

Document public

Géométrie des formations géologiques de l'estuaire de la Loire

Rapport final phase 1

BRGM/RP-54878-FR

Mars 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2005 05PIRB07

M.Garcin , B.Poisson

Avec la collaboration de

P.Conil

Vérificateur :

Nom : Nicole LENOTRE

PO/ Cécile LE GUERN

Approbateur :

Nom : Pierre CONIL

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.


LOIRE ESTUAIRE
Cellule de mesures et de suivis

 Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Estuaire, Loire, Quaternaire, Holocène, Forages, Aménagements

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Garcin M., Poisson B., Conil P. (2006) Géométrie des formations géologiques de l'estuaire de la Loire – Rapport final phase 1 – Rapport BRGM/RP-54878-FR, 83 p., 37 fig.

© BRGM, 2006, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

Ce rapport a été réalisé dans le cadre d'une opération de Service Public qui a fait l'objet d'une convention entre le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire et le BRGM (SG/DJ VB 05-171).

Ce travail correspond à la première phase du programme et concerne la zone intermédiaire de l'estuaire de la Loire comprise entre Paimboeuf et la limite ouest du Pellerin.

Une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances des formations sédimentaires de l'estuaire et de ses marges a été réalisée ; un rappel des processus géodynamiques ayant joué un rôle dans l'évolution de l'estuaire au Quaternaire y est présenté.

Une base de données des forages référencés dans la Banque de Données du Sous-Sol (BSS) a été créée. La base de données a été réalisée sous ACCESS (© Microsoft) et comprend 554 forages. Ces forages ont été sélectionnés puis recodés à partir des dossiers BSS d'origine (dossiers papier). La méthode suivie ainsi que la structure informatique de la base sont fournies.

L'exploitation de cette base de données de forages a été réalisée avec le logiciel GDM (© BRGM). Des cartes thématiques ont été calculées par interpolation. Elles permettent de reconstituer et de visualiser le toit du substratum et l'épaisseur des alluvions. Le toit du socle possède une morphologie très complexe avec de nombreux hauts-fonds totalement ou partiellement ennoyés sous les alluvions. Des cartes d'épaisseur pour les lithologies les plus fréquentes ont été présentées et discutées, elles permettent de dégager les zones d'accumulation préférentielle de chaque lithologie spécifique (sables, argiles, vases, tourbes et formations graveleuses).

Des coupes transversales et longitudinales passant par les forages les mieux renseignés ont été dressées puis interprétées. Les corps sédimentaires montrent une géométrie complexe, les dépôts estuariens se caractérisent par une très grande variabilité latérale de faciès, rendant l'interprétation délicate, notamment en terme chronologique du fait de l'absence de forages datés dans la zone estuarienne au sens strict.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION..... | 9 |
| 1.1. GENERALITES..... | 9 |
| 1.2. OBJECTIFS..... | 9 |
| 1.3. PROGRAMME DE L'ETUDE..... | 9 |
| 1.4. LE CLIMAT ET LES PRINCIPAUX PROCESSUS DU QUATERNAIRE..... | 11 |
| 1.4.1. Les grands cycles climatiques..... | 12 |
| 1.4.2. L'Holocène..... | 12 |
| 1.5. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE..... | 14 |
| 1.5.1. Cadre géographique..... | 15 |
| 1.5.2. Cadre géologique..... | 15 |
| 2. ETAT DES CONNAISSANCES..... | 19 |
| 2.1. VARIATIONS HOLOCENE DU NIVEAU DE LA MER..... | 19 |
| 2.2. PALEOENVIRONNEMENTS DE LA LOIRE A L'HOLOCENE..... | 22 |
| 2.2.1. Loire aval..... | 22 |
| 2.2.2. Loire moyenne..... | 25 |
| 2.3. MORPHOLOGIE FLUVIALE DE LA LOIRE AVAL..... | 26 |
| 2.3.1. Evolution naturelle : incisions et remplissages..... | 27 |
| 2.3.2. Aménagements anthropiques..... | 30 |
| 2.3.3. L'exemple de l'île de Cordemais..... | 31 |
| 2.4. CONCLUSION..... | 33 |
| 3. LES SONDAGES..... | 37 |
| 3.1. METHODOLOGIE..... | 37 |
| 3.2. BASE DE DONNEES..... | 39 |
| 3.2.1. Structure de la base de données..... | 39 |
| 3.2.2. Codage et représentation graphique..... | 41 |
| 4. EXPLOITATION DES DONNEES DE SONDAGES..... | 45 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1. CARTES THEMATIQUES | 45 |
| 4.1.1. Toit du substratum et épaisseur des alluvions | 45 |
| 4.1.2. Epaisseurs cumulées par lithologie | 49 |
| 4.2. LES COUPES DE REFERENCE | 62 |
| 4.2.1. Coupe transversale T1 | 65 |
| 4.2.2. Coupe transversale T2 | 65 |
| 4.2.3. Coupe transversale T3 | 66 |
| 4.2.4. Coupe longitudinale L1 | 71 |
| 4.2.5. Transect longitudinal L2 | 72 |
| 5. SYNTHESE..... | 75 |
| 6. BIBLIOGRAPHIE..... | 79 |

Liste des illustrations

| | |
|--|----|
| Figure 1 - Carte de localisation du secteur d'étude (Occupation du sol issue de CORINE LandCover) | 10 |
| Figure 2 - Les différentes tâches du projet | 11 |
| Figure 3 - Les grands cycles climatiques du Quaternaire | 13 |
| Figure 4 - Chronozones et civilisations de la fin du Pléistocène à l'Holocène | 14 |
| Figure 5 - Extrait de la carte géologique numérique Pays de la Loire à 1/250 000 | 16 |
| Figure 6 - Carte des formations géologiques quaternaires - carte géologique numérique Pays de la Loire à 1/250 000..... | 17 |
| Figure 7 - Courbe des variations du niveau de la mer proposée par Pinot (1974) | 20 |
| Figure 8 – Evolution du niveau estimé de la mer (bande grisée)de 7500 BP à 500 BP (Mésolithique au Moyen Age), d'après le remplissage des marais au Sud de l'estuaire (Bernard, 1996)..... | 20 |
| Figure 9 – Indicateurs de paléoniveaux marins (cercles) et niveaux prédits par Lambeck (1997) (traits), pour la région de l'estuaire de la Loire | 22 |
| Figure 10 – Séquence schématique du remplissage alluvial dans la zone de l'estuaire, d'après Alix (1969)..... | 27 |
| Figure 11 – Evolution des gouttières du fleuve, sur une coupe transverse L'Aiguillon-Les Morées (extrait de Barbaroux, 1981) | 28 |
| Figure 12 – Coupe schématique du remplissage estuarien, entre Montoir et Mindin (extrait de Barbaroux, 1981)..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figure 13 – Evolution de l'estuaire amont de 1887 à 1976, entre La Martinière et Paimboeuf (extrait de Barbaroux, 1981, d'après un document OREAM)..... | 32 |
| Figure 14 – Récapitulatif des données d'évolution environnementale et sédimentaire de l'estuaire de la Loire | 35 |
| Figure 15 - Organigramme logiciel..... | 39 |
| Figure 16 - Relations entre les tables de la base de données ForagesEstuaires | 41 |
| Figure 17 - Représentations graphiques des codes lithologiques (1/2) | 42 |
| Figure 18 - Représentations graphiques des codes lithologiques (2/2) | 43 |
| Figure 19 - Code stratigraphique, signification et coloration..... | 44 |
| Figure 20 - Carte de l'altitude du toit du substratum | 47 |
| Figure 21 - Carte de l'épaisseur de remplissage alluvionnaire | 48 |
| Figure 22 - Carte de l'épaisseur des formations sableuses (s.s.)..... | 51 |
| Figure 23 - Carte de l'épaisseur des formations sableuses (s.l.)..... | 52 |
| Figure 24 - Carte de l'épaisseur des formations argileuses (s.s.) | 54 |
| Figure 25 - Carte de l'épaisseur des formations argileuses (s.l.) | 55 |
| Figure 26 - Carte de l'épaisseur des vases (s.s.) | 56 |
| Figure 27 - Carte de l'épaisseur des vases (s.l.) | 57 |
| Figure 28 - Carte de l'épaisseur des formations graveleuses (s.s.) | 59 |
| Figure 29 - Carte de l'épaisseur des formations graveleuses (s.l.) | 60 |
| Figure 30 - Carte des épaisseurs des tourbes et argiles tourbeuses | 61 |
| Figure 31 - Localisation des transects réalisés..... | 63 |
| Figure 32 - Palette lithologique utilisée dans les coupes | 64 |
| Figure 33 - Coupe transversale T1 (ordonnées : altitude en m NGF) | 68 |
| Figure 34 - Coupe transversale T2 | 69 |
| Figure 35 - Coupe transversale T3 | 70 |
| Figure 36 - Coupe longitudinale L1 | 73 |
| Figure 37 - Coupe longitudinale L2..... | 74 |

1. Introduction

1.1. GENERALITES

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une opération de Service Public qui a fait l'objet d'une convention entre le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire et le BRGM (SG/DJ VB 05-171). Ce travail correspond à la première phase du programme et concerne la zone intermédiaire de l'estuaire de la Loire comprise entre Paimboeuf et la limite ouest du Pellerin (Figure 1). Cette phase fait office de test méthodologique afin de valider l'intérêt d'une telle approche pour le GIP Estuaire.

Ce rapport est l'un des résultats de cette étude, il est accompagné par une base de données de forage et d'un SIG sous Mapinfo permettant d'accéder aux informations sur les forages de la zone estuarienne de la phase 1.

1.2. OBJECTIFS

Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants :

- réaliser une base de données des forages recensés dans l'estuaire de la Loire,
- reconstituer la géométrie des sédiments holocènes,
- déterminer les dynamiques fluviales qui ont conduit à ces dépôts.

Cette démarche est nécessaire pour replacer les processus actuels qui affectent l'estuaire dans le contexte évolutif qui les a précédés. Elle devrait permettre à terme de mieux cerner l'enchaînement des processus et des états qui ont conduit à la situation actuelle de l'estuaire et d'interpréter celle-ci de façon plus pertinente.

Il s'agit donc d'identifier les différents corps et ensembles sédimentaires holocènes présents dans l'estuaire et sur ses marges. Dans un premier temps une chronostratigraphie relative est tentée.

Des hypothèses sur les différents modes de fonctionnement de l'estuaire au cours de l'Holocène sont émises et montrent les évolutions de la dynamique estuarienne. Ces évolutions sont à mettre en parallèle avec : d'une part, celle du contexte climatique et eustatique global, et d'autre part, celle des aménagements et actions anthropiques à l'échelle du bassin versant de la Loire.

1.3. PROGRAMME DE L'ETUDE

L'étude a comporté plusieurs tâches complémentaires schématisées dans la Figure 2.

Dans un premier temps, une analyse et une synthèse bibliographique ont été réalisées afin de faire le point sur l'état des connaissances sur les dépôts alluviaux et estuariens de la Loire. Cette synthèse permettra de donner un cadre stratigraphique et environnemental aux données issues des forages et nous permettra d'émettre des hypothèses sur la chronologie des dépôts rencontrés.

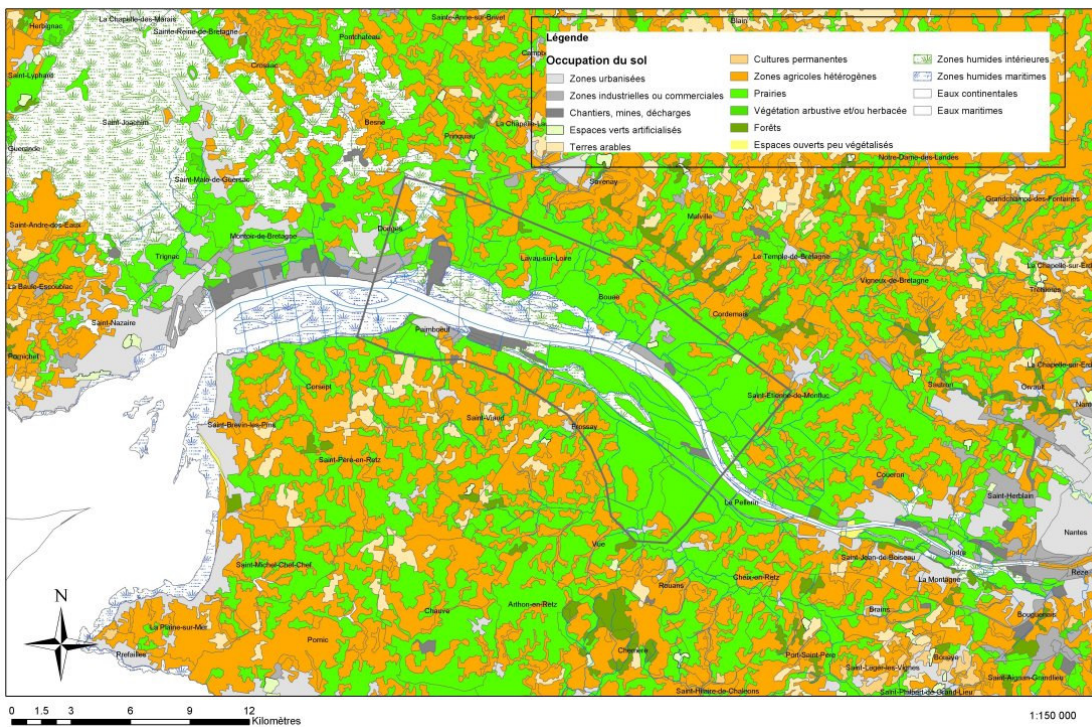


Figure 1 - Carte de localisation du secteur d'étude (Occupation du sol issue de CORINE LandCover)

Parallèlement, une base de données de forages a été réalisée à partir des sondages référencés, sur le secteur d'étude, dans la Banque de Données du Sous Sol (BSS). Cette base de données, après validation et traitements, fournit des informations sur la lithologie et les épaisseurs des dépôts présents (logs, coupes, cartes spécifiques). Ensuite, l'analyse de ces données permet d'émettre des hypothèses sur la géométrie des dépôts et leur lithostratigraphie, et, dans certains cas favorables, d'essayer de reconstituer au moins partiellement la dynamique fluviale qui les a engendrés. Enfin des conclusions et des recommandations sont proposées.

