionnel (8 modalités) [type fonctionnel]
- l'interprétation archéologique (12 modalités) [sous-type fonctionnel]
- la datation (10 modalités) [datecode]
- le Z moyen (en m) [Moy (Z)]
- l'épaisseur (en m) [épaisseur]
- la profondeur moyenne (en m) [prof.moy.], qui correspond à la différence entre le Z actuel et le Z moyen de l'UC
- le nombre de mesures [nombre de Qd]

- la coordonnée géographique X [X]
- la coordonnée géographique Y [Y]
- la moyenne de résistance Qd (en MPa) [moyenne de Qd]
- l'écart type du Qd (en MPa) [écart-type de Qd]
- la médiane du Qd (en MPa) [médiane Qd]
- le coefficient de variation du Qd [c.v. Qd]; indice de dispersion calculé à partir du rapport de l'écart type et de la moyenne.

Sur le site de Saint Julien, des fonctions archéologiques spécifiques ont été reconnues et doivent être mis en évidence. L'étude aura comme base la typologie fonctionnelle mise au point avec M. Fondrillon (cf 4-1) ; la modalité « occupation indéterminée » ne peut être intégrée pour la réalisation du référentiel. Aussi, l'analyse des UC se fera à deux échelles, celle du type fonctionnel et du sous-type fonctionnel. Les modalités de ces variables du site 16 sont cochées dans le tableau (Fig. 75)<sup>41</sup>. Le nombre d'UC associé y est mentionné à partir de l'emploi des valeurs brutes et lissées.

---

<sup>41</sup> N.B. : Ce tableau sera repris pour l'ensemble des descriptions des UC des sites pour faciliter leur comparaison.

Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Interprétation utilisée pour le site de Saint-Julien	Nombre d'UC	Effectif en % pour les types
Occupation extérieure	Circulation (cour, voirie)	x	50	53,1%
	Mise en culture (jardins, champs)	x	154 (153 avec valeurs régularisées)	
	Pacage, pâturage	x	52	
	Friche / terrain vague		-	
Occupation intérieure	Occupation intérieure (circulation, piétinement, rejets domestiques dans un bât.ou sous-abris) Foyer (résidus de foyer en place)	x	13	2,7%
Construction	Const. en pierre (mur, plot, palissade)	x	7	13%
	Const. en matériau périssable		-	
	Sol construit (Carrelage, mosaïque, dallage, béton de mortier ou d'argile)	x	3 (2 avec valeurs régularisées)	
	Terre battue		-	
	Empierrement (y compris cailloutis)	x	27	
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse		-	
	Mise en œuvre (déchets de taille, préparation matériaux, radier, aire de gâchage)	x	26	
Destruction	Destruction in situ	x	-	10,8%
	Démantèlement / Récupération	x	52	
	Dégradation lente / décomposition		-	
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction	x	23	17,4%
	nivellement / aménagement (assainissement)	x	61	
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage (fosse)		-	3%
	dépotoir (tas)	x	14	
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées (dépotoir)		-	0
	alluvions grossières anthropisées (dépotoir)		-	
	colluvions fines anthropisées		-	
	colluvions grossières anthropisées		-	
Naturel	alluvions fines (sable fin, limon, argile)		-	0
	alluvions grossières (sable grossiers, galets)		-	
	Colluvions fines		-	
	colluvions grossières		-	
	dépôt éolien		-	
	Roche calcaire (calcaire, marne calcaire, tuffeau)		-	

Fig. 75- Tableau du nombre d'UC de qualité « 2 » du site 16 en fonction des types et sous-types fonctionnels

On constate que le nombre d'individus (UC) par fonction archéologique est hétérogène (Fig. 75). Les niveaux d'*occupation extérieure* représentent plus de la moitié des effectifs (53,1%) avec ceux de *mise en culture* étant les plus nombreux (32% de l'effectif total). Ce sont ensuite les *remblais d'aménagement* (17,4%) puis les niveaux de *construction* (13%) qui ont une part importante dans la distribution. Dans le chapitre 4, les fréquences calculées à partir des données disponibles à l'échelle de la ville soulignaient la prépondérance de ces types fonctionnels dans des proportions différentes.

D'autre part, les datations des US sur le site de Saint-Julien ont été codées. Il faut noter que les niveaux antiques et médiévaux ont été difficilement datés et que, pour beaucoup d'entre

eux, les archéologues ont proposé une fourchette de datation. Certaines se chevauchent mais il a été choisi de garder le découpage pour éventuellement les regrouper par la suite (Fig. 76).

Fourchette de datation (en siècle)	datecode
1-2	1,5
3-4	3,5
4	4
6-9	7,5
7-9	8
8-10	9
9-10	9,5
10-11	10,5
12	12
12-13	12,5
13	13
13-14	13,5
14	14
15-16	15,5
16-17	16,5
17-18	17,5

Fig. 76 - Tableau des modalités de la variable datecode

- Description des types et sous-types fonctionnels des UC à partir de leurs propriétés mécaniques (résistance Qd et variabilité Qd)

On peut soulever plusieurs questions :

1- les UC équivalentes (datation commune) possèdent- elles les mêmes propriétés mécaniques ?

2- les UC aux fonctions archéologiques communes possèdent-elles les mêmes propriétés mécaniques ?

3- les UC aux fonctions archéologiques contrastées se différencient-elles significativement par leurs caractéristiques ?

#### *\*Valeurs de résistance Qd*

Pour répondre aux deux premières questions, les moyennes de résistance des UC ont été comparées au sein de chaque type et sous-type fonctionnel correspondant, autant avec les valeurs brutes que lissées.

Les deux graphiques qui suivent présentent la résistance moyenne des UC pour la fonction *occupation extérieure* avec les valeurs brutes et lissées (Fig. 77).

Les premières observations montrent qu'il y a quelques anomalies expliquées par les enregistrements de terrain. Par exemple, à l'aide des coupes et des photos, il est possible de

montrer que dans les niveaux de *mise en culture*, il y a des concentrations de pierres qui ont été traversées par le pénétromètre (16.56.11, 16.83.4, 16.88.4). Dans ce cas, il faut faire un choix :

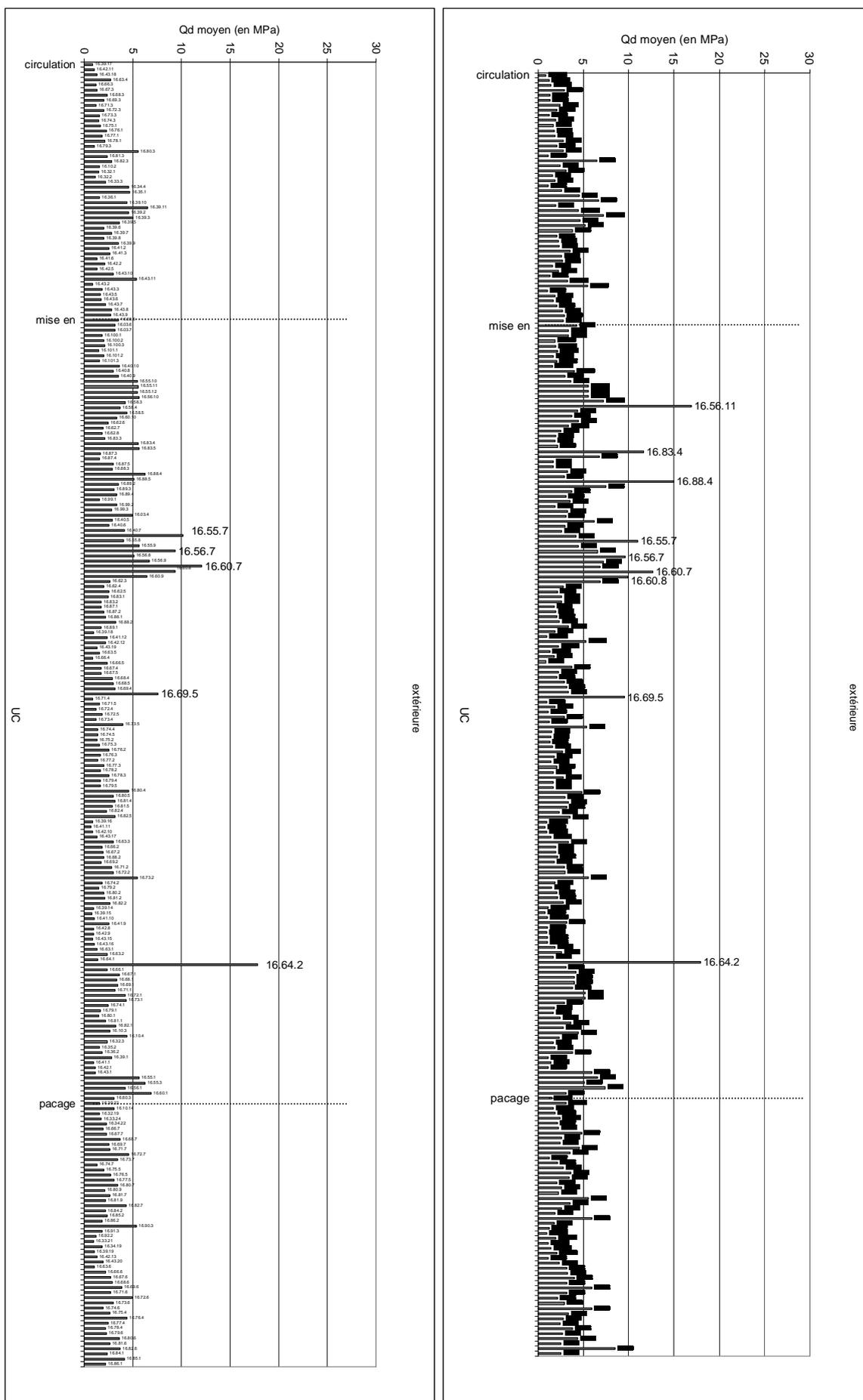
- soit éliminer la valeur dans le tableau car on considère que la mesure n'est pas représentative du milieu

- soit garder la valeur car ces mesures, bien que peu représentées au sein de l'agrégation peuvent être significatives du milieu. On pose à nouveau ici la question de la référence archéologique (postulat).

C'est ce deuxième choix qui est suivi.

D'autre part, les SP 16.55, 16.56 et 16.60 sont situés dans la même zone en bord de coupe. On observe une résistance moyenne importante (entre 9 et 13 MPa). Dans ce cas, la question est de savoir s'ils n'ont pas traversé une structure particulière dans la coupe qui n'a pas été vue à la fouille à la même altitude que les niveaux agricoles.

Fig. 77 - Répartition des UC du la fonction occupation extérieure en fonction de leur résistance moyenne brute et régularisée



Les différents graphiques ont été étudiés pour chacune des fonctions sélectionnées notamment pour les niveaux de construction et de remblai d'aménagement (Annexe 140). On a constaté que l'utilisation de la régularisation des données ne change pas ou peu les observations.

Ensuite, les propriétés mécaniques ont été comparées pour les différentes interprétations afin de voir si celles-ci diffèrent. Avec les conseils des géotechniciens et des statisticiens, il a été choisi de travailler avec la médiane de Qd de chaque UC plutôt qu'avec la moyenne de Qd. Les valeurs de la médiane sont intéressantes statistiquement car elles sont plus stables que la moyenne : les fortes et faibles valeurs d'une UC ont moins de poids dans le calcul de la médiane. La figure 78 présente les fourchettes de résistance pour les interprétations retenues, à partir du minimum et du maximum des valeurs. Le lissage des données réduit les fourchettes de résistance des UC de *dépotoir*, de *sol construit* et des *constructions en pierre* (Fig. 78).

Par ailleurs, on constate des chevauchements de certaines classes de valeurs de résistance qui permettent de conclure qu'il n'existe pas de lien direct entre une interprétation archéologique et la plage de variation des mesures pénétrométriques

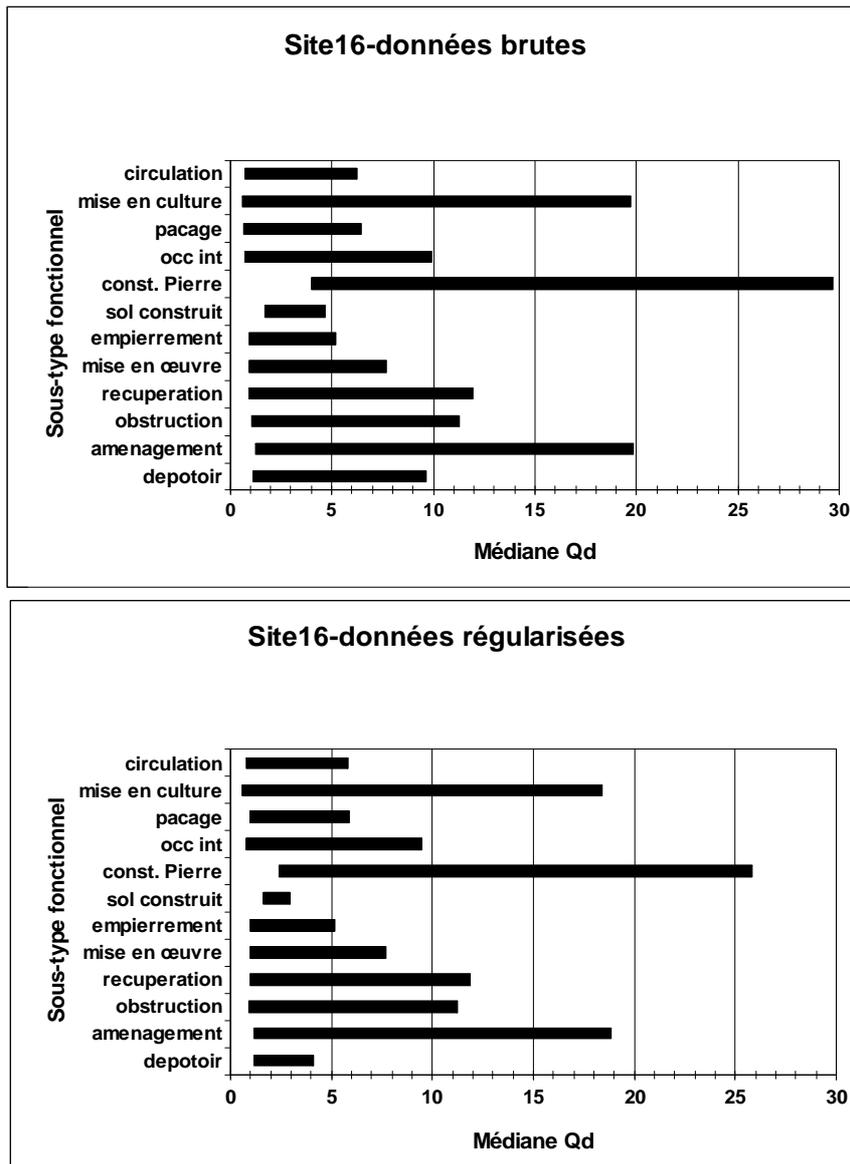


Fig. 78 – Représentation des fourchettes de la résistance médiane (Qd en MPa) des UC selon les sous-types fonctionnels avec les données brutes et régularisées

Pour aller plus loin dans la comparaison de ces fourchettes, on peut étudier la répartition du nombre d'UC selon des classes de résistance définies sur le graphique des fourchettes à partir des données brutes (Fig. 79 et Fig. 80). Les classes de médiane de Qd sont :

- n°1 : valeurs inférieures à 1 MPa
- n°2 : valeurs comprises entre 1 et 5 MPa
- n°3 : valeurs comprises entre 5 et 8 MPa
- n°4 : valeurs comprises entre 8 et 10 MPa
- n°5 : valeurs comprises entre 10 et 12 MPa
- n°6 : valeurs comprises entre 12 et 20 MPa
- n°7 : valeurs supérieures à 20 MPa.

		classe médiane							
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	1	2	3	4	5	6	7	Total
construction	const. Pierre		1	2		2	1	1	7
	empierrement	1	25	1					27
	mise en œuvre	1	14	11					26
	sol construit		3						3
destruction	récupération	1	38	11	1	1			52
extérieure	circulation	1	44	5					50
	mise en culture	9	122	14	3	1	5		154
	pacage	1	49	2					52
intérieur	occ int	3	7	2	1				13
remblai aménagement	aménagement		45	5	4	5	2		61
	obstruction		15	5	1	2			23
remblai usage	dépotoir		12	1	1				14
Total		17	375	59	11	11	8	1	482

Fig. 79 – Tableau de répartition du nombre d'UC en fonction des classes de médiane de Qd et des interprétations

		classe médiane							
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	1	2	3	4	5	6	7	Total
construction	const. Pierre		14,29	28,57		28,57	14,29	14,29	100
	empierrement	3,70	92,59	3,70					100
	mise en œuvre	3,85	53,85	42,31					100
	sol construit		100,00						100
destruction	récupération	1,92	73,08	21,15	1,92	1,92			100
extérieure	circulation	2,00	88,00	10,00					100
	mise en culture	5,84	79,22	9,09	1,95	0,65	3,25		100
	pacage	1,92	94,23	3,85					100
intérieur	occ int	23,08	53,85	15,38	7,69				100
remblai aménagement	aménagement		73,77	8,20	6,56	8,20	3,28		100
	obstruction		65,22	21,74	4,35	8,70			100
remblai usage	dépotoir		85,71	7,14	7,14				100
Total		3,53	77,80	12,24	2,28	2,28	1,66	0,21	100

Fig. 80 – Tableau des fréquences des UC par classes de médianes pour chacune des interprétations.

Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ces trois dernières figures :

- lorsque les valeurs de résistance sont supérieures à 20 MPa, il s'agit seulement de *construction en pierre* (mur)

- lorsque les valeurs sont comprises entre 12 et 20 MPa, les UC sont des *constructions en pierre*, des couches *mise en culture* ou bien des *remblais d'aménagement*. Concernant les niveaux agricoles, ce sont des UC directement positionnées sur le mur écroulé (F182) : les labours ont entamé le mur et ont remonté des pierres

- lorsque les valeurs sont comprises entre 10 et 12 MPa, il y a beaucoup de possibilités : les UC peuvent être de la *construction en pierre*, de la *récupération*, de la *mise en culture*, un remblai d'*aménagement* ou d'*obstruction*

- lorsque les valeurs sont comprises entre 8 et 10 MPa, il s'agit soit de niveau de récupération, de mise en culture, d'occupation intérieure, de remblai d'*aménagement* ou d'*obstruction*, ou bien de *dépotoir*

- lorsque les valeurs sont comprises entre 5 et 8 MPa, les UC peuvent être de toutes les interprétations excepté un sol construit

- lorsque les valeurs sont comprises entre 1 et 5 MPa, les UC peuvent être de toutes les interprétations. Cela pose problème car 77,8 % des UC étudiés font partis de cette classe

- lorsque les valeurs sont inférieures à 1 MPa, les UC peuvent être des couches d'*empierrement*, de *mise en œuvre*, de *récupération*, de *circulation*, de *mise en culture*, de *pacage* ou d'*occupation intérieure*

- 92,59 % des UC d'*empierrement*, 94,23 % des UC de *pacage* et 100 % des UC de *sol construit* appartiennent à la classe n°2.

Ces premières observations révèlent une diversité des possibilités selon les valeurs de résistance. Toutefois, les classes de résistance ont des effectifs très inégaux : 81% des UC ont une valeur de résistance inférieures à 5MPa.

Ainsi, pour simplifier les descriptions à venir, les classes de médiane de Qd correspondront à celles définies pour la modélisation de la stratification de ce site (code-barres) (2-1-4) : inférieure à 1 MPa, entre 1 et 2 MPa, entre 2 et 4 MPa et supérieure à 4 MPa. Les limites sont arbitraires mais permettent d'équilibrer les effectifs des UC correspondantes.

Classe de médiane de Qd	% d'UC
Médiane Qd < 1 MPa	3 %
1 MPa ≤ médiane Qd < 2 MPa	29 %
2 MPa ≤ médiane Qd < 4 MPa	41 %
Médiane Qd ≥ 4 MPa	27 %

Fig. 81 - Tableau des classes de médiane de Qd et des effectifs d'UC correspondants

Enfin, à l'aide des probabilités conditionnelles du théorème de Bayes, il est possible d'estimer la probabilité (*a posteriori*) d'être dans un type et/ou un sous-type fonctionnel en fonction de la valeur de résistance (probabilité *a priori*)<sup>42</sup>. La formule des probabilités de Bayes

<sup>42</sup> Le principe des statistiques Bayésiennes repose sur la relation : probabilité *a priori* + données = probabilité *a posteriori* (ORTON 2000 : 207).

est la suivante :  $P(A/B) = P(B/A) * P(A) / P(B)$  avec P la probabilité et A, B les variables étudiées<sup>43</sup>.

D'abord, les valeurs de résistance (médiane) ont été réparties selon les 4 classes de résistance Qd pour faciliter l'étude. Puis, les probabilités *a posteriori* ont été calculées à partir de la formule de Bayes (Fig. 82).

Probabilités		A posteriori				A priori
		classe médiane Qd				
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	< 1 MPa	1-2 MPa	2-4 MPa	> 4 MPa	Total
Occupation extérieure		64,7%	62,0%	57,0%	35,9%	53,1%
	Circulation	5,9%	15,3%	10,0%	6,3%	10,4%
	Mise en culture	52,9%	36,5%	32,0%	24,2%	32,0%
	Pacage, pâturage	5,9%	10,2%	15,0%	5,5%	10,8%
	Friche / terrain vague	--	--	--	--	--
Occupation intérieure		17,6%	1,5%	2,0%	3,1%	2,7%
	Occupation intérieure	17,6%	1,5%	2,0%	3,1%	2,7%
	Foyer	--	--	--	--	--
Construction		11,8%	12,4%	10,5%	18,0%	13,1%
	Const. en pierre	0	0	0	5,5%	1,5%
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--
	Sol construit	0	0,7%	0,5%	0,8%	0,6%
	Terre battue	--	--	--	--	--
	Empierrement	5,9%	9,5%	5,5%	1,6%	5,6%
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--
	Mise en œuvre	5,9%	2,2%	4,5%	10,2%	5,4%
Destruction		5,9%	8,8%	9,0%	16,4%	10,8%
	Destruction in situ	--	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	5,9%	8,8%	9,0%	16,4%	10,8%
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement		0	11,7%	18,0%	25,0%	17,4%
	obstruction	0	5,1%	3,5%	7,0%	4,8%
	nivellement / aménagement	0	6,6%	14,5%	18,0%	12,7%
Remblaiement/comblement d'usage		0	3,6%	3,5%	1,6%	2,9%
	comblement usage	--	--	--	--	--
	dépotoir	0	3,6%	3,5%	1,6%	2,9%
Naturel anthropisé		--	--	--	--	--
	alluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--
	alluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--
Naturel		--	--	--	--	--
	alluvions fines	--	--	--	--	--
	alluvions grossières	--	--	--	--	--
	Colluvions fines	--	--	--	--	--
	colluvions grossières	--	--	--	--	--
	dépôt éolien	--	--	--	--	--
	roche	--	--	--	--	--
* nombre d'UC		100% (17)*	100% (137)	100% (200)	100% (128)	100% (482)

Fig. 82 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 4 classes de médiane du Qd

D'après le corpus sélectionné sur le site 16, on observe que les probabilités *a posteriori* permet d'affiner le diagnostic statistique des probabilités *a priori*. En effet, on observe des tendances en fonction des valeurs de médiane Qd :

- plus les valeurs de résistance sont faibles, plus la probabilité d'être dans une *occupation extérieure* et *intérieure* augmente ;

<sup>43</sup> Dans notre cas, la formule est :  $P(\text{Type} / \text{classe médiane Qd}) = P(\text{classe médiane Qd} / \text{Type}) * P(\text{Type}) / P(\text{classe médiane Qd})$ .

- plus les valeurs de résistance augmentent, plus la probabilité d'être dans un niveau de *destruction* et de *remblai d'aménagement* augmente ;
- la distribution est plus homogène pour les niveaux de construction.

On retiendra que :

- lorsque les valeurs de médiane sont inférieures à 4MPa, une UC a une forte probabilité d'être un *niveau extérieur* (environ 60 % pour les 3 premières classes) ;
- lorsque les valeurs de médiane sont supérieures à 4 MPa, une UC peut-être à 36% un *niveau extérieur* et à 25% un *remblai d'aménagement* ;
- lorsque les valeurs sont inférieures à 1 MPa, une UC a une forte probabilité d'être un *niveau mis en culture* (53%) et un *niveau intérieur* (17%) ; elle ne peut pas être une construction en pierre, un sol construit, un remblai d'aménagement et obstruction ni un dépotoir ;
- lorsque les valeurs sont comprises entre 1 et 2 MPa, une UC a plus de chance d'être un *niveau mis en culture* (36%) et de *circulation* (15%) ; elle ne peut pas être une construction en pierre ;
- lorsque les valeurs sont comprises entre 2 et 4 MPa, une UC peut être un *niveau mis en culture* (32%), de *pacage* (15%) ou de *remblai d'aménagement* (14%) ; elle ne peut pas être une construction en pierre ;
- lorsque les valeurs sont supérieures à 4 MPa, une UC peut être un *niveau de mise en culture* (24%) puis un *remblai d'aménagement* (18%).

#### \*Variabilité Qd

La variabilité de la résistance Qd est mesurée à partir du coefficient de variation. La distribution cumulée de cet indice de dispersion permet de définir manuellement 4 classes de variabilité faible à forte :

- c.v. (Qd) < 0,15 (20% des effectifs)
- $0,15 \leq \text{c.v. (Qd)} < 0,29$  (30% des effectifs)
- $0,29 \leq \text{c.v. (Qd)} < 0,5$  (30% des effectifs)
- c.v. (Qd) > 0,5 (20% des effectifs)

Des probabilités *a priori* et *a posteriori* ont été calculées pour les types et sous-types fonctionnels des UC selon ces classes de variabilité (Fig. 83). Elles montrent pour chaque classe que ce sont les *occupations extérieures* qui sont les plus représentées. On observe que les probabilités d'être dans un niveau de *circulation* et de *récupération* diminuent lorsque le c.v.(Qd) est croissant, tandis que la tendance s'inverse pour les *remblais d'aménagements*. Les autres

tendances sont homogènes et donc proches de la probabilité *a priori* pour les autres sous-types fonctionnels.

Il faut noter que le c.v (Qd) des constructions en pierre ne peut pas être inférieur à 0,29 et celui du remblai d'obstruction ne peut être inférieur à 0,15.

Probabilités		<i>A posteriori</i>				<i>A priori</i>
		c.v. Qd				
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	< 0,15	0,15 - 0,29	0,29-0,5	>0,5	Total
Occupation extérieure		56,7%	60,5%	48,7%	43,2%	53,1%
	Circulation	18,9%	10,2%	7,8%	6,2%	10,4%
	Mise en culture	27,8%	37,6%	29,9%	29,6%	32,0%
	Pacage, pâturage	10,0%	12,7%	11,0%	7,4%	10,8%
	Friche / terrain vague	--	--	--	--	--
Occupation intérieure		3,3%	2,5%	2,6%	2,5%	2,7%
	Occupation intérieure Foyer	3,3%	2,5%	2,6%	2,5%	2,7%
Construction		13,3%	11,5%	15,6%	11,1%	13,1%
	Const. en pierre	0	0	1%	7,4%	1,5%
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--
	Sol construit	1%	0,6%	--	1,2%	0,6%
	Terre battue	--	--	--	--	--
	Empierrement	5,6%	5,7%	7,1%	2,5%	5,6%
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--
	Mise en œuvre	6,7%	5,1%	7,8%	--	5,4%
Destruction		17,8%	12,1%	7,8%	6,2%	10,8%
	Destruction in situ	--	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	17,8%	12,1%	7,8%	6,2%	10,8%
Dégradation lente / décomposition		--	--	--	--	--
		--	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement		6,7%	10,8%	23,4%	30,9%	17,4%
	obstruction	0	2,5%	8,4%	7,4%	4,8%
Remblaiement/comblement d'usage	nivellement / aménagement	6,7%	8,3%	14,9%	23,5%	12,7%
	comblement usage	2,2%	2,5%	1,9%	6,2%	2,9%
Naturel anthropisé	dépotoir	--	--	--	--	--
		2,2%	2,5%	1,9%	6,2%	2,9%
Naturel	alluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--
	alluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--
		--	--	--	--	--
		--	--	--	--	--
		100% (90)	100% (157)	100% (154)	100% (81)	100% (482)

Fig. 83 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 4 classes de médiane du Qd

En conclusion, les résultats obtenus à partir de la description des propriétés mécaniques (résistance et indice de dispersion) permettent de hiérarchiser les possibilités selon les classes de médiane de Qd et sont à utiliser en complément des fourchettes présentées plus haut. La non unicité des distributions confirme la complexité d'établir un référentiel sur l'interprétation fonctionnelle stricte des mesures de résistance. De nombreux facteurs comme la constitution lithologique n'ont pas été pris en compte dans cette analyse et influencent les résultats. Il faut

vérifier, par exemple, si les niveaux de destruction et de remblai peuvent avoir le même type de matériaux sur le site de Saint-Julien<sup>44</sup>.

Avant d'aborder la question de la constitution lithologique des UC, deux autres doivent être traitées : celle de l'influence de la position stratigraphique (profondeur et altimétrie) d'une UC et celle de l'épaisseur d'une UC.

- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leur position altimétrique

Même si les valeurs de résistance sont déterminantes pour caractériser fonctionnellement le sol, il faut prendre en compte sa situation géographique et surtout, la position altimétrique des UC retenues pour le référentiel.

En effet, en partant du postulat que des activités humaines de périodes particulières produisent des sols de constitution spécifique, l'hypothèse est que certains types et sous-types fonctionnels apparaissent spécifiquement à temps  $t$ , donc à une profondeur  $p$ .

La relation entre la position altimétrique (Moy  $Z$ ) d'une UC et sa datation doit alors être discutée avant de décrire les UC en fonction de la moyenne de  $Z$ , et ce d'autant plus que les propriétés mécaniques risquent de montrer une dérive avec la profondeur.

*\*Relation Moy  $Z$  et date*

Les observations issues du PANDA ne permettront pas de donner une datation des niveaux traversés. Cependant, les lois de la stratigraphie font qu'il existe une corrélation entre la datation et l'altimétrie des niveaux du sous-sol. Sur le site de Saint-Julien, il apparaît que la corrélation entre une date et la position altimétrique d'une UC est forte (81%) (Fig. 84)

---

<sup>44</sup> Ces résultats pourront être confrontés avec ceux obtenus dans les travaux de M. Fondrillon (FONDRILLON *en cours*)

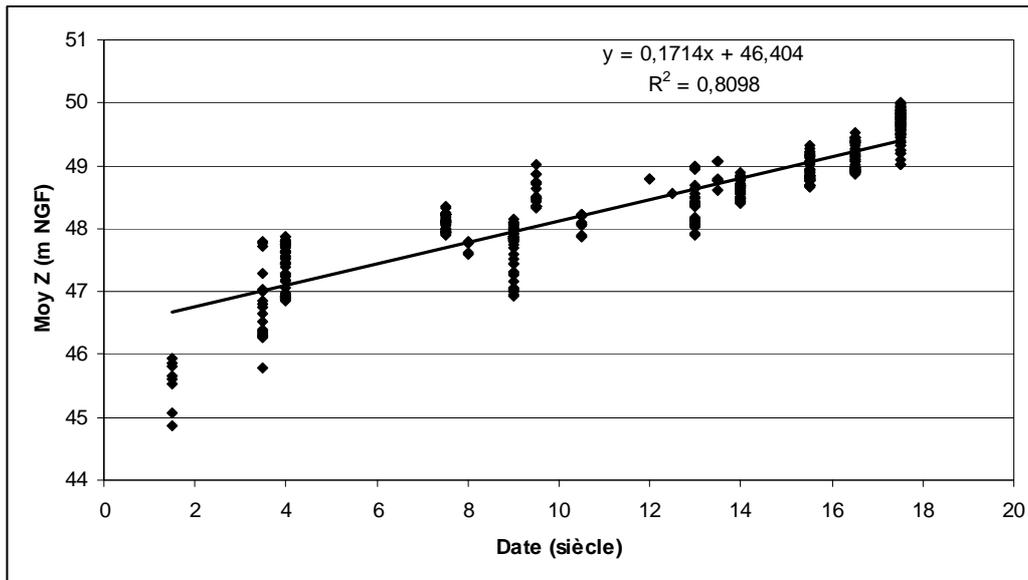


Fig. 84 - Répartition des altitudes moyennes UC en fonction de leur datation

Il faut observer toutefois des chevauchements, notamment pour les niveaux des 3<sup>e</sup> – 4<sup>e</sup> s. et des 8<sup>e</sup>-9<sup>e</sup> s. qui sont situés entre 47 et 48 m NGF : ce qui reflète le caractère hétérogène de la formation de la stratification du site (cf section 2, Annexe 84). Ainsi, selon l’hypothèse énoncée plus haut, dans la tranche de 47 à 48 m NGF, les possibilités d’interprétation du signal risquent d’être plus nombreuses.

*\*Relation Moy Z et type / sous-types fonctionnels*

Les UC ont été réparties selon 5 classes de Z moyen qui ont été choisies globalement tous les mètres et en relation avec les connaissances archéologiques du site (Z moyen inférieur à 46 m NGF, compris entre 46 et 47 m NGF, compris entre 47 et 48 m NGF, compris entre 48 et 49 m NGF et supérieur à 49 m NGF). La répartition des UC montre que les UC sont majoritairement situées au dessus de 47 m NGF (Fig. 85). Par ailleurs, il faut noter que les UC de *sol construit* et de *dépotoir* ne sont situés que dans une seule classe d’altitude (respectivement, supérieur à 49 m NGF et entre 47 et 48 m NGF).

De la même façon que les valeurs de résistance des UC, des probabilités d’être dans un niveau spécifique peuvent être calculées à partir de ces classes d’altimétrie (Fig. 85). Ceci donne un aperçu de la stratification du site à différentes périodes.

Probabilités		A posteriori					A priori
		classe Z (m NGF)					
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	< 46	46-47	47-48	48-49	> 49	Total
Occupation extérieure		0	0	31,8%	81%	39,2%	53,1%
	Circulation	0	0	0	9,5%	23,1%	10,4%
	Mise en culture	0	0	11,2%	57,3%	16,2%	32,0%
	Pacage, pâturage	0	0	20,6%	14,2%	0	10,8%
	Friche / terrain vague	--	--	--	--	--	--
Occupation intérieure		0	0	0	2,8%	5,4%	2,7%
	Occupation intérieure	0	0	0	2,8%	5,4%	2,7%
	Foyer	--	--	--	--	--	--
Construction		33,3%	0	15,9%	10%	16,9%	13,1%
	Const. en pierre	33%	0	3%	0	0,0%	1,5%
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--	--
	Sol construit	0	0	0	0	2,3%	0,6%
	Terre battue	--	--	--	--	--	--
	Empierrement	0	0	13,1%	6,2%	0	6,0%
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--	--
	Mise en œuvre	0	0	0	3,3%	14,6%	5,4%
Destruction		0	8%	22,4%	0	20%	10,8%
	Destruction in situ	--	--	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	0	8,0%	22,4%	0	20%	10,8%
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement		66,7%	92%	16,8%	6,2%	18,5%	17,4%
	obstruction	0	8%	4,7%	3,8%	6,2%	4,8%
	nivellement / aménagement	66,7%	84%	12,1%	2,4%	12,3%	12,7%
Remblaiement/comblement d'usage		0	0	13,1%	0	0	2,9%
	comblement usage	--	--	--	--	--	--
	dépotoir	0	0	13,1%	0	0	2,9%
Naturel anthropisé	...						
Naturel	...						

100% (9) 100%(25) 100%(107) 100%(211) 100%(130) 100%(482)

Fig. 85 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 5 classes d'altimétrie

Ainsi, à partir des UC retenues, il s'avère que :

- en dessous de 46 m NGF, une UC a 67% de probabilité d'être dans un remblai d'aménagement
- entre 46 et 47 m NGF, une UC a 92 % de chance d'être un remblai d'aménagement et d'obstruction (84% de l'effectif total pour l'aménagement)
- entre 47 et 48 m NGF, les possibilités sont plus variées (8 sous-types sur 12) ; les probabilités les plus fortes sont des UC de récupération et de pacage (22 % et 21 %)
- entre 48 et 49 m NGF, une UC a 81% de probabilité d'être un niveau d'occupation extérieure avec 57 % sur l'effectif total pour les niveaux mis en culture
- au dessus de 49 m NGF, les probabilités les plus fortes sont pour les niveaux de circulation et de récupération (23% et 20 %).

L'utilisation de la position altimétrique dans le référentiel apporte des informations utiles à l'interprétation des niveaux archéologiques. Toutefois, son emploi peut s'avérer délicat dans le cas où la stratification d'un site est composée essentiellement de niveau de fossés comme cela est le cas pour le site du Parking d'Anatole France (site 69).

- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leur épaisseur

Pour étudier la répartition des UC selon leurs épaisseurs, les classes définies dans le postulat de départ sont reprises.

#### *\*Relation épaisseur et variabilité de la résistance des UC*

On peut supposer que, plus une UC est épaisse, plus la variabilité interne du Qd des UC est importante. Un c.v. (Qd) moyen a été calculé et rapporté au centre de la classe des épaisseurs (la dernière classe a un maximum de 110 cm). On observe que la corrélation entre l'épaisseur et le c.v (qd) est forte avec un rapport de détermination  $R^2$  égal à 81% (Fig. 86).

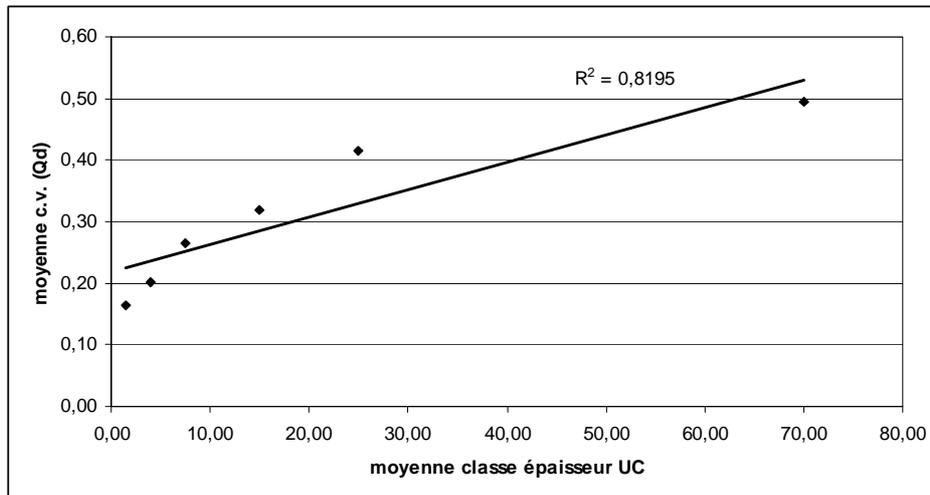


Fig. 86 – Distribution du c.v. (Qd) moyen des UC en fonction des classes d'épaisseur (en cm)

#### *\*Relation épaisseur et types / sous-types fonctionnels*

D'abord, près de la moitié des UC ont une épaisseur qui varie entre 5 et 20 cm. Ensuite, le calcul des probabilités des interprétations fonctionnelles, en fonction des classes des épaisseurs, révèle la difficulté de discriminer les interprétations sauf pour les classes d'épaisseur comprises entre 5 et 30 cm pour lesquelles la mise en culture est prépondérante (Fig. 87). On observe que la probabilité d'être dans un niveau de *circulation* augmente lorsque l'épaisseur diminue alors que la probabilité d'être dans une *mise en culture* augmente avec l'épaisseur.

Cependant, en orientant les descriptions sur les types fonctionnels, on peut retenir que :

- lorsqu'une UC a une épaisseur inférieure à 5 cm, elle a une forte probabilité d'être une *occupation extérieure* et de *construction*,

- lorsqu'une UC a une épaisseur comprise entre 5 et 20 cm, elle est peut être à 60% de chance une *occupation extérieure*,

- lorsqu'une UC a une épaisseur supérieure à 20 cm, elle a de forte chance d'être une *occupation extérieure* et un *remblai d'aménagement*,

- une *occupation intérieure* ne peut pas être supérieure à 20 cm (ici la valeur maximale est de 11 cm).

L'épaisseur est un indicateur plutôt discriminant pour les types fonctionnels les mieux représentées : l'occupation extérieure, le niveaux de construction (faible épaisseur), les niveaux de remblais d'aménagement (fortes épaisseurs).

Probabilités		A posteriori						A priori
		épaisseur						
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	< 3cm	3cm - 5cm	5cm - 10cm	10cm - 20cm	20cm - 30cm	> 30cm	TOTAL
Occupation extérieure		44,1%	52,2%	60,3%	57,8%	58,5%	39,5%	53,1%
	Circulation	22%	15,2%	16,9%	2,9%	7,5%	0,0%	10,4%
	Mise en culture	6,8%	17,4%	39,7%	52,0%	43,4%	14,0%	32,0%
	Pacage, pâturage	15,3%	19,6%	3,7%	2,9%	7,5%	25,6%	10,8%
	Friche / terrain vague	--	--	--	--	--	--	--
Occupation intérieure		1,7%	8,7%	4,4%	2%	0	0	2,7%
	Occupation intérieure Foyer	1,7%	8,7%	4,4%	2%	0	0	2,7%
Construction		28,8%	19,6%	13,2%	7,8%	9,4%	7%	13,1%
	Const. en pierre	0	0	1%	2,9%	0	3,5%	1,5%
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--	--	--
	Sol construit	5%	0	0	0	0	0	0,6%
	Terre battue	--	--	--	--	--	--	--
	Empierrement	11,9%	8,7%	3,7%	2,9%	9,4%	3,5%	5,6%
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--	--	--
	Mise en œuvre	11,9%	10,9%	8,8%	2%	0	0	5,4%
Destruction		11,9%	13,0%	13,2%	10,8%	5,7%	8,1%	10,8%
	Destruction in situ	--	--	--	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	11,9%	13,0%	13,2%	10,8%	5,7%	8,1%	10,8%
Remblaiement/comblement d'aménagement		11,9%	6,5%	6,6%	16,7%	20,8%	43%	17,4%
	obstruction nivellement / aménagement	0	0	1,5%	2,9%	9,4%	15,1%	4,8%
Remblaiement/comblement d'usage		1,7%	0	2,2%	4,9%	5,7%	2,3%	2,9%
	comblement usage dépotoir	--	--	--	--	--	--	--
Naturel anthropisé	...	1,7%	0	2,2%	4,9%	5,7%	2,3%	2,9%
Naturel	...	--	--	--	--	--	--	--
		100% (59)	100% (46)	100% (136)	100% (102)	100% (53)	100% (86)	100% (482)

Fig. 87 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 6 classes d'épaisseur

Ces premières analyses ont porté sur les propriétés mécaniques des UC, leur position altimétrique et leur épaisseur. Les premiers résultats montrent qu'une interprétation fonctionnelle des niveaux archéologiques n'a pas de propriétés mécaniques qui lui sont propres sauf pour les maçonneries qui ont des mesures de résistance très élevées. Cependant, on a relevé un ensemble d'indices qui permettent de distinguer les probabilités *a priori* et les probabilités *a posteriori*.

En outre, grâce à ses résultats, il est possible de proposer différentes interprétations fonctionnelles du dépôt et d'en exclure d'autres. Il est alors nécessaire de vérifier si ce référentiel est transposable à d'autres sites et éventuellement à d'autres villes.

Pour préciser les indices les plus informatifs et proposer une première classification, il est préférable de travailler simultanément sur l'ensemble des variables. Une analyse factorielle permettra de visualiser les corrélations dans un espace multidimensionnel (cf 4-2).

• *Analyse statistique des UC de qualité « 2 » : analyse factorielle*

- Le choix des données et des variables

Avant de réaliser l'analyse factorielle, il est nécessaire de déterminer le type de données et les variables discriminantes. C'est pourquoi, il a fallu résoudre certains problèmes (Fig. 88) :

Problèmes	Discussion
Choix entre l'emploi des valeurs brutes et lissées du Qd pour étudier les UC	Il faut tester avec les deux types de mesures pour voir si il y a une différence et faire un choix
Choix entre la moyenne du Qd et la médiane du Qd	A priori, la médiane est indicateur plus robuste que la moyenne car il accorde moins de poids aux fortes et faibles valeurs (pour les valeurs brutes, elle sont d'autant plus fortes).
Choix entre l'écart-type du Qd et le c.v. du Qd	L'écart-type et la moyenne du Qd sont corrélés : il vaut mieux utiliser le coefficient de variation qui est un bon estimateur de la dispersion.
Choix entre le nombre de valeurs par UC et l'épaisseur d'une UC	Le nombre de valeurs et l'épaisseur portent la même information. L'épaisseur sera donc privilégiée dans l'analyse.
L'intégration de la position altimétrique d'une UC (Moy Z)	-Il faut voir si la date et la moyenne de Z sont fortement corrélées. -La profondeur moyenne a été intégrée à l'analyse
Emploi des coordonnées X et Y des UC	Les variables X et Y peuvent être importantes dans la structuration des données car on constate que les sondages sont fortement concentrés au sud-est et au nord-ouest de la fouille. Il faut tester avec ou sans ces deux variables.
Certaines UL n'ont qu'une seule valeur brute (= 1 coup de marteau) ou lissé, faut-il les éliminer de l'analyse ?	Il faut voir au cas par cas les UL qui présentent une seule valeur.

Fig. 88 – Tableau des problèmes posés par le choix des variables et des données pour une analyse factorielle

- Présentation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)

Toutes les variables sont quantitatives sauf les variables « type fonctionnel » et « sous-type fonctionnel » qui sont qualitatives. L'Analyse en Composantes Principales est la méthode adaptée à l'étude puisqu'elle est une technique de description statistique permettant de représenter les liaisons entre les variables et les similitudes entre les individus.

Le tableau de données est constitué de 482 UC (valeurs brutes) et 480 UC (valeurs lissées) définies par 9 variables continues (Datecode, Moy (Z), épaisseur, profondeur moyenne,

coordonnées X et Y, Moy (Qd), médiane (Qd) et c.v. (Qd)) et 2 variables illustratives (Type et sous-type fonctionnel). Etant donné que les valeurs sont de différentes natures (position géographique en mètre et résistance en MPa), il faut réaliser une ACP normée et les variables seront « centrées réduites » (LEBART, MORINEAU, PIRON 2000 : 36-37).

Plusieurs essais ont été réalisés afin de répondre aux différents problèmes dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau qui suit (Fig. 89)

ESSAI	Type Valeurs		Variables continues								
	brutes	lissées	Datecode	Moy (Z)	épaisseur	Profondeur moyenne	X	Y	Moy (Qd)	Médiane (Qd)	c.v. (Qd)
1a	<b>x</b>		x	x	x	x	x	x	<b>x</b>		
1b	<b>x</b>		x	x	x	x	x	x		<b>x</b>	
2a		<b>x</b>	x	x	x	x	x	x	<b>x</b>		
2b		<b>x</b>	x	x	x	x	x	x		<b>x</b>	
3	x		x	x	x	x				x	x

Fig. 89 – Tableau récapitulatif des essais réalisés par une ACP

#### - Résultats des essais 1 et 2

Les essais 1 et 2 ont été réalisés afin d’orienter le choix sur l’utilisation de valeurs brutes ou lissées des valeurs de résistances pour le calcul de certaines variables et sur l’utilisation de la résistance moyenne du Qd ou sa médiane.

L’étude des cercles des corrélations montre que les variables X et Y sont fortement corrélées, que l’épaisseur et le c.v. (Qd) le sont aussi et que la moyenne de Z et la date sont assez proches (Fig. 90). Les tableaux des valeurs-tests des corrélations sont présentés en annexe (Annexe 141). On ne constate pas de nette différence entre l’emploi des valeurs brutes ou lissées.

