

---

## Évolution morphologique et sédimentaire de la plaine alluviale d'un espace urbanisé (Tours, Indre-et-Loire, France)

*Morphological and sedimentary evolution of a floodplain in an urban area (Tours, Indre-et-Loire, France)*

Eymeric Morin, Xavier Rodier, Amélie Laurent-Dehecq et Jean-Jacques Macaire

---



### Édition électronique

URL : <http://racf.revues.org/1985>  
ISSN : 1951-6207

### Éditeur

Fédération pour l'édition de la Revue archéologique du centre de la France (FERACF)

### Édition imprimée

Pagination : 367-400  
ISSN : 0220-6617

### Référence électronique

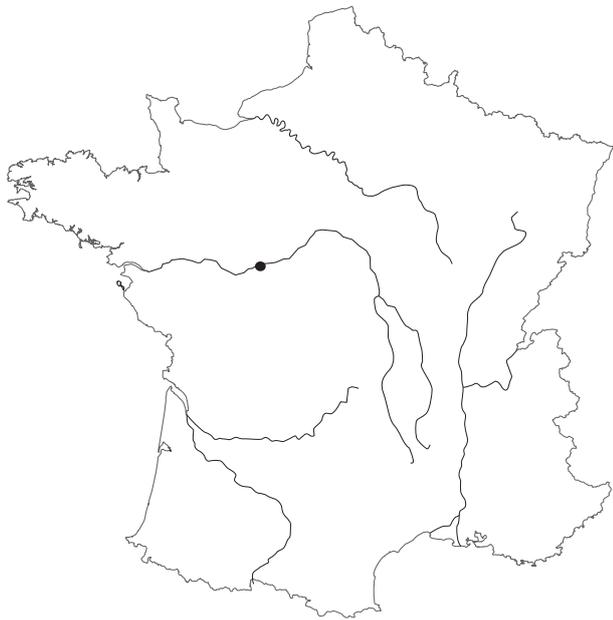
Eymeric Morin, Xavier Rodier, Amélie Laurent-Dehecq et Jean-Jacques Macaire, « Évolution morphologique et sédimentaire de la plaine alluviale d'un espace urbanisé (Tours, Indre-et-Loire, France) », *Revue archéologique du Centre de la France* [En ligne], Tome 52 | 2013, mis en ligne le 31 décembre 2013, consulté le 02 octobre 2016. URL : <http://racf.revues.org/1985>

---

Ce document est un fac-similé de l'édition imprimée.



Les contenus de la *Revue archéologique du centre de la France* sont disponibles selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.



Eymeric MORIN\*, Xavier RODIER\*, Amélie LAURENT-DEHECO\*, \*\* et Jean-Jacques MACAIRE\*\*\*

## Évolution morphologique et sédimentaire de la plaine alluviale d'un espace urbanisé (Tours, Indre-et-Loire, France)

*MORPHOLOGICAL AND SEDIMENTARY EVOLUTION OF A FLOODPLAIN IN AN URBAN AREA (TOURS, INDRE-ET-LOIRE, FRANCE)*

**Mots-clés :** Géomorphologie, archéologie urbaine, plaine alluviale, Loire, Cher, Tours, géostatistique.

**Keywords:** *Geomorphology, urban archaeology, alluvial plain, city of Tours, River Loire, Cher river, geostatistics.*

**Résumé :** Les zones urbaines situées dans les plaines alluviales offrent un grand potentiel géo-archéologique pour la compréhension de la dynamique fluviale dans la longue durée et ses relations avec l'occupation du sol en contexte anthropisé, car elles permettent d'exploiter des très nombreuses données de sondages du sous-sol. Dans la plaine alluviale de Tours, partagée par la Loire et le Cher, les relations sociétés/milieus font l'objet de travaux interdisciplinaires autour d'un programme de recherches archéologiques initié à la fin des années 1960. Une base de données sédimentaires comprenant 1309 sondages a été constituée puis exploitée dans un système d'information géographique pour produire des modèles géostatistiques et géomorphologiques. La stratigraphie et la chronologie du remplissage alluvial ont également été étudiées avec des sondages et des datations  $^{14}\text{C}$  et OSL obtenues à l'occasion d'opérations archéologiques. Les résultats croisés permettent une lecture renouvelée de l'évolution morphologique de la plaine alluviale tourangelle du Weichsélien à nos jours.

\* UMR 7324 CITERES Laboratoire Archéologie et Territoires, Université François-Rabelais/CNRS –Tours, MSH Val-de-Loire, 33, Allée Ferdinand de Lesseps, BP 60449, 37204 Tours, France.

\*\* Service Archéologique Départemental du Loiret, Cité administrative Coligny, 131, rue du Faubourg Banner, 45042 Orléans, France.

\*\*\* EA 6293 Géo-Hydrosystèmes Continentaux (GéHCO), Université François-Rabelais de Tours, UFR Sciences et Techniques, Parc de Grandmont, 37200 Tours, France.

**Abstract:** *Urban areas located in floodplains offer a great geo-archaeological potential for the comprehension of fluvial dynamics on long term and its relationship with land occupation, as they allow exploiting many survey data of the basement. In the floodplain of Tours, shared by the River Loire and Cher river, relations between human societies and environment are the subject of an interdisciplinary work within the frame of an archaeological program initiated in the late 1960's. A sedimentary database including 1309 surveys has been created then exploited in a geographic information system to produce geomorphological and geostatistical models. The stratigraphy and chronology of the alluvial filling were also studied with surveys and <sup>14</sup>C and OSL dating obtained in the course of archaeological prospections. The combined results provide a new reading of the morphological evolution of the floodplain of Tours from the Weichselian to nowadays.*

## INTRODUCTION

### 1. LA ZONE D'ÉTUDE

- 1.1. Localisation et contexte géologique
- 1.2. État des connaissances sur la plaine alluviale tourangelle

### 2. MODÉLISATION DES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET SÉDIMENTAIRES DE LA PLAINE ALLUVIALE

- 2.1. Méthode
- 2.2. Modèles géostatistiques réalisés

### 3. STRATIGRAPHIE ET CHRONOLOGIE DU REMPLISSAGE ALLUVIAL

- 3.1. Chronologie de la mise en place des dépôts alluviaux
- 3.2. Stratigraphie et chronologie du remplissage alluvial dans l'espace urbanisé ancien

### 4. ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET SÉDIMENTAIRE DE LA PLAINE ALLUVIALE ET FACTEURS FORÇANT

- 4.1. Période weichsélienne
- 4.2. Période holocène avant les premières occupations humaines
- 4.3. Période holocène à partir des premières occupations humaines

## CONCLUSION

### ■ BIBLIOGRAPHIE

## INTRODUCTION

En contexte urbain, la reconnaissance de la géométrie des formations superficielles et des substrats géologiques situés sous les dépôts anthropiques, par la réalisation de cartes, de coupes ou de modèles, répond le plus souvent à des questionnements géotechniques (*e.g.* USSEGLIO-POLATERA 1980 ; STRANGE, BOOTH et ELLISON 1998 ; BOZZANO *et al.* 2000 ; ROYSE, REEVES et GIBSON 2008 ; MARACHE *et al.* 2009). Cette reconnaissance est aussi appliquée à l'archéologie, car elle permet de mieux appréhender le cadre géomorphologique des premières occupations humaines (BREYSSSE *et al.* 2002 ; GALINIÉ *et al.* 2003a ; DOMINIQUE, MARACHE et REGALDO-SAINT BLANCARD 2010). Les zones urbaines situées dans les plaines alluviales, comme Tours, permettent d'exploiter de très nombreuses données de sondages géologiques ou géotechniques et de fouilles archéologiques. Elles offrent ainsi un grand potentiel pour la compréhension de la dynamique morphologique et sédimentaire sur plusieurs millénaires, de ses contraintes sur l'occupation humaine et, réciproquement, des conséquences de l'urbanisation sur la dynamique de la plaine alluviale aux époques historiques (*e.g.* BRAVARD *et al.* 1997 ; PROVANSAL *et al.* 1999).

La découverte d'un établissement enclos du II<sup>e</sup> s. av. J.-C. (DE FILIPPO 2007), supposé vaste, pose la question d'antécédents gaulois à la ville romaine de Tours créée au tournant de notre ère, même si une solution de continuité ne paraît pas encore établie, car les témoins du I<sup>er</sup> s. av. J.-C. restent rares.

Néanmoins, il ne peut plus être exclu que la profondeur de ces vestiges soit une cause de leur méconnaissance (GALINIÉ 2007 : 17 ; RODIER, GALINIÉ et BRUNET 2010).

L'espace urbanisé ancien, situé en rive gauche de la Loire, a fait l'objet d'un programme de recherches archéologiques depuis plus de 40 ans et bénéficie ainsi d'une documentation archéologique abondante et robuste (GALINIÉ 2007). L'étude des relations sociétés/milieus a très tôt constitué l'un des volets de ce programme (DUBANT 1993 ; VIVENT 1998).

Cet article présente différents modèles restituant les caractéristiques géomorphologiques de la plaine alluviale tourangelle (altitude du toit des alluvions ou du substrat rocheux, épaisseur des alluvions ou des dépôts anthropiques, etc.)<sup>1</sup>. Ces modèles sont calculés à partir d'une base de données sédimentaires, selon une analyse géostatistique dans un système d'information géographique. Si les méthodes sont *a priori* éprouvées, la validité des modèles proposés repose sur un contrôle et une analyse fine des données et des interprétations selon une démarche interdisciplinaire. La répartition des datations <sup>14</sup>C et OSL dans la plaine alluviale et la stratigraphie des dépôts dans une partie de l'espace urbanisé ancien sont également présentées. Les différents résultats obtenus ont été confrontés afin de restituer les grands traits de l'évolution de la plaine alluviale tourangelle depuis le Pléistocène supérieur (Weichsélien), de mettre en évidence les facteurs forçant cette évolution et de souligner certaines caractéristiques des interactions sociétés/milieus, en précisant notamment le cadre physique et sa mise à profit par les premières occupations humaines.

1. Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet " Relations entre la dynamique de la Loire et du Cher et l'espace urbanisé tourangeau ", financé par l'Établissement Public Loire et le Fond européen de développement régional dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature 2007-2013. Ce projet s'inscrit dans la continuité de précédents programmes de recherche, initiés dans les années 1990, concernant les relations sociétés/milieus fluvial dans le bassin de la Loire et intégrant l'étude de la plaine alluviale tourangelle (BURNOUF *et al.* 1999 ; CARCAUD et GARCIN 2001). Il fait suite à de précédentes cartographies ou modélisations des caractéristiques géomorphologiques de la plaine alluviale à Tours (DUBANT 1993 : Pl. 17 ; BLIN 1998 ; TABERLY 1999 ; MARLET 2000 ; LAURENT 2007 : 338-353).

## 1. LA ZONE D'ÉTUDE

### 1.1. Localisation et contexte géologique

Le secteur étudié est situé dans le sud-ouest du Bassin parisien et correspond à un tronçon de plaine alluviale, long de 6,7 km et large de 4,5 km au maximum, partagé par la Loire moyenne au nord et le Cher au sud (Fig. 1). D'une superficie de 26,6 km<sup>2</sup>, cet espace urbain situé en fond de vallée est limité au nord et au sud par des coteaux assez abrupts constitués de calcaires et formations argilo-siliceuses du Crétacé supérieur (Turonien notamment) ou de calcaire lacustre éocène (Ludien) (Rasplus, Alcaydé et Desprez 1974). Le choix des bornes amont-aval du secteur étudié a été contraint par la densité des données existantes et la nécessité de prendre en compte une taille de tronçon suffisamment grande. Dans le fond de vallée, les altitudes actuelles s'échelonnent entre environ 40 m NGF, dans lit de la Loire à l'ouest de la zone d'étude, et 57 m NGF à l'emplacement de l'amphithéâtre antique de Tours (Fig. 1). Au sommet des coteaux, le front des plateaux alentours est situé entre 50 et 60 m au-dessus du fond de vallée actuel.

La largeur de la vallée est assez homogène (4 à 4,5 km) jusqu'en aval de Tours, en partie ouest de la zone d'étude, où elle diminue jusqu'à 2,7 km au niveau de la confluence avec la Choisille (Fig. 1). Ce rétrécissement est dû à la présence de calcaire éocène dans les versants, plus dur que les calcaires turoniens. Le calcaire éocène est descendu à la faveur de failles reconnues dans ce secteur (Fig. 1), d'orientation N 20° et à rejet vertical d'environ 50 m (MACAIRE et MIGNOT 1979). Le substrat rocheux en fond de vallée est en majeure partie représenté par les calcaires turoniens, excepté à la bordure ouest où il est constitué par le calcaire éocène.

### 1.2. État des connaissances sur la plaine alluviale tourangelle

Les études antérieures de la plaine alluviale tourangelle ont défini quelques grands traits des caractéristiques et de l'évolution morphologiques et sédimentaires de cet espace depuis le Weichsélien (CARCAUD *et al.* 2002 : 73 ; BURNOUF *et al.* 2003 : 167-168 ; CARCAUD, GARCIN et BURNOUF 2007) :

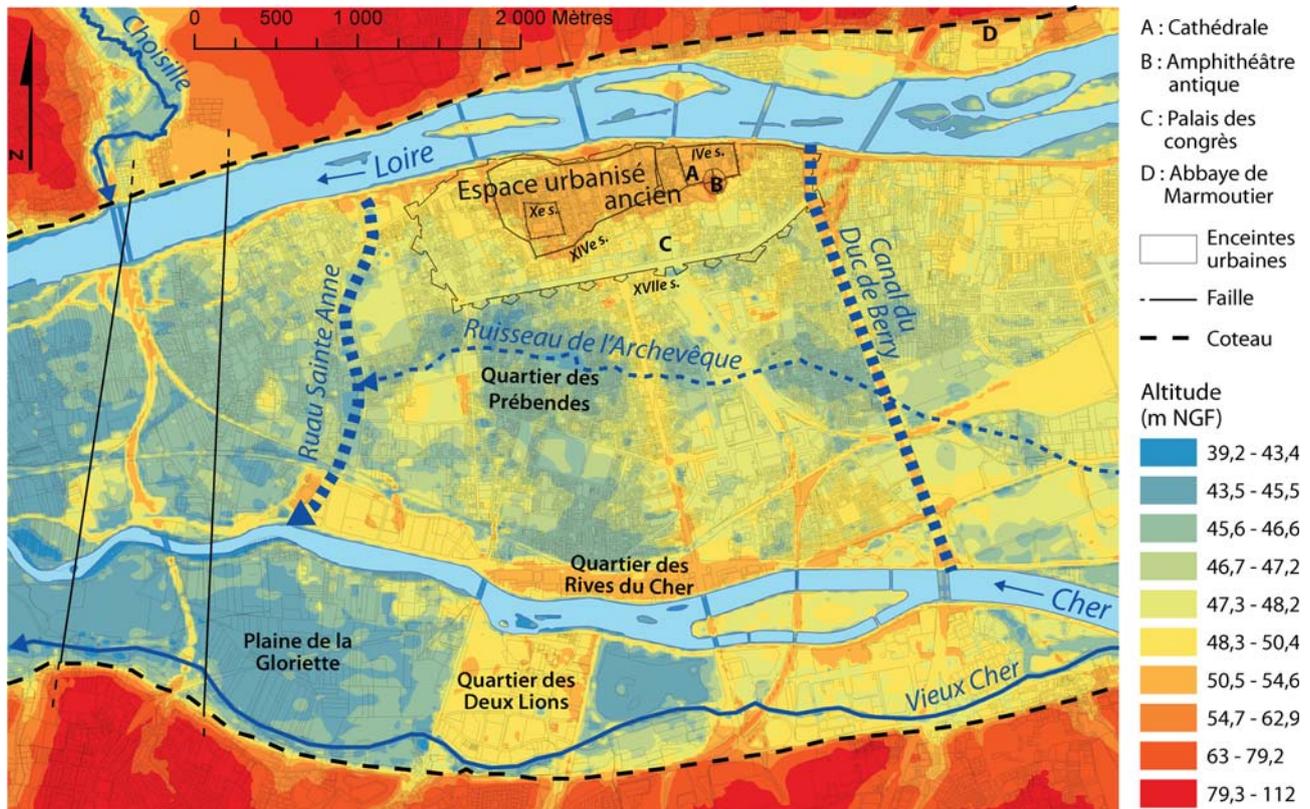


Fig. 1 : Modèle numérique des altitudes actuelles de la plaine alluviale de Tours.

- La dernière grande phase d'incision du substrat rocheux crétacé et éocène par la Loire a pu être attribuée au Weichsélien supérieur ou au dernier maximum glaciaire (Fig. 2).
- Après la dernière grande phase d'incision de la vallée et jusqu'au Tardiglaciaire (Fig. 2), une sédimentation essentiellement sablo-graveleuse semble s'être développée sur toute la largeur de la vallée avec un style fluvial en tresse à chenaux multiples.
- Durant la transition Tardiglaciaire-Holocène, La Loire et le Cher paraissent avoir évolué d'un système à chenaux multiples vers un système à chenal unique, leurs tracés se fixant partiellement et respectivement au nord et au sud de la plaine alluviale. Dans les chenaux abandonnés, une sédimentation plus fine et organique s'est développée dès le début de l'Holocène (VIVENT 1998).
- À Tours, le tracé de la Loire a légèrement fluctué au cours de l'Holocène, notamment par migration selon un axe nord-sud (GARDÈRE 2011 : Fig. 5). Le tracé du Cher pourrait avoir été re-

lativement stable en empruntant un talweg au sud de la plaine alluviale.

- À l'Holocène, une sédimentation plus fine de type plaine d'inondation s'est développée dans l'interfluve entre Loire et Cher, jusque lors des dernières crues historiques au XIX<sup>e</sup> s., et des levées naturelles (bourrelets de rives), percées par des couloirs de défluviations, ont pu se constituer en bordure des chenaux actifs.
- Les alluvions mises en place durant le Pléistocène supérieur et l'Holocène sont essentiellement sableuses, graveleuses et silto-argileuses ; cette dernière fraction granulométrique étant généralement relativement plus abondante dans les dépôts du Cher (BURNOUF et CARCAUD 2000 : 9).
- L'épaisseur des sédiments fluviaux semble varier d'environ 3-4 m dans le secteur de Saint-Pierre-des-Corps ou dans la plaine d'inondation du Cher, jusqu'à 7-8 m dans certains secteurs de Tours au nord de la plaine alluviale (BURGEAP 1993 : 2 ; BURNOUF et CARCAUD 2000 : 9).

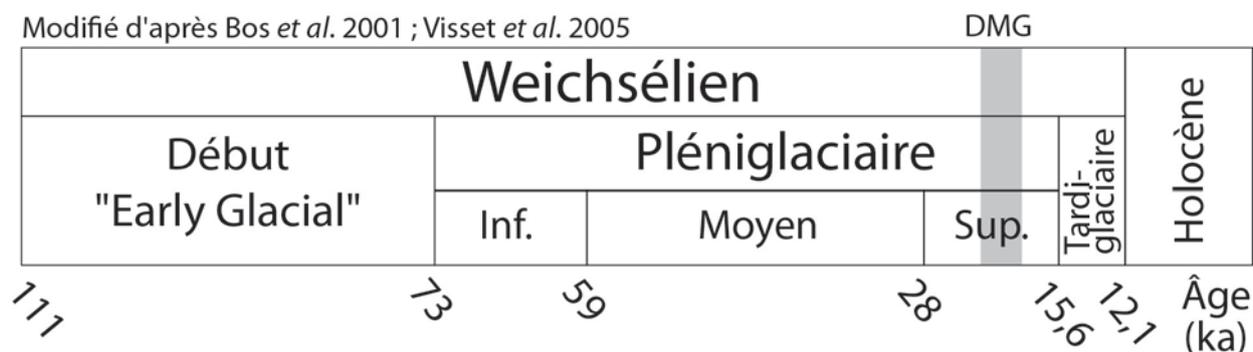


Fig. 2 : Chronostratigraphie du Quaternaire récent adapté à la Touraine (Weichsélien ante Tardiglaciaire d'après Bos *et al.* 2001 : fig. 5 ; Tardiglaciaire et Holocène d'après VISSET *et al.* 2005 : Tab. 2). Le dernier maximum glaciaire (DMG : -25-18 ka) est figuré en gris.

- En outre, dans l'espace urbanisé ancien, les recherches archéologiques menées sur de nombreuses fouilles ont mis en évidence différentes caractéristiques morphologiques :
- Il existe un bourrelet alluvial situé au niveau de la cathédrale (Fig. 1, A), isolant le lit mineur de la Loire au nord du reste de la plaine d'inondation au sud (Jouquand *et al.* 1999 : 15) et une montille<sup>2</sup> à l'emplacement de l'amphithéâtre antique (Fig. 1, B) (GAY-OVEJERO, MACAIRE et SEIGNE 2007).
- Des paléochenaux ont été identifiés (PHILIPPON 1948 ; DUBANT 1993 : 110-113 ; JESSET, JOUQUAND et MASSAT 1996 : 711 ; FOUILLET *et al.* 2002 : 28-29 ; DAVID *et al.* 2013 : 54-60). Les similarités dans la nature de leur comblement alluvial fin et organique, la proximité des fouilles et la chronologie univoque de mise en place initiale des dépôts datés (début de l'Holocène) ont suggéré que les opérations archéologiques avaient recoupé un même et unique paléochenal, dont le tracé passait dans l'emprise de l'espace urbanisé ancien (DUBANT 1993 : 118 ; TABERLY 1999 : 27 ; MARLET 2000 : 29).
- L'ensemble de la ville antique et médiévale s'apparente à un vaste plateau dont les microreliefs d'origine anthropique résultent des zones denses de peuplement et d'activité (GALINIÉ 1981 : 36). Les cartes (DUBANT 1993 : Pl. 17) et modèles géostatistiques (LAURENT 2007 : Pl. 132) ont confirmé que l'épaisseur des dépôts anthropiques était généralement plus forte

dans l'emprise de l'enceinte du XIV<sup>e</sup> s. (Fig. 1), et maximale au niveau de la berge en rive gauche actuelle de la Loire (jusqu'à 10 m).

Enfin, la plaine alluviale tourangelle constitue un hydrosystème anthropisé depuis deux millénaires, ce qui a fortement modifié les modalités de transit des flux hydrosédimentaires et l'évolution morphologique associée :

- La Loire a été fortement aménagée et exploitée aux périodes historiques, avec l'édification de ponts dès l'Antiquité (SEIGNE et NEURY 2007), de turcies dès le Haut Moyen-Âge, de levées et bateis<sup>3</sup> de dérivations dès le XV<sup>e</sup> s. (DURRENBERGER 1999 ; NOIZET, CARCAUD et GARCIN 2004 ; GARCIN *et al.* 2006 ; CHOPLIN 2011) et l'occupation des îles (LAGADIC 1999).
- De l'Antiquité à l'époque actuelle, l'espace urbain a gagné dans la Loire sur la rive sud. Ce gain est plus important dans la partie ouest de l'espace urbanisé ancien (environ 200 m) que dans sa partie est (environ 50 m) (GALINIÉ *et al.* 2003b).
- Le Cher a été aménagé de turcies dès la période médiévale, puis de levées à partir du XV<sup>e</sup> s. (BURNOUF et MAILLARD 2003). À la fin du XVIII<sup>e</sup> s., l'édification de barrages sur le Cher à l'ouest de la zone d'étude a permis de déplacer vers l'amont sa confluence avec la Loire (BURNOUF et CARCAUD 2000 : 12) : cette confluence artificielle se situe actuellement à 13 km en aval de la limite occidentale du secteur étudié. La rivière a ainsi été raccourcie et son tracé

2. En géomorphologie ligérienne, les montilles sont des monticules d'alluvions anciennes, des "buttes" insubmersibles relativement aux inondations historiques (DION 1961).