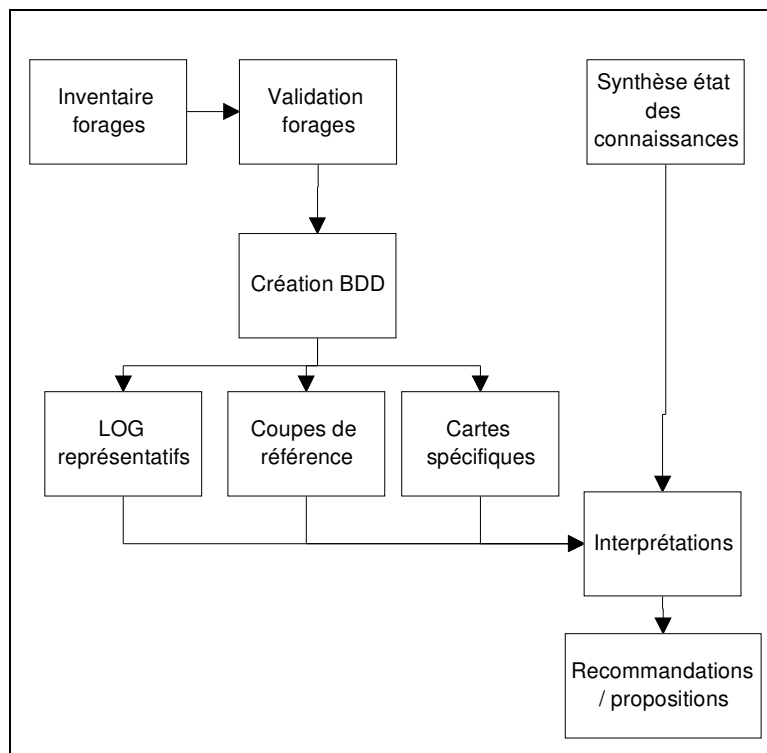


Figure 2 - Les différentes tâches du projet

1.4. LE CLIMAT ET LES PRINCIPAUX PROCESSUS DU QUATERNAIRE

La Terre a subi au cours de la fin du Tertiaire des modifications géodynamiques qui ont entraîné, il y a environ 2 millions d'années, le développement de calottes de glace dans l'hémisphère nord. Depuis, la Terre subit une alternance de périodes froides (périodes glaciaires) et de périodes plus tempérées (périodes interglaciaires).

En 1941, Milan Milankovitch a développé la théorie selon laquelle, les variations des paramètres orbitaux de la Terre (excentricité, obliquité, précession des équinoxes) contrôlaient la quantité et la distribution de l'énergie solaire reçue par la Terre et par là même, étaient responsables des phases climatiques. Cette théorie, reprise notamment par Berger (1978, 1992), est considérée comme l'un des fondements de la climatologie actuelle même si les variations orbitales de la Terre n'expliquent pas toute la variabilité ni l'ampleur des phases climatiques.

La succession des cycles climatiques au cours du Quaternaire est marquée par le développement des grands inlandsis dans l'hémisphère nord (Fennoscandie et Laurentides) et la croissance des calottes antarctique et groenlandaise. Les modifications des circulations atmosphériques et océaniques corrélatives vont aboutir à de profondes modifications environnementales à l'échelle globale. De surcroît, le fort volume d'eau stocké sous forme de glace par les inlandsis va induire des variations du

niveau marin (variations eustatiques), elles-mêmes responsables d'effets paléogéographiques et morphogénétiques. Sous et à proximité des grands inlandsis, la surcharge de la glace provoque l'enfoncement de la lithosphère, puis lors de leur fonte une remonté progressive : c'est l'isostasie glaciaire.

L'évolution de l'estuaire de la Loire va donc directement et indirectement être affectée par cette histoire climatique. Elle sera liée aux modifications d'échelle globale (variations eustatiques, des températures...), régionale (modification des écoulements et de la dynamique ligérienne à l'échelle du bassin versant) et à leur expression locale (éloignement de la ligne de rivage, alternance de phase à influence marine plus ou moins marquées suivant les fluctuations du niveau marin...).

Il nous paraît donc important de présenter très succinctement ces grands cycles climatiques et de les garder en mémoire comme des facteurs primordiaux de l'évolution de l'estuaire au cours du temps.

1.4.1. Les grands cycles climatiques

Le tableau de la Figure 3 présente les principales périodes climatiques du Quaternaire. Les différentes nomenclatures alpine, méditerranéenne et nordique y sont mises en relation. Des âges indicatifs (en milliers d'années : ka *Before Present* , BP) sont portés sur les principales limites d'étage. On emploie ce type de dates pour donner les datations au carbone 14 (C14) avant calibration. Le « présent » correspond à 1950, date à partir de laquelle la diffusion du nucléaire empêcherait toute datation C14.

1.4.2. L'Holocène

Dans le cadre de ce projet, nous allons essentiellement nous focaliser sur des événements et des dépôts datés de la fin du dernier glaciaire (Wurm ou Weichsélien) et de l'Holocène (qui correspond au dernier interglaciaire perdurant encore de nos jours). La stratigraphie et les différentes périodes identifiées dans l'Holocène étant nombreuses et beaucoup plus fines que pour les périodes antérieures, nous les avons détaillées dans un tableau spécifique (Figure 4). C'est à celles-ci que nous nous référerons dans les chapitres suivants.

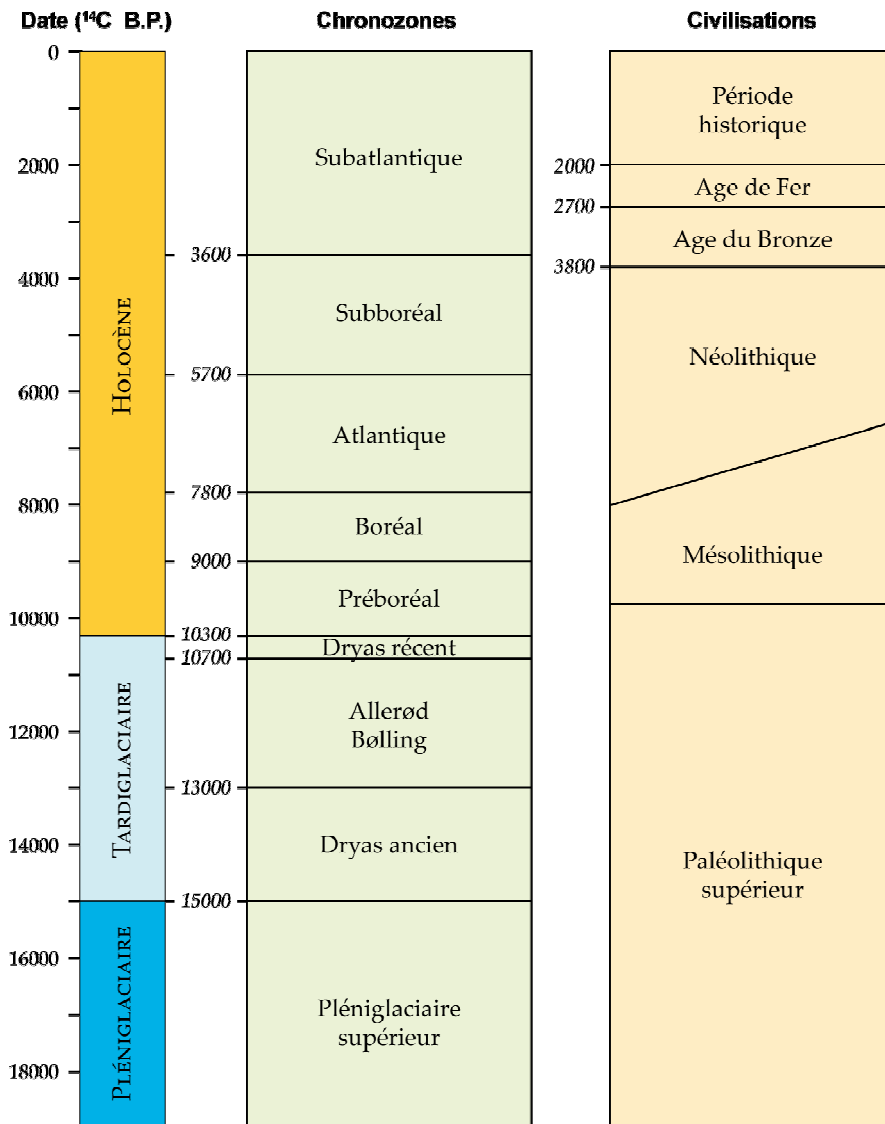


Figure 4 - Chronozones et civilisations de la fin du Pléistocène à l'Holocène

1.5. CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

Le bassin versant de la Loire couvre 117 000 km² soit environ 1/5 du territoire français. La Loire présente des caractéristiques hydrologiques dépendantes de l'hétérogénéité géologique, morphologique et climatique du bassin versant ainsi que de l'inégale distribution des confluences. A titre d'exemple, l'apport des confluences en amont de la zone estuarienne (Cher, Vienne et Maine) triple presque le débit du fleuve. De ce fait, les confluences majeures donnent à la Loire un régime complexe marqué par trois influences principales (« cévenole », moyenne montagne océanique et

plaines/plateaux océaniques) avec des débits pondérés (peu d'écart entre les valeurs moyennes) mais irréguliers (écarts importants entre les valeurs extrêmes de crue et d'étiage) (Garcin et al. 2006 ; Schulé, 2004).

1.5.1. Cadre géographique

L'estuaire de la Loire est situé entre deux coteaux, le Sillon de Bretagne au Nord et le coteau de Saint-Père au Sud. Au Nord et au Sud du fleuve, des plateaux d'altitude inférieure à 100 m, basculés à partir de failles, s'inclinent vers des dépressions marécageuses.

La zone d'étude qui nous intéresse (21 Km x 9 Km) se situe en aval de Nantes et s'étend sur les communes du Pellerin à Paimboeuf. Dans cette zone, la Loire, après avoir traversé les barres rocheuses du Sillon de Bretagne, s'élargit dans une vaste plaine alluviale. De cette plaine inondable et marécageuse émergent, ça et là, des buttes gneissiques (Cordemais, Bouée) et batholites de granite (Lavau).

A la sortie de ce tronçon, la vallée s'étrangle à nouveau, entre Donges et Paimboeuf, à la traversée d'une barre rocheuse parallèle au Sillon de Bretagne. Cette barre affleure en Brière sous la forme d'îles, et dans la plaine de Montoir sous la forme de buttes. Elle est également à l'origine des nombreuses buttes rocheuses noyées dans le remplissage alluvial, seulement décelables par les sondages ou la géophysique (Ottmann et al., 1968).

1.5.2. Cadre géologique

La carte des formations quaternaires (Figure 6) montre la surface importante occupée par les dépôts récents dans la région de l'estuaire. Ces dépôts correspondent à deux types de dynamique de mise en place :

- les sédiments alluviaux associés à la Loire et à ses affluents (Erdre, Sèvre etc.)
- les sédiments liés aux marais et lac (Brière, plaine de Mazerolle en amont de Sucé-sur-Erdre et Lac de Grandlieu)

Il faut noter aussi la surface très importante occupée par les dépôts récents attribués à l'Holocène par rapport à celle correspondant aux sédiments pléistocènes. Ces derniers ne sont présents qu'en rive droite de l'estuaire le long du cisaillement sud-armoricain où ils forment une terrasse (communes de St-Etienne-de-Montluc, Cordemais, Bouée et Lavau-sur-Loire). Quelques affleurements pléistocènes sont signalés sur les marges Est du lac de Grandlieu.

Cette première observation nous indique d'ores et déjà que l'Holocène est une période de sédimentation active ayant tendance à ennoyer les formations quaternaires et les paléo-morphologies antérieures.