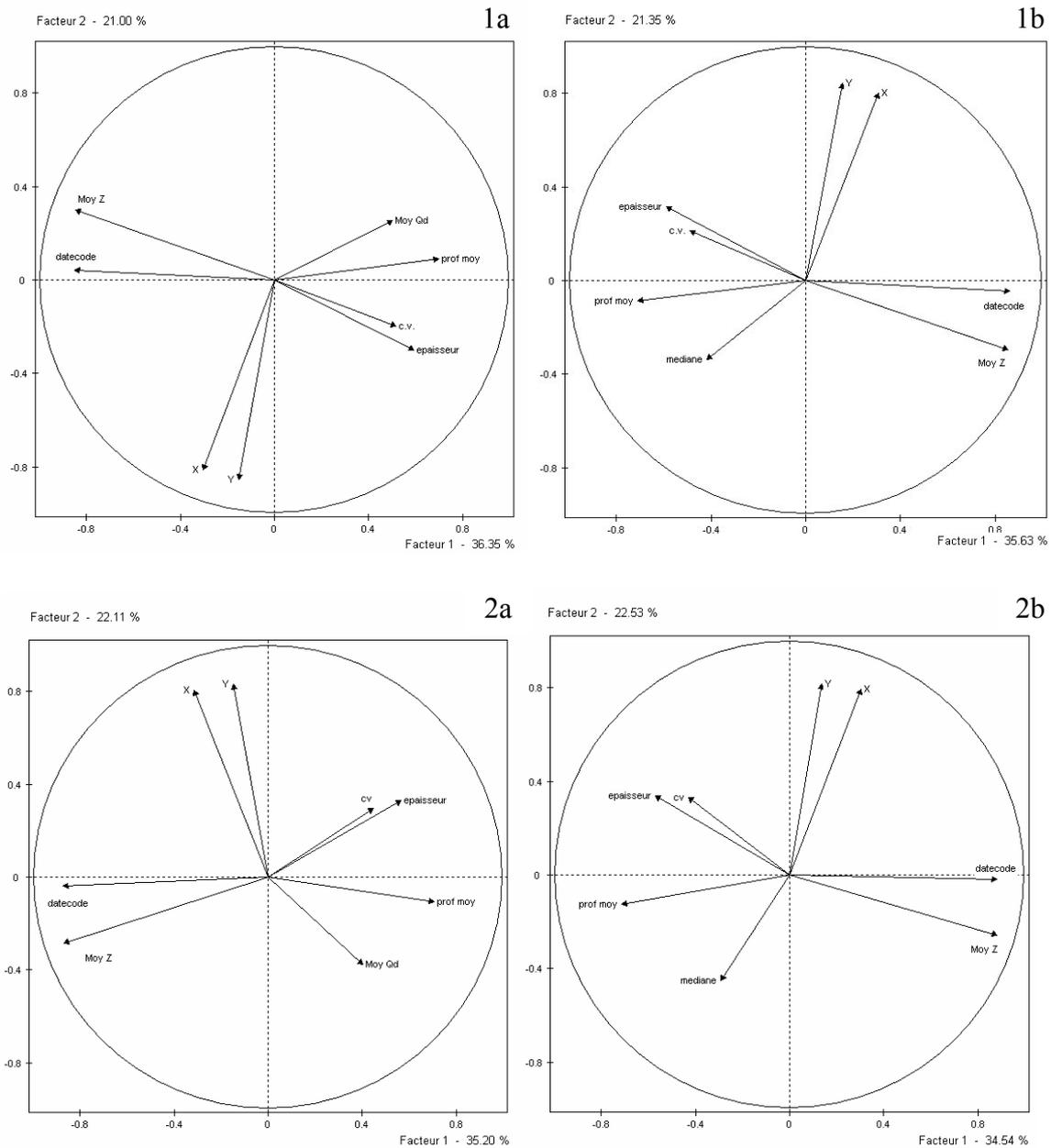


Fig. 90 - Cercles des corrélations des variables dans le premier axe factoriel pour les essais 1 et 2.

Si on étudie de plus près les variables qui contribuent à la formation des axes (Fig. 91), on observe que les résultats diffèrent sensiblement pour les axes 2 et 3, selon qu'on utilise la moyenne du Qd ou la médiane du Qd. D'autre part, la part d'explication des facteurs dans la distribution spatiale des données est quasiment similaire.

N° essai	Type d'essai	Axe 1	Axe2	Axe 3
Essai1a	Valeurs brutes avec moy (Qd)	Moy (Z) et datecode opposée à prof. moy. (36,35 %)	Y opposée à Moy (Z) (21%)	prof. moy. opposée à c.v. (15,66%)
Essai1b	Valeurs brutes avec médiane (Qd)	prof. moy. opposée à Moy (Z) et datecode (35,63 %)	médiane opposée à Y (21,35 %)	c.v. opposée à prof. moy. (15,13 %)
Essai2a	Valeurs lissées avec moy (Qd)	Moy (Z) et date code opposée à prof. moy. (35,20 %)	Moy Qd opposée à Y (22,11 %)	c.v. opposée à prof. moy. (14,66 %)
Essai2b	Valeurs lissées avec médiane (Qd)	prof. moy. opposée à Moy (Z) et datecode (34,54 %)	médiane opposée à Y (22,53 %)	X opposée à c.v. (14,20 %)

Fig. 91 – Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes (ou facteurs) 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données pour les essais 7 et 8.

Les individus projetés dans les plans factoriels qui suivent sont représentés selon une forme et une couleur liée à leur interprétation (Fig. 92).

Ustype	interprétation	Code couleur
extérieure	circulation	
	mise en culture	
	pacage	
intérieur	occ int	
construction	const. Pierre	
	sol construit	
	empierrement	
	mise en œuvre	
destruction	récupération	
remblai aménagement	obstruction	
	aménagement	
remblai usage	dépotoir	

Fig. 92 – Légende de représentation des UC du site 16 en fonction de leur interprétation

L'étude de la projection des individus dans le premier plan factoriel défini par les axes 1 et 2 (Fig. 93 et Fig. 94) pour les essais 1a et 1b montre que :

- les individus (UC) de chaque interprétation sont préférentiellement regroupés dans des zones spécifiques
- la représentation des individus proportionnellement à leur contribution met en évidence les murs et les remblais aux fortes valeurs de résistance.

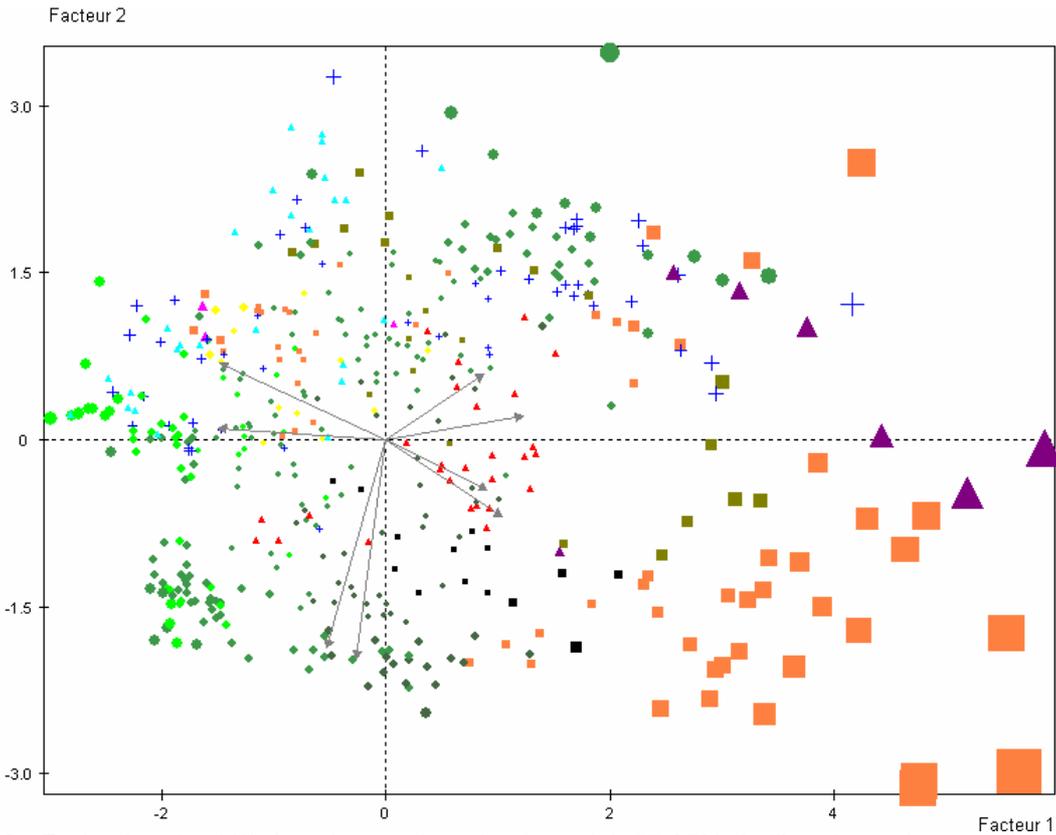


Fig. 93 - Projection des UC dans le premier plan factoriel (57,35% de l'inertie totale) pour l'essai 1a en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur)

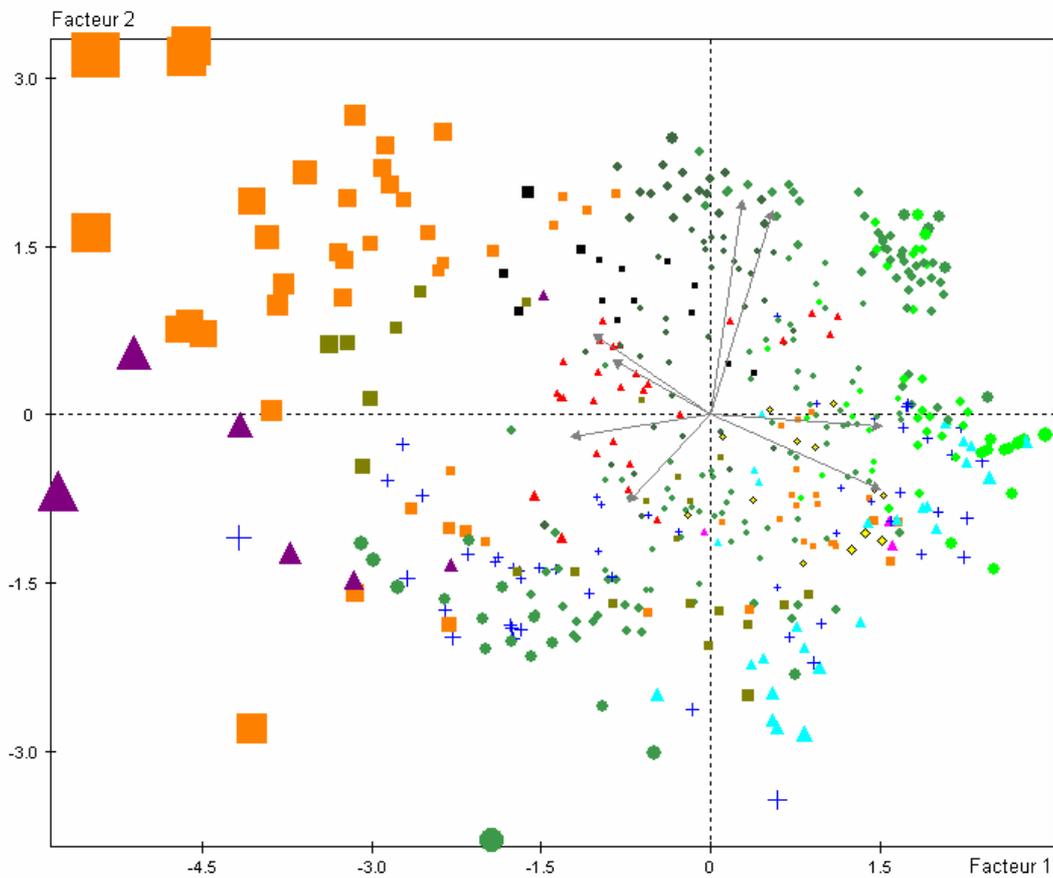


Fig. 94 – Projection des UC dans le premier plan factoriel (56,98% de l'inertie totale) pour l'essai 1b en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur)

Le choix des valeurs brutes ou lissées n'a pas de conséquence importante dans la formation des axes, pas plus que le choix de la moyenne ou la médiane du Qd.

Par commodité, les essais suivants utilisent les **valeurs brutes et la médiane de Qd**

### - Résultats de l'essai 3

L'essai 3 a été fait pour déterminer si les variables X et Y apportent un biais à la lecture des observations. L'emploi des coordonnées X et Y semblent être important dans la structuration des données. Un tel effet ne saurait être cependant transposable d'un site à l'autre et ne pourrait être considéré que comme un facteur de biais.

L'objectif est de comparer l'essai 1b à l'essai 3. On observe alors de forte corrélation entre les variables datecode et Moy Z, entre l'épaisseur et le c.v. du Qd, entre X et Y lorsqu'on les utilise (Fig. 95).

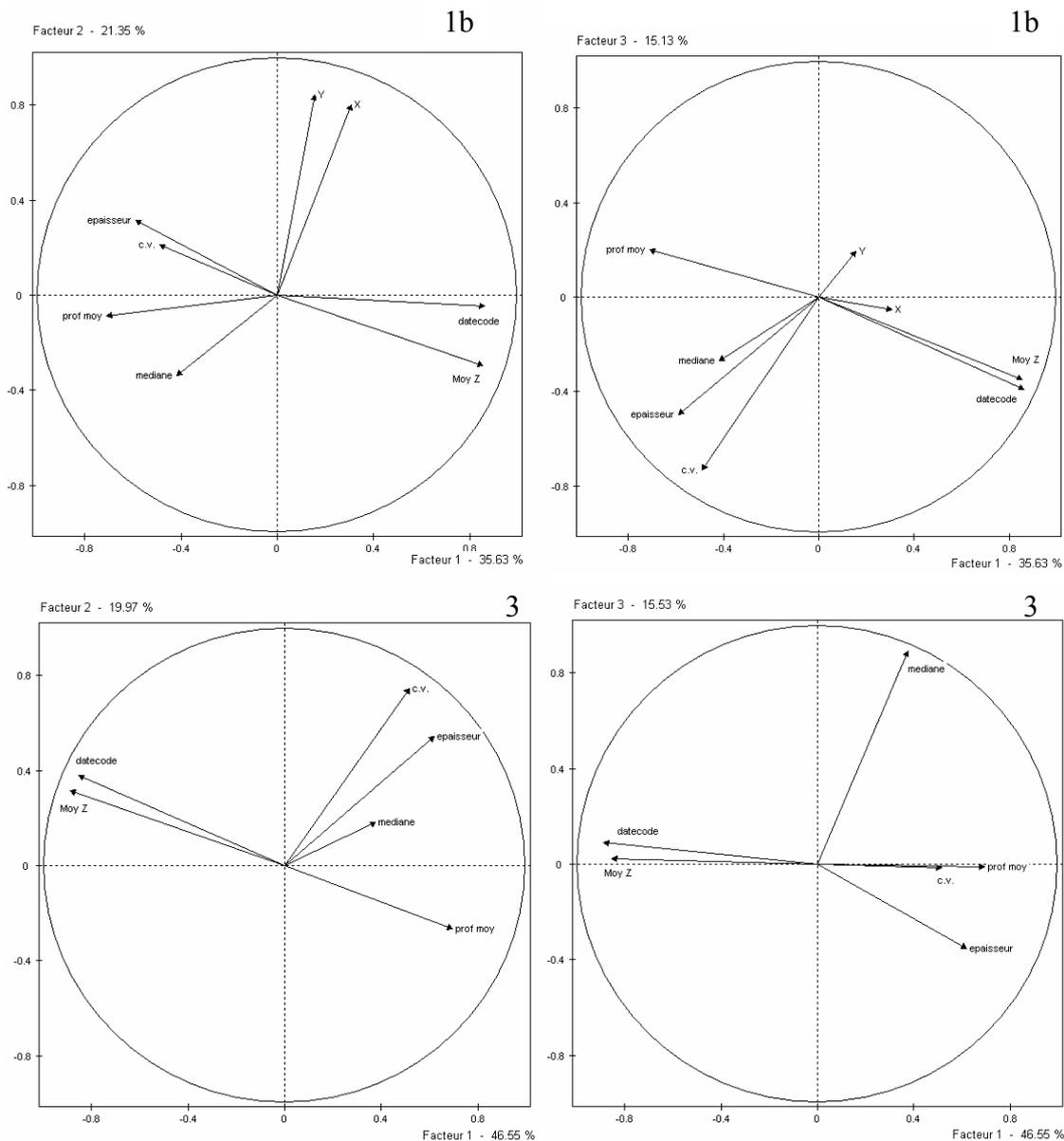


Fig. 95 - Cercles des corrélations des variables pour les essais 1 et 3 (avec les deux plans factoriels)

L'étude de l'explication de la formation des axes par les variables montre des résultats différents selon que l'on utilise ou pas les coordonnées géographiques des UC (Fig. 96).

N° essai	Type d'essai	Axe 1	Axe2	Axe 3
Essai1a	Valeurs brutes avec médiane (Qd) et coordonnées X, Y	prof. moy. opposée à moy (Z) et date (35,63 %)	médiane opposée à Y (21,35 %)	c.v. opposée à prof. moy. (15,13 %)
Essai3	Valeurs brutes avec médiane (Qd) sans coordonnées X, Y	moy (Z) opposée à prof. moy. (46,55 %)	prof moy opposée à c.v. (19,97%)	épaisseur opposée à médiane (15,53 %)

Fig. 96 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes (ou facteurs) 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données pour les essais 1b et 3.

La part d'explication du premier facteur augmente de 11 % lorsqu'on enlève le X et le Y. Les coordonnées ont un effet structurant trop important. En effet, les SP liés aux UC retenues ne sont pas régulièrement réparties dans l'espace.

L'analyse de la projection de l'ensemble des individus dans le premier plan factoriel des essais 1a et 3 montre bien que les coordonnées géographiques sont déterminantes (Fig. 94 et Fig. 96).

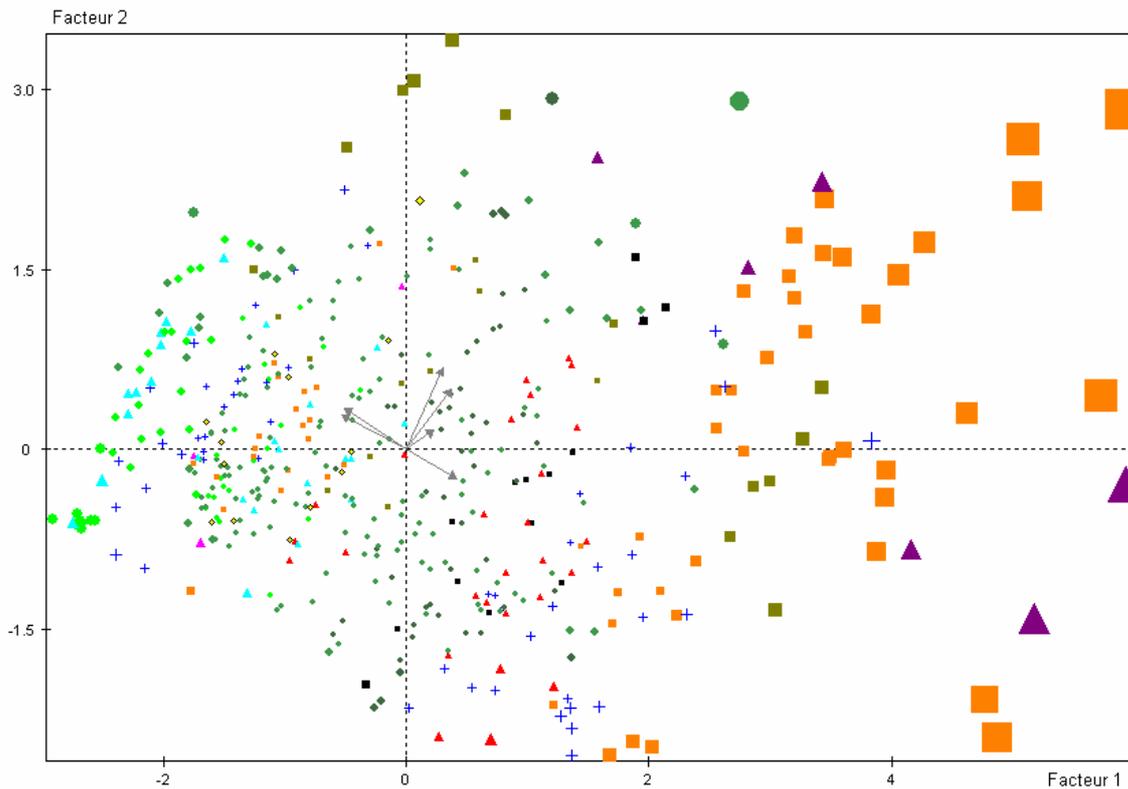


Fig. 97 - Projection des UC du site 16 dans le premier plan factoriel (66,52% de l'inertie totale) pour l'essai 3 en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur)

En étudiant l'essai 3, on observe que :

- la date et la moyenne de Z sont fortement corrélées. La date est une information redondante par rapport à la moyenne de Z. Elle est toutefois conservée afin d'aider à l'interprétation des données

- la moyenne de Z et la profondeur moyenne sont des variables qui portent sur le même type d'information (l'altitude). Elles sont anti-corrélées sur le cercle des corrélations (quasiment à 180° dans les cercles de corrélations)

- le premier axe est défini par la position des UC à la verticale donc leur ancienneté
- le deuxième axe est défini par la variabilité des valeurs du Qd au sein de chaque UC
- le troisième axe est défini par les valeurs de médiane du Qd

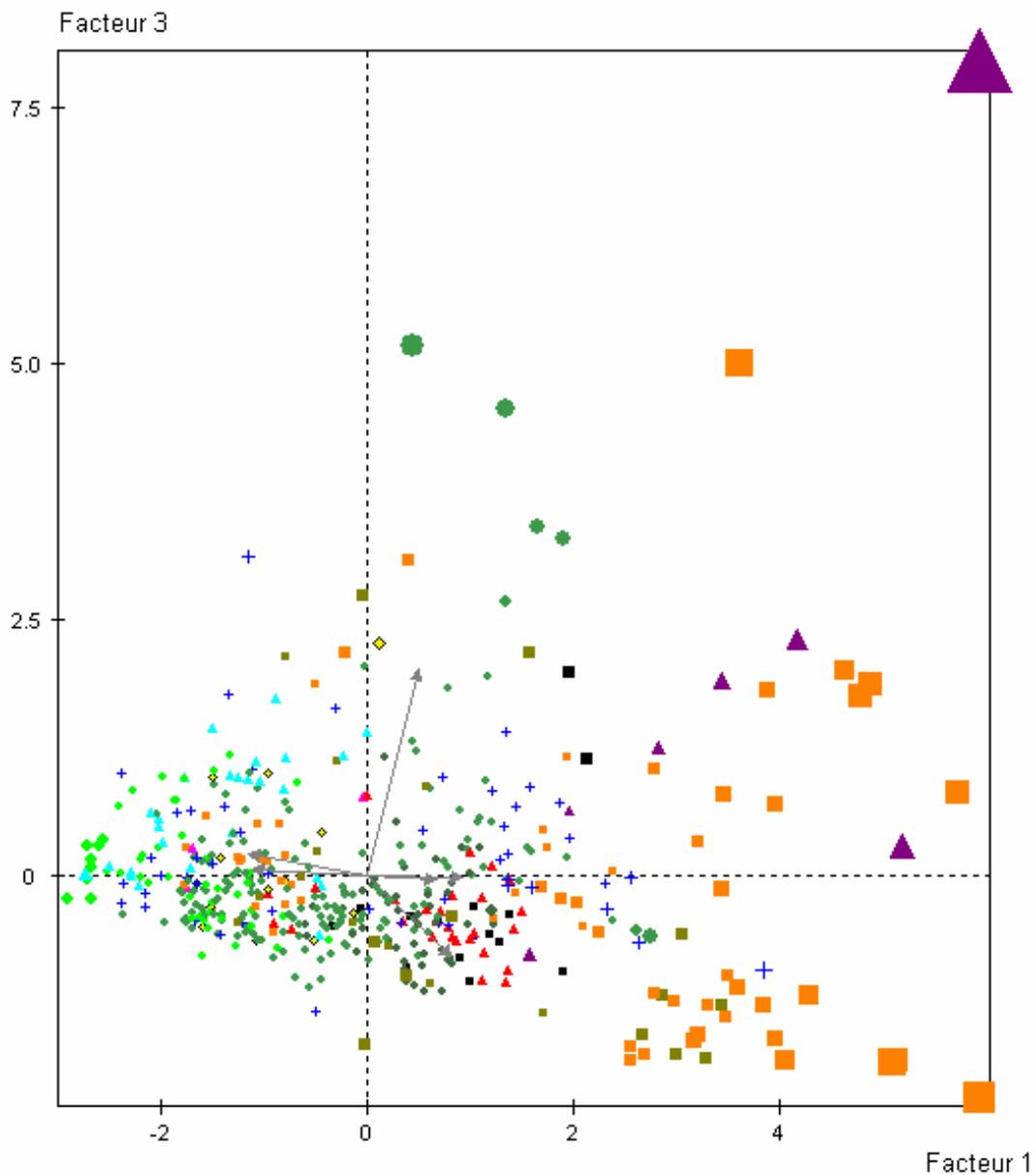


Fig. 98 - Projection des UC du site 16 dans le deuxième plan factoriel pour l'essai 3 en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur)

L'analyse de la projection de l'ensemble des individus dans les deux plans factoriels de l'essai 3 (Fig. 97 et Fig. 98) montre que ce sont les *constructions en pierres* (murs) et les *remblais d'aménagement* plutôt anciens qui contribuent à la formation des axes 1 et 3.

Ensuite, la figure qui suit présente la projection des modalités des interprétations archéologiques dans les deux premiers plans factoriels (Fig. 99). Leur position correspond au barycentre de la distribution des UC correspondantes.

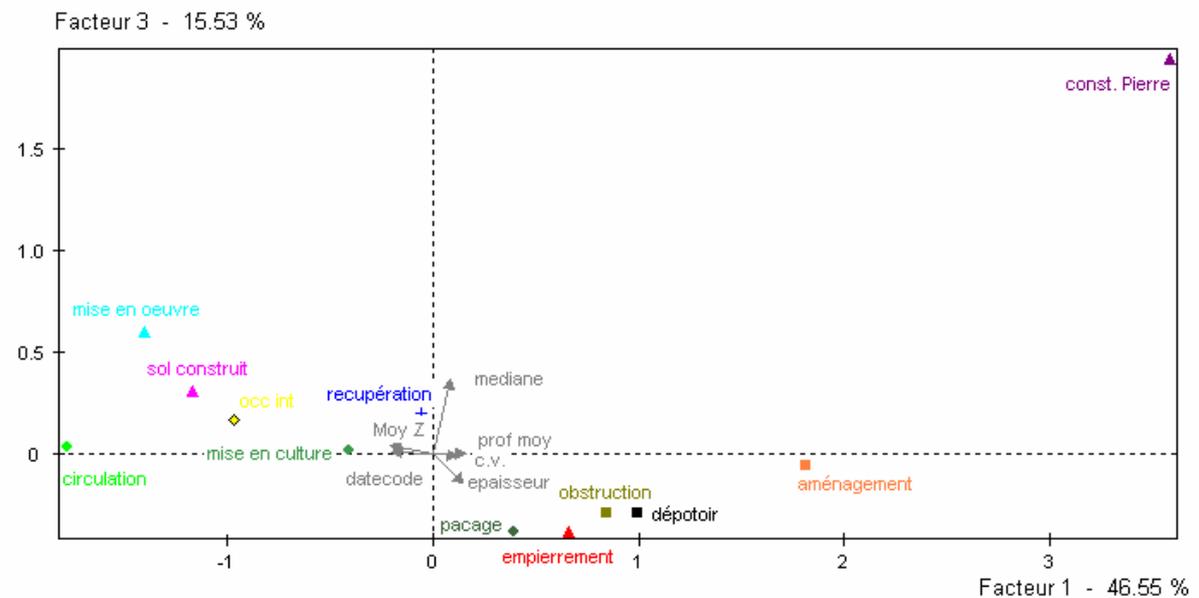
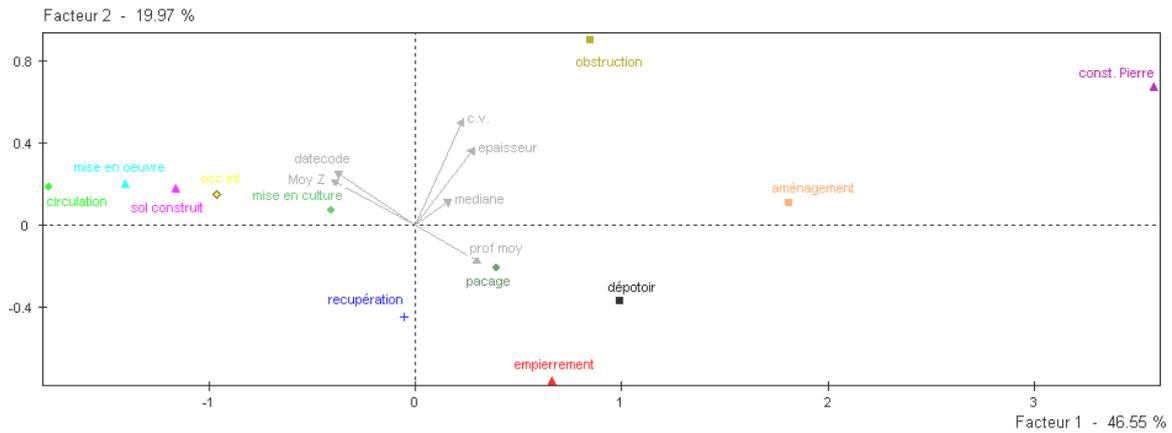


Fig. 99 - Projection des modalités de la variable interprétation dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3.

Avec les précautions d'usage, on peut en tirer une image de la position des UC dans les plans factoriels. On peut déjà former 4 groupes :

- le premier regroupe les niveaux de circulation, de mise en œuvre, de sol construit, d'occupation intérieure, de mise en culture, de récupération ;
- le deuxième, les niveaux de *pacage*, d'*empierrement*, de *remblai d'obstruction* et d'*usage* ;
- le troisième, les remblais d'aménagement ;
- le quatrième, les constructions en pierre.

A la lecture des deux projections, on peut considérer que le premier groupe représente les UC peu profondes (assez récentes) avec des valeurs de résistances moyennes à fortes et une variabilité interne moyenne. Le deuxième correspond aux UC profondes avec des valeurs de résistance faibles et une variabilité interne faible (sauf pour les UC d'obstruction). Le troisième

correspond aux UC plus profondes avec des valeurs de résistance moyenne et une variabilité interne moyenne. Le quatrième correspond aux UC plus profondes, aux valeurs de résistances très fortes et une variabilité interne forte.

		SITE 16 - ACP ESSAI 3			
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4
Occupation extérieure	Circulation				
	Mise en culture				
	Pacage, pâturage				
	Friche / terrain vague	--	--	--	--
Occupation intérieure	Occupation intérieure				
	Foyer	--	--	--	--
Construction	Const. en pierre				
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--
	Sol construit				
	Terre battue	--	--	--	--
	Empierrement				
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--
	Mise en œuvre				
Destruction	Destruction in situ	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération				
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction				
	nivellement / aménagement				
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage	--	--	--	--
	dépotoir				
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées	--	--	--	--
	alluvions grossières anthropisées	--	--	--	--
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--
Naturel	alluvions fines	--	--	--	--
	alluvions grossières	--	--	--	--
	Colluvions fines	--	--	--	--
	colluvions grossières	--	--	--	--
	dépôt éolien	--	--	--	--
	substrat rocheux	--	--	--	--
<i>Légende :</i> + faible ++ moyen +++ fort	<i>Description classes</i>	<b>Profond + Qd ++ à +++ C.V. ++</b>	<b>Profond ++ Qd + C.V. ++</b>	<b>Profond +++, Qd +, C.V. ++</b>	<b>Profond +++, Qd +++, C.V. +++</b>

Fig. 100 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP de l'essai 3 pour le site 16

Ces premières observations sont à nuancer par le fait que certains sous-types fonctionnels sont représentés à différentes altimétries. En étudiant la projection des individus dans ces plans factoriels (Fig. 97, Fig. 98), on peut distinguer nettement deux groupes pour les niveaux de remblais d'aménagement, pour ceux de récupération ainsi que pour ceux d'empierrement : ils se distinguent par leur position verticale dans la stratification du site.

- *Analyse des propriétés mécaniques des UC selon leur lithologie*

Une piste de travail avait été exploitée dès la maîtrise sur l'étude de la relation entre la constitution des couches stratigraphiques (Unité Lithologique) et leurs propriétés mécaniques. Les premiers résultats ont montré que le découpage en 24 descriptions lithologiques, appelés faciès lithologiques\*, était trop précis. C'est pourquoi, ces UL avaient été regroupées selon leur constituant dominant (limon, sable, etc...) (LAURENT 2002 : 75-76). Ensuite, les UL ont été réparties selon leur constituant dominant et leur fonction archéologique. Cette confrontation a révélé d'abord, que la majorité des UL sont limoneuses et, ensuite, que chaque fonction archéologique est représentée par des niveaux de différentes natures à des proportions spécifiques.

Cette approche est reprise dans cette étude et adaptée à l'échelle d'analyse propre aux UC. On sait que la nature du sous-sol conditionne les propriétés mécaniques mesurée. L'objectif est d'étudier les valeurs de résistance de la typologie fonctionnelle à partir de la nature lithologique des UC. Il faut donc répondre à deux questions:

- existe-il une nature lithologique propre aux types et sous-types fonctionnels ?
- peut-on caractériser la nature lithologique des UC à partir de leurs propriétés mécaniques ?

Concrètement, il s'agit, dans un premier temps, de déterminer le constituant dominant pour chacune des UC à partir des descriptions lithologiques, si les conditions de terrain le permettent, ou à partir des descriptions archéologiques, le cas échéant. Dans un deuxième temps, la répartition de la nature lithologique des UC selon les interprétations fonctionnelles est exposée. Puis, dans un troisième temps, les propriétés mécaniques des constituants dominants des UC ont été étudiées.

- Les constituants dominants des UC

Les descriptions lithologiques et archéologiques révèlent la présence de 9 constituants dominants. Les UC peuvent être de type sableux, limono-sableux, limoneux, argileux, de terre cuite, d'ardoise, de tuffeau, de calcaire ou de mortier.

- Relation entre lithologie et fonction archéologique des UC

Les UC ont été réparties par interprétation fonctionnelles en fonction de leur constituant dominant (Fig. 102). Les probabilités montrent que :

- les UC de *terre cuite* ne sont associées qu'au sol construit ; de même que les UC argileuses, de mortier et d'ardoise le sont avec les *remblais d'aménagement* et les UC de calcaire avec les *constructions en pierre* ;
- les UC limoneuses se partagent entre les *remblais d'aménagement* (43%) et de *dépotoir* (40%) ;
- les UC limono-sableuses composent essentiellement les *niveaux extérieurs* (72%) ;
- les UC sableuses constituent majoritairement les niveaux de *récupération* (58%) et de *remblai d'aménagement* (40%) ;
- les UC de tuffeau correspondent en partie à la *mise en œuvre* (57%), aux *constructions en pierre* et aux *remblais d'aménagement* (11%) ;
- les UC de *niveaux extérieurs* sont strictement limono-sableuses et celles des *dépotoirs* sont seulement limoneuses.

Ces observations montrent que certains types fonctionnels ont leur propre lithologie sur le site 16.

Probabilités		constituant									
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	terre cuite	argileux	limoneux	limono-sableux	sableux	mortier	tuffeau	calcaire	ardoise	TOTAL
Occupation extérieure		0	0	0	72,1%	0	0	0	0	0	53,1%
	Circulation	0	0	0	14,1%	0	0	0	0	0	10,4%
	Mise en culture	0	0	0	43,4%	0	0	0	0	0	32,0%
	Pacage, pâturage	0	0	0	14,6%	0	0	0	0	0	10,8%
	Friche / terrain vague	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Occupation intérieure		0	0	8,6%	2%	0	0	8,6%	0	0	2,7%
	Occupation intérieure	0	0	8,6%	2%	0	0	8,6%	0	0	2,7%
	Foyer	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Construction		100%	0	0	9,3%	0	0	68,6%	100%	0	13,1%
	Const. en pierre	0	0	0	0	0	0	11,4%	100%	0	1,5%
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Sol construit	100%	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6%
	Terre battue	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Empierrement	0	0	0	7,6%	0	0	0	0	0	5,6%
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Mise en œuvre	0	0	0	1,7%	0	0	57,1%	0	0	5,4%
Destruction		0	0	8,6%	5,9%	57,8%	0	5,7%	0	0	10,8%
	Destruction in situ	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	0	0	8,6%	5,9%	57,8%	0	5,7%	0	0	10,8%
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement		0	100%	42,9%	10,7%	42,2%	100%	17,1%	0	100%	17,4%
	obstruction	0	0	0	5,6%	2,2%	0	5,7%	0	0	4,8%
	nivellement / aménagement	0	100%	42,9%	5,1%	40,0%	100%	11,4%	0	100%	12,7%
Remblaiement/comblement d'usage		0	0	40,0%	0	0	0	0	0	0	2,9%
	comblement usage	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	dépotoir	0	0	40,0%	0	0	0	0	0	0	2,9%
Naturel anthropisé		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Naturel		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
TOTAL		100% (3)	100% (1)	100% (35)	100% (355)	100% (45)	100% (4)	100% (35)	100% (3)	100% (1)	100% (482)

Fig. 101 -Tableau des probabilités des UC par types et sous-types fonctionnels en fonction des constituants dominants

- Description des constituants dominants des UC à partir de leurs valeurs de résistance

La répartition des UC selon leur constituant dominant et les classes de médiane de Qd (Fig. 102) montre que la majorité d'entre elles ont des valeurs de résistance comprises entre 2 et 4 MPa. Ensuite, pour chaque classe de médiane, ce sont les couches limono-sableuses qui dominent.

Par ailleurs, les probabilités *a posteriori* des UC sableuses augmentent lorsque les valeurs de résistance sont croissantes. Enfin, les couches argileuses et de calcaire ont des valeurs supérieures à 4 MPa.

Probabilités	<i>A posteriori</i>				<i>A priori</i>
	classe médiane Qd				
Constituant dominant	<1 MPa	1-2 MPa	2-4 MPa	> 4 MPa	Total
terre cuite argileux		0,7%	0,5%	0,8%	0,6% (3)
limoneux	6,3%	7,2%	8,5%	5,5%	7,3% (35)
limono-sableux	81,3%	85,5%	75,0%	57,8%	73,7% (355)
sableux		3,6%	10,0%	15,6%	9,3% (45)
mortier			0,5%	2,3%	0,8% (4)
tuffeau	12,5%	2,9%	5,0%	14,8%	7,3% (35)
calcaire				2,3%	0,6% (3)
ardoise			0,5%		0,2% (1)
Total	100% (16)	100% (138)	100% (200)	100% (128)	100% (482)

Fig. 102 -Tableau de répartition des UC en fonction des constituants dominants et des classes de médiane de Qd

- Description lithologie en fonction des variables retenues pour l'ACP de l'essai 3 : l'essai 3b

Afin de mettre en relation les propriétés mécaniques, la position altimétrique et la lithologie des UC, une autre analyse factorielle (essai 3b) a été mise en œuvre à partir des variables retenues dans l'ACP de l'essai n°3. Cette fois-ci, c'est le constituant dominant qui est utilisé comme variable illustrative.

Ainsi, les modalités des constituants dominants ont été projetées dans les deux premiers plans factoriels afin d'étudier leur similitude et/ ou leur différence (Fig. 103).

On peut alors associer ces constituants dominants aux classes n°1, 3 et 4 définies à l'issue de l'ACP de l'essai 3 (Fig. 104).

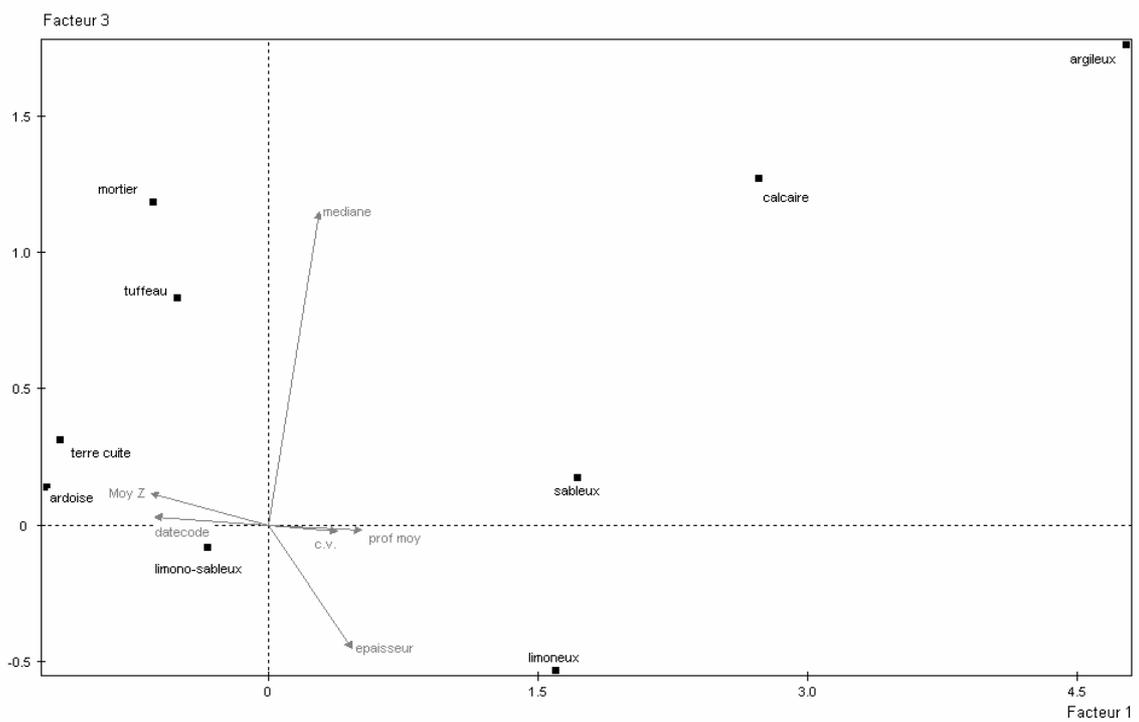
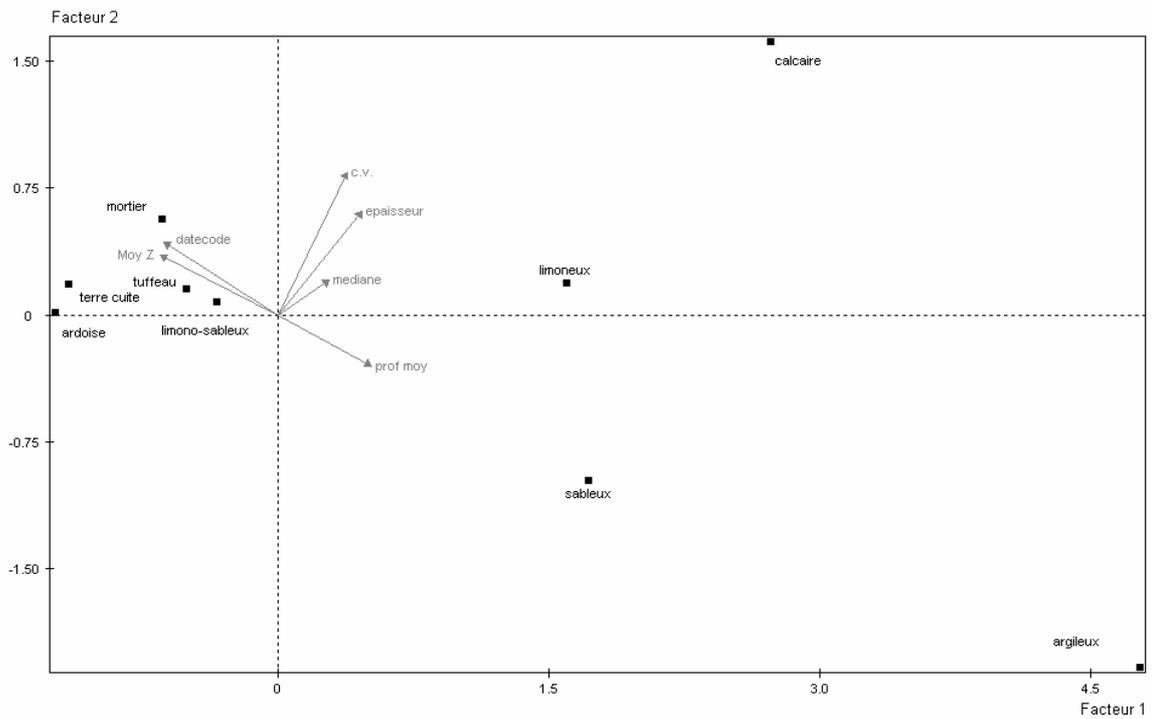


Fig. 103 - Projection des modalités de la variable interprétation dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3b.

		SITE 16 - ACP ESSAI 3			
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4
Occupation extérieure	Circulation				
	Mise en culture				
	Pacage, pâturage				
	Friche / terrain vague	--	--	--	--
Occupation intérieure	Occupation intérieure				
	Foyer	--	--	--	--
Construction	Const. en pierre				
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--
	Sol construit				
	Terre battue	--	--	--	--
	Empierrement				
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--
	Mise en œuvre				
Destruction	Destruction in situ	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération				
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction				
	nivellement / aménagement				
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage	--	--	--	--
	dépotoir				
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées	--	--	--	--
	alluvions grossières anthropisées	--	--	--	--
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--
Naturel	alluvions fines	--	--	--	--
	alluvions grossières	--	--	--	--
	Colluvions fines	--	--	--	--
	colluvions grossières	--	--	--	--
	dépôt éolien	--	--	--	--
	substrat rocheux	--	--	--	--
<i>Légende :</i> + faible ++ moyen +++ fort		<b>Profond +</b> <b>Qd ++ à +++</b> <b>c.v. ++</b>	<b>Profond ++</b> <b>Qd +</b> <b>c.v. ++</b>	<b>Profond +++</b> <b>Qd +,</b> <b>c.v. ++</b>	<b>Profond +++</b> <b>Qd +++</b> <b>c.v. +++</b>

Constituant dominant	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4
terre cuite				
argileux				
limoneux				
limono-sableux				
sableux				
mortier				
tuffeau				
calcaire				
ardoise				

Fig. 104 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP des essais 3 (en haut) et 3b (en bas)

L'attribution des constituants dominants selon les classes définies durant l'essai 3 atténue les résultats obtenus par le calcul des probabilités des interprétations fonctionnelles (Fig. 101). En effet, les niveaux argileux ne sont associés qu'aux constructions en pierre alors que le remblai d'aménagement est aussi concerné. Aussi, les niveaux sableux correspondent à la classe représentée par les remblais d'aménagements alors qu'ils sont aussi associés au niveau de récupération. Enfin, selon le plan factoriel choisi, la place des niveaux limoneux varie entre la classe 2 (premier plan) et la classe 3 (deuxième plan) ; celles-ci sont d'ailleurs très proches par leur description (profondeur moyenne à forte, Qd faible, c.v. moyen).

Au final, la confrontation de l'interprétation fonctionnelle et de la lithologie des UC révèle un référentiel plutôt complexe. Ceci reflète bien l'hétérogénéité du sous-sol en milieu urbain et la difficulté des archéologues à interpréter des niveaux spécifiques à partir de leur constitution.

- *Bilan*

En conclusion, les différentes analyses ont permis de faire le choix sur le type de données et les variables déterminantes pour constituer un référentiel. La démarche à suivre est ainsi présentée dans un schéma synthétique et sera appliquée sur les sites de comparaison (Fig. 105). Enfin, un tableau reprend les principaux résultats issus des différentes descriptions : les cases colorées en noir et en gris correspondent aux plus fortes probabilités (respectivement pour les types et les sous-types fonctionnels) (Fig. 106).

Le référentiel archeologico-mécanique basé sur l'interprétation fonctionnelle du dépôt archéologique permet de proposer des probabilités selon les critères choisis (Qd, c.v. (Qd), épaisseur, profondeur). De même, le référentiel basé sur la nature des couches permet de proposer différents constituants dominants selon les classes de résistance. Grâce au formalisme bayésien, on possède une image *a priori* des propriétés de la typologie fonctionnelle et une image *a posteriori* de la formation de la stratification du site avec des présomptions plus ou moins fortes d'interprétations fonctionnelles.