3. "Ouvrage de protection construit sur les rives de la Loire en pieux battus, fagots et terre" (BURNOUF et CARCAUD 1999 : 22).

N° datation	Age <sup>14</sup> C BP	Code laboratoire	Fourchette d'âge (cal BP, 2σ)	Cote (m NGF)	Texture de l'échantillon	Site archéologique
1	3400 ± 150	UQ 1710	4083 - 3339	43,90 - 44,00	silto-argilo-tourbeuse	Rue Nationale, Nouvelle République
2	4150 ± 150	UQ 1803	5257 - 4164	42,50 - 42,55	silto-argilo-tourbeuse	Rue Nationale, Nouvelle République
3	9200 ± 150	UQ 1722	11051 - 9912	42,30 - 42,35	silto-argilo-tourbeuse	Rue Nationale, Nouvelle République
4	8800 ± 150	Ly-6370	10207 - 9539	40,00 - 40,10	silto-argilo-tourbeuse	Boulevard Heurteloup, palais des congrès Vinci
5	6075 ± 75	Ly-6371	7161 - 6749	40,15 - 40,20	silto-argilo-tourbeuse	Boulevard Heurteloup, palais des congrès Vinci
6	9630 ± 70	Ly-6372	11194 - 10755	39,65 - 39,70	silto-argilo-tourbeuse	Boulevard Heurteloup, palais des congrès Vinci
7	9970 ± 70	Ly-6040	11744 - 11238	40,10 - 40,50	silto-argilo-tourbeuse	Rue de la Victoire
8	9795 ± 75	Ly-6041	11400 - 10822	40,50 - 40,85	silto-argilo-tourbeuse	Rue de la Victoire
9	5120 ± 55	Ly-6042	5989 - 5734	40,85 - 41,10	silto-argilo-tourbeuse	Rue de la Victoire
10	2215 ± 165	A11975	2713 - 1868	44,96 - 45,01	silto-argileuse	Lycée Descartes
11	3630 ± 60	A 11635	4145 - 3730	44,55 - 44,60	silto-argileuse	Lycée Descartes
12	4480 ± 55	A 11977	5309 - 4892	44,25 - 44,30	silto-argileuse	Lycée Descartes
13	4570 ± 90	A 11978	5577 - 4962	43,85 - 43,90	silto-argileuse	Lycée Descartes
14	4680 ± 120	A 11976	5648 - 4985	43,50 - 43,55	silto-argileuse	Lycée Descartes
15	4965 ± 100	A 11979	5920 - 5481	43,10 - 43,15	silto-argileuse	Lycée Descartes
16	5130 ± 200	A 11980	6310 - 5339	42,70 - 42,75	silto-argileuse	Lycée Descartes
17	8800 ± 165	A 11636	10235 - 9526	42,00 - 42,05	silto-argileuse	Lycée Descartes
18	4460 ± 60	Poz-38802	5298 - 4879	44,15 - 44,25	silto-argileuse	Rue Gambetta
19	3340 ± 35	Poz-37273	3682 - 3475	44,05 - 44,10	silto-argilo-tourbeuse	Rue Gambetta
20	960 ± 30	Beta-319440	1155 - 1021	43,88 - 43,92	silto-argilo-tourbeuse	Rue de la Parmentière (commune de La Riche)
21	4360 ± 30	Beta-323747	5034 - 4853	45,10	silto-argileuse	Rue Nationale, tracé du tramway
22	5030 ± 30	Beta-323748	5891 - 5659	44,85 - 44,87	silto-argileuse	Rue Nationale, tracé du tramway
23	4710 ± 40	Beta-323749	5582 - 5321	45,18	silto-argileuse	Rue Nationale, tracé du tramway
24	8520 ± 50	Beta-323750	9550 - 9453	42,88	silto-argilo-sableuse	Rue Nationale, tracé du tramway
25	4050 ± 30	Beta-323751	4783 - 4426	43,57 - 43,6	sableuse	Rue Nationale, tracé du tramway
26	5010 ± 30	Beta-323752	5891 - 5655	41,99	silto-argilo-sableuse	Rue Nationale, tracé du tramway
27	10030 ± 40	Beta-323753	11750 - 11328	41,36	silto-argilo-sableuse	Rue Nationale, tracé du tramway
28	1910 ± 30	Beta-317497	1929 - 1740	44,55 - 44,60	silto-argilo-tourbeuse	Rue Nationale, tracé du tramway

Tabl. 1 : Datations 14C acquises lors de fouilles archéologiques dans la plaine alluviale de Tours.

modifié jusque dans le secteur de Tours. Un tronçon du Cher abandonné, long d'environ 15 km, est appelé " Vieux Cher " (Fig. 1). Au cours des années 1960, le Cher a été canalisé à Tours avec de nouvelles modifications de son tracé.

- Le ruau<sup>4</sup> Sainte-Anne, d'orientation nord-sud, était une défluviation abrupte de la Loire vers le Cher (Fig. 1), le sens du courant étant généralement dirigé du fleuve vers son affluent (COUDERC, BADEY et DJEMMALI 2010 : fig. 4), sauf lorsque le Cher connaissait une cote de crue supérieure à celle de la Loire (NOIZET, CARCAUD et GARCIN 2004 : 145). Ce ruau a été fortement aménagé dès le Moyen Âge, puis clos définitivement et remblayé à la fin du 18<sup>e</sup> s. (COUDERC, BADEY et DJEMMALI 2010 : 25-26 et Tabl. 1).

- Le Ruisseau de l'Archevêque suivait l'orientation générale de la vallée d'est en ouest dans l'interfluve et débouchait dans le ruau Sainte-Anne (Fig. 1). Il ne semble pas correspondre à une bifurcation du Cher ou de la Loire sur la carte colorisée de Siette de 1619<sup>5</sup>, dans laquelle il est figuré comme un chenal déconnecté et en eau. Il a été aménagé et a existé jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> s., avant de disparaître avec l'avancée de l'urbanisation vers le sud (MARLET 2000 : 30).
- Dans l'espace urbanisé ancien et ses environs existaient des boires, dépressions longiformes en eau, telle la " boire Saint Venant " au nord du *castrum* de Saint Martin (NOIZET 2005). Cette boire a pu être fortement aménagée et a été partiellement intégrée au système défensif de l'enceinte du XIV<sup>e</sup> s.

4. En Loire moyenne, un " ruau " est un chenal secondaire plus ou moins connecté au chenal principal.

5. BNF cote Ge DD 2937 (1192).

- Au XIX<sup>e</sup> s., un canal reliant la Loire et le Cher, “canal du Duc de Berry”, a été creusé à l'est de Tours pour ouvrir la navigation entre Loire et Cher (Fig. 1). Ce canal a été partiellement comblé à la fin des années 1960 lors de la construction de l'autoroute A10, qui suit son tracé.

## 2. MODÉLISATION DES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET SÉDIMENTAIRES DE LA PLAINE ALLUVIALE

### 2.1. Méthode

#### 2.1.1. Constitution et traitement d'une base de données sédimentaires géoréférencée

Afin de réaliser des modèles géostatistiques des caractéristiques morphologiques et sédimentaires de la zone étudiée, une base de données sédimentaires géoréférencée a été établie pour être exploitée dans un système d'information géographique. La base a été alimentée par récolement de données de sondages archéologiques, géologiques et géotechniques disponibles dans les travaux universitaires (MARLET 2000 ; LAURENT 2007), les rapports de fouilles, la Banque du Sous-Sol du BRGM<sup>6</sup>, les archives municipales et départementales, les directions des services techniques des mairies, ou encore mises à disposition par des entreprises privées<sup>7</sup>.

Les données récolées sont hétérogènes, car elles ont été produites pour des objectifs variés et par divers intervenants. Il a donc été nécessaire de les vérifier et de les traiter manuellement avant de les intégrer dans la base de données. Cette étape est essentielle pour implanter des critères de contrôle en vue des requêtes sur la base et permet d'éliminer dès ce stade les données présentant des incohérences.

Pour chaque sondage, la cohérence du positionnement planimétrique et altimétrique a systématiquement été vérifiée et la qualité de l'information altimétrique a été classifiée (levé de géomètre en cotes absolues, relatives, ou estimation d'après la

carte IGN). La complétude de l'information litho-stratigraphique depuis la surface actuelle jusqu'au substrat rocheux a été indiquée (complète/incomplète). Une typologie de la qualité de l'information litho-stratigraphique a été mise en place pour discriminer les sondages possédant une description fine (stratigraphie détaillée, mention des principales classes granulométriques, des couleurs, des constituants et structures sédimentaires...) de ceux possédant une description moins fine (stratigraphie générale, mention des principales classes granulométriques et de la couleur) ou de ceux pour lesquels il y a absence de description lithologique et seulement une description stratigraphique générale (remblais, alluvions, substrat).

Les descriptions des alluvions ont été traitées et des faciès sédimentaires types ont été définis, notamment d'après la granularité qui est représentative du contexte hydrodynamique de dépôt, mais aussi dans certains cas d'après la nature des constituants sédimentaires, comme la matière organique figurée parfois abondante. L'ordre d'énumération des classes texturales (argiles, silt ou limon, sable, gravier, galet, bloc) dans les descriptions indique leur abondance relative et permet la classification typologique des sédiments. Au total, sept faciès sédimentaires traduisant différents environnements de sédimentation ont été définis :

- silto-argileux et silto-argilo-tourbeux, traduisant des milieux de décantation (ex : plaine d'inondation éloignée du chenal actif ou chenal abandonné) ;

- silto-argilo-sableux et sableux à matrice silto-argileuse, traduisant des contextes de dépôt de plaine d'inondation plus énergiques (ex : plaine d'inondation proche du chenal actif, levées, îles) ;

- sableux, sablo-graveleux et graveleux, traduisant respectivement des milieux d'énergie croissante de chenaux actifs (ex : barres sédimentaires ou fonds de chenaux).

La base de données constituée dans un système de gestion de base de données possède une structure simple avec trois tables : “ Site ”, “ Sondage ” et “ Couche ” (Fig. 3). La table “ Site ” permet l'adressage postal et la classification par commune de groupes de sondages. Dans la table “ Sondage ” sont référencés les coordonnées planimétriques et altimétriques ainsi que des indices de qualité des sondages (altimétrie, description lithostratigraphique, complétude de l'information stratigraphique). La table “ Couche ” renvoie à la nature (dépôt anthropique, alluvions, substrat ro-

6. <http://infoterre.brgm.fr>

7. GINGER CEBTP Tours et Compétence Géotechnique Tours.

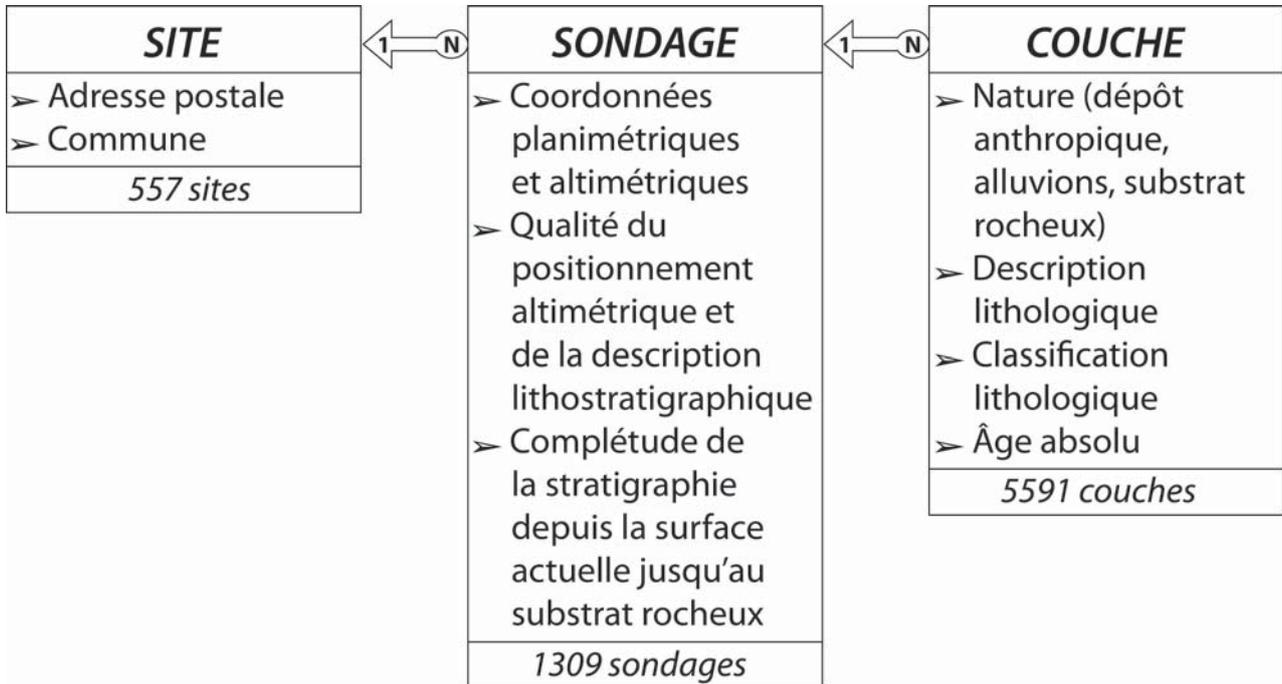


Fig. 3 : Structure simplifiée de la base de données sédimentaires.

cheux), aux descriptions et classification lithologiques, et parfois à l'âge absolu des couches sédimentaires constituant chaque sondage. Au total, 5 591 couches réparties en 1309 sondages ont été intégrées à la base de données (Fig. 3).

### 2.1.2. Analyse géostatistique

Afin de produire des modèles géostatistiques pour les différentes variables étudiées (altitude du toit des alluvions et du substrat rocheux, épaisseur des alluvions et du dépôt anthropique, épaisseur cumulée des dépôts silto-argileux et tourbeux), des jeux de données ont été sélectionnés et extraits de la base de données. Ces données ponctuelles peuvent être traitées avec une approche probabiliste comme la géostatistique, grâce à laquelle la pondération des variables entre les différents points d'observation n'est pas définie *a priori*<sup>8</sup> mais à partir des données.

L'analyse géostatistique s'articule en deux phases. La première, phase exploratoire, étudie

et pose les hypothèses sur la structuration spatiale de la variable à estimer. La seconde, phase de modélisation, consiste à interpoler spatialement la variable par krigeage ordinaire (KRIGE 1951 ; MATHERON 1963 : 1259-1261 ; GRATTON 2002 ; ZANNETTI 2005 : 234) dans un système d'information géographique. La phase exploratoire s'effectue par le traçage et l'analyse d'un variogramme, dit expérimental, qui est un diagramme de corrélation de la variance en fonction de la distance. Celui-ci permet d'analyser le degré de ressemblance (autocorrélation) des variables mesurées aux points d'observation en fonction de leur distance, c'est-à-dire d'estimer la dispersion de la distribution d'une variable dans l'espace (MATHERON 1963 : 1250-1252 ; ARNAUD et EMERY 2000 : 179). Le variogramme expérimental permet donc d'identifier la distance maximale entre deux points de mesure, au-delà de laquelle il n'y a plus de corrélation. La phase de modélisation débute par le paramétrage et l'ajustement d'une fonction mathématique de lissage, ou variogramme théorique, sur le variogramme expérimental. La qualité du modèle réalisé dépend en partie de la validité du variogramme théorique à représenter les tendances du variogramme expérimental. La modélisation se termine avec une interpolation par krigeage ordinaire, qui utilise les corrélations entre les points de mesures pour estimer la réparti-

8. C'est le cas de la fonction inverse à la distance (IDW) ou la fonction Spline.

tion spatiale d'une variable quantitative (MATHERON 1963 : 1259-1261), en ayant préalablement implémenté les paramètres du variogramme théorique.

Le krigeage permet une validation croisée des données, qui consiste à estimer la variable étudiée en chaque point d'un jeu de données, en l'éliminant temporairement et en appliquant le variogramme théorique (GRATTON 2002 ; ZANINETTI 2005 : 244). Cette démarche permet de s'assurer de la fiabilité des modèles réalisés en analysant la relation entre les valeurs mesurées et estimées à partir du modèle sous forme de coefficient de détermination ( $R^2$ ). Des cartes d'interpolation des erreurs standard ont été produites conjointement aux modèles, permettant de visualiser localement la robustesse de ces derniers.

La modélisation des corps sédimentaires (barres, îles) présents actuellement dans le chenal de la Loire et du Cher n'a pas été réalisée, car ces structures sont très mobiles au pas de temps étudié et/ou ont été fortement artificialisées. Le secteur de la plaine alluviale situé en rive droite de la Loire, au nord-est de la zone d'étude, n'a pas été pris en compte dans cet article. L'évolution géomorphologique détaillée de ce secteur, notamment aux environs de l'abbaye de Marmoutier (Fig. 1, D), a déjà été partiellement restituée (MORIN 2012).

Le modèle de l'altitude du toit des alluvions a été enrichi en implantant des points complémentaires sur le tracé actuel des chenaux de la Loire et du Cher. Les valeurs d'altitude à ces points ont été extrapolées manuellement à partir de données issues de levés bathymétriques<sup>9</sup> et tenant compte d'une pente moyenne de 0,03 % pour le Cher (BETURE-CEREC 2003 : 7) et de 0,029 % pour la Loire (LATAPIE 2011 : 74). Les points complémentaires n'ont pas été pris en compte durant la phase exploratoire de l'analyse géostatistique : ils n'ont été utilisés que pour l'étape finale d'interpolation.

Le modèle d'épaisseur cumulée des alluvions silto-argileuses et tourbeuses a été constitué en cumulant, pour chaque sondage, l'épaisseur de toutes les couches définies comme de faciès silto-argileux et silto-argilo-tourbeux, qu'elles soient séparées ou non par des couches plus sableuses. Les modèles d'épaisseur des alluvions et d'épaisseur cumulée des alluvions silto-argileuses et tourbeuses ont uniquement été réalisés à partir de sondages dont l'information stratigraphique était complète depuis la surface actuelle jusqu'au toit du substrat rocheux.

## 2.2. Modèles géostatistiques réalisés

L'analyse préliminaire de différents jeux de données a montré que les modèles les plus fiables étaient réalisés en tenant compte uniquement des sondages dont la coordonnée altimétrique a été obtenue par levé de géomètre en cotes absolues (en mètres NGF). Seuls ces modèles sont présentés ci-après.

### 2.2.1. Modèle d'altitude du toit du substrat rocheux

Ce modèle a été réalisé avec 626 points de sondages (Fig. 4) et possède un coefficient de détermination ( $R^2$ ) de 0,58. Les secteurs les moins fiables sont situés sur les bordures sud, est et ouest de la carte, car les données y sont moins nombreuses (Fig. 5). Dans ces secteurs les interprétations du modèle doivent être prudentes.

Le modèle met en évidence les formes d'érosion de la Loire et du Cher dans le substrat crétacé et éocène. De manière cohérente, on observe que les altitudes du toit du substrat tendent à décroître d'est en ouest selon la pente du fond de vallée. Elles se répartissent entre 47,8 et 36,5 m NGF respectivement vers l'angle sud-ouest de l'enceinte du <sup>iv</sup><sup>e</sup> s. (Fig. 4, A) et dans le chenal de la Loire, avec une moyenne des valeurs vers 42 m NGF.

Un contraste important apparaît dans l'interfluve (Fig. 4). En amont du ruau Sainte-Anne, les hauts fonds du substrat calcaire, nettement plus élevés, se présentent sous forme de crêtes parallèles orientées est-ouest. En aval du ruau Sainte-Anne, bien que la fiabilité du modèle soit moindre (Fig. 5), le substrat paraît surcreusé et présente un relief moins inégal, sans contraste marqué entre interfluves et chenaux (Fig. 4). Au sud du tracé actuel du Cher, le toit du substrat est nettement surcreusé.

Le tracé connu du Ruisseau de l'Archevêque correspond à un couloir déprimé dans le substrat (Fig. 4, B). Entre le ruisseau de l'Archevêque et le tracé actuel du Cher, un autre couloir déprimé est identifié (Fig. 4, C).

Dans l'espace urbanisé ancien, un surcreusement interprété comme le tracé d'un paléochenal peut être observé (Fig. 4, D). Il paraît partir du tracé actuel de la Loire, en amont du pont actuel de l'autoroute A10. Le paléochenal se prolonge sous l'espace urbanisé ancien avec un profil sinueux et tend à rejoindre le chenal ligérien actuel au niveau du nord-ouest de l'enceinte du <sup>xiv</sup><sup>e</sup> s. Il délimite des hauts fonds du substrat crétacé dans ce secteur (Fig. 4, A, E et F).

9. Données CETE Normandie-Centre.

### 2.2.2. Modèle de l'altitude du toit des alluvions

Ce modèle a été réalisé en interpolant les données de 722 points de sondages, auxquels s'ajoutent 60 points complémentaires implantés sur le tracé de la Loire et 57 points sur le tracé du Cher (Fig. 6). Le modèle est assez robuste, avec un  $R^2$  de 0,72. Les secteurs les moins fiables sont situés sur les bordures sud, est et ouest de la carte (Fig. 7).

Le modèle met en évidence des variations de cotes modérées de la surface des alluvions weichséliennes et holocènes, sous les dépôts anthropiques. Ces formes, bien que modestes, sont néanmoins importantes dans un contexte de plaine alluviale, car elles délimitent des secteurs plus ou moins submersibles lors des inondations. Le modèle ne représente pas une forme monogénique, instantané d'une période particulière, car la fossilisation des paléoreliefs fluviaux par le recouvrement des dépôts anthropiques a été continue dans la plaine alluviale, entre les  $1^{\text{er}}$  et  $xx^{\text{e}}$  s. De manière générale, on observe des hauts fonds de forme linéaire, orientés est-ouest, ou des hauts fonds de forme elliptique. Ils sont limités par des zones déprimées formant des couloirs orientés est-ouest (Fig. 6). Les altitudes se répartissent entre 38,5 et 50,7 m NGF, respectivement en aval dans le lit de la Loire et au niveau de l'amphithéâtre antique (Fig. 6, A), avec une moyenne des valeurs vers 45,6 m NGF.

Dans la partie nord-est de la zone d'étude, une structure d'au moins 2,5 km de longueur, de 400 à 500 m de largeur et d'altitude relativement plus élevée (47,5 m NGF à l'est et 49 m NGF à l'ouest) constitue nettement ce que l'on nomme " montille " dans la vallée de la Loire. Cette montille a déjà été mise en évidence à l'emplacement de l'amphithéâtre antique (GAY-OVEJERO, MACAIRE et SEIGNE 2007) où elle atteint sa cote la plus élevée (Fig. 6, A). Elle ne correspond pas ici seulement à une " butte " mais à une structure linéaire de plusieurs kilomètres de long. À l'ouest de la montille, ce qui peut être considéré comme une levée naturelle moins élevée est identifiable (Fig. 6, B). Elle apparaît découpée par un réseau de talwegs pouvant, au moins en partie, correspondre à d'anciens chenaux de défluviation constitués lors de ruptures de levées en période de crue (Fig. 6, C et D). L'existence d'un bombement au sud du fleuve, isolant les chenaux du reste de la plaine alluviale (DUBANT 1993 : pl. 21 ; BURNOUF et CARCAUD 1999 : 64 ; JOUQUAND *et al.* 1999 : 15 ; CARCAUD *et al.* 2002 : 73 ; BURNOUF *et al.* 2003 : 167), est ici confirmée à la fois par la présence d'une montille et celle d'une levée natu-

relle, dont les formes et tailles respectives sont bien contraintes spatialement par le modèle.