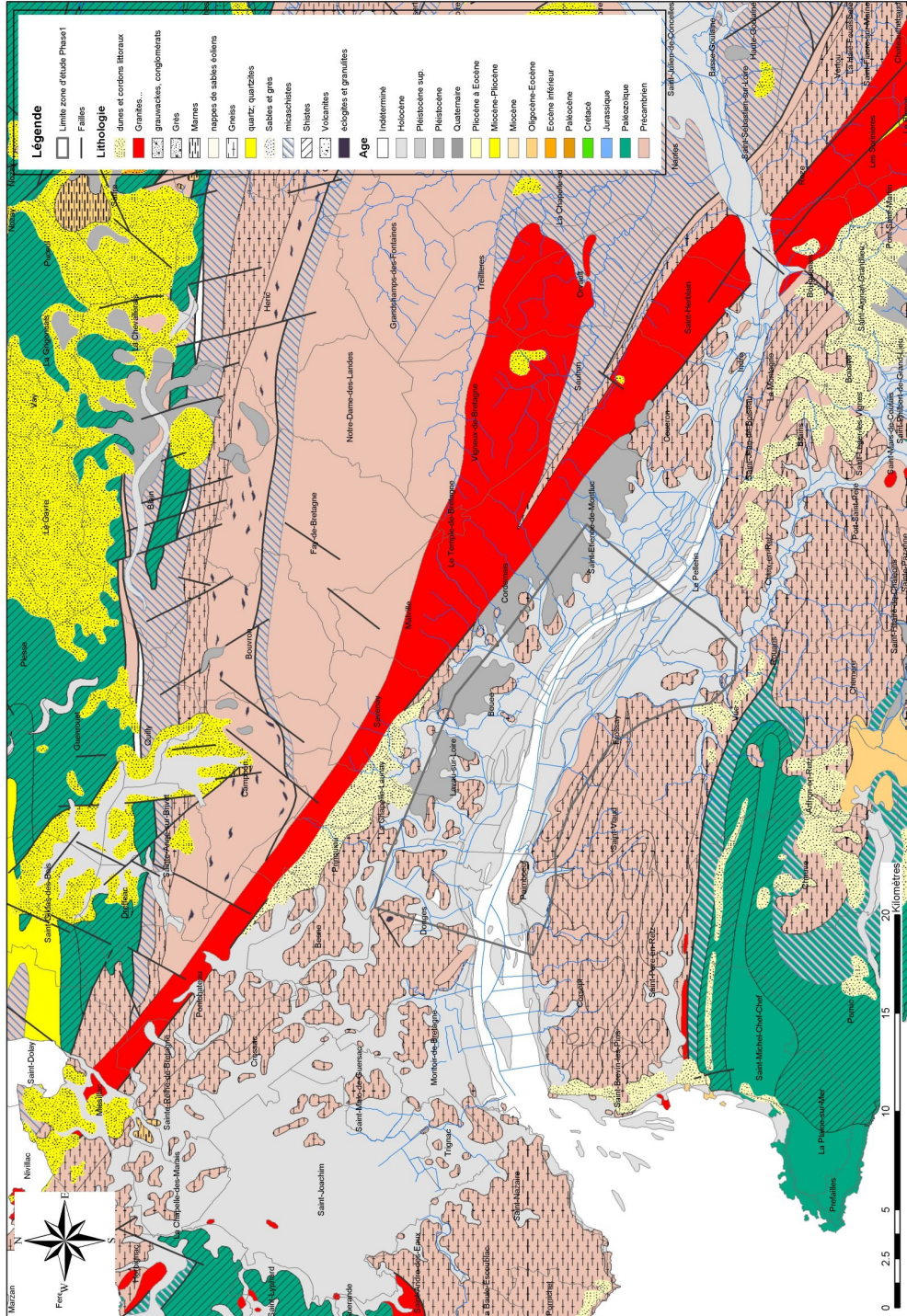


Figure 5 - Extrait de la carte géologique numérique Pays de la Loire à 1/250 000

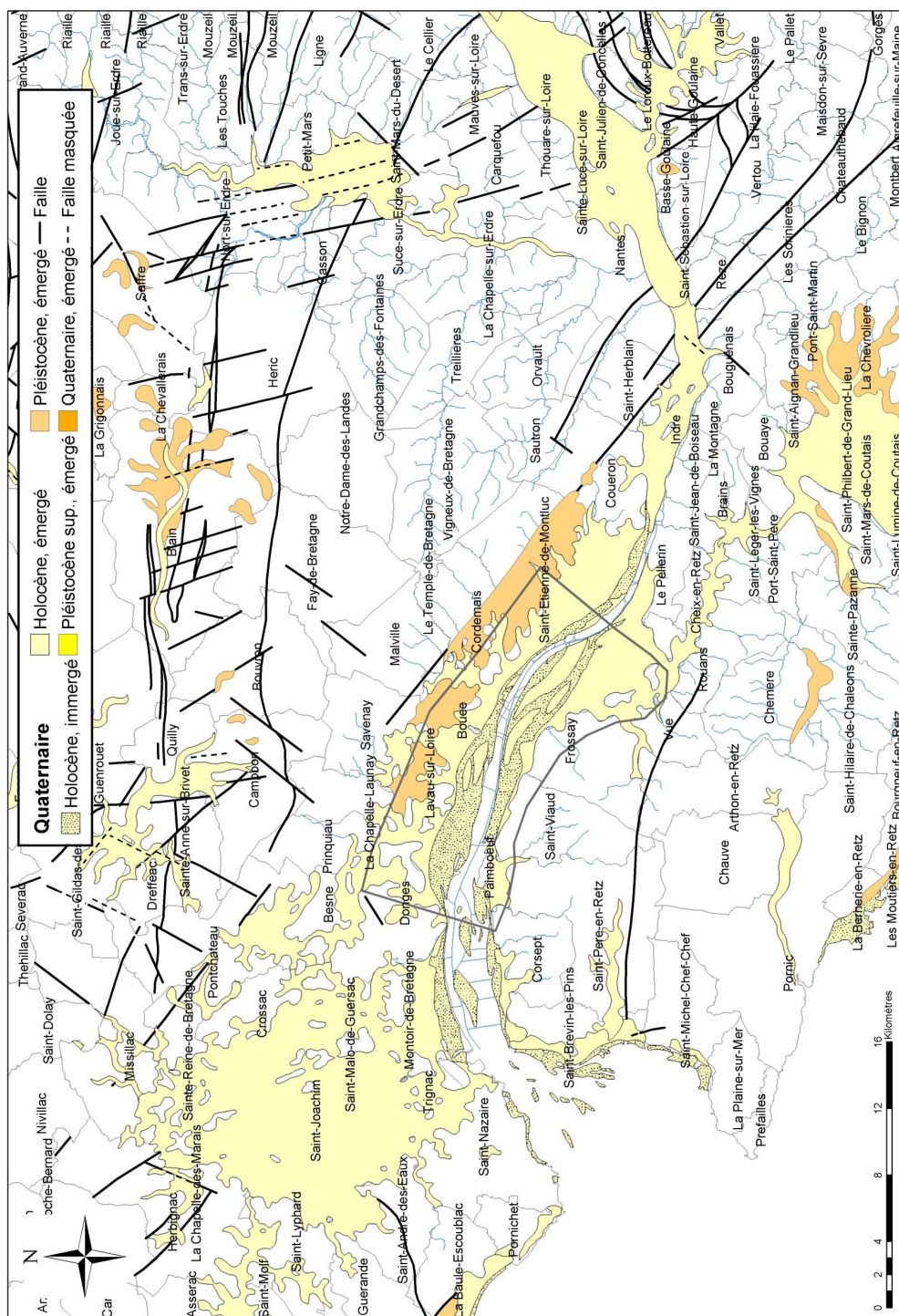


Figure 6 - Carte des formations géologiques quaternaires - carte géologique numérique Pays de la Loire à 1/250 000

2. Etat des connaissances

2.1. VARIATIONS HOLOCENE DU NIVEAU DE LA MER

Lors du dernier maximum glaciaire, le niveau de la mer s'est abaissé d'environ 120 m au-dessous de son niveau actuel. Ensuite, durant le réchauffement climatique holocène, le niveau marin est remonté très rapidement dans un premier temps puis plus lentement. Des phases d'arrêt de la remontée et même de baisses eustatiques temporaires se sont produites (ce sont des *phases de régression* ou régressives). L'ensemble de la remontée du niveau marin au cours de l'Holocène est classiquement appelé *transgression flandrienne* dans la bibliographie.

Si l'évolution générale du niveau marin est globalement connue, de nombreuses études ont démontré que cette évolution était loin d'être uniforme selon les régions. Il importe donc de reconstituer une courbe eustatique locale afin de déterminer les conditions paléoenvironnementales régionales.

Plusieurs auteurs ont publiés des études traitant des variations eustatiques de la Bretagne et région de l'Ouest ; elles mettent en œuvre des méthodes différentes qui aboutissent parfois à des divergences de résultats (dans le détail).

Les informations localisées sur le littoral atlantique, a fortiori sur la région de l'embouchure de la Loire, sont rares.

Pinot (1974) a fourni une courbe de la remontée du niveau marin holocène à partir de données issues du plateau continental au large de la Bretagne méridionale (Figure 7). On y remarque outre la rapide remontée eustatique de la première partie de l'Holocène, une phase régressive courte autour de 10 000 BP qui pourrait correspondre au Dryas Récent (phase froide très courte et intense). Par ailleurs, s'y individualise très nettement une phase régressive à la fin de la période subboréale et qui durerait environ 2000 ans. Cette courbe eustatique semble confortée, au moins partiellement, par les travaux palynologiques et paléoenvironnementaux réalisés en Brière et Loire aval (Cyprien et al., 2004) avec notamment la mise en évidence d'une régression vers 4500 BP.

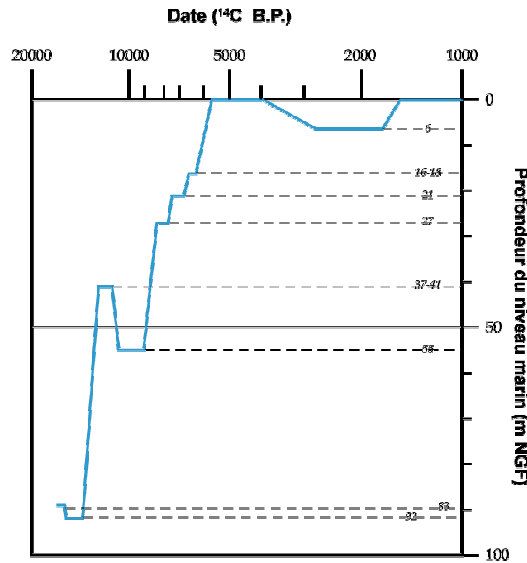


Figure 7 - Courbe des variations du niveau de la mer proposée par Pinot (1974)

Bernard (1996), à partir de la compilation de données de forages réalisés dans les marais du Sud de l'estuaire, a proposé une courbe de la transgression flandrienne locale (Figure 8). Cette courbe, qui ne recouvre malheureusement que la seconde moitié de l'Holocène (de 7500 BP à 500 BP), a le mérite de refléter les effets des variations eustatique dans la zone qui précisément nous intéresse. On remarque, suite à une remontée rapide de 7500 BP à 5000 BP, une phase de palier dans la remontée vers 4500 BP puis une tendance régressive entre 4000 et 3000) enfin une remontée du niveau marin plus modeste jusqu'à la période récente.

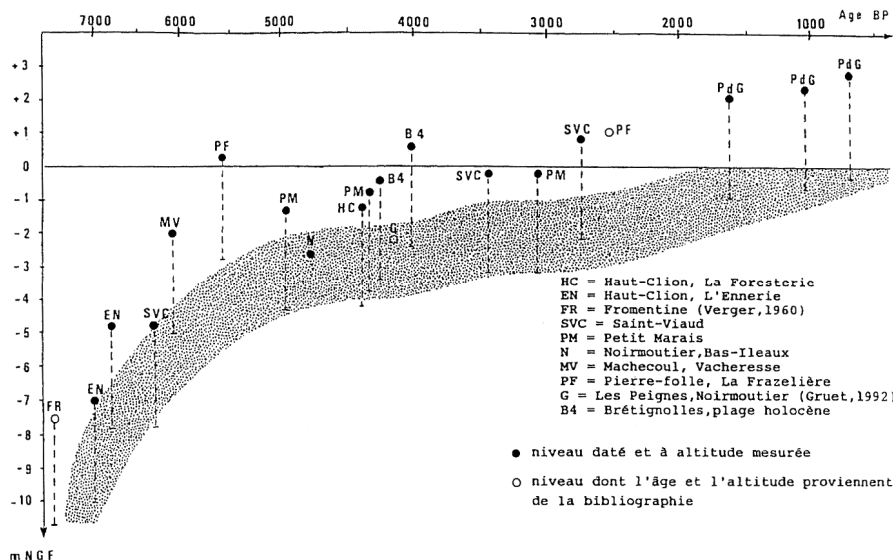


Figure 8 – Evolution du niveau estimé de la mer (bande grisée) de 7500 BP à 500 BP (Mésolithique au Moyen Age), d'après le remplissage des marais au Sud de l'estuaire (Bernard, 1996)

Lambeck a tenté en 1997 de modéliser numériquement la transgression holocène sur le littoral français. Son travail part de l'hypothèse que la transgression flandrienne observée depuis le dernier maximum glaciaire (*Last Glacial Maximum*, LGM) est affectée sur la côte de la Manche et le littoral Atlantique par deux influences distinctes simultanées :

- la réponse isostatique à la fonte de la calotte fennoscandienne, qui induit à un instant donné une décroissance des niveaux de la mer du Nord vers le Sud ;
- la réponse isostatique au déversement d'eau de fonte dans l'Océan Atlantique, qui induit à un instant donné une décroissance des niveaux de la mer de l'Est vers l'Ouest.

Ces deux phénomènes entraîneraient en outre un changement d'équilibrage gravitationnel lié au déplacement des masses d'eau et de glace, qui a lui-même des conséquences isostatiques.