Afin de proposer d'éventuels réajustements méthodologiques, il s'est avéré nécessaire de confronter ces premiers résultats avec ceux obtenus sur des sites dans l'environnement de Tours et dans la ville de Lyon.

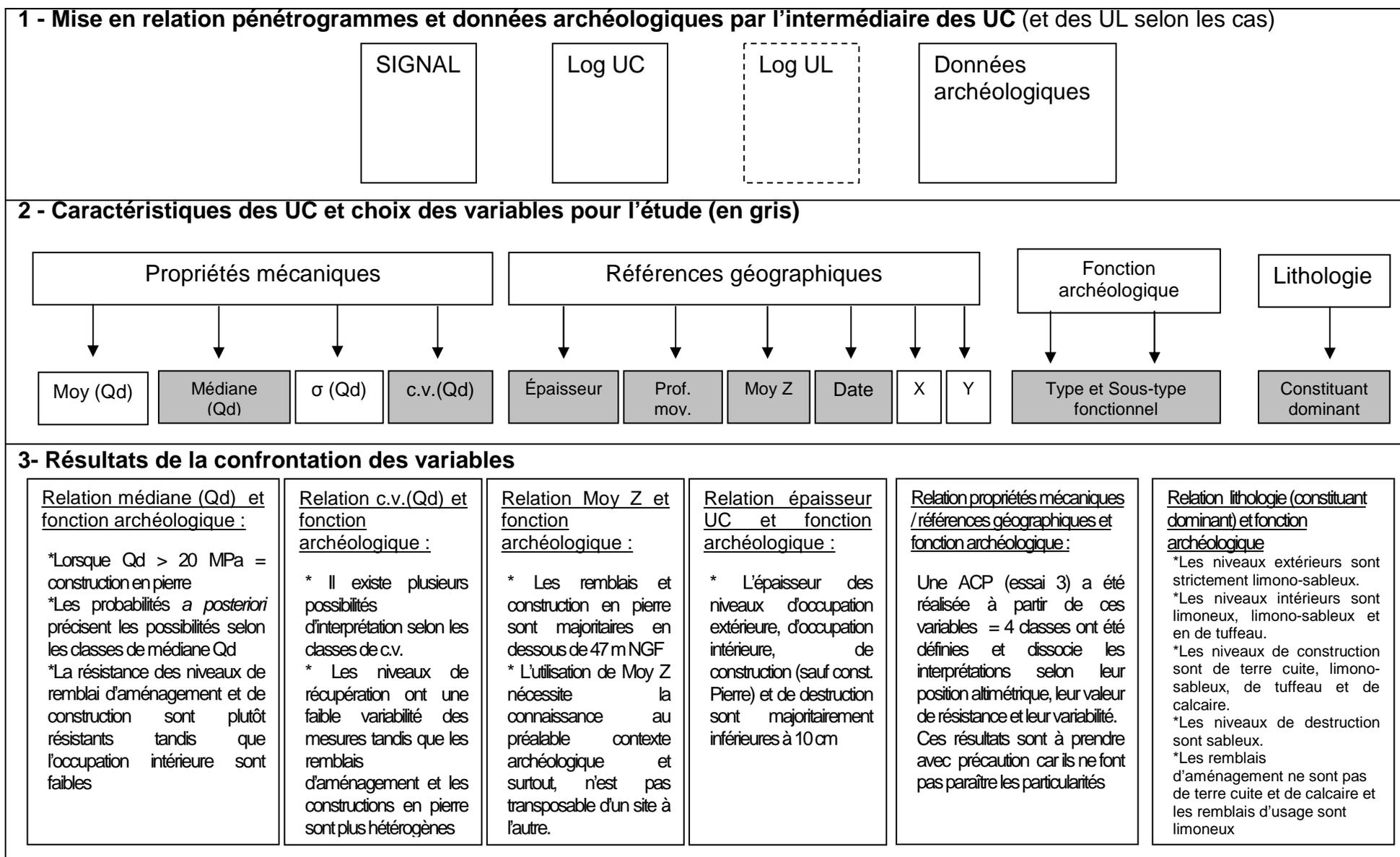


Fig. 105 – Synthèse de la méthode pour créer un référentiel archéologico-mécanique et résultats sur le site 16

		Forte probabilité pour type				Forte probabilité pour sous-type					X Pas de possibilités																							
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Classe médiane (Qd)				Classe c.v. (Qd)				classe moy Z					classe épaisseur					ACP (essai 3)				constituant dominant										
		< 1 MPa	1-2 MPa	2-4 MPa	> 4 MPa	< 0.15	0.15 - 0.29	0.29 - 0.5	> 0.5	< 46	46-47	47-48	48-49	> 49	< 3cm	3 cm - 5 cm	5 cm - 10 cm	10 cm - 20 cm	20 cm - 30 cm	> 30 cm	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	terre cuite	argileux	limoneux	limono-sableux	sableux	mortier	tuffeau	calcaire	ardoise	
Occupation extérieure	Circulation									x	x														x	x	x		x	x	x	x	x	x
	Mise en culture									x	x														x	x	x		x	x	x	x	x	
	Pacage, pâturage									x	x														x	x	x		x	x	x	x	x	
	Friche / terrain vague																																	
	Occupation intérieure	Occupation intérieure									x	x	x						x	x					x	x			x	x		x	x	
	Foyer									x	x	x						x	x					x	x			x	x		x	x		
Construction	Const. en pierre	x	x	x		x	x				x				x	x									x	x	x	x	x	x		x		
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	Sol construit									x	x	x	x		x	x	x	x	x						x	x	x	x	x	x	x	x		
	Terre battue	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	Empierrement									x	x														x	x	x		x	x	x	x		
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	Mise en œuvre									x	x	x													x	x	x		x	x		x	x	
	Destruction	Destruction in situ	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
Démantèlement / Récupération										x															x	x								
Dégradation lente / décomposition		--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction	x																						x								x		
	nivellement / aménagement	x								x					x	x								x	x	x		x		x	x			
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage	x								x	x		x	x										x	x		x	x	x	x	x			
	dépotoir	x								x	x		x	x										x	x		x	x	x	x	x			
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	alluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
Naturel	alluvions fines	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	alluvions grossières	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	Colluvions fines	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	colluvions grossières	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	dépôt éolien	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	roche	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--			

Fig. 106 -Tableau de synthèse des résultats principaux des descriptions des UC sur le site 16

## 5-2-2- Applications sur les sites de comparaison

L'objectif est de confronter les résultats obtenus sur le site 16 à ceux des sites de comparaison de Tours et de Lyon.

Les conditions d'accès aux informations archéologiques et géotechniques ont déterminé le choix de ces sites. Ainsi, les méthodes de description développées précédemment seront appliquées sur les sites 69 et 17 de la ville de Tours, le site 5MA en Indre-et-Loire et les sites L1015, L105 et L025 de la ville de Lyon.

Pour chacun des sites, des logs découpés en UC ont été restitués. Le tableau suivant présente les modalités des interprétations des UC qui apparaissent dans ces logs (Fig. 107).

Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Site 16	Site 69	Site 17	Site 5MA	Site L1015	Site L105	Site L025
Occupation extérieure	Circulation (cour, voierie)	X				X		
	Mise en culture (jardins, champs)	X						X
	Pacage, pâturage	X						
	Friche / terrain vague							
Occupation intérieure	Occupation intérieure (circulation, piétinement, rejets domestiques dans un bâtiment ou sous abris)	X						
	Foyer (résidus de foyer en place)							
Construction	Const. en pierre (mur, plot, palissade)	X					X	
	Const. en matériau périssable							
	Sol construit (Carrelage, mosaïque, dallage, béton de mortier ou d'argile)	X	X			X		
	Terre battue					X		
	Empierrement (y compris cailloutis)	X				X		
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse							
	Mise en œuvre (déchets de taille, préparation matériaux, radier, aire de gâchage)	X				X	X	
Destruction	Destruction in situ							
	Démantèlement / Récupération	X						
	Dégradation lente / décomposition							
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction	X	X	X		X		
	nivellement / aménagement (assainissement)	X	X	X	X	X	X	X
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage (fosse)		X					
	dépotoir (tas)	X						
Occupation indéterminée	occupation indéterminée (impossible de distinguer l'int. de l'ext.)							
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées (dépotoir)					X		
	alluvions grossières anthropisées (dépotoir)		X					
	colluvions fines anthropisées							
	colluvions grossières anthropisées							
Naturel	alluvions fines (sable fin, limon, argile)		X	X		X	X	
	alluvions grossières (sable grossiers, galets)		X			X		X
	Colluvions fines							
	colluvions grossières							
	dépôt éolien							X
	Roche calcaire				X			
<i>Nombre UC</i>		<b>482</b>	<b>69</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>70</b>	<b>14</b>	<b>11</b>

Fig. 107 - Tableau de synthèse des modalités des interprétations des UC retenues sur les sites étudiés

- *Application sur le site 69 (Tours – Parking Anatole France)*

Le site 69 a l'avantage d'être localisé dans la même zone que le site 16, soit sur le front de Loire et dans la partie centrale de la ville. A partir du rapport de fouille de sauvetage et de quelques relevés lithologiques, les UC ont été déterminées pour constituer les logs de 13 SP (le SP n°069.03 est inexploitable) (Annexe 142). Au total, 69 UC seront exploitées pour l'analyse fonctionnelle du dépôt archéologique (PL. 90).

- A propos de la relation entre l'altimétrie moyenne et la datation des UC

La stratification du site est particulière car elle est partagée entre des niveaux d'alluvions anthropisées, recoupés en partie par le fossé défensif. Ainsi, les remblais de ce fossé médiéval sont situés dans la même tranche altimétrique que les niveaux antiques (Fig. 108). La corrélation entre les altitudes des UC et leur datation est donc plutôt faible ( $R^2 = 55\%$ ). La position altimétrique est moins déterminante que sur le site 16.

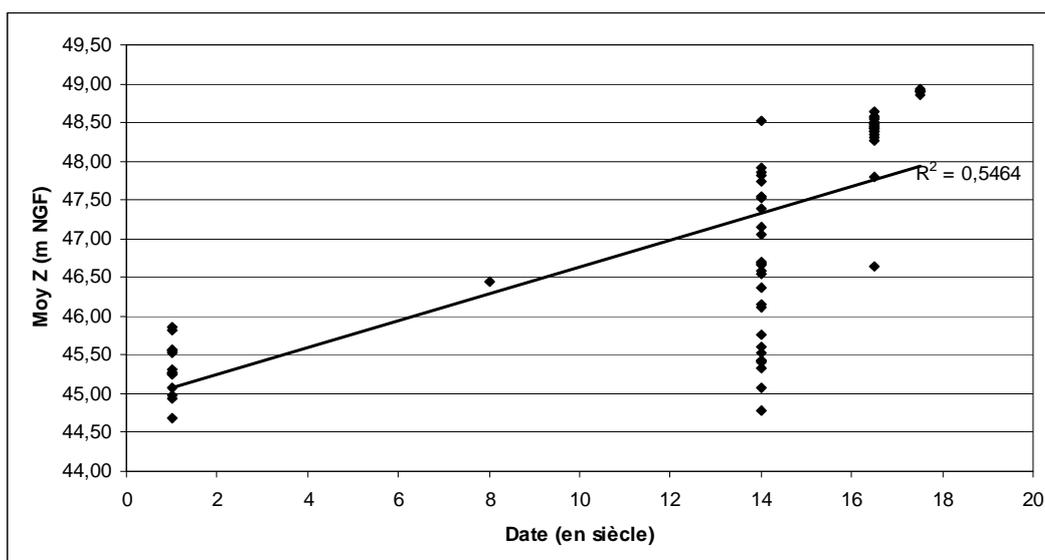


Fig. 108 - Répartition des altitudes moyennes des UC du site 69 en fonction de leur datation

- Fourchette de résistance Qd

La distribution des fourchettes de résistance (médiane Qd) des UC du site 69 montre qu'il n'y a pas d'unicité pour les sous-types fonctionnels. On observe seulement qu'au-delà de 13 MPa, les UC correspondent à des alluvions grossières. Toutefois, on ne peut pas différencier les alluvions fines des niveaux anthropiques. Il faut noter que les alluvions fines (sable fin) sont globalement moins résistantes que les alluvions grossières (graviers).

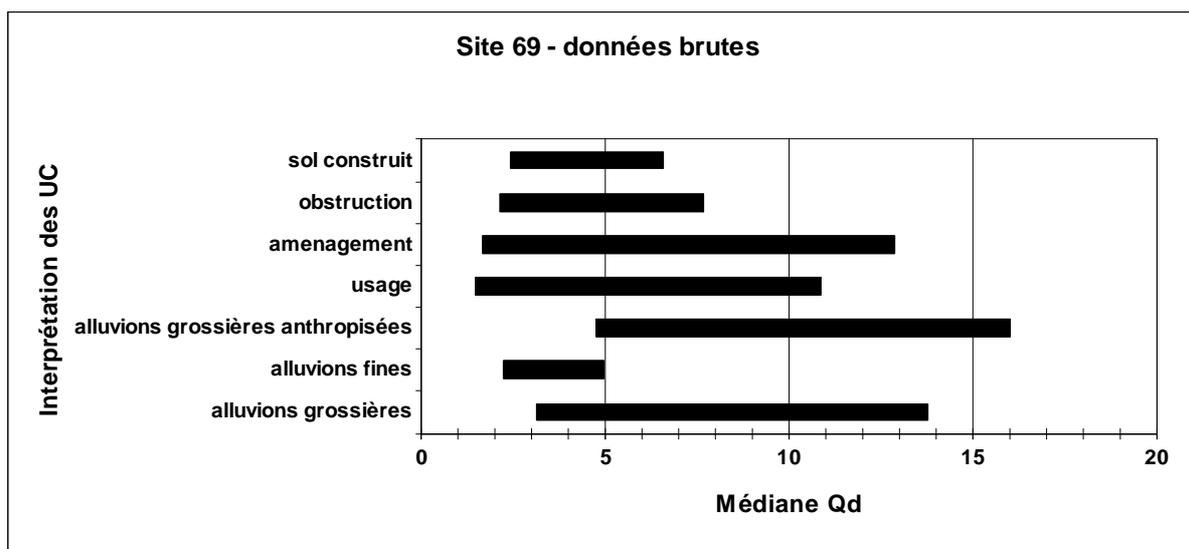


Fig. 109 - Représentation des fourchettes de résistance (médiane Qd en MPa) des UC selon leurs interprétations sur le site 69

- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leurs propriétés mécaniques

La répartition des UC par interprétation en fonction de leur valeur de résistance (médiane Qd) montre que plus de la moitié d'entre eux ont une médiane supérieure à 4 MPa (Fig. 110). Par ailleurs, il y a près de la moitié des UC qui sont des *remblais d'aménagement* pour lesquels la probabilité augmente lorsque la valeur de résistance diminue. Cette tendance est la même pour les *sols construits* mais elle s'inverse pour les *remblais d'obstruction* et les *alluvions grossières*.

Le calcul des probabilités conditionnelles montre que :

- aucune UC n'a de valeur inférieure à 1 MPa
- lorsqu'elles sont comprises entre 1 et 2 MPa, il s'agit soit d'un remblai d'aménagement ou d'usage
- lorsqu'elles sont comprises entre 2 et 4 MPa, la probabilité est plus importante pour les remblais d'aménagement (37%) puis les sols construits (22%)
- lorsqu'elles sont supérieures à 4 MPa, les remblais d'aménagement puis d'obstruction sont les plus représentés.

Par ailleurs, la répartition des UC par interprétation en fonction des classes de coefficient de variation du Qd est plus équilibrée (Fig. 110). En outre, la variabilité des mesures de résistance d'une UC de *sol construit* (c.v. < 0,15) est plus faible que les *remblais d'aménagement et d'usage* (c.v. compris entre 0,15 et 0,5) et les *remblais d'obstruction* (probabilité de 47% pour c.v. > 0,5). Enfin, les UC de *niveaux naturels* ont une probabilité plus forte d'avoir un indice de dispersion moyen.

Probabilités		A posteriori										A priori				
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	classe médiane Qd				Classe c.v. Qd				Classe épaisseur						Total
		< 1 MPa	1-2 MPa	2-4 MPa	>4 MPa	< 0,15	0,15 - 0,29	0,29-0,5	> 0,5	< 3cm	3cm - 5cm	5cm - 10cm	10cm - 20cm	20cm- 30cm	>30cm	
Occupation extérieure	Circulation	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Mise en culture	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Pacage, pâturage	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Friche / terrain vague	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Occupation intérieure	Occupation intérieure	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Foyer	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Construction	Const. en pierre	0	0	22,2%	7,5%	66,7%	5,9%	--	--	75,0%	25,0%	33,3%	--	--	--	13% (9)
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Sol construit	0	0	22,2%	7,5%	67%	5,9%	0	0	75,0%	25,0%	33,3%	0	0	0	13%(9)
	Terre battue	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Empierrement	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Mise en œuvre	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Destruction	Destruction in situ	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction	0	50,0%	48,1%	50,0%	0,25	52,9%	48,0%	66,7%	0	75,0%	66,7%	60,0%	20,0%	56,1%	49,3% (34)
	nivellement / aménagement	0	0	11,1%	22,5%	0	5,9%	16,0%	46,7%	0	0	0	20,0%	0	26,8%	17,4% (12)
		0	50,0%	37,0%	27,5%	0,25	47,1%	32,0%	20,0%	0	75,0%	66,7%	40,0%	20,0%	29,3%	31,9% (22)
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage	0	50,0%	14,8%	15,0%	0	17,6%	20,0%	20,0%	12,5%	0	0	20,0%	0	22,0%	15,9% (11)
	dépotoir	0	50,0%	14,8%	15,0%	0	17,6%	20,0%	20,0%	12,5%	0	0	20,0%	0	22,0%	15,9% (11)
Naturel anthropisé	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	0	0	0	12,5%	8,3%	11,76%	8,00%	0,00%	12,5%	0	0	20,00%	0	7,32%	7,25% (5)
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Naturel	alluvions fines	0	0	14,8%	15,0%	0	11,8%	24,0%	13,3%	0	0	0	0	80,0%	14,6%	14,5% (10)
	alluvions grossières	0	0	11,1%	10,0%	0	11,8%	16,0%	6,7%	0	0	0	0	60,0%	9,8%	10,1% (7)
	Colluvions fines	0	0	3,7%	5,0%	0	0	8,0%	6,7%	0	0	0	0	20,0%	4,9%	4,3% (3)
	colluvions grossières	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	dépôt éolien	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	substrat rocheux	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
		0%	100% (2)	100% (27)	100% (40)	100% (12)	100% (17)	100% (25)	100% (15)	100% (8)	100% (4)	100% (7)	100% (5)	100% (5)	100% (41)	100% (69)

Fig. 110 – Tableau des probabilités conditionnelles des interprétations des UC du site 69 en fonction de leurs propriétés mécaniques et de leur épaisseur

- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leur épaisseur

La distribution des UC sur site 69 selon les 6 classes d'épaisseur (Fig. 110) montre que :

- l'épaisseur des *sols construits* varie entre 0 et 10 cm avec une forte probabilité d'être inférieure à 3 cm (75%)
- l'épaisseur des *remblais d'aménagement* et d'*obstruction*, ceux d'*usage* ainsi que les alluvions grossières anthropisées est plutôt variable
- l'épaisseur des *alluvions fines et grossières* est supérieure à 20 cm, avec une forte probabilité pour la classe 20-30 cm.

On observe que la probabilité qu'une UC soit un *remblai d'obstruction et d'usage* augmente lorsque l'épaisseur est croissante. La tendance s'inverse pour les *remblais d'aménagement* et les *niveaux naturels*.

- Description des interprétations des UC à partir de l'analyse factorielle (6 variables)

Une ACP a été réalisée à partir des paramètres définis pour l'essai n° 3 du site 16 (p 250). La matrice des valeurs-test ainsi que la projection des individus dans les deux premiers plans factoriels sont présentés en annexe (Annexes 143 et 144).

Comme pour le site 16, le premier axe est expliqué par la position altimétrique, le deuxième axe, par une opposition entre médiane Qd et épaisseur, et le troisième axe, par une opposition entre profondeur moyenne et médiane Qd (Fig. 111). En outre, **le c.v. Qd des UC est moins déterminant sur le site 69 que le site 16.**

N° essai	Type d'essai	Axe 1	Axe2	Axe 3
Essai 3 – SITE 16	Valeurs brutes avec médiane (Qd) sans coordonnées X, Y	moy (Z) opposée à prof. moy. (46,55 %)	prof moy opposée à c.v. Qd (19,97%)	épaisseur opposée à médiane Qd (15,53 %)
Essai 3 – SITE 69		moy (Z) opposée à prof. moy. (41,6 %)	Médiane Qd opposée à épaisseur (24,88%)	Prof. moy. opposée à médiane Qd (13,44 %)

Fig. 111 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données de l'essai n° 3 pour les sites 16 et 69

La distribution des interprétations (variable illustrative) dans les deux premiers axes factoriels montre que les UC naturelles (alluvions fines et grossières) s'opposent aux UC de sol construit et de remblai d'aménagement (Fig. 112). Entre ces deux groupes, se situent les remblais

d'usage et d'obstruction. Ainsi, les niveaux naturels, anthropisés ou pas, forment un premier groupe caractérisé par des UC profondes à épaisseur moyenne à faible et aux valeurs de résistances élevées (Fig. 113). Puis, un deuxième groupe composé des remblais d'usage et d'obstruction correspondent à des UC moyennement profondes à forte épaisseur avec de faible à moyenne résistance. Ensuite, les remblais d'aménagement correspondent à des UC plutôt profondes avec une épaisseur moyenne et des valeurs de résistance moyenne. Enfin, les sols construits, également à part sont peu profonds et peu épais avec une résistance moyenne.

Ces descriptions ne sont que des tendances qui ne rendent pas compte des cas particuliers. En outre, la distribution des individus montre que certaines UC de remblais d'usage et d'aménagement sont associées aux alluvions fines localisées aussi en profondeur. En effet, il s'agit des UC situées au fond du fossé défensif et à la même profondeur que les niveaux naturels.

Toutefois, ces observations révèlent la possibilité de distinguer le dépôt archéologique du dépôt naturel si leur nature est plutôt grossière.

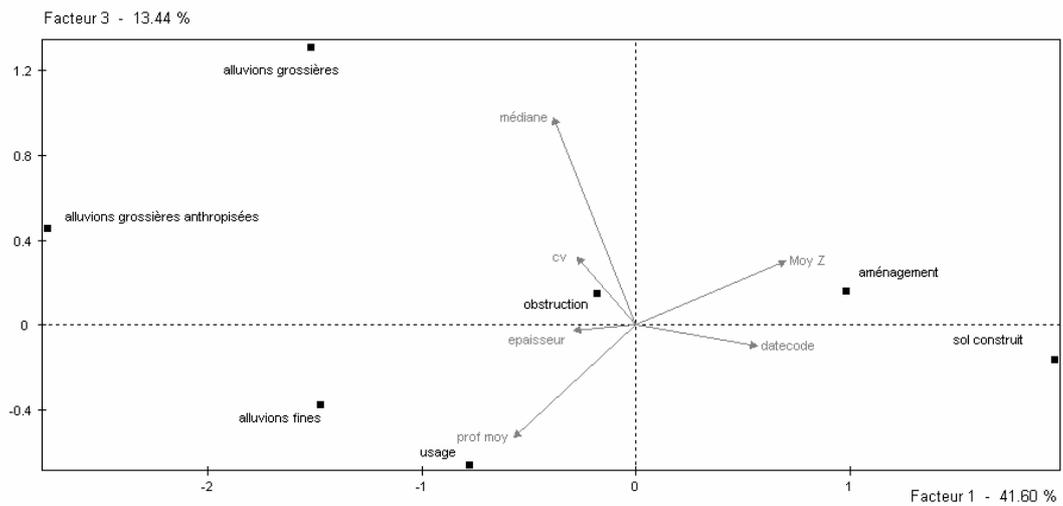
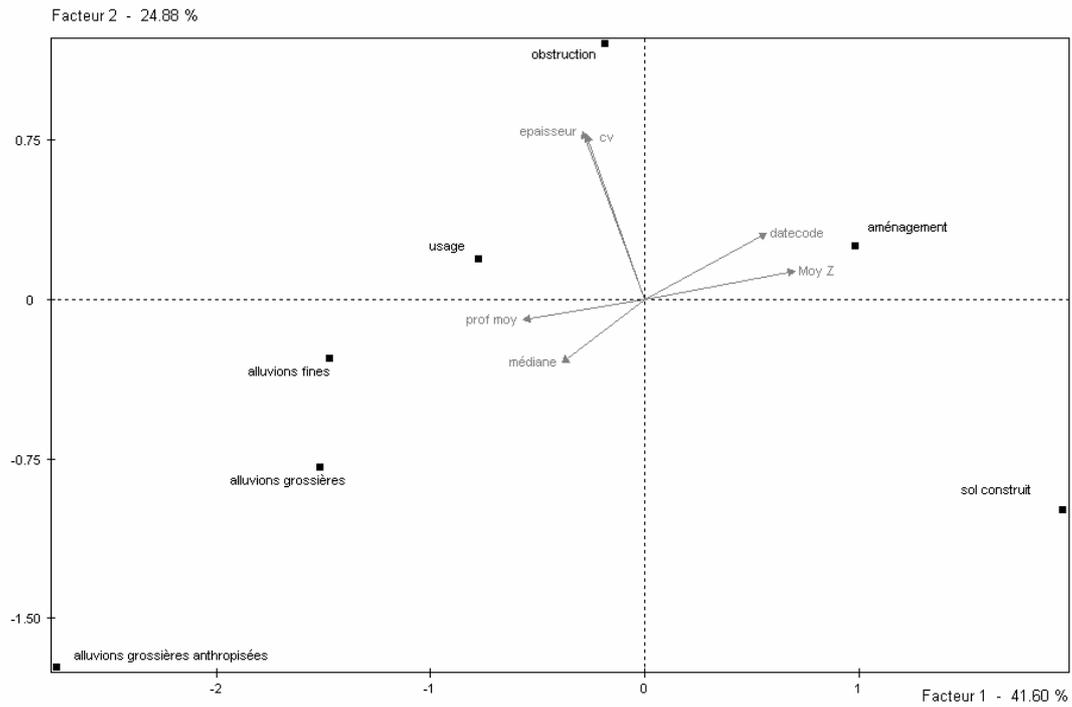


Fig. 112 - Projection des modalités de la variable interprétation dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3 pour le site 69.

		SITE 69 - ACP ESSAI 3			
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4
Occupation extérieure	Circulation	--	--	--	--
	Mise en culture	--	--	--	--
	Pacage, pâturage	--	--	--	--
	Friche / terrain vague	--	--	--	--
Occupation intérieure	Occupation intérieure	--	--	--	--
	Foyer	--	--	--	--
Construction	Const. en pierre	--	--	--	--
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--
	Sol construit				
	Terre battue	--	--	--	--
	Empierrement	--	--	--	--
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--
	Mise en œuvre	--	--	--	--
Destruction	Destruction in situ	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	--	--	--	--
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction				
	nivellement / aménagement				
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage				
	dépotoir	--	--	--	--
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées	--	--	--	--
	alluvions grossières anthropisées				
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--
Naturel	alluvions fines				
	alluvions grossières				
	Colluvions fines	--	--	--	--
	colluvions grossières	--	--	--	--
	dépôt éolien	--	--	--	--
	substrat rocheux	--	--	--	--
<i>Légende :</i> + faible ++ moyen +++ fort		<b>Profond +++</b> <b>Epaisseur ++</b> <b>Qd + à ++</b>	<b>Profond ++</b> <b>Epaisseur +++</b> <b>Qd + à ++</b>	<b>Profond +++</b> <b>Epaisseur ++</b> <b>Qd ++</b>	<b>Profond +</b> <b>Epaisseur +</b> <b>Qd ++</b>

Fig. 113 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP de l'essai 3 pour le site 69

- Mise en relation des interprétations fonctionnelles des UC avec leur lithologie

Sur le site 69, les UC sont de différentes natures : argileuse à sableuse, graveleuse et de tuffeau (Fig. 114). La répartition des constituants dominants selon les interprétations fonctionnelles est présentée en annexe (Annexe 145). Les probabilités augmentent lorsque les valeurs de résistance sont croissantes pour les UC argileuses et sablo-argileuses alors qu'elles diminuent pour les UC limoneuses, de mortier et de tuffeau.

Probabilités	A posteriori				A priori
	classe médiane Qd				
constituant dominant	< 1 MPa	1-2 MPa	2-4 MPa	> 4 MPa	TOTAL
argileux			11,1%	12,5%	11,6% (8)
sablo-argileux			7,4%	12,5%	10,1% (7)
limoneux		50%	25,9%	17,5%	21,7%(15)
sableux		50%	33,3%	35,0%	34,8% (24)
mortier			14,8%	7,5%	10,1% (7)
gravier				12,5%	7,2% (5)
tuffeau			7,4%	2,5%	4,3% (3)
<i>Total</i>	<i>0</i>	<i>100% (2)</i>	<i>100% (27)</i>	<i>100% (40)</i>	<i>100% (69)</i>

Fig. 114 - Tableau des probabilités conditionnelles des constituant dominant des UC du site 69 en fonction de leur classe de résistance

En conclusion, le site 69 présente des points communs avec le site 16 :

- la non unicité des propriétés mécaniques des interprétations fonctionnelles ;
- les variables « profondeur » et « médiane Qd » qui permettent de discriminer les interprétations fonctionnelles ;
- la formation de 2 classes statistiques qui différencient les UC de *remblai d'aménagement* et les UC de *remblai d'obstruction et d'usage*.

De plus, l'analyse factorielle des UC du site 69 à partir des 6 variables (*Z* moyen, profondeur, médiane Qd, c.v. Qd, épaisseur, datecode) permet de dissocier les niveaux anthropiques des niveaux naturels.

Les UC des sites 17 et 5MA ont des points communs d'un point de vue lithologique avec celles les sites 16 et 69. Toutefois, leur faible effectif limite les analyses statistiques. C'est pourquoi, les caractéristiques des interprétations fonctionnelles des UC des sites 17 et 5MA sont présentés en annexe (Annexes 146 et 147). Elles seront intégrées à l'étude globale des sites.

- *Application sur le site L1015 (Lyon – rue Mgr Lavarenne)*

Le site L1015 (Lyon) est localisé dans un contexte similaire aux sites 16 et 69 de Tours, sur le front de la Saône et à l'emplacement d'un ancien bras de la rivière entre la colline de Fourvière et une ancienne île.

Ainsi, 70 UC ont été restituées à l'aide des observations de terrain et de relevés lithologiques à partir de 13 SP (Pl. 91, Annexe 148).

- A propos de la relation entre l'altimétrie moyenne et la datation des UC

Deux éléments d'observations permettent de démontrer qu'il est difficile de corrélérer la position altimétrique des UC et leur datation (Fig. 117). D'abord, la topographie du toit du niveau naturel (alluvions) mis au jour sur le site présente un pendage vers le sud. Ensuite, pour les niveaux médiévaux et modernes, les UC sont situées à la fois en contexte intérieur (niveau de cave) et extérieur (rue) à des bâtiments. Comme sur le site 69, la variable Moy Z est difficile à exploiter seule sans connaissance au préalable du contexte historique.

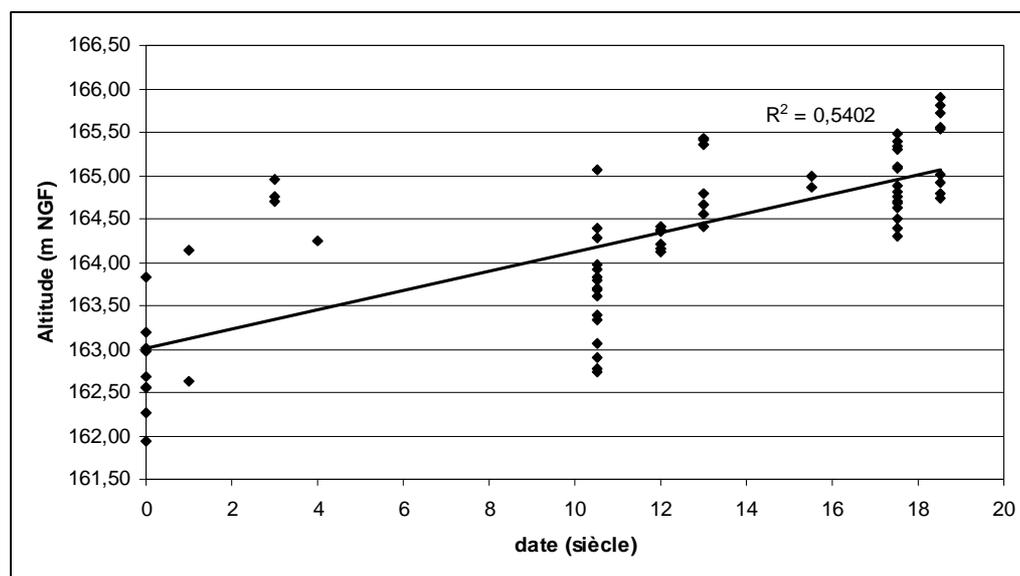


Fig. 115 - Répartition des altitudes moyennes des UC en fonction de leur datation

- Fourchette de résistance

La distribution des fourchettes de résistance montre plusieurs possibilités en dessous de 11 MPa (Fig. 117). On retiendra, qu'au dessus de 11 MPa, une UC peut être un remblai d'aménagement ou un niveau de circulation. Leur fourchette est d'ailleurs très étendue.

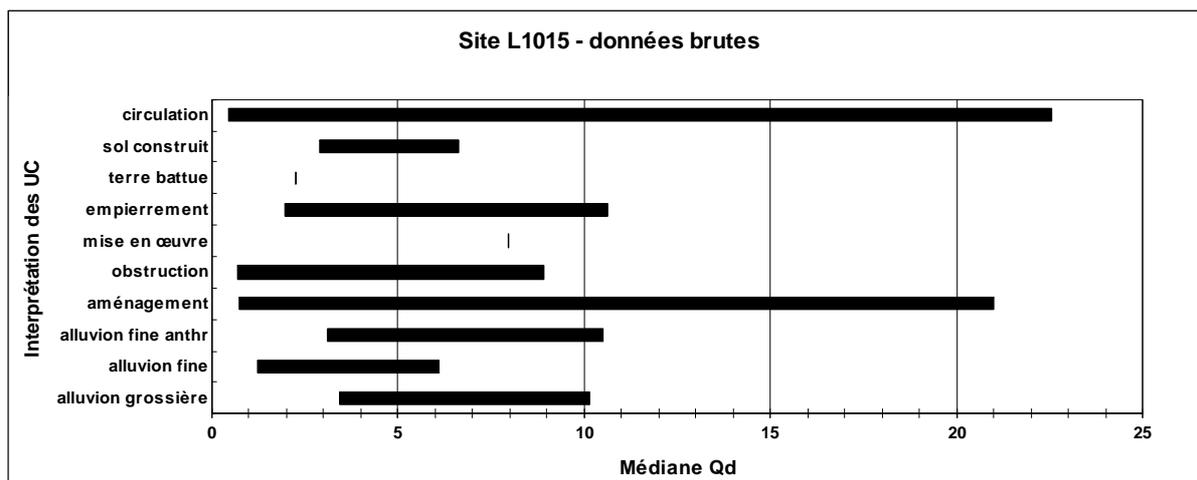


Fig. 116 - Représentation des fourchettes de résistance (médiane Qd en MPA) des UC selon leurs interprétations sur le site L1015

- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leurs propriétés mécaniques

Sur le site de la rue Mgr Lavarenne, près de la moitié des UC ont des valeurs de résistance supérieures à 4 MPa (46% des effectifs) (Fig. 117). On observe que les probabilités *a posteriori* augmentent pour les UC de *construction* lorsque les valeurs de résistance sont croissantes. Par contre, les probabilités diminuent pour les UC de *remblai d'aménagement et d'obstruction*.

Par ailleurs, plus de la moitié des UC correspondent à des remblais d'aménagement. Leur répartition au sein des 4 classes de résistance montre que la probabilité d'être une UC de *remblais d'aménagement* est forte pour chaque classe, notamment pour les deux premières (> 75%). Ensuite, lorsque la médiane est comprise entre 2 et 4 MPa, ce sont les *niveaux naturels* qui apparaissent en deuxième possibilité. Enfin, lorsque les valeurs sont supérieures à 4 MPa, ce sont les *niveaux extérieurs* (circulation) qui apparaissent en deuxième position.

L'indice de dispersion présente aussi plusieurs possibilités suivant les 4 classes. On retient que les présomptions d'être une UC de construction diminuent lorsque le c.v. Qd augmente alors que la tendance s'inverse pour les remblais d'aménagement.

Ainsi, les classes des propriétés mécaniques ne permettent pas de dissocier nettement les niveaux naturels des niveaux archéologiques.

Probabilités		A posteriori														A priori
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	classe médiane Qd				classe c.v. Qd				épaisseur						Total
		< 1 MPa	1-2 MPa	2-4 MPa	> 4 MPa	<0,15	0,15 - 0,29	0,29-0,5	> 0,5	< 3cm	3cm - 5cm	5cm - 10cm	10cm - 20cm	20cm - 30cm	> 30cm	
Occupation extérieure		25%		8,3%	25%	14,3%	20%	18,2%	12,9%	28,6%	20%	22%	14,3%	25%	4,3%	15,7% (11)
	Circulation	25%		8,3%	25%	14,3%	20%	18,2%	12,9%	28,6%	20%	22%	14,3%	25%	4,3%	15,7% (11)
	Mise en culture	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Pacage, pâturage	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Friche / terrain vague	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Occupation intérieure	Occupation intérieure	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Foyer	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Construction			10%	12,5%	15,6%	42,9%	30%	9,1%	3,2%	28,6%	40%	22,2%	7,1%	16,7%		12,9% (9)
	Const. en pierre	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Sol construit			4,2%	3,1%			10%	4,5%			11%	7,1%			2,9% (2)
	Terre battue			4%		14,3%				14%						1% (1)
	Empierrement		10%	4,2%	9,4%	28,6%	20,0%	4,5%		14,3%	40%	11,1%		8,3%		7,1% (5)
Destruction	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Mise en œuvre				3,1%				3,2%					8,3%		1,4% (1)
	Destruction in situ	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement	Démantèlement / Récupération	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	obstruction	75%	80%	54,2%	43,8%	28,6%	40%	50%	67,7%	28,6%	40%	56%	42,9%	58,3%	69,6%	54,3% (38)
Remblaiement/comblement d'usage	nivellement / aménagement	25%	20%	8,3%	6,3%			13,6%	12,9%			11%	7,1%	8,3%	17,4%	10,0% (7)
	dépotoir	50%	60%	45,8%	37,5%	28,6%	40%	36,4%	54,8%	28,6%	40%	44%	35,7%	50%	52,2%	44,3% (3)
Naturel anthropisé	comblement usage	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	dépotoir	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
				4,2%	6,3%	14,3%			6,5%	14,3%					8,7%	4,3% (3)
	alluvions fines anthropisées			4,2%	6,3%	14,3%			6,5%	14,3%					8,7%	4,3% (3)
	alluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Naturel	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
			10%	20,8%	9,4%		10%	22,7%	9,7%				35,7%		17,4%	12,9% (9)
	alluvions fines		10%	16,7%	3,1%			18,2%	6,5%				14,3%		17,4%	8,6% (6)
	alluvions grossières			4,2%	6,3%			10%	4,5%	3,2%			21,4%			4,3% (3)
	colluvions fines	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	colluvions grossières	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	dépôt éolien	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
substrat rocheux	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
		100% (4)	100% (10)	100% (24)	100% (32)	100% (7)	100% (10)	100% (22)	100% (31)	100% (7)	100% (5)	100% (9)	100% (14)	100% (12)	100% (23)	100% (70)

Fig. 117 – Tableau des probabilités conditionnelles des interprétations des UC du site L1015 en fonction de leurs propriétés mécaniques et de leur épaisseur

- Description des interprétations fonctionnelles des UC à partir de leurs épaisseurs

On observe que seuls les niveaux extérieurs et les remblais d'aménagement sont représentés dans les 6 classes d'épaisseurs. Le formalisme bayésien révèle que les probabilités des remblais d'aménagements augmentent en fonction de l'épaisseur.

Malgré les faibles effectifs, on note que :

- l'épaisseur d'une UC comprise entre 3 et 5 cm ne peut être que du remblai d'aménagement (40%), de l'empierrement (40%) et de la circulation (20%) ;
- l'épaisseur du sol construit varie entre 5 et 20 cm ;
- l'épaisseur d'un remblai d'obstruction est supérieure à 5 cm.

- Description des interprétations des UC à partir de l'analyse factorielle (6 variables)

Une analyse factorielle a été réalisée à partir des critères retenus sur le site 16 (médiane Qd, c.v. Qd, moy Z, prof. moy., épaisseur, datecode) afin de mettre en évidence des corrélations et d'étudier la répartition des UC selon leur interprétations (Annexes 149). **Les variables qui expliquent la formation des 2 premiers axes sont les mêmes pour les 2 sites** (Fig. 118). En outre, la datation des UC est plus déterminante que l'épaisseur pour expliquer la formation de l'axe 3 pour le site L1015.

N° essai	Type d'essai	Axe 1	Axe2	Axe 3
Essai 3 – SITE 16	Valeurs brutes avec médiane (Qd) sans coordonnées X, Y	moy (Z) opposée à prof. moy. (46,55 %)	prof moy opposée à c.v. Qd (19,97%)	épaisseur opposée à médiane Qd (15,53 %)
Essai 3 – SITE L1015		moy (Z) opposée à prof. moy. (44,88 %)	prof moy opposée à c.v. Qd (23,54%)	datecode opposée à médiane Qd (15,74 %)

Fig. 118 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données de l'essai n° 3 pour les sites 16 et 69

La projection des modalités des interprétations des UC du site L1015 dans les deux premiers plans factoriels permet de les regrouper selon différents critères (Fig. 119, Fig. 120, Fig. 121) :

- les niveaux de circulation et de mise en œuvre qui sont peu profonds et qui ont des valeurs de résistance faible avec une forte variabilité

- les niveaux d'empierrement, de sol construit et de remblai d'aménagement qui sont peu profonds et qui ont des valeurs de résistance moyenne à forte avec une faible variabilité

- les niveaux de remblais d'obstruction et d'alluvions fines anthropisées qui sont moyennement profonds et qui ont des valeurs de résistance moyenne avec une variabilité moyenne à forte

- les alluvions fines et grossières qui sont très profondes et qui ont des valeurs de résistance moyenne à forte avec une variabilité moyenne à forte.

L'UC de terre battue est mise à part car elle ne possède qu'une seule mesure (un coup de marteau) qui engendre un c.v. nul et une faible épaisseur.

Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Code couleur
Occupation extérieure	circulation	
construction	sol construit	
	Terre battue	
	Empierrement	
	Mise en oeuvre	
remblai aménagement	obstruction	
	aménagement	
Naturel anthropisé	Alluvions fines anthropisées	X
Naturel	Alluvions fines	A
	Alluvions grossières	A

Fig. 119 - Légende des interprétations représentées sur le site 69

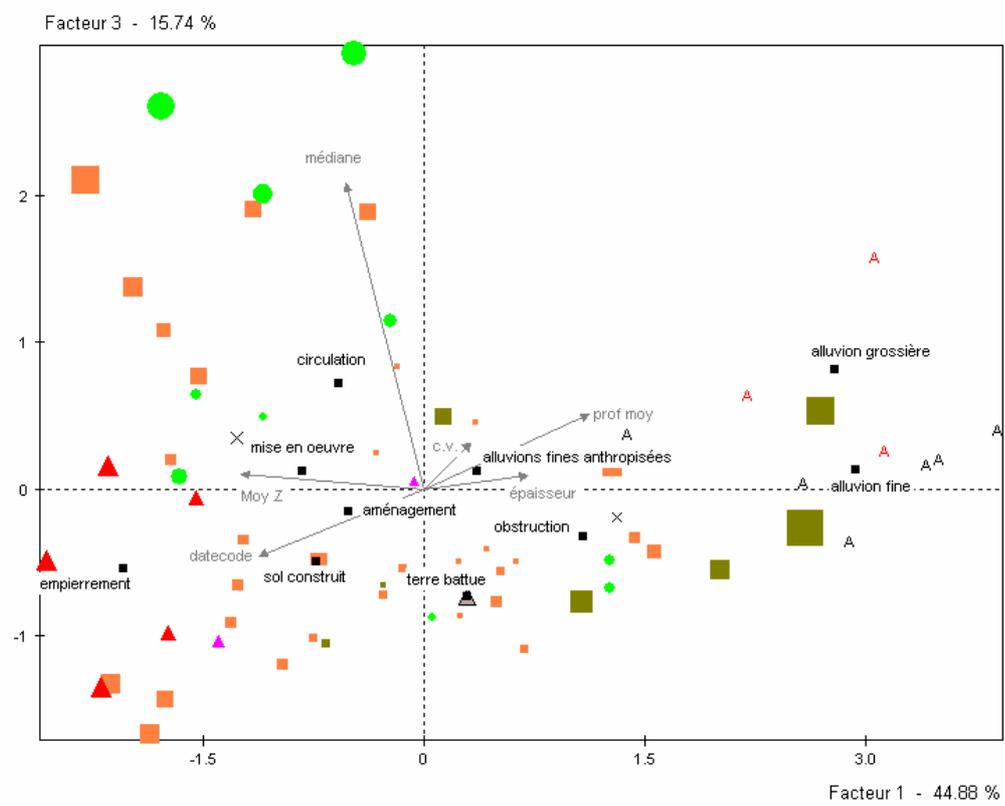
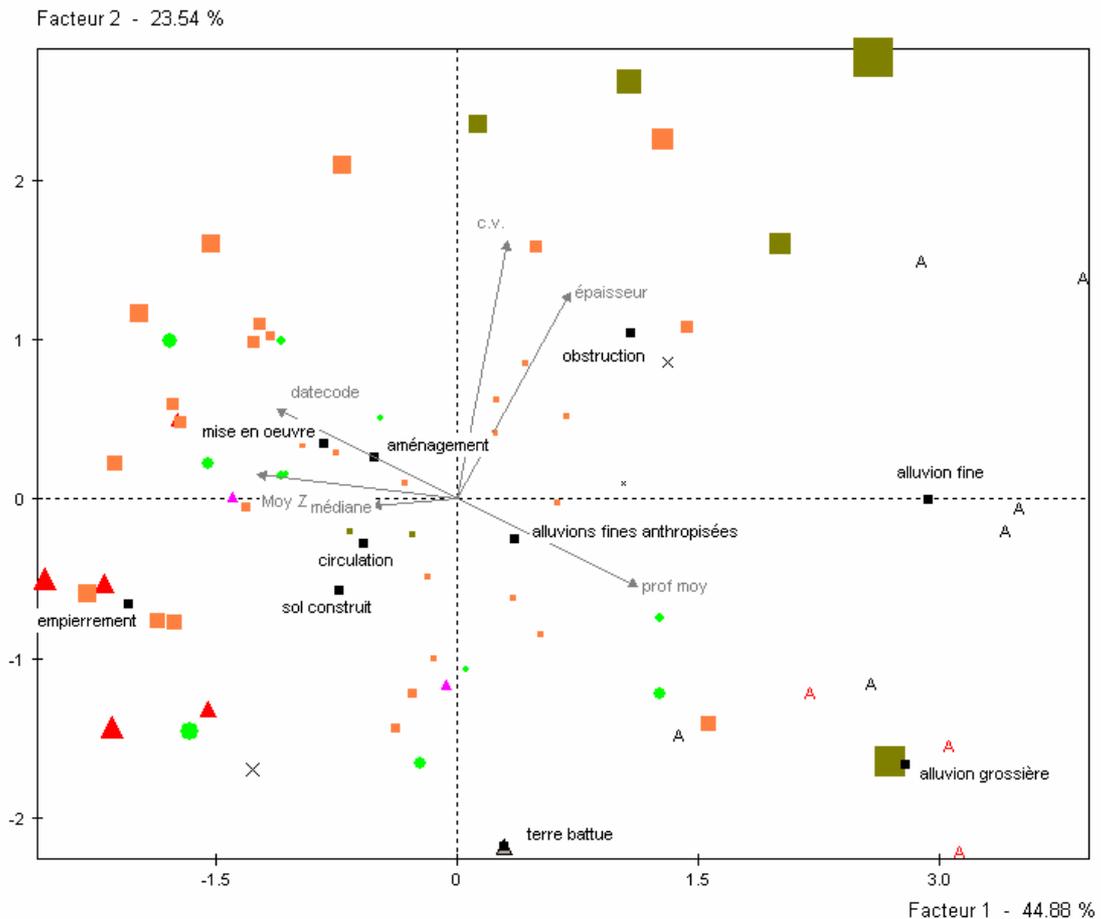


Fig. 120 - Projection des modalités de la variable sous-type fonctionnel et des UC dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3 pour le site L1015.