D'autres hauts fonds de forme linéaire, bombements apparentés à des levées naturelles ou des barres sédimentaires, sont distinguables sur le modèle : en rive droite du Cher (Fig. 6, E) et sur la bordure sud du tracé connu du ruisseau de l'Archevêque (Fig. 6, F). En certains emplacements, ces reliefs sont superposés à des hauts fonds du substrat crétacé (Fig. 4, G et H ; Fig. 6, E et F), alors qu'à d'autres emplacements ce n'est pas le cas (Fig. 4, I ; Fig. 6, B). Ceci illustre bien la diversité de la morphologie fluviale façonnée dans la longue durée, avec des formes héritées ou à l'inverse d'autres totalement nouvelles.

Entre les hauts fonds, des couloirs plus ou moins déprimés et larges sont mis en évidence. Les deux plus profonds se situent approximativement à l'emplacement des tracés actuels de la Loire et du Cher. Un couloir moins profond et large, localisé entre les bombements situés respectivement au sud du ruisseau l'Archevêque (Fig. 6, F) et au nord du tracé actuel du Cher (Fig. 6, E), pourrait correspondre à un ancien bras du Cher. Le manque d'informations le long du tracé connu du ruau Sainte-Anne ne permet pas de restituer sur le modèle un couloir déprimé qui pourrait potentiellement lui correspondre.

Au sud du Cher, en partie médiane de la carte, le modèle bien que moins fiable (Fig. 7) fait apparaître des hauts fonds sédimentaires (Fig. 6, G). Si ces derniers peuvent correspondre à un colmatage alluvial rapide de ce secteur après les modifications du tracé du Cher au  $xviii^{\text{e}}$  s., un apport colluvial en pied de versant aux débouchés des talwegs est aussi possible. Dans ce secteur, et à la différence du reste de la plaine alluviale, la présence d'éléments carbonatés dans les sédiments à différents niveaux dans les sondages semble conforter cette hypothèse.

Des hauts fonds de forme elliptique sont observés en différents emplacements sur le modèle. Ils peuvent être issus de la dissection des levées naturelles et bombements déjà mises en évidence (Fig. 6, H, I et K) par un réseau de talweg. En outre, en rive gauche du chenal actuel de la Loire, ces hauts fonds de forme elliptique pourraient correspondre à d'anciennes îles (Fig. 6, L et M). Cette hypothèse est validée à l'emplacement de l'île de Saint-Cosme (DUFAY à paraître) dont les contours s'esquissent clairement sur le modèle (Fig. 6, L). Cette observation conforte l'hypothèse que d'autres hauts fonds de forme elliptique pourraient également correspondre à d'anciennes îles, comme c'est probablement le cas à l'est de l'espace urbanisé ancien

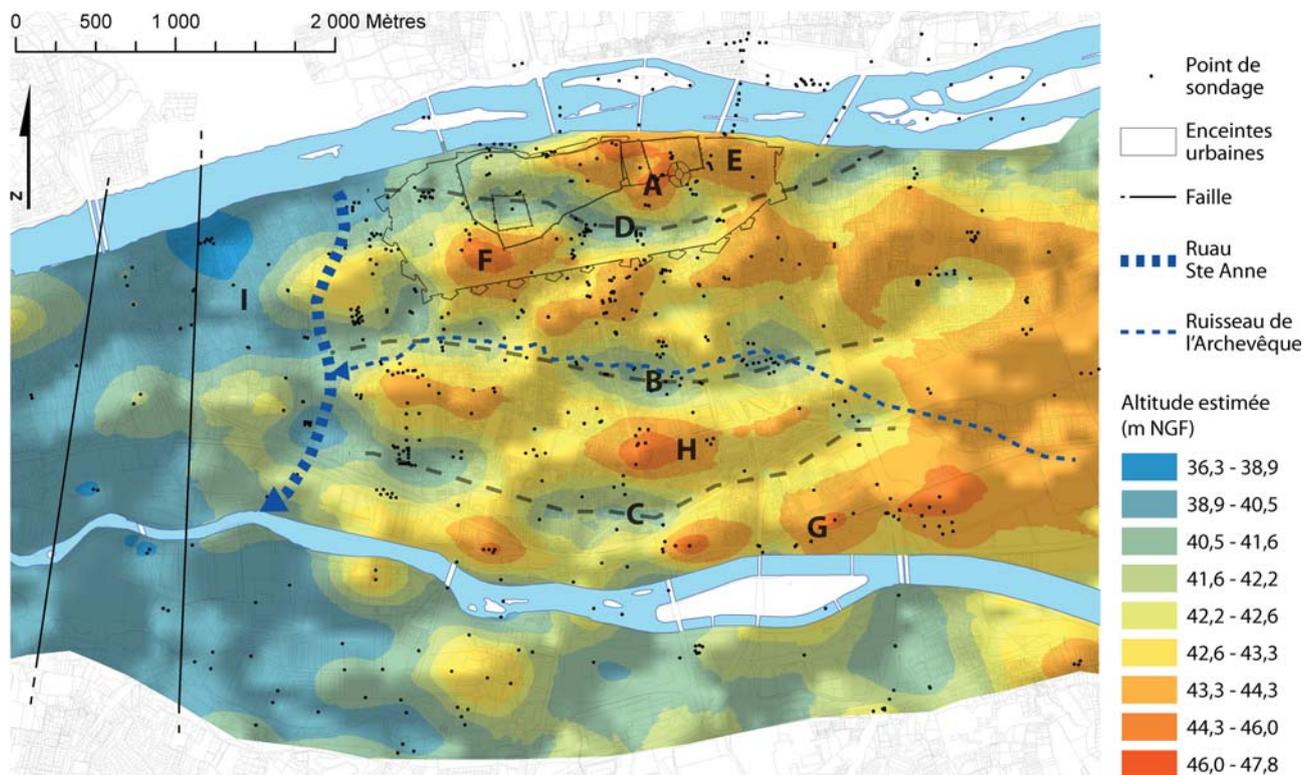


Fig. 4 : Modèle géostatistique d'altitude du toit du substrat rocheux de la plaine alluviale de Tours ( $R^2$  : 0,58 ; erreur moyenne : -0,001 ; moyenne des écarts entre les valeurs d'altitude mesurées et estimées : 1,28 m).

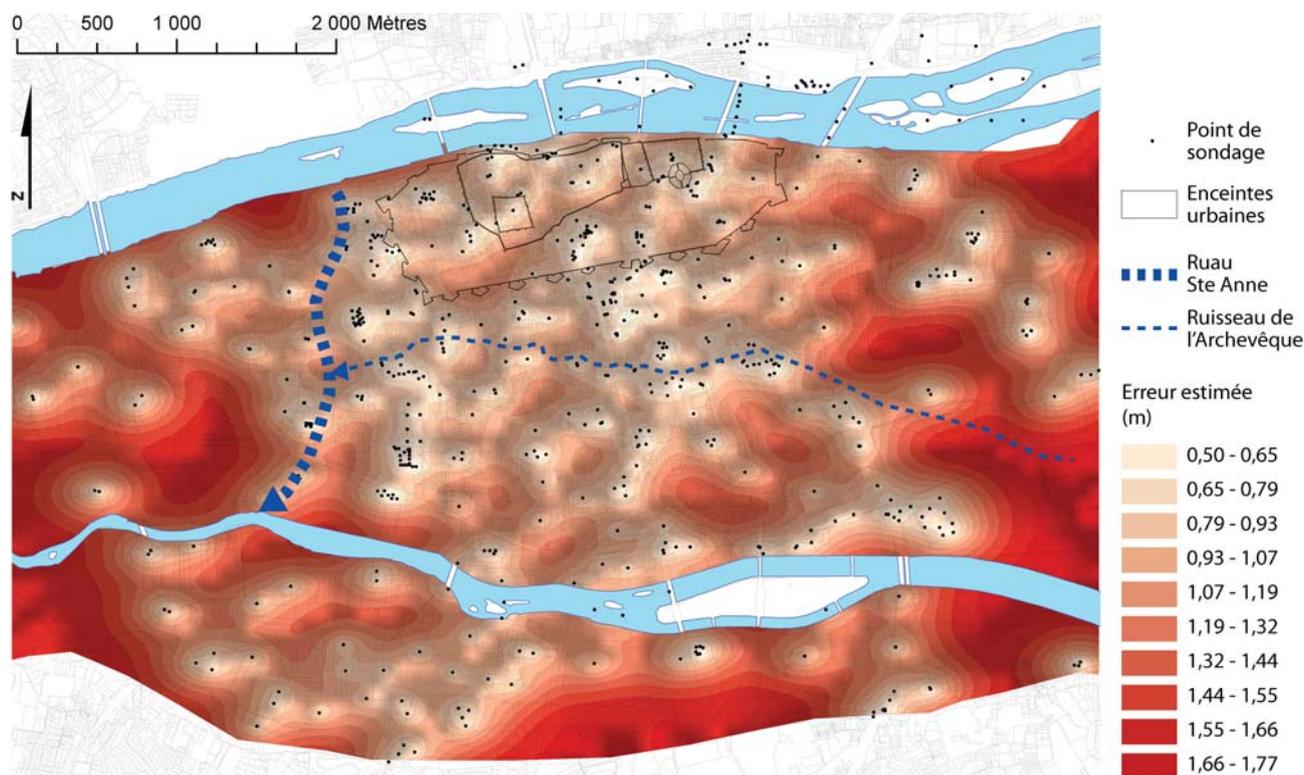


Fig. 5 : Estimation des erreurs standard du modèle géostatistique d'altitude du toit du substrat rocheux de la plaine alluviale de Tours.

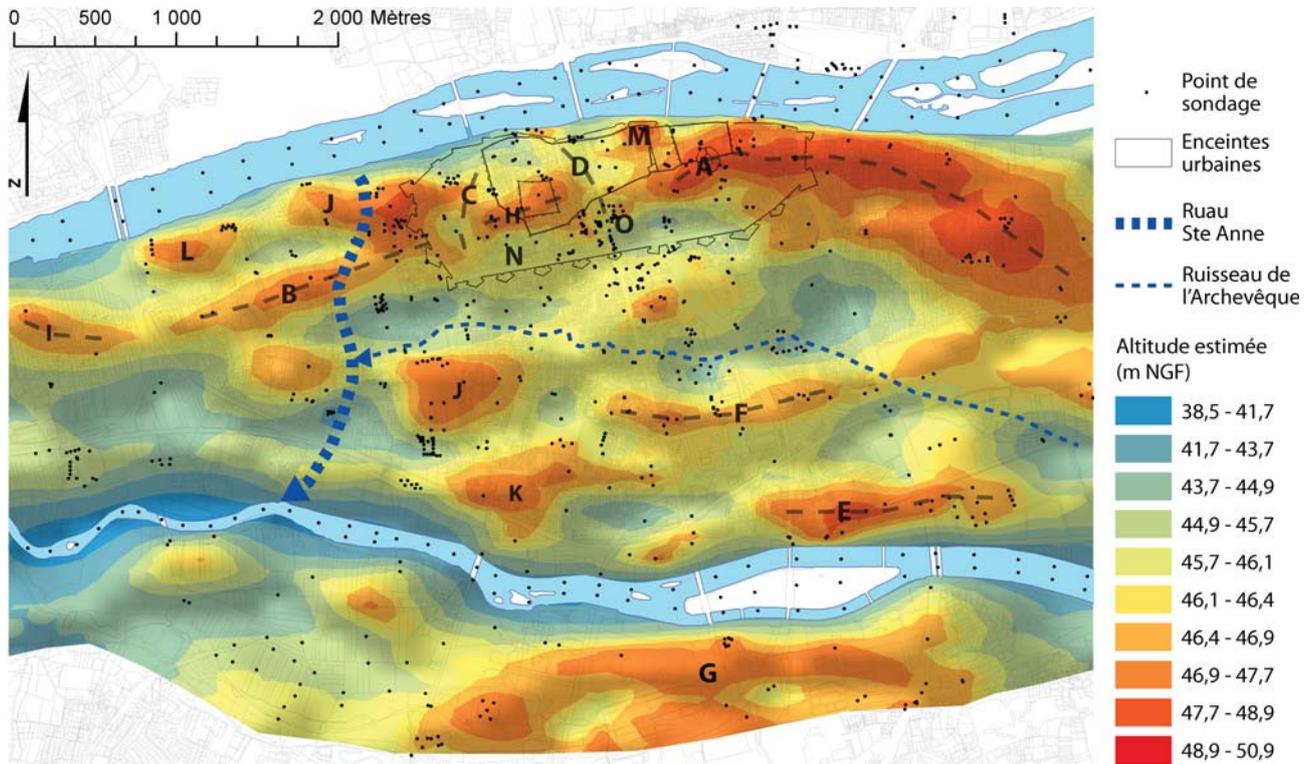


Fig. 6 : Modèle géostatistique d'altitude du toit des alluvions de la plaine alluviale de Tours ( $R^2 : 0,72$  ; erreur moyenne : 0,010 ; moyenne des écarts entre les valeurs d'altitude mesurées et estimées : 0,92 m).

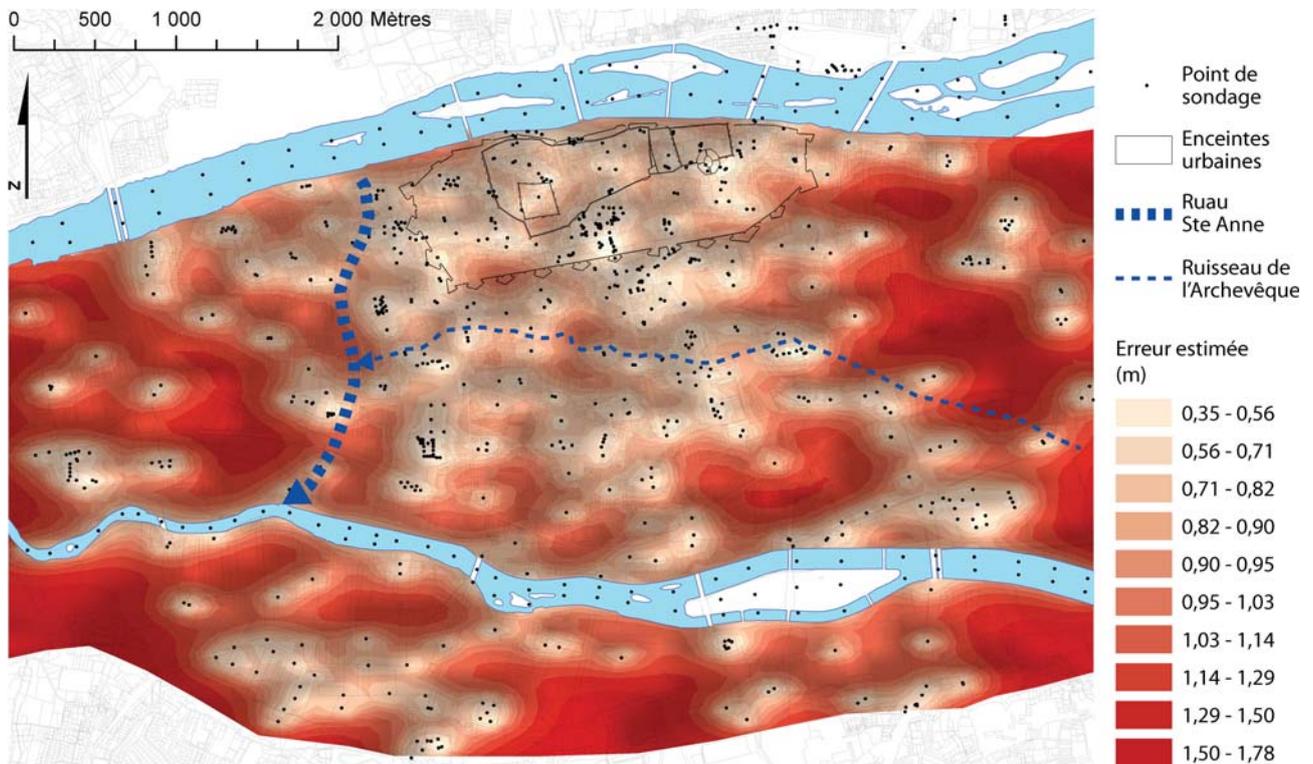


Fig. 7 : Estimation des erreurs standard du modèle géostatistique d'altitude du toit des alluvions de la plaine alluviale de Tours.

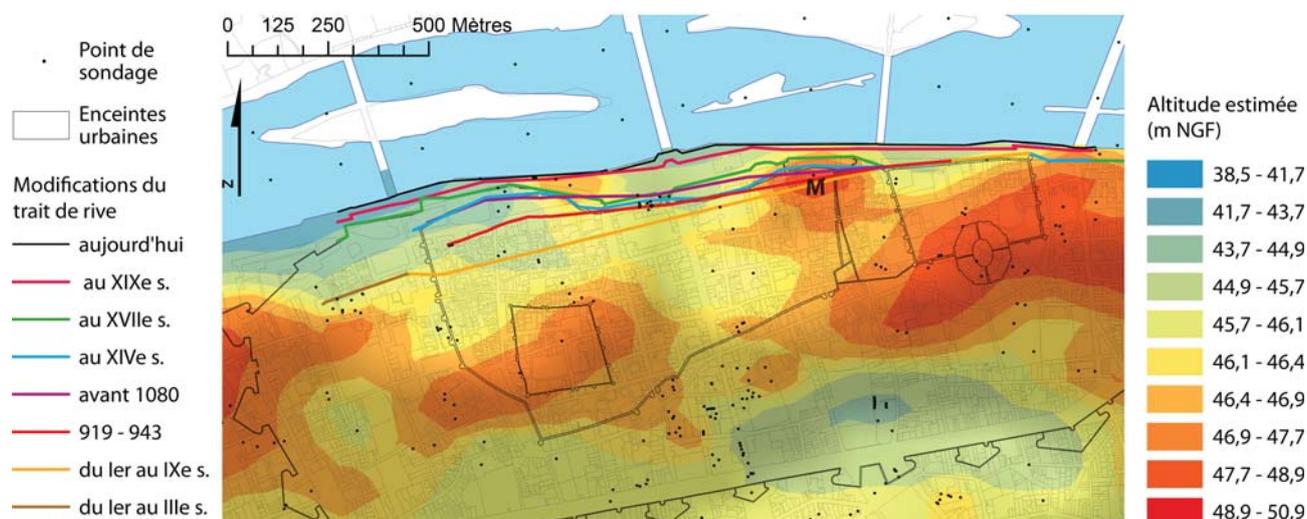


Fig. 8 : Modèle géostatistique d'altitude du toit des alluvions dans l'espace urbanisé ancien de Tours et modifications du trait de rive gauche de la Loire en lien avec les gains anthropiques.

(Fig. 6, M). Dans ce secteur, le rattachement de l'île à la berge s'est probablement effectué avant le I<sup>er</sup> s., car le trait de rive se situait à l'emplacement de l'île à cette période (Fig. 8, M). Hors de l'espace urbanisé ancien, directement à l'ouest de la jonction entre la Loire et le ruau Sainte-Anne, l'existence probable d'une île aujourd'hui rattachée à la berge est validée par le modèle (Fig. 6, J).

### 2.2.3. Modèle d'épaisseur des alluvions

Ce modèle a été réalisé avec 511 points de sondages (Fig. 9) et possède un  $R^2$  de 0,54. Comme pour les autres modèles, les secteurs les moins fiables sont situés sur les bordures sud, est et ouest de la carte (Fig. 10). L'épaisseur des alluvions en fond de vallée est comprise entre 0,7 m vers l'hôpital Bretonneau (Fig. 9, A) et 9,2 m au sud de l'enceinte du IV<sup>e</sup> s. (Fig. 9, B), avec une moyenne des valeurs vers 4,1 m.

Sur ce modèle, les contrastes d'épaisseur sont forts. Dans la zone centrale de l'interfluve entre Loire et Cher, en amont du tracé connu du ruau Sainte-Anne (Fig. 9), les épaisseurs sont généralement plus faibles (environ 0,7 à 7 m avec une moyenne vers 3 m). Dans les autres secteurs du modèle les épaisseurs sont plus fortes, comme en rive gauche de l'actuel tracé de la Loire (environ 1 à 9 m avec une moyenne vers 4,5 m), en partie sud

du Cher (environ 2,5 à 8 m avec une moyenne vers 5 m), et à l'ouest du tracé connu du ruau Sainte-Anne (environ 1,5 à 8,5 avec une moyenne vers 6 m). De manière générale, l'épaisseur des alluvions est plus importante dans les secteurs où le toit du substrat créacé est déprimé.

Dans l'espace urbanisé ancien, l'épaisseur des alluvions est probablement sous-estimée à l'emplacement de l'amphithéâtre (Fig. 9, C) car aucun sondage exploitable n'a intégralement traversé, jusqu'au substrat créacé, les sédiments de la montille (Fig. 6, A). Les épaisseurs modélisées de sédiments fluviaux sont plus fortes dans la partie nord-ouest de l'enceinte du XVII<sup>e</sup> s. (Fig. 9, D), au sud de l'enceinte du XIV<sup>e</sup> s. (Fig. 9, B), dans l'emprise de l'enceinte du IX<sup>e</sup> s. (Fig. 9, E) et au sud-est de l'enceinte du IV<sup>e</sup> s. (Fig. 9, F).

### 2.2.4. Modèle d'épaisseur cumulée des alluvions silto-argileuses et tourbeuses

Ce modèle a été réalisé en interpolant les données de 423 couches sédimentaires réparties sur 211 points de sondages et possède un  $R^2$  de 0,61 (Fig. 11). Les secteurs les moins fiables sont toujours principalement situés sur les bordures sud, est et ouest de la carte (Fig. 12).

Le modèle met en évidence les secteurs où les alluvions silto-argileuses et silto-argilo-tourbeuses sont plus épaisses. En contexte fluvial, ces sédiments

fines et organiques se mettent en place dans des milieux de sédimentation calmes et propices à la décantation, des zones basses humides de façon plus ou moins permanente permettant la conservation de la matière organique, tels les chenaux déconnectés, les bassins et les plaines d'inondation (BRIDGE 2003 : 275-279). Le modèle indique donc les secteurs où ces types de sédimentation ont été prépondérants. Les épaisseurs cumulées d'alluvions fines et organiques varient de 0 à 7,9 m (localement au pied du coteau sud de la vallée) avec une moyenne des valeurs à 0,6 m.

Le modèle indique clairement que les zones situées au sud du Cher, plus localement au nord de cette rivière, et à l'ouest du tracé connu du ruau Sainte-Anne ont, dans la longue durée, été favorables à une sédimentation en contexte hydrodynamique peu énergique (Fig. 11). Les sédiments silto-argileux et tourbeux sont généralement moins épais dans l'interfluve en amont du ruau Sainte-Anne. Au sein de ce dernier espace, certains contrastes apparaissent sur le modèle. Une bande correspondant à de plus fortes épaisseurs est observée à l'emplacement du tracé connu du ruisseau de l'Archevêque (Fig. 11). Ceci tend à valider la fiabilité du modèle réalisé, et suggère que le tracé du ruau Sainte-Anne a été assez stable dans la longue durée.