La combinaison de tous ces effets provoquerait sur la côte bretonne des différences de niveau eustatique de 10 m à 20 m (respectivement à la mi-Holocène et au LGM) entre différentes localisations.

Lambeck (1997) souligne ainsi la nécessité de prendre en compte, localement, soit une courbe basée sur des données régionales, qui intègre par définition le facteur isostatique local, soit une courbe théorique corrigée des effets isostatiques locaux.

D'après les observations compilées par cet auteur :

- le niveau marin descendait au moins 100 m au-dessous du niveau actuel vers 20000–18000 B.P.;
- l'essentiel de la montée consécutive s'est faite entre 15000 et 6000 B.P. ;
- depuis 6000 B.P., le niveau est resté relativement stable (remontée de 6 à 10 m).

Lambeck récuse l'hypothèse émise par certains auteurs de petites oscillations du niveau marin, de quelques mètres sur un millier d'années ou moins. Selon lui, de telles oscillations à l'échelle globale ne peuvent s'expliquer car elles résulteraient alors d'échanges de volumes d'eau ou de glace irréalistes. De surcroît, Il rappelle que l'incertitude des indicateurs utilisés pour reconstituer les paléoniveaux de la mer est souvent si grande que l'on ne peut en déduire l'existence réelle d'oscillations.

Les résultats de ses modélisations de la remontée du niveau marin depuis 8000 ans sont présentés Figure 9. Ils montrent que le niveau marin s'est élevé assez rapidement jusqu'à 6000 ans puis plus lentement ensuite. Aucun épisode régressif n'y apparaît, ce qui contredit les résultats de la plupart des études paléoenvironnementales réalisées sur tourbières datées de la Loire aval (voir courbes précédentes et section suivante).

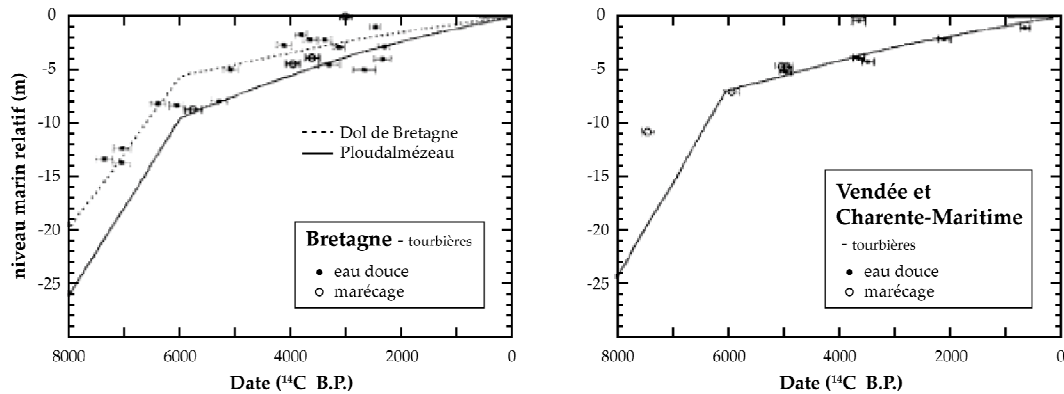


Figure 9 – Indicateurs de paléoniveaux marins (cercles) et niveaux prédits par Lambeck (1997) (traits), pour la région de l'estuaire de la Loire

Toutes ces études démontrent la complexité de reconstituer une courbe eustatique régionale qui est dépendante de facteurs nombreux, complexes et interdépendants (eustatisme globale, isostasie glaciaire, isostasie eustatique, tectonique etc.) Selon la méthode et l'approche utilisée, des divergences peuvent apparaître et résultent intrinsèquement des particularités et limites de ces méthodes. Cependant, les grands traits de la transgression holocène sont les mêmes, quelle que soit la méthode utilisée : une remontée du niveau marin très rapide dès la fin du glaciaire jusqu'à 6000 BP environ, ensuite la vitesse de remontée est beaucoup plus faible et se caractérise par des paliers et des épisodes régressifs de quelques mètres.

2.2. PALEOENVIRONNEMENTS DE LA LOIRE A L'HOLOCENE

2.2.1. Loire aval

Cyprien et al. (2004) retracent l'évolution sur la période holocène du tronçon aval de la Loire, à travers une étude interdisciplinaire combinant des approches palynologique, paléogéographique, archéologique et sédimentologique. Cette étude synthétise les observations effectuées sur neuf sites répartis de Saint-Nicolas de Bourgueil à Cordemais.

Les travaux réalisés sur des zones plus restreintes précisent les tendances mises en évidence par cette synthèse. Le marais de Brière, par exemple, a été l'objet de plusieurs études paléoenvironnementales dont les résultats concernent directement l'évolution de l'estuaire de la Loire. En effet, la Brière est un bassin côtier, situé en bordure de l'estuaire, qui enregistre les influences marine et fluviale successives (Visset, 1979, 1982, 1985).

a) Le Preboréal (10000–8900 B.P.)

La végétation témoigne d'un réchauffement du climat par rapport au Tardiglaciaire. On observe une phase de sédimentation de limons à Munet, interprétée comme un dépôt en eaux calmes (~Saumur).

b) Le Boréal (8900–7800 B.P.)

Au Boréal, une forêt de noisetiers, chênes, ormes et tilleuls s'installe. Cette fermeture du paysage et le développement du couvert forestier protégerait plus efficacement les versants de l'érosion. Les sédiments du Boréal sont fins, caractérisent un milieu de dépôt de faible énergie, leur taux de sédimentation est faible. Les marécages, inondés au début de la période boréale, commencent ensuite à s'assécher.

Ce n'est qu'à la fin de cette période que la mer envahit la cuvette de la Brière à la faveur de talwegs, le niveau marin est alors évalué à -17 m (Visset, 1982).

c) L'Atlantique (7800–5700 B.P.)

A Oudon (à 80 km de l'embouchure actuelle de la Loire), une intrusion d'eau de mer dans la vallée du Havre est observée entre 6740 et 5000 B.P. Cette intrusion marine est synchrone de la transgression Atlantique (Morzadec-Kerfourn, 1974 ; Visset, 1979 ; Bernard, 1996). Celle-ci est également visible sur le site de Gesvres dans la vallée de l'Erdre (localisée juste au Nord de Nantes). Elle se caractérise par des dépôts datés de 7350 B.P. à 6340 B.P. formé par un mélange de sédiments argileux fluviaux et marins sur une dizaine de mètres d'épaisseur (Ouguerram et Visset, 2001). Une tourbière s'y installe dès 5770 B.P. et y perdure jusqu'à nos jours.

En Brière, la mer envahit le marais aux alentours de 7260 B.P. (Visset, 1985). En négligeant l'éventuel tassement postérieur des dépôts lacustres, Visset (1985) évalue pour cette époque le niveau moyen de la mer vers -9 m NGF. Il affirme que le bassin reste pratiquement ennoyé et soumis à une sédimentation active pendant toute la période Atlantique. Dans l'extrême Nord des marais de Brière, entre 6300 et 6000 B.P., une étude palynologique met en évidence une pénétration plus tardive de la mer à la faveur d'une vallée (Visset, 1988).

A Cordemais, la végétation témoigne d'un environnement marécageux à salinité élevée (Cyprien et Visset, 2000). Des kystes de dinoflagellés fossiles y ont été retrouvés, les uns caractérisant une influence marine, les autres des eaux plus douces (Cyprien et al., 2004).

A Saint-Viaud, la mer atteint le socle à la cote -5.35 m NGF avant 6370 B.P. La sédimentation y débute par le dépôt d'une couche argilo-sableuse (L'Helgouac'h et al, 2001). Elle est surmontée par deux alternances tourbeuses, la première étant datée de 6370 B.P. à -4.7 m NGF. Ces deux horizons tourbeux indiquent une influence marine nettement moindre et un ralentissement de la transgression marine.

d) Le Subboréal (5700–3600 B.P.)

La première partie de cette période est transgressive (5700 BP-4500 BP), tandis que la seconde est régressive (à partir de 4500 BP ; Visset et al., 1994, 1995, 1996).

Morzadec-Kerfourn (1974) considère que durant la période Subboréale, le climat est humide ce qui permet la pérennisation des marécages sur le littoral armoricain.

En Brière, l'extension de la surface des schorres (prés salés, marais maritimes) est liée à une très faible montée du niveau de la mer et à un ralentissement de la sédimentation vers 4500 B.P. (datation du sommet de la vase organique – Visset, 1982). A cette époque, un hiatus de sédimentation est clairement mis en évidence dans le Nord de la Brière, révélant une probable régression du niveau de la mer (Visset, 1988). Ensuite, dès 4200 BP, la Brière se transforme en un immense marécage dès qu'un cordon littoral l'isole de toute influence marine. A la vase bleue d'origine marine se superpose alors une phase lacustre à tourbe, dans laquelle on retrouve de nombreux restes d'arbres fossiles, datés au radiocarbone aux alentours de 4300–4000 B.P. (Visset, 1982).

A partir du début de la phase régressive (4500 B.P.), des tourbières s'installent sur la plupart des sites de la Loire aval (par exemple, marais de Cantin à Saint-Viaud – L'Helgouac'h et al, 2001).

A la même période, les dépôts dans les tributaires sont à dominante sableuse et graveleuse, ce qui est interprété comme un indicateur de l'augmentation de leur débit.

A Cordemais, la régression marine provoque l'érosion des dépôts des sédiments estuariens antérieurs (Cyprien et Visset, 2000), alors que plus en amont, les marécages disparaissent. Cette érosion partielle des sédiments déposés au début du Subboréal est connue aussi bien en Loire (Visset, 1979) qu'en Vilaine (Morzadec-Kerfourn, 1974).

e) Le Subatlantique (3600 B.P. –présent)

Dans de nombreux marécages, la prolifération de plantes aquatiques, et notamment de nombreuses espèces paludéennes, atteste d'une augmentation de l'humidité, et probablement d'une hausse du niveau de la mer (Cyprien et al., 2004).

Sur le site de Cordemais, on observe un hiatus dans l'enregistrement sédimentaire vers l'Age de Bronze (3000 B.P.) et l'Age de Fer (Cyprien et Visset, 2000). Cette anomalie pourrait être la conséquence d'une succession de petites régressions liées à un abaissement du niveau de la mer à ces périodes (Pirazzoli, 1991 ; L'Helgouac'h et al., 2001 ; Prigent et al., 1983).

Cette hypothèse concorde avec l'observation en Brière d'un bas niveau marin entre 3000 et 2600 B.P., marqué notamment par le développement d'une futaie (Visset,

1982). La découverte de nombreux briquetages¹, construits par l'homme avant la fin de l'Age du Bronze et actuellement submergés, démontre que la mer était alors au-dessous de son niveau actuel (Prigent et al., 1983). Le niveau de la mer actuel pourrait avoir été atteint lors d'une pulsation transgressive entre la période gallo-romaine et 1000 A.D. Cette pulsation a permis le dépôt de vase fluvio-marine datée à 1530 B.P. (Visset, 1985). Cette transgression pourrait avoir commencé dès 2100 B.P., si l'on en croit l'interruption de la tourbification dans le Sud de la Brière. Elle est interprétée comme la conséquence de la rupture locale du cordon littoral sous l'effet de la hausse de niveau marin (Visset, 1982).

Un optimum climatique est décrit dans la région de Saint-Nazaire aux alentours de 1700 B.P. (Barbaroux et al., 1974).

Période historique

Dès le Moyen Age, ces marécages sont aménagés par les sociétés : moulins, barrages et pêcheries s'y multiplient. Les hommes gèrent désormais les flux d'eau et contrôlent les inondations temporaires dans les dépressions topographiques. La sédimentation qui en résulte est alternativement tourbeuse et limoneuse pendant toute la période médiévale. Certains marais, complètement asséchés durant l'été, servent alors de pâturages.

2.2.2. Loire moyenne

Visset et al. (2005) ont les conclusions géomorphologiques suivantes quant à l'étude paléoenvironnementale d'enregistrements sédimentaires situés entre Tours et Saumur :

« D'un point de vue hydrologique, cette première partie de l'Holocène (Préboréal, Boréal et Atlantique) est analysée comme une période de lente installation de la métamorphose fluviale dont les prémices sont constatées au Tardiglaciaire. L'incision du cours principal de la Loire et l'entourbement des paléochenaux situés dans les vals marquent une nette diminution des transferts alluviaux, en lien avec le réchauffement postglaciaire. C'est à l'Atlantique que la stabilité des hydrosystèmes s'exprime le plus nettement avec des vitesses de sédimentation très réduites dans les bras morts (< 0.5 mm/an) (Carcaud, 2004). »

Au Subboréal, « les enregistrements sédimentaires montrent les premiers signes d'une évolution de la dynamique de la Loire vers des débits et des transferts alluviaux plus abondants. A partir du Néolithique moyen, les plaines d'inondation sont atteintes par des alluvions plus grossières (limono-sableuses) qui provoquent le remblaiement rapide des bras morts [2.7 à 4.2 mm/an]. Ce contexte d'hydrologie active s'accroît au Néolithique final et pendant l'Age du Bronze. Dans les Vals, on note alors une réactivation de certains paléo-bras de la Loire [...]. »

¹ En l'occurrence, des installations de traitement du sel marin.

En ce qui concerne la période Subatlantique, « on constate une réduction des flux hydrologiques et sédimentaires durant l'Age du Fer. Elle se matérialise par la reprise d'une décantation argilo-tourbeuse dans les bras morts ».