		SITE L1015 - ACP ESSAI 3			
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4
Occupation extérieure	Circulation				
	Mise en culture	--	--	--	--
	Pacage, pâturage	--	--	--	--
	Friche / terrain vague	--	--	--	--
Occupation intérieure	Occupation intérieure	--	--	--	--
	Foyer	--	--	--	--
Construction	Const. en pierre	--	--	--	--
	Const. en matériau périssable	--	--	--	--
	Sol construit				
	Terre battue	--	--	--	--
	Empierrement				
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	--	--	--	--
	Mise en œuvre				
Destruction	Destruction in situ	--	--	--	--
	Démantèlement / Récupération	--	--	--	--
	Dégradation lente / décomposition	--	--	--	--
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction				
	nivellement / aménagement				
Remblaiement/comblement d'usage	comblement usage	--	--	--	--
	dépotoir	--	--	--	--
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées				
	alluvions grossières anthropisées	--	--	--	--
	colluvions fines anthropisées	--	--	--	--
	colluvions grossières anthropisées	--	--	--	--
Naturel	alluvions fines				
	alluvions grossières				
	Colluvions fines	--	--	--	--
	colluvions grossières	--	--	--	--
	dépôt éolien	--	--	--	--
	substrat rocheux	--	--	--	--
<i>Légende :</i> + faible ++ moyen +++ fort		<b>Profond +</b> <b>Qd +</b> <b>c.v. +++</b>	<b>Profond +</b> <b>Qd ++ à +++</b> <b>c.v. +</b>	<b>Profond ++</b> <b>Qd ++</b> <b>c.v. ++ à +++</b>	<b>Profond +++</b> <b>Qd ++ à +++</b> <b>c.v. ++ à +++</b>
		<i>Description classes</i>			

Fig. 121 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP de l'essai 3 pour le site L1015

- Mise en relation des interprétations fonctionnelles des UC avec leur lithologie

La constitution des UC étudiées sur le site L1015 est de nature variée : argileuse à sableuse, de graviers, de terre cuite, de mortier et de schiste. La répartition des UC en fonction des constituants dominants et des interprétations fonctionnelles est présentée en annexe (Annexe 150).

Les couches sont majoritairement sableuses, argileuses et argilo-sableuses (Fig. 122). On observe que les UC de terre cuite et limoneuses ont des médianes (Qd) inférieures à 4 MPa et que l'UC de schiste a une médiane supérieure à 4 MPa. Enfin, pour chacune des classes de médiane, il existe plusieurs possibilités. Il faut noter que la probabilité qu'une UC soit limono-sableuse diminue lorsque les valeurs de résistance augmentent. Toutefois, comme pour les autres sites, les UC très résistantes ont une forte probabilité d'être sableuse.

Probabilités	<i>A posteriori</i>				<i>A priori</i>
	Classe médiane Qd				
Constituant dominant	< 1 Mpa	1-2 Mpa	2-4 Mpa	> 4 Mpa	Total
terre cuite		10%	8,3%		4,3%
argileux	25%	20%	29,2%	9,4%	18,6%
argilo-sableux		10%	25%	15,6%	17,1%
limoneux	25%		4,2%		2,9%
limono-sableux		20%	8,3%	3,1%	7,1%
sableux	25%	20%	16,7%	40,6%	28,6%
gravier	25%		4,2%	6,3%	5,7%
mortier		10%		12,5%	7,1%
galets		10%	4,2%	9,4%	7,1%
schiste				3,1%	1,4%
Total	100%(4)	100%(10)	100%(24)	100%(32)	100%(70)

Fig. 122 - Tableau des probabilités conditionnelles des UC par constituant dominant en fonction des classes de médiane (Qd)

En conclusion, le site L1015 possède des traits communs aux sites 16 et 69 de Tours :

- la non unicité des propriétés mécaniques des interprétations fonctionnelles ;
- la discrimination des interprétations fonctionnelles par les variables « profondeur », « médiane Qd » et « c.v Qd » ;
- la forte corrélation entre les variables « Moy Z » et « datecode »
- la forte corrélation entre les variables « épaisseur » et « c.v. Qd » ;
- la ressemblance des UC de *circulation* avec celles de *mise en œuvre* ;
- la différenciation entre les UC de *remblai d'obstruction* et les remblais *d'aménagements* ;

Comme sur le site 69, l'analyse factorielle permet de dissocier les niveaux anthropiques des niveaux naturels.

La ressemblance des plans factoriels des ACP des 3 sites montre qu'il est pertinent de réaliser une ACP globale de l'ensemble des sites.

- *Analyse globale des interprétations fonctionnelles des sites étudiés*

- Classification des interprétations fonctionnelles

L'ensemble des UC de qualité 2 des sites 16, 17, 69, 5MA, L1015, L105 et L025 a été regroupé afin d'étudier globalement les interprétations fonctionnelles. Une analyse factorielle (ACP) a été réalisée à partir des 659 UC décrites par les variables : médiane Qd, c.v. Qd, épaisseur, profondeur moyenne et datation. Cet essai (n°4) correspond aux conditions de l'essai 3 sans la variable « Moy Z ».

Les cercles de corrélation des deux premiers plans factoriels (Fig. 123) et les valeurs-tests (Annexe 153) montrent une forte corrélation entre les variables « épaisseur » et « c.v. Qd » ainsi qu'entre les variables « épaisseur » et « médiane Qd ».

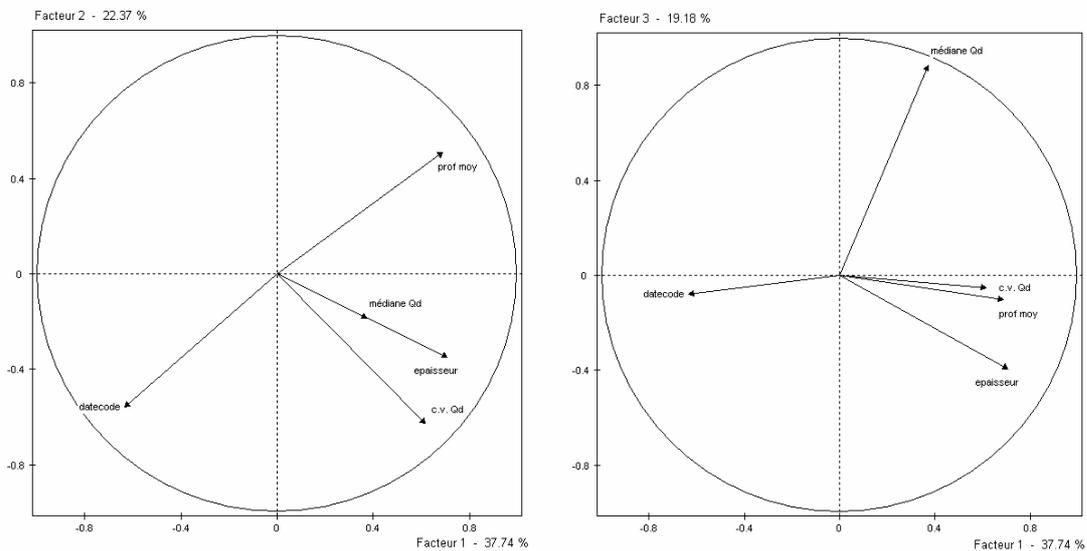


Fig. 123 - Cercle des corrélations des variables de l'essai 4 selon les deux plans factoriels

Les variables qui contribuent le plus à la formation des axes sont l'épaisseur, le c.v. (Qd) et la médiane Qd (Fig. 124).

N° essai	Type d'essai	Axe 1	Axe2	Axe 3
Essai 4 (tous les sites)	Valeurs brutes avec médiane (Qd) sans coordonnées X, Y, Z	épaisseur opposée à datecode (37,74 %)	Prof. moy opposée à c.v. (Qd) (22,37%)	Médiane Qd opposée à épaisseur (19,18%)
Essai3 (site 16 – 482 UC)	Valeurs brutes avec médiane (Qd) sans coordonnées X, Y	moy (Z) opposée à prof. moy. (46,55 %)	prof moy opposée à c.v. (Qd) (19,97%)	épaisseur opposée à médiane Qd (15,53 %)
Essai3 (site 69 – 69 UC)		moy (Z) opposée à prof. moy. (41,6 %)	Médiane Qd opposée à épaisseur (24,88%)	Prof. moy. opposée à médiane Qd (13,44 %)
Essai3 (site L1015 – 70 UC)		moy (Z) opposée à prof. moy. (44,88 %)	prof moy opposée à c.v. (Qd) (23,54%)	datecode opposée à médiane Qd (15,74 %)

Fig. 124 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données de l'essai n° 4 (tous les sites) et de l'essai n°3 des sites 16, 69 et L1015

La projection des individus dans le premier axe factoriel montre que les UC de niveaux naturels sont associés à celles de remblais d'aménagement et de constructions (Pl. 92).

Pour simplifier la lecture, on a projeté les modalités des sous-types fonctionnels dans les deux premiers plans factoriels (barycentre) (Fig. 125). Les sous-types fonctionnels sont regroupés selon différents paramètres (Pl. 93) :

- les UC de *circulation*, de *mise en culture*, d'*occupation intérieure*, de *sol construit*, de *terre battue* et de *mise en œuvre* qui sont caractérisés par une faible épaisseur, une faible profondeur, une faible variabilité interne et une résistance Qd faible à moyenne ;

- les UC de *pacage*, d'*empierrément*, de *récupération* et de *dépotoir* qui correspondent à des niveaux d'épaisseur faible à moyenne, d'une profondeur faible à moyenne, d'une variabilité interne faible à moyenne et d'une résistance Qd faible à moyenne ;

- les UC de *remblais d'aménagement* et d'*alluvions fines anthropisées* qui ont une épaisseur moyenne, une profondeur faible à moyenne, une variabilité interne moyenne et une résistance Qd faible à moyenne ;

- les UC de *remblai d'obstruction* et les *comblements d'usage* qui sont décrites par une épaisseur moyenne à forte, une profondeur moyenne à forte, une variabilité interne moyenne à forte et une résistance Qd ;

- les UC de *construction en pierre*, d'*alluvions grossières anthropisées*, d'*alluvions fines*, d'*alluvions grossières*, de *dépôt éolien* et de *substrat rocheux* (argile à silex) qui ont une épaisseur moyenne à forte, une forte profondeur, une variabilité interne moyen à fort et une résistance Qd moyen à fort.

Au final, **cette classification manuelle permet de distinguer les couches archéologiques des formations naturelles.**

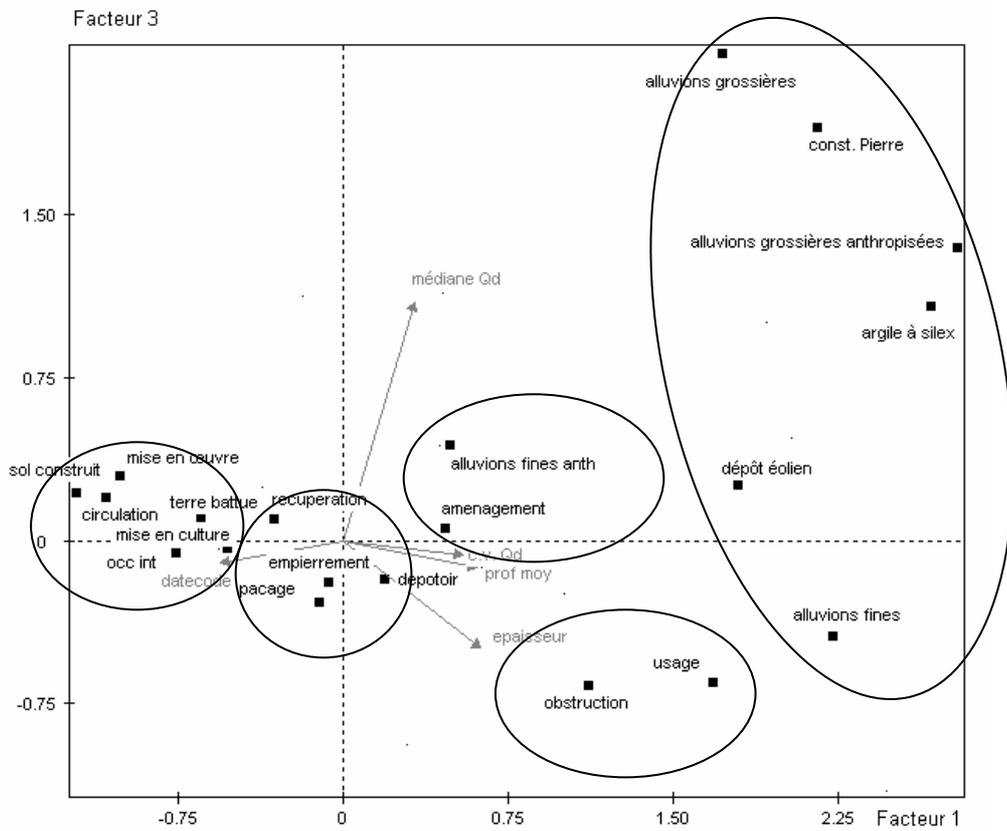
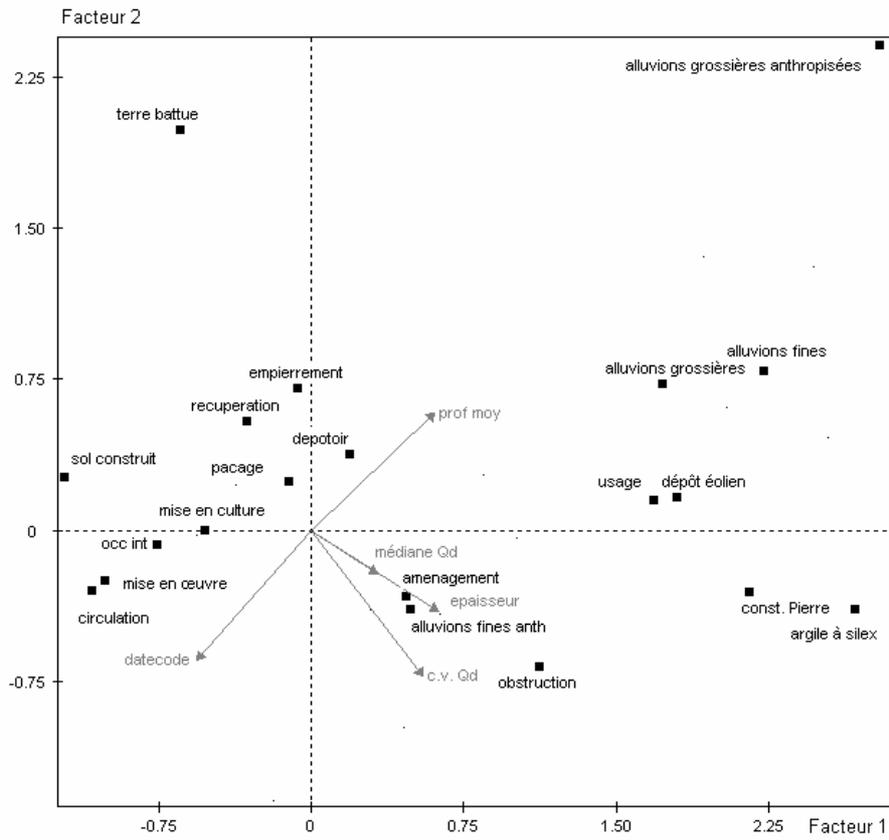


Fig. 125 -Projection des modalités de la variable sous-type fonctionnel dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 4

### 5-2-3- Résultats et limites de la mise en place du référentiel archéologico-mécanique

La démarche pour élaborer un référentiel archéologico-mécanique a été mise en place à partir du site de Saint-Julien à Tours. L'objectif était de mettre en relation les observations archéologiques et les données pénétrométriques par l'intermédiaire de l'Unité Contextuelle (UC). L'UC est alors associée à l'Unité Lithologique lorsque le relevé détaillé des coupes traversées par le PANDA a été possible. En outre, des variables liées aux propriétés mécaniques et à la situation géographique des UC ont été retenues afin de discriminer les interprétations fonctionnelles des niveaux archéologiques et naturels.

La description statistique a été développée pour les sites 16, 69 et L1015. Lorsque le nombre d'individu (UC) était trop faible (site 17, 5MA, L105 et L025), l'analyse a été simplifiée car il n'est pas envisageable d'effectuer une ACP.

Les résultats principaux sont présentés suivant le double-objectif de l'évaluation d'un site archéologique, d'une part, la distinction du dépôt archéologique et du niveau naturel, et d'autre part, le découpage en tranche distincte du dépôt archéologique et des niveaux naturels. Ils seront confrontés aux hypothèses présentées dans le 1<sup>er</sup> chapitre.

Enfin, un dernier point doit être abordé celui de l'application du référentiel d'un site à l'autre, et à autre échelle, d'une ville à l'autre.

#### • *Distinction du dépôt archéologique et des niveaux naturels*

L'étude descriptive des UC montre qu'il est possible de distinguer le dépôt archéologique des niveaux naturels à deux conditions :

- une connaissance au préalable du contexte historique et archéologique qui permet d'avancer une hypothèse sur la cote du toit du niveau naturel et une épaisseur moyenne du dépôt ;
- la présence de niveaux naturels qui sont constitués d'éléments grossiers (graviers, galets) ou d'argile. Ils sont situés à une profondeur importante et ont des propriétés mécaniques élevées.

Seul le site 16 ne fournit pas d'UC naturelles. Le site étant localisé dans une zone de la ville mal documentée, le postulat situait la cote du toit du niveau naturel (alluvions) entre 45 et 47 m NGF. Or, la fouille a révélé qu'elle se situait plus bas, en moyenne vers 44,5 m NGF. Ainsi, peu de SP ont été exécutés au dessous de 45 NGF et ils ne sont pas localisés à proximité d'une coupe de référence qui aurait permis de constituer des UC naturelles de qualité « 2 ».

Pour le site 69, à l'aide des connaissances du site 16 et du site 3 ainsi que des sondages géotechniques traditionnels, les archéologues s'attendaient à voir apparaître les alluvions vers 44,5 m NGF ; ce qui a été validé par la fouille. En outre, l'ACP (essai 3) permet de dissocier les alluvions fines et grossières (anthropisées ou pas) du dépôt archéologique par le fait qu'elles sont profondes, moyennement épaisses et de résistance moyenne. De plus, la nature du constituant dominant (argile et sable grossier) engendre pour certaines UC de fortes valeurs de résistances non atteintes par les dépôts archéologiques (> 13 MPa).

Sur le site 17, il était difficile de poser une hypothèse sur l'emplacement des alluvions ligériennes car on s'attendait à avoir des niveaux médiévaux (cimetière habité) sous les remblais modernes mis au jour. Toutefois, des alluvions (sables fins) ont été découvertes aux alentours de 47 m NGF. Les analyses descriptives ne permettent pas de les dissocier des niveaux archéologiques de lithologie voisine.

Sur le site 5MA, localisé dans un contexte géomorphologique différent des sites tourangeaux (coteau en bord de Loire), les sondages géotechniques traditionnels réalisés autour de la pile permettaient de connaître la nature du sous-sol (tuffeau) mais apportaient peu d'information sur l'épaisseur du dépôt archéologique. La fouille a apportée plus de précision sur la constitution du sol naturel : du tuffeau recouvert de marne calcaire / argile à silex sur les hauteurs. Seules les argiles à silex ont été intégrées dans le référentiel (UC de qualité « 2 »).

En outre, il est possible de distinguer le substrat rocheux (argile à silex) et les niveaux archéologiques sur un pénétrogramme car les valeurs de résistance sont plus élevées pour le niveau naturel.

Sur les sites 72 et 77, les alluvions ont été atteintes (Annexe 111 et 112) mais ne se distinguent pas clairement sur les pénétrogrammes. Sur le site 77, la question est de savoir s'il s'agit d'alluvions réellement en place.

Sur le site L1015, d'après le contexte géomorphologique environnant, les archéologues évaluaient le toit des alluvions du Rhône (galets) aux alentours de 262 m NGF. Les résultats de l'ACP (essai 3) montrent un groupe formé d'alluvions fines et grossières qui se dissocie des autres car il est caractérisé par des UC très profondes, avec des valeurs de résistance moyenne à forte et une variabilité moyenne à forte. Sur ce site les alluvions fines anthropisées sont associées aux remblais d'obstruction car les UC sont moyennement profondes, de résistance moyenne et de variabilité moyenne à forte. On a donc une forte probabilité de détecter les niveaux naturels sur un pénétrogramme.

Sur les sites L105 et L025, situés sur la colline de Fourvière, on connaissait la nature du substrat (argile et galets du Villafranchien) mais pas exactement sa cote.

L'étude du site L105 révèle que les UC naturelles (alluvions fines) ne se distinguent pas du dépôt archéologique par l'étude des propriétés mécaniques. C'est la position altimétrique qui est déterminante sur ce site.

Celle du site L025 montre que l'UC d'alluvions grossières (galets Villafranchien) se distingue nettement des autres niveaux observés sur le site. Toutefois, les dépôts éoliens limoneux ne se dissocient pas des niveaux archéologiques. Une fois de plus, c'est l'altitude moyenne qui permettra de discriminer l'ensemble.

En conclusion, d'une ville à l'autre, on peut distinguer le dépôt archéologique et les niveaux naturels lorsque ces derniers sont de nature grossière. En effet, les constituants grossiers engendrent des valeurs de résistance élevées qui occasionnent parfois des problèmes techniques pour le PANDA (tiges cassées ou tordues). Toutefois, les alluvions fines ont des caractéristiques plus proches des niveaux archéologiques sauf dans lorsqu'elles sont argileuses.

Enfin, l'estimation *a priori* de la position altimétrique moyenne de ces niveaux, à partir du contexte historique, permet évidemment d'augmenter les chances de reconnaissance.

#### • *Caractérisation fonctionnelle du dépôt archéologique*

Le bilan lié à la caractérisation fonctionnelle du dépôt archéologique et des niveaux naturels est présenté suivant les variables qui caractérisent les UC : médiane (Qd), c.v. (Qd), date, altitude moyenne, profondeur moyenne et épaisseur.

L'étude par site a révélé la non-unicité des propriétés mécaniques des interprétations fonctionnelles mais la possibilité de regrouper certaines d'entre elles (par exemple, les remblai d'usage et d'obstruction partagent les mêmes critères). Les résultats de l'ACP globale (essai 4) montrent que les variables « épaisseur », « c.v. Qd » et « médiane Qd » sont les plus discriminantes pour dissocier les interprétations des UC selon les sites.

Par ailleurs, il est plus difficile de dissocier les types fonctionnels que les sous-types fonctionnels. C'est pourquoi, les observations sont présentées à l'échelle des sous-types.

Enfin, on observe globalement que sont les *remblais d'aménagement* puis les *niveaux extérieurs* et enfin les niveaux de *construction* qui sont les plus représentés toutes périodes confondues.

- Propriétés mécaniques des UC

\* Médiane Qd

La valeur de résistance est la variable la plus directement accessible sur un pénétrogramme. Pour les études descriptives, 4 classes de résistance ont été définies selon une répartition des effectifs plutôt équilibrée. Ce sont toutefois les classes intermédiaires (entre 1 et 4 MPa) qui regroupent l'essentiel des UC. Par ailleurs, il sera nécessaire d'ajuster cette classification car la dernière classe regroupe des valeurs de résistance fortes à très fortes (entre 4 et 30 MPa) et ne permet pas de ressortir les cas spécifiques comme les maçonneries, les alluvions grossières ou le substrat rocheux (> 12 MPa).

Pour simplifier la lecture de la comparaison des résultats, ils sont présentés suivant 3 types de valeurs : faible « + » (Qd < 1 MPa), moyenne « ++ » (1 MPa < Qd < 4 MPa) et forte « +++ » (Qd > 4 MPa) (Fig. 126).

<i>Résistance Qd</i>			<i>Légende :</i>						
			<i>+ faible</i>	<i>++ moyenne</i>	<i>+++ forte</i>				
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Postulat	Site 16	Site 69	Site 17	Site 5MA	Site L1015	Site L105	Site L025
Occupation extérieure	Circulation (cour, voirie)	++	++				+ à +++		
	Mise en culture (jardins, champs)	+ à ++	+ à ++						+++
	Pacage, pâturage	+ à ++	++						
	Friche / terrain vague	+ à ++							
Occupation intérieure	Occupation intérieure	+ à ++	+						
	Foyer	+							
Construction	Const. en pierre	+++	+++					+++	
	Const. en matériau périssable	++							
	Sol construit	+++	++	++			++		
	Terre battue	+++					++		
	Empierrement (y compris cailloutis)	+++	++				++ à +++		
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse								
	Mise en œuvre	++ à +++	+++				+++	+++	
Destruction	Destruction in situ	+++							
	Démantèlement / Récupération	+++	+++						
	Dégradation lente / décomposition	++							
Remblaiement/ comblement d'aménagement	obstruction	+ à +++	++ à +++	++ à +++	++		+ à +++		
	nivellement / aménagement	+ à +++	++ à +++	++ à +++	++	++ à +++	+ à +++	+ à +++	++ à +++
Remblaiement/ comblement d'usage	comblement usage (fosse)	+ à +++		++					
	dépotoir (tas)	+ à +++	++						
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées (dépotoir)	++					+++		
	alluvions grossières anthropisées (dépotoir)	+++		+++					
	colluvions fines anthropisées	++							
	colluvions grossières anthropisées	+++							
Naturel	alluvions fines (sable fin, limon, argile)	++		++ à +++	++		+++	++ à +++	
	alluvions grossières (sable grossiers, galets)	+++		+++			+++		+++
	Colluvions fines	++							
	colluvions grossières	+++							
	dépôt éolien	++							++ à +++
	Substrat rocheux	+++				+++			

Fig. 126 - Tableau récapitulatif des valeurs de résistance (médiane Qd) par interprétation fonctionnelle sur les sites étudiés

Ces résultats montrent qu'ils sont très proches de ce qu'on attendait en terme de compacité des couches. Il n'existe pas d'unicité entre une interprétation fonctionnelle et une valeur de résistance Qd. Enfin, les niveaux extérieurs et intérieurs sont en moyenne moins résistant que les niveaux de construction, destruction et de remblais. Ainsi, hormis pour les maçonneries (fortes valeurs), l'emploi unique de la variable « médiane Qd » ne permet pas de caractériser fonctionnellement le dépôt archéologique.

**\*c.v. (Qd)**

Le coefficient de variation correspond à l'agitation du signal (pic et creux) et permet de qualifier le degré d'hétérogénéité des niveaux archéologiques et naturels.

Les UC sont les plus nombreuses dans les deux dernières classes de résistance pour tous les sites. Ainsi, pour simplifier aussi la comparaison des sites, 3 types de valeurs de variabilité sont utilisés : faible « + » (c.v. < 0,29), moyenne « ++ » (0,29 < c.v. < 0,5) et forte « +++ » (c.v. > 0,5) (Fig. 127).

<u>Variabilité (Qd)</u>			<u>Légende :</u>						
+ faible ++ moyenne +++ forte			SITES						
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Postulat	Site 16	Site 69	Site 17	Site 5MA	Site L1015	Site L105	Site L025
Occupation extérieure	Circulation (cour, voirie)	+	++				+ à ++		
	Mise en culture (jardins, champs)	++	+ à ++						+++
	Pacage, pâturage	++	++						
	Friche / terrain vague	+							
Occupation intérieure	Occupation intérieure	+	+						
	Foyer	+							
Construction	Const. en pierre	+++	+++					+++	
	Const. en matériau périssable	+							
	Sol construit	++	++	+			+		
	Terre battue	+					+		
	Empierrement (y compris cailloutis)	+++	++				+		
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse								
	Mise en œuvre	++	+++				+++	++	
Destruction	Destruction in situ	+++							
	Démantèlement / Récupération	+++	+++						
	Dégradation lente / décomposition	+							
Remblaiement/ comblement d'aménagement	obstruction	+ à +++	++ à +++	+++	++		++ à +++		
	nivellement / aménagement	+ à +++	++ à +++	+ à ++	+ à +++	+ à ++	+ à ++	+ à ++	+ à +++
Remblaiement/ comblement d'usage	comblement usage (fosse)	+ à +++		++ à +++					
	dépotoir (tas)	+ à +++	++						
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées (dépotoir)	+++					+		
	alluvions grossières anthropisées (dépotoir)	+++		+					
	colluvions fines anthropisées	+++							
	colluvions grossières anthropisées	+++							
Naturel	alluvions fines (sable fin, limon, argile)	+++		++	+ à ++		++	++ à +++	
	alluvions grossières (sable grossiers, galets)	+++		++			+		++
	Colluvions fines	+++							
	colluvions grossières	+++							
	dépôt éolien	+++							+ à +++
	Substrat rocheux	+++				++			

Fig. 127 - Tableau récapitulatif des valeurs de la variabilité de résistance (c.v. Qd) par interprétation fonctionnelle sur les sites étudiés

Certaines idées préconçues sont contredites par les observations notamment pour les niveaux *mis en culture* qui ont une variabilité plus importante que prévu, et ceux d'*empierrement et naturels* qui ont une variabilité plus faible. En effet, la part des artefacts ponctuels (pierre) doit être sous-estimée dans le modèle des niveaux *mis en culture*. Par contre, la constitution des niveaux d'*empierrement* et des *niveaux naturels* est plus homogène que prévu.

Il faut retenir que ce sont les niveaux de *construction en pierre*, de *mise en œuvre* et de *remblais* (tous les sous-types) qui sont les plus hétérogènes. Ces résultats permettent de préciser les présomptions faites à partir des valeurs de résistance.

#### - Localisation géographique des UC

La localisation géographique est également déterminante pour interpréter un pénétrogramme. La dimension verticale (position altimétrique, profondeur, épaisseur, date) est privilégiée ici car les coordonnées dans la dimension horizontale (coordonnées X et Y) ont une influence à l'échelle de chaque site qui ne peut être transposée d'un site à l'autre.

#### \* *Moyenne Z, date et profondeur moyenne*

L'altitude moyenne, la profondeur moyenne et la datation d'une UC sont étroitement liées.

D'abord, il n'est pas possible de proposer une classification de l'altitude moyenne puisqu'elle est spécifique à chaque site et d'une ville à l'autre. Toutefois, les analyses descriptives montrent que la moyenne de Z est déterminante dans la caractérisation fonctionnelle du sous-sol. En effet, les analyses factorielles (essai 3) effectuées pour les sites 16, 69 et L1015 montrent que cette variable est celle qui contribue le plus à la discrétisation des individus (UC). Nous venons aussi de démontrer qu'elle constitue un critère pour dissocier le dépôt archéologique et les niveaux naturels.

Dans cette étude, la datation des UC a été codée en variable continue. L'utilisation du PANDA ne permet pas de dater directement les niveaux traversés. Néanmoins, l'emploi de la date dans les analyses permet de relier les résultats directement à la temporalité du site puisque la position altimétrique n'est pas transférable d'un site à l'autre.

Enfin, la profondeur moyenne permet également d'apporter un complément d'information pour la position stratigraphique des niveaux archéologiques. En outre, il n'existe

pas de forte corrélation entre la profondeur moyenne et la résistance d'une UC. L'effet de dérive n'est pas important sur les sites étudiés.

### \* *Épaisseur*

L'étude descriptive des épaisseurs a été réalisée à partir de 6 classes. L'épaisseur d'une UC couplée aux autres variables peut aussi être déterminante dans la caractérisation du dépôt archéologique (Fig. 128). On retiendra que lorsque l'épaisseur est inférieure à 5 cm, il s'agit seulement d'occupation intérieure, de sol construit et de terre battue.

Par ailleurs, si on confronte les résultats avec le postulat de départ, certaines interprétations ont été mal évaluées comme les niveaux de circulation, de sol construit et de mise en œuvre qui peuvent être plus épaisses. Par contre, la différence observée pour les niveaux naturels n'est pas significative car la plupart des SP ont été interrompus dans leur partie supérieure.

<i>Épaisseur</i>			<i>Légende :</i>						
			« < 10 » = valeurs épaisseur						
			« toutes » = toutes fourchettes possible						
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Postulat	SITES						
			Site 16	Site 69	Site 17	Site 5MA	Site L1015	Site L105	Site L025
Occupation extérieure	Circulation (cour, voirie)	5 – 20 cm	< 10 cm				< 30 cm		
	Mise en culture (jardins, champs)	> 30 cm	toutes						> 20 cm
	Pacage, pâturage	> 20 cm	toutes						
	Friche / terrain vague	5 – 20 cm							
Occupation intérieure	Occupation intérieure	< 3 cm	< 5 cm						
	Foyer	< 3 cm							
Construction	Const. en pierre	> 20 cm	> 5 cm					> 20 cm	
	Const. en matériau périssable	> 3 cm							
	Sol construit	< 5 cm	< 3 cm	< 3 cm			< 20 cm		
	Terre battue	< 5 cm					< 3 cm		
	Empierrement (y compris cailloutis)	5 – 20 cm	toutes				< 30 cm		
	Tranchée de fondation, trou de poteau, fosse	0							
	Mise en œuvre	< 20 cm	< 10 cm				> 20 cm	< 10 cm	
Destruction	Destruction in situ	> 10 cm							
	Démantèlement / Récupération	> 5 cm	toutes						
	Dégradation lente / décomposition	< 10 cm							
Remblaiement/ comblement d'aménagement	obstruction	> 10 cm	> 20 cm	> 10 cm	> 50 cm		> 5 cm		
	nivellement / aménagement	> 10 cm	toutes	< 20 cm	> 20 cm	> 20 cm	toutes	< 30 cm	toutes
Remblaiement/ comblement d'usage	comblement usage (fosse)	> 10 cm		toutes					
	dépotoir (tas)	> 10 cm	toutes						
Naturel anthropisé	alluvions fines anthropisées (dépotoir)	< 30 cm					toutes		
	alluvions grossières anthropisées (dépotoir)	< 30 cm		toutes					
	colluvions fines anthropisées	toutes							
	colluvions grossières anthropisées	toutes							
Naturel	alluvions fines (sable fin, limon, argile)	toutes		> 20 cm	> 70 cm		> 10 cm	> 20 cm	
	alluvions grossières (sable grossiers, galets)	toutes		> 20 cm			> 10 cm		< 3 cm
	Colluvions fines	toutes							
	colluvions grossières	toutes							
	dépôt éolien	toutes							> 20 cm
	Substrat rocheux	toutes				> 20 cm			

Fig. 128 - Tableau récapitulatif des épaisseurs des UC par interprétation fonctionnelle sur les sites étudiés

En conclusion, l'étude des propriétés mécaniques couplée à la localisation verticale permet de proposer différentes interprétations et d'en exclure d'autres.

Ces propositions seront également affinées si on possède des informations sur le type de stratification attendue sur un site. En effet, la situation d'un site dans la zone urbanisée à un temps  $t$  produit des niveaux archéologiques spécifiques : par exemple, dans une zone située extra-muros, on s'attend plutôt à avoir des niveaux extérieurs ou des remblais de types dépotoirs. De même, on n'observe pas les mêmes types de niveaux en contexte intérieur ou extérieur d'un bâtiment.

- *Caractérisation lithologique du sous-sol*

La caractérisation lithologique du sous-sol consiste à vérifier d'une part, si la nature du sol a des propriétés mécaniques spécifiques, et d'autre part, si on peut la lier à une interprétation fonctionnelle. Pour le référentiel, un constituant dominant a été affecté à chaque UC. D'une ville à l'autre et d'un site à l'autre, la liste des constituants dominants varie. Sur l'ensemble des sites, on a démontré que les UC sableuses ont une probabilité plus importante d'être résistante.

L'ensemble des UC (659) ont été réparties par interprétations fonctionnelles en fonction de leur constituant dominant (Fig. 129). On observe que les niveaux extérieurs et les remblais d'aménagements sont les plus hétérogènes.

Ces résultats expliquent en partie la non unicité des propriétés mécaniques des fonctions archéologiques mais une étude plus précise et poussée (échelle plus fine) permettra d'affiner le référentiel. Il sera intéressant de les confronter avec ceux de l'étude réalisée sur la caractérisation fine du dépôt archéologique à partir de l'assemblage des constituants (tamisage, granulométrie) par M. Fondrillon (FONDRILLON 2007).

Probabilités		constituant dominant																	Total
Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	charbon	terre cuite	argileux	limono-argileux	limoneux	limono-sableux	sableux	sablo-argileux	argile à silex	argilo-sableux	gravier	galets	mortier	tuffeau	calcaire	ardoise	schiste	
Occupation extérieure	Circulation			8,3%	9,1%	5%	70%	3,3%			41,7%								41%
	Mise en culture			8,3%		1,7%	14%	3,3%			41,7%								9,3%
	Pacage, pâturage				9,1%	1,7%	42,1%												23,5%
	Friche					1,7%	14,2%												8,2%
Occupation intérieure	Occ. Int.					5%	1,9%								7,5%				2,0%
	Foyer					5%	1,9%								7,5%				2,0%
Construction	Const. en pierre		66,7%			1,7%	9%						75,0%	52,9%	67,5%	75%			12,6%
	Const. en mat. Périssa.													5,9%	10,0%	75,0%			1,2%
	Sol construit		66,7%											41,2%	7,5%				2,1%
	Terre battue					2%													
	Empierrement fosse						7,4%						62,5%						4,9%
Mise en œuvre						1,6%						12,5%	5,9%	50,0%				4,2%	
Destruction	Destruction in situ					5,0%	5,7%	28,6%							5%				7,9%
	Démantèlement / Récupération					5%	6%	29%							5%				8%
	Dégradation lente																		
Remblaiement/comblement d'aménagement	obstruction	100%	33,3%	33,3%	81,8%	47%	13%	55%	100%		42%	11%	13%	47%	20%	25%	100%	100%	27%
	nivellement / aménagement		33,3%	4,2%		5%	7%	8%	71%									100%	7%
Remblaiement/comblement d'usage	dépotoir	100%		29,2%	81,8%	42%	7%	47%	29%		41,7%	11,1%	12,5%	47,1%	15,0%	25,0%	100%		20,5%
	comblement usage					31,7%		6,6%											3,8%
Naturel anthropisé	dépotoir					8,3%		6,6%											1,7%
	alluvions fines anth							1,1%			16,7%	55,6%							2,1%
	alluvions G anth							1,1%			16,7%								1,2%
Naturel	colluvions fines anth																		0,5%
	colluvions G. anth																		0,8%
	alluvions fines			58,3%	9,1%	5,0%		5%		100%		33,3%	12,5%						4,2%
	alluvions grossières			58,3%	9,1%			2%											2,6%
	Colluvions fines							3%				33,3%	12,5%						1,1%
colluvions G																			
dépôt éolien					5%														
substrat rocheux										100%									
		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Nb UC		1	6	24	11	60	366	91	7	1	12	9	8	17	40	4	1	1	659

Fig. 129 - Tableau des probabilités conditionnelles des interprétations fonctionnelles des UC des sites étudiés en fonction de leur constituant dominant

- *Bilan*

Ce référentiel archéologico-mécanique présente des résultats satisfaisants pour dissocier le dépôt archéologique et les niveaux naturels. En présence d'alluvions, ce sont les plus grossières qui sont reconnaissables sur un pénétrogramme. Il sera utile de faire d'autres tests dans des villes qui ont le même contexte géomorphologique (alluvions du Quaternaire) comme Paris, Bordeaux ou Nantes. D'autres tests doivent être réalisés dans des villes qui reposent directement sur le substrat rocheux comme Angers ou Orléans.

Le but du référentiel archéologico-mécanique est de caractériser les UC indéterminées (UC de qualité 1 et 0) à partir des critères significatifs (médiane Qd, c.v. Qd, profondeur et épaisseur). En associant les propriétés mécaniques et la localisation verticale, on peut proposer des possibilités d'interprétation fonctionnelle des niveaux traversés par le PANDA. Pour attribuer une ou plusieurs interprétations fonctionnelles à une UC inconnue, il est nécessaire de mesurer sa proximité aux classes définies dans l'ACP globale. L'analyse de proximité est la prochaine étape à suivre. Il faudra tester les UC de qualité 1 qui ont une interprétation supposée afin de valider le référentiel.

L'étude a permis de vérifier les postulats énoncés pour la typologie fonctionnelle. Le postulat sur les propriétés mécaniques a été validé par les observations de terrain. Toutefois, l'estimation des épaisseurs a parfois été remise en cause par le corpus.

La méthodologie a d'abord été testée à l'échelle locale puis de façon globale. Les résultats montrent des spécificités régionales qui s'expliquent par la présence de constituants spécifiques mais globalement, les résultats sont similaires d'une ville à l'autre pour plusieurs caractéristiques :

- les *constructions en pierre* sont détectées par leur forte valeurs de résistance et occasionnent la plupart du temps un refus ;
- les *sols construits*, peu épais sont de faible résistance ;
- les *remblais d'aménagement* ont de fortes valeurs et sont plutôt hétérogènes (agitation du signal) ;
- les *niveaux extérieurs* ont de faibles à fortes valeurs de résistance mais sont plutôt homogènes.

### 5-3- Essai de modélisation du dépôt archéologique à l'échelle du site

L'objectif est de modéliser le caractère hétérogène du sol urbain par l'intermédiaire de ses propriétés mécaniques. Il est alors nécessaire d'identifier des zones homogènes selon une échelle d'analyse qui est adaptée aux données étudiées.

Il est possible de déterminer l'échelle adéquate à partir d'une analyse préalable de la structure de la variabilité spatiale des données (DENIS, CRÉMOUX, BREYSSE 1997) selon les principes de la **géostatistique\*** (BREYSSE *et al.* 2002 : 49 ; chapitre 2). A noter que cette opération intervient après avoir régularisé le signal selon un pas constant (1 cm). Dans un premier temps, on quantifie la variabilité spatiale des propriétés mécaniques pour les sites 16, 69 et L1015 par une analyse variographique.

Dans un deuxième temps, la méthode pour construire une image synthétique du sous-sol (code-barre) est présentée et discutée à partir des résultats de l'analyse précédente. Cette représentation est confrontée aux données de terrain.

Enfin, l'étude sur le bruit et la qualité du signal qui a été développée dans le cadre de la thèse de L. Houy (HOUY 2005) est abordée. Elle repose sur la distinction de zones homogènes et la quantification du bruit local à partir du principe de l'**entropie\*** (cf chap 4). Le but principal est de voir, selon les cas, si le bruit est une erreur de mesure aléatoire ou s'il peut révéler une activité humaine spécifique.

#### 5-3-1- Analyse de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques du sous-sol

L'analyse a été développée au cours de la maîtrise (LAURENT 2002) et dans le cadre de la thèse de L. Houy (HOUY 2005) à partir des données du site de Saint-Julien à Tours (site 16). Le but ici est de confronter les résultats avec ceux obtenus sur le site 69 à Tours et le site L1015 à Lyon.

- *Rappel sur les principes de l'analyse*

Les principes de l'analyse de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques ont été présentés dans le 2<sup>e</sup> chapitre (2-1-4). Un schéma synthétique reprend les points essentiels pour le cas du site de Saint-Julien à Tours (Fig. 130).

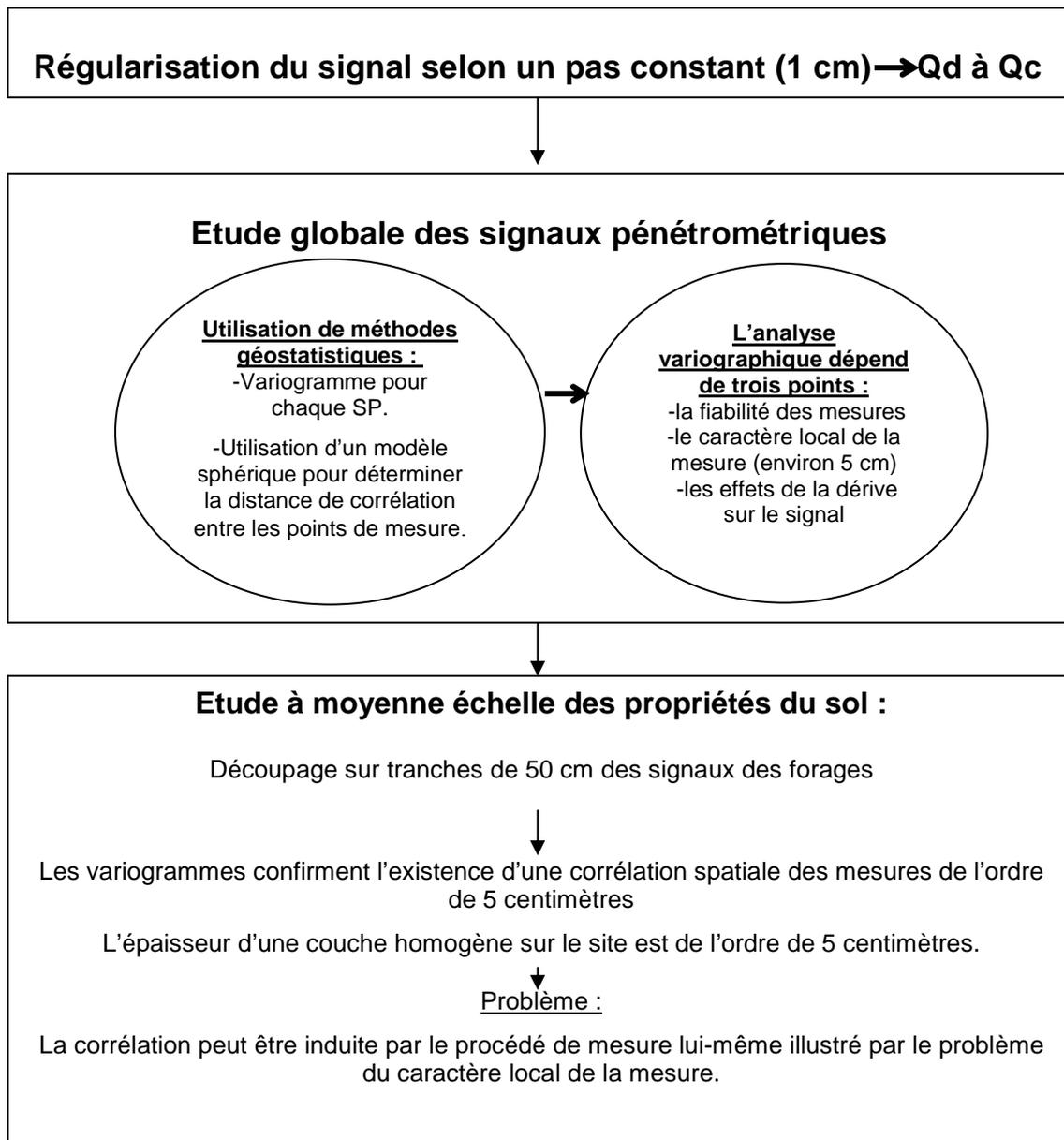


Fig. 130 - Schéma de synthèse de l'analyse de la variabilité des propriétés mécaniques du site 16 (d'après LAURENT 2002 : Fig. 12)

- *Analyse variographique à moyenne échelle*

Sur le site 16, la tranche de 50 cm qui présente le moins de perturbation locale est située entre 48,3 et 47,8 m NGF. L'analyse variographique a révélé qu'une couche homogène a une épaisseur de l'ordre de 5 cm<sup>45</sup>. La question est de savoir si cette mesure reflète le caractère régionalisé à moyenne échelle ou bien si elle est liée au procédé de mesure lui-même qui attribue la

<sup>45</sup> L'épaisseur est déduite de la portée « a » du variogramme

valeur locale de Qd à une zone d'environ 5 cm d'épaisseur. Pour tenter d'y répondre, l'analyse est appliquée sur des niveaux interprétés sur le site 16 puis est étendue aux sites 69 et L1015.