Dans l'espace urbanisé ancien, une bande correspondant à des épaisseurs plus importantes est également repérable (Fig. 11). Elle recoupe des sites archéologiques où des paléochenaux ont été observés (DUBANT 1993 : 110-113 ; JESSET, JOUQUAND et MASSAT 1996 : 711 ; FOUILLET *et al.* 2002 : 28-29 ; DAVID *et al.* 2013 : 54-60). Ces éléments, et la validation du modèle le long du tracé du ruisseau de l'Archevêque, suggèrent l'existence d'un paléochenal recoupant l'emprise de l'espace urbanisé ancien (noté " paléochenal UA " ci-après) du sud-est vers le nord-ouest, avec un profil sinueux (Fig. 11). Cela diffère d'une précédente hypothèse de restitution du tracé de ce paléochenal (DUBANT 1993 : pl. 80) qui le dessinait en direction du ruisseau de l'Archevêque.

#### 2.2.5. Modèle d'épaisseur des dépôts anthropiques

Ce modèle a été réalisé en interpolant les données de 739 points de sondages (Fig. 13) et possède un  $R^2$  de 0,64. Les secteurs les moins fiables sont situés sur les bordures est et ouest de la carte et dans certains secteurs au sud du Cher (Fig. 14). L'épaisseur des dépôts anthropiques est nulle ou presque dans différents secteurs peu urbanisés de la carte, comme à l'ouest de la zone d'étude ou au sud-ouest dans la

plaine de la Gloriette (Fig. 13). Elle est maximale (11 m) sur les berges artificielles de la Loire en front de l'espace urbanisé ancien de Tours, en lien avec les gains modernes et contemporains sur la Loire. La moyenne des valeurs pour l'ensemble du modèle est de 2,20 m.

L'épaisseur des dépôts archéologiques est importante dans l'espace urbanisé ancien, notamment dans l'emprise de l'enceinte du XIV<sup>e</sup> s., comme cela a déjà été montré dans de précédents travaux (LAURENT 2007 : 349 ; LAURENT et FONDRILLON 2010 : 336). Cette répartition des épaisseurs est fortement corrélée avec la densité de l'occupation humaine (LAURENT 2007 : 349).

Les quartiers aménagés dans le dernier tiers du XX<sup>e</sup> s. et au début du XXI<sup>e</sup> s. (ex : quartiers des Rives du Cher, des Deux Lions) possèdent des épaisseurs relativement importantes de dépôts anthropiques pouvant atteindre 7 m (Fig. 13). À l'inverse, certains secteurs urbanisés au XIX<sup>e</sup> s. (ex : quartier des Prébendes ; CHAILLOT 1959 : 393) ou plus périphériques à l'agglomération (ex : sur les bordures est et ouest de la zone d'étude), présentent des épaisseurs de dépôts anthropiques inférieures à 1 m (Fig. 13).

### 3. STRATIGRAPHIE ET CHRONOLOGIE DU REMPLISSAGE ALLUVIAL

#### 3.1. Chronologie de la mise en place des dépôts alluviaux

La chronologie de l'évolution morphologique et sédimentaire de la plaine alluviale à Tours depuis le Pléistocène supérieur peut être précisée grâce à la compilation de 42 datations absolues, dont 28 obtenues par méthode  $^{14}\text{C}$  (Tabl. 1) et 14 par méthode OSL (Tabl. 2). Ces datations ont essentiellement été réalisées dans l'emprise de l'espace urbanisé ancien lors d'opérations archéologiques (Fig. 15).

La calibration des âges  $^{14}\text{C}$  conventionnels en âges calendaires BP (notés cal BP ci-après) a été effectuée avec le logiciel CALIB V6 (STUIVER et REIMER 1993) et la base de données de calibration IntCal09 (REIMER *et al.* 2009). Les dates calibrées sont reportées avec les âges encadrant la fourchette de probabilité de calibration à  $2\sigma$  (95,4 %). Les datations OSL ont été réalisées sur des grains de quartz présentant un bon signal luminescent. Parmi les différents choix qu'offrent les résultats des datations OSL, seuls les âges calculés avec la valeur moyenne des doses équivalentes (" central age model ") ont été retenus, car les grains de quartz

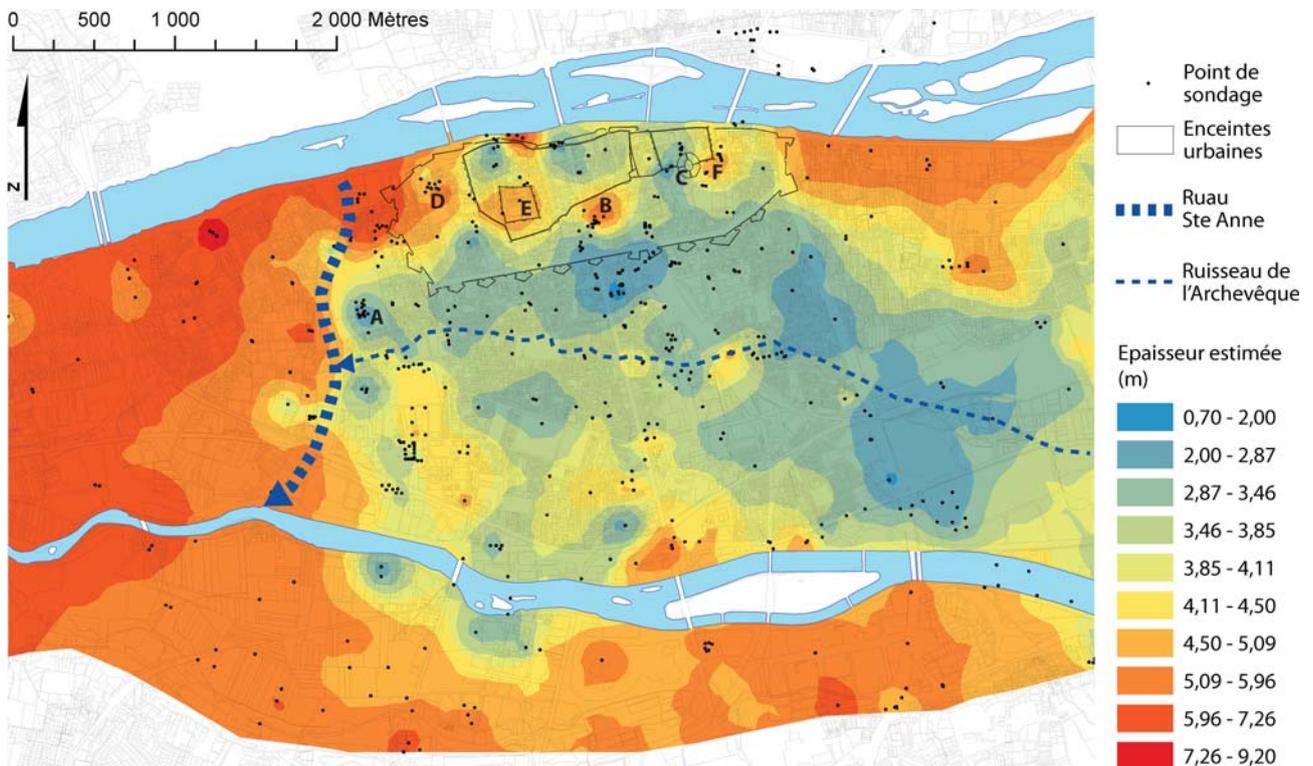


Fig. 9 : Modèle géostatistique de l'épaisseur des alluvions de la plaine alluviale de Tours ( $R^2$  : 0,54 ; erreur moyenne : -0,006 ; moyenne des écarts entre les valeurs d'épaisseur mesurées et estimées : 1,26 m).

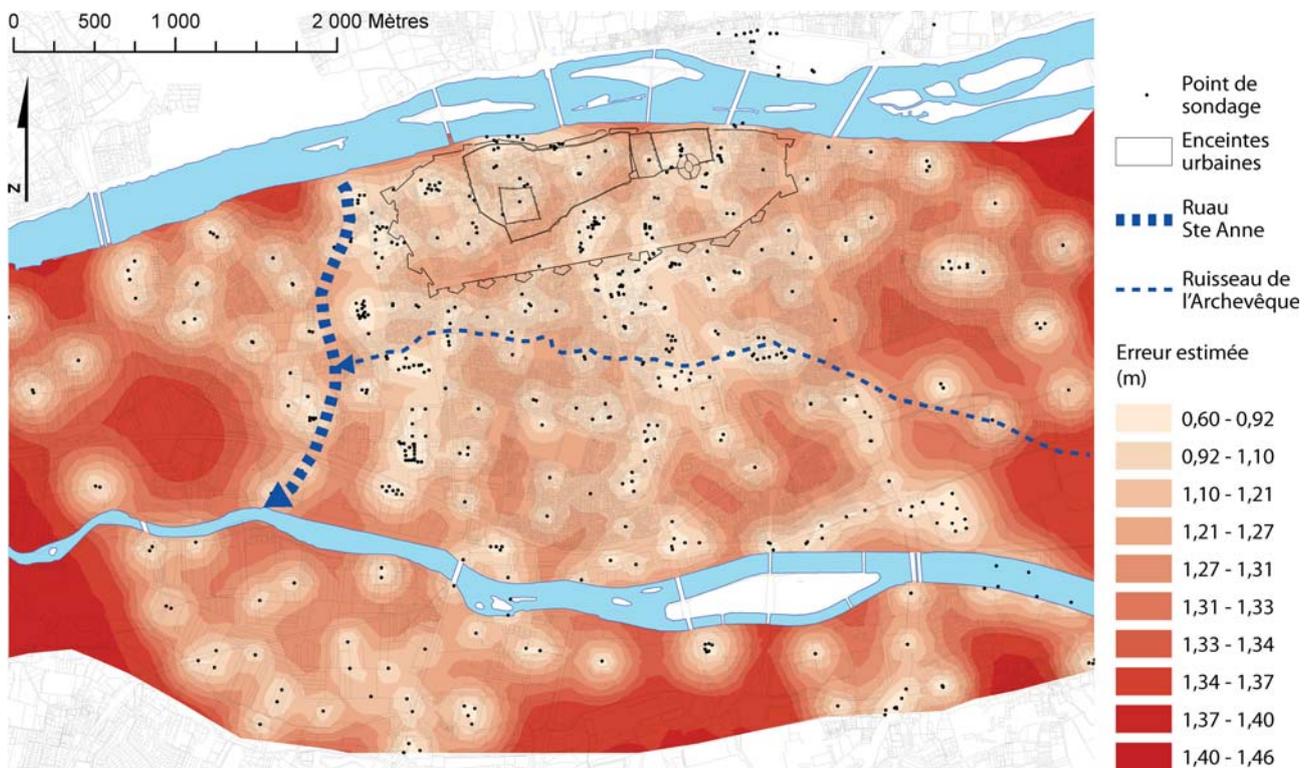


Fig. 10 : Estimation des erreurs standard du modèle géostatistique de l'épaisseur des alluvions de la plaine alluviale de Tours.

N° datation	Age OSL (ka)	Fourchette d'âge (BP)	Cote (m NGF)	Texture de l'échantillon	Site archéologique
29	5,20 ± 0,57	5710 - 4570	46,00 - 46,46	sableuse à matrice	Rue Delperrier
30	7,47 ± 0,71	8120 - 6700	45,70 - 45,85	sableuse à matrice	Rue Delperrier
31	10,33 ± 0,49	10760 - 9780	42,90 - 42,95	sableuse	Ancienne clinique des Dames Blanches
32	1,00 ± 0,05	990 - 890	45,90 - 46,00	silto-argilo-sableuse	Ancienne clinique des Dames Blanches
33	0,83 ± 0,04	810 - 730	45,50 - 45,60	sableuse	Ancienne clinique des Dames Blanches
34	2,06 ± 0,10	2100 - 1900	45,82 - 45,92	sableuse à matrice	Ancienne clinique des Dames Blanches
35	1,26 ± 0,10	1300 - 1100	47,60 - 47,70	silto-argilo-sableuse	Abbaye de Marmoutier
36	1,30 ± 0,11	1350 - 1130	46,70 - 46,80	sablo-graveleuse	Abbaye de Marmoutier
37	6,53 ± 0,43	6900 - 6040	47,60 - 47,55	sableuse	Abbaye de Marmoutier
38	3,72 ± 0,55	4210 - 3110	47,65 - 47,60	silto-argilo-sableuse	Abbaye de Marmoutier
39	5,16 ± 0,28	5380 - 4820	41,70 - 41,75	sablo-graveleuse à matrice	Prieuré de Saint-Cosme
40	0,80 ± 0,03	780 - 700	45,02 - 45,12	silto-argilo-sableuse	Prieuré de Saint-Cosme
41	0,83 ± 0,04	810 - 730	44,02 - 44,12	silto-argileuse	Prieuré de Saint-Cosme
42	19,13 ± 1,54	20610 - 17530	45,28 - 45,32	sableuse à matrice	Place Jean-Jaurès, tracé du tramway

Tabl. 2 : Datations OSL acquises lors de fouilles archéologiques dans la plaine alluviale de Tours.

de tous les échantillons datés avaient été suffisamment blanchis avant leur enfouissement (GALBRAITH *et al.* 1999). De plus, seuls les âges calculés avec une teneur en eau moyennée ont été retenus ("medium water content"), car l'évolution de la teneur en eau sur la longue durée des échantillons datés est inconnue. Les dates OSL sont reportées avec les âges maximum et minimum correspondant à la fourchette de l'incertitude sur la mesure, minorés de 60 ans pour être exprimés en BP et comparés avec les âges  $^{14}\text{C}$  calibrés (notés OSL BP ci-après).

Sur les 42 dates  $^{14}\text{C}$  et OSL compilées, une seule date est située au Pléistocène supérieur et correspond en partie au dernier maximum glaciaire (20610-17530 OSL BP). Les autres dates sont toutes situées dans l'Holocène (Fig. 2 ; Fig. 16). Il existe ainsi un hiatus chronologique important couvrant la fin du Pléniglaciaire weichsélien supérieur et l'ensemble du Tardiglaciaire. Les 41 dates situées dans l'Holocène s'échelonnent du début de l'Holocène (11750-11328 cal BP) à la période médiévale (780-700 OSL BP).

Le comblement du paléochenal UA (Fig. 11) par des alluvions silto-argilo-sableuses, silto-argileuses et silto-argilo-tourbeuses a débuté dès 11750-11328 cal BP et s'est poursuivi au moins jusqu'à 10207-9539 cal BP (Fig. 16). Après 10207-9539 cal BP et avant 7161-6749 cal BP, un hiatus chronologique est observé dans tous les sondages ayant recoupé ce chenal abandonné. Ce hiatus chronologique a également été mis en évidence par les analyses palynologiques (VIVENT 1998 : 28 ; VISET 2002 : 145 ; VISET 2011). Ces éléments, et la proximité des cotes des

datations qui encadrent le hiatus, suggèrent l'existence d'un hiatus sédimentaire. Après 7161-6749 cal BP et au moins jusqu'aux premières occupations gallo-romaines dans la première moitié du 1<sup>er</sup> s. ap. J.-C., le comblement du chenal abandonné et de la plaine alluviale s'est poursuivi.

Dans la partie sud-ouest de l'espace urbanisé ancien (Fig 15, n° 29-30), les dates de 8120-6700 OSL BP et de 5710-4570 OSL BP dans des échantillons sableux à matrice silto-argileuse attestent d'une sédimentation Holocène à dominante sableuse dans ce secteur, à des cotes altitudinales relativement élevées (Tabl. 2, n° 29-30; Fig. 16, n° 29-30). Cela n'est singulièrement pas enregistré dans le comblement sédimentaire du paléochenal UA. Ces éléments, ainsi que la localisation des échantillons datés au débouché d'un talweg identifié sur le modèle de l'altitude du toit des alluvions, suggèrent que ce secteur a été alluvionné lors d'épisodes de ruptures de levées et que ces dépôts sont associés à des "crevasse splay" (BRIDGE 2003 : 272).

À l'extérieur de l'espace urbanisé ancien, les datations absolues sont essentiellement situées sur les sites des abbayes de Marmoutier et de Saint Cosme (Fig. 15, n° 35-38 et n° 39-41), où elles témoignent de l'évolution médiévale des îles éponymes (MORIN 2012 ; DUFAY à paraître). Une autre datation est située à l'ouest de la confluence historique du ruau Sainte-Anne avec le Cher (Fig. 15, n° 20). À ce dernier emplacement, la date obtenue (1155-1021 cal BP) et les études géomorphologiques réalisées (DJEMMALI, GARDÈRE et BADEY 2010 : 8-9, Fig. 3) tendent à montrer que la confluence connue du ruau

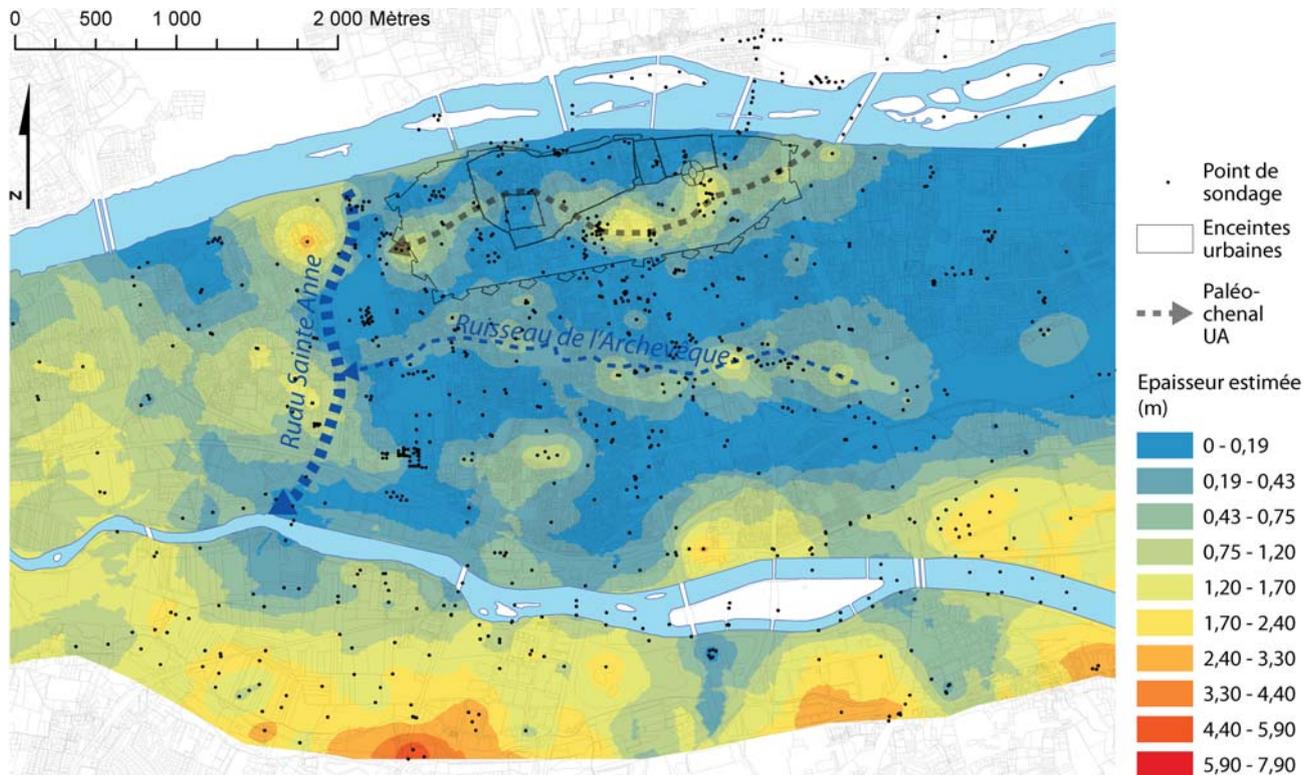


Fig. 11 : Modèle géostatistique de l'épaisseur cumulée des alluvions silto-argileuses et tourbeuses de la plaine alluviale de Tours ( $R^2$  : 0,61 ; erreur moyenne : -0,003 ; moyenne des écarts entre les valeurs d'épaisseur cumulée mesurées et estimées : 0,78 m).

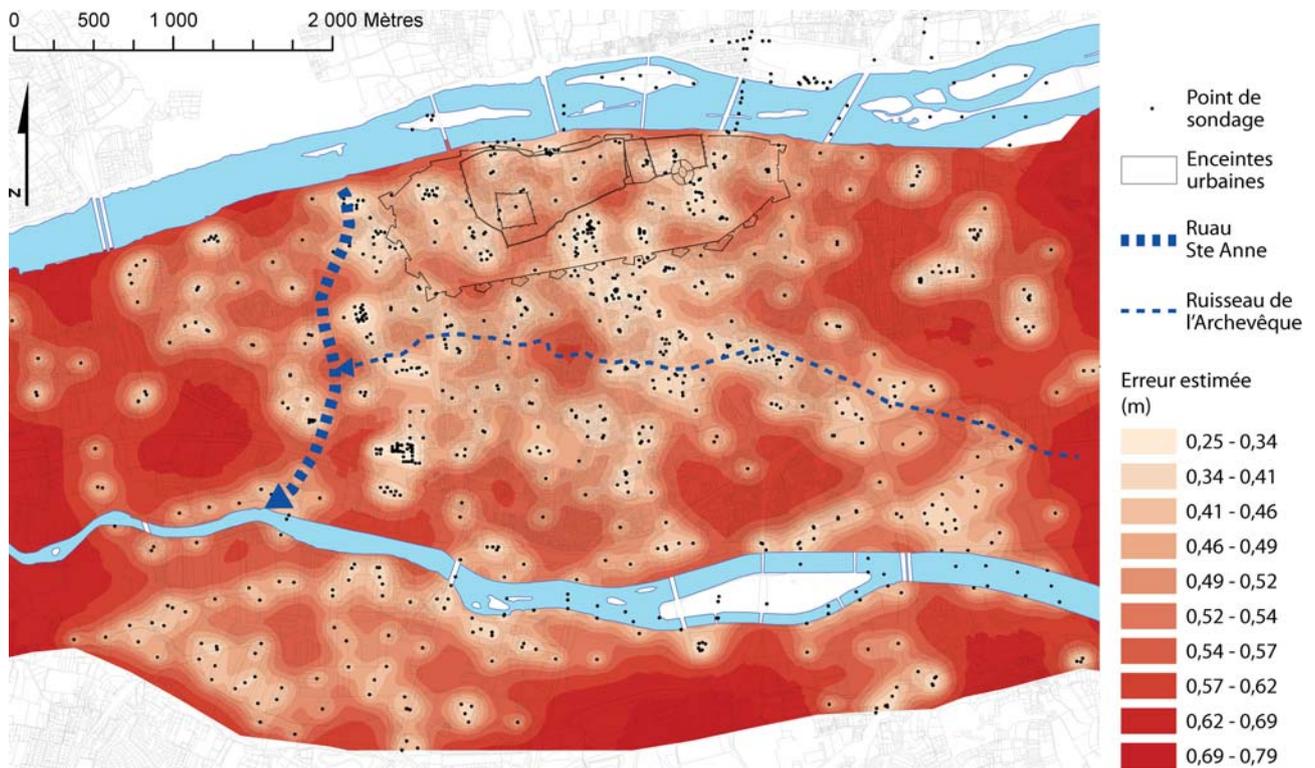


Fig. 12 : Estimation des erreurs standard du modèle géostatistique de l'épaisseur cumulée des alluvions silto-argileuses et tourbeuses de la plaine alluviale de Tours.