Pendant la période gallo-romaine, le remplissage des paléochenaux se poursuit à des taux à peu près constants, de l'ordre de 0.2 à 0.6 mm/an.

Au contraire, « le Moyen-âge représente un seuil important pour la dynamique des Vals [...]. Depuis, on observe une disparition des sédiments tourbeux et une accélération des vitesses de sédimentation [atteignant 1.7 à 2.1 mm/an]. Cette rupture dynamique est interprétée comme une réponse de l'hydrosystème au déboisement des paysages végétaux de versant et de fond de vallée. »

2.3. MORPHOLOGIE FLUVIALE DE LA LOIRE AVAL

La plupart des auteurs s'accordent sur le fait que les dépôts identifiables sont souvent très locaux, lenticulaires, et qu'il est extrêmement délicat de définir une séquence étant donnée cette variabilité latérale (commune en domaine estuarien).

Néanmoins, une séquence idéale est proposée entre autres par Alix (1969), et reprise par Limasset (1988) :

- socle (souvent altéré dans sa partie supérieure),
- sables grossiers et galets de base du remplissage,
- sable de Loire (dans le chenal et les paléo-chenaux),
- alternance d'argiles, argiles sableuses, sables argileux et sables (parfois appelée « jalle »),
- vase (sur les prairies basses inondables).

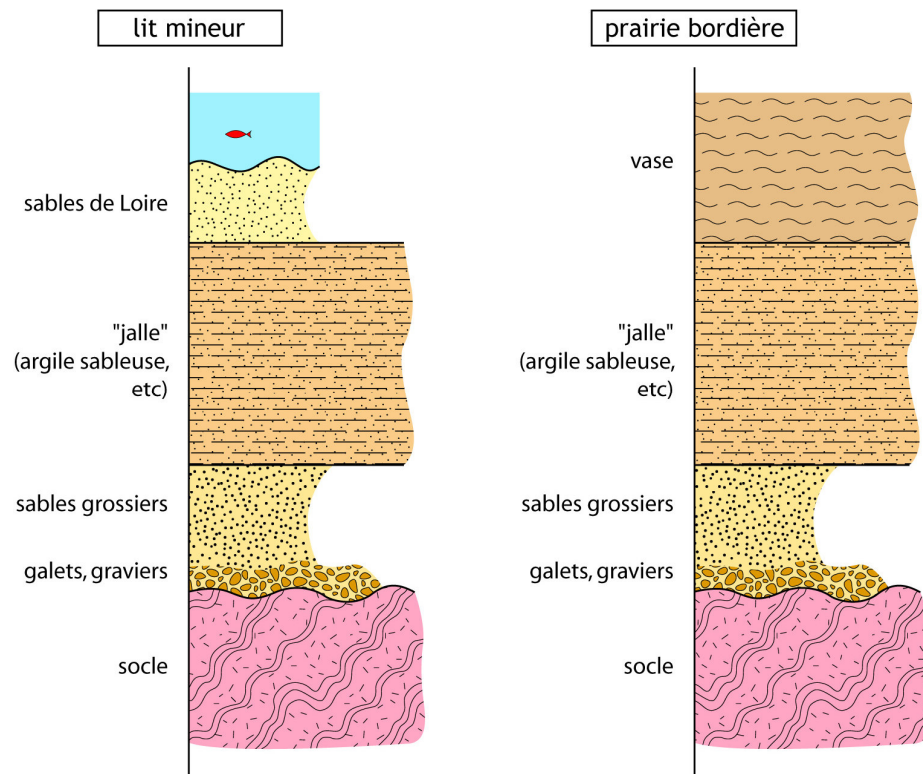


Figure 10 – Séquence schématique du remplissage alluvial dans la zone de l'estuaire, d'après Alix (1969)

Une étude géomorphologique de la « Basse-Loire », publiée par Barbaroux en 1981, décrit l'estuaire dans sa partie la plus aval (le dernier tronçon, situé en aval de notre zone d'intérêt). Elle a servi de base aux paragraphes ci-dessous.

2.3.1. Evolution naturelle : incisions et remplissages

a) Dominance de l'aggradation

Barbaroux (1981) propose une chronologie des phases d'incision et de remplissage de la Loire à l'aide de deux transects situés en aval de la zone qui nous intéresse : l'un entre Penhoët et Mindin, l'autre entre l'Aiguillon et les Morées.

En l'absence de données géochronologiques précises, les âges des dépôts fournis par l'auteur sont des estimations. Nous ne reportons ici que la coupe couvrant la chronologie la plus large : le transect de l'Aiguillon aux Morées. L'autre transect, ne présentant qu'une succession de creusements non repérés chronologiquement, n'est pas présenté.

Le point remarquable de la séquence proposée (Figure 11) est la dominance des phases d'alluvionnement sur l'ensemble l'Holocène, alors que durant la période précédente (fin du Pléistocène, de ~25000 à 10000 B.P.), le creusement du lit avait

clairement prévalu. Une reprise d'érosion localisée semble cependant avoir interrompu la phase de remplissage entre 7800 et 3850 B.P. (Figure 11, d), elle pourrait être corrélée à la phase régressive de 4500 BP. On remarquera par ailleurs la création de deux gouttières, siège du passage du lit de la Loire, séparées par un point haut.

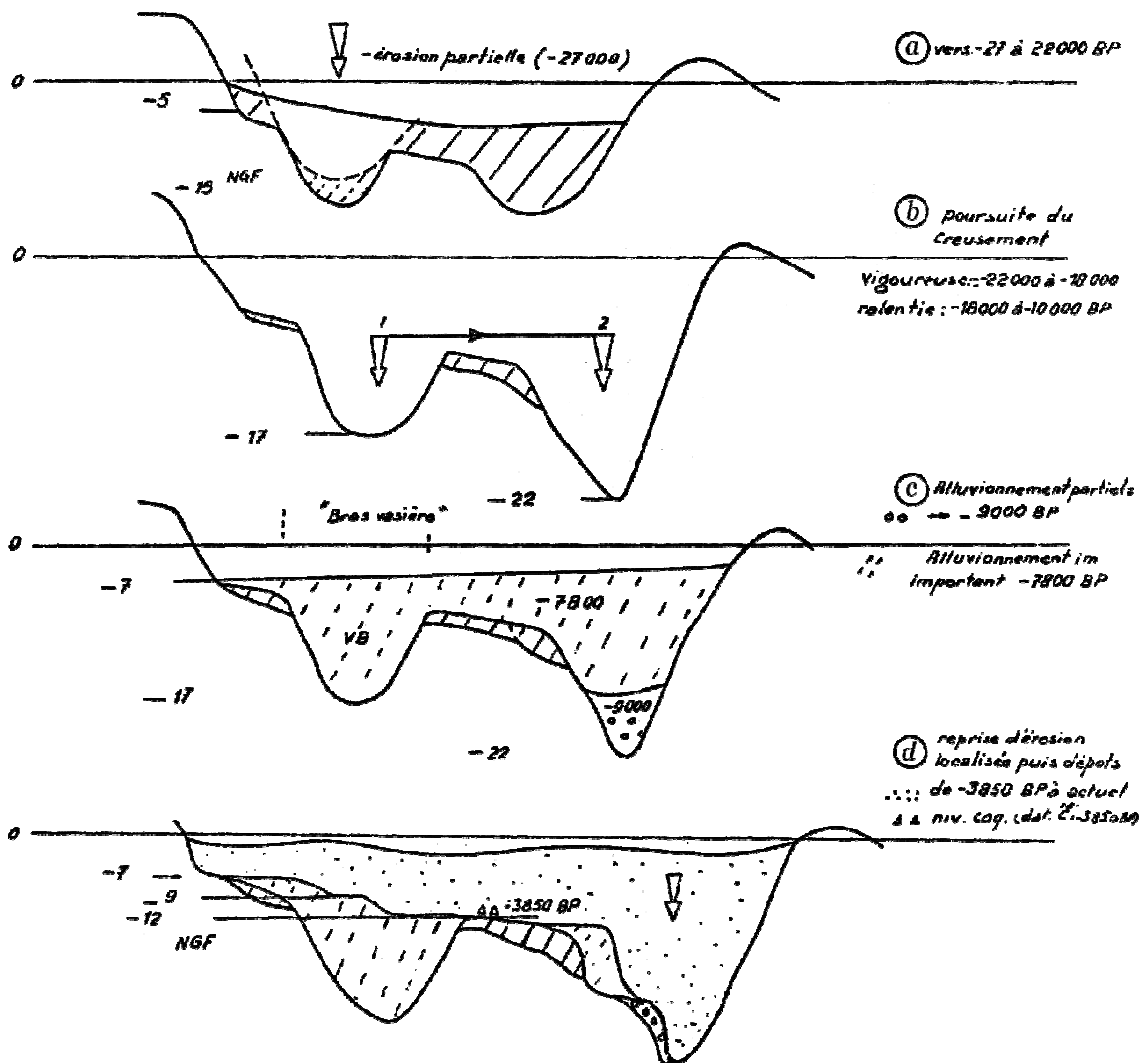


Figure 11 – Evolution des gouttières du fleuve, sur une coupe transverse L'Aiguillon-Les Morées (extrait de Barbaroux, 1981)

b) Secteur de Saint-Nazaire

Barbaroux (1981) détaille la séquence de dépôts alluvionnaires de la Loire dans le secteur Donges-Saint-Nazaire (toujours en aval immédiat de notre zone d'intérêt), à partir de sondages et d'études antérieures.

Le lit rétréci dans la zone de Saint-Nazaire apparaît comme un chenal étroit à la base, rempli de plusieurs couches d'alluvions déposées depuis 18000 ans (Figure 12). Une

seule reprise d'érosion est notable à l'Holocène, par un léger encaissement du chenal au Nord, dans les dépôts du Subatlantique et du Subboréal.

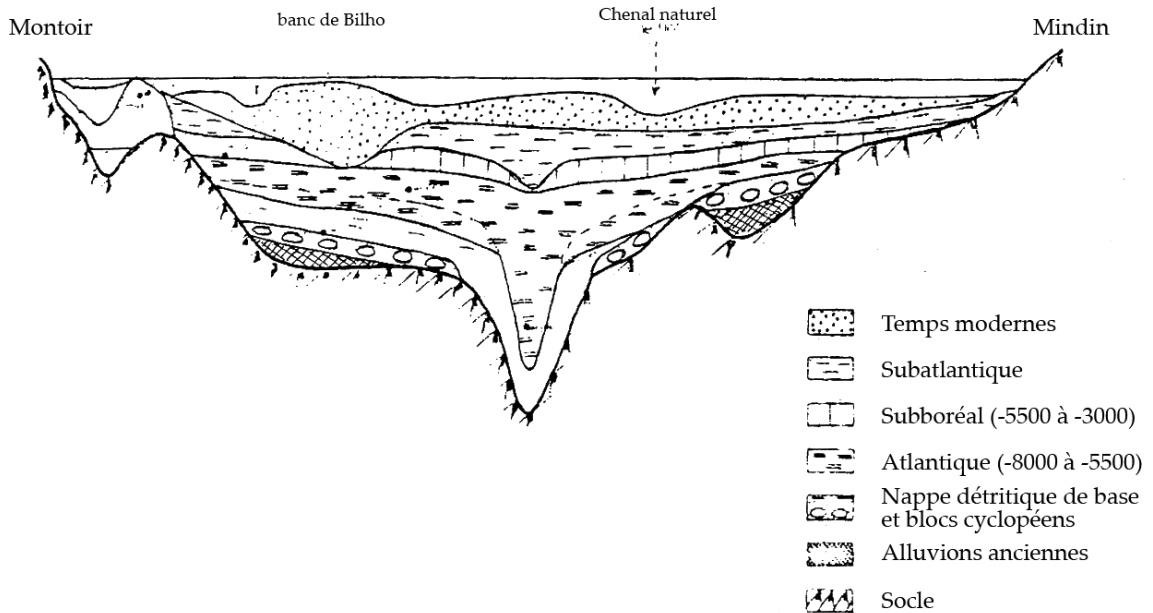


Figure 12 – Coupe schématique du remplissage estuarien, entre Montoir et Mindin (extrait de Barbaroux, 1981)

Les décalages entre les positions du lit actuel, et celles des paléolits subatlantique et tardiglaciaire démontrent clairement **la mobilité du chenal principal à l'échelle de quelques milliers d'années**. Ce phénomène s'observe d'ailleurs tout au long de la Loire. Ottmann et al. (1968) notent par exemple qu'au niveau de l'île du Carnet (près de Paimboeuf), le substratum rocheux est particulièrement profond (34 à 41 m NGF). Cette morphologie en creux est interprétée comme un ancien lit qui apparaît clairement décalé vers le Sud par rapport au lit actuel (Figure 12).

L'évolution et les changements de granulométrie du remplissage sont interprétés par Barbaroux comme des indices de la dominance de l'influence marine ou fluviale. Au cours de l'Holocène, deux périodes à influences fluviales dominantes apparaissent :

- lors de la régression subatlantique, la dominance fluviale est marquée par un horizon plus grossier dans les sables à la hauteur de Saint-Nazaire / Mindin (Barbaroux et al., 1974),
- au Petit Age Glaciaire (XVII–XVIIIe siècles) (Barbaroux, 1981).