- Application sur des niveaux spécifiques du site 16

A l'aide du découpage de la stratification du site 16 établi pour le référentiel archéologico-mécanique (cf 5-2), des UC\* équivalentes (échelle agrégation archéologique) ont été retenues afin d'étudier la structure de la variabilité spatiale des valeurs de Qd (dans la dimension verticale). Le choix a été porté sur des UC épaisses de plus de 40 cm et appartenant au type fonctionnel « remblai aménagement ».

Les variogrammes des UC ainsi sélectionnées ont été calculés (Pl. 94). Lorsque le cas s'est présenté, les dérives ont été traitées de façon à obtenir une variance comparable. On ajuste ensuite un variogramme théorique sur chacun des variogrammes expérimentaux afin de définir la longueur de corrélation (portée). Lorsque la variance se stabilise, il n'y a plus de corrélation spatiale entre les mesures.

La distance de corrélation entre les mesures de résistance de pointe (portée) est reportée pour chaque UC en fonction de leur ensemble (Fig. 131).

Type fonctionnel	Sous-type fonctionnel	Agrégation	Moy Z	NUM UC	Médiane Qd	c.v. Qd	Epaisseur (m)	Portée « a » (cm)
Remblai aménagement	aménagement	2.40	46,4	16.79.12	3,03	1,02	1,01	4
				16.85.5	4,49	0,64	1,08	9
				16.86.5	4,45	0,74	1,09	6
Remblai aménagement	aménagement	2.37	46,9	16.94.4	1,65	0,41	0,65	5
				16.107.2	1,88	0,38	0,65	8
				16.108.2	2,32	0,75	0,65	8
Remblai aménagement	obstruction	1.07	49,5	16.51.1	4,27	0,51	0,84	13
				16.52.1	5,12	0,39	0,83	8
				16.65.1	1,89	0,45	0,81	13

Fig. 131 - Tableau des caractéristiques des UC et la distance de corrélation spatiale des valeurs de Qd

Les variogrammes des UC des agrégations 2.37 et 1.07 ont des variances qui varient entre 0,5 et 4 MPA<sup>2</sup> alors que ceux des UC des agrégations 2.40 ont des variances qui varient entre 8 et 12 MPA<sup>2</sup>. Ces différences intrinsèques sont expliquées par la présence de pics dans les pénétrogrammes. Par ailleurs, certains variogrammes présentent un effet de dérive au-delà d'une distance de 20 cm (UC 16.79.12, 16.107.2).

L'analyse variographique de ces exemples montre qu'à l'échelle de l'Unité Contextuelle (de l'ordre de 50 cm) les mesures pénétrométriques sont corrélées sur une épaisseur qui varie entre 4 et 13 cm (moyenne de 8,2 cm). Ces résultats sont en tout cas dans le même ordre de mesure que sur l'ensemble du site.

## - Application sur le site 69

Les SP de la section 2 du site 69 ont été sélectionnés pour cette étude (espacement de 2 mètres entre les SP 69.05 à 10 et de 3 mètres entre les SP 69.11 à 14). Dans un premier temps, les variogrammes à l'échelle globale ont été tracés afin de détecter les pénétrogrammes qui présentent une dérive manifeste. Il apparaît que la moitié des signaux montrent une dérive alors que les autres ont une structure spatiale très variée (portée de 10 cm à 1 mètre). Ces premières observations révèlent la nécessité de pratiquer l'analyse variographique à moyenne échelle et de supprimer les dérives.

La tranche de 50 cm d'épaisseur pour laquelle les signaux sont les moins perturbés par des pics, est apparue aux alentours de 47,7 et 47,2 m NGF. Après le traitement de la dérive pour les SP 69.08, 69.13 et 69.14 et l'ajustement de variogrammes théoriques, on mesure la longueur de corrélation (portée). On observe que le variogramme du SP 69.06 présente une variance plus élevée que les autres (20 MPa<sup>2</sup>). On a choisi alors de traiter les pics de façon à ce qu'ils influencent moins le variogramme. Concrètement, les pics sont plafonnés à 5 MPa comme cela avait été testé sur le site 16 (BREYSSE *et al.* 2002 : 50). La variance diminue à 0,5 MPa<sup>2</sup> (Fig. 132).

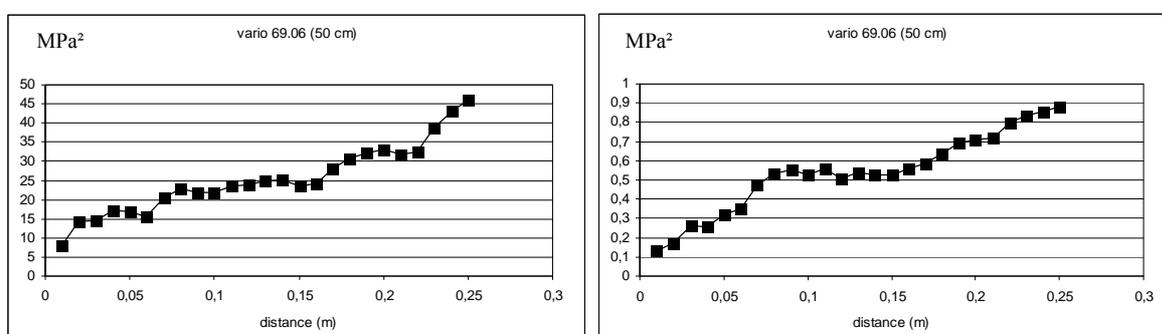


Fig. 132 - Confrontation des variogrammes avant et après élimination des pics pour le SP 69.06

Ainsi, sur l'ensemble des SP, l'épaisseur d'une zone homogène varie entre 4 et 10 cm (Pl. 95).

En supposant une homogénéité horizontale à l'échelle de l'ensemble, un signal moyen est construit à partir des 10 SP pour cette tranche. Il permet de réduire la variance (« bruits » de mesure) (BREYSSE *et al.* 2002 : 71). Le variogramme de ce signal moyen a été calculé : la portée est de 4 centimètres (Fig. 133).

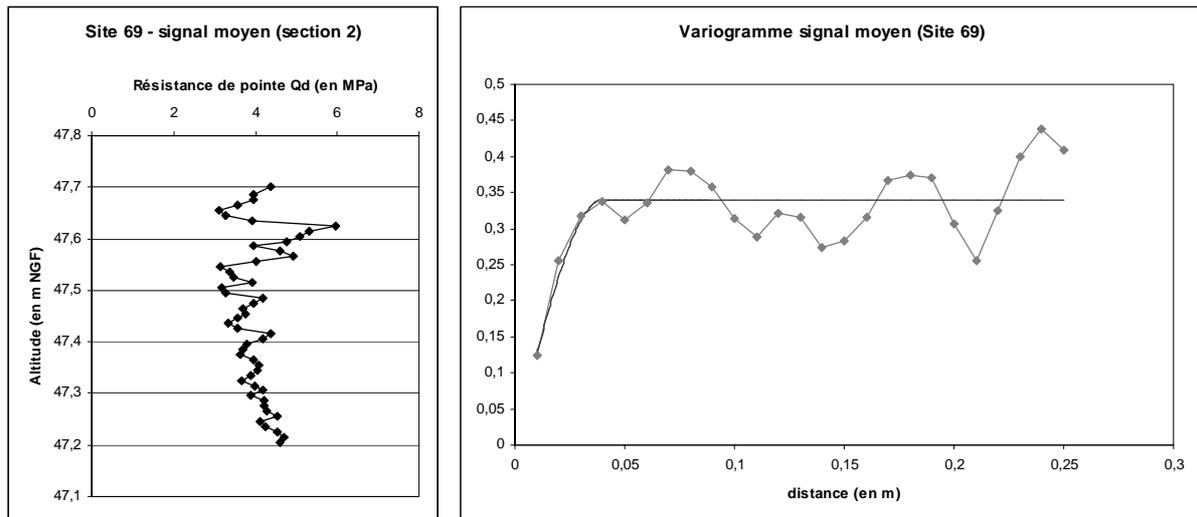


Fig. 133 - Signal moyen des SP de la section 2 du site 69 pour la tranche comprise entre 47,7 et 47,2 m NGF et le variogramme correspondant  
**(en noir: variogramme sphérique où  $\gamma(\Delta z) = C * [3/2 * (\Delta z)/a - 1/2 * (\Delta z^3/a^3)]$  lorsque  $\Delta z < a$  et où  $\gamma(\Delta z) = C$  lorsque  $\Delta z > a$ ; avec  $C = 0,34$  et  $a = 0,04$ , sans effet de pépité)**

#### - Application sur le site L1015

De la même façon que le site 69, l'ensemble des SP du site L1015 ont été étudiés à l'échelle globale selon les trois espaces définis par les campagnes de prospection au PANDA. L'analyse variographique à cette échelle montre qu'environ 10 SP sur 41 présente une dérive. Les autres ont une portée qui varie entre 5 et 60 cm.

Il a été choisi de travailler sur la tranche située entre 163,5 et 163 m NGF à partir de 10 SP réparties dans les 3 zones prospectées (L1015.42, L1015.43, L1015.193, L1015.197, L1015.158, L1015.140, L1015.122, L1015.211, L1015.215). Après traitement de la dérive du SP L1015.140 et plafonnement des pics à 5 MPa pour les SP L1015.97, l'examen des variogrammes montre que l'épaisseur d'une zone homogène varie entre 4 et 18 cm (Pl. 96).

En outre, un signal moyen a été calculé pour l'ensemble des SP de cette tranche ; la portée du variogramme est de 13 centimètres (Fig. 134).

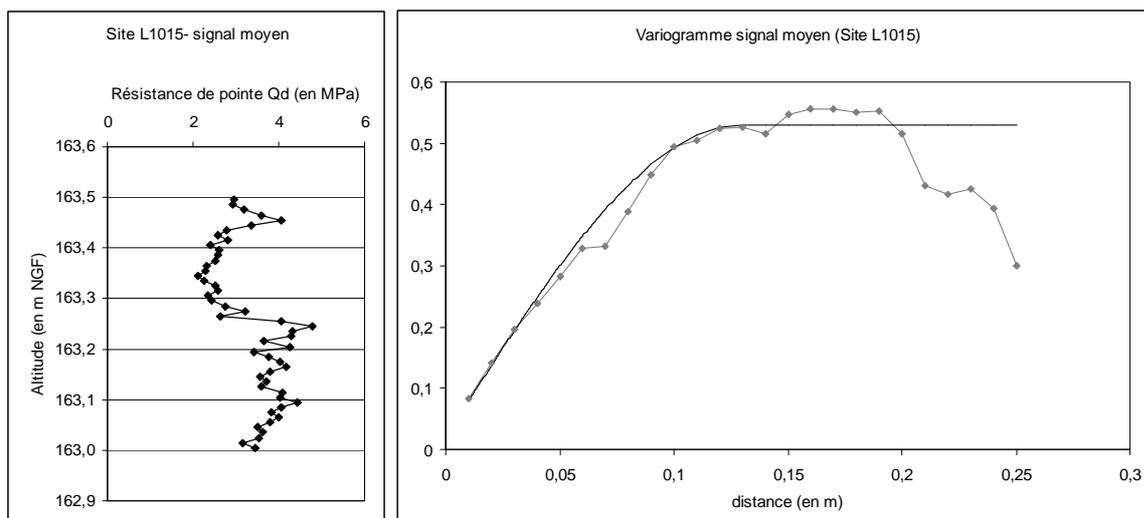


Fig. 134 - Signal moyen des SP de la section 2 du site L1015 pour la tranche comprise entre 163,5 et 163 m NGF et le variogramme correspondant  
**(en noir** : variogramme sphérique où  $\gamma(\Delta z) = C * [3/2 * (\Delta z)/a - 1/2 * (\Delta z^3/a^3)]$  lorsque  $\Delta z < a$  et où  $\gamma(\Delta z) = C$  lorsque  $\Delta z > a$ ; avec  $C=0.53$  et  $a=0.13$ , avec un effet de pépite = 0,02)

- *Bilan*

L'analyse de la variabilité des propriétés spatiales de niveaux spécifiques (remblai et occupation extérieure) sur le site 16 et sur une tranche de 50 cm, considérée comme homogène, pour les sites 69 et L1015 montre une corrélation spatiale de l'ordre de 5 à 10 cm. On peut conclure que la distance de corrélation reflète bien le caractère régionalisé à moyenne échelle.

Par ailleurs, on a démontré que pour réduire la variance de certains variogrammes, il faut traiter la dérive et éliminer les pics.

### 5-3-2- Réalisation de l'image mécanique du sous-sol : la méthode des « codes-barres »

Lors de la régularisation du signal, on obtient des mesures de résistance  $Q_c$  selon un pas d'échantillonnage constant (tous les 1 cm). Il est possible d'attribuer un code de couleur à chaque mesure de  $Q_c$  de façon à obtenir une image simplifiée du sous-sol.

Il faut alors déterminer des classes de résistance à partir de la distribution statistique des valeurs de  $Q_d$ . Le choix des limites des classes dépend de la forme des lois de répartition de la résistance et du type de contraste que l'on veut souligner (discrimination des couches de qualité médiocre ou de forte résistance) (BREYSSSE *et al.* 2002 : 53). Je présenterai les classes de résistance choisies pour les sites 16, 69 et L1015.

Ensuite, les images en « code-barres » seront construites selon ces classes de résistance et selon des zones dites « homogènes » d'une épaisseur minimale de 5 cm. L'objectif est de confronter cette représentation de la stratification avec les données de terrain.

- *Choix des classes de résistance*

Pour réaliser une image en « code-barre », il faut analyser la distribution statistique des SP concernés. Les limites des classes sont établies de façon à avoir des effectifs suffisants et équilibrés. Par ailleurs, lors de l'établissement du référentiel archéologico-mécanique, il est apparu que la majorité des UC ont des valeurs de résistance moyenne à fortes selon les sites ( $Q_d$  entre 2 et 4 MPa, cf 4-2). C'est pourquoi, les limites de classes sont définies selon des fractiles qui discriminent les couches au  $Q_d$  moyen à fort.

Sur le site 16, en 2001, les SP étudiés sont ceux réalisés durant l'année 2000 (les 40 premiers). Les limites des classes retenues concernent les fractiles à 10%, 30% et 70% (respectivement 1, 2 et 4 MPa) (BREYSSE *et al.* 2002 : 53 ; LAURENT 2002). D'autre part, L. Houy, dans le cadre de sa thèse, a étudié d'autres SP (SP 16.75 à 16.82) et a déterminé d'autres classes de résistance à partir des fractiles à 10%, 40% et 70%, soit respectivement 1,44, 2,5 et 4,1 MPa (Fig. 135) (HOUY 2005 : 44). Ces deux analyses montrent des classes de résistance similaire.

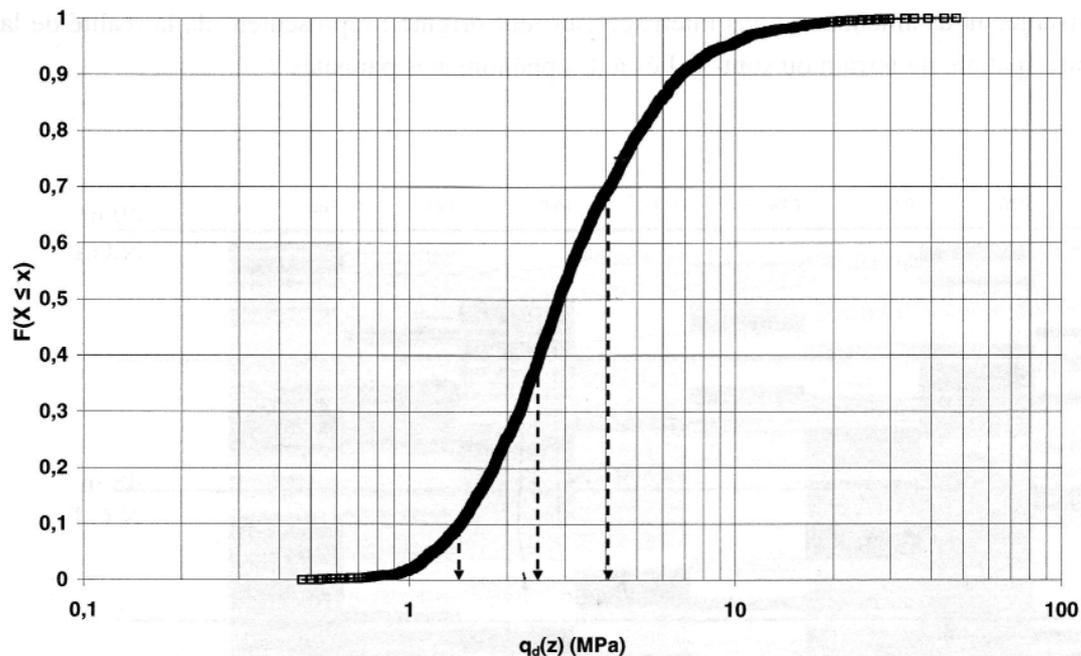


Fig. 135 - Distribution cumulée croissante des valeurs de  $Q_d$  des SP du site 16 (SP16.75 à 82) (HOUY 2005 : Fig. A-17)

Sur le site 69, la distribution statistique du Qd des SP de la section 2 montre que les valeurs de résistance sont plus élevées que sur le site 16 (Fig. 136). Les valeurs varient entre 0 et 35 MPa. On peut retenir les valeurs des fractiles à 10%, 40% et 70%.

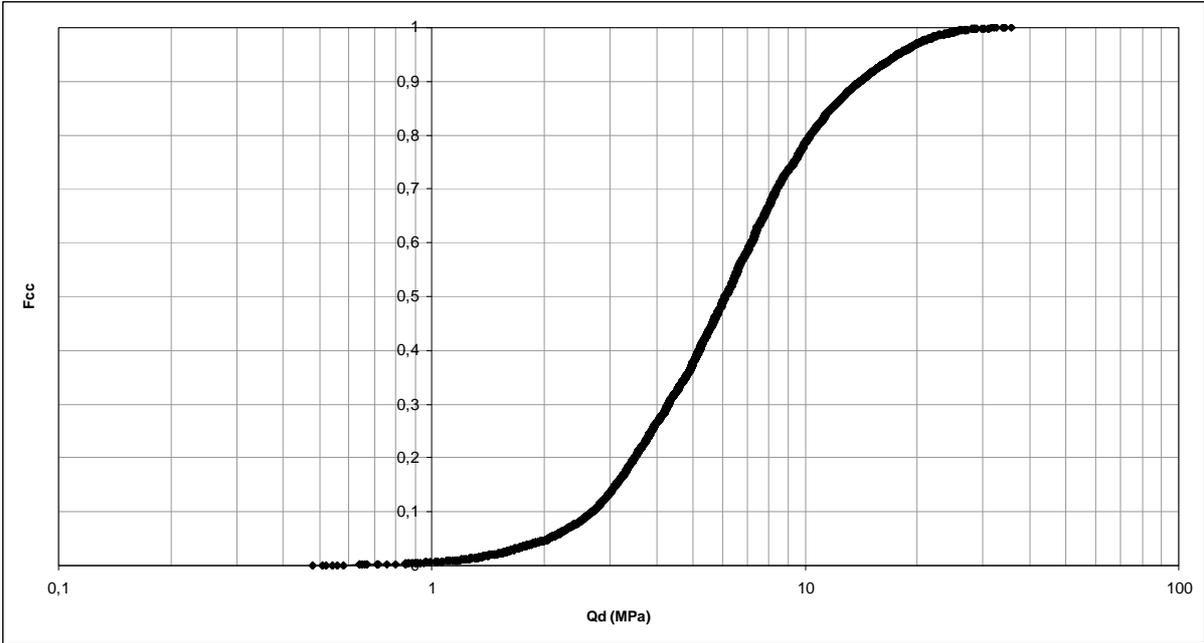


Fig. 136- Distribution cumulée croissante des valeurs de Qd des SP du site 69

Sur le site L1015, la distribution statistique du Qd de l'ensemble des SP révèle aussi des valeurs élevées (Qd varie entre 0 et 100 MPa) et les mêmes fractiles ont été retenus (Fig. 137).

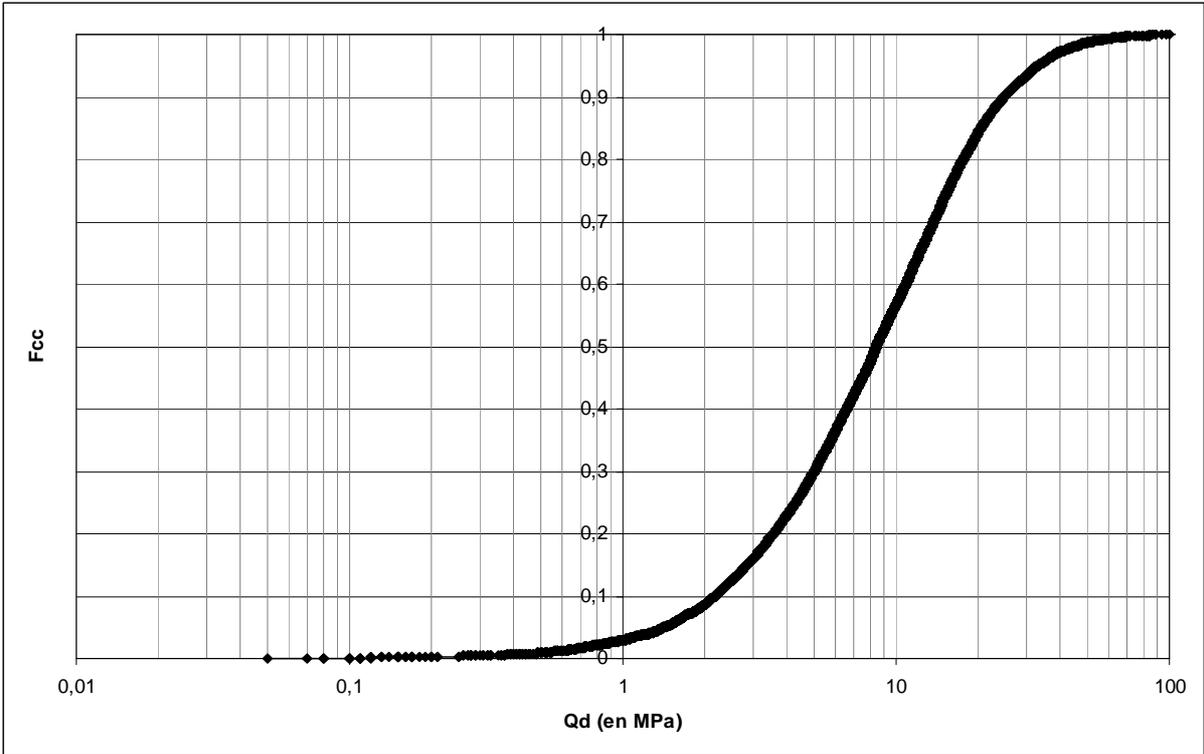


Fig. 137- Distribution cumulée croissante des valeurs de Qd des SP du site L1015

Les classes de résistance retenues sont celles qui sont présentées dans le tableau suivant (Fig. 138) :

fractile	SITE 16 (SP16.66 à 82)	SITE 69 (SP69.05 à 14)	SITE L1015 (tous les SP)
10%	1,44 MPa	2,69 MPa	2,18 MPa
40%	2,5 MPa	5,2 MPa	6,6 MPa
70%	4,1 MPa	8,38 MPa	13,74 MPa

Fig. 138 -Tableau des classes de résistance retenues pour la réalisation des images en code-barres pour les sites 16, 69 et L1015

• *Confrontation des codes-barres avec les observations de terrain*

Les codes-barres sont établis selon des zones de 5 cm (calcul d'une valeur moyenne de Qd tous les 5 cm), définies par l'analyse variographique et selon un code de couleur suivant les classes de résistance retenues. Les couleurs sont le blanc ( $Q_d < 1^{\text{er}}$  fractile), le gris clair ( $Q_d$  compris entre  $1^{\text{er}}$  et  $2^{\text{e}}$  fractile), le gris foncé ( $Q_d$  compris entre le  $2^{\text{e}}$  et le  $3^{\text{e}}$  fractile) et le noir ( $Q_d > 3^{\text{e}}$  fractile) (cf chap 2 – Fig4).

Les SP étudiés sont ceux dont on possède un relevé stratigraphique. Les codes-barres sont directement confrontés aux coupes stratigraphiques (Pl. 97 à Pl. 110) ainsi qu'aux coupes restituées (Pl. 111 à Pl. 114). Les images montrent sur l'ensemble des sites que le sous-sol est hétérogène et que l'échelle de l'ordre de 5 cm est trop fine pour ressortir globalement les variations stratigraphiques. C'est pourquoi, les codes-barres ont aussi été construits à l'échelle de 10 cm.

Sur le site 16, quelque soit l'échelle employée (5 et 10 cm), on observe que les valeurs de résistance sont globalement plus élevées dans la partie ouest du site (zone 1 ; cf section 1, 2 et 10) : ces deux ensembles stratigraphiques à l'ouest et à l'est ont été vus à la fouille.

Dans la zone 1, les niveaux extérieurs modernes (période 5 à 8) sont plus résistants que les niveaux agricoles sauf pour les SP 16.58, 16.55 et 16.60 (section 10). A noter que ces SP sont situés dans une zone reconnue comme plus sèche et indurée à la fouille et peu conductrice par la méthode électrique. En zone 2, les niveaux extérieurs et intérieurs (SP 16.10, 16.32, 16.33, 16.1B, 16.34 et 16.35) modernes ne se distinguent pas nettement des niveaux de la période 3 (empierrement, tas de charbon). Les remblais antiques de la période 2 sont aussi très hétérogènes mais plutôt résistants à partir de 46 m NGF. Enfin, comme il a été vu dans la partie précédente (5-2), les alluvions anthropisées ne se distinguent pas des remblais sus-jacents (SP 16.13, 16.34, 16.32, 16.37, 16.39, 16.43 et 16.80 ?).

Sur le site 69, les code-barres à 5 et 10 cm montrent que les comblements du fossé défensif et de l'aménagement en bord de Loire (période 4) ainsi que les aménagements postérieurs (période 5) sont plus hétérogènes que les autres niveaux. Par ailleurs, les niveaux liés au système défensif (période 3) sont globalement moins résistants que le reste. Enfin, les alluvions se distinguent nettement du dépôt archéologique pour trois SP sur quatre (SP69.05, 69.06 et 69.11).

Sur le site L1015, les code-barres montrent que le dépôt archéologique et les sols naturels sont hétérogènes. Les alluvions fines (US 163) ne se distinguent pas du dépôt archéologique car les valeurs sont inférieures à 6,6 MPa. Toutefois, les alluvions grossières (US164) apparaissent plus nettement sur les codes-barres par leurs valeurs élevées (sections 38, 39-43, 48-49-50, 100 et AB).

En conclusion, ces observations rejoignent les résultats obtenus par le référentiel archéologico-mécanique :

- les remblais et les alluvions grossières sont très résistants
- les connaissances préalables à l'étude (estimation cote du toit des alluvions) sont indispensables pour pouvoir les distinguer.

Enfin, la modélisation de l'hétérogénéité en code-barre d'un site archéologique est utile aux archéologues car elle permet de dissocier des ensembles stratigraphiques homogènes à l'échelle décimétrique (échelle de l'agrégation retenue pour le référentiel) plutôt qu'à l'échelle centimétrique (échelle de l'US).

### 5-3-3- Analyse du bruit et de la qualité d'un signal

Une autre piste de travail a été développée durant la thèse de L. Houy concernant la détection de « zones bruitées » sur le signal ainsi que l'affectation d'un indice de qualité global du signal. Un bruit correspond à un signal agité, non-organisé (aléatoire) qui est lié soit à un frottement de la tige perturbant la mesure, soit à une activité humaine particulière.

#### • *Démarche*

Le bruit et la qualité d'un signal sont mesurés à partir du concept de l'**entropie**\*<sup>46</sup>, présenté dans le 4<sup>e</sup> chapitre (4-3).

L'hypothèse de travail est que le **bruit** correspond à « une erreur de mesure qui est dans ce cas prépondérante vis-à-vis de la mesure au sens strict » (HOUY 2005 : 48). Il existe une relation

---

<sup>46</sup> NB : la fonction de l'entropie,  $L(z) = \sum_0^z |X(z + \Delta z) - X(z)|$

entre l'entropie du signal  $m_{|Qd|}$  (la pente de la fonction  $L(z)$ ), la portée  $a$  (laquelle définit la structure de corrélation spatiale entre les points) et les variances  $\sigma^2_{Qd}$  et  $\sigma^2_{|Qd|}$  sur chaque zone où la fonction  $L(z)$  peut être considérée comme linéaire, sous l'hypothèse d'une distribution supposée gaussienne (DENIS, CRÉMOUX 2002) :

$$m^2_{|Qd|} = \frac{2\sigma^2_{Qd}}{a^2} - \sigma^2_{|Qd|}$$

soit 
$$a = \frac{2\sigma^2_{Qd}}{\sqrt{m^2_{|Qd|} - \sigma^2_{|Qd|}}}$$

L'agitation d'une zone est d'autant plus élevée que sa portée  $a$  est faible (signal peu structuré) et que sa variance  $\sigma^2_{|Qd|}$  est élevée (HOUY 2005 : 18). En outre, le bruit est quantifié au sein de chaque zone homogène (Unité Mécanique, cf chapitre 4) en calculant le rapport entre la portée  $a$  et le pas d'échantillonnage  $\Delta z_m$  (épaisseur zone). Lorsque la portée  $a$  est inférieure ou égale à  $\Delta z_m$ , le bruit prédomine. Par contre, lorsque la portée est supérieure au pas d'échantillonnage (soit le rapport  $a / \Delta z_m > 1$ ), les données reflètent la variabilité intrinsèque du sol. Dans ce dernier cas, on suppose seulement que le bruit est négligeable (Fig. 139). La démarche est schématisée en prenant l'exemple du SP 16.79 (Pl. 115).

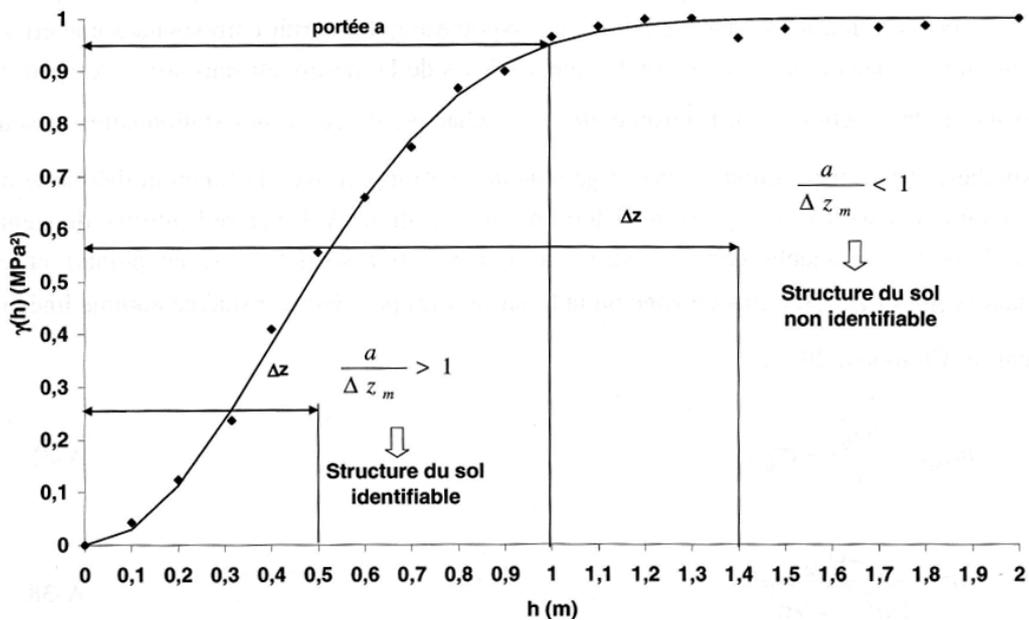


Fig. 139 - Influence du rapport  $a / \Delta z_m$  pour identifier les zones bruitées, avec un variogramme de modèle Gaussien (HOUY 2005 : 49, Figure A-20)

Le calcul de ce rapport  $a / \Delta z_m$  permet de distinguer les zones stationnaires structurées de celles qui sont bruitées. Ces zones bruitées peuvent alors être écartées de l'analyse sur la variabilité spatiale des propriétés mécaniques du sous-sol.

La détection des zones bruitées permet aussi de calculer un **indice de qualité global (IQ)** d'un pénétrogramme en comparant le nombre de points de mesures bruitées  $N_{Qd(z) \text{ bruitée}}$  au nombre total de mesures  $N_{Qd(z)}$  :

$$IQ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n N_{Qd(z) \text{ bruitée}}}{\sum_{j=1}^m N_{Qd(z)}}$$

L'indice de qualité dépend du seuil retenu entre le rapport  $a / \Delta z_m$ . En effet, si on considère que les mesures exploitables sont celles dont le rapport  $a / \Delta z_m$  est supérieur ou égale à 2 et pas à 1 comme il a été défini plus haut, l'indice de qualité global diminue. L'exemple du SP 16.79 montre que l'indice de qualité passe de 84% pour un rapport  $a / \Delta z_m < 1$  à 52% pour un rapport  $a / \Delta z_m < 2$  (HOUY 2005 : 49-50).

### • Résultats

L'analyse a été réalisée pour les sections 6 et 21 du site 16, en confrontant les codes-barres et les coupes stratigraphiques, les zones bruitées apparaissent en rouge en fonction du rapport  $a / \Delta z_m < 2$  (Pl. 116 et Pl. 117).

Pour les deux sections, on observe que les zones bruitées sont situées principalement dans les niveaux non fouillés mais interprétés comme des remblais d'aménagement de la période antique d'après les observations voisines. Ce sont des niveaux majoritairement sableux avec la présence de matériaux de construction de différents calibres (cailloux et pierre), du « tout venant ». Le bruit semble être ici la caractéristique de ce type de formation archéologique. Il faudrait le vérifier sur d'autres sites.

Cependant, on note une différence entre les sections concernant les jardins modernes (périodes grisées) : les signaux des SP de la section 6 sont bruités ponctuellement, tandis que ceux de la section 21 ne sont pas bruités. L'ensemble des SP traverse pourtant des niveaux équivalents. Toutefois, les données de terrains permettent de poser l'hypothèse que l'occupation X (agreg 217) est divisée en deux ensembles : une cour dans la partie nord de la zone et un jardin dans la partie sud de la zone 2. Ainsi, les bruits (dans la partie nord) pourraient être expliqués par la présence d'artefacts archéologiques (pierre, cailloux).

Enfin, les indices de qualité des SP étudiés sont supérieurs à 89% pour le rapport  $a / \Delta z_m < 1$  et supérieurs à 49 % pour le rapport  $a / \Delta z_m < 2$  (Fig. 140). En confrontant ces deux indices, il faut retenir que les SP 16.71, 16.72, 16.73, 16.74 et 16.82 sont ceux qui ont le moins de zones bruitées.

**Section 6 - Indice de Qualité**

SP	66	67	68	69	70	71	72	73	74
$a / \Delta z_m < 1$	0,89	0,78	0,92	0,86	0,95	0,91	0,91	0,95	0,90
$a / \Delta z_m < 2$	0,70	0,65	0,61	0,71	0,49	0,82	0,84	0,95	0,81

**Section 21 - Indice de Qualité**

SP	75	76	77	78	79	80	81	82
$a / \Delta z_m < 1$	0,94	0,98	1	0,87	0,84	0,97	0,89	0,93
$a / \Delta z_m < 2$	0,63	0,68	0,59	0,7	0,52	0,75	0,65	0,93

Fig. 140 - Tableau des indices de qualité des SP des section 6 et 21 du site 16 en fonction de  $a / \Delta z_m$

En conclusion, ces premiers résultats montrent que l'analyse du bruit est la prochaine étape qu'il faut envisager de suivre pour le traitement des données pénétrométriques. Elle est une approche complémentaire à celle de l'analyse variographique pour distinguer des zones dites homogènes. Il faudra construire des codes-barres et étudier le bruit avec une approche multi-échelles (5, 10, 20, 50 et 100 cm).

## 5-4- Le couplage des données géotechniques aux données géophysiques

L'utilisation du pénétromètre lors de campagne de prospection a été l'occasion de le coupler avec des méthodes géophysiques. Je présente ici les premiers résultats de ces expériences.

L'objectif est de tenter de répondre à différents points tels que le choix de la maille d'étude pour pouvoir détecter des vestiges archéologiques et l'emploi du PANDA *a priori* ou *a posteriori* de la géophysique.

### 5-4-1- Observations sur le site de Saint-Julien à Tours

Sur le site 16, l'emploi de la géophysique (électrique et magnétique) et du PANDA s'est fait simultanément durant les 4 campagnes de fouilles sans réflexion directe sur l'application d'un maillage commun. Toutefois, la problématique commune était de détecter des vestiges et de se concentrer sur l'étude des niveaux du Haut Moyen Age souvent difficiles à interpréter, les Terres Noires.

La méthode électrique a détectée des anomalies conductrices et résistantes, notamment en zone 1 pour les profondeurs moyennes de 48,35 et 47,9 m NGF (Pl. 118, Pl. 119) et en zone 2 pour les profondeurs moyennes de 48,15 et 47,65 m NGF (Pl. 120, Pl.121). Les profondeurs atteintes par la géophysique sont représentées en pointillés bleus sur les coupes stratigraphiques (échelle 10 cm). A l'aide des code-barres des sections 2, 6, 10 et 21 (Pl. 98, Pl. 66, Pl. 101, Pl. 102), on observe une corrélation entre les anomalies et les valeurs de la résistance de pointe Qd :

- en zone 1, sur la section 2, les valeurs de résistances des SP sont les mêmes (entre 2 et 4 MPa) pour les deux profondeurs (une seule agrégation) et les images électriques montrent les mêmes valeurs de résistivité. En zone 2, sur la section 2, les valeurs de résistance des SP sont élevées à 48,15 NGF et faibles à 47,9 NGF (deux agrégations différentes) et les images électriques témoignent de niveaux résistants à 48,15 NGF et conducteurs à 47,9 NGF ;

- sur la section 6, les valeurs de résistance des SP sont plus élevées à 48,15 NGF qu'à 47,65 NGF et les images électriques montrent une résistivité plus importante à 48,15 NGF qu'à 46,65 NGF ;

- sur la section 10, les valeurs de résistance des SP sont fortes pour les deux profondeurs atteintes et les images électriques révèlent également des zones résistantes ;

- sur la section 21, les valeurs de résistance des SP montrent des valeurs moins élevées en allant vers le sud (SP 16.78 et 16 .79) pour les deux profondeurs d'investigations tandis que les

images électriques révèlent, sur l'ensemble de la surface, la présence de niveaux plus résistants à 48,15 m NGF qu'à 47,9 m NGF.

Ainsi, ces résultats montrent que l'on peut utiliser le PANDA pour la caractérisation fonctionnelle des anomalies détectées à l'aide du référentiel archéologico-mécanique et pour préciser la profondeur des vestiges archéologiques.

#### 5-4-2- Observations sur le site du 7 rue de La Bazoche à Tours

A Tours, lors du projet de réhabilitation des bâtiments du 7 rue de la Bazoche, 28 SP ont été exécutés à une maille de 2 m. Ensuite, une campagne de prospection électrique et magnétique a été réalisée par A. Kermorvan (Université de Tours) avec, respectivement, une maille de 2,25 m et de 1 m. Il faut préciser qu'aucun projet de fouille n'est envisagé et qu'il est donc impossible d'expliquer les anomalies mises en évidence.

L'objectif était de vérifier les hypothèses de la présence de murs du 2<sup>e</sup> état de l'amphithéâtre, d'un fossé et d'une rue suivant l'axe sud-nord (Pl. 70). Les relevés de bâti montrent que les éléments de l'amphithéâtre (à l'ouest) apparaissent vers 53 m NGF sur ce site. Sous l'hypothèse que le mur de l'amphithéâtre n'ait pas été totalement détruit, il y a une forte probabilité que les SP (notamment BAZ.8 et BAZ.9, Pl. 122) et la prospection électrique le détectent (Annexe 114 et 115).

Une image en code-barre simplifiée (sans étude variographique au préalable) est construite pour l'axe ouest-est des SP correspondants afin de restituer la stratigraphie du site (Pl. 123). Les code-barres révèlent des niveaux plus indurés dans la zone interne de l'amphithéâtre que dans la zone externe : il s'agit peut-être de remblais liés à la construction de l'édifice. Les SP BAZ.8 et BAZ.9 ne semblent pas avoir atteints de maçonnerie. Toutefois, les SP BAZ.7 présente un refus à la cote 52,5 m NGF : est-ce le mur du deuxième état de l'amphithéâtre ? Une étude plus poussée des pénétrogrammes à la lumière du référentiel archéologico-mécanique permettra de poser des hypothèses sur la nature des niveaux traversés par le PANDA.

Les mesures électriques ont montré la présence de deux ensembles sédimentaires différents orientés sud-ouest/nord-est (Annexe 114). Cet axe va à l'encontre de l'orientation que suit le mur de l'amphithéâtre. Les mesures magnétiques sont plus sensibles à la surface (éléments métalliques, structures du sol, présence d'eau) et font apparaître quelques anomalies impossibles à interpréter (Annexe 115). La prospection électrique n'a pris en compte qu'environ 2 mètres

d'épaisseur du sous-sol. Il aurait été intéressant d'employer une méthode radar afin d'explorer les niveaux sous-jacents.

#### 5-4-3- Observations sur le site de Stolpie

A Stolpie, en Pologne, en milieu rural, 18 SP ont été réalisés suivant une maille de 30 m (carroyage suivi pour la prospection pédestre) et une méthode de prospection magnétique a été effectué par A. Tabbagh et J. Thiesson (Université Paris 7) dans le cadre de l'ACI TTT Dynamique des paysages.

Quelques anomalies ont été détectées par géophysiques ; seule une correspond à une structure archéologique. Cependant, aucun SP n'a été fait à cet endroit. Une autre anomalie correspondait à une trace d'eau qui a été mise en évidence par un essai à la tarière. 1 SP a été réalisé à son emplacement : l'anomalie apparaît bien sur le signal.

##### • *Confrontation avec les observations géophysiques et mécaniques :*

Le plan d'implantation des SP superposé à celui des interprétations des géophysiciens montre que le maillage adopté (30 mètres) sur ce site est trop lâche pour appréhender d'éventuels vestiges archéologiques (Pl. 124).

Une anomalie a été distinguée lors de la prospection magnétique ( $x = 167$ ,  $y = -32$  m). Le SP STO.15 a été effectué dans l'optique de reconnaître l'anomalie et évaluer sa profondeur (Fig.4). Il a été localisé suivant l'orientation du carroyage pour implanter les sondages STO.16 et STO.17, situés à 10 m de part et d'autre du n°15. Le sondage à la tarière montre la présence d'eau à 1,43 m et la trace de bois. Les observations sont :

- entre 0 et 143 cm : une couche noire argileuse homogène
- entre 143 et 150 cm : une couche noire argileuse très humide.

On observe anormalement une résistance inférieure à 1 MPa entre 1,20 et 1,50 m sur le pénétrogramme (Pl. 125). La présence d'eau correspondrait à un ancien bassin de collecte d'eau (drainage).

On note qu'un autre sondage à la tarière a été réalisé près du sondage n°14 afin de compléter le référentiel de ce site. On peut distinguer (Pl. 126) :

- entre 0 et 86 cm : une couche noire limono-argileuse homogène avec traces d'argile blanche

- entre 86 et 100 cm : une couche brune claire limoneuse homogène.

Dans ce cas d'étude, le but premier était de détecter des vestiges archéologiques. Il apparaît que la maille adoptée ne convient pour l'emploi au pénétromètre. Par contre, son emploi *a posteriori* de la prospection géophysique permet d'apporter une information sur la profondeur de l'anomalie.

Ces premiers résultats montrent qu'il est préférable d'utiliser le PANDA *a posteriori* de la prospection géophysique afin d'orienter le choix de la maille d'analyse et aussi de préciser la profondeur des anomalies détectées. Puis, à l'aide du référentiel, il sera possible de proposer une caractérisation fonctionnelle (possibilités) des niveaux étudiés. On retiendra que les anomalies résistantes sont les plus faciles à détecter.

En milieu urbain, il faut employer une maille assez fine si la question est de détecter des vestiges archéologiques. Ainsi, en développant la méthode du code-barre et la détection des bruits de mesure, il serait bien de restituer un plan des zones aux propriétés mécaniques communes que l'on pourra confronter aux résultats géophysiques.

## **5-5- Bilan**

La mobilisation des différentes sources de données pour une évaluation à l'échelle du site révèle des informations sur l'épaisseur globale du dépôt archéologique et sa caractérisation interne.

D'abord, un référentiel archéologico-mécanique a permis de valider les postulats sur les caractéristiques des couches archéologiques (compacité, épaisseur, degré d'hétérogénéité). L'objectif était de confronter les données archéologiques à l'échelle de l'agrégation et les mesures pénétrométriques par l'intermédiaire des UC. Les résultats montrent qu'il est possible de distinguer le dépôt archéologique et les niveaux naturels. En analysant conjointement les caractéristiques mécaniques et la position altimétrique des UC, on peut proposer différentes interprétations fonctionnelles.

Ensuite, un essai de modélisation du caractère hétérogène de la stratification a été réalisé par la construction d'images en code-barres. La stratification a été découpée selon des zones dites « homogènes » d'une épaisseur minimale de 5 et 10 cm. Par ailleurs, on a estimé la part de « bruit de mesure » que présente les pénétrogrammes par l'estimation de leur degré d'agitation (entropie). Le bruit de mesure est interprété sur le site<sup>16</sup> comme un trait spécifique à un remblai sableux et comme des artéfacts de type cailloux et/ou pierres dans des niveaux de cour.

Enfin, on a démontré qu'il est préférable d'employer le pénétromètre *a posteriori* de la prospection géophysique de façon à orienter la maille d'analyse et pour aider à l'interprétation des anomalies géophysiques.

## Chapitre 6- Du point à la ville : modélisation du volume du sol urbain

L'objectif est de mettre en perspective le potentiel informatif du dépôt archéologique établi à l'échelle du site par rapport aux hypothèses énoncées à l'échelle de la ville. Un schéma synthétise les résultats obtenus à partir des données utiles à l'évaluation à l'échelle de la ville et du site (Pl. 127). Le problème réside en la définition d'une échelle adaptée à la lecture archéologique et géotechnique des couches archéologiques.

L'expérience sur la ville de Tours permet de mettre en place un indice de l'intensité de l'occupation humaine et un modèle de production de stratification à l'échelle de la ville. De plus, l'examen des différentes sources utiles apporte des informations sur l'épaisseur du dépôt archéologique et sur le toit des alluvions. L'analyse des pénétrogrammes propose également des hypothèses sur l'épaisseur du dépôt et un découpage en Unités Mécaniques, des zones dites « homogènes » d'un point de vue mécanique (résistance  $Q_d$  et variabilité interne).

L'étude des sites à Tours et à Lyon suscite la mise en oeuvre d'un référentiel liant les données archéologiques aux données géotechniques à l'échelle de l'agrégation par l'intermédiaire d'Unité Contextuelle. Il est possible de distinguer le dépôt archéologique et les niveaux naturels, à l'aide de paramètres liés aux propriétés mécaniques du sol et à la profondeur, et de proposer des interprétations fonctionnelles pour les UC. Enfin, l'image en « code-barre » est un nouveau mode de représentation de la stratification des sites qui permet de rendre compte du degré d'hétérogénéité du sol, de définir la qualité d'un signal et de détecter des zones de « bruits de mesure ».

Dans un premier temps, j'éclairerai deux points :

- la confrontation des UM définies empiriquement sur les pénétrogrammes de SP du site 16 avec le référentiel archéologico-mécanique et les codes-barres correspondants. La réflexion sera basée sur le problème de l'échelle d'analyse ;

- la validation des hypothèses énoncées sur l'épaisseur du dépôt archéologique sur les SP réalisés à Tours et le référentiel archéologico-mécanique. Le but est de compléter la base de données liée à l'estimation de l'épaisseur du dépôt archéologique et du toit du niveau naturel.