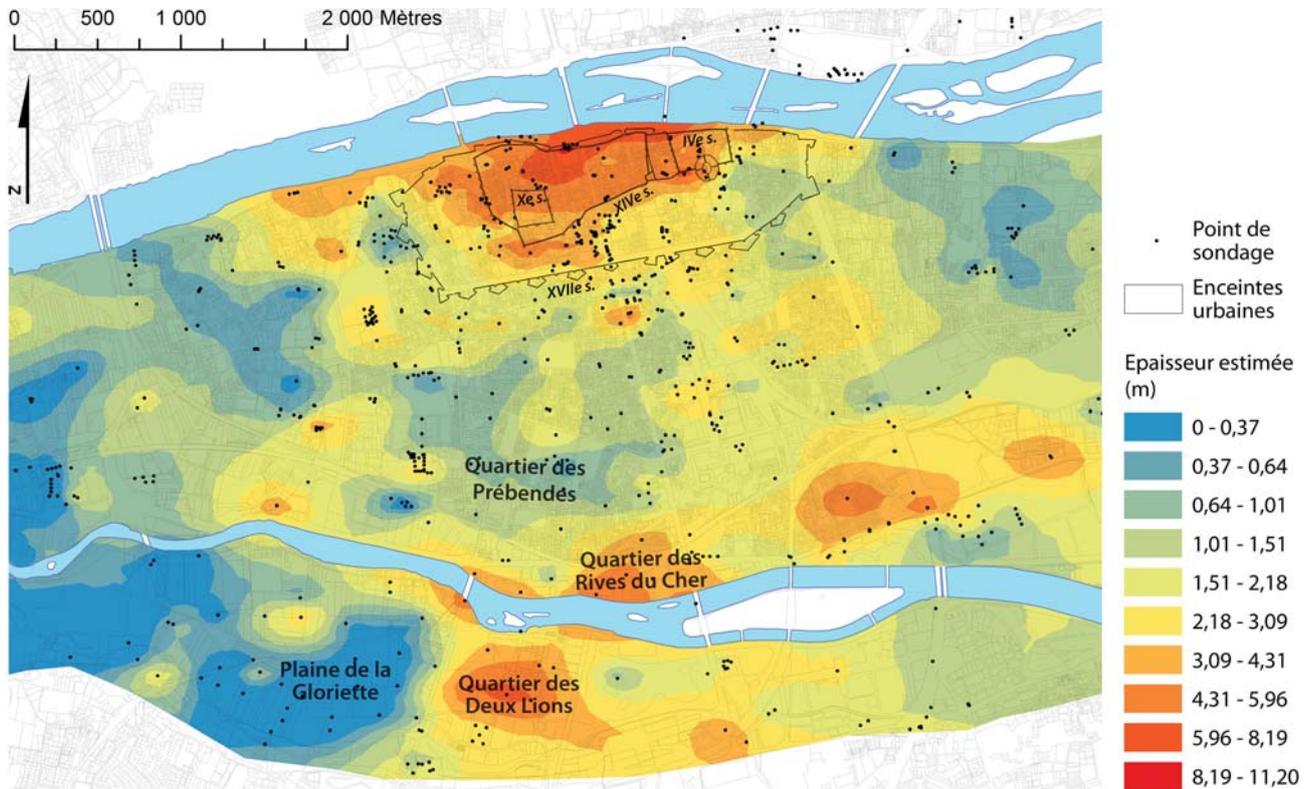


Fig. 13 : Modèle géostatistique de l'épaisseur des dépôts anthropiques de la plaine alluviale de Tours ( $R^2 : 0,64$  ; erreur moyenne :  $-0,003$  ; moyenne des écarts entre les valeurs d'épaisseur mesurées et estimées :  $1,13$  m).

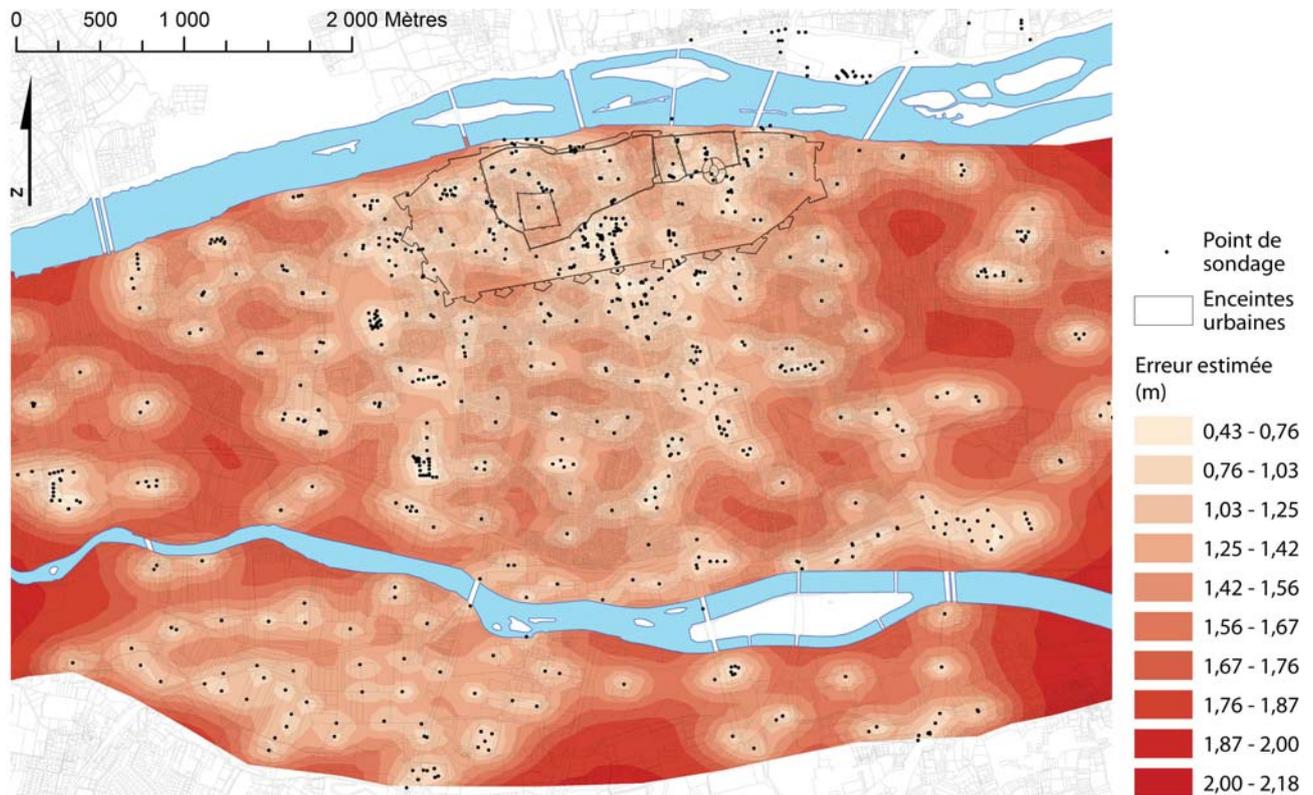


Fig. 14 : Estimation des erreurs standard du modèle géostatistique de l'épaisseur des dépôts anthropiques de la plaine alluviale de Tours.

Sainte-Anne avec le Cher d'après le cadastre napoléonien (Fig. 1) se situe plus à l'est de quelques centaines de mètres qu'elle ne le fut jusqu'à au moins la fin du premier millénaire après J.-C.

### 3.2. Stratigraphie et chronologie du remplissage alluvial dans l'espace urbanisé ancien

#### 3.2.1. Constitution d'un transect stratigraphique dans l'espace urbanisé ancien

Afin de préciser l'évolution morphologique et sédimentaire depuis le Pléistocène supérieur, un transect stratigraphique de 835 m de long a été construit d'après 13 sondages répartis le long de la rue Nationale entre les places Anatole France et Jean Jaurès (Fig. 15 ; Fig. 17). Ce transect permet de recouper le paléochenal UA (Fig. 11), observé à l'occasion de différentes opérations d'archéologie préventive. Il bénéficie d'informations lithostratigraphiques et de datations obtenues lors de prospections archéologiques ou géo-archéologiques.

Étant donné la variabilité spatio-temporelle de l'enregistrement sédimentaire inhérente au contexte fluvial (Macaire 1990), la stratigraphie du transect a été établie sur la base de 9 unités constituées de différents faciès lithologiques. La chronologie et la morphologie du remplissage alluvial ont pu être précisées par les datations faites sur les sondages situés sur le transect. Concernant le paléochenal UA, toutes les datations obtenues sur son linéaire ont été utilisées.

#### 3.2.2. Distribution et interprétation des âges et des unités stratigraphiques sur le transect

Au-dessus du substrat crétacé, les plus anciennes alluvions ont été mises en évidence dans la partie sud du transect : ce sont des dépôts sablo-graveleux et sableux mis en place au Weichsélien avant 20610-17530 OSL BP (Fig. 17, unité 1). Ils témoignent d'un milieu de sédimentation à forte énergie associé à un chenal actif proche d'un système alluvial en tresse. Sur l'unité 1 reposent des dépôts plus fins, sableux à matrice silto-argileuse et silto-argileux, dont la mise en place a débuté avant et s'est pour-

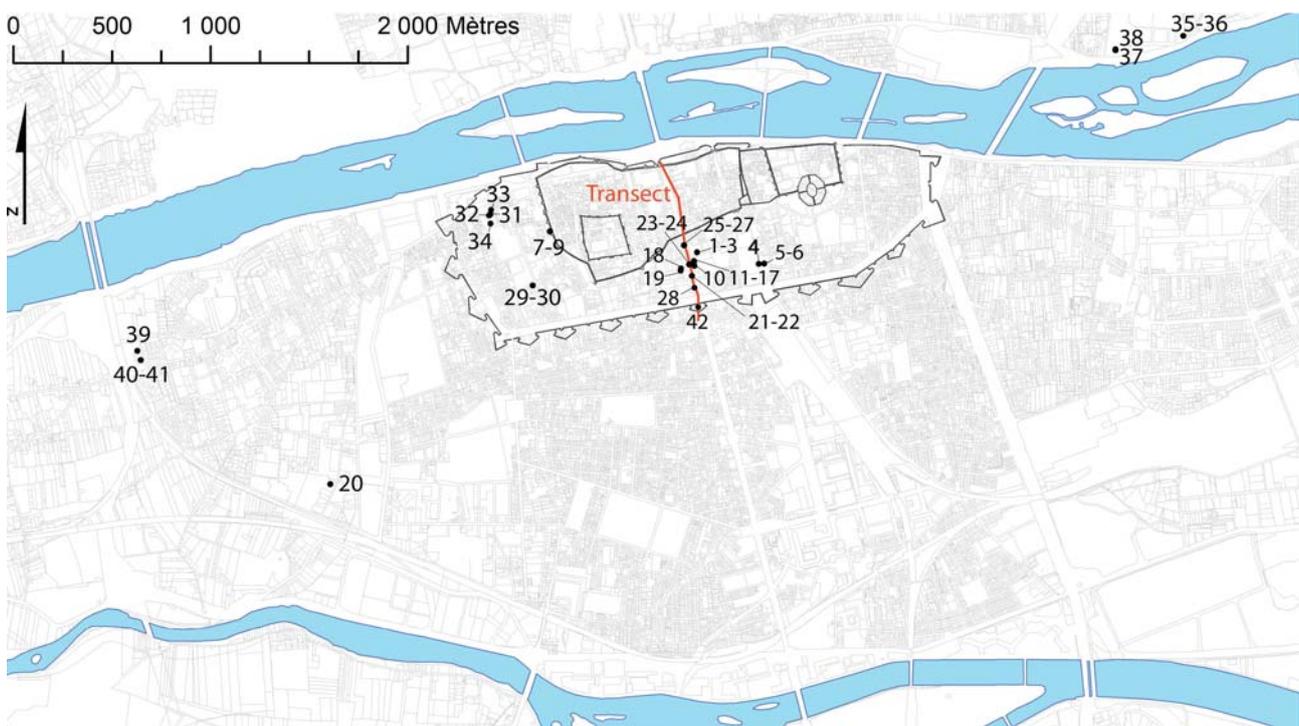


Fig. 15 : Localisation des échantillons datés par 14C et OSL dans la plaine alluviale de Tours. La correspondance des numéros de datations est indiquée dans les Tab. 1 et 2. Le tracé du transect stratigraphique réalisé dans l'espace urbanisé ancien est figuré par un trait rouge.

suivie après 20610-17530 OSL BP, c'est-à-dire à la fin du Pléniglaciaire weichsélien supérieur (Fig. 17, unité 2). Les sédiments de l'unité 2 témoignent d'un contexte de dépôt plus calme relativement à ceux de l'unité 1, telle une plaine d'inondation assez proximale. La topographie de la surface du toit de l'unité 2 est irrégulière.

Dans la partie sud du transect, les alluvions de l'unité 1 sont en contact latéral avec des alluvions fines et organiques de l'Holocène moyen (Fig. 17, unités 4 et 5). Ceci implique que les dépôts des unités 1 et 2 ont été incisés par un paléochenal à une ou plusieurs reprises après 20610-17530 OSL BP et avant la mise en place des premiers dépôts holocènes (avant 11750-11328 cal BP). Similairement, dans la partie nord du transect, des dépôts sableux et sablo-graveleux sont au contact de dépôts fins et organiques de l'Holocène moyen au sud et sableux de l'Holocène supérieur au nord. Compte tenu de la similarité des contacts dans les parties nord et sud du transect, ces dépôts sableux et sablo-graveleux ont été attribués à l'unité 1, mais ils pourraient également correspondre à l'unité 2, voire aux deux.

Les plus anciennes alluvions holocènes datées (Fig. 17, unité 4) se sont mises en place dès 11750-11328 cal BP et 11744-11238 cal BP dans un paléochenal creusé dans le substrat rocheux, jusqu'à la cote de 39 m NGF sur le site du palais des congrès (DUBANT 1993 : Pl. 69 ; VIVENT 1998 : 43) (Fig. 1, C). Cela implique au moins une phase d'incision du substrat après 20610-17530 OSL BP et avant 11750-11328 cal BP. Les dépôts silto-argilo-sableux organiques à passées silto-argileuses et tourbeuses de l'unité 4 indiquent un contexte hydrodynamique calme, avec cependant des épisodes relativement plus dynamiques permettant les apports sableux : ce milieu pourrait correspondre à celui d'un chenal secondaire abandonné et épisodiquement reconnecté au chenal principal. Ces dépôts reposent directement sur le substrat crétacé dans sa partie la plus surcreusée (vers 39 m NGF), mais sur le flanc sud du paléochenal, à des cotes altimétriques plus élevées (jusqu'à 43 m NGF), ils recouvrent une couche sablo-graveleuse de quelques décimètres d'épaisseur, non datée, constituant l'unité 3 (Fig. 17). La nature plus grossière des sédiments de l'unité 3 montre un contexte hydrodynamique plus dynamique peu compatible avec l'environnement de dépôt des alluvions de l'unité 4. De plus, l'unité 3 est encadrée dans les unités 1 et 2 et recouverte par l'unité 4, ce qui suggère qu'elle ait été mise en place après 20610-17530 OSL BP et avant 11750-11328 cal

BP, peut-être au Tardiglaciaire, lors d'une phase de sédimentation comprise entre deux phases d'incision, permettant son dépôt jusqu'à la cote d'au moins 43 m NGF.

Les dépôts de l'unité 4 ont pu se mettre en place au moins jusqu'à 9550-9453 cal BP dans le paléochenal, avec une cote minimum de 43,5 m NGF. Après cette date, un hiatus pollinique (VIVENT 1998 : 28 ; VISSET 2002 : 145 ; VISSET 2011) et chronologique (Fig. 16) a été mis en évidence jusqu'avant 7161-6749 cal BP, à l'aplomb de la partie la plus surcreusée du substrat crétacé, et avant 6310-5339 cal BP à l'aplomb des flancs de ce surcreusement. Après ces dates, des dépôts silto-argileux et tourbeux à passées silto-argilo-sableuses se sont mis en place (Fig. 17, unité 5), reflétant un milieu de sédimentation plus calme que lors du dépôt de l'unité 4 et très caractéristique d'un chenal abandonné. Ces données indiquent clairement l'existence d'un hiatus sédimentaire lié à d'une phase d'incision postérieure à 9550-9453 cal BP et antérieure à 7161-6749 cal BP, jusqu'à une cote proche mais supérieure à celle de l'incision tardiglaciaire probable.

Les plus anciens sédiments de l'unité 5 se sont mis en place dès 7161-6749 cal BP dans la partie incisée la plus profonde au sein des dépôts de l'unité 4, approximativement à l'aplomb du surcreusement maximal dans le substrat crétacé. L'accrétion sédimentaire progradant latéralement dans le paléochenal explique les variations d'âge à la base de cette unité (7161-6749 cal BP à 5257-4164 cal BP). L'unité 5 s'est mise en place au moins jusqu'à 4083-3339 cal BP (Tab.1, no 1), date après laquelle le comblement fin et organique du paléochenal s'est achevé vers la cote de 45,3 m NGF dans le secteur recoupé par le transect.

Après 4083-3339 cal BP et avant 2713-1868 cal BP, des sédiments sableux et sablo-graveleux constituant l'unité 6 se sont mis en place après incision des dépôts de l'unité 5 (Fig. 17). Le comblement s'est fait dans un petit chenal peu profond (entre les cotes 43,7 et 45,5 m NGF) et de largeur indéterminée sur le transect, en contexte de fait hydrodynamique. Dans la partie nord du transect, des sédiments sablo-graveleux à dominante sableuse assez similaires et mis en place à des cotes altimétriques proches ont été interprétés comme appartenant à l'unité 5 (Fig. 17).

Les sédiments des unités 1, 5 et 6 sont scellés par des dépôts sableux et ponctuellement silto-argileux constituant l'unité 7 (Fig. 17). Le sable est plus grossier dans le secteur proche du chenal

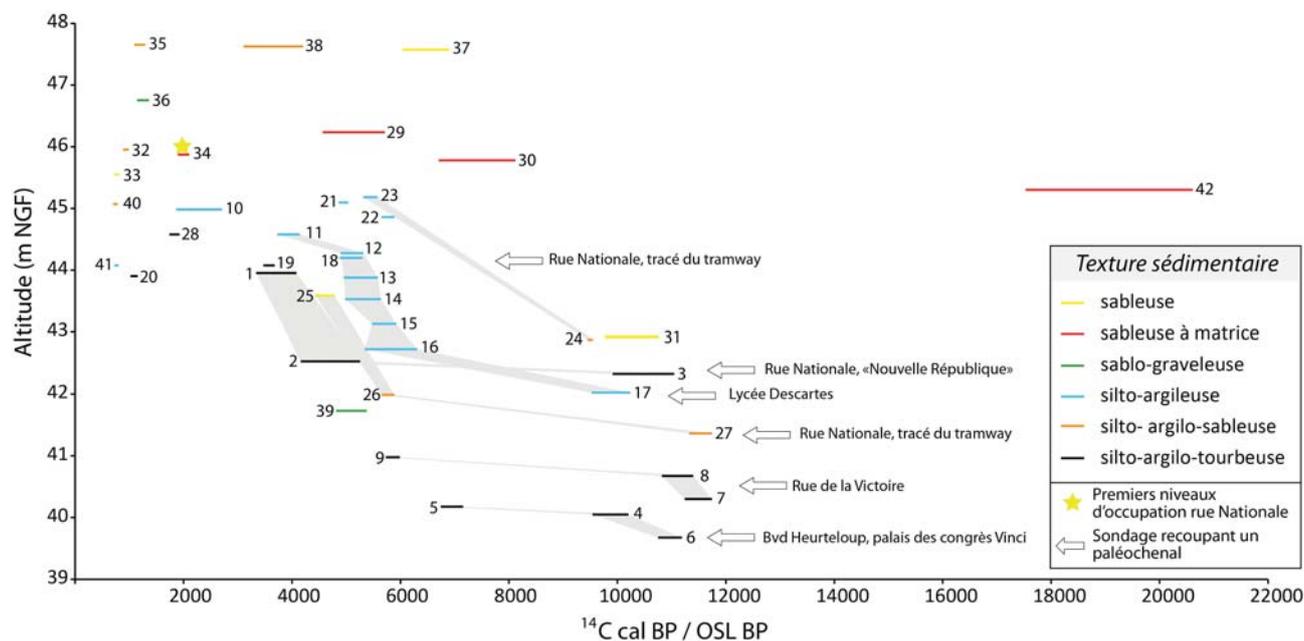


Fig. 16 : Répartition chronologique, altimétrique et lithologique des échantillons datés par  $^{14}\text{C}$  (n°1 à 28) et OSL (n°29 à 42) dans la plaine alluviale de Tours. La correspondance des numéros de datations est indiquée dans les Tabl. 1 et 2.

actuel de la Loire, en partie nord du transect, et plus fin plus au sud. La nature de ces sédiments et la forme relativement plane de leur toit suggèrent qu'ils correspondent à des dépôts de plaine d'inondation proximale au chenal actif, dont la mise en place a été favorisée localement par une rupture de la levée naturelle (Fig. 6, D). Dans certains secteurs plus déprimés, comme vers le lycée Descartes, les faciès sont plus riches en fraction silto-argileuse. Ces dépôts, mis en place après 4083-3339 cal BP, dès 2713-1868 cal BP (Tabl. 1, n° 10 ; Fig. 15, n° 10 ; Fig. 16, n° 10) et potentiellement jusqu'à la création de l'agglomération antique dans la première moitié du 1<sup>er</sup> s. ap. J.-C., manquent dans d'autres secteurs de l'espace urbanisé ancien, comme par exemple dans le secteur du palais des congrès (Fig. 1, C).

Dans la partie sud du transect, des sédiments silto-argilo-tourbeux anthropisés (céramique gallo-romaine, faune, bois, galets) constituant l'ensemble 8 se sont mis en place vers 1929-1740 cal BP jusqu'à la cote d'environ 44,75 m NGF (David *et al.* 2013 : 62-67) dans une dépression encaissée dans les dépôts weichséliens des unités 1 et 2 (Fig. 17). Cette dépression est apparentée à un petit chenal de 20 à 30 m de large, telle une boire, dont la profondeur et la stratigraphie complète sont inconnues. Ces dépôts se sont mis en place dans

un milieu calme et inondé, avec un apport d'éléments anthropiques, témoignant de l'existence de cette boire lors des premières phases d'occupation gallo-romaines. Une observation ponctuelle dans une fouille boulevard Béranger, à proximité vers l'O/S/O (Fig. 17), a montré des dépôts similaires traversés de pilotis (PHILIPPON 1948). Ceci suggère la continuité plus à l'ouest du tracé de la boire. La largeur relativement importante de cette structure exclut qu'elle soit issue d'un creusement anthropique et suggère plutôt une dépression naturelle initiale. Cependant, la forme très irrégulière du toit de l'unité 2 au sud de la boire pourrait être issue d'un d'aménagement anthropique de sa berge sud, aménagement indiqué par la présence de pilotis sur le site des fouilles du boulevard Béranger. Après 1929-1740 cal BP, la boire a été remblayée.

Les dépôts anthropiques ont été mis en place jusqu'à la période actuelle et sont particulièrement épais en bordure du chenal de la Loire, en lien notamment avec l'aménagement des berges aux périodes contemporaine et moderne. L'épaisseur des dépôts anthropiques décroît assez régulièrement vers le sud du transect, jusqu'à la limite sud d'extension de l'unité 7. Au-delà, l'épaisseur des dépôts anthropiques est variable, en lien avec l'irrégularité de la surface du toit des unités 1, 2 et 8.