L'évolution de l'estuaire de la Loire durant le dernier cycle glaciaire-interglaciaire peut être résumée ainsi (Barbaroux et al., 1974 ; Barbaroux, 1981) :

- Au Würm, une phase érosive creuse fortement le lit et y dépose blocs (colluvions) et alluvions.

- Vers 15000 à 13000 BP, on observe des dépôts marins à huîtres dans la région de Montoir.
- A l'Atlantique, la sédimentation débute par un niveau grossier à galets et se poursuit avec des niveaux plus fins tout au long de cette période.
- Au Subboréal, durant une phase de stabilité du niveau marin, on note une reprise d'érosion puis des dépôts lagunaires avant le retour d'une sédimentation à caractère marin.
- Au Subatlantique, on observe d'abord un horizon grossier marquant une influence fluviale forte, suivi de dépôts plus fins traduisant un retour à des conditions plus maritimes. Une nouvelle phase sableuse d'origine fluviale accompagne un épisode régressif et un refroidissement du climat. Cette phase se produit juste avant le Dunkerquien (période du Haut Moyen Age marqué par une transgression) qui voit s'installer un régime estuarien proche de l'actuel avec des sédiments silto-vaseux. Seule une incursion marine franche y a été observée. Le remplissage estuarien se poursuit jusqu'à l'Actuel, le Petit Age Glaciaire est marqué par une reprise d'érosion.

2.3.2. Aménagements anthropiques

Si l'influence anthropique a probablement insidieusement modifié la dynamique du fleuve depuis les débuts du Néolithique, l'accélération de la pénétration marine et l'augmentation des aménagements et travaux dans l'estuaire interviennent au cours de la période historique récente (Barbaroux 1981).

L'aménagement de l'estuaire depuis la période préindustrielle peut être résumé en trois grandes étapes :

1. **chenalisation par endiguages** (1750–1840) : Cette chenalisation a été réalisée dans le but de faciliter l'accès au port de Nantes en suscitant un « auto-dragage » du fleuve. Cette opération a consisté à réunir des îles et à supprimer des bras morts en les obstruant par des digues, afin de renforcer le courant principal et de le contraindre dans un chenal unique.
2. **approfondissement des chenaux naturels, dragages et canal de dérivation** (1840–1930) : l'auto-dragage n'ayant pas été assez efficace, on commença par approfondir le chenal fluvial par dragages successifs, jusqu'à l'amener à la cote -5 m. Un chenal artificiel fut ensuite creusé dans le rocher et dans les alluvions de la rive gauche, mais son utilisation fut rapidement abandonnée, et les efforts furent reportés sur les dragages et les endiguements.
3. **chenaux artificiels** (1930–actuel) : une loi d'utilité publique permettant rectifier le cours de fleuve depuis 1933, de nombreux travaux ont été entrepris au cours du XX^e siècle : dragage, remblaiements, creusement et rectification de chenaux artificiels. Ces travaux ont conduit à une artificialisation de plus en plus marquée de l'estuaire, surtout à l'aval de Nantes.

L'observation des cartes de 1887 à 1976 (Figure 13) montre clairement l'évolution imposée au fleuve par les aménagements anthropiques. Ceux-ci sont responsables de la réduction très importante de la largeur du lit du fleuve d'un facteur 5, sa chenalisation par la mise en place de digues et la suppression des bras secondaires et annexes hydrauliques. Par ailleurs, cette réduction de la largeur disponible à l'écoulement s'accompagne d'une réduction drastique du nombre d'îles. Ces modifications influent directement sur les vitesses des écoulements qui sont augmentées, l'expansion latérale des crues qui est restreinte, les processus de stockage et déstockage sédimentaire qui sont profondément modifiés.

Les répercussions de ces modifications hydrogéomorphologiques ont eu et ont encore des conséquences majeures sur la dynamique des flux (liquide, solides) et des échanges et interactions entre eaux douces et salée. En témoignent entre autres : l'augmentation du bouchon vaseux et sa remontée vers l'amont, la remontée de la limite de salinité de 25 km depuis 1950 et enfin, la remontée de la marée dynamique de 35 km depuis 1900.

Toutefois, ces modifications du comportement de l'estuaire ne sont probablement pas dues uniquement aux aménagements locaux. Ainsi, les modifications de l'occupation du sol et les aménagements hydrauliques effectués aussi bien en Loire moyenne depuis le Moyen Age (édification des levées, ouvrages de navigation etc. Garcin et al ; 2006) que dans le bassin amont durant les dernières décennies (retenues et barrages hydrauliques) ont aussi une part de responsabilité dans cette évolution.

2.3.3. L'exemple de l'île de Cordemais

L'île de Cordemais est la réunion récente de deux îles (Ottmann et al., 1968). Les cartes de 1755 montrent en effet que ces îles étaient réduites à deux rochers, qui, par l'accrétion de sédiments, se sont transformés en îles visibles sur les cartes de 1887 (Figure 13). Ce remplissage alluvial a été largement favorisé dès le XIX^e siècle par la construction de digues en bois réunissant les deux îles.

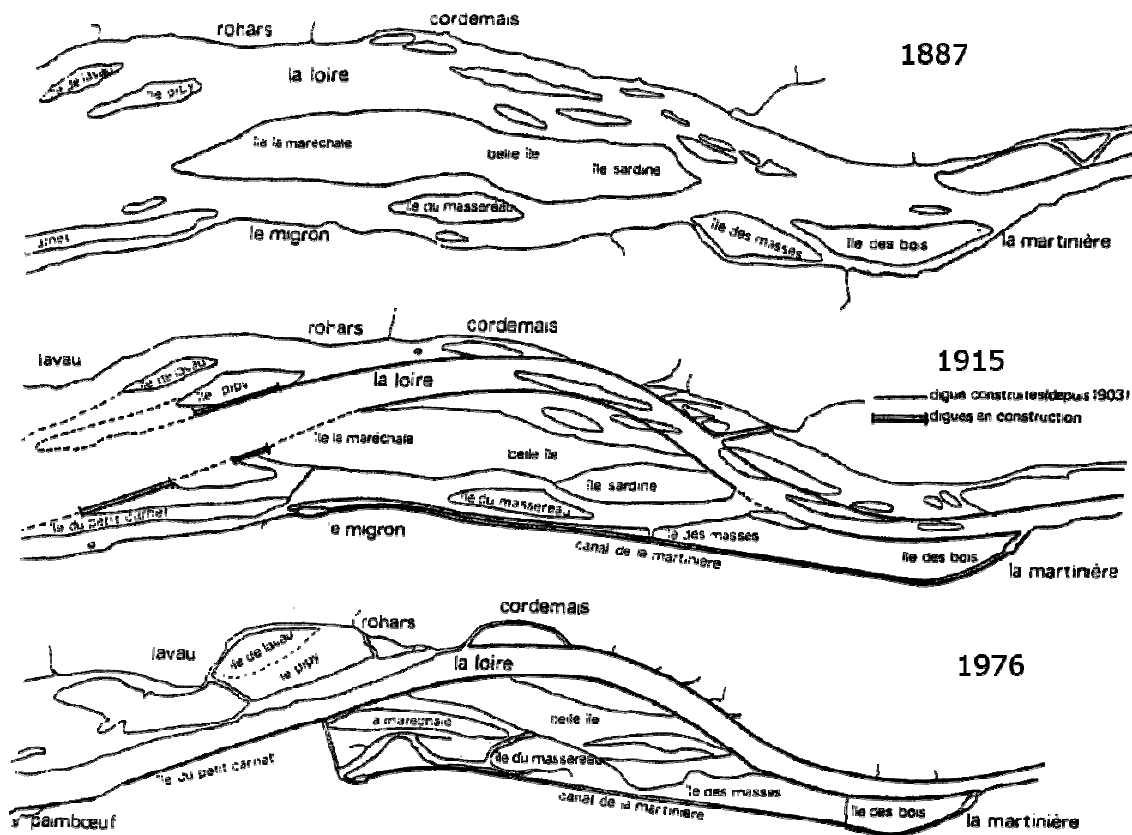


Figure 13 – Evolution de l'estuaire amont de 1887 à 1976, entre La Martinière et Paimboeuf (extrait de Barbaroux, 1981, d'après un document OREAM)

a) Situation paléoenvironnementale

Un cordon vaseux, ou bourrelet de rive, se développe en bordure de la Loire aux environs de la seconde moitié de la période Subboréale (4700–3600 B.P.), vraisemblablement du fait d'une accumulation de vase venant de l'amont (Cyprien et Visset, 2000). Dès lors, la mer ne peut plus pénétrer dans la cuvette, le milieu devenant strictement palustre.

b) Remplissage sédimentaire

Le remplissage récent de l'île de Cordemais comporte une bonne épaisseur de vase essentiellement argileuse (jusqu'à 25 m par endroit). Ottmann et al. (1968) soulignent que bien que cette vase comporte une fraction organique (roseaux écrasés), il ne s'agit pas pour autant de vraie « tourbe ». Il ne faut donc pas confondre ces dépôts avec ceux de la phase de remplissage terminale, strictement tourbeuse, des marais voisins.

De leur côté, les chenaux bordant l'île sont colmatés par plusieurs mètres de sable de Loire gris noirs en tout point comparables aux sables actuels (Ottmann et al., 1968).

c) Substratum rocheux

Le rocher qui constitue le soubassement de l'île (et sert ainsi de fondations à la centrale thermique qui s'y trouve) est composé de migmatites recoupées de nombreux filons de pegmatites et de quartz. Ces roches se présentent en bancs sub-verticaux, orientés en moyenne suivant la direction armoricaine, et très fracturés (Ottmann et al., 1968). L'altération des gneiss peut être très importante (jusqu'à 30 m d'épaisseur).

Sur les flancs des thalwegs, les roches altérées présentent en outre de nombreux niveaux d'oxydation secondaire consistant en croûtes ferrugineuses parfois épaisses. Ottmann et al. (1968) interprètent ces dépôts comme des témoins de périodes d'arrêt du remplissage, sans doute liées aux stationnements du niveau marin lors de la transgression flandrienne.

Du fait de l'altération des bancs, on observe une morphologie du substratum en fosses d'altération alternant avec des arêtes résistantes. Le thalweg rocheux qui recoupe l'île atteint jusqu'à 30 m de profondeur.

2.4. CONCLUSION

Dès la fin du Weichsélien le niveau marin remonte rapidement jusqu'aux alentours de 6000 BP, la transgression est ensuite beaucoup plus lente et montre des phases régressives courtes. Ces fluctuations de la transgression flandrienne vont conditionner en grande partie les phases et la nature des dépôts, aussi bien dans l'estuaire que sur ses marais marginaux. Alors qu'au Weichsélien et au Tardiglaciaire, la Loire a un comportement essentiellement incisif, l'Holocène se caractérise par une phase de sédimentation et de colmatage des morphologies préexistantes. Les courtes oscillations régressives et péjorations climatiques de l'Holocène entraînent généralement, soit une incision modérée de la Loire dans les dépôts antérieurs, soit une augmentation de la granulométrie des sédiments.

Les études des paléoenvironnements et des sédiments holocènes ont été réalisées principalement dans les marais marginaux de l'estuaire. C'est de ces recherches que proviennent l'essentiel des datations et des reconstitutions des milieux. Les études traitant de l'estuaire *sensu stricto* sont rares et n'offrent généralement que peu d'informations stratigraphiques étayées sur des analyses fines (datations radiocarbone, palynologie etc.). Par contre, elles permettent d'avoir une vision géométrique des dépôts qui est complémentaire. Le principal trait qui en ressort est la grande variabilité morphologique du toit du substratum. Celui-ci semble en effet caractérisé par la présence de nombreux paléoreliefs ennoyés sous les alluvions. Le chenal principal de la Loire est affecté d'une très grande mobilité à l'échelle de quelques milliers d'années. Cette mobilité explique la morphologie complexe du substratum sous jacent qui a été modelé par les chenaux successifs de la Loire.

Les changements climatiques et notamment le réchauffement holocène ont induit des modifications environnementales à l'échelle du bassin versant. Elles ont abouti à une transformation de la dynamique fluviale à l'échelle de l'hydrosystème. Les flux aussi bien liquides que solides ont varié à la fois qualitativement et quantitativement et ces

variations ont entraîné, en amont de la zone d'intérêt, un changement du style fluvial. A ces modifications d'origine climatique il faut ajouter, dès le Néolithique, les modifications de l'usage du sol par les sociétés humaines. Ces actions anthropiques, dans un premier temps assez discrètes, vont progressivement devenir de plus en plus sensibles. Elles vont s'intensifier à partir du Moyen Age pour prendre un caractère exponentiel à l'époque moderne. L'évolution des paramètres caractérisant le bassin versant ne peut pas être sans effet au niveau de l'estuaire qui en va subir les effets résultants. L'estuaire va en quelque sorte « réagir » à l'ensemble de ces changements de paramètres. A cela s'ajoute les effets directs des aménagements et travaux entrepris sur l'estuaire lui-même. Les paramètres d'entrée de l'estuaire ont été modifiés et le système estuarien lui-même a été modifié. Dès lors l'attribution d'une évolution d'un des paramètres de l'estuaire à une cause unique paraît délicate, il est fort probable qu'elle soit la résultante de plusieurs causes d'origine diverse.