Dans un deuxième temps, je présenterai la démarche suivie pour réaliser les cartes d'interpolation de l'épaisseur du dépôt et du toit des alluvions.

## **6-1- Le potentiel informatif à l'échelle du site pour analyser le volume du sol urbain à Tours**

La confrontation du référentiel archéologico-mécanique avec le découpage des pénétrogrammes en UM permet d'éclairer la question du choix de l'échelle d'analyse des pénétrogrammes et de valider les hypothèses sur l'épaisseur du dépôt archéologique.

### **6-1-1- Résultats de la confrontation du référentiel archéologico-mécanique avec les UM des SP du site 16**

Les résultats des 4 tests pour la distinction des UM des SP 16.32 et 16.78 sont comparés au log établi à l'échelle des UC et au code-barre correspondants (Pl. 128, Pl. 129).

Les UM définies par les tests 1 et 4 sont d'ordre décimétrique tandis que les tests 2 et 3 sont d'ordre centimétrique (de 5 à 50 cm). Les tests 2 et 3 sont les plus proches de l'échelle de l'UC mais il n'y a pas de correspondance avec les UM pour les deux SP.

Si on confronte les UM des tests 1 et 4 avec les code-barres des SP, sans calculer les caractéristiques des UM, on observe que :

- l'UM 32.1 a un Qd moyen à fort
- l'UM 32.2 a un Qd moyen
- l'UM 32.3 a un Qd moyen
- l'UM 78.1 a un Qd faible à moyen
- l'UM 78.2 a un Qd fort.

Le code-barre construit en partant du postulat qu'une zone homogène possède une épaisseur minimale de 10 cm met mieux en valeur les UM distinguées pour le SP 16.78 que pour le SP 16.32.

Enfin, on a affecté manuellement à chaque UM du test 1, une classe fonctionnelle du référentiel archéologico-mécanique et les sous-types fonctionnels correspondants (Fig. 141).

UM	médiane Qd	c.v. Qd	épaisseur	prof. moy.	Hypothèses référentiel	observations terrain	Validation
32.1	2,48	0,56	2,26	1,21	classe 2/3	Mise en culture	Non
						Empierrement	Oui
						Remblai aménagement	Oui
32.2	1,50	0,45	1,50	3,07	classe 3	Remblai aménagement	Oui
32.3	2,22	0,67	1,70	4,77	classe 4	Remblai aménagement	Non
						Alluvions anthropisées ?	Non
78.1	1,80	0,54	3,04	1,50	classe 3	Mise en culture	Non
						Dépotoir	Non
						Remblai aménagement	Oui
78.2	5,50	0,47	0,95	3,59	classe 4/5	Remblai aménagement ou Alluvions ?	Non Oui

Fig. 141 - Caractérisation fonctionnelle des UM des SP 16.32 et 16.78 établies d'après le test 1

Le problème est que l'échelle d'analyse est différente entre le test 1 et l'établissement du référentiel : une UM peut correspondre à une ou plusieurs UC.

La confrontation des UM décrites à l'échelle d'ordre décimétrique et centimétrique avec le référentiel archéologico-mécanique justifie, la multiplication des tests sur l'étude de l'hétérogénéité et la construction de code-barres en travaillant à une échelle adaptée au référentiel (10-25 cm).

#### 6-1-2- Validation des hypothèses sur l'épaisseur du dépôt archéologique

Pour constituer une base de données sur l'épaisseur du dépôt archéologique de Tours, des points d'observations ont été sélectionnés à partir de logs archéologiques et de logs géotechniques. Par ailleurs, des hypothèses sur l'épaisseur et des indices de fiabilité ont été établis à partir des sondages au PANDA (4-1-5, Fig. 23). L'objectif est de valider ces hypothèses à partir du référentiel archéologico-mécanique.

On ne retiendra ici que les points pour lesquels l'estimation est jugée satisfaisante et la localisation comble un vide documentaire (Fig. 142).

Lieu SP	Num SP référence	Hypothèse cote alluvion	Epaisseur estimée du dépôt (m)	UM correspondante	Médiane Qd	c.v. Qd
T20	201	45,50	3,90	UM 201.3	5,71	0,46
T23	231	46	2,4	UM 231.3	9,67	0,43
T3	31	45,00	7,20	UM 31.3	11,41	0,38
T30	302	46,70	4,70	UM 302.3	7,88	0,61
T38	382	45,50	3,65	UM 382.4	7,79	0,32
T41	411	47,50	4,75	UM 411.2	5	0,75
T8	81	46,4	5,1	UM 81.3	7,03	0,35

Fig. 142 - SP avec hypothèses sur la cote du toit des alluvions et l'épaisseur du dépôt archéologique à Tours

Le toit des alluvions est situé à une cote altimétrique qui varie entre 46 et 47,50 et les valeurs de résistance sont supérieures à 5MPa et le c.v. (Qd) est supérieur à 0,32. Le référentiel montre qu'à une certaine profondeur, lorsque les valeurs de résistance Qd sont élevées (> 4 MPa) et le coefficient de variation moyen à fort (> 0,29), la probabilité d'être dans un niveau naturel est très forte. Les hypothèses proposées ici sont alors validées. Ainsi, lorsque l'on possède des informations préalables sur la cote du toit des alluvions dans le voisinage du point à estimer et que l'on découpe manuellement les pénétrogrammes en UM, à l'échelle décimétrique, il est possible d'obtenir une estimation convenable de l'épaisseur du dépôt archéologique.

En conclusion, ces 7 points d'observations sont intégrés à la base de données créée pour élaborer une carte des épaisseurs du dépôt et une carte du toit des alluvions à l'échelle de l'espace urbanisé ancien.

## 6-2- Essai de modélisation de l'épaisseur du volume du sol urbain à Tours

Un des objectifs de l'évaluation est de modéliser l'épaisseur du volume du sol urbain. Il s'agit de réaliser une carte des épaisseurs du dépôt archéologique, et dans le même temps, une carte du niveau naturel à l'échelle de la ville. L'application a été réalisée pour la ville de Tours à partir des données sélectionnées et présentées dans le chapitre 4.

Dans un premier temps, une base de données a été constituée à partir des points d'observations et des hypothèses sur l'épaisseur. Dans un deuxième temps, une analyse de la structuration spatiale des points d'observation a été réalisée pour élaborer les cartes des épaisseurs du dépôt archéologique et du toit des alluvions.

### 6-2-1- Constitution d'une base de données à partir des données et des hypothèses de travail

Pour modéliser le volume du sol urbain, on a recours aux observations archéologiques, géologiques et géotechniques présentées dans le chapitre 4. Ces observations sont représentées par des points au sein de la zone d'étude retenue.

Une base de données géographique a été constituée pour représenter ces observations à l'échelle de l'espace urbanisé ancien : **BDdepot1**. Les champs de cette couche sont :

- les coordonnées géographiques, X et Y
- un code identifiant
- la source de l'observation
- la cote altimétrique (en m NGF) du niveau actuel
- la cote altimétrique (en m NGF) du toit du niveau naturel (alluvions de la Loire)
- l'épaisseur du dépôt archéologique (en m)

Au total, 145 points ont été retenus dans l'espace étudié (Pl. 130, Pl. 131 et Fig. 143). Le premier critère de sélection était d'obtenir des informations pour renseigner l'ensemble des champs. Le deuxième critère était de retenir que les points contenus dans la zone d'étude pour réaliser les cartes d'estimation du dépôt archéologique et du toit du niveau naturel.

On observe que ces données sont irrégulièrement réparties dans l'espace et que l'épaisseur varie entre 0,75 et 12 mètre. L'épaisseur moyenne est de 3,85 m, avec un écart-type de 1,9. Il faut noter que 80% des observations ont une épaisseur inférieure à 6 mètres.

Par ailleurs, le toit des alluvions varie entre 41,2 et 50,7 m NGF. La cote moyenne du toit des alluvions est de 46,14 m NGF avec un écart-type de 1,39. 80% des effectifs ont le toit des alluvions inférieur à 47 m NGF.

Un point important est que cette base contient 2 points dont les mesures ont été extrapolées à partir de données voisines (« Pont Wilson » et « Transect 8 ») (Pl.131) : ces données ont été construites afin de donner une valeur limite à l'espace étudié. C'est pourquoi, une autre base de donnée excluant ces points extrapolés a été établie et nommée **BDdepot2**. Cette deuxième base sera utilisée pour analyser la structuration spatiale des observations sur l'épaisseur et le toit des alluvions.

Sources données	BD O.Marlet (archo)	BD de Blin-Taberly (geotechnique)	Observations archéologiques	BDgeotech	Hypothèses PANDA	Estimation par extrapolation
BDdepot1	16	65	40	15	7	2
BDdepot2	16	65	40	15	7	0

Fig. 143 - Tableau de contingence des points sélectionnées pour la constitution de BDdepot1 et BDdepot2.

#### 6-2-2- Elaboration d'une carte des épaisseurs du dépôt archéologique

Pour construire une carte des épaisseurs de ce dépôt, il faut générer des surfaces à partir des points par une **interpolation\***. C'est une opération qui consiste à déterminer, à partir de valeurs discontinues, de nouvelles valeurs correspondant à un caractère intermédiaire pour lequel aucune mesure n'a été effectuée. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 4, le problème est la généralisation des observations ponctuelles à toute la ville. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode d'interpolation adaptée à la répartition spatiale des données et à la nature même de ces données. Il est possible de réaliser ce genre d'analyse à partir de logiciel traitant des données géoréférencées (Mapinfo, ArcGis, Surfer, GDM).

Par ailleurs, l'objectif est d'affiner la première tentative cartographique de la carte déjà élaborée pour la ville de Tours lors de la maîtrise d'O. Marlet (MARLET 2000, Annexe 47) . Elle a été réalisée à l'aide du logiciel GDM du BRGM.

Avant de présenter les cartes des épaisseurs du volume de sol urbain à Tours, il faut revenir sur le choix de la méthode d'interpolation puis l'analyse de la structuration spatiale.

- *Choix d'une méthode d'interpolation*

Pour pouvoir représenter la variabilité spatiale de ces épaisseurs, l'**interpolation spatiale** est la procédure la mieux adaptée. Elle permet l'estimation de la valeur d'une variable en un point à

partir des valeurs de la même variable mesurée en des points voisins (ARNAUD, EMERY 2000 ; ZANINETTI 2005 : 213). Il existe deux approches pour l'interpolation :

- une approche déterministe où la pondération est définie à priori (fonction Spline, fonction inverse de la distance, polygones de Thiessen...)

- une approche probabiliste où la pondération est définie à partir des données (Krigage).

Celle qui semble la mieux adaptée à l'étude est celle du **krigeage**. Cette méthode porte le nom de son précurseur, D.G. Krige, ingénieur minier, qui a développé des méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir de forages à partir des années 1950 (KRIGE 1951). C'est G. Matheron (MATHERON 1970) qui formalise l'approche « en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale » (GRATTON 2002 : 1). Il met au point la théorie des variables régionalisées, connue sous le nom de **géostatistique\***. Elle est l'application des probabilités aux phénomènes naturels qui se développent dans l'espace et dans le temps. Le krigage est un estimateur géostatistique qui devient alors une référence auprès des géographes, des sciences de la terre et des sciences humaines (ZANINETTI 2005 : 233-234). Ce modèle probabiliste donne également un indicateur de la précision de l'estimation. « Cet indicateur, appelé variance d'estimation, est un outil précieux car il ouvre la voie à une possible gestion des incertitudes (traduites en termes de variance) » (SANDJIVY 2003).

Le krigage se différencie par les autres méthodes déterministes (Spline, distance-inverse, méthode des plus proches voisins, polygone de Thiessen...) du fait qu'il fait précéder l'interpolation d'une **analyse variographique**, qui consiste à élaborer un modèle de covariance ou de variogramme à partir de données et d'informations disponibles (ARNAUD, EMERY 2000 : 179 ; ZANINETTI 2005 : 234).

En effet, l'intérêt de la variographie est de pouvoir analyser et modéliser le degré de ressemblance (autocorrélation) entre la mesure d'un phénomène obtenu entre deux points. En particulier, la variographie conduit à identifier la distance maximale entre deux points de mesures au delà de laquelle, il n'y a plus de corrélation.

En fait, pour les différentes approches d'interpolation spatiale, l'estimation d'une valeur est calculée suivant une fonction F où chaque valeur est pondérée. Le problème consiste à déterminer la pondération de chacun des points environnants. Dans le cas du krigage, le poids correspond au degré de ressemblance obtenu par l'analyse variographique (GRATTON 2002 : 1).

Pour mettre en œuvre le krigage, il faut répondre à différentes conditions (ARNAUD, EMERY 2000) :

- la moyenne et la variance de la fonction F doivent être stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de la position des points, seulement la distance entre les points

- les données voisines du point à estimer, appelé voisinage, doivent être en nombre suffisant pour conduire à une estimation précise et peu sensible à l'ajout ou au retrait d'une donnée périphérique.

En posant l'hypothèse de stationnarité, la méthode qui convient pour l'étude est le Krigeage ordinaire.

- *Analyse de la structuration spatiale de l'épaisseur du dépôt : analyse variographique de BDdepot2*

Pour analyser la structuration spatiale de l'épaisseur du dépôt archéologique, il faut en tracer un semi-variogramme qui est un graphe qui présente le demi-écart quadratique moyen (fonction d'ajustement choisie ici) de couples de points en fonction de leur distance (cf chapitre 2, 4 et 5). Le but est de déterminer la distance de corrélation spatiale entre les points d'observations, soit la portée  $a$  du semi-variogramme.

Pour réaliser le variogramme expérimental, il faut définir plusieurs paramètres :

- la portée limite qui définit la limite de la recherche (moitié de la fenêtre d'étude) ;
- le nombre de pas de recherche ;
- la distance entre les pas de recherche ou distance de voisinage ;
- la direction du variogramme, omnidirectionnel ou directionnel ;
- le champ du cône d'orientation de l'orientation retenue.

Plusieurs logiciels ont été utilisés afin d'élaborer le variogramme de l'épaisseur du dépôt archéologique :

- le logiciel VARIOWIN© (PANNATIER 1996, ANSELIN 2003)
- l'extension *Geostatistical analyst* d'ARGIS© (ESRI)
- le logiciel ISATIS© mis au point par des chercheurs de la société Géovariances

L'étude a été réalisée à l'aide de géotechniciens du CDGA (D. Breyse, S. Dominique – Université Bordeaux I) et de géologues du GEAC (S. Salvador, S. Morice – Université de Tours) pour les aspects techniques des logiciels ainsi que pour la critique des applications.

La portée limite a été définie à 1200 m. Pour déterminer la distance de voisinage, nous avons estimé la densité de points théorique. On obtient 1 point tous les 128 mètres (143 points sur 235,27 ha étudié ; la zone étant un polygone représentatif de l'espace urbanisé ancien). Nous avons

alors choisi 100 m de distance de voisinage qui correspond à la tolérance selon J.-M. Zaninetti (ZANINETTI 2005 : 237). Le nombre de pas utilisé est 12.

Dans un premier temps, avec ISATIS©, on obtient un cercle variographique qui permet de déterminer la direction du variogramme (Fig. 144).

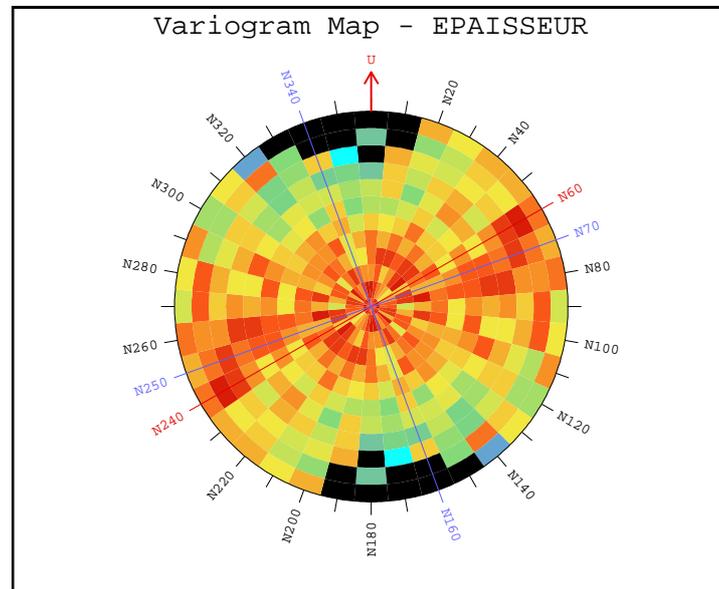


Fig. 144 - Cercle variographique de l'épaisseur de BDdepot2

A priori, on observe que le variogramme des épaisseurs est directionnel à  $70^{\circ}/160^{\circ}$  : il est anisotrope. La variance est la plus importante en rouge (sur l'axe de  $70^{\circ}$ ) ; s'il n'y a pas de concentration de couleur, c'est que le variogramme est omnidirectionnel (isotropie).

Le variogramme de BDdepot2 est tracé suivant les directions ( $70^{\circ}/160^{\circ}$  avec un angle de tolérance de  $10^{\circ}$ ), le pas d'étude (100 mètres) et le nombre de pas (12) (Fig. 145). Pour chaque pas de recherche, on possède le nombre de paires de points<sup>47</sup> qui ont contribué à calculer la variance correspondante.

<sup>47</sup> Il est conseillé d'avoir au minimum 20 paires de points de mesure ; à partir de 50 paires, les résultats sont robustes.

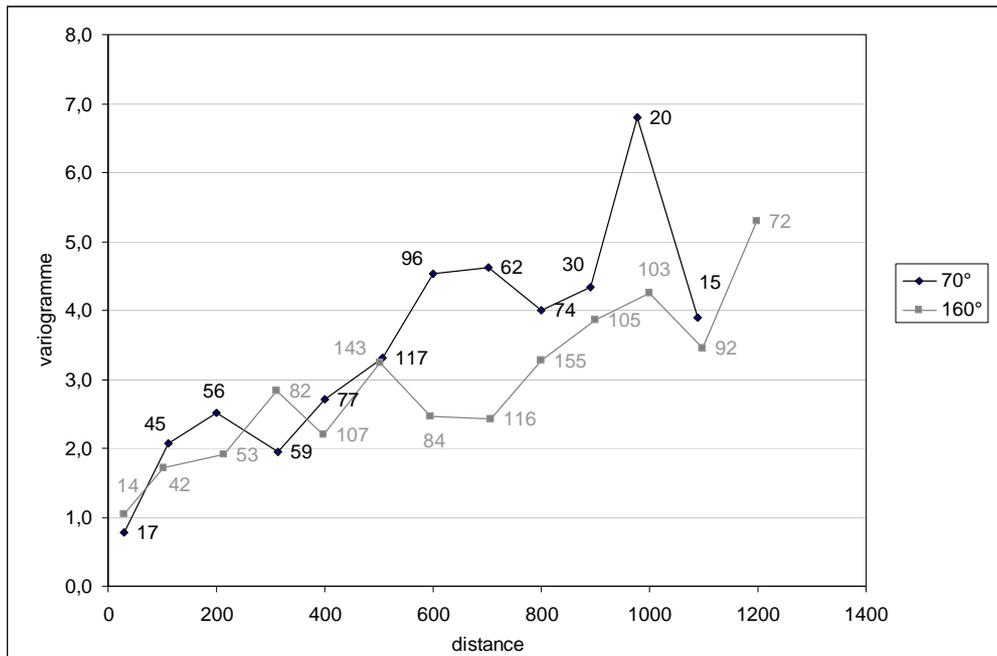


Fig. 145 - Variogrammes expérimentaux de BDdepot2 pour les directions 70°/160°

On ajuste alors un modèle théorique sur le variogramme expérimental (Fig. 146). Celui qui est retenu est un modèle exponentiel avec un effet de pépite de 0,4, une portée  $a$  de 300 m et une variance totale  $C$  de 4,6, suivant la relation  $\gamma(h) = C*[1 - \exp(-h/a)]$ , avec  $h$ , la distance,

soit  $\gamma(h) = 0,4 + 4,2*[1 - \exp(-h/300)]$  pour la direction de 70° et  $\gamma(h) = 0,4 + 4,2*[1 - \exp(-h/200)]$  pour la direction de 160°. L'opération est délicate puisqu'elle dépend de l'objectivité de l'utilisateur.

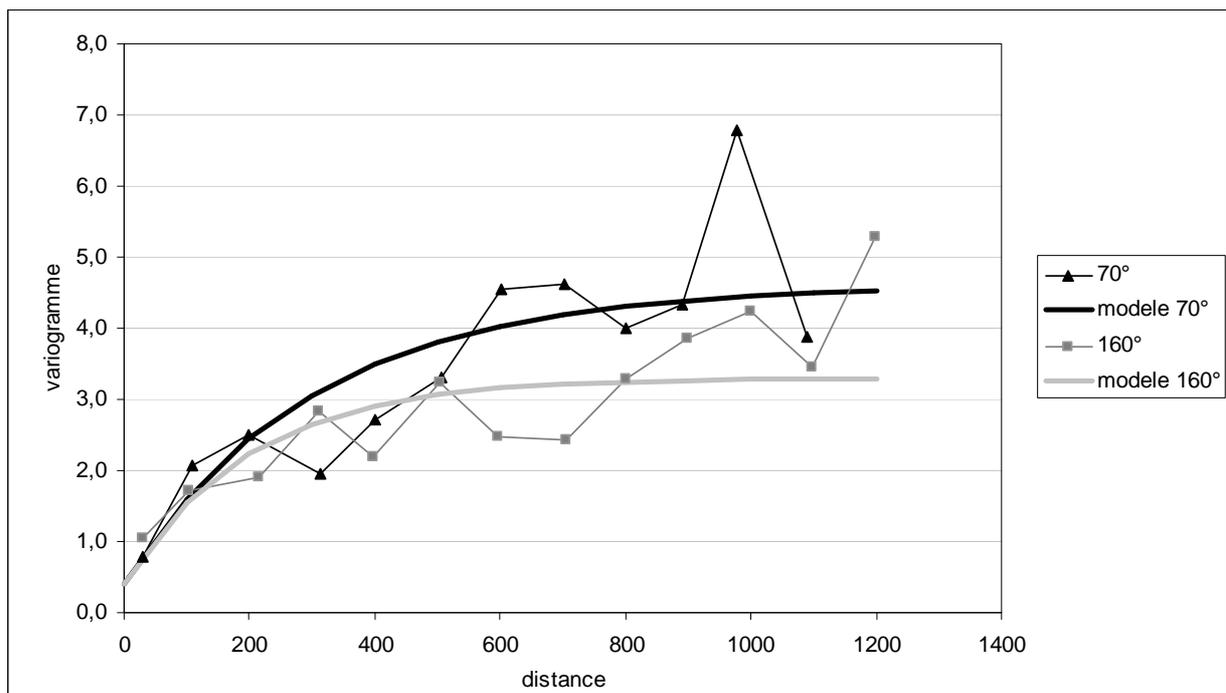


Fig. 146 - Variogrammes expérimentaux et ajustés de BDdepot2

On observe que :

- d'une part, l'effet de pépite correspond à une micro-structuration des données que la variogramme ne peut mesurer. Il correspond au  $1/10^e$  de la variance total donc il est plutôt négligeable ;

- d'autre part, la distance de corrélation entre les points de mesure est estimée à environ 300 mètres. Pour une étude globale de la ville, ce résultat est plutôt raisonnable. Par contre, à l'échelle locale, il est à prendre avec des précautions puisque l'interpolation ne tient pas compte des effets des composantes socio-spatiales. Par exemple, la présence d'une enceinte présente une rupture significative dans la production de sol. L'idéal serait de réaliser une interpolation au sein de chaque enceinte urbaine. Ceci n'a pas pu être réalisé car le nombre de point est insuffisant pour certaines d'entre elle (enceinte des 3<sup>e</sup>- 4<sup>e</sup> s, du 10<sup>e</sup> s. et du 12<sup>e</sup> s.).

Il faut noter que pour la ville de Bordeaux, la portée est estimée à 500 mètres (DOMINIQUE *en cours*) et le krigeage a été effectué sous contrainte d'inégalité qui est une « technique qui permet d'utiliser une variable qui n'est pas définie par une valeur exacte en un point, mais par un intervalle dont les bornes constituent les données d'inégalité » (DOMINIQUE, MARACHE, RÉGALDO-SAINT BLANCARD *en cours de soumission* ; LANGLAIS 1990). Cette procédure consiste à simuler, au droit du point pour lequel on dispose une donnée d'inégalité, une valeur qui appartient « à l'intervalle défini par les données d'inégalité et les données exactes » (DOMINIQUE, MARACHE, RÉGALDO-SAINT BLANCARD *en cours de soumission* : 10) puis à intégrer ces points simulés aux points mesurés. Ainsi, elle permet de mettre en œuvre des observations qui n'ont pas atteint les alluvions du Quaternaire ou le substratum. Il faudra donc envisager de suivre cette démarche pour une prochaine étude.

Ensuite, il faut déterminer le voisinage : il peut être unique si on veut prendre en compte tous les points dans le calcul de l'estimation, ou bien, glissant si on choisit une distance limite de recherche. Dans ce cas, le voisinage est unique et correspond aux 145 points d'observations.

Pour finir, il faut réaliser une validation croisée du modèle choisi afin de s'assurer de sa robustesse. Elle consiste à estimer la valeur de l'épaisseur en chaque point appartenant à la base de données en les éliminant temporairement et en appliquant le variogramme ajusté. Les données sélectionnées pour calculer les estimations sont celles de BDdepot1 (Fig. 147). On étudie la relation entre une valeur mesurée et estimée à partir du modèle en chaque point.

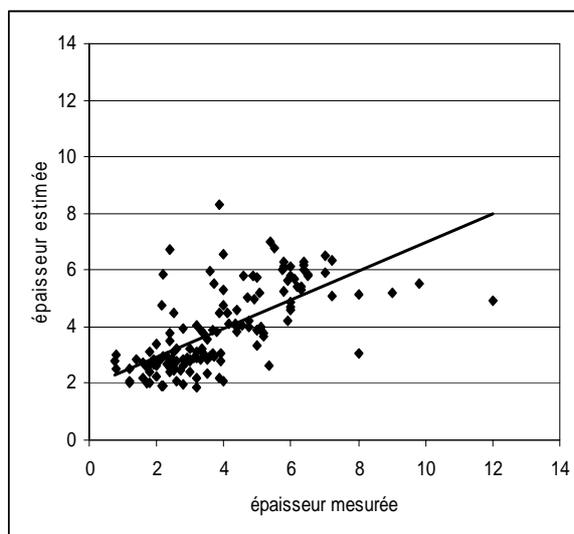


Fig. 147 - Validation croisée des valeurs mesurées et estimées de l'épaisseur du dépôt archéologique (BDdepot1)

Le coefficient de corrélation ( $r$ ) entre les valeurs mesurées et estimées est égal à 0,67. Celui obtenu pour Bordeaux présente le même résultat (0,71). L'erreur moyenne est correcte puisqu'elle est proche de zéro (-0,017). Enfin, la moyenne des écarts entre les valeurs mesurées et estimées est de 0,96m.

- *Interpolation de l'épaisseur du dépôt archéologique*

La carte d'interpolation spatiale de l'épaisseur du dépôt archéologique a été élaborée avec ArcGIS, à partir du modèle défini ci-dessus (Pl. 132). L'épaisseur estimée varie de 1 à 10,8 mètres. Elle est plus importante au sein de la zone comprise dans l'enveloppe de la ville du 14<sup>e</sup> siècle (environ supérieure à 5 mètres). Si on compare cette carte au modèle des indices de l'intensité de l'occupation (Pl. 26 à 30), on observe une forte corrélation entre épaisseur et intensité d'occupation. Par ailleurs, les valeurs de la carte des épaisseurs établies à partir du modèle de production de stratification (Pl. 31) ont été sous-estimées dans la partie du front de Loire.

La carte des erreurs standard montre que les estimations calculées au bord de la zone d'étude sont peu fiables car il y a peu de points d'observation (PL. 133).

Il est important de préciser le résultat dépend de la résolution choisie pour la représentation des données.

Enfin, puisqu'il s'agit d'un modèle, l'objectif de cette carte est de poser des hypothèses sur l'épaisseur à l'échelle de la ville. A l'échelle du site, l'archéologue doit revenir aux points d'observations et travailler sur des coupes stratigraphiques restituées.

### 6-2-3- Elaboration d'une carte du toit du niveau naturel

La carte du toit du niveau naturel a été élaborée de la même façon que celle de l'épaisseur. L'étude de la structuration spatiale a été effectuée à partir des observations de BDdepot2 puis l'interpolation a été réalisée à partir de ceux de BDdepot 1.

- *Analyse de la structuration spatiale du toit des alluvions : analyse variographique de BDdepot2*

Les mêmes paramètres sont conservés : un pas de mesure de 100 mètre et un nombre de pas de 12. Ici, le champ sélectionné correspond au toit des alluvions.

Le cercle variographique montre que le variogramme du toit des alluvions est omnidirectionnel (Fig. 148).

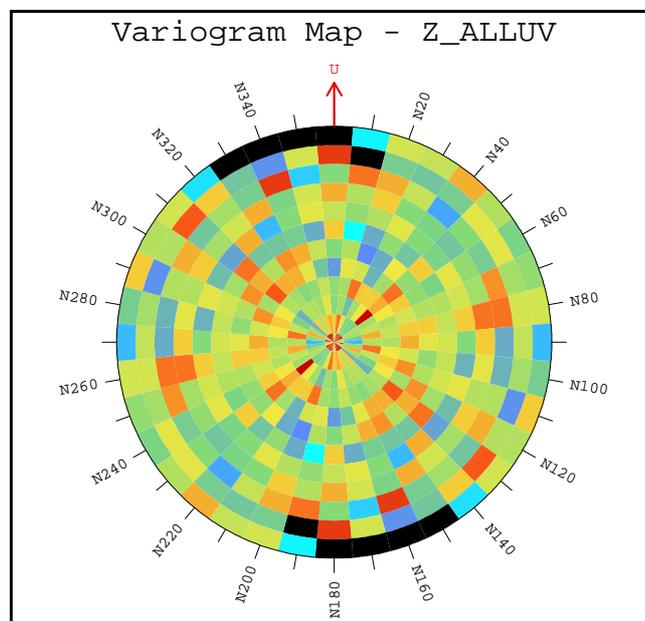


Fig. 148 - Cercle variographique du toit des alluvions de BDdepot2

Ensuite, un modèle de variogramme est ajusté à partir du variogramme expérimental (Fig. 149). Le modèle retenu est sphérique avec un effet de pépite de 0,6, une portée  $a$  de 175 mètres et une variance totale  $C$  de 1,9 où  $\gamma(h) = C * [(3(h)/2 a) + ( h^3/2 a^3 )]$  lorsque  $h < a$  et où  $\gamma(h) = C$  lorsque  $h \geq a$ ,

Soit  $\gamma(h) = 0,6 + 1,3 * [(3(h)/2*175) + ( h^3/2*175^3 )]$  lorsque  $h < 175$  et où  $\gamma(h) = 1,6$  lorsque  $h \geq 175$ .

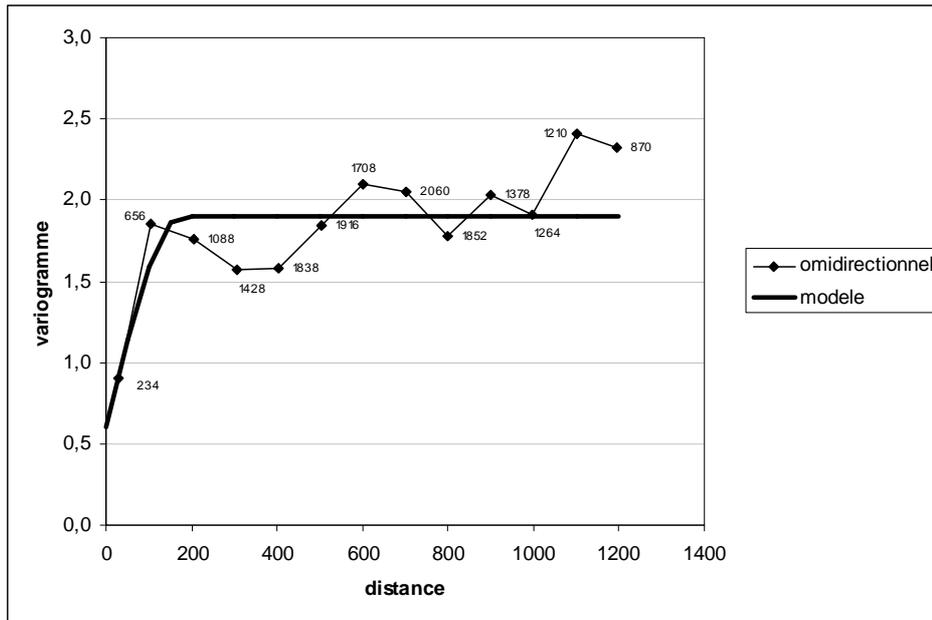


Fig. 149 - Variogramme expérimental et ajusté du toit des alluvions de BDdepot2

Ainsi, la distance de corrélation théorique entre les points de mesure est de 175 mètres. Elle plus courte que celle des épaisseurs. Dans ce cas, l'effet de pépite est plus important (30% de la variance totale). Il y a donc des variations à micro-échelle plus importantes que pour les épaisseurs.

Ici, le voisinage est glissant et a été choisi sur une distance de 175m.

Enfin, la validation croisée des données mesurées et estimées par le modèle, pour la base BDdepot1, présente un coefficient de corrélation plutôt moyen (0,50) avec une erreur moyenne satisfaisante de 0,03 et une moyenne des écarts de 0,89 m (Fig. 150).

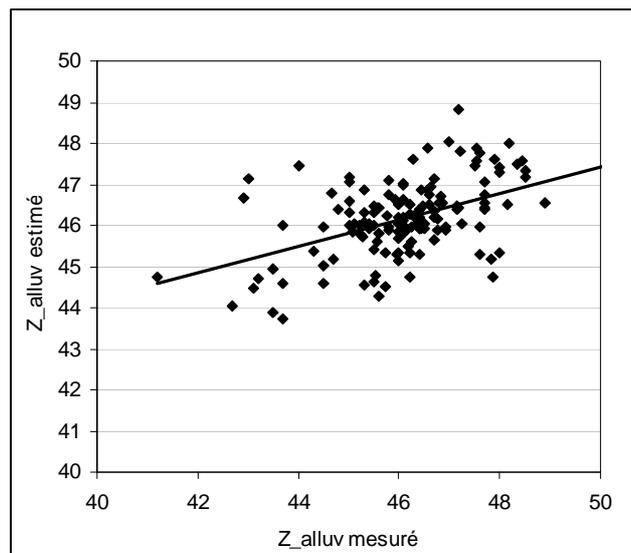


Fig. 150 - Validation croisée des valeurs mesurées et estimées de l'épaisseur du dépôt archéologique (BDdepot1)

- *Interpolation du toit des alluvions*

La carte d'interpolation du toit des alluvions est réalisée à partir du modèle présenté ci-dessus et des points d'observations de BDdepot1 (Pl. 134). Les cotes estimées varient entre 43 et 49 m NGF. On observe que :

- le toit des alluvions est plus élevé dans la partie nord-est de l'espace urbanisé ancien (à l'emplacement de l'amphithéâtre) et les parties les plus hautes sont localisées sous l'espace qui constituait la ville au 14<sup>e</sup> siècle. Cette zone peut être interprétée comme une montille ancienne de la Loire (GAY-OVEJERO, MACAIRE, SEIGNE à paraître) ;

- une dépression apparaît en direction de la Loire qui correspond à l'espace gagné sur la Loire de l'Antiquité au 17<sup>e</sup> siècle ;

- une autre dépression dans la partie sud que l'on peut expliquer par la présence de paléochenaux.

La carte des erreurs standard permet également de prendre des précautions sur la qualité des estimations sur les bords de la zone d'étude et notamment, dans la zone située à l'est de l'enceinte du 14<sup>e</sup> s. (Pl. 135).

### 6-3- Bilan

La confrontation du potentiel informatif des observations archéologiques et géotechniques à l'échelle de la ville et du site a permis de retenir une échelle d'analyse de l'ordre de 10 à 25 cm afin de caractériser fonctionnellement le dépôt archéologique. Les pistes de travail à suivre sont le développement des tests pour modéliser l'hétérogénéité du sous-sol et la construction de code-barres multi-échelles.

Une carte des épaisseurs du dépôt archéologique a été établie à partir de la méthode du krigeage qui a l'avantage de prendre en compte le positionnement géographique des points d'observations et de calculer l'erreur d'estimation. La distance de corrélation du variogramme ajusté est de 300 mètres. On peut conclure que la maille de 100 mètres est satisfaisante pour acquérir les données à l'échelle de la ville et elle permet d'expliquer les variations à une échelle plus fine (effet de pépite sur le variogramme).

Par ailleurs, si on la superpose avec les surfaces détruites, on obtient une carte du potentiel archéologique réelle à l'échelle de l'espace urbanisée ancien (Pl. 136). Toutefois, on ne peut définir les zones où le potentiel est partiel car il faudrait faire notamment un inventaire exhaustif des caves.

Une carte du toit des alluvions a également été constituée et met en évidence 4 ensembles orientés est-ouest (cours de la Loire) : une zone élevée dans la partie ouest de l'amphithéâtre, une zone moyenne située de part et d'autre du mur sud de l'enceinte du 14<sup>e</sup> s. et deux dépressions au nord et au sud de la zone moyenne. L'hypothèse retenue est que les zones haute et moyenne forment une montille.

## Conclusion

L'étude permet de répondre aux objectifs d'une évaluation archéologique complète d'une ville à travers les caractéristiques du sol urbain, le produit des activités humaines. Le couplage des approches archéologiques et géotechniques a permis de saisir les modalités de formation du dépôt archéologique (phases d'extension et de rétraction de la ville) et son caractère hétérogène. Les analyses ont porté notamment sur l'estimation de l'épaisseur du volume de sol urbain et son découpage en tranches fonctionnelles distinctes pour la ville de Tours et des sites de comparaison (Cinq-Mars-la-Pile, Lyon, Stolpie).

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs méthodes ont été développées :

- l'adoption d'une typologie fonctionnelle des couches archéologiques pour lesquelles des postulats sur l'épaisseur, la compacité et la variabilité interne (degré d'hétérogénéité) ont été formulés. Cette typologie fine (types et sous-types) est adaptée aux sites étudiés et a été conçue de façon empirique avec la collaboration étroite de M. Fondrillon qui travaille sur la caractérisation du sol urbain (étude des constituants et des processus de formation des couches archéologiques et du sol urbain). L'objectif était de la confronter aux observations de terrain ;

- la mise en œuvre des sources archéologiques, planimétriques, géologiques, géophysiques et géotechniques qui apportent des informations sur l'épaisseur du dépôt archéologique, les usages de la ville à un temps  $t$  et l'état de conservation du sous-sol. Cela a été l'occasion de réaliser des sondages au pénétromètre dynamique léger PANDA (SP) qui, contrairement aux autres techniques d'évaluation (sondages à la pelle mécanique, carottages, prospection géophysique), a l'avantage d'être peu coûteuse, non-destructive, facilement maniable et accessible à toutes les surfaces. Cette technique consiste à mesurer la résistance de pointe ( $Q_d$ ) du sous-sol. Le but était de vérifier, d'une part la possibilité de distinguer le dépôt archéologique et les niveaux naturels, d'autre part la possibilité de le caractériser plus finement ;

- la définition d'une échelle d'analyse adaptée à l'interaction des informations utiles à l'évaluation à l'échelle de la ville avec celles à l'échelle du site. Les données ont été acquises à l'échelle du transect qui représente un échantillon représentatif de la ville et qui facilite la multiplication des prises de mesure pour le cas de la prospection au PANDA. La question était de mettre en perspective les données acquises à l'échelle du site dans une appréhension globale de la ville ;

- la prise en compte des éléments de la topographie historique pour découper la ville en composantes socio-spatiales. L'étude s'est concentrée sur les enceintes urbaines qui correspondent aux enveloppes les plus facilement appréhendables de l'espace urbanisé ancien. L'objectif était de

mettre en évidence l'hypothèse qu'il existe des contrastes forts entre zones *intra-* et *extra-muros* en termes de production de sol, c'est-à-dire, des activités humaines plus intenses dans les zones intra-muros qui se traduisent par une production de stratification plus importante.

La mise en œuvre de ces méthodes pour l'évaluation du potentiel informatif des sources disponibles à Tours a permis de constituer plusieurs modèles :

- la répartition d'un **indice d'intensité d'occupation** selon des zones prédéfinies et selon des tranches chronologiques de 500 ans ;

- la **production de stratification** à partir de l'indice de l'intensité d'occupation et des types fonctionnels. L'hypothèse est que le dépôt archéologique est plus épais dans la zone médiane et dans la partie centrale du front de la Loire ;

- l'**analyse du caractère hétérogène** du sol urbain par le découpage des pénétrogrammes en unités mécaniques (UM) dites « homogènes » (résistance Qd et variabilité). Les résultats obtenus par quatre variantes de la procédure de traitement du signal montrent qu'il est nécessaire de poursuivre l'étude sur l'entropie (agitation du signal) à une échelle proche de 20 – 25 cm afin de mettre en relation les UM avec les observations archéologiques.

L'évaluation du potentiel informatif des observations collectées à l'échelle des sites de Tours et des sites de comparaison a suscité la mise en place de deux méthodes pour mettre en relation les observations archéologiques avec les observations géotechniques :

1 - un **référentiel archéologico-mécanique** qui confronte les données de terrain à l'échelle de l'agrégation (Unités Contextuelles) et les mesures des SP. Les résultats sont satisfaisants pour distinguer le dépôt archéologique et les niveaux naturels à condition de disposer de connaissances préalables du contexte géologique et archéologique. Il sera nécessaire de poursuivre l'expérience dans des villes au contexte géomorphologique comparable à celui de Tours et de Lyon (présence d'alluvions du quaternaire) comme à Paris, Bordeaux ou Nantes.

Par ailleurs, la caractérisation fonctionnelle des couches archéologiques à l'aide de critères significatifs (médiane (Qd), c.v. (Qd), profondeur et épaisseur) est satisfaisante mais plus complexe. D'abord, les postulats sur les propriétés mécaniques des types et sous-types fonctionnels ont été validés alors que ceux qui concernent l'épaisseur ont été remis en cause par les observations de terrain. Ensuite, bien qu'il n'y ait pas d'unicité des propriétés mécaniques des UC, on a associé manuellement plusieurs interprétations fonctionnelles au moyen d'une analyse factorielle (ACP) à partir des critères retenus.

L'étape suivante consiste à valider ce référentiel en le confrontant à des UC pour lesquelles on possède une hypothèse (UC de qualité 1). Concrètement, il s'agit de mesurer la

proximité aux classes définies dans l'ACP globale. On peut également procéder à une analyse discriminante si on opte pour une classification automatique des interprétations fonctionnelles (LEBART, MORINEAU, PIRON 2000 : 251-252). Elle consiste à décrire et postuler l'appartenance à des groupes prédéfinis d'un ensemble d'observations à partir de descripteurs pertinents.

Enfin, la non-unicité des propriétés mécaniques des types archéologiques s'explique par leur constitution lithologique. On attend de pouvoir confronter les résultats avec ceux des travaux en cours de M. Fondrillon sur l'assemblage des constituants des couches archéologiques afin d'affiner le diagnostic.

2 – une modélisation de la stratification d'un site par des **images en code-barre** construites à partir de classes de résistance Qd et d'une analyse de l'hétérogénéité. L'établissement d'un code-barre est précédé d'une analyse variographique de signaux peu agités (peu de pics) sur des tranches de 50 cm. Pour les sites 16, 69 et L1015, après traitements des signaux (dérive, plafonnement des pics), les variogrammes révèlent qu'une couche possède des propriétés mécaniques communes sur une épaisseur minimale de 5 à 10 cm.

De plus, il est possible de représenter sur le code-barre les zones qui correspondent à un « **bruit** » de mesure. Celui-ci est détecté à l'aide de l'étude de l'entropie du signal. Sur le site 16, un « bruit » est caractéristique de niveaux de remblais d'aménagement sableux et constitués de tout venant mais il est aussi lié à la présence d'artéfacts comme des cailloux et des pierres qui occasionnent des frottements sur la tige du pénétromètre. Ces résultats montrent que cette piste est à poursuivre en priorité pour affiner la caractérisation du dépôt archéologique.

Enfin, les expériences du couplage du PANDA avec les méthodes géophysiques (électriques et magnétiques) sur les sites 16, BAZ et STO démontrent qu'il est préférable de réaliser la prospection géotechnique *a posteriori* afin d'orienter le choix de la maille d'analyse et de préciser la profondeur des anomalies détectées. A l'aide du référentiel archéologico-mécanique et des code-barres, il est possible de présumer l'interprétation fonctionnelle des anomalies géophysiques.

On a vu que depuis la fin des années 1970 et, surtout depuis les dernières lois de 2001 et 2003 sur l'archéologie préventive, la politique de patrimonialisation réduit la pratique de l'évaluation à l'estimation du coût financier et à celle du rendement des résultats au détriment de la définition d'une véritable politique de recherche scientifique (définition de questions historiques, hiérarchisation des sites). C'est pourquoi le choix des techniques d'évaluation est primordial en termes de rentabilité financière et scientifique. On a démontré que l'emploi du pénétromètre PANDA est en mesure de répondre à ce compromis par ses avantages techniques et son utilité pour reconnaître et caractériser le dépôt archéologique. De plus, les résultats du couplage du

pénétrromètre avec le géoendoscope montrent qu'il sera pertinent de renouveler et d'approfondir l'expérience sur d'autres sites en milieu urbain.

La mise en perspective des données acquises à l'échelle du site pour une évaluation globale de la ville permet de conclure qu'il faut poursuivre les analyses sur la modélisation de l'hétérogénéité du sous-sol (tests sur l'entropie et code-barre) à une échelle d'analyse de l'ordre de 10 à 25 cm.

Par ailleurs, une base de données sur l'épaisseur du dépôt archéologique de Tours a été constituée à partir des points d'observations et des hypothèses issues du PANDA, validées par le référentiel. On peut estimer l'épaisseur du dépôt archéologique en tout point de la ville à partir de la méthode du krigeage qui est précédée par une analyse de la structuration des données dans la dimension horizontale. La distance de corrélation entre les données est de 300 mètres à Tours et l'épaisseur estimée varie de 1 et 10 mètres. Ainsi, le maillage théorique de 100 mètres est pertinent pour restituer l'épaisseur du dépôt et pour expliquer les variations à une échelle plus fine.

En superposant la carte des épaisseurs avec les destructions totales, on obtient une carte du potentiel archéologique réel à l'échelle de l'espace urbanisé ancien qui permet de renouveler les connaissances que l'on a sur la ville. Un inventaire exhaustif des caves et des réseaux enterrés apportera un complément d'information sur l'état de conservation du sous-sol afin de déterminer des zones au potentiel nul, partiel ou total, comme cela a été fait dans d'autres villes (cf DEPAVF)

Une carte du toit des alluvions a également été restituée à partir de la base de données. Elle met en évidence des ensembles orientés est-ouest : une zone élevée dans la partie centrale et notamment, sous l'amphithéâtre antique (montille) et deux dépressions au nord et au sud de la partie centrale (front de Loire et paléochenaux).

Enfin, en s'inspirant de l'expérience en cours à Bordeaux (projet RIVIERA), on pourra intégrer des points d'observations qui n'ont pas atteint le niveau naturel dans la base de données des épaisseurs. En employant la méthode du krigeage sous contrainte d'inégalités, on pourra ainsi affiner les estimations sur l'épaisseur du dépôt et le toit des alluvions.

Pour conclure, l'étude a, dans cette première phase d'étude conduite en quatre ans, privilégié la lecture du volume du sol urbain dans sa dimension verticale. Elle a ouvert la voie à des travaux complémentaires : la définition plus précise des composantes socio-spatiales dans la dimension horizontale qui permettra de proposer un découpage plus fin de la ville ; l'affinement du modèle de production de stratification ; enfin, par la multiplication des points d'observations, la possibilité de réalisation de paléo-MNT à un temps *t*.