#### 4. ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE ET SÉDIMENTAIRE DE LA PLAINE ALLUVIALE ET FACTEURS FORÇANT

Le croisement des modèles géostatistiques et des données stratigraphiques présentés ci-dessus permet de restituer les grands traits de l'évolution morphologique et sédimentaire de la plaine alluviale tourangelle depuis le Weichsélien, en lien avec des forçages climatique et anthropique. La plaine alluviale a évolué durant les périodes weichsélienne et holocène. Pour l'Holocène, une distinction a été faite entre périodes antérieure et postérieure à la création de l'agglomération antique de Tours, en contextes respectivement "peu ou pas anthropisés" et "anthropisés".

##### 4.1. Période weichsélienne

###### 4.1.1. Dernière grande phase d'incision weichsélienne en fond de vallée

L'essentiel des formes du relief du toit des substrats rocheux crétacé et éocène, notamment les contrastes d'altitude entre les secteurs plus élevés (interfluve entre Loire et Cher en amont du tracé connu du ruau Sainte-Anne) et moins élevés (interfluve entre Loire et Cher en aval du tracé connu du ruau Sainte-Anne, secteur au sud du tracé actuel du Cher), a pu être en partie modelé lors d'une phase d'incision majeure de la vallée au Weichsélien, avant 20610-17530 OSL BP (Tabl. 2, n° 42). L'incision du substrat rocheux s'est néanmoins poursuivie dans des chenaux actifs jusqu'à la transition Tardiglaciaire-Holocène, tels le ruisseau de l'Archevêque et le paléochenal UA (Fig. 4, A ; Fig. 17), voire jusqu'à la période actuelle dans le chenal de la Loire. Cette incision s'est donc développée avant le dernier maximum glaciaire et probablement avant le Pléniglaciaire weichsélien supérieur (Fig. 2), ce qui diffère de précédentes hypothèses (CARCAUD *et al.* 2002 : 73 ; BURNOUF *et al.* 2003 : 167). Une grande phase d'incision antérieure à l'apparition de vraies conditions climatiques périglaciaires, c'est-à-dire probablement avant le Pléniglaciaire weichsélien moyen, a été montrée en Loire moyenne (CASTANET 2008 : 377) et en Europe du Nord-Ouest (VAN HUISSTEDEN, GIBBARD et BRIANT 2001 ; ANTOINE *et al.* 2007 : 2717-2719). Une autre phase d'incision a été généralement signalée en Europe du Nord-Ouest à la transition Pléniglaciaire weichsélien moyen-supérieur, vers 28 ka BP (MOL, VANDENBERGHE et KASSE 2000 : Fig. 10). La dernière grande phase d'incision weichsélienne du fond de

vallée à Tours pourrait s'être développée durant l'une de ces périodes. Néanmoins, dans la partie aval de la vallée de la Choisille qui conflue avec celle de la Loire juste en aval de Tours (Fig. 1), la dernière incision majeure du substrat crétacé s'est développée avant le Pléniglaciaire weichsélien moyen, probablement durant une période plus fraîche et humide du Début weichsélien ou du Pléniglaciaire weichsélien inférieur (MORIN 2011 : 399-400), ce qui implique une incision de magnitude au moins équivalente à la même période en Loire tourangelle. Cette phase d'incision a pu être relativement courte par rapport aux périodes de dépôt qui l'encadrent (VANDENBERGHE 2008), et la forme du toit du substrat rocheux sous la ville de Tours est probablement polygénique.

La "montille" située dans la partie nord-est de la carte (Fig. 6, A), dont l'altitude maximale (50,7 m NGF) se situe à environ 5 m au-dessus de la moyenne des altitudes des alluvions (45,6 m NGF) et à environ 10 m au-dessus du lit mineur du fleuve (environ 41 m NGF au nord de l'amphithéâtre), est le résidu d'une basse terrasse. En Loire tourangelle, les terrasses Fx sont situées à des cotes similaires (MACAIRE 1983 : 186), mais il n'est pas établi que les sédiments soient contemporains. La dernière grande phase d'incision weichsélienne en fond de vallée, qui a érodé les dépôts fluviaux antérieurs jusqu'au substrat rocheux, a probablement épargné localement les dépôts formant cette montille de basse terrasse. Ceci semble confirmé par la différence des cotes altimétriques entre le point le plus haut de la montille, à 50,7 NGF au niveau de l'amphithéâtre, et celle des dépôts du Pléniglaciaire weichsélien supérieur (Fig. 17, unité 2), à 45,3 m NGF au niveau de la place Jean Jaurès (Fig. 15, n° 42). Cette différence montre que l'accrétion de la montille et sa mise en relief ultérieure se sont effectuées à des périodes antérieures à 20610-17530 OSL BP. En effet, les dépôts sableux de moyenne énergie constituant la montille jusqu'à son sommet (GAY-OVEJERO, MACAIRE et SEIGNE 2007 : Fig. 3) indiquent un niveau de base du fleuve plus élevé que celui ayant prévalu à la fin du Pléniglaciaire weichsélien supérieur et à l'Holocène (Fig. 15). De plus, il n'y a pas dans l'évolution morphologique et sédimentaire de la Loire d'indice d'une incision ayant entraîné un destockage sédimentaire aussi conséquent en fond de vallée entre 20610-17530 OSL BP et le Tardiglaciaire. Ceci diffère de précédentes hypothèses suggérant une mise en relief de la "montille" à Tours durant le Weichsélien supérieur (CARCAUD *et al.* 2002 : 73) ou l'Holocène (GAY-OVEJERO, MACAIRE et SEIGNE 2007). En revanche, ces données sont plus en accord avec les

hypothèses concernant la mise en relief des basses terrasses en Loire moyenne : Pléniglaciaire inférieur (CASTANET 2008 : 375), avant le Pléniglaciaire weichsélien supérieur (MACAIRE 1983 : 186, 194). D'un point de vue morphologique, la montille ne paraît pas particulièrement superposée à un haut fond du substrat rocheux, dont la cote sous-jacente est variable (Fig. 4, A et D ; Fig. 6, A).

Différentes hypothèses peuvent être formulées pour expliquer le fort surcreusement du substrat rocheux observé dans l'interfluve à l'ouest du tracé connu du ruau Sainte-Anne (Fig. 4). Il pourrait avoir une origine morpho-structurale : le resserrement de la vallée à cet emplacement a pu conduire à concentrer les écoulements et à augmenter la puissance fluviale<sup>10</sup>, favorisant ainsi l'érosion dans un contexte d'incision majeure. L'hypothèse d'une puissance fluviale plus importante, au moins durant les épisodes de crues, n'est cependant pas confortée par le modèle d'épaisseur des alluvions silto-argileuses et tourbeuses qui sont relativement épaisses dans ce secteur (Fig. 11). Le surcreusement pourrait éventuellement avoir une origine structurale plus directe, en relation avec le rejeu néotectonique du panneau effondré du calcaire éocène dans ce secteur (MACAIRE et MIGNOT 1979). Il est peu probable qu'il s'agisse d'un contrôle lithologique, car si toutes les formations carbonatées tourangelles sont fissurées et plus ou moins perméables (COUDERC 1968), les calcaires crétacés plus sableux et tendres sont plus sujets à l'érosion mécanique que le calcaire lacustre, comme le montre le rétrécissement de la vallée dans ce secteur. L'hypothèse néotectonique, impliquant une légère subsidence antérieure au comblement de la vallée par les alluvions weichséliennes et holocènes n'est donc pas à exclure. L'épaississement des alluvions silto-argileuses et tourbeuses dans ce secteur, qui témoigne d'une chute de la capacité de transport sédimentaire associée, pourrait s'expliquer par la diminution du gradient hydraulique dans cette zone affaissée. Cette hypothèse est confortée par la mise en évidence d'une activité néotectonique dans des zones proches de la vallée de la Loire moyenne, comme dans le secteur de l'anticlinal d'Amboise (CHAMPION, MAILLARD et CARIO 1971). L'absence d'une zone déprimée significative sur le modèle d'altitude du toit des alluvions (Fig. 6)

10. La puissance fluviale permet d'estimer la capacité de transport sédimentaire d'un cours d'eau, en fonction des conditions hydrologiques, de la morphologie générale (pente et forme de la vallée) et locale (style fluvial) (LATAPIE 2011 : 35).

montre que la subsidence n'a pas perduré durant les périodes d'alluvionnement weichséliennes et holocènes. Cela traduit l'impact majeur de la sédimentation sur la morphologie relativement à la néotectonique dans un contexte favorable au dépôt.

#### 4.1.2. Accrétion sédimentaire weichsélienne avant le Tardiglaciaire

Après la dernière grande phase d'incision weichsélienne, le remplissage sédimentaire de la plaine alluviale a débuté avant 20610-17530 OSL BP, probablement durant le Pléniglaciaire weichsélien moyen à supérieur, ce qui diffère de précédentes hypothèses (CARCAUD *et al.* 2002 : 73 ; BURNOUF *et al.* 2003 : 167). Les alluvions en contact du substrat rocheux dans l'ensemble du fond de vallée sont généralement sablo-graveleuses, comme au niveau de la place Jean Jaurès (Fig. 17, unité 1), ou sableuses. Ces faciès et leur distribution impliquent une sédimentation dans des systèmes fluviaux à chenaux multiples, caractéristiques des environnements périglaciaires. Il pourrait s'agir de systèmes en tresse, comme suggéré par différents auteurs (BLIN 1998 : 90 ; CARCAUD *et al.* 2002 : 73 ; BURNOUF *et al.* 2003 : 167), ou encore des systèmes à chenaux en tresse anastomosés (Bridge 2003 : 149-152). Cette dernière hypothèse est confortée par les modèles d'altitude du toit du substrat rocheux et des alluvions qui montrent clairement l'existence de couloirs communiquant entre eux par des talwegs (Fig. 4 et Fig. 6). Les dépôts sablo-graveleux et sableux sont ubiquistes à la base du comblement sédimentaire des plaines inondables en Europe du Nord-Ouest, où ils ont été attribués à différentes périodes du Pléniglaciaire weichsélien sans autre précision (HAESAERTS 1984 : 22 ; VAN HUISSTEDEN, VAN DER VALK et VANDENBERGHE 1986 : 308-312 ; BROWN et KEOUGH 1992 : 437 ; ANTOINE 1997 : 95-97 ; HOUBEN *et al.* 2001 : 252 ; PASTRE *et al.* 2003 : 2178 ; PIANA *et al.* 2009 : 81). En Loire moyenne, ces dépôts ont été attribués au Pléniglaciaire weichsélien moyen (CASTANET 2008 : 375-377 ; MORIN *et al.* 2011 : 356-357), supérieur (MACAIRE 1981 : 226-229 ; MACAIRE 1983 : 186-187), voire à la première partie de l'Holocène (MACAIRE *et al.* 2002 : 1003).

Au-dessus des dépôts du Pléniglaciaire weichsélien moyen à supérieur de l'unité 1, les sédiments sableux à matrice silto-argileuse de l'unité 2, recouverts par un sondage au niveau de la place Jean Jaurès, se sont mis en place dès 20610-17530 OSL BP (Fig. 17), aux environs du dernier maximum glaciaire (Fig. 2). La nette différence de granularité de

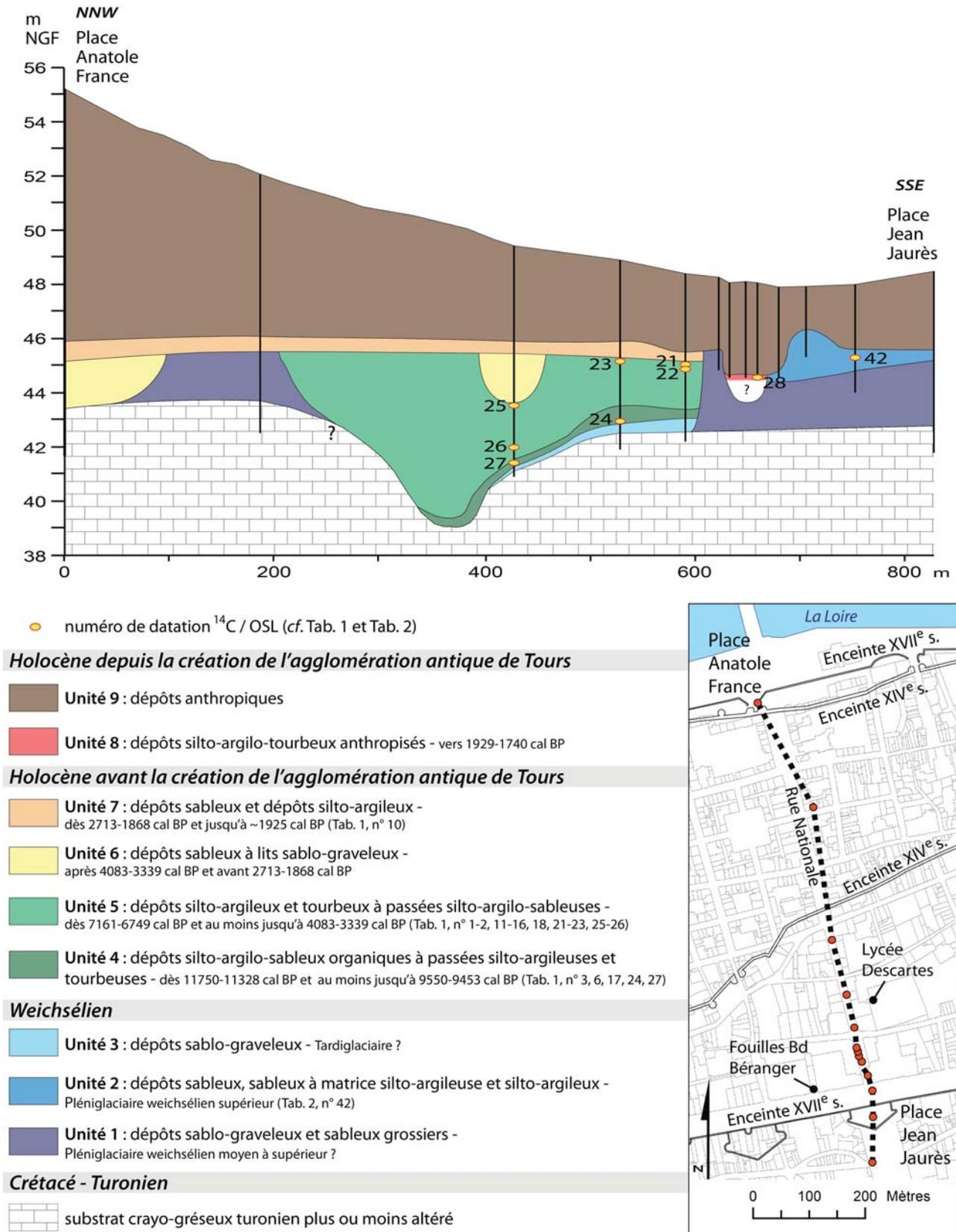


Fig. 17 : Transect lithostratigraphique entre les places Anatole France et Jean-Jaurès à Tours.

ces dépôts avec les dépôts sous-jacents peut suggérer une modification du système fluvial en lien avec le contexte climatique froid et sec à cette époque (HUIJZER et VANDENBERGHE 1998 : 405-411). Cependant, cette observation ponctuelle ne donne pas une vue suffisante du système fluvial à cette époque. De plus, en Loire amont et moyenne, le Pléniglaciaire weichsélien supérieur est caractérisé par le dépôt de sédiments de granularité grossière traduisant un milieu énergétique (COLLS *et al.* 2001 : 747 ; STRAFFIN et BLUM 2002 : 93 ; CASTANET 2008 : 380-387), excepté dans le dernier millénaire de cette période, vers 15-16 ka cal BP, durant lequel la sédimentation fluvio-éolienne sableuse apparaît dominante (CASTANET 2008 : 387-389). La différence de faciès entre les unités 1 et 2 au niveau de la place Jean Jaurès (Fig. 17) pourrait donc simplement résulter de l'évolution morphologique de ce secteur par migration des chenaux dans la plaine alluviale.

La Loire a manifestement été l'agent principal du comblement sédimentaire en fond de vallée au Weichsélien moyen et supérieur : les sédiments du ruisseau de l'archevêque, dans la moitié sud de l'interfluve, possèdent une signature minéralogique caractéristique de la Loire. Ils correspondent donc à un remaniement de dépôts ligériens constituant probablement l'essentiel de l'encaissant du ruau (DUBANT 1993 : 116). La plus grande partie des sédiments et formes fluviales de l'interfluve ont du se mettre en place au Weichsélien avant le Tardiglaciaire.

#### 4.1.3. Évolution morphologique et sédimentaire au Tardiglaciaire

Dans le paléochenal UA, les dépôts weichséliens des unités 1 et 2 et le substrat créacé ont été incisés après 20610-17530 OSL BP et avant la mise en place de l'unité 3 (Fig. 17). L'aspect lacunaire des données concernant le Tardiglaciaire dans la plaine alluviale tourangelle ne permet cependant pas de préciser davantage les événements à cette période.

Au Tardiglaciaire, le réchauffement climatique du Bölling (TAYLOR *et al.* 1993), apparu dès 15600 cal BP dans la chronozonation régionale (VISETT *et al.* 2005 ; VISETT, CYPRIEN et CARCAUD 2008), a induit une métamorphose fluviale, souvent associée à une phase d'incision des chenaux, largement reconnue sur la Loire moyenne et son bassin (CASTANET 2008 : 390-394 ; PIANA *et al.* 2009 : 81-82 ; MORIN *et al.* 2011 : 357), dans le Bassin parisien (ANTOINE 1997 : 97-99 ; PASTRE *et al.* 1997 : 297) et en Europe du Nord-Ouest (HAESAERTS 1984 : 22 ; TEBBENS *et*

*al.* 1999 : 71 ; MOL, VANDENBERGHE et KASSE 2000 : Fig. 10 ; GAO *et al.* 2007 : 205-206). Les prémices d'une rétractation des chenaux de la Loire et du Cher et d'une métamorphose fluviale est donc possible dès cette période en Touraine.

L'unité 3 (Fig. 16) pourrait être contemporaine du Dryas récent, période durant laquelle l'érosion des versants semble avoir été importante dans le bassin amont de la Loire, en lien avec un refroidissement et une baisse associée du couvert végétal (GAY, MACAIRE et COCIRTA 1998 : 311 ; NÉGREL *et al.* 2004 : 968 ; MACAIRE *et al.* 2010 : 509), avec une réactivation épisodique de chenaux et le dépôt de sédiments grossiers comme observé en Loire moyenne orléanaise (CASTANET 2008 : 395-399).

L'incision de l'unité 3 et du substrat avant 11750-11328 cal BP (Fig. 17) s'est vraisemblablement développée dans les chenaux alors actifs à la transition Tardiglaciaire-Holocène, comme déjà observé dans la plaine alluviale tourangelle (CARCAUD *et al.* 2002 : 73-75 ; BURNOUF *et al.* 2003 : 167) et plus généralement en Loire moyenne (CARCAUD 2004 ; CASTANET 2008 : 401-404), dans le Bassin parisien (ANTOINE 1997 : 101 ; PASTRE *et al.* 1997 : 300-301 ; DESCHODT 2002 : 152) et en Europe du Nord-Ouest (VANDENBERGHE *et al.* 1994 : 480 ; TEBBENS *et al.* 1999 : 71 ; MOL, Vandenberghe et Kasse 2000 : Fig. 10). Cette métamorphose fluviale est liée à l'oscillation climatique plus chaude accompagnant l'entrée dans l'Holocène. À Tours, cette période d'incision marque la rétractation des chenaux principaux de la Loire et du Cher, en partie nord et sud de la plaine alluviale, tandis que les chenaux secondaires, comme le paléochenal UA ou le ruisseau de l'Archevêque (Fig. 11) sont progressivement déconnectés. Au sud du tracé actuel du Cher, le toit du substrat nettement surcreusé (Fig. 4) montre bien le talweg dans lequel un chenal a pu se rétracter à la transition Tardiglaciaire-Holocène.

## 4.2. Période holocène avant les premières occupations humaines

### 4.2.1. Holocène inférieur

Suite à la métamorphose fluviale et à la rétractation des chenaux à la transition Tardiglaciaire-Holocène, un comblement silto-argilo-sableux organique à passées silto-argileuses et tourbeuses s'est effectué dans les chenaux en abandon, tel le paléochenal UA (Fig. 17, unité 4), et probablement le ruisseau de l'Archevêque. Ces dépôts se sont mis en place

dès 11750-11328 cal BP et au moins jusqu'à 9550-9453 cal BP. L'abandon des chenaux a été progressif, la présence d'une fraction sableuse assez abondante dans certains niveaux de l'unité 4 indiquant une reconnexion épisodique au chenal principal. L'abondance de matière organique dans les sédiments de chenaux abandonnés ou des plaines inondables au début de l'Holocène a déjà été mise en évidence à Tours (VIVENT 1998 ; CARCAUD *et al.* 2002 : 74) et a été observée ailleurs sur la Loire moyenne ou ses affluents (GARCIN *et al.* 1999 : 411 ; CASTANET 2008 : 405 ; PIANA *et al.* 2009 : 82 ; MORIN *et al.* 2011 : 357-358 ; VISET 2011), dans le Bassin parisien (ANTOINE 1997 : 101 ; PASTRE *et al.* 1997 : 301) et en Europe du Nord-Ouest (LEFÈVRE *et al.* 1993 : 21 ; TEBBENS *et al.* 1999 : 71). Les écoulements de la Loire sont restés actifs, mais confinés dans leur lit mineur, comme le montrent les dépôts sableux mis en place vers 10760-9780 OSL BP à 200 m au sud de l'actuel trait de rive gauche de la Loire (Tabl. 2, n° 31 ; Fig. 15, n° 31 ; Fig. 16, n° 31).

Entre 9550-9453 cal BP et 7161-6749 cal BP une phase d'incision s'est développée dans le paléochenal UA, montrant la reconnexion de ce dernier avec le chenal principal de la Loire. L'incision a en partie érodé les dépôts du début de l'Holocène. Elle est contemporaine d'une phase de regain d'activité fluviale caractérisée par une hausse de la fréquence et de la magnitude des inondations notée sur la Loire moyenne (CASTANET 2008 : 323, Fig. 164), ses affluents (PIANA *et al.* 2009 : 82), et plus généralement en Europe (STARKEL 1999). Dans d'autres secteurs de la Loire moyenne ou du Bassin parisien, cette période correspond à un regain du détritisme terrigène ou une incision (PASTRE *et al.* 2002 : 36-37 ; MORIN *et al.* 2011 : 360). En Touraine, les séquences polliniques de la fin du Boréal et du début de l'Atlantique sont souvent tronquées, montrant bien que ce regain d'activité fluviale a entraîné une lacune sédimentaire (VISET 2011). Dans d'autres secteurs de la Loire moyenne, l'incision entre le Boréal et l'Atlantique n'a pas été enregistrée dans des chenaux abandonnés de taille plus modeste, et la sédimentation fine et organique a pu se poursuivre durant la majeure partie de l'Holocène (GARCIN *et al.* 1999 : 411).