Un récapitulatif de l'ensemble des données concernant les paléoenvironnements et les paléoconditions hydro-sédimentaires de la Loire aval et moyenne est présenté dans la figure 14.

| Ech. âge (B.P.) | Etage | Dates | Niveau marin relatif | | Tempé rature | Marais | Sédimentation Saumur-Nantes | Sédimentation aval de Nantes |
|--|---------------|-----------------------------|----------------------|----------|-----------------|---|---|---|
| | | | valeur (m NGF) | tendance | | | | |
| 0 | | | 0 | | | | | |
| 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 | | XVIIIe 2000-1500 1700 | 0 | ↗ | ↘ (PAC) | Gestion anthropique de l'eau Inondations temporaires Marais asséchés l'été (pâtures) ⇒ sédimentation tourbeuse / limoneuse Intrusion marine en Brière Sud | Disparition des sédiments tourbeux Accélération de la sédimentation Réduction des flux hydro-sédimentaires Décantation argilo-tourbeuse dans bras morts | Hiatus Poussée fluviale sableuse Dépôts plus fins Horizon détritique Hiatus |
| 2000 2200 2400 2600 2800 3000 3200 3400 3600 3800 4000 | Subatlantique | | | ↗ | ↗ | Dépôts alternés tourbe / limon ↗ d'humidité Disparition des marécages amont ⇒ tourbières Isolement de la Brière ⇒ phase lacustre Nombreux marécages | Alluvions grossières limono-sableuses Remblaiement rapide des bras morts Alternance dépôts tourbe / limon ↗ des sables fins et grossiers (Munet, Oudon) Flux hydro-sédimentaires plus abondants Hiatus | |
| 4000 4200 4400 4600 4800 5000 | Subboréal | | | ↗ | ↗ | | | |
| 5200 5400 5600 5800 6000 | | 6000 | -6/-7 | ↗ | | Intrusions marines Passée tourbeuse : ralentissement de la transgression | | Début du remplissage à Saint-Viaud par une couche argilo-sableuse Argile verte |
| 6200 6400 6600 6800 7000 | Atlantique | 6370 | -5 | | | Forte salinité | | |
| 7200 7400 7600 7800 | | 7260 | -9 | | | Début d'une forte influence marine | | |
| 8000 8200 8400 8600 8800 | Boréal | 8000 | -17 | | | Intrusion marine en Brière Assèchement en amont | | |
| 9000 9200 9400 9600 9800 | Préboréal | | | | | Munet inondé | | |
| 10000 | | 9840 | ~ -45 | ↗ | | | dépôts de limons | Sables vaseux |

Figure 14 – Récapitulatif des données d'évolution environnementale et sédimentaire de l'estuaire de la Loire

3. Les sondages

3.1. METHODOLOGIE

L'approche proposée vise à exploiter les données de sondages référencés dans la « Banque de Données du Sous Sol » (BSS) dont le BRGM est le détenteur. Tous les ouvrages traitant du sous-sol et ayant dépassé 10 m de profondeur doivent être versés dans la BSS selon le code minier. Cette base de données est gérée par les Services Géologiques Régionaux (SGR) du BRGM. Cette base de données est à l'origine conservée sous forme de fichiers papier. Dès la fin des années 1970, les données (toujours conservées sous forme papier) ont été parallèlement saisies informatiquement.

Les données présentes dans la BSS proviennent donc d'ouvrages dont les finalités et les dates de réalisation sont très variables (étude géotechnique, forages pétrolier, recherche d'eau, creusement de puits, forage scientifique etc.) De ce fait, les informations contenues dans chaque dossier peuvent être très disparates et très éloignées de nos besoins présents. La qualité de l'information originellement relevée est très variable selon l'objectif du projet initial, la méthode et les techniques utilisées et les connaissances du foreur. C'est pour cela que dans le cadre d'études travaillant sur des formations superficielles récentes, qui sont très souvent délaissées voir ignorées par les sondeurs, il nous est nécessaire de filtrer les forages BSS afin de ne garder que ceux susceptibles de nous donner l'information recherchée. Par ailleurs, l'hétérogénéité des descriptions des logs lithologiques ne permet pas une exploitation directe des données contenues dans la BSS informatique. C'est ce type de limite dans l'exploitation de la BSS actuelle qui a conduit le BRGM à lancer un vaste programme de mise à jour et de validation des données du sous sol nommé « Référentiel Géologique ». Pour réaliser notre étude, nous nous sommes appuyés d'une part sur le « Référentiel Géologique » et d'autre part sur des travaux réalisés précédemment en Loire moyenne dans le cadre de projet de recherche à vocation géologique (secteur d'Avaray ; Garcin et al. 1999 ; Garcin et al. 2001) et à vocation géo-archéologique (secteur de Tours, Burnouf et al. 2003, C. Blin 1998 ; C. Taberly 1999: Maîtrises de l'Université d'Angers, O.Marlet 2001: Maîtrise de l'Université de Tours; secteur d'Angers V.Dupont 2003).

Afin de s'extraire des contraintes et limites de la BSS, nous avons donc appliqué la démarche présentée ci-dessous.

Dans un premier temps nous avons sélectionné toutes les données de la BSS présents sur le secteur d'étude de la phase 1 ce qui a abouti à une première sélection de 1078 forages. Sur ces 1078 ouvrages nous n'avons retenu que ceux qui offraient une coupe géologique et/ou une coupe géologique simplifiée ce qui nous a ramené à 170 forages sur toute la zone Phase I et 762 sur tout l'estuaire. Or, après contrôle, il s'est avéré que certains forages notamment ceux qui sont antérieurs à la fin des années 70 pouvaient contenir des informations de type coupe géologique non mentionnées dans la base informatique. Il a finalement été décidé de passer en revue tous les dossiers papiers

des sondages présents sur les cartes concernées afin de récolter le maximum d'informations. Cette démarche nous a finalement permis de sélectionner 438 forages dans la zone de la tranche 1.

Afin de pouvoir traiter l'ensemble des données de forages selon des approches thématiques, il a été ensuite nécessaire d'homogénéiser la description de chaque forage au sein d'une nouvelle base de données.

Chaque forage possède des informations « tête de forage » incluant son indice BSS, sa position x, y, z (position en x, y en Lambert II, z en mètres NGF). L'altitude du forage est parfois peu précise, le foreur affectant souvent l'altitude approximativement à partir de sa localisation sur la carte IGN. Les altitudes ont donc été corrigées en extrayant les valeurs du MNT Unifié (fourni par le GIP Estuaire) correspondant aux positions géographiques des sondages.

Chaque passe de forage est ensuite repérée par l'indice du forage, la profondeur de toit et de mur de la passe. La description lithologique initiale qui figure dans le dossier papier est retranscrite *in extenso*. Un champ lithologie est créé. Ce champ contient un code lithologique qui est affecté en fonction de la description du foreur. Les valeurs de code de ce champ « lithologie » sont normalisées selon les règles et le lexique en vigueur dans le programme *Référentiel Géologique*. Les informations stratigraphiques, quand elles sont présentes, sont reportées. A ces champs sont ajoutés des niveaux repères qui permettent ensuite des traitements spécifiques permettant de restituer sous forme cartographiques certaines limites (toit du substratum par exemple). Compte tenu de la complexité des formations alluviales estuariennes (géométrie, passage latéraux de faciès, diachronisme...), nous n'avons retenu que les niveaux repères suivants :

- Toit du substratum qui correspond soit à la limite entre les formations estuariennes et le socle, soit à la limite entre le socle sain et le socle altéré.
- Toit de la zone altérée quand elle existe (ou a été notée). Cette limite correspond à la limite entre le socle altéré et les formations estuariennes. Dans le cas où cette zone altérée n'existe pas, ce niveau repère est confondu avec celui du toit du substratum sain.
- Toit du conglomérat de base qui correspond au sommet des formations détritiques à graviers et galets assez souvent présentes en base de remplissage alluvial. Si les niveaux grossiers de la base des alluvions ne sont pas présents, ce niveau repère sera confondu avec celui du toit du socle altéré ou celui du substratum sain.
- Alluvions, terme qui englobera l'ensemble des formations alluviales et péri alluviales (tourbe notamment) du Quaternaire.

Les niveaux repères présentés précédemment vont permettre de réaliser des cartes d'isohypse du toit du substratum, du socle altéré, de la base des alluvions et des niveaux grossiers. Ces niveaux repères permettront aussi de cartographier l'épaisseur

de socle altéré, des niveaux grossiers de base de remplissage et l'épaisseur des alluvions.

3.2. BASE DE DONNEES

La base de données comporte 554 forages totalisant 4645 passes, elle a été réalisée sous ACCESS (© Microsoft). La base est accessible avec le logiciel GDM (Gestion des Données Minières © BRGM) permettant ainsi l'édition des logs, de coupes et divers traitements d'interpolation (Figure 15).

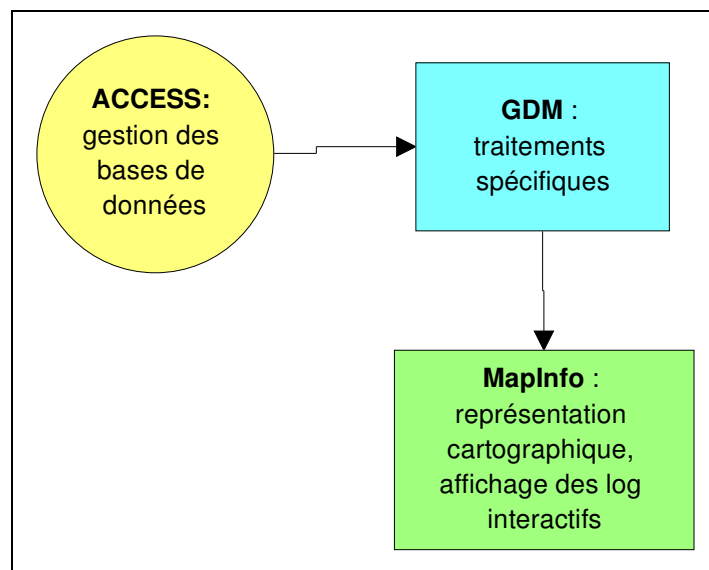


Figure 15 - Organigramme logiciel

3.2.1. Structure de la base de données

La base de données a été structurée en cinq tables relationnelles, les relations entre ces tables sont présentées dans la Figure 16.

Une table **InfoForage** qui décrit chaque tête de forage, elle comprend les champs suivants :

Indc : Index BSS complet

Indr : Index BSS réduit

X, Y, Z : coordonnées de la tête de forage avec x, y en m (Lambert II étendu) et Z en m

Date : date de réalisation du sondage

ObjectSondage : variable de type ObjetSondage

TypeSondage : variable de type TypeSondage

NomDuVal : variable de type NomDesVals

Recherche : boolean (vrai si il s'agit d'un sondage réalisé dans le cadre d'un projet de recherche, sinon faux)

Informations : informations diverses textuelles

Une table **Lithologie** qui comprend la description de chaque passe de sondage, elle est liée à la table InfoForage par le champ Indc (Index BSS complet).

La table Lithologie comprend les champs suivants :

Indc : Index BSS complet

Indr : Index BSS réduit

PROF : Profondeur de la fin de la passe

EPAI : épaisseur de la passe

FORMATION : Nom de la formation géologique – non utilisé

CODE_STRATI_BSS :

CODE_LITHOLOGIQUE : Code lithologique

ELEM : éléments particulier présents dans le sédiments (bois, coquilles etc.) – non utilisé

COUL : couleur du sédiment – non utilisé

TEXT : Description complète telle qu'elle est fournie dans le document original

X, Y, Z : coordonnées Lambert II étendu en m, Z en M de la passe

Carotte : Numéro de carotte – non utilisé

STRA : code stratigraphique

Lithologie : Description lithologique compacte textuelle

Stratigraphie : Etage stratigraphique de la passe

La table **ObjetSondage** est un type énuméré contenant les valeurs suivantes : *BSS*, *Hydrogeol*, *Geotech*, *Recherche*. Ce type permet de déterminer l'objectif initial du sondage s'il est connu.

La table **TypeSondage** contient les valeurs suivantes : *Carotté*, *SondeAMain*, *Tarière*, *Virtuel*, *Inconnu*. Ce type permet de fixer le type d'outils utilisé lors du forage s'il est connu. Le type Virtuel correspond à des sondages artificiellement ajoutés. Ce type permet de forcer un calcul d'interpolation dans une zone sans forage, mais où l'on peut évaluer l'épaisseur d'une formation spécifique. Il s'agit dans le cas de l'estuaire de créer des forages virtuels avec une épaisseur de formation alluviale nulle dans les zones où le socle affleure.

La table **NomDuVals** contient les valeurs suivantes : *EstuairePhase1*, *Estuaire...*, et permet d'associer un sondage à un espace nominatif.