## Table des figures

Fig. 1- Localisation des villes ayant donné lieu à un document d'évaluation en fonction de leurs origines (source : CNAU) .....	30
Fig. 2 - Tableau des étapes de présentation de la documentation et leurs objectifs .....	31
Fig. 3 – Schéma de la formation de la stratification des couches archéologiques.....	37
Fig. 4 – Schéma théorique d'un diagramme stratigraphique et les différents termes d'enregistrements .....	40
Fig. 5 – Typologie fonctionnelle des couches archéologiques.....	44
Fig. 6 – Tableau des postulats sur la compacité, l'épaisseur et la variabilité interne des interprétations fonctionnelles du dépôt archéologique .....	50
Fig. 7 - Tableau des caractéristiques des unités stratigraphiques, unités mécaniques et unités lithologiques.....	61
Fig. 8 - Variogramme théorique.....	63
Fig. 9 – Schéma du procédé de mesure du PANDA .....	64
Fig. 10 - Représentation en code-barre de la stratification de la section 21.....	66
Fig. 11 - Tableau des faciès lithologiques observés sur le site de Saint-Julien .....	68
(LAURENT 2002 : Fig. 20).....	68
Fig. 12 - Tableau récapitulatif des premiers tests réalisés pour la constitution d'un référentiel archéologico-mécanique.....	69
Fig. 13 - Schéma de synthèse des premiers résultats et des perspectives de l'utilisation du pénétromètre de type PANDA en milieu urbain (d'après LAURENT 2003) .....	70
Fig. 14 -Tableau récapitulatif des informations à retenir pour répondre aux objectifs de l'évaluation à partir des sources disponibles aux archéologues .....	79
Fig. 15 -Schéma des objectifs principaux de la thèse en fonction des échelles d'analyse .....	84
Fig. 16 – Restitution tracé de la confluence du Rhône et de la Saône à Lyon (BRAVARD 1995).....	127
Fig. 17 – Lyon au 2 <sup>e</sup> siècle (PELLETIER, ROSSIAUD 190 : Fig. 104).....	128
Fig. 18 - Caractéristique de l'épaisseur des Types fonctionnels des logs étudiés (en mètre).....	137
Fig. 19 - Représentation des épaisseurs moyennes des types fonctionnels en fonction de leur durée d'existence	138
Fig. 20 – Représentation des épaisseurs du type « extérieur » en fonction de leur durée d'existence .....	139
Fig. 21 - Tableau de répartition des neuf zones en fonction des 6 espaces définis à l'échelle de l'espace urbanisé ancien.....	141
Fig. 22 - Tableau schématique de l'intensité de l'occupation en fonction des phases d'urbanisation et des zones de la ville.....	141
Fig. 23 - Tableau des indices de l'intensité de l'occupation en fonction des phases d'urbanisation et des zones de la ville.....	142
Fig. 24 - Tableau des indices de l'intensité de l'occupation en fonction des classes de 500 ans et des zones de la ville.....	142
Fig. 25 - Caractéristiques des épaisseurs en fonction de leur date à partir des 25 logs.....	143
Fig. 26 - Représentation des fréquences cumulées croissantes des épaisseurs des passes en fonction de leur date .....	144
Fig. 27- Tableau des épaisseurs et des indices de l'intensité de l'occupation en fonction des tranches de 500 ans et des zones.....	145
Fig. 28 - Distribution des épaisseurs moyenne en fonction des indices d'intensité d'occupation pour chaque tranche de 500 ans et pour chaque zone .....	146
Fig. 29 - Tableau des épaisseurs par tranche et totale par zone en fonction du modèle de production de stratification.....	147
Fig. 30 - Estimation des volumes (en m3) du dépôt archéologique en fonction des zones et des tranches de 500 ans .....	148
Fig. 31 – Tableau des sources planimétriques utiles à l'évaluation du potentiel informatif de la ville de Tours... 153	153
Fig. 32 – Tableau de classification des sondages en fonction de la présence des informations géographiques et la qualité de l'observation. ....	157
Fig. 33 - Structure de la base de données « BDgeotech » réalisée avec 4 <sup>e</sup> Dimension .....	158
Fig. 34 – Tableau des sondages répertoriés dans la zone d'étude entre 1999 et 2005 pour Tours (en gras, ceux retenus pour l'étude).....	159
Fig. 35 – Tableau de l'impact des principales destructions sur le sous-sol de Tours du 19 <sup>e</sup> s. à aujourd'hui .....	162
Fig. 36 – Tableau des estimations des surfaces fouillées en fonction des espaces étudiés et des surfaces détruites .....	163
Fig. 37 – Tableau récapitulatif du nombre de SP enregistrés dans la base BaDoPAN.....	169
Fig. 38- Résultats des statistiques descriptives des mesures brutes des 97 SP.....	172
Fig. 39- Distribution des fréquences cumulées relatives des valeurs de résistances brutes.....	172
Fig. 40 - Tableau des hypothèses sur la cote du toit des alluvions pour chacun des lieux prospectés au PANDA	173

Fig. 41 - Schéma récapitulatif des étapes de l'acquisition des données pénétrométriques utiles à l'évaluation à l'échelle de la ville.....	175
Fig. 42 - Tableau de synthèse des informations utiles à l'évaluation du potentiel informatif de Tours à l'échelle des transects.....	176
Fig. 43 - Hypothèse du découpage du signal du SP T342 en Unité Mécanique.....	178
Fig. 44 - Variables descriptives des UM du signal du SP T342 (découpage manuel).....	180
Fig. 45 - Signal brut ( $X'$ ), dérive $t(z)$ et fluctuation du paramètre géotechnique (triangle) (HOUY 2005 : Figure A-6).....	182
Fig. 46 - Variables pour analyser la variabilité interne des UM du signal du SP T342.....	183
Fig. 47 - Liste des variables retenues pour l'étude des UM.....	183
Fig. 48 - Schéma des trois variantes du calcul de l'indice avec une fenêtre constante de 5 cm.....	187
Fig. 49 - Tableau récapitulatif des tests pour la détection des UM en fonction du type de signal et de l'étude de l'entropie.....	188
Fig. 50 - Exemple d'UM bruitées et non bruitées sur le signal du SP T342.....	190
Fig. 51 - Tableau récapitulatif des essais d'ACP réalisés pour les 238 UM.....	192
Fig. 52 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes (ou facteurs) 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données pour les essais 1a et 1b.....	193
Fig. 53 - Projection des zones dans les deux premiers plans factoriels pour l'essai 1b.....	194
Fig. 54 - Schéma des correspondances entre les UM et l'indice d'intensité de l'occupation pour le SP T11.....	195
Fig. 55 - Distribution de la fréquence cumulée croissante de la médiane ( $Q_d$ ) et du c.v. ( $Q_d$ ) des UM en fonction des indices d'occupation.....	196
Fig. 56 - Schéma théorique des tendances des UM.....	197
Fig. 57 - Comparaison d'un signal théorique $Q_c$ (longueur de corrélation 20 cm) et des signaux obtenus à partir du calcul des moyennes mobiles de 10, 20 et 50 cm.....	200
Fig. 58 - Comparaison d'un signal théorique $Q_c$ (longueur de corrélation 20 cm) et de la fonction $L(z)$ obtenus à partir du calcul des moyennes mobiles de 10, 20 et 50 cm.....	200
Fig. 59 - Tableau récapitulatif du nombre de valeurs retenues dans le calcul des indices d'entropie selon les 3 variantes.....	202
Fig. 60 - Schéma explicatif de la démarche du test n°4.....	204
Fig. 61 - Tableau des caractéristiques des 6 SP du site 17.....	219
Fig. 62 - Tableau des caractéristiques des 14 SP du site 69.....	223
Fig. 63 - Tableau des caractéristiques des 10 SP du site 72.....	224
Fig. 64 - Tableau des caractéristiques des 10 SP du site 72.....	225
Fig. 65 - Tableau des caractéristiques des 26 SP du site BAZ.....	226
Fig. 66 - Tableau des caractéristiques des 9 SP du site 5MA.....	229
Fig. 67 - Tableau des caractéristiques des 41 SP du site L1015.....	235
Fig. 68 - Tableau des caractéristiques des 5 SP du site L040.....	237
Fig. 69 - Tableau des caractéristiques des 5 SP du site L105.....	238
Fig. 70 - Tableau des caractéristiques des 3 SP du site L025.....	239
Fig. 71 - Tableau des caractéristiques des 5 SP du site LTRI.....	240
Fig. 72 - Tableau des caractéristiques des 18 SP du site STO.....	243
Fig. 73 - Tableau de synthèse des observations retenues pour l'évaluation du potentiel informatif à l'échelle d'un site.....	246
Fig. 74 - Tableau des conditions d'études des SP des sites étudiés.....	247
Fig. 75 - Tableau du nombre d'UC de qualité « 2 » du site 16 en fonction des types et sous-types fonctionnels.....	253
Fig. 76 - Tableau des modalités de la variable datecode.....	254
Fig. 77 - Répartition des UC de la fonction <i>occupation extérieure</i> en fonction de leur résistance moyenne brute et régularisée.....	256
Fig. 78 - Représentation des fourchettes de la résistance médiane ( $Q_d$ en MPa) des UC selon les sous-types fonctionnels avec les données brutes et régularisées.....	258
Fig. 79 - Tableau de répartition du nombre d'UC en fonction des classes de médiane de $Q_d$ et des interprétations.....	259
Fig. 80 - Tableau des fréquences des UC par classes de médianes pour chacune des interprétations.....	259
Fig. 81 - Tableau des classes de médiane de $Q_d$ et des effectifs d'UC correspondants.....	260
Fig. 82 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 4 classes de médiane du $Q_d$ .....	261
Fig. 83 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 4 classes de médiane du $Q_d$ .....	263
Fig. 84 - Répartition des altitudes moyennes UC en fonction de leur datation.....	265

Fig. 85 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 5 classes d'altimétrie .....	266
Fig. 86 - Distribution du c.v. (Qd) moyen des UC en fonction des classes d'épaisseur (en cm).....	267
Fig. 87 - Tableau des probabilités conditionnelles (en %) des types et sous-types fonctionnels des UC en fonction des 6 classes d'épaisseur.....	268
Fig. 88 - Tableau des problèmes posés par le choix des variables et des données pour une analyse factorielle ...	270
Fig. 89 - Tableau récapitulatif des essais réalisés par une ACP .....	271
Fig. 90 - Cercles des corrélations des variables dans le premier axe factoriel pour les essais 1 et 2. ....	272
Fig. 91 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes (ou facteurs) 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données pour les essais 7 et 8. ....	273
Fig. 92 - Légende de représentation des UC du site 16 en fonction de leur interprétation.....	273
Fig. 93 - Projection des UC dans le premier plan factoriel (57,35% de l'inertie totale) pour l'essai 1a en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur).....	274
Fig. 94 - Projection des UC dans le premier plan factoriel (56,98% de l'inertie totale) pour l'essai 1b en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur).....	274
Fig. 95 - Cercles des corrélations des variables pour les essais 1 et 3 (avec les deux plans factoriels).....	276
Fig. 96 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes (ou facteurs) 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données pour les essais 1b et 3. ....	276
Fig. 97 - Projection des UC du site 16 dans le premier plan factoriel (66,52% de l'inertie totale) pour l'essai 3 en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur).....	277
Fig. 98 - Projection des UC du site 16 dans le deuxième plan factoriel pour l'essai 3 en fonction de leur contribution à la formation des axes (taille) et de leur interprétation (couleur).....	278
Fig. 99 - Projection des modalités de la variable interprétation dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3. ....	279
Fig. 100 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP de l'essai 3 pour le site 16.....	280
Fig. 101 -Tableau des probabilités des UC par types et sous-types fonctionnels en fonction des constituants dominants .....	283
Fig. 102 -Tableau de répartition des UC en fonction des constituants dominants et des classes de médiane de Qd .....	284
Fig. 103 - Projection des modalités de la variable interprétation dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3b.....	285
Fig. 104 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP des essais 3 (en haut) et 3b (en bas)....	286
Fig. 106 -Tableau de synthèse des résultats principaux des descriptions des UC sur le site 16.....	289
Fig. 107 - Tableau de synthèse des modalités des interprétations des UC retenues sur les sites étudiés .....	290
Fig. 108 - Répartition des altitudes moyennes des UC du site 69 en fonction de leur datation .....	291
Fig. 109 - Représentation des fourchettes de résistance (médiane Qd en MPA) des UC selon leurs interprétations sur le site 69.....	292
Fig. 110 - Tableau des probabilités conditionnelles des interprétations des UC du site 69 en fonction de leurs propriétés mécaniques et de leur épaisseur.....	293
Fig. 111 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données de l'essai n° 3 pour les sites 16 et 69 .....	294
Fig. 112 - Projection des modalités de la variable interprétation dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3 pour le site 69. ....	296
Fig. 113 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP de l'essai 3 pour le site 69.....	297
Fig. 114 - Tableau des probabilités conditionnelles des constituant dominant des UC du site 69 en fonction de leur classe de résistance .....	298
Fig. 115 - Répartition des altitudes moyennes des UC en fonction de leur datation.....	299
Fig. 116 - Représentation des fourchettes de résistance (médiane Qd en MPA) des UC selon leurs interprétations sur le site L1015 .....	300
Fig. 117 - Tableau des probabilités conditionnelles des interprétations des UC du site L1015 en fonction de leurs propriétés mécaniques et de leur épaisseur.....	301
Fig. 118 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données de l'essai n° 3 pour les sites 16 et 69 .....	302
Fig. 119 - Légende des interprétations représentées sur le site 69 .....	303
Fig. 120 - Projection des modalités de la variable sous-type fonctionnel et des UC dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 3 pour le site L1015. ....	304
Fig. 121 - Tableau de description des classes manuelles issues de l'ACP de l'essai 3 pour le site L1015 .....	305
Fig. 122 - Tableau des probabilités conditionnelles des UC par constituant dominant en fonction des classes de médiane (Qd).....	306
Fig. 123 - Cercle des corrélations des variables de l'essai 4 selon les deux plans factoriels.....	307

Fig. 124 - Tableau récapitulatif des variables contribuant à la formation des axes 1, 2 et 3 ainsi que la part d'explication des axes dans la variabilité des données de l'essai n° 4 (tous les sites) et de l'essai n°3 des sites 16, 69 et L1015.....	308
Fig. 125 -Projection des modalités de la variable sous-type fonctionnel dans les deux premiers plans factoriels de l'essai 4.....	309
Fig. 126 - Tableau récapitulatif des valeurs de résistance (médiane Qd) par interprétation fonctionnelle sur les sites étudiés.....	313
Fig. 127 - Tableau récapitulatif des valeurs de la variabilité de résistance (c.v. Qd) par interprétation fonctionnelle sur les sites étudiés .....	314
Fig. 128 - Tableau récapitulatif des épaisseurs des UC par interprétation fonctionnelle sur les sites étudiés.....	316
Fig. 129 - Tableau des probabilités conditionnelles des interprétations fonctionnelles des UC des sites étudiés en fonction de leur constituant dominant .....	318
Fig. 130 - Schéma de synthèse de l'analyse de la variabilité des propriétés mécaniques du site 16 (d'après LAURENT 2002 : Fig. 12).....	321
Fig. 131 - Tableau des caractéristiques des UC et la distance de corrélation spatiale des valeurs de Qd .....	322
Fig. 132 - Confrontation des variogrammes avant et après élimination des pics pour le SP 69.06.....	323
Fig. 133 - Signal moyen des SP de la section 2 du site 69 pour la tranche comprise entre 47,7 et 47,2 m NGF et le variogramme correspondant .....	324
Fig. 134 - Signal moyen des SP de la section 2 du site L1015 pour la tranche comprise entre 163,5 et 163 m NGF et le variogramme correspondant.....	325
Fig. 135 - Distribution cumulée croissante des valeurs de Qd des SP du site 16 (SP16.75 à 82) (HOUY 2005 : Fig. A-17) .....	326
Fig. 136- Distribution cumulée croissante des valeurs de Qd des SP du site 69.....	327
Fig. 137- Distribution cumulée croissante des valeurs de Qd des SP du site L1015.....	327
Fig. 138 -Tableau des classes de résistance retenues pour la réalisation des images en code-barres pour les sites 16, 69 et L1015.....	328
Fig. 139 - Influence du rapport $a / \Delta z_m$ pour identifier les zones bruitées, avec un variogramme de modèle Gaussien (HOUY 2005 : 49, Figure A-20).....	330
Fig. 140 - Tableau des indices de qualité des SP des section 6 et 21 du site 16 en fonction de $a / \Delta z_m$ .....	332
Fig. 141 - Caractérisation fonctionnelle des UM des SP 16.32 et 16.78 établies d'après le test 1.....	340
Fig. 142 - SP avec hypothèses sur la cote du toit des alluvions et l'épaisseur du dépôt archéologique à Tours.....	341
Fig. 143 - Tableau de contingence des points sélectionnées pour la constitution de BDdepot1 et BDdepot2.....	343
Fig. 144 - Cercle variographique de l'épaisseur de BDdepot2.....	346
Fig. 145 - Variogrammes expérimentaux de BDdepot2 pour les directions 70°/160° .....	347
Fig. 146 - Variogrammes expérimentaux et ajustés de BDdepot2 .....	347
Fig. 147 - Validation croisée des valeurs mesurées et estimées de l'épaisseur du dépôt archéologique (BDdepot1) .....	349
Fig. 148 - Cercle variographique du toit des alluvions de BDdepot2 .....	350
Fig. 149 - Variogramme expérimental et ajusté du toit des alluvions de BDdepot2 .....	351
Fig. 150 - Validation croisée des valeurs mesurées et estimées de l'épaisseur du dépôt archéologique (BDdepot1) .....	351

## Glossaire

<b>Alluvions :</b>	sédiments constitués de sables granitiques, d'argiles et de limons, transportés et déposés par les cours d'eau.
<b>Code-barre :</b>	représentation de l'image de la stratification en code de couleur que l'on appelle par analogie code-barre.
<b>Distribution statistique :</b>	répartition de mesures en fréquence cumulée croissante (en %).
<b>Entropie :</b>	quantité qui désigne la part de désordre ou de hasard que comporte tout système d'énergie ou d'information.
<b>Géoarchéologie :</b>	application de la géologie à l'archéologie permettant d'analyser les espaces géographiques et définir les éléments constitutifs des niveaux archéologiques.
<b>Géostatistique :</b>	discipline à la frontière entre les mathématiques et les sciences de la terre.
<b>Géotechnique :</b>	partie de la géologie qui étudie les propriétés des sols et des roches en fonction des projets de construction d'ouvrages.
<b>Interpolation :</b>	opération consistant à déterminer, à partir d'une série statistique succincte aux valeurs trop espacées, de nouvelles valeurs correspondant à un caractère intermédiaire pour lequel aucune mesure n'a été effectuée.
<b>Lithologie :</b>	nature des roches constituant une formation géologique.
<b>Log :</b>	coupe stratigraphique
<b>Mouille :</b>	surcreusement entre les bancs d'alluvions du lit mineur
<b>NGF :</b>	Nivellement Général de la France. Système de référence d'altitude en mètre dont l'origine 0 correspond au niveau de la mer dans le port de Marseille.
<b>PANDA :</b>	Pénétrromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur.
<b>Résistance de pointe :</b>	Mesure en Mpa obtenue à l'aide de pénétromètre dynamique que l'on appelle aussi <b>Qd</b> .
<b>Ruau :</b>	terme local désignant un ruisseau, un cours d'eau secondaire (ruau de l'Archevêque à Tours) ou un chenal plus large (ruau Sainte Anne à Tours).
<b>Seuil :</b>	haut-fond dans le lit mineur, en général localisé dans un secteur de divergence du couant, entre deux mouilles.

<b>Signal :</b>	correspond au tracé représentant la résistance de pointe en fonction de la profondeur. Il est appelé aussi pénétrogramme.
<b>Substrat(um) :</b>	terme désignant une formation géologique. A Tours, on l'appelle substrat calcaire du Turonien Supérieur.
<b>Transect :</b>	Grande bande de terrain arbitrairement choisie dans un secteur géographique comme échantillon de celui-ci, et recoupant ses différentes unités paysagères
<b>UC :</b>	Unité Contextuelle. Elle est caractérisée par une interprétation fonctionnelle homogène enregistrée à l'échelle de l'agrégation ou de la phase archéologique.
<b>UL :</b>	Unité Lithologique. Elle est caractérisée par sa texture, sa couleur et les constituants qui la composent.
<b>UM :</b>	Unité Mécanique. Elle est caractérisée par sa forme sur le signal et correspond à une variabilité du signal homogène sur une certaine profondeur.
<b>US :</b>	Unité Stratigraphique.
<b>Variogramme :</b>	graphe qui présente le demi-écart quadratique moyen de couples de points en fonction de leur distance. Il traduit le degré de corrélation spatiale des points de mesure les uns par rapport aux autres en fonction de leur distance.

## Bibliographie

A PROPOS N°10 1991

A Propos N°10 - Tours en représentation, *Bulletin du L.A.U.T.*

ACHARD-COROMPT *et al.* 2006

Achard-Corompt N. *et al.* - L'ACR "La plaine crayeuse champenoise et ses marges", un exemple d'intégration des données quantifiées issues de fouilles de grandes surfaces dans un programme de synthèse historique, *Les Nouvelles de l'archéologie*, 104-105: 64-71.

ALCAYDE *et al.* 1990

Alcayde G. *et al.* - *Val de Loire. Anjou, Touraine, Orléanais, Berry. Guides géologiques régionaux.*, 2e édition, Masson ed., 200p.

ANDERSON, BRANDT, ORBONS 1994

Anderson K., Brandt R.V., Orbons J. - L'apport des études géophysiques quant à l'orientation et la gestion des fouilles archéologique, *Nouvelles de l'archéologie*, N° 56: 39-44.

ANDREWS 1984

Andrews G. - Archaeology in York : an assesment, *Archaeological papers from York presented to M.W. Barley*: 172-208.

ANSELIN 2003

Anselin L. - *An Introduction to Variography using Variowin*, [www.sal.uiuc.edu/stuff/stuff-sum/pdf/variowin.pdf](http://www.sal.uiuc.edu/stuff/stuff-sum/pdf/variowin.pdf), University of Illinois, 17p.

ARCHEOLOGIE URBAINE 1982

Archeologie Urbaine - *Archéologie urbaine, Actes du colloque International de Tours, 17-20 novembre 1980.*

ARCHÉOLOGIE-URBAINE 1982

*Actes du colloque International de Tours 17-20 Novembre 1980*, Archéologie urbaine, Paris.

ARLAUD 1994

Arlaud C. - Lyon St Jean, Les fouilles de l'îlot Tramassac, *DARA*, 10: 151p.

ARLAUD *et al.* 2000

Arlaud C. *et al.* - Lyon, les dessous de la presqu'île, Bourse -République - Célestins, Terreaux, *DARA*, 20.

ARNAUD, EMERY 2000

Arnaud M., Emery X. - *Estimation et interpolation spatiale. Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*, Paris, Hermes Science Europe, 221p.

ASSELIN 1998

Asselin O. - *Tours Noyé des eaux. Les inondations du Cher et de la Loire dans la région tourangelle au XVIIIe siècle*, mémoire de maîtrise d'Histoire, Université de Tours.

ATLAS... 1995

*Centre Camille Julian*, Atlas topographique des villes de Gaule méridionale, Aix-en-Provence.

AUDIBERT 1998

Audibert C. - *Les digues de la Loire à Tours à la fin du Moyen Age*, mémoire de maîtrise, Université Tours.

AUVINET, JUAREZ, VALDEZ 2005

Auvinet G., Juarez M., Valdez Y.P. - Caractérisation géostatistique du sol lacustre de la vallée de Mexico, *Revue Française de Géotechnique*, 110: 19-26.

AYALA et al. 1998

Ayala G. et al. - *Place Benoît Crépu (Lyon 5ème arr.)*, Rapport de sondages, AFAN, Ministère de la Culture, Lyon.

AYALA et al. 2003

Ayala G. et al. - *Rue Monseigneur Lavarenne (Rhône)*, rapport de diagnostic archéologique, INRAP, Ministère de la Culture, Lyon.

AYALA 2005

Ayala G. - *Lyon 5e, place Benoît Crépu, Parc Saint-Georges*, Bilan scientifique 2003, DRAC Rhône-Alpes, SRA, Lyon.

BABONAUX 1970

Babonaux Y. - *Le lit de la Loire, étude d'hydrodynamique fluviale*, Paris.

BAIZE, JABIOL 1998

Baize D., Jabiol B. - *Guide pour la description des sols*, collection Techniques et pratique.

BARGE et al. 2004

Barge O. et al. - L'utilisation des Systèmes d'Information géographique appliquée à l'archéologie française, *Revue d'Archéométrie*, 28: 15-24.

BARLES et al. 1999

Barles S. et al. - *Le sol urbain*, Paris, coll.Villes, 280 p.

BARLES, GALINIÉ, GUILLERME 1999

Barles S., Galinié H., Guillerme A. - Evolution temporelle des sols urbains, in: BARLES, S. et al., *Le sol urbain*: 261-275.

BARLES, GUILLERME 2003

Barles S., Guillerme A. - Le sol urbain : connaissance technique et reconnaissance scientifique, deux siècles d'histoire, in: BREYSSE, KASTNER dir. 2003: 37-60.

BARLEY 1977

Barley M.-W. dir. - *European towns :their archaeology and early history*, Londres.

BATES et al. 2000

Bates M.R. et al. - Evaluation strategies for deeply stratified alluvial areas : the use of borehole stratigraphic logs, in: ROSKAMS, S. ed., *Interpreting stratigraphy, Site evaluation, recording procedures and stratigraphic analysis*, BAR International Series 910: 49-69.

BATES, BATES 2000

Bates M.R., Bates C.R. - Multidisciplinary approaches to the geoarchaeological evaluation of deeply stratified sedimentary sequences : examples from Pleistocene and Holocene deposits in Southern England, United Kingdom, *Journal of Archaeological Science*, 27: 845-858.

BEBIEN en cours

Bebien C. - *La céramique gallo-romaine à Tours du 1er s. av. au 6e s. ap. J.-C. : consommation et approvisionnement*, dir. A. Ferdière, Université Tours.

BELLAC 2005

Bellac - [http://membres.lycos.fr/talisker/CDDU/Bellac/bellac\\_geotec02.htm](http://membres.lycos.fr/talisker/CDDU/Bellac/bellac_geotec02.htm).

BEN NEJMA 1992

Ben Nejma F. - *Morphologie urbaine et héritage historique, le cas de Tours d'après le cadastre napoléonien*, mémoire de maîtrise, Université de Tours.

BENEVOLO 1993

Benevolo L. - *La ville dans l'histoire européenne*, ed. du seuil, coll. " Faire l'Europe ", 284 p.

BERGER *et al.* 2005

Berger J.-F. *et al.* - Un essai de modélisation prédictive du peuplement en haute vallée du Rhône, in: BERGER J.F., BERTONCELLO F., BRAEMER F: 117-122.

BERGER, BERTONCELLO, BRAEMER *et al.* 2005

Berger J.-F., Bertoncello F., Braemer F. (dir.) *et al.* - *Temps et espaces de l'homme en société, analyses et modèles spatiaux en archéologie.*, Actes des XXVe Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Antibes, CNRS - Cepam.

BERNOT 2004a

Bernot E. - *10-12, rue Joliot Curie, rapport de diagnostic archéologique*, SAM Lyon.

BERNOT 2004b

Bernot E. - *25, rue Joliot Curie, "Maison Dufour", rapport de diagnostic archéologique*, SAM Lyon.

BERNOT *et al.* 2006

Bernot E. *et al.* - *Rapport de fouille de sauvetage du site Mgr Lavarenne et de la rue A. Max*, Service Archéologique Municipal de Lyon, Lyon.

BERNOT, BECKER 2003

Bernot E., Becker C. - *4bis et 6 rue des fossés de Trion, rapport de diagnostic archéologique*, SAM Lyon.

BESSON *et al.* 2003

*Utilisation de la résistivité électrique pour la caractérisation de la structure des sols cultivés*, 4e colloque Geofcan, 23-24/09/2003, Paris,  
<http://www.labos.upmc.fr/sisyphe/dga/geofcan03/pdf/besson.pdf>.

BIDDLE 1969

Biddle M. - Excavations at Winchester, 1968, Seventh interim report, *The Antiquaries Journal*, 49: 295-329.

BIDDLE 1970

Biddle M. - Excavations at Winchester, 1969, Eighth interim report, *The Antiquaries Journal*, 50: 277-326.

BIDDLE 1976

Biddle M. - The towns, in: WILSON, D.M., éd., *The archaeology of anglo-saxon England*, Londres: 99-150.

BIDDLE 1977

Biddle M. - Excavations at Winchester, 1971, Tenth and final interim report, *The Antiquaries Journal*, 55: 295-337.

BIDDLE 1982

Biddle M. - Vers une archéologie urbaine au service de la société, *in*: ARCHEOLOGIE URBAINE 1982: 47-53.

BIDDLE, HUDSON, HEIGHWAY 1973

Biddle M., Hudson D., Heighway C. - *The future of London's past, a survey of the archaeological implications of planning and development in the nation's capital*, 4, Worcester, Rescue Publication, 94p.

BIGET, HERVÉ 1995

Biget J.-L. , Hervé J.C. - *Panoramas urbains, situations de l'histoire des villes*, ENS Editions, coll. Sociétés, Espaces, Temps.

BISSON 1995

Bisson D. - *Villes en représentation, région Centre*, Tours, 102p.

BISSON, RODIER, THOMAS 1995

Bisson D., Rodier X., Thomas F. - Site 033, rue Emile Zola, *in*: *A propos d'Archéologie Urbaine*, Tours, ADEAUT: 32-43

BLIN 1998

Blin C. - *Contribution à la géoarchéologie et à la morphogenèse de la Loire dans le val de Tours. Constitution d'une base de données géologique*, mémoire de maîtrise de Géographie sous la direction de Carcaud N., Université d'Angers, 96.

BOILLE 1977

Boille P. - *Plan Permanent de Sauvegarde et de Mise en Valeur*, ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire, ministère de la culture et de l'environnement, Tours.

BOISSAVIT-CAMUS *et al.* 2005

Boissavit-Camus B. *et al.* - Chrono-chorématique urbaine : figurer l'espace/temps des villes, *in*: BERGER J.F., BERTONCELLO F., BRAEMER F. *et al.*: 67-80.

BOISSEUIL 1992

Boisseuil D. - *Le pont sur la Loire à la fin du Moyen Age*, Recherches sur Tours, 6, Tours.

BOITTE, SOUYAT 1999

Boitte B., Souyat E. - *Création d'une base de données géotechniques pour le Grand-Lyon*, mémoire de PIRD, INSA Lyon, 54p.

BONIS 1994

Bonis A. - Les idées de la ville, *Nouvelles de l'archéologie*, 56: 33-34.

BONNAMOUR 2004

Bonnamour G. - *Rapport interne sur la mise en place d'un SIG sur les données issues des Balmes*, Service Archéologique Municipal, Lyon.

BOSSEAU 2002

Bosseau R. - *Analyse topographique et évaluation du potentiel archéologique des trois îlots du centre urbanisé ancien à Tours (secteur de la cité)*, mémoire de maîtrise d'archéologie (dir. H. Galinié), Université de Tours.

BOUILLÉ 1977

Bouillé F. - *Un modèle universel de banque de données, simultanément partageable, portable et répartie*, mémoire de thèse de Mathématique, spécialité informatique, 3 vol/, Université Paris 6.

BOUQUET 1998

Bouquet C. - *Les villes et le fleuve : histoire des relations entre les sociétés urbaines et la Loire Moyenne à la fin du Moyen Age*, mémoire de DEA, université de Tours, 106 p.

BOURIN 2002

Bourin M. - L'espaces, Analyses de l'espace, *in*: Schmitt, J.-C., Oexle, O.G., *Les tendances actuelles de l'histoire du Moyen Age en France et en Allemagne*, Publication de la Sorbonne: 490-510.

BRAVARD, VÉROT-BOURRÉLY, FRANC 1995

Bravard J.-P., Vérot-Bourrély A., Franc O. - Paléodynamique du site fluvial de Lyon depuis le tardiglaciaire, *in*: BRAVARD, PRESTEAU 1995: 177-201.

BREUL 2000a

Breul P. - *Rapport d'étude géotechnique : étude expérimentale d'un ferrier, Ludres (57) (01/12/2000)*, Sol Solution, département géoendoscopie, 11p.

BREUL 2000b

Breul P. - *Rapport d'étude géotechnique : reconnaissance archéologique du Palais Ducal de Nancy (27 au 30/11/2000)*, Sol Solution, département géoendoscopie, 13p.

BREUL 2001

Breul P. - *Rapport d'essais PANDA et endoscope sur le site de St Julien (13 et 14 Juin 2000)*, Clermont-Ferrand, LERMES-CUST.

BREUL 2005

Breul P. - *Rapport d'étude - Couplage d'essais géotechniques et de la géoendoscopie en vue d'une qualification archéologique du sol urbain, application au site du parking St Georges (Lyon)*, CUST, Université Blaise Pascal.

BREUL, GOURVES, HADDANI 2002

Breul P., Gourves R., Haddani Y. - Géo-endoscopie : application à la reconnaissance et au diagnostic en site urbain, *Revue Française de Géotechnique*, 101.

BREUL, HADDANI 2002

Breul P., Haddani Y. - *Rapport d'essais : site de Saint-Julien -Tours, campagne réalisée les 15 et 16 Novembre 2001*, Clermont-Ferrand, LERMES-CUST.

BREYSSE 1995

Breysse D. - *L'hétérogénéité en mécanique des sols : la problématique du sol urbain*, Rapport GdR Sol urbain, Paris.

BREYSSE 1999

Breysse D. - Génie civil urbain et mécanique des sols, *in*: BARLES *et al.* 1999: 143-178.

BREYSSE 2003

Breysse D. - Quantifier l'hétérogénéité du sol urbain et modéliser ses effets, *in*: BREYSSE, KASTNER *dir.* 2003: 123-146.

BREYSSE, KASTNER 2003

Breysse D., Kastner R. - Le sol urbain : spécificités du milieu et des enjeux, *in*: BREYSSE, KASTNER *dir.* 2003: 19-36.

BREYSSE, KASTNER *dir.* 2003

Breysse D., Kastner R. *dir.* - *Sols urbains*, Traité MIM, Lavoisier, 462p.

BREYSSE *et al.* 2005

*Valorisation des données géotechniques à l'échelle d'une commune urbaine*, GeoCityNet, 10-11/10/2005, Villeneuve d'Asq.

BREYSSE, LANOT, PIETTE 2005

*Valorisation de données géotechniques et géologiques pour réduire les incertitudes à l'échelle d'une commune urbaine (Pessac, Gironde)*, JNF'05 - Quatrième conférence nationale Fiabilité des Matériaux et des Structures, 25-26/10/2005.

BREYSSE *et al.* 2002

Breysse D. *et al.* - Le pénétromètre et l'hétérogénéité des sols archéologiques urbains, *Revue Française de Géotechnique*, 100: 43-58.

BROGIOLO 1987

Brogio G.P. ed. - *Archeologia urbana in Lombardia, valutazione dei depositi archeologici e inventario dei vincoli*, Modane.

BROGLIO, WARD-PERKINS 1999

Broglio G.P., Ward-Perkins B. dir. - *Idea and Ideal of the Town between late Antiquity and the Early Middle Ages*, Leiden.

BRULET, GHENNE-DUBOIS 1987

Brulet R., Ghenne-Dubois M.J. dir. - *Atlas du sous-sol des centres urbains anciens*, 13 fascicules publiés, Bruxelles.

BRULET 1989

Brulet R. - *Actes du colloque de Louvain-la-Neuve " Archéologie et Aménagement " (1988)*, *Les Cahiers de l'Urbanisme*, 7.

BRUN, MARCIGNY, VANMOERKERKE 2006a

Brun P., Marcigny C., Vanmoerkerke J. - Essai d'évaluation des opérations de grande surface, *Nouvelles de l'archéologie*, 104-105: 88-96.

BRUN, MARCIGNY, VANMOERKERKE 2006b

Brun P., Marcigny C., Vanmoerkerke J. dir. - *Une archéologie des réseaux locaux. Quelles surfaces étudier pour quelle représentativité? Actes de la table ronde des 14 et 15 juin 2005 à Châlons-en-Champagne*, *Les Nouvelles de l'archéologie*, 104-105, 96p.

BRUNET 1987

Brunet R. - *La carte, mode d'emploi*, Fayard/Reclus, 269p.

BRUNET 2000

Brunet R. - Des modèles en géographie? Sens d'une recherche, *Bulletin de la société de Géographie de Liège*, 2: 21-30.

BUCHANAN 1963

Buchanan C. - *Traffic in Towns*, Ministry of transport.

BURGÉAP 1993

Burgéap - *Etude de la variation de la nappe alluviale au droit de la ville de Tours entre Loire et Cher*, Rapport final, octobre 1993, Service Techniques de la ville de Tours.

BURNOUF 1994

Burnouf J. - Informatisation des archives du sol en archéologie de sauvetage : les expériences lyonnaises, 1984-1994 - I - Proto-informatique : l'enregistrement des données des fouilles de l'opération archéologique préalable à la construction du métro de Lyon (1984 - 1988). *Le médiéviste et l'ordinateur*, 29: <http://lemo.irht.cnrs.fr/29/mo2911.htm>.

BURNOUF, ARLAUD, BRAVARD *et al.* 1994

Burnouf J., Arlaud C., Bravard J.-P. *et al.* - Lyon Saint-Jean, les fouilles de l'îlot Tramassac, *DARA*, 10: 151p.

BURNOUF, CARCAUD 1999

Burnouf J., Carcaud N. - Le val de Loire en Anjou Touraine : un cours forcé par les sociétés riveraines, *Médiévales*, 36.

CAMMAS *et al.* 1995

Cammass C. *et al.* - Le problème des " terres noires " sur les sites urbains tardo-antiques et médiévaux : réflexions et propositions méthodologiques à partir de l'exemple du Collège de France à Paris, *Nouvelles de l'Archéologie*, 61: 22-29.

CANTI, MEDDENS 1998

Canti M.G., Meddens F.-M. - Mechanical coring as an aid to archaeological projects, *Journal of Field Archaeology*, 25/1: 97-105.

CARCAUD 2002

Carcaud N. dir. - *Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges (Région Centre)*, Rapport de synthèse du PCR 2000-2002, SRA Centre, Orléans.

CARCAUD, GARCIN 2001

Carcaud N., Garcin M. dir. - *Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges (Région Centre)*, Synthèse des résultats du PCR 1996-1999, SRA Centre, Orléans.

CARDARELLI *et al.* 2002

Cardarelli A. *et al.* - Valutazione del rischio archeologico e programmazione degli interventi di trasformazione urbana e territoriale : l'esperienza di Modena, *in*: GELICHI 2002: 31-40.

CAROZZA 2005

Carozza J.-M. - *Les modèles spatiaux en archéologie : un état des lieux*, [http://www.iag.asso.fr/articles/modelisation\\_spatiale\\_archeologie.htm](http://www.iag.asso.fr/articles/modelisation_spatiale_archeologie.htm), 3 p.

CAROZZA *et al.* 2005

Carozza J.-M. *et al.* - Modélisation prédictive du risque archéologique : application de la méthode «Weights of Evidence » à la plaine du Roussillon. Premiers résultats, *in*: BERGER J.F., BERTONCELLO F., BRAEMER F.: 105-116.

CARVER 1980

Carver M.O.H. - Medieval Worcester, an archaeological framework: report, surveys, texts and essays, *Worcestershire Archaeological Society 3S*, 7.

CARVER 1981

Carver M.O.H. - Sampling Towns: an optimistic strategy, *in*: CLACK P., HASELGROVE S. eds, *Approaches to the urban Past*, Dept of archaeology, University of Durham, Occasional Papers 2: 65-91.

CARVER 1983

Carver M.O.H. - Forty French towns : an essay on archaeological site evaluation and historical aims, *Journal of archaeology*, 2: 339-378.

CARVER 1987

Carver M.O.H. - *Underneath English towns, Interpreting urban archaeology*, Londres.

CASTELLS *et al.* 1991

Castells J. *et al.* - La documentació i avaluació del patrimoni i els mapes arqueològics dels centres urbans, *Revista d'arqueologia de Ponent* 1: 718-781.

CAVAILLÈS *et al.* 2000

Cavaillès M. *et al.* - *Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain : Parthenay, Tours*, 246p.

CHAMPAGNE 2002

Champagne F. - *La fouille de l'Hotel de Police (site 23), DFS*.

CHAPELOT 1982

Chapelot J. - Evaluation du patrimoine archéologique urbain, procédures d'analyse et programmation des recherches, *in: ARCHÉOLOGIE URBAINE* 1982: 27-35.

CHARTIER 1999

Chartier M. - Modélisation géographique, *Cahiers I - 1998-1999, Thème 1 - Environnement, sociétés, espaces*, *ArScan*: 37-44, <http://www.mae.u-paris10.fr/arscan/Cahiers/FMPro>.

CHAUVIGNÉ 1909

Chauvigné A. - *Topographie de la plaine de Caesarodunum : situation de Caesarodunum du 4e au 12e siècle, comparaison des altitudes anciennes et actuelles*, BACTHS.

CHENORKIAN 1996

Chenorkian R. - *Pratique archéologique statistique et graphique*, Errance, 162 p.

CHEVALIER 1975

Chevalier B. - *Tours ville royale 1356-1520, origine et développement d'une capitale à la fin du Moyen-Age*, publication de la Sorbonne, 634 p.

CHEVALIER 1985

Chevalier B. - *Histoire de Tours*, Toulouse, Privat, 423 p.

CHEVALIER, CHARLOT 1858

Chevalier C., Charlot M.-G. - *Etudes sur la Touraine : hydrographie, géologie, agronomie, statistique*, Tours, Guillaud-Verger.

CHEVEREAU 2003

Chevereau S. - *Tours reconstruit, des bombardements à la renaissance*, Editions Alan Sutton, 128p.

CLARKE 1972

Clarke D.L. - *Models in archaeology*, London, Methuen.

CLARKE 1977

Clarke D.L. - *Spatial archaeology*, London, Academic Press.

CLOTUCHE 2006

Clotuche R. - Onnaing "ZAC de la vallée de l'Escaut", *Les Nouvelles de l'archéologie*, 104-105: 51-56.

CNAU 1987

Cnau - *Enregistrements de données de fouilles urbaines*, Tours, 102p.

CNAU 1988

Cnau - *Fouille, enregistrement : analyses des fossés et de leur comblement en milieu urbain*, Tours, 130p.

CNAU 1989

*Guide pour l'élaboration des documents d'évaluation du patrimoine archéologique urbain*, Tours.

CNAU 2004a

Cnau - *Diagnostics archéologiques en milieu urbain : objectifs, méthodes, résultats*, Actes de la table ronde (SDA, CNAU), 6-7 Octobre 2003, Tours, 275p.

CNAU 2004b

Cnau - *Informatisation des Documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France : bilan d'étape 2002-2003*.

COLLECTIF 2000

Collectif - La modélisation des systèmes de peuplement : débat à propos d'un ouvrage récent. Des oppida aux métropoles, *Les petits cahiers d'Anatole*, 5: 60p., [http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2\\_5.pdf](http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2_5.pdf).

COLLOQUE 2000

*Actes du colloque (8-9 Novembre 2000)*, Presses des Ponts et Chaussées, Risque et génie civil.

COLLOQUE ENPC 1994

*Presses des Ponts et Chaussées*, Gestion des ouvrages d'art, compte-rendu du colloque international organisé par l'ENPC (18-20 octobre 1994).

COMTE, SIRAUDEAU 1990

Comte F., Siraudeau J. - *Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain : Angers, Tours*, 130p.

CONAUT 1998

Conaut M. - *Tours, secteur sauvegardé : Plan de Sauvegarde et de Mise en Valeur, 21 planches*, ministère de l'équipement, des transports et du logement, ministère de la culture et de la communication, Tours.

CORDARY 1994

Cordary D. - *Mécanique des sols*, Paris, Lavoisier, 380 p.

COSTE *et al.* 2000

Coste M.C. *et al.* - *Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain : Compiègne*, Tours, 184p.

COURTY *et al.* 1989

Courty M.-A. *et al.* - *Soils and micromorphology in archaeology*, Cambridge, CUP, 344 p.

COWGILL 1974

Cowgill G.L. - Quantitative studies of urbanization at Tehotihuacan, *in*: Hammond, N., *Mesoamerican archaeology : new approaches*, London: 363-396.

CRIBELLIER, MASSAT 1996

Cribellier Ch., Massat T. - Site 15 : 10, rue Gambetta, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*, 44: 710-721.

DABAS 1999

Dabas M. - Contribution de la prospection géophysique à large maille et de la géostatistique à l'étude des tracés autoroutiers. Application aux ferriers de la Buissière sur l'A77, *Revue d'Archéométrie*, 23: 141-154.

DABAS *et al.* 2006

Dabas M. *et al.* - *La prospection*, coll. Archéologiques, Errance.

DABAS, HESSE, TABBAGH 1995

Dabas M., Hesse A., Tabbagh A. - Géophysique de sub-surface et reconnaissance du sous-sol urbain, *in*: BARLES 1995: 213-218.

DAVID, TALIN D'EYZAC 2001

David C., Talin D'eyzac S. - Exemples de prospection géophysique appliquée aux parcs et jardins, *Les Nouvelles de l'archéologie*, 83/84: 49-51.

DAVTIAN 2003

Davtian G. - *La modélisation prédictive*, Ecole thématique CNRS-ISA de Tours, [http://isa.univ-tours.fr/download/ET2003\\_modpredict.pdf](http://isa.univ-tours.fr/download/ET2003_modpredict.pdf), 18p.

DE FILIPPO 1998

De Filippo R. - *Tours, rue Victor Hugo / rue Giraudeau (site 62)*, Rapport de diagnostic archéologique.

DE FILIPPO 2001

De Filippo R. - *Hôpital de Clocheville, Rapport final de synthèse d'opération archéologiques*, INRAP - SRA Centre.

DE FOUQUET 2006

De Fouquet C. - *La modélisation géostatistique des milieux anthropisés*, mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Paris, 96 p.

DELAGE 1999

Delage P. - Caractérisation spatiale des sols urbains, *in*: BARLES *et al.* 1999: 215-250.

DEMOLON, GALINIÉ, VERHAEGHE 1994

Demolon P., Galinié H., Verhaeghe F. dir. - *Archéologie des villes dans le Nord-Ouest de l'Europe (VIIe-XIIIe siècle)*, actes du IV<sup>e</sup> congrès international d'archéologie médiévale (Douai 1991), Douai.

DENÈGRE, SALGÉ 1996

Denègre J., Salgé F. - Les systèmes d'information géographique, *Que sais-je ?*, 3122.

DENIS, CRÉMOUX 2000

Denis A., Crémoux F. - Proceedings of the ICASP 8 Conference, Sydney, Australia 12-15 December 1999, *Structural analysis of a signal from entropy tool, Application to tunnel boring data, Applications of Statistics and Probability*.

DENIS, CRÉMOUX 2002

Denis A., Crémoux F. - Using the entropy of curves to segment a time or spatial series, *Mathematical geology*, vol.34, N°8: 899-914.

DENIS, CRÉMOUX, BREYSSE 1997

Denis A., Crémoux F., Breysse D. - Apport d'une approche géostatistique dans l'interprétation des mesures de diagraphies différées, *Revue IFP*, vol. 52, N° 4: 389-406

DENIS, MARTINAUD 2003

Denis A., Martinaud M - Reconnaissance géotechnique et géophysique du sol urbain, *in: BREYSSE, KASTNER dir. 2003: 97-122.*

DENIZOT 1935

Denizot G. - Sur la constitution des vals de la Loire et sur la signification des monticules insubmersibles, *C.R. Acad.Sc. Fr.*, T201: 1206-1208.

DEXTER, CZYZ, GATE 2006

Dexter A.R., Czyz E.A., Gate O.P. - A method for prediction of soil penetration resistance, *Soil & Tillage Research*: 8p.

DI MÉO 1991

Di Méo G. - *L'Homme, l'Espace, la Société*, Paris.

DION 1934

Dion R. - *Le val de Loire*, Etude de géographie régionale, Tours, 752p.

DJINDJIAN 1991

Djindjian F. - *Méthodes pour l'archéologie*, Paris, Armand Colin, 401p.