À cette époque, en bordure du chenal de la Loire, une levée naturelle (Fig. 6, B) a pu se constituer (BURNOUF *et al.* 2003 : 167). Des ruptures de levées se sont effectuées, comme l'attestent les sédiments silto-argilo-sableux mis en place au moins vers 8120-6700 OSL BP (Tabl. 2, n° 30 ; Fig. 16, n° 30) à l'ouest de l'espace urbanisé ancien (Fig. 6, C ; Fig. 15, n° 30).

#### 4.2.2. Holocène moyen à supérieur

Dès 7161-6749 cal BP, le paléochenal UA a été déconnecté du chenal principal, comme le montre la mise en place des dépôts silto-argileux et tourbeux à passées silto-argilo-sableuses de l'unité 5 (Fig. 17). Dans ce contexte hydrodynamique calme, la sédimentation s'est poursuivie au moins jusque vers 4083-3339 cal BP, sans interruption décelable, et le paléochenal s'est complètement comblé. Ceci indique une relative stabilité morphologique de la plaine alluviale durant plusieurs millénaires, avec une activité de la Loire essentiellement restreinte à son lit mineur. Cela suggère également un niveau moyen du fleuve relativement bas à cette période, limitant les apports sédimentaires latéraux et favorisant la déconnexion et le colmatage fin et organique du paléochenal. Cette tendance générale à la baisse de l'activité fluviale a déjà été proposée en Loire moyenne pour l'Holocène supérieur à moyen (Castanet 2008 : 405-407 ; ARNAUD-FASSETTA *et al.* 2010 : 98). En bordure des chenaux de la Loire et du Cher, l'accrétion des levées naturelles évoquées pour l'Holocène inférieur a pu se poursuivre (Fig. 6, B), ainsi que la sédimentation sableuse à matrice silto-argileuse liée aux ruptures de levées, comme vers 5710-4570 OSL BP (Tabl. 2, n° 29 ; Fig. 15, n° 29 ; Fig. 16, n° 29). L'évolution morphologique de l'interfluve est néanmoins restée probablement limitée.

Après 4083-3339 cal BP et avant 2713-1868 cal BP, le petit chenal comblé ultérieurement par des alluvions essentiellement sableuses et sablo-graveleuses de l'unité 6 s'est incisé dans l'unité 5 (Fig. 17). Cela traduit un regain de la dynamique fluviale entraînant des conséquences morphologiques dans la plaine d'inondation. Un tel regain a été observé dès 4500 cal BP dans d'autres secteurs de la Loire moyenne (CARCAUD *et al.* 2002 : 76 ; GARCIN *et al.* 2006 : 228 ; CASTANET 2008 : 407-411 ; ARNAUD-FASSETTA *et al.* 2010 : 100) ou du Bassin parisien (PASTRE *et al.* 1997 : 294). Il a été mis en relation avec un changement du climat, plus humide à cette époque (GUIOT 1987 : 116-117), peut-être accentué par l'impact anthropique sur les versants de la Loire supérieure (ARNAUD-FASSETTA *et al.* 2010 : 100). L'anthropisation a en effet eu pour conséquence d'augmenter de manière significative l'érosion des versants dans ce secteur après 5300 cal BP (MACAIRE *et al.* 2010 : 512-513), favorisant les apports sédimentaires en aval. L'absence de données chronologiques plus précises ne permet pas de cor-

réler de manière fiable les observations effectuées à Tours avec celles faites ailleurs en Loire moyenne.

Après 2713-1868 cal BP et jusqu'à la création de la ville antique, les alluvions weichséliennes et holocènes ont été recouvertes par des dépôts sableux et ponctuellement silto-argileux de l'unité 7 (Fig. 17), probablement dans une plaine d'inondation à proximité du chenal actif. Cette observation, effectuée à l'emplacement du transect (Fig. 15 ; Fig. 17), ne se vérifie pas dans l'ensemble de l'espace urbanisé ancien. Par exemple, sur le site du palais des congrès (Fig. 1, C), le toit de l'unité 5 est légèrement déprimé et directement scellé par des dépôts anthropiques, sans recouvrement sableux similaire à l'unité 7, ni indice de décapage anthropique de cette dernière unité (DUBANT 1993 : Pl. 69 ; VIVENT 1998 : 43). Ceci pourrait être dû à la configuration morphologique de la plaine alluviale en rive gauche de la Loire dans ce secteur, la montille (Fig. 6, A) constituant un obstacle à la propagation latérale des crues et des sédiments vers les zones situées plus au sud. De même, le ruisseau de l'Archevêque n'a pas été recouvert et a pu préserver un fonctionnement hydrologique, même restreint, jusqu'à son remblaiement au XIX<sup>e</sup> s. La couverture de l'unité 7 n'est donc pas ubiquiste dans toute la plaine alluviale : elle est probablement restée proche du chenal actif.

#### 4.3. Période holocène à partir des premières occupations humaines

Dans l'espace urbanisé ancien, les reliefs hérités de l'évolution quaternaire du fond de vallée sont modestes, mais à considérer dans un environnement soumis à l'aléa hydrologique. Les premières occupations se trouvent à la fois sur des hauts fonds, comme l'amphithéâtre antique (Fig. 6, A) pour lequel la montille a été mise à profit, et des zones plus basses, comme l'établissement gaulois (Fig. 6, N) ou les thermes antiques (Fig. 6, O). Cela confirme bien qu'il n'existe pas de sites favorables *a priori* pour l'installation des communautés humaines le long des berges des fleuves (BURNOUF *et al.* 2001 : 8-9).

En partie sud de l'espace urbanisé ancien, la mise en place des sédiments tourbeux anthropisés de l'unité 8 s'est effectué dans une boire au moins vers 1929-1740 cal BP (Fig. 17). Cette boire pourrait correspondre à un chenal ayant déjà fonctionné au cours de l'Holocène. Elle pourrait aussi être un héritage morphologique weichsélien déprimé, mis en eau à la faveur d'une remontée du niveau moyen

de la nappe phréatique des alluvions au cours de l'Holocène supérieur.

Les premières constructions en matériaux périssables correspondant à la ville ouverte antique ont été remplacées dans la seconde moitié du I<sup>er</sup> s. ap. J.-C. par des constructions en pierre ou sur solin maçonné (JOUQUAND 2007 : 333-334). Cette phase de reconstruction a été systématiquement précédée d'un remblai d'exhaussement pouvant atteindre plus d'1 m d'épaisseur (*ibid.* ; LORANS *et al.* à paraître) et indubitablement lié à la nécessité de se protéger de l'aléa hydrologique ou plus vraisemblablement d'une remontée progressive du toit de la nappe phréatique des alluvions, peu profonde à cette époque (DRIARD 2007). Cette remontée ne serait pas en relation avec un forçage climatique, car la période gallo-romaine ne fut pas spécifiquement humide (BÜNTGEN *et al.* 2011 : Fig. 4). Elle a pu être induite par une forte accrétion sédimentaire dans les chenaux actifs, entraînant un exhaussement des lits fluviaux et subséquemment une élévation générale de la surface piézométrique (LORANS *et al.*, à paraître).

Cette élévation de la surface piézométrique, liée à accrétion sédimentaire dans chenaux actifs, a pu être accentuée par l'impact anthropique. En effet, le déclin de l'aunaie lié à l'impact anthropique dans la plaine alluviale tourangelle s'est amorcé dès l'âge du Fer (VISSET 2011), et sa quasi-disparition est manifeste au Haut-Empire (VIVENT 1998 : 65). En réduisant l'évapotranspiration et en favorisant le ruissellement, cette disparition a pu contribuer à la remontée des plans d'eau en fond de vallée (SMITH et CHARMAN 1988 ; CHAPMAN et ROSE 1991 ; MACAIRE *et al.* 2006 : 655-656 ; MORIN *et al.* 2011 : 359). Ce phénomène pourrait aussi avoir été favorisé localement par les constructions civiles et monumentales car elles ont nécessité l'exploitation des ressources proches (bois, carrières).

Dans l'espace urbanisé ancien ainsi que dans de nombreux secteurs de la plaine alluviale, l'épaisseur des dépôts anthropiques est généralement supérieure à celle des dépôts alluviaux sous-jacents, bien que ces derniers se soient mis en place sur des durées bien supérieures. Il existe actuellement des contrastes d'altitude importants entre des secteurs plus élevés, ayant été soumis à une urbanisation soit très précoce (ex : espace urbanisé ancien dès la première moitié du I<sup>er</sup> s. ap. J.-C.), soit très récente (ex : quartiers des Deux Lions ou des Rives du Cher dans le dernier tiers du XX<sup>e</sup> s.), et des secteurs moins élevés où l'urbanisation s'est soit effectuée à l'époque contemporaine (ex : quartier des Prébendes au XIX<sup>e</sup> s. ; CHAILLOT 1959 : 393), soit est quasi absente (ex : plaine de la

Gloriette) (Fig. 1). Ces reliefs ne sont pas induits par la morphologie originelle de la plaine alluviale mais par l'épaisseur des dépôts anthropiques (Fig. 13), en lien localement avec les modalités d'occupation et d'urbanisation, ce qui confirme de précédentes hypothèses (GALINIÉ 1981 : 36).

Au cours du premier millénaire après J.-C., certaines périodes furent probablement plus propices que d'autres pour effectuer les gains de la ville sur la Loire (GALINIÉ *et al.* 2003b). En particulier, le chenal de la Loire s'est déplacé latéralement à l'ouest de l'espace urbanisé ancien : il a progressé vers le sud, probablement aux environs du IV<sup>e</sup> s., puis vers le nord avant les IX<sup>e</sup>-XI<sup>e</sup> s. (GARDÈRE 2011 : 62-65).

À l'échelle de la Loire moyenne, l'édification d'ouvrages de protection des berges dès le haut Moyen Âge a contribué à la stabilité morphologique de la plaine alluviale : l'évolution morphologique a été depuis le plus souvent limitée au lit mineur contraint (barres sédimentaires, îles), tandis que la fréquence et la magnitude des grandes inondations se sont accrues (GARCIN *et al.* 2006). Dans la plaine alluviale tourangelles, seuls les aménagements anthropiques (levées, routes, canal...) semblent avoir changé sensiblement le paysage de l'interfluve entre le début du XVII<sup>e</sup> s. et la moitié du XIX<sup>e</sup> s. (DUBANT 1993 : 67-71).

## CONCLUSION

Cette étude a permis d'exploiter de très nombreuses données du sous-sol en couplant les informations livrées par les modèles géostatistiques et celle des études géomorphologiques plus traditionnelles. Elle a précisé l'évolution morphologique et sédimentaire de ce secteur de la Loire moyenne du Weichsélien jusqu'à nos jours, le cadre physique des premières occupations humaines, mais aussi le rôle des modalités d'urbanisation dans la morphologie actuelle du fond de vallée.

Après la dernière incision du substrat rocheux, antérieure à la fin du Pléniglaciaire weichsélien supérieur, la mise en place de dépôts grossiers s'est effectuée dans des systèmes à chenaux multiples, sur toute la largeur de la plaine alluviale, probablement dès le Pléniglaciaire weichsélien moyen et au cours du Pléniglaciaire weichsélien supérieur. Ces dépôts ont constitué les principales formes du relief de l'interfluve entre Loire et Cher avant son urbanisation. Une phase d'incision puis d'alluvionnement grossier dans les chenaux est probable au Tardiglaciaire. À la transition Tardiglaciaire-Holocène, des chenaux ont de nouveau été incisés. L'incision a entraîné un retrait

de la Loire et du Cher approximativement au niveau de leur lit mineur actuel, au nord et au sud de la plaine alluviale, et l'abandon progressif des chenaux secondaires, comme celui situé dans l'espace urbanisé ancien et le ruisseau de l'Archevêque. Dans ces chenaux partiellement abandonnés, une sédimentation à forte composante organique s'est développée dès le début de l'Holocène, tandis que le lit mineur des cours principaux restait actif. Entre 9550-9453 cal BP et 7161-6749 cal BP, une reconnexion des chenaux secondaires, accompagnée d'une phase d'incision modérée, a en partie érodé les dépôts holocènes antérieurs. Après cette incision et jusque vers 4083-3339 cal BP, une sédimentation fine et organique s'est de nouveau développée dans ces chenaux, indiquant une relative stabilité morphologique de la plaine alluviale et un niveau moyen du fleuve relativement bas à cette période. Entre 4083-3339 cal BP et 2713-1868 cal BP, un regain de la dynamique fluviale est enregistré, avec l'incision et le comblement à dominante sableuse de petits chenaux. Dès 2713-1868 cal BP et jusqu'à l'occupation humaine du I<sup>er</sup> s. ap. J.-C., le recouvrement des dépôts holocènes antérieurs par des dépôts essentiellement sableux s'est effectué localement dans certains secteurs de l'espace urbanisé ancien. Les modifications morphologiques entraînées durant cette dernière période n'ont probablement affecté que les secteurs proximaux des chenaux actifs, le reste de l'interfluve présentant une relative stabilité morphologique. Dans d'autres secteurs de l'espace urbanisé ancien et sur le ruisseau de l'Archevêque, les chenaux ont pu subsister et rester en eau jusqu'à leur remblaiement, respectivement à la période gallo-romaine et au XIX<sup>e</sup> s. La contribution du Cher dans l'évolution morphologique du fond de vallée apparaît mineure durant le Weichsélien et l'Holocène.

Les occupations humaines du I<sup>er</sup> s. ap. J.-C. ne sont pas concentrées sur les modestes reliefs alluviaux. Les divagations de la Loire au cours du premier millénaire après J.-C. ont pu favoriser à certaines périodes les gains notables de la ville vers le nord. Le remblai d'exhaussement systématique dans la seconde moitié du I<sup>er</sup> s. ap. J.-C. traduit une nécessité de se protéger de l'aléa hydrologique ou plus vraisemblablement d'une remontée de la surface piézométrique, laquelle fut probablement induite par l'accrétion sédimentaire dans les chenaux actifs et favorisée par l'anthropisation de la plaine. L'essentiel des reliefs actuels de la plaine alluviale, notamment dans l'espace urbanisé ancien, résulte de l'épaisseur des dépôts anthropiques.

S'ils apportent des informations pour les sciences historiques en général, les modèles géomorpholo-

giques développés dans la plaine alluviale de Tours sont également des outils d'aide à la décision potentiellement utiles pour les gestionnaires et acteurs de l'archéologie. Ils peuvent contribuer à la programmation des recherches archéologiques, en particulier dans l'espace urbanisé ancien, en permettant une estimation de l'épaisseur du dépôt archéologique et en soulignant les vides documentaires. Ces modèles peuvent s'avérer également utiles pour la programmation d'opérations géotechniques et la gestion technique du sous-sol urbain. Enfin, grâce aux potentialités d'investigation future de cet espace en perpétuelle transformation, les modèles pourront être confrontés à de nouvelles données de terrain et être affinés. L'approche menée à Tours est reproductible dans d'autres villes situées dans des plaines alluviales bénéficiant de documentations sédimentaire et archéologique robustes.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE 1997  
Antoine P. - Modifications des systèmes fluviaux à la transition Pléniglaciaire-Tardiglaciaire et à l'Holocène : l'exemple du bassin de la Somme (Nord de la France), *Géographie physique et Quaternaire*, 51 : 93-106.
- ANTOINE *et al.* 2007  
Antoine P., Limondin-Lozouet N., Chaussé C., Lautridou J.P., Pastre J.-F., Auguste P., Bahain J.-J., Falguères C. et Galehb B. - Pleistocene fluvial terraces from northern France (Seine, Yonne, Somme): synthesis, and new results from interglacial deposits, *Quaternary Science Reviews*, 26 : 2701-2723.
- ARNAUD et EMERY 2000  
Arnaud M. et Emery X. - *Estimation et interpolation spatiale. Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*, Hermes Science Europe, Paris, 221 p.
- ARNAUD-FASSETTA *et al.* 2010  
Arnaud-Fassetta G., Carcaud N., Castanet C. et Salvador P.G. - Fluviale palaeoenvironment in archaeological context: geographical position, methodological approach and global change - Hydrological risk issues, *Quaternary International*, 216 : 93-117.
- BERGERON, DEHAYS et POINTET 1983  
Bergeron C., Dehays H. et Pointet T. - Remontées des nappes d'eau souterraines. Causes et effets, *Document du BRGM*, 60, 50 p. URL : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/83-SGN-353-EAU.pdf>. Consulté le 05/05/2013.
- BETURE-CEREC 2003  
BETURE-CEREC - *Étude préalable à la mise en place d'une gestion concertée de l'eau dans le bassin versant du Cher, Etape 1 : Etat des lieux et diagnostic*, Rapport d'étude, St Quentin en Yvelines, 130 p. URL : [http://www.schema-amenagement-gestion-des-eaux-cher-amont.com/spipcarto/IMG/pdf/Etat\\_des\\_lieux\\_diagnostic.pdf](http://www.schema-amenagement-gestion-des-eaux-cher-amont.com/spipcarto/IMG/pdf/Etat_des_lieux_diagnostic.pdf). Consulté le 29/03/2013.
- BLIN 1998  
Blin C. - *Contribution à la géoarchéologie et à la morphogénèse de la Loire dans le val de Tours. Constitution d'une base de données géologique*, mémoire de maîtrise de géographie, Université d'Angers, 1 vol. dactyl.
- BOS *et al.* 2001  
Bos J.A.A., Bohncke S.J.P., Kasse C. et Vandenberghe J. - Vegetation and Climate during the Weichselian Early Glacial and Pleniglacial in the Niederlausitz, eastern Germany – macrofossil and pollen evidence, *Journal of Quaternary Science*, 16 : 269-289.
- BOZZANO *et al.* 2000  
Bozzano F., Andreucci A., Gaeta M. et Salucci R. - A geological model of the buried Tiber River valley beneath the historical centre of Rome, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59 : 1-21.
- BRAVARD *et al.* 1997  
Bravard J.-P., Vérot-Bourrély A., Franc O. et Arlaud C. - Paléodynamique du site fluvial de Lyon depuis le Tardiglaciaire, *Documents d'archéologie en Rhône-Alpes*, 15 : 177-201.
- BREYSSE *et al.* 2002  
Breysse D., Rodier X., Niandou H., Galinié H. et Laurent A. - le pénétromètre et l'hétérogénéité des sols archéologiques urbains, *Revue française de Géotechnique*, 100 : 43-58
- BRIDGE 2003  
Bridge J.S. - *Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record*, Blackwell Science Ltd, Oxford, 491 p.
- BROWN et KEOUGH 1992  
Brown A.G. et Keough M. - Holocene floodplain metamorphosis in the Midlands, United Kingdom, *Geomorphology*, 4 : 433-445.
- BÜNTGEN *et al.* 2011  
Büntgen U., Tegel W., Nicolussi K., McCormick M., Frank D., Trouet V., Kaplan J.O., Herzig F., Heussner K.U., Wanner, H., Luterbacher J. et Esper J. - 2500 years of European climate variability and human susceptibility, *Science*, 331 : 578-582.
- BURGEAP 1993  
BURGEAP - *Étude de la variation de la nappe alluviale au droit de la ville de Tours entre Loire et Cher. Rapport final octobre 1993*, Services techniques de la mairie de Tours, 29 p.
- BURNOUF et CARCAUD 1999  
Burnouf J. et Carcaud N. - Le val de Loire en Anjou Touraine : un cours forcé par les sociétés riveraines, *Médiévales*, 18 : 17-29.
- BURNOUF et CARCAUD 2000  
Burnouf J. et Carcaud N. - L'homme et les vallées : les vals de Loire de Tours à Angers, *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest.*, 107 : 7-22.
- BURNOUF et MAILLARD 2003  
Burnouf J. et Maillard B. - Les sociétés et la confluence du Cher avec la Loire à la fin du Moyen Âge et à l'époque moderne, in : Petit J.G. et Sanguin A.L. (dir.), *Les fleuves de France atlantique, identités, espaces, représentations, mémoires*, L'Harmattan, Paris : 41-56.
- BURNOUF *et al.* 1999  
Burnouf J., Carcaud N., Cubizolle H., Trément F., Visset L., Garcin M. et Serieyssol K. - *Intéactions*

- hommes/milieus dans le bassin de la Loire (fin du Tardiglaciaire-époque industrielle), *Rapport final de synthèse*, UMR 6575 - Archéologie et Territoires, Tours, 2 vol. dactyl.
- BURNOUF *et al.* 2001  
Burnouf J., Carcaud N., Cubizolle H., Trément F., Visset L., Garcin M. et Serieyssol K. - Les relations sociétés / milieux physiques depuis la fin du Tardiglaciaire : les apports du Programme Loire, *Quaternaire*, 12 : 5-13.
- BURNOUF *et al.* 2003  
Burnouf J., Carcaud N., Garcin M., Galinié H., Giot D., Rodier X., Marlet O., Blin C. et Taberly C. - Fluvial metamorphosis of the loire river during holocene and the role of natural and anthropogenic factors: A case study from the area of Tours, France, in : Howard A.J., Macklin M.G. et Passmore D.G. (dir.), *Alluvial Archaeology in Europe*, Swets & Zeitlinger, Lisse : 163-171
- CARCAUD 2004  
Carcaud N. - *D'espace et de temps : un itinéraire de recherche et d'enseignement sur les anthroposystèmes fluviaux*, mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université d'Angers.
- CARCAUD et GARCIN 2001  
Carcaud N. et Garcin M. - *Géoarchéologie de la Loire moyenne et de ses marges, Synthèse des résultats du Projet Collectif de Recherche 1996-1999*, 125 p. URL : [http://www.za-loire.org/telechargements/PubliP-CR96\\_99.pdf](http://www.za-loire.org/telechargements/PubliP-CR96_99.pdf). Consulté le 29/03/2013.
- CARCAUD, GARCIN et BURNOUF 2007  
Carcaud N., Garcin M. et Burnouf J. - L'interfluve entre Loire et Cher, petite échelle et longue durée, in: GALINIÉ 2007 : 393-396.
- CARCAUD *et al.* 2002  
Carcaud N., Garcin M., Visset L., Musch J. et Burnouf J. - Nouvelle lecture de l'évolution des paysages fluviaux à l'holocène dans le bassin de la Loire moyenne, in : Bravard J.P. et Magny M. (dir.), *Les fleuves ont une histoire, paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15000 ans*, Errance, Paris : 71-84.
- CASTANET 2008  
Castanet C. - *La Loire en Val d'Orléans. Dynamiques fluviales et socio-environnementales durant les derniers 30000 ans : de l'hydrosystème à l'anthroposystème*, thèse de doctorat d'archéologie, Université de Paris 1, 1 vol. dactyl.
- CHAILLOT 1959  
Chaillot C. - Les quartiers et faubourgs de Tours, *Noroi*, 24 : 383-399.
- CHAMPION, MAILLARD et CARIO 1971  
Champion M., Maillard Ph. et Cario P. - Les alluvions de la Loire en Région Centre. Inventaire de la production et des gisements, *Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 1131 : 47-68
- CHAPMAN et ROSE 1991  
Chapman S.B. et Rose R.J. - Change in the vegetation at Coon Rigg Moss National Nature Reserve within the period 1958-86, *Journal of Applied Ecology* 28 : 140-153.
- CHOPLIN 2011  
Choplin H. - *Marmoutier, Saint-Cosme et la Loire : dynamique des berges et des îles (x<sup>e</sup> - xviii<sup>e</sup> siècle)*, mémoire de master 2 d'archéologie, Université de Tours, 2 vol. dactyl.
- COLLS *et al.* 2001  
Colls A.E., Stockes S., Blum M.D. et Straffin E. - Age limits on the Late Quaternary evolution of the upper Loire River, *Quaternary Science Reviews*, 20 : 743-750.
- COUDERC, BADEY et DJEMMALI 2010  
Couderc A., Badey S. et Djemmali N. - *La Riche, Indre-et-Loire, Z.A.C. Saint-François. Étude documentaire*, Inrap, Tours, 33 p.
- COUDERC 1968  
Couderc J.M. - Les phénomènes d'hydrologie karstique en Touraine, *Noroi*, 58 : 227-251.
- DAVID *et al.* 2013  
David S., Gardère Ph., Fondrillon M., Couderc A., Vissac C. - *Tours, Indre-et-Loire, Tramway, rue Nationale et place Jean-Jaurès. Un espace de circulation antique*, Rapport de fouille archéologique, Inrap, Tours, 458 p.
- DESCHODT 2002  
Deschodt L. - Une phase de sédimentation alluviale au Préboréal initial dans la vallée de l'Escaut (Nord de la France), *Quaternaire*, 13 : 149-152.
- DE FILIPPO 2007  
de Filippo R. - Avant la ville, la question de l'occupation gauloise, in : Galinié 2007 : 321-322.
- DION 1961  
Dion, R. - 1961. *Histoire des levées de la Loire*, Flammarion, Paris, 312 p.
- DJEMMALI, GARDÈRE et BADEY 2010  
Djemmal N., Gardère P. et Badey S. - *La Riche (Indre-et-Loire), " La Parmentière ", Diagnostic archéologique de la ZAC du " Plessis Botanique ", Phase 1*, Inrap, Tours, 19 p.
- DOMINIQUE, MARACHE et REGALDO-SAINT BLANCARD 2010  
Dominique S., Marache A. et Régaldo-Saint Blancard P. - Apport de la géostatistique à la connaissance de la morphologie naturelle du site de Bordeaux (France), *Archéosciences*, 34 : 25-37.
- DRIARD 2007  
Driard C. - L'alimentation individuelle en eau par des puits, in : GALINIÉ 2007 : 337.
- DUBANT 1993  
Dubant D. - *Le site de Tours du 1<sup>er</sup> au milieu du xix<sup>e</sup> siècle. De l'adoption à l'astreinte (étude historique)*, thèse de doctorat d'archéologie, Université de Tours, 3 vol. dactyl.
- DUFAÏ à paraître  
DufaÏ B. - *A la recherche de l'île de Saint-Cosme, Rapport de fouilles de la fouille du prieuré Saint-Cosme 2009-2010*, Service de l'Archéologique du département d'Indre et Loire.
- DURRENBERGER 1999  
Durrenberger V. - *D'une rive à l'autre de la Loire : les aménagements du lit mineur de la Loire du x<sup>e</sup> au xv<sup>e</sup> siècle dans les sources écrites, de Rochecorbon à Saint-Cyr*, mémoire de maîtrise d'histoire du Moyen Âge, Université de Tours, 2 vol. dactyl.
- FOUILLET *et al.* 2002  
Fouillet N., Bouillon J., Champagne V., Chimier J.P., Couvin F., De Belvata Balasy C., Ott M. et Neury P. - *Tours (Indre-et-Loire), Le Lycée Descartes, Document final de synthèse de fouilles préventives*, Service Régional de l'Archéologie de la région Centre, Orléans, 2 vol dactyl.