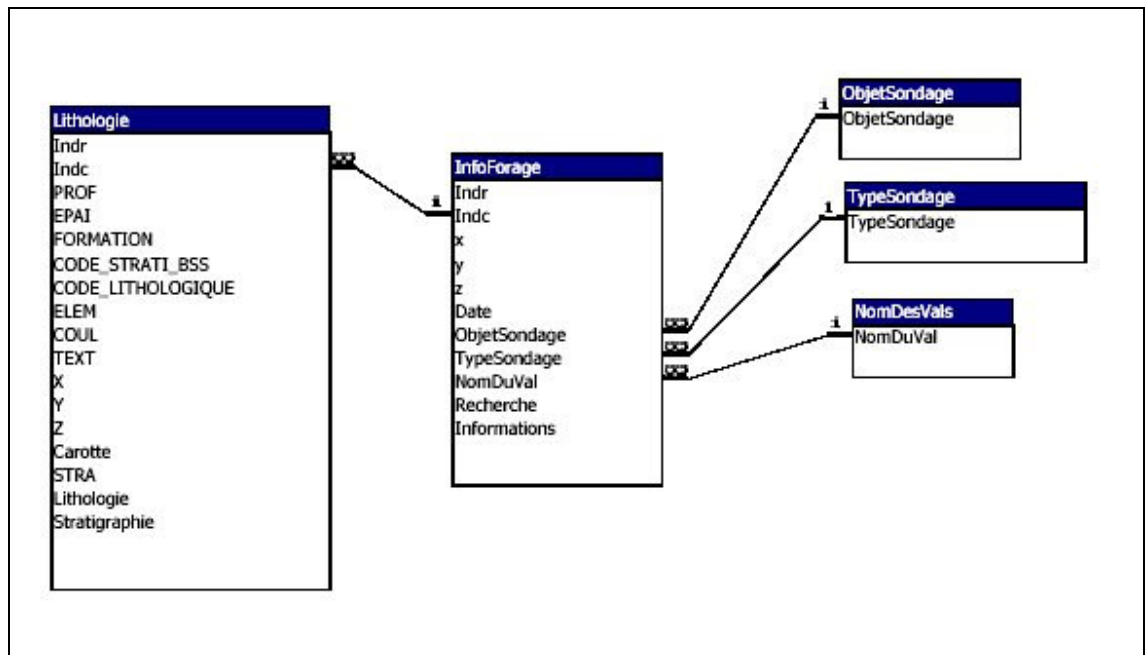


Figure 16 - Relations entre les tables de la base de données ForagesEstuaires

3.2.2. Codage et représentation graphique

L'ensemble des codes lithologiques qui ont été utilisés pour l'élaboration des logs sont présentés dans la Figure 17 et la Figure 18. Les codes stratigraphiques et leurs significations sont présentés dans la Figure 19.

| | | | | | |
|--|-------------|--------------------------------------|--|-------------|--------------------|
| | AARG | arène argileuse | | BLOC | blocs |
| | AB | argile à galets | | CAIL | gros cailloux |
| | ABLO | argile à blocs | | CONG | conglomérat |
| | AFER | argile ferrugineuse | | F | alluvions |
| | AGB | argile à galets et graviers | | FAIL | Faïlle |
| | AGR | argile à graviers | | GALE | galets |
| | AMO | argile à matières organiques | | GANa | granite d'anatexie |
| | APL | argile plastique | | GN | gneiss |
| | AREN | arène meuble | | GNO | gneiss oëillé |
| | ARGI | argile | | GRAR | grès ; argile |
| | ARGN | arène gneissique | | GRA | graviers |
| | ARGR | arène granitique | | GR | granite |
| | ARMI | argile micacée | | GRAV | grave |
| | ARSA | argile et sable | | GRES | grès |
| | ASAB | argilite sableuse | | GRF | grès fin |
| | ASB | argile sableuse | | GRNL | granulite |
| | ASF | argile sableuse fine | | LACU | Lacune |
| | ASGA | argile sableuse à galets | | LIM | limon |
| | ASGB | argile sableuse à galets et graviers | | MIGR | microgranite |
| | ASGR | argile sableuse à graviers | | MSC | micaschiste |
| | ASH | argilite schisteuse | | ORGR | orthogneiss |
| | ASIL | argile silteuse | | QTZ | quartz filonien |
| | AT | argile tourbeuse | | QTZT | quartzite |

Figure 17 - Représentations graphiques des codes lithologiques (1/2)

| | | | | | |
|--|------|-------------------------------------|--|------|---------------------------------|
| | QZ | quartz | | SFSG | sable fin à grossier |
| | RALT | Roche d'altération s.l. | | SGA | sable grossier argileux |
| | REMB | remblais | | SGB | sable à graviers et galets |
| | ROGN | roggons | | SG | sable grossier |
| | SAAR | sable argileux | | SGR | sable grossier à très grossier |
| | SAB | sable ; argile | | SILS | silt sableux |
| | SABG | sable argileux à galets | | SILT | silt |
| | SABL | sables et graviers | | SM | sable moyen |
| | SA | sable | | SMA | sable moyen argileux |
| | SAGB | sable argileux à graviers et galets | | SMGA | sable moyen à grossier argileux |
| | SAGR | sable argileux à graviers | | SMG | sable moyen à grossier |
| | SAMI | sable micacé | | SOCL | socle indéterminé |
| | SATF | sable très fin | | SSIL | sable siliceux |
| | SATG | sable très grossier | | SSLT | sable silteux |
| | SAVA | sable vaseux | | STA | silt argileux |
| | SB | sable à galets | | THRO | Dépôts anthropiques |
| | SCGR | schiste ; grès | | TOUR | tourbe |
| | SCHI | schiste | | TV | terre végétale |
| | SFA | sable fin argileux | | VAMO | vase à matière organique |
| | SFM | sable fin à moyen | | VASA | vase sableuse |
| | SF | sable fin | | VASE | vase |
| | SFMA | sable fin à moyen argileux | | VATO | vase tourbeuse |
| | SFN | sable fin à très fin | | ZERO | pas d'information |

Figure 18 - Représentations graphiques des codes lithologiques (2/2)

| | | |
|--|----------------|--|
| | HOLOCEN | Holocène (Versilien/Flandrien) |
| | QUAT | Quaternaire |
| | MQUAT | Mur du Quaternaire |
| | TCONGLO | Toit du conglomérat de base |
| | MREMPLI | Base du remplissage (= Toit du substratum) |
| | TALTER | Toit des altérites |
| | MALTER | Base des altérites meubles |
| | TSUBPAL | Toit du substratum paléozoïque |
| | PALEOZO | Paléozoïque |
| | IND | Âge indéterminé |

Figure 19 - Code stratigraphique, signification et coloration

4. Exploitation des données de sondages

4.1. CARTES THEMATIQUES

Plusieurs types de cartes thématiques ont été réalisées et concernent soit les altitudes de niveaux repères, soit l'épaisseur cumulée de certains faciès lithologiques. Ces cartes permettent d'obtenir une représentation graphique et de visualiser les morphologies sous-jacentes au remplissage alluvionnaire ainsi que les zones d'accumulation de certaines lithologies. Ces traitements, réalisés avec le logiciel GDM, aident à l'analyse et à l'interprétation des dépôts.

La méthodologie est la suivante :

1. Extraction et calcul éventuel de la valeur à interpoler dans les sondages ;
2. Pour les interpolations d'épaisseurs, on complète en indiquant 0 pour les sondages où la formation à interpoler est absente ;
3. Interpolation sur une grille dont la maille est de 100 m de coté. La zone interpolée est composée de deux sous-domaines correspondant aux zones comportant suffisamment de sondages.

Les données sont interpolées par krigeage avec variogramme linéaire sans dérive.

Les résultats de ces interpolations sont représentés sur le fond de la carte géologique à 1/50 000 par des courbes d'iso-valeurs à remplissage coloré. Y figurent par ailleurs, les positions des sondages utilisés lors de l'interpolation.

4.1.1. Toit du substratum et épaisseur des alluvions

La surface du toit du substratum rocheux (Figure 20) correspond à l'altitude de l'interface entre le substratum (généralement constitué de gneiss plus ou moins altéré) et les formations alluviales. Cette surface ne correspond pas forcément à une paléo-surface à une date donnée (isochrone) mais elle fournit, en chaque point, la profondeur maximale ayant été atteinte par l'érosion avant le remplissage alluvionnaire.

La carte du remplissage sédimentaire (Figure 21) représente l'épaisseur actuelle d'alluvions recouvrant le substratum. Dans la mesure où la topographie de la zone étudiée présente peu de relief, la carte du toit du substratum et celle de l'épaisseur des alluvions sont très proches, sauf dans la zone basse du lit mineur actuel (Figure 20, A).

Le lit mineur actuel est décalé par rapport aux zones les plus profondes du toit du substratum, indiquant des déplacements du lit mineur de la Loire au cours de l'Holocène. La carte de l'altitude du toit du substratum indique un creusement selon un

axe qui suit plutôt la direction du lit majeur que celle du lit mineur (Figure 20, A). Ainsi un profond paléo-chenal apparaît-il clairement sur la rive droite actuelle (près de Lavau), sous une pile d'alluvions de plus de 35 m (Figure 21, B) tandis qu'un autre axe se dessine sous le lit mineur actuel. Ces deux branches sont séparées par le haut fond de Paimboeuf qui apparaît très nettement sur les cartes d'interpolation. En amont de la zone d'étude, la topographie du substratum semble s'approfondir en rive gauche du lit mineur actuel, sous le lit majeur (Figure 20, C).

L'axe du paléo-chenal au niveau des Donges apparaît également sensiblement décalé du lit actuel, vers le Nord (Figure 20 et Figure 21, D). Cette zone se caractérise à la fois par le resserrement du paléo-chenal et celui de la plaine alluviale.

On peut identifier de profonds chenaux atteignant 20 m de profondeur, aux embouchures respectives des drainages des marais de Cordemais et de Bouée (Figure 20 et Figure 21, E et F). Ces paléomorphologies sont désormais comblées par les sédiments et invisibles dans le paysage actuel.

La Taillée, petite rivière débouchant sur l'île Chevalier, montre au contraire un paléo-chenal beaucoup moins profond mais plus large (Figure 20 et Figure 21, G).

Les dépressions locales que l'on observe dans la carte du toit du substratum correspondent à des artefacts dus à l'insuffisante densité de sondage en regard de la finesse de certaines morphologies (Figure 20, H).

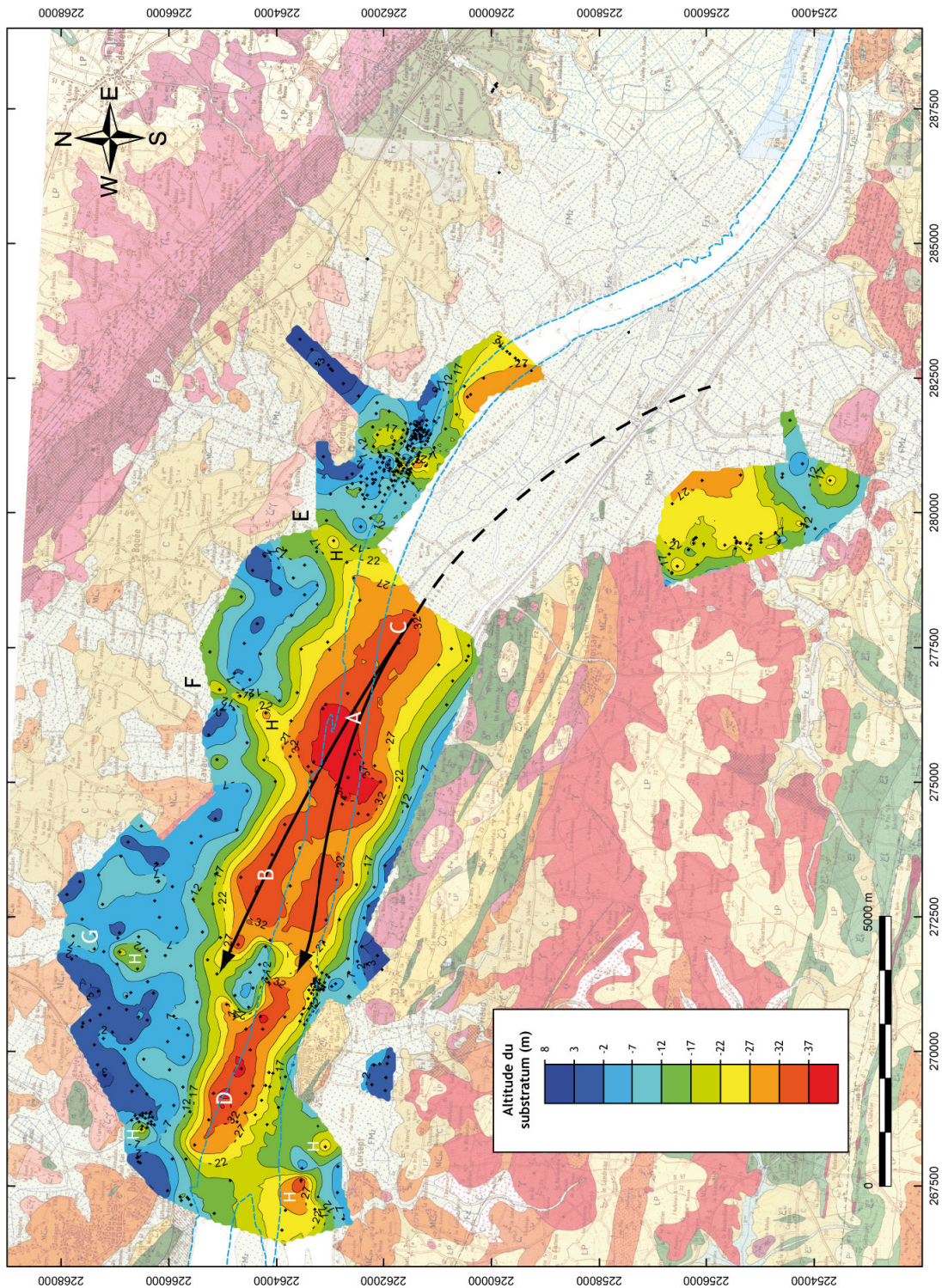


Figure 20 - Carte de l'altitude du toit du substratum