DOMINIQUE *en cours*

Dominique S. - *Méthodologie de modélisation du sous-sol : application à l'agglomération bordelaise*, (Université Bordeaux 1, dir. D. Breysse).

DOMINIQUE, MARACHE, RÉGALDO-SAINT BLANCARD *en cours de soumission*

Dominique S., Marache A., Régaldo-Saint Blancard P. - Morphologie naturelle du site de Bordeaux (France), *Archéosciences*.

DUBANT 1987

Dubant D. - *Etude archéologique des fossés défensifs de la ville de Tours du IVe au XVe siècle : secteur de la cité*, Etude archéologique des fossés défensifs de la ville de Tours du IVe au XVe siècle : secteur de la cité, 174 p.

DUBANT 1989a

Dubant D. - *Inventaire des documents cartographiques de la Varenne de Tours : des origines au cadastre napoléonien*, mémoire de DEA d'histoire, Université de Tours.

DUBANT 1989b

Dubant D. - *Tours site 021: rue de la Monnaie, Sauvetage urgent: rapport préliminaire*, LAUT, Tours.

DUBANT 1990

Dubant D. - *Tours site 11 : Fouilles de la Nouvelle République*, Tours.

DUBANT 1991

Dubant D. - *Tours site 016 : fouilles de la place du maréchal Leclerc, Sauvetage programmé : rapport préliminaire*, LAUT, *BSAT*, 43: 97-103.

DUBANT 1992a

Dubant D. - *L'observation des Allées Béranger (site 027)*, *R.A.C.F.*: 818-821.

DUBANT 1992b

Dubant D. - *Tours site 024 : rue de la Victoire, Rapport d'intervention, Approche paléoenvironnementale et données annexes*, LAUT, Tours.

DUBANT 1993a

Dubant D. - *Le site de Tours du 1er au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, de l'adoption à l'astreinte (étude historique)*, thèse de 3<sup>e</sup> cycle d'Histoire, Université de Tours, 3T, 305 p.

DUBANT 1993b

Dubant D. - Tours site 023 : fouilles du Centre International des Congrès " Vinci ", rapport préliminaire, Tours, *BSAT*, 43: 803-824.

DUBOIS, SAZERAT 1974

Dubois J., Sazerat J.-P. - L'amphithéâtre de Tours, *MSAT*, VIII: 41-74.

DUBOIS, SAZERAT 1977

Dubois J., Sazerat J.-P. - L'amphithéâtre de Tours. Recherches récentes, *BSAT*, XXXVIII: 355-378.

DUBOULOZ 2003

Dubouloz J. - L'évaluation des méthodes de diagnostic : simulation sur des sites de l'Aisne, *Nouvelles de l'archéologie*, 91: 46-50.

DUBY 1980

Duby G. dir. - *Histoire de la France urbaine*, 4 tomes, Paris, L'univers historique, Le Seuil.

DUCHAUFOUR 1997

Duchaufour P. - "*Abrégé de pédologie*". *Sol, végétation, environnement*, Paris, Masson.

DUFAÏ 2001

DufaÏ B. - Quel avenir pour la carte archéologique urbaine? Eléments de réflexion, *Les Nouvelles de l'archéologie*, 85: 37-49.

DUFAÏ 2002

DufaÏ B. - De la topographie à l'histoire. Comprendre l'évolution des villes anciennes, *Mappemonde*, 67: 32-3.

DURAND-DASTÈS *et al.* 1998

Durand-Dastès F. *et al.* - *Des oppida aux métropoles*, collection " villes ", ARCHAEOEMEDES, Paris, Anthropos, éd. Economica, 280 p.

DURAND-DASTÈS 2001

Durand-Dastès F. - Les concepts de la modélisation en analyse spatiale, *in*: SANDERS 2001:

DURRENBERGER 1999

Durrenberger V. - *D'une rive à l'autre de la Loire. Les aménagements du lit mineur de la Loire du XI<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> s. dans les sources écrites de Rochecorbon à Saint-Cyr*, mémoire de maîtrise (dir. J. Burnouf), Université Tours.

DUVERGÉ 1774

Duvergé M. - *Mémoire topographique, physique et médicinal ou traité sur la situation de la ville de Tours, sur la nature de son sol, sur les qualités de l'eau et de l'air, sur la nourriture, le tempérament, le caractère, les maladies de ses habitants et des troupes qui y sont en garnison*, Tours (Bibliothèque municipale de Tours).

EDDY, PETCHEY 1983

Eddy M.-R., Petchey M.-R eds - *Historic towns in Essex, an archaeological survey of Saxon and Medieval Towns*, Chelmsford.

ELKATEB, CHALTURNYK, ROBERTSON 2003

Elkateb T., Chalturnyk R., Robertson P.K. - On overview of soil heterogeneity : quantification and implications on geotechnical fiel problems, *Can. Geotech. Journal*, 40 : 1-40.

FAUVET *et al.* 1998

Fauvet M.C. *et al.* - Analyse de données géographiques : application des bases de données temporelles, *Revue internationale de géomatique*, 8: 149-165.

FERDIÈRE 1999

Ferdière A. dir. - *La géologie, les sciences de la terre*, coll. Archéologiques, Errance, 168 p.

FERRAS 1993

Ferras R. - *Les modèles graphiques en géographie*, Economica-Reclus, 110p.

FONDRILLON 2001

Fondrillon M. - *Caractérisation archéologique du sol urbain*, mémoire de DEA Villes et territoires mention archéologie sous la direction d'H. Galinié, Tours.

FONDRILLON *en cours*

Fondrillon M. - *La formation du sol urbain : étude archéologique des terres noires du haut Moyen Age (4e-12e siècle)*, mémoire de thèse, dir. H. Galinié, Université de Tours (soutenance fin 2007),

FONQUERNIE 1989

Fonquernie A. - *Techniques actuelles de fondation, de l'avant-projet à l'exécution. Guide à l'usage des archéologues*, 178 p.

FOUILLET *et al.* 2000

Fouillet N. *et al.* - *Tours, lycée Descartes " Bâtiment F ", Opération préventive de fouille archéologique*, DFS, Orléans.

FOUILLET *et al.* 2003

Fouillet N. *et al.* - Les fouilles de la place Anatole France, SRA Centre,, DFS:

FOUILLET 2005

Fouillet N. - *Tours, 36, 38, 38bis rue Mirabeau, rapport final d'opération de diagnostic archéologique*, ISRA Centre.

FOUILLET, JOLY 2004

Fouillet N., Joly S. - Université François-Rabelais, 3, rue des Tanneurs, Opération préventive de diagnostic archéologique, SRA Centre, DFS:

GAILLOT 2006

Gaillot S. - *Chantier de la rue Mgr Lavarenne, expertise géomorphologique, Rapport final*, LRGE, Université Lumière Lyon 2, 34 p.

GALINIÉ 1974

Galinié H. - Tours site 1 : Saint-Pierre-le-Puellier, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*: 155-172.

GALINIÉ 1978

Galinié H. - Tours site 3 : Le château de Tours, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*: 639-662.

GALINIÉ 1979

Galinié H. - Tours site 6 : rue des Ursulines, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*: 234-249.

GALINIÉ 1981

Galinié H. - *Recherches sur la topographie de Tours du 4<sup>e</sup> au 11<sup>e</sup> siècle*, thèse d'histoire, Université de Caen.

GALINIÉ *et al.* 1982

Galinié H. *et al.* - Fouilles archéologiques à Tours 1982, rapport préliminaire, *BSAT*, 40: 153-199,

GALINIÉ 1982

Galinié H. - L'archéologie urbaine, rapport préliminaire, *in*: ARCHÉOLOGIE URBAINE 1982: 21-25

GALINIÉ 1984

Galinié H. - Van Es et al. Het bodemarchief bedreigd..., *compte rendu Archéologie Médiévale* 14: 406-410,

GALINIÉ 1985

Galinié H. - Genèse du paysage urbain, *in*: CHEVALIER 1985: 11-40

GALINIÉ 1988

Galinié H. - L'archéologie urbaine française face à des choix, *in*: FEHRING 1988: 163-170

GALINIÉ 1989

Galinié H. - Prévision et gestion archéologiques en milieu urbain, *in*: BRULET 1989: 64-69

GALINIÉ 1991a

Galinié H. - Carte archéologique et évaluation du patrimoine archéologique urbain des villes de France, *Nouvelles de l'archéologie*, 45: 27-30,

GALINIÉ 1991b

Galinié H. - Chronique d'archéologie urbaine 2, *R.A.C.F.*, 30: 241-245,

GALINIÉ 1992

Galinié H. - La gestion des archives du sol en ville, actes du colloque de San sebastian (1991), *Nazioarteko jardunaldiak Interbenzioarkeologia*: 137-162,

GALINIÉ 1994

Galinié H. - Potentiel archéologique urbain et évaluation, *Nouvelles de l'archéologie*, 55: 17-19,

GALINIÉ 1995

Galinié H. - L'évaluation du potentiel archéologique des villes : les archives du sol, *in*: BARLES 1995: 201-205

GALINIÉ 1997

Galinié H. - Tours de Grégoire, Tours des archives du sol, *in*: GAUTHIER, GALINIÉ 1997: 65-80

GALINIÉ 1999a

Galinié H. - Enjeux en archéologie urbaine, *Revue archéologique de Picardie*, N° spécial 16: 13-15,

GALINIÉ 1999b

Galinié H. - L'appréhension archéologique du sol urbain, *in*: BARLES (et al.) 1999: 7-21

GALINIÉ 2000

Galinié H. - *Ville, espace urbain et archéologie*, Tours,

GALINIÉ 2003

Galinié H. - Lire les archives du sol en villes, *in*: BREYSSE, KASTNER 2003 *dir.*: 447-455

GALINIÉ 2004

Galinié H. - L'expression *Terres Noires*, un concept d'attente, *Les petits cahiers d'Anatole*, 15: 29p, [http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2\\_15.pdf](http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2_15.pdf)

GALINIÉ *et al.* 2004

Galinié H. *et al.* - Quelques aspects documentés des relations entretenues par les habitants de Tours avec la Loire du 1er au 12e s., *in*: Burnouf J., Leveau P., *Fleuves et Marais, une Histoire au Croisement de la Nature et de la Culture. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux, lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes*: 127-136

GALINIÉ *dir.* 2007

Galinié H. *dir.* - *Tours antique et médiéval, lieux de vie et temps de la ville (40 ans d'archéologie urbaine)*, Tours,

GALINIÉ, BOUCARD 1980

Galinié H., Boucard J. - *La gestion des archives du sol à Saintes, implications archéologiques de l'occupation des secteurs anciens*, LAUT, multicopié,

GALINIÉ *et al.* 2003a

Galinié H. *et al.* - Téotolon, doyen de Saint-Martin, évêque de Tours au Xe siècle, et urbaniste?, *in*: GAUTHIEZ, ZADORA-RIO, GALINIÉ 2003: 239-256.

GALINIÉ *et al.* 2005

Galinié H. *et al.* - ARSOL. La chaîne de gestion des données de fouilles du Laboratoire Archéologie et Territoires., *Les petits cahiers d'Anatole*, 17: 25p, [http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2\\_17.pdf](http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2_17.pdf)

GALINIÉ, KEMP, LORANS 1982

Galinié H., Kemp R.L., Lorans E. - Tours site 6 : Rue des Ursulines, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*: 176-184,

GALINIÉ *et al.* 2003b

Galinié H. *et al.* - Utilisation du pénétromètre dynamique de type PANDA en milieu urbain pour l'évaluation et la caractérisation du dépôt archéologique, *Revue d'Archéométrie*, 27: 15-26,

GALINIÉ, LORANS 1980

Galinié H., Lorans E. - Tours site 6 : rue des Ursulines, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*:

GALINIÉ, LORANS 1981

Galinié H., Lorans E. - Tours site 6 : rue des Ursulines, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*: 1073-1084,

GALINIÉ, LORANS 2000

Galinié H., Lorans E. - *Rapport de la première campagne de fouille programmée sur le site Prosper Mérimée/St Julien (site 16)*, Tours,

GALINIÉ, LORANS, FONDRILLON 2001

Galinié H., Lorans E., Fondrillon M. - *Tours Site 16, Fouille programmée sur le site Prosper Mérimée/St Julien, 2<sup>e</sup> campagne de fouille*, rapport multicopié UMR 6575,

GALINIÉ *et al.* 2002

Galinié H. *et al.* - *Tours Site 16, Fouille programmée sur le site Prosper Mérimée/St Julien, 3<sup>e</sup> campagne de fouille*, rapport multicopié UMR 6575,

GALINIÉ *et al.* 2003c

Galinié H. *et al.* - *Tours Site 16, Fouille programmée sur le site Prosper Mérimée/St Julien, 4<sup>e</sup> campagne de fouille*, rapport multicopié UMR 6575.

GALINIÉ, RANDOIN 1979a

Galinié H., Randoïn B. - *Les archives du sol à Tours, survie et avenir de l'archéologie de la ville*, Tours,

GALINIÉ, RANDOIN 1979b

Galinié H., Randoïn B. - Tours sites 06 et 8, Place de la Victoire, rapport préliminaire, LAUT, *BSAT*: 7-34,

GALINIÉ, RODIER 2001

Galinié H., Rodier X. - Les modifications du trait de la rive gauche de la Loire dans l'Ouest de tours, *in*: CARCAUD, GARCIN 2001: 29-36

GALINIÉ, RODIER 2002

Galinié H., Rodier X. - ToToPI, Topographie de Tours Pré-Industriel un outil d'analyse urbaine, *Les petits cahiers d'Anatole*, 11: 12p, [http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2\\_11.pdf](http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2_11.pdf)

GALINIÉ, RODIER, SALIGNY 2004

Galinié H., Rodier X., Saligny L. - Entités fonctionnelles, entités spatiales et dynamique urbaine dans la longue durée, *Histoire et mesure*, XIX - 3/4: 223-242.

GALINIÉ, ROYO 1993

Galinié H., Royo - *Atlas des villes et des réseaux de villes en région centre*, 3 fascicules.

GARMY 1992

Garmy P. - *L'archéologie urbaine en France : aspects juridiques, instruments de programmation scientifique et urbanistique*, rapport inédit du colloque de Bruxelles (1992),

GARMY 1994

Garmy P. - Pour une archéologie de la ville, *Nouvelles de l'archéologie*, 55: 5-6.

GARMY 1995

Garmy P. - Etat de la recherche française en archéologie urbaine : éléments pour un bilan 1986-1993, *Nouvelles de l'archéologie*, 59: 47-51.

GARMY 1999

Garmy P. - France, *in*: SARFATIJ H., MELLI P., *Rapport sur la situation de l'archéologie urbaine en Europe*, Editions du Conseil de l'Europe: 91-102.

GARMY *et al.* 2005

Garmy P. *et al.* - Logiques spatiales et « systèmes de villes » en Lodévois de l'Antiquité à la période moderne, *in*: BERGER J.F., BERTONCELLO F., BRAEMER F.: 335-346

GAUTHIER, PICARD 1987

Gauthier N., Picard J.-Ch. dir. - *Topographie chrétienne des cites de la Gaule des origines au milieu du VIII<sup>e</sup> siècle*, De Boccard.

GAUTHIEZ 1999

Gauthiez B. - Approche morphologique des plans de villes, archéologie et sources écrites, *Archéologie des villes, démarches et exemples en Picardie*, *Revue archéologique de Picardie*, n° spécial 16: 17-26.

GAUTHIEZ, ZADORA-RIO, GALINIÉ 2003

Gauthiez B., Zadora-Rio E., Galinié H. - *Village et Ville au Moyen Age : les dynamiques morphologiques*, 5, Presses universitaires François-Rabelais, coll "Perspectives Villes et Territoires".

GAY-OVEJERO, MACAIRE, SEIGNE à paraître

Gay-Ovejero I., Macaire J.-J., Seigne J. - Sondages carottés cave du Couvent des Dominicains, 12 rue du Général Meusnier, et au 5 rue Manceau, Tours (37).

GELICHI 2002

Gelichi S. - *Dalla carta di rischio archeologico di Cesena alla tutela preventiva urbana in Europa*, Florence;

GELICHI, ALBERTI, LIBRENTI 1999

Gelichi S., Alberti A., Librenti M. - *Cesena : la memoria del passato, Archeologia urbana e valutazione dei depositi*, Florence.

GIGOUT, HOREMANS, RASPLUS 1972

Gigout M., Horemans P., Rasplus L. - Sur la géologie des environs d'Orléans, *Bulletin BRGM*, I, n°1: 1-28.

GOBIN 2001

Gobin A. - *Analyse topographique et évaluation du potentiel archéologique du secteur Anatole France/Saint-Saturnin à Tours*, mémoire de maîtrise d'Archéologie (dir. H. Galinié), Université de Tours.

GODARD, LEGAY 1992

Godard G., Legay J.-M. - Modélisation et simulation : une approche de la prédictivité, *in*: Jollivet, M., *Sciences de la nature, Sciences la société, les passeurs de frontières*, Paris: 491-509.

GOUDINEAU dir. 1989

Goudineau C. *dir.* - Aux origines de Lyon, *DARA*, 2: 128p.

GRATALOUP 1996

Grataloup C. - *Lieux d'histoire. Essai de géohistoire systématique*, Montpellier, Reclus, coll. "Espaces mode d'emploi", 256p.

GRATTON 2002

Gratton Y. - Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale, *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*: [www.iag.asso.fr](http://www.iag.asso.fr).

HABIB 1978

Habib P. - Mécanique des sols et des roches, *in*: MANDEL J., *Propriétés mécaniques des matériaux - Rhéologie - Plasticité*, Paris, Eyrolles: 187-206.

HAGGETT 1973

Haggett P. - *L'analyse spatiale en géographie humaine*, traduction H. Fréchou, 390p.

HARRIS 1979a

Harris E. C. - The laws of archaeological stratigraphy, *World Archaeology*, 11/1: 111-117.

HARRIS 1979b

Harris E. C. - *Principle of Archaeological Stratigraphy*, Londres/New York, Academic Press.

HEIGHWAY 1972

Heighway C. dir. - *The erosion of history. Archaeology and Planning in Towns. A study of historic towns affected by modern development in England, Wales and Scotland.*, S.I., CBA, Londres.

HESSE 1978

Hesse A. - *Manuel de prospection géophysique appliquée à la reconnaissance archéologique*, 8, Centre de recherches sur les techniques gréco-romaine, Université de Dijon, 127 p.

HESSE 2002

Hesse A. - Méthodes géophysiques de la prospection, *in*: MISKOVSKY 2002: 393-406.

HISTOIRE & MESURE 2004

Histoire & Mesure - Système d'information géographique, archéologie et histoire.

HODDER, ORTON 1976

Hodder I., Orton C. - *Spatial analysis in archaeology*, VIII, Cambridge, Cambridge University Press, 270p.

HOUY 2005

Houy L. - *Variabilité des sols et risques liés à l'interaction sol-ouvrage*, mémoire de thèse (dir. D. Breyse et A. Denis), CDGA, Université de Bordeaux I, 367p.

HUBERT 1959

Hubert J. - Evolution de la topographie et de l'aspect des villes de Gaule du Ve au Xe siècle, *la citta nell'alto medioevo*, 6: 529-558.

HUDSON 1981

Hudson P. - *Archeologia urbana e programmazione della ricerca : l'esempio di Pavia*, Florence,

HUGHES 1976

Hughes M. - *The small towns of Hampshire : the archaeological and historical implications of development*, Winchester.

JAFFROT *en cours*

Jaffrot E. - *Recherche sur la relation entre l'usage du sol et l'état de conservation du matériau céramique (du 1er au 10è s.). Application au site de la ville de Tours.*, dir. H. Galinié, Université de Tours.

JESSET, CHIMIER 2000

Jesset S., Chimier J.-P. - *Tours, 60 rue Marceau (site 65)*, DFS de fouille d'évaluation archéologique,

JOLY 1979

Joly D. - *Les archives du sol à Chartres, avenir et archéologie de la ville*, Mémoire de maîtrise. Université de Paris I.

JOUQUAND 1996

Jouquand A.- M. - *La fouille des abords de la cathédrale de Tours, place François-Sicard*, SRA Centre.

JOUQUAND 2000

Jouquand A.- M. - *Tours, 2Ter rue de Lucé (site 66)*, rapport d'évaluation archéologique.

JOUQUAND *et al.* 2002

Jouquand A.- M. *et al.* - *Le temple antique de Tours (site 48)*, Centre Dramatique Régional, rue E. Zola, DFS de fouille archéologique préventive, SRA Orléans.

KHOLER, PARKER 1986

Kholer T.A., Parker S.C. - Predictive models for archaeological resource location, *in: Advances in archeological model and theory*, 9, New York, Academic Press: 397-452.

KRIER 2004

Krier V. - *La plaine alluviale de l'Oise. Milieu et système fluvial*, Service départemental d'archéologie, CD-Rom.

KRIGE 1951

Krige D.G. - A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand, *Journal of Chem., Metal. and Minning Soc. of South Africa*, 52: 119-139.

KVAMME, KENNETH 1985

Kvamme K.L., Kenneth P. - Determining empirical relationships between the natural environment and prehistoric site locations : a hunter-gatherer example, *in: Carr R., For concordance in archaeological analysis*, University of Arkansas, Westport Publishers: 208-237.

LABRUYÈRE 2002

Labruyère G. - "*Géotouraine*", <http://gerard.labruyere.club.fr/geo/tours.html>.

LAGADIC 1999

Lagadic V. - *Les îles de la Loire à Tours aux XIVe-XVe s.*, mémoire de maîtrise (dir. J. Burnouf), Université Tours.

LANGLAIS 1990

Langlais V. - *Estiamtion sous contraintes d'inégalités*, Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris.

LAURENT 2002

Laurent A. - *Application du pénétromètre dynamique de type PANDA en archéologie urbaine : l'exemple du site de Saint-Julien à Tours*, mémoire de maîtrise d'archéologie (dir. H.Galinié et D. Breysse), Université de Tours.

LAURENT 2003

Laurent A. - *Méthodes et techniques de l'évaluation du potentiel archéologique du sol des villes (France, Europe du Nord)*, mémoire de DEA Villes et Territoires, mention Archéologie, sous la direction d'H. Galinié et D. Breysse, Université de Tours.

LAURENT 2006

Laurent A. - Un outil de prospection géotechnique en milieu urbain : le PANDA (Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur), *in: Dabas M., La prospection*, Errance, "collections archéologiques".

LAURENT 2007 (sous presse)

Laurent A. - *Prospekcja geotechniczna za pomoca PANDA (Automatycznego Dynamicznego Penetrometru Cyfrowego sterowanego komputerowo)*, *in: Buko, A., Zespół wiezowy w Stolpiu, Badania 2003-2005.*, Varsovie.

LAVEDAN 1960

Lavedan P. - *Les villes françaises*, éd. Vincent, Créal et Cie, 236 p.

LE GOFF 1989

Le Goff J. - *La ville médiévale et le temps*, Villes, bonnes villes, cités et capitales, mélanges offerts à B. Chevalier, Publication de l'Université de Tours, 325-392.

LE GOFF 1998

Le Goff J. dir. - *La ville en France au Moyen Age*, (1ère édition 1980), vol.2, coll. Histoire de la France urbaine, Seuil, Points histoire.

LE MER 2003

Le Mer R. - *Rapport interne sur les objectifs de la constitution d'une base de données à partir des données des Balmes*, Service Archéologique municipal, Lyon, 20p.

LEBART, MORINEAU, PIRON 2000

Lebart L., Morineau A., Piron M. - *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, 2e et 3e cycles, 3e édition, Dunod, 439 p.

LEFEBVRE 2006

Lefebvre B. - Construction et déconstruction de l'espace urbain : une modélisation en volume du bâti ancien, *MIA Journal*, vol. 0, n°2: <http://www.map.archi.fr/mia/journal/>.

LELONG 1976

Lelong C. - Le tertre de Saint-Martin et l'évolution du sol de Tours, 91: 441-450.

LEPETIT, PUMAIN 1993

Lepetit B., Pumain D. - *Temporalités urbaines*, Anthropos, coll. " Villes ", Economica, 317 p.

LES CLEFS DU SOL 1976

Les Clefs Du Sol - A propos d'archéologie urbaine à Tours, 2, *Bulletin du L.A.U.*: 19-25.

LEUCCI, NEGRI 2006

Leucci G., Negri S. - Use of ground penetrating radar to map subsurface archaeological features in an urban area, *Journal of Archaeological Science*, 33: 502-512.

LÉVY 1999

Lévy J. - Le tournant géographique. Penser l'espace pour lire le monde, coll. *Mappemonde*.

LHÉRITIER 1922

Lhéritier M. - Tours, ses fonctions urbaines.

LORANS 2002

Lorans E. - Evaluation et recherche archéologique à Tours (1973-1999), in: GELICHI 2002: 59-67.

LORANS 2004

Lorans E. - *Le site de l'abbaye de MArmoutier (Tours, Indre-et-Loire), rapport 2004 et programme 2005*.

LORANS 2005

Lorans E. - *Le site de l'abbaye de MArmoutier (Tours, Indre-et-Loire), rapport 2005 et projet 2006-2008*.

LUSSAULT 1993

Lussault M. - *Tours : images de la ville et politique urbaine*, 3, coll. Sciences de la ville, 415 p.

MABIRE-LA-CAILLE 1988

Mabire-La-Caille - *L'évolution topographique de la cité de Tours des origines jusqu'au 18è siècle*, 3 t., thèse d'histoire, Université de Tours.

MACAIRE 1981

Macaire J.-J. - *Contribution à l'étude géologique et paléopédologique du Quaternaire dans le Sud-Ouest du bassin de Paris (Touraine et ses abords)*, thèse Université tours, 303p.

MACAIRE, MIGNOT 1979

Macaire J.-J., Mignot Y. - Sur la présence de failles sous l'agglomération de Tours, *Bulletin BRGM*, I - 3: 191-196.

MACPHAIL 1994

Macphail R.I. - The reworking of urban stratigraphy by human and natural processes, *in*: HALL A.R., *Urban-rural connexions : perspectives from environmental archaeology*.

MACPHAIL 2003

Macphail R.I. - *St. Julien, Tours (2002) : soil micromorphology, chemistry and magnetic susceptibility - note on preliminary interpretations*.

MACPHAIL, GALINIÉ, VERHAEGHE 2003

Macphail R.I., Galinié H., Verhaeghe F. - A future for dark earth ?, *Antiquity*, 77: 349-358.

MAGNAN *et al.* 1986

Magnan D. *et al.* - *Expériences d'informatisation en archéologie urbaine : Actes de la table ronde de Tours des 21 et 22 Novembre 1985* /, SRA Aquitaine.

MAGNAN 1989

Magnan D. - L'inventaire archéologique informatisé en France, dans la perspective de l'aménagement, *in*: BRULET 1989: 70-78.

MAGNAN 1982

Magnan J.P. - *Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols*, Paris, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.

MALOCHET 2000

Malochet M. - *Evolution topographique de l'abbaye de Saint-Julien de Tours du XIe au XIXe siècle*, mémoire de maîtrise d'Histoire de l'Art du Moyen Age, Université de Tours, 2 vol. dactyl.

MAQUAIRE *et al.* 2002

Maquaire O. *et al.* - Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes noires de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France), *C.R. Géoscience*, 334: 835-841.

MARLET 2000

Marlet O. - *Les paléochenaux dans la plaine alluviale de Tours du tardiglaciaire à aujourd'hui. Intégrations des données archéologiques*, Maîtrise d'archéologie (dir. J. Burnouf), 47 p.

MARMET, BEST, TABBAGH 2002

Marmet E., Best C., Tabbagh A. - Prospection systématique par sondages à la pelle mécanique : limites liées à la probabilité de découverte de sites archéologiques, *Revue d'Archéométrie*, 26: 11-22.

MAROT, MARLET 2005

Marot E., Marlet O. - *La fouille des abords de la pile, Cinq-Mars-La-Pile, Indre-et-Loire, rapport de fouilles*, Conseil Général d'Indre-et-Loire.

MARTINAUD 2004

Martinaud M. - Méthodes de détection non destructives pour le diagnostic en milieu urbain, *in*: CNAU, *Diagnostiques archéologiques en milieu urbain : objectifs, méthodes, résultats, Actes de la table ronde (SDA, CNAU), 6-7 Octobre 2003*, Tours: 97-109.

MARTINAUD *et al.* 1999

Martinaud M. *et al.* - Sur l'intégration de résultats géophysiques avec des résultats de sondages mécaniques ponctuels, *Revue d'Archéométrie*, 23: 33-47.

MATARASSO 2000

Matarasso P. - Conceptions du temps et modélisations : l'apport récent des modèles intégrés planétaires du changement global, temps des phénomènes et temps de la décision, *in*: Barrué-Pastor, M., Bertrand, G., *Les temps de l'environnement*, Toulouse, Presses Universitaires du Mirail: 177-188.

MATHERON 1970

Matheron G. - *La théorie des variables régionalisées et ses applications*, Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Paris.

MESQUI 1992

Mesqui J. - Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain, compte rendu, *Bulletin monumental*, T 150-I.

MINIVIELLE, SOUIAH 2003

Minivielle E., Souiah S.A. - *L'analyse statistique et spatiale, (Statistiques, cartographie, Télédétection, SIG)*, Nantes, Editions du Temps.

MONIN, LASCOUX 2005

Monin M., Lascoux J.-P. - *Rapport de diagnostic archéologique, 28 rue du Chapeau Rouge*, SAM Lyon.

MONNOYEUR-ROUSSEL *et al.* 1992

Monnoyeur-Roussel V. *et al.* - *Lyon, Ilot Clément V, Rapport de fouille de sauvetage*, Service Archéologique Municipal et SRA Rhône-Alpes, Lyon.

MORINEAU, ALUJA-BANET 1998

Morineau A., Aluja-Banet T. - *Analyse en composantes principales (avec illustrations SPAD)*, Decisia.

MOUSSOUTEGUY 2002

Moussouteguy N. - *Utilisation combinée des essais pressiométriques et diagraphies instantanées pour mieux évaluer le risque géotechnique en reconnaissance des sols*, mémoire de thèse (dir. D. Breyse), Université Bordeaux 1, CDGA.

NEURY, SEIGNE 2003

Neury P., Seigne J. - Deux ponts antiques (?) à Tours, *R.A.C.F.*, 42: 227-234.

NOIZET 2003

Noizet H. - *Pratiques spatiales, représentations de la ville et fabrique urbaine de Tours : chanoines, moines et laïcs à Saint-Martin et Saint-Julien*, thèse de doctorat dirigée par H. Galinié, 3 vol. Université de Tours.

NOIZET, CARCAUD, GARCIN 2004

Noizet H., Carcaud N., Garcin M. - Rive droite rive gauche : la Loire et Tours (XIIIe-XVe siècles), *in*: Burnouf J., Leveau P., *Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture*.

ORTALLI 2002

Ortalli J. - Ricerca e tutela in Emilia Romagna : dall'archologia preventiva alla cartografia di pianificazione, *in*: GELICHI 2002: 25-30.

ORTON 2000

Orton C. - *Sampling in archaeology*, 284p.

OXLEY 2002

Oxley J. - The managment of archaeological deposits in York, *in*: GELICHI 2002: 87-92.

PANISSOD, DABAS 1999

Panissod C., Dabas M. - La reconnaissance des sols historiques urbains par méthodes géophysiques, *Histoire et mesure*, XIV-3/4: 221-248.

PANNATIER 1996

Pannatier Y. - *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*, New-York, Springer-Verlag.

PELLETIER, ROSSIAUD 1990

Pelletier A., Rossiaud J. - *Histoire de Lyon, Antiquité et Moyen Age*, editions Horvath, 475p.

PELLETIER, DELFANTE 2000

Pelletier J., Delfante Ch. - *Villes et urbanisme dans le monde*, Paris, coll. U " Initiation aux études de géographie ", Armand Colin, 199 p.

PENN 1980

Penn K.-J. - *Historic Towns in Dorset*, Dorchester.

PETITFRÈRE 1998

Petitfrère C. - Une ville mise en scène : Tours d'après l'iconographie générale des XVIe-XVIIIe siècles, *in*: Petifère, C., *Images et imaginaires de la ville à l'époque moderne*, vol.15, Tours, Collection Sciences de la ville, MSV - Université Tours: 175-210.

PHILIPPONAT, HUBERT

Philipponat G., Hubert B. - *Fondations et ouvrages en terre*, Paris, Eyrolles, 548 p.

PIÉTRI 1983

Piétri L. - *La Ville de Tours du 4e au 6e siècle : naissance d'une cité chrétienne*, Rome, Ecole Française de Rome, 69.

PIÉTRI, BIARNE 1987

Piétri L., Biarne J. - Province ecclésiastique de Tours (Lugdunensis Tertia), vol. V, *in*: Gauthier N., Picard J.-Ch. dir., *Topographie chrétienne des cites de la Gaule des origines au milieu du VIIIe siècle*, De Boccard.

PINOL *et al.* 1996

Pinol J.-L. *et al.* - *Atlas historique des villes de France*, Paris, Hachette, 336 p.

PIROT, VARET-VITU 2004

Pirot F., Varet-Vitu A. - Introduction (SIG), *in*: HISTOIRE & MESURE 2004: 219-222.

POUPET, HARFOUCHE 2002

Poupet P., Harfouche R. - *Approche pédologique des Terres Noires, Tours Saint-Julien*.

PRICE, HUNTER, MCMICHAEL 1964

Price J.C., Hunter R.G., Mcmichael E. V. - Core drilling in an Archaeological Site, *American Antiquity*, 30: 219-222.

PROVOST 1988-2001

Provost M. dir. - *Carte archéologique de la Gaule*, Paris, Académie et Belles-Lettres.

PUMAIN 1993

Pumain D. - L'espace, le temps et la matérialité des villes, *in*: LEPETIT, PUMAIN 1993: 135-157.

PUMAIN, SAINT-JULIEN 1997

Pumain D., Saint-Julien T. - *L'analyse spatiale T.I Localisations dans l'espace*, Paris, Cursus, Armand Colin.

PUMAIN, SAINT-JULIEN 2001

Pumain D., Saint-Julien T. - *Les interactions spatiales*, Paris, Cursus, Armand Colin.

RANDOIN 1987

Randoin B. - *Enregistrements des données de fouilles urbaines*, 1ère partie, Tours, 99 p.

RICHARD 1987

Richard G. - L'apport de la préhistoire à la géologie de la vallée de la Loire orléanaise. Etat de la question en 1987, *Bull. Ann. Nat.Orl.Loire moy.*, 6: 53-73.

ROBERT *et al.* 2001

Robert S. *et al.* - Archéologues et aménageurs un partenariat pour demain, Colloque, 5-6 février 2002, musée des Beaux-Arts de Lyon, *Nouvelles de l'archéologie*, 86: 12-16.

ROBERTSON, WRIDE 1998

Robertson P.K., Wride C.E. - Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 442-459.

RODIER 1994a

Rodier X. - Evaluation du potentiel archéologique de Tours à partir de deux exemples récents, *Nouvelles de l'archéologie*, 55: 20-25.

RODIER 1994b

Rodier X. - *Evaluation du potentiel archéologique de Tours, les exemples récents*, Mémoire de DEA d'archéologie, Université de Tours, 58 p.

RODIER 1994c

Rodier X. - *Tours, Rapport diagnostic du site 032, 3 rue Gambetta*, 16p.

RODIER 2000

Rodier X. - Le système d'information géographique TOTOPI: Topographie de Tours Pré-Industriel, 22/12/2000, 28600 signes, 5 fig., *Les petits cahiers d'Anatole*, 4: [http://www.univ-tours.fr/lat/Pages/F2\\_4.html](http://www.univ-tours.fr/lat/Pages/F2_4.html).

RODIER 2006

Rodier X. - L'archéologue et la carte, *Mappemonde*, 83: 8p., <http://www.mgm.fr/PUB/Mappemonde/MappeSom.html>.

RODIER, GALINIÉ 2006

Rodier X., Galinié H. - Figurer l'espace/temps de Tours pré-industriel : essai de chrono-chorématique urbaine, *Mappemonde*, 83.

RODIER, SALIGNY 2007

Rodier X., Saligny L. - *Modélisation des objets urbains pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée*, Actes du colloque international de géomatique et d'analyse spatiale SAGEO 2007, Clermont-Ferrand 18-19 juin 2007, 24p.

RODWELL 1975

Rodwell K. - *Historic Towns in Oxfordshire : a survey of the new county*, Oxford.

ROLLIER 1994

Rollier G. - *Document d'évaluation du patrimoine archéologique urbain : Cluny*, Tours, 112p.

SAINT-GÉRAND 2005

Saint-Gérard T. - Comprendre pour mesurer...ou mesurer pour comprendre?, in: GUERMOND (dir.), *Modélisations en géographie, déterminismes et complexités*, ed. Hermès: 261-297.

SANDERS 1993

Sanders L. - Modèles de la dynamique urbaine : une présentation critique, in: LEPETIT, PUMAIN 1993: 3-41.

SANDJIVY 2003

Sandjivy L. - Procédé pour la détermination d'un indice de qualité spatiale de données regionalisées, *Demande de Brevet Européen, publié le 03/09/2003, <http://gauss.ffii.org/PatentView/EP1341094>, n° EP1341094.*

SARFATIJ, MELLI 1999

Sarfati H., Melli P. - L'archéologie de la ville, in: *Rapport sur la situation de l'archéologie urbaine en France*, éditions du Conseil de l'Europe: 13-15.

SCHIFFER 1987

Schiffer M.B. - *Formation processes of Archaeological Record*, University of New Mexico Press, 428 p.

SCHIORRING 1988

Schiorring O. - Das danische Stadt archaologische Projekt " Mittelalterstadt ", in: FEHRING 1988: 143-151.

SCHWIEN 2003

Schwie J.-J. - L'évaluation en milieu urbain, l'exemple de Besançon, *Nouvelles de l'Archéologie*, 91: 40-45.

SEIGNE 2001

Seigne J. - Un pont (?) antique (?), *R.A.C.F.*, 40: 287-290.

SERIER 2002

Serier L. - *Une ville et son fleuve : l'exemple de Tours au XVIIIe siècle*, mémoire de maîtrise (dir. B. Maillard), Université Tours.

STEIN 1986

Stein J.K. - Coring archaeological sites, *American Antiquity*, 51/3: 505-527.

TABBAGH 2002

Tabbagh A. - Un outil de reconnaissance géophysique en milieu urbain : la prospection électrostatique, *Revue Française de Géotechnique*, 101: 3-10.

TABERLY 1999

Taberly Ch. - *Interprétation lithostratigraphique sur la fenêtre de Tours. Intégration des données géologiques, palynologiques et archéologiques*, 2 vol., Maîtrise de Géographie sous la direction de Carcaud N., Université d'Angers, 103 p.

TALIN D'EYZAC 1998

Talin D'eyzac S. - *Tours, 27 Bd Béranger (site 60)*, Rapport de diagnostic archéologique.

TERRES NOIRES 2000

Terres Noires - 1, Documents Sciences de la ville n° 6, MSH.

THÉRIAULT, CLARAMUNT 1999

Thériault M., Claramunt C. - La représentation du temps et des processus dans les SIG : une nécessité pour la recherche interdisciplinaire, *Revue internationale de géomatique*, 9: 67-99.

THÉRY 1990

Théry H. - Chrono-chorèmes et paléochorèmes : la dimension temporelle dans la modélisation graphique, in: André Y. *et al.*, *Modèles graphiques et représentations spatiales*, Paris/Montpellier, Anthropos/reclus: 41-61.

THEUREAU 1992

Theureau C. - *Tours, site 025, 17 rue des Ursulines*, Compte-rendu sur les sondages effectués le 3 mars 1992, Tours.

THIERRY 2003

Thierry P. - *La cartographie préventive de l'aléa mouvements de terrain en zone urbaine : réalisation sur le Grand Lyon et approches nouvelles*, SIRNAT-JPRN, Orléans, 7p.

THIESSON, TABBAGH 2005

Thiesson J., Tabbagh A. - *Rapport sur la prospection géophysique sur le site de Stolpie (Pologne)- ACI TTT*, rapport interne.

THIVET *et al.* 2005

Thivet M. *et al.* - Mise en place d'un SIG appliqué à la reconnaissance de l'agglomération antique d'Epomanduodurum (Mandeure, Mathay, Doubs), in: BERGER J.F., BERTONCELLO F., BRAEMER F.: 393-398.

TISSOT *et al.* 2005

Tissot C. *et al.* - Modélisation spatio-temporelle d'activités humaines à fort impact environnemental, *Cybergeo*, 313: 15 p.

TO, KAY 2005

To J., Kay B.D. - Variation in penetrometer resistance with soil properties : the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions, *Geoderma*, 126: 261-276.

TROADEC 2001

Troadec J. - *Recherche urbaine et archéologie préventive. Evaluation d'un patrimoine archéologique : l'îlot de l'hôtel-Dieu à Bourges*, Bourges.

USSEGLIO-POLATERA 1980

Usseglio-Polatera J.M. - *Contribution à la cartographie géotechnique de la ville de Paris. Etude de la ville de Belleville (XIXe et Xxe arrondissements)*, Thèse Paris I-ENS des Mines de Paris, 271 p.

UZIELLI 2004

Uzielli M. - *Variability of stress-normalized CPT measurements and application to seismic liquefaction initiation assessment*, Université de Firenze, thèse de doctorat en génie civil, Firenze, 532.

UZIELLI, VANNUCCHI, PHOON 2005

Uzielli M., Vannucchi G., Phoon K.-K. - Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters, *Géotechnique*, 55: 3-20.

VAN DER LEEW, FAVORY, FICHES 2003

Van Der Leew S., Favory F., Fiches J.-L. dir. - *Archéologie et systèmes socio-environnementaux*, 27, CNRS éditions, coll."CRA Monographie", 408p.

VAN ES 1982

Van Es W.Z. - *Het bodemarcheif bedreig : archeologie en planologie in de binnensteden van Nederland*, Amersfoort.

VANNIER 1999

Vannier R. - *La ville de Tours et la Loire à la fin du Moyen Age : les digues de Tours*, mémoire de maîtrise (dir. J. Burnouf), Université Tours.

VERHAEGHE 1992

Verhaeghe F. - Documents d'évaluation du patrimoine archéologique urbain, compte rendu, *Archéologie médiévale*, 22: 561-566.

VERHAEGHE 1994

Verhaeghe F. - L'archéologie urbaine dans les pays de l'Europe de nord, évolutions récentes, *Nouvelles de l'archéologie*, 55: 46-50.

VERHAGEN 1995

Verhagen P. - La carte du potentiel archéologique en Hollande : une méthode de prédiction fondée sur les données de l'archéologie et du paysage, *Nouvelles de l'archéologie*, 61: 34-39.

VERHAGEN 2005

Verhagen P. - A review of predictive modelling for archaeological heritage management in the Netherlands, *in*: BERGER J.F., BERTONCELLO F., BRAEMER F: 83-92.

VERHAGEN 2007

Verhagen P. - *Case studies in archaeological predictive modelling*, Leiden University Press, 223p.

VÉROT-BOURRÉLY 2001

Vérot-Bourrély A. - Place Benoît Crépu (Lyon, 5e), Evaluation archéologique complémentaire du projet parking Saint-Georges par l'étude géo-archéologique des sondages géotechniques carottés, *DFS*: 38.

VERSLYPE, BRULET (dir.) 2004

Verslype L., Brulet R. (dir.) - *Terres Noires, Dark earth*, Actes de la table-ronde internationale tenue à Louvain-la-Neuve, les 09 et 10 décembre 2001, Louvain-la-Neuve, 187p.

VILLEDIEU 1990

Villedieu F. - Lyon, Saint-Jean, les fouilles de l'avenue Adolphe Max, *DARA*, 3.

VILLES SUEDOISES 1976-1985

*76 fascicules parus*, Medeltidsstaten des Rijkantkvarieambetet och Statens Historika Musser Rapporter.

WARREN 1990a

Warren R.E. - Predictive modelling in archaeology : a primer, *in*: ALLEN, GREEN, ZUBROW 1990: 90-111.

WARREN 1990b

Warren R.E. - Predictive modelling of archaeological site location : a case study in the Midwest, *in*: ALLEN, GREEN, ZUBROW 1990: 201-215.

WEATHLEY, GILLINGS 2002

Weathley D., Gillings M. - *Spatial technology and archaeology, the archaeological application of GIS*, ed. Taylor & Francis, 269p.

WHALLON 1973

Whallon R. - Spatial analysis of occupation floors : application of dimensional analysis of variance, *American Antiquity*, 38: 266-278.

WHALLON 1974

Whallon R. - Spatial analysis of occupation floors : the application of nearest neighbour analysis, *American Antiquity*, 39: 16-34.

YULE 1990

Yule B. - The "dark earth" and late Roman London, *Antiquity*, 64: 620-628.

ZADORA-RIO 2006

Zadora-Rio E. dir. - *PCR Atlas archéologique de Touraine, rapport d'activité 2006 et programme 2007-2009*, LAT - UMR 6173 CITERES, Tours.

ZANINETTI 2005

Zaninetti J.-M. - *Statistique spatiale, méthodes et applications géomatiques*, Paris, Hermes sciences, 321 p.

## Résumé

La connaissance de l'étendue et de l'épaisseur du sol archéologique des villes constitue une information déterminante pour l'appréciation de l'état des connaissances scientifiques, pour l'estimation de l'intensité et du mode d'usage du sol et pour la définition de stratégies de recherche. Par ailleurs, il est nécessaire de développer des méthodes d'évaluation adaptées à la politique actuelle de patrimonialisation pour une rentabilité autant scientifique que financière.

La thèse vise à répondre aux questions historiques concernant les villes par l'évaluation du potentiel informatif des données disponibles aux archéologues. Elle consiste à appréhender les modalités de formation de l'espace urbain et des composantes socio-spatiales à travers les caractéristiques du sol urbain produit par les activités humaines. Les analyses ont porté notamment sur l'estimation de l'épaisseur du volume de sol urbain et son découpage en tranches fonctionnelles distinctes pour la ville de Tours et des sites de comparaison.

Le croisement de la vision de l'archéologue et de celle du géotechnicien permet de proposer des modèles sur la production de stratification (carte des épaisseurs du dépôt archéologique) et des méthodes pour modéliser l'hétérogénéité du dépôt. Les résultats révèlent qu'un maillage théorique de 100 mètres est satisfaisant pour saisir les variations de l'épaisseur du dépôt. Dans la dimension verticale, l'échelle d'analyse adaptée à la distinction de zones dite « homogènes » est de l'ordre de 10 – 25 cm.

A l'échelle d'un site, un référentiel archéologico-mécanique a été établi pour des sites de Tours et de Lyon. L'étude démontre que l'emploi du pénétromètre PANDA est en mesure d'améliorer la caractérisation du dépôt archéologique. L'élaboration d'un référentiel commun à un ensemble de sites est un enjeu à moyen terme, qui permettra la valorisation de ces avancées.

Mots-clés : archéologie urbaine, sol urbain, évaluation du potentiel archéologique, géotechnique

## Abstract

Knowing the extense and thickness of cities' archaeological soil is crucial information in order to assess scientific knowledge, to value the intensity and use of the soil and to define strategies for research. Moreover, it is necessary to develop assessing methods suitable for the present heritage policy, aiming both at scientific and financial profitability.

This thesis aims at answering historical questions regarding cities, by assessing the informative potential of data available to archaeologists. It consists in grasping the means of formation of the urban space and socio-spatial elements, through the characteristics of the urban soil, resulting from human activities. More specifically, the analysis focused on assessing the thickness of the volume of the urban soil and its division into distinct functional layers, in the city of Tours and sites of comparison.

The crossroads between the vision of the archaeologist and that of the geotechnician enables the setting up of models on the production of stratification (maps charting the thickness of the archaeological deposit) and methods to model the heterogeneity of the deposit. Results have revealed that a theoretical 100-m<sup>2</sup> grid is enough to understand variations in the thickness of the deposit. Vertically, the scale of analysis necessary to distinguish the so-called "homogeneous" zones is roughly 10 – 25 cm.

On the scale of a site, an archaeologico-mechanical referential frame has been established for sites in Tours and Lyons. The study shows that the use of the PANDA penetrometer is capable of improving the characterization of the archeological deposit. The elaboration of a common referential frame for a group of sites is, in the medium term, an issue which will allow the promotion of these advances.