- GALBRAITH *et al.* 1999  
Galbraith R.F., Roberts R.G., Laslett G.M., Yoshida H. et Olley J.M. - Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jimmum rock shelter, northern Australia: Part I, Experimental design and statistical models, *Archaeometry*, 41 : 339-364.
- GALINIÉ 1981  
Galinié H. - Recherches sur la topographie de Tours du IV<sup>e</sup> au XI<sup>e</sup> siècle, thèse de doctorat d'histoire, Université de Caen.
- GALINIÉ 2007  
Galinié H. - *Tours antique et médiéval, lieu de vie, temps de la ville. 40 ans d'archéologie urbaine*, 30<sup>e</sup> supplément à la Revue archéologique du centre de la France, FERACF, Tours, 440 p.
- GALINIÉ *et al.* 2003a  
Galinié H., Laurent A., Rodier X., Breyse D., Houy L., Niandou H. et Breul P. - Utilisation du pénétromètre dynamique du type PANDA en milieu urbain pour l'évaluation et la caractérisation du dépôt archéologique, *Revue d'archéométrie*, 27: 15-26.
- GALINIÉ *et al.* 2003b  
Galinié H., Chouquer G., Rodier X. et Chareille P. - Tétolon, doyen de Saint-Martin, évêque de Tours au X<sup>e</sup> siècle, et urbaniste, *in* : Gauthiez B., Zadora-Rio E. et Galinié H. (dir.), *Village et ville au Moyen Âge : les dynamiques morphologiques*, Collection Perspectives "Villes et Territoires", 5, Presses Universitaires François-Rabelais, Tours, p.239-256 (vol. 1) et p.201-219 (vol. 2).
- GAO *et al.* 2007  
Gao C., Boreham S., Preece R.C., Gibbard P.L. et Briant R.M. - Fluvial response to rapid climate change during the Devensian (Weichselian) Lateglacial in the River Great Ouse, southern England, UK, *Sedimentary Geology*, 202 : 193-210.
- GARCIN *et al.* 1999  
Garcin M., Giot D., Farjanel G., Gourry J.C., Klopman W. et Négrel P. - Géométrie et âge des alluvions du lit majeur de la Loire moyenne, exemple du Val d'Avaray (Loir et Cher, France), *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Series IIA, Earth and Planetary Science*, 329 : 405-412.
- GARCIN *et al.* 2006  
Garcin M., Carcaud N., Gautier E., Burnouf J., Castanet C. et Fouillet N. - Impacts des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique, *in* : Allée P. et Lespez L. (dir.), *L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement*, Presses Universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand : 225-236.
- GARDÈRE 2011  
Gardère Ph. - Étude géomorphologique, *in*: Fouillet N. (dir.), *Tours, Indre-et-Loire, 33 à 39 rue Courte-line et 1 à 15 rue de la Madeleine, La fouille de la clinique des Dames Blanches. Volume 3, études des spécialistes*, INRAP, Tours : 42-72.
- GAY, MACAIRE et COCIRTA 1998  
Gay I., Macaire J.-J., Cocirta C. - Évolution qualitative des flux particuliers depuis 12 600 ans dans le bassin du lac Chambon, Massif central, France, *Bulletin de la Société géologique de France*, 169 : 301-314
- GAY-OVEJERO, MACAIRE et SEIGNE 2007  
Gay-Ovejero I., Macaire J.-J. et Seigne J. - Une mon-tille à l'origine de l'amphithéâtre, *in* : GALINIÉ 2007 : 241.
- GRATTON 2002  
Gratton Y. - Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale, Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique. URL : [https://cours.etsmtl.ca/sys866/Cours/documents/krigeage\\_juillet2002.pdf](https://cours.etsmtl.ca/sys866/Cours/documents/krigeage_juillet2002.pdf). Consulté le 09/05/2013.
- GUIOT 1987  
Guiot J. - Late Quaternary Climatic Change in France Estimated from Multivariate Pollen Time Series, *Quaternary Research*, 28 : 100-118.
- HAESAERTS 1984  
Haesaerts P. - Les formations fluviatiles pléistocènes du bassin de la Haine (Belgique), *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 21 : 19-26.
- HOUBEN *et al.* 2001  
Houben P., Nolte S., Rittweger H. et Wunderlich J. - Lateglacial and Holocene environmental change indicated by fluvial deposits of the Hessian Depression (Central Germany), *in*: Maddy D., Macklin M.G. et Woodward J.C. (dir.), *River Basin Sediment Systems, Archives of Environmental Change*, Balkema, Rotterdam : 249-264.
- HUIJZER et VANDENBERGHE 1998  
Huijzer B. et Vandenberghe J. - Climatic reconstruction of the Weichselian Pleniglacial in northwestern and central Europe, *Journal of Quaternary Science*, 13 : 391-417.
- JESSET, JOUQUAND et MASSAT 1996  
Jesset S., Jouquand A.-M. et Massat T. - Fouilles archéologiques à Tours, 1995-1996 : rapports préliminaires, *Bulletin de la Société Archéologique de Touraine*, XLIV : 699-737.
- JOUQUAND *et al.* 1999  
Jouquand A.-M., Champagne F., Rodier X., Husi P. et Wittmann A. - La fouille des "abords de la cathédrale" de Tours (Indre-et-Loire) : Antiquité - haut Moyen Âge, *Revue archéologique du Centre de la France*, 38 : 7-98.
- JOUQUAND 2007  
Jouquand A.-M. - Les domus, *in* : GALINIÉ 2007 : 333-335
- KRIGE 1951  
Krige D.G. - A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand, *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52 : 119-139.
- LAGADIC 1999  
Lagadic V. - *Interactions hommes/milieu : les îles de la Loire à Tours aux XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> siècles*, mémoire de maîtrise d'histoire du Moyen Âge, Université de Tours, 2 vol. dactyl.
- LATAPIE 2011  
Latapie A. - *Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire moyenne*, thèse de doctorat des sciences de la Terre et de l'environnement, Université de Tours. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00644961>. Consulté le 29/03/2013
- LAURENT 2007  
Laurent A. - *Évaluation du potentiel archéologique en milieu urbain*, thèse de doctorat d'histoire, Univer-

- sité de Tours. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00214256>. Consulté le 29/03/2013.
- LAURENT et FONDRILLON 2010  
Laurent A. et Fondrillon M. - Mesurer la ville par l'évaluation et la caractérisation du sol urbain : l'exemple de Tours, *Revue archéologique du centre de la France*, 49 : 307-343.
- LEFÈVRE *et al.* 1993  
Lefèvre D., Heim J., Gilot E. et Mouthon J. - Évolution des environnements sédimentaires et biologiques à l'Holocène dans la plaine alluviale de la Meuse (Ardennes, France). Premiers résultats *Quaternaire*, 4 : 17-30.
- LORANS *et al.* à paraître  
Lorans E., Jouquand A.M., Fouillet N. et Rodier X. - Les rythmes de l'espace urbain à Tours : nouvelles données, nouvelles questions (1<sup>er</sup> s. av. J.-C. - x<sup>e</sup> s. ap. J.-C.), in : Lorans E. et Rodier X. (dir.), *Archéologie de l'espace urbain*, PUFR/CTHS, 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 de doctorat d'Etat - Sciences, Université de Tours, 2 vol. dactyl.
- MACAIRE 1983  
Macaire J.-J. - Évolution du réseau hydrographique dans le Sud-Ouest du Bassin de Paris pendant le Pliocène et le Quaternaire, *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 20 : 183-195.
- MACAIRE 1990  
Macaire J.-J. - L'enregistrement du temps dans les dépôts fluviaux superficiels : de la géodynamique à la chronostratigraphie, *Quaternaire*, 1 : 41-49.
- MACAIRE et MIGNOT 1979  
Macaire J.-J. et Mignot Y. - Sur la présence de failles sous l'agglomération de Tours, *Bulletin du BRGM (deuxième série)*, Section I, n° 3 : 191-196.
- MACAIRE *et al.* 2002  
Macaire J.-J., Bellemlil S., Di-Giovanni C., De Luca P., Visset L. et Bernard J. - Sediment yield and storage variations in the Négron River catchment (south western Parisian Basin, France) during the Holocene period, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27 : 991-1009.
- MACAIRE *et al.* 2006  
Macaire J.-J., Bernard J., Di-Giovanni C., Hirschberger F., Limondin-Lozouet N. et Visset L. - Quantification and regulation of organic and mineral sedimentation in a late Holocene floodplain as a result of climatic and human impacts (Taligny marsh, Parisian Basin, France), *The Holocene*, 16 : 647-660.
- MACAIRE *et al.* 2010  
Macaire J.-J., Fourmont A., Argant J., Bréhéret J.G., Hirschberger F. et Trément F. - Quantitative analysis of climate versus human impact on sediment yield since the Lateglacial: The Sarliève palaeolake catchment (France) *The Holocene*, 20 : 497-516.
- MARACHE *et al.* 2009  
Marache A., Breyse D., Piette C. et Thierry P. - Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: The Pessac case (France), *Engineering Geology*, 107 : 67-76.
- MARLET 2000  
Marlet O. - *Les paléochenaux dans la plaine alluviale de Tours du Tardiglaciaire à aujourd'hui. Intégration de données archéologiques*, mémoire de maîtrise d'archéologie, Université de Tours, 2 vol. dactyl.
- MATHERON 1963  
Matheron G. - Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 58 : 1246-1266.
- MOL, VANDENBERGHE et KASSE 2000  
Mol J., Vandenberghe J. et Kasse C. - River response to variations of periglacial climate in mid-latitude Europe, *Geomorphology*, 33 : 131-148.
- MONITION 1977  
Monition L. - Effets de l'urbanisation sur les eaux souterraines, *Actes du colloque AISH Amsterdam, Octobre 1977, UNESCO Studies and reports in hydrology*, IAHS/UNESCO, 24 : 162-166. URL : [http://itia.ntua.gr/hj/redbooks/123/iahs\\_123\\_0162.pdf](http://itia.ntua.gr/hj/redbooks/123/iahs_123_0162.pdf). Consulté le 04/05/2013
- MORIN 2011  
Morin E. - *Évolution morpho-sédimentaire de la vallée de la Choisille (sud-ouest du Bassin parisien, France) depuis le Weichsélien. Spécificité de l'impact climatique et anthropique en Europe du Nord-Ouest*, thèse de doctorat des sciences de la Terre, Université de Tours. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00627074>. Consulté le 29/03/2013.
- MORIN 2012  
Morin E. - Marmoutier et la Loire, in : Lorans E. et Creissen T. (dir.), *Le site de l'abbaye de Marmoutier (Tours, Indre-et-Loire). Rapport 2012*, UMR 7324 CITERES-LAT, Tours : 66-75.
- MORIN *et al.* 2011  
Morin E., Macaire J.-J., Hirschberger F., Gay-Ovejero I., Rodrigues S., Bakyono J.P. et Visset L. - Spatio-temporal evolution of the Choisille River (southern Parisian Basin, France) during the Weichselian and the Holocene as a record of climate trend and human activity in north-western Europe, *Quaternary Science Reviews*, 30 : 347-363.
- NÉGREL *et al.* 2004  
Négrel P., Kloppman W., Garcin M. et Giot D. - Lead isotope signatures of Holocene fluvial sediments from the Loire river valley, *Applied Geochemistry*, 19 : 957-972.
- NOIZET 2005  
Noizet H. - Une histoire géo-archéologique du rapport à la Loire : le cas de la boire Saint-Venant à Tours, in : Berger J.F., Bertoncello F., Braemer F., Davtian G. et Gazenbeek M. (dir.), *Temps et espaces de l'homme en société. Analyses et modèles spatiaux en archéologie, XXVes Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 21-23 octobre 2004*, Éditions APDCA, Antibes : 451-461.
- NOIZET, CARCAUD et GARCIN 2004  
Noizet H., Carcaud N. et Garcin M. - Rive droite rive gauche : la Loire et Tours (XIIe-XVe siècles), in : Burnouf J. et Leveau P. (dir.), *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*, CTHS, Paris : 137-155.
- PASTRE *et al.* 1997  
Pastre J.-F., Fontugne M., Kuzucuoglu C., Leroyer C., Limondin-Lozouet N., Talon M. et Tisnérat N. - L'évolution tardi et postglaciaire des lits fluviaux au

- nord-est de Paris (France). Relations avec les données paléoenvironnementales et l'impact anthropique sur les versants, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4 : 291-312.
- PASTRE *et al.* 2002  
 Pastre J.-F., Leroyer C., Limondin-Lozouet N., Orth P., Chaussé C., Fontugne M., Gauthier A., Kunesch S., Le Jeune Y. et Saad M.-C. - Variations paléoenvironnementales et paléohydrologiques durant les 15 derniers millénaires : les réponses morphosédimentaires des vallées du Bassin Parisien (France), *in* : Bravard J.P. et Magny M. (dir.), *Histoire des rivières et des lacs de Lascaux à nos jours*, Errance, Paris : 29-44.
- PASTRE *et al.* 2003  
 Pastre J.-F., Limondin-Lozouet N., Leroyer C., Ponel P. et Fontugne M. - River system evolution and environmental changes during the Lateglacial in the Paris Basin (France), *Quaternary Science Reviews*, 22 : 2177-2188
- PHILIPPON 1948  
 Philippon A. - Contribution à l'étude des niveaux gallois et gallo-romain de la ville de Tours, *Bulletin de la Société Archéologique de Touraine*, 23 : 345-352.
- PIANA *et al.* 2009  
 Piana J., Carcaud N., Cyprien-Chouin A.L., Visset L. et Leroy D. - Dynamique paysagère tardiglaciaire et holocène dans la vallée du Loir à Pezou (Loir-et-Cher) : développements méthodologiques et premiers résultats, *Noroi*, 213 : 73-88.
- PROVANSAL *et al.* 1999  
 Provansal M., Berger J.-F., Bravard J.-P., Salvador P.G., Arnaud-Fassetta G., Brunet H. et Vérot-Bourrély A. - Le régime du Rhône dans l'Antiquité et au Haut Moyen Age, *Gallia*, 56 : 13-32.
- RASPLUS, ALCAYDÉ et DESPREZ 1974  
 Rasplus L., Alcaydé G. et Desprez N. - *Carte géologique qu 1/50000 et notice explicative, feuille Tours (457)*, Éditions du BRGM.
- REIMER *et al.* 2009  
 Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Burr G.S., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., McCormac F.G., Manning S.W., Reimer R.W., Richards D.A., Southon J.R., Talamo S., Turney C.S.M., van der Plicht J. et Weyhenmeyer C.E. - IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP, *Radiocarbon*, 51 : 1111-1150.
- RODIER, GALINIÉ et BRUNET 2010  
 Rodier X., Galinié H. et Brunet R. - Tours: étude chrono-chorématique, M@ppemonde, 100. [En ligne]. URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num28/articles/art10406.html>. Consulté le 07/05/2013.
- ROYSE, REEVES et GIBSON 2008  
 Royse K.R., Reeves H.J. et Gibson A.R. - The modelling and visualisation of digital geoscientific data as an aid to land-use planning in the urban environment; an example from the Thames Gateway, *in* : Liverman D.G.E., Pereira C. et Marker B. (dir.), *Communicating Environmental Geoscience*, Geological Society, Special Publication 305, London : 89-106.
- SEIGNE et NEURY 2007  
 Seigne J. et Neury P. - Les ponts antiques sur la Loire, *in* : GALINIÉ 2007 : 232-238.
- SMITH et CHARMAN 1988  
 Smith R.S. et Charman D.J. - The vegetation of upland mires within conifer plantations in Northumberland, northern England, *Journal of Applied Ecology*, 25 : 579-594.
- STARKEL 1999  
 Starkel L. - 8500-8000 yrs BP Humid Phase—Global or regional, *Science Reports of Tohoku University*, 49 : 105-133.
- STRAFFIN et BLUM 2002  
 Straffin E.C. et Blum M.D. - Late and post-glacial fluvial dynamics of the Loire river, Burgundy, France, *in* : Bravard J.P. et Magny M. (dir.), *Histoire des rivières et des lacs de Lascaux à nos jours*, Errance, Paris : 85-99.
- STRANGE, BOOTH et ELLISON 1998  
 Strange P.J., Booth S.J. et Ellison R.A. - Development of 'rockhead' computer-generated geological models to assist geohazard prediction in London, *in* : Maund J.G. et Eddleston M. (dir.), *Geohazards in Engineering Geology, Engineering Geology Special Publications*, 15, Geological Society, London : 409-414.
- STUIVER et REIMER 1993  
 Stuiver M. et Reimer P.J. - Extended <sup>14</sup>C database and revised CALIB radiocarbon calibration program, *Radiocarbon*, 35 : 215-230.
- TABERLY 1999  
 Taberly C. - *Interprétation lithostratigraphique sur la fenêtre de Tours. Intégration des données géologiques, palynologiques et archéologiques*, mémoire de maîtrise de géographie, Université d'Angers, 2 vol. dactyl.
- TAYLOR *et al.* 1993  
 Taylor K.C., Lamorey G.W., Doyle G.A., Alley R.B., Grootes P.M., Mayewski P.A., White J.W.C. et Barlow L.K. - The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change, *Nature*, 361 : 432-436.
- TEBBENS *et al.* 1999  
 Tebbens L.A., Veldkamp A., Westerhoff W. et Kroonenberg S.B. - Fluvial incision and channel downcutting as a response to Late-glacial and Early Holocene climate change: the lower reach of the River Meuse (Maas), The Netherlands, *Journal of Quaternary Science*, 14 : 59-75.
- USSEGLIO-POLATERA 1980  
 Usseglio-Polatera J.M. - *Contribution à la cartographie géotechnique de la Ville de Paris. Etude de la butte de Belleville (XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> arrondissements)*, thèse de doctorat de géologie de l'ingénieur, Université Paris 6, 1 vol. dactyl.
- VAN HUISSTEDEN, GIBBARD et BRIANT 2001  
 van Huissteden J., Gibbard P.L. et Briant R.M. - Periglacial fluvial systems in northwest Europe during marine isotope stages 4 and 3, *Quaternary International*, 79 : 75-88.
- VAN HUISSTEDEN, VAN DER VALK et VANDENBERGHE 1986  
 van Huissteden J., van der Valk L. et Vandenberghe J. - Geomorphological evolution of a lowland valley system during the Weichselian, *Earth Surface Processes and Landforms*, 11 : 207-216.
- VANDENBERGHE 2008  
 Vandenberghe J. - The fluvial cycle at cold-warm-cold transitions in lowland regions: A refinement of theory, *Geomorphology*, 98 : 275-284.

- VANDENBERGHE *et al.* 1994  
 Vandenberghe J., Kasse C., Bohncke S. et Kozarski S.  
 - Climate-related river activity at the Weichselian-  
 Holocene transition: a comparative study of the Warta  
 and Maas rivers, *Terra Nova*, 6 : 476-485.
- VISSET 2002  
 Visset L. - Étude palynologique, *in* : FOUILLET *et al.*  
 2002 : 144-147
- VISSET 2011  
 Visset L. - Le paléoenvironnement au cours de l'Holo-  
 cène d'après les données palynologiques, *in* : *Atlas*  
*Archéologique de Touraine*. [En ligne], mis en ligne le  
 10 février 2011. URL : <http://a2t.univ-tours.fr/notice.php?id=163>. Consulté le 29/03/2013:
- Visset, Cyprien et Carcaud 2008  
 Visset L., Cyprien A.L. et Carcaud N. - Essai sur la  
 végétation tardiglaciaire dans le bassin de la Loire  
 moyenne et de ses marges, *Revue Archéologique du*  
*Loiret*, 32 : 149-161.
- VISSET *et al.* 2005  
 Visset L., Cyprien A.L., Carcaud N., Bernard J. et Ou-  
 guerram A. - Paysage végétal dans le bassin de la Loire  
 moyenne du Tardiglaciaire à l'Actuel, *Journal de bota-*  
*nique de la Société botanique de France*, 29 : 41-51.
- VIVENT 1998  
 Vivent D. - *Le site de Tours et son environnement :*  
*l'approche palynologique*, Recherches sur Tours,  
 volume 8, 15<sup>e</sup> supplément à la revue Archéologique du  
 Centre de la France, FERAC/ADEAUT, Tours, 95 p.
- ZANINETTI 2005  
 Zaninetti J.M. - *Statistique spatiale, méthodes et appli-*  
*cations géomatiques*, Hermes Sciences, Paris, 321 p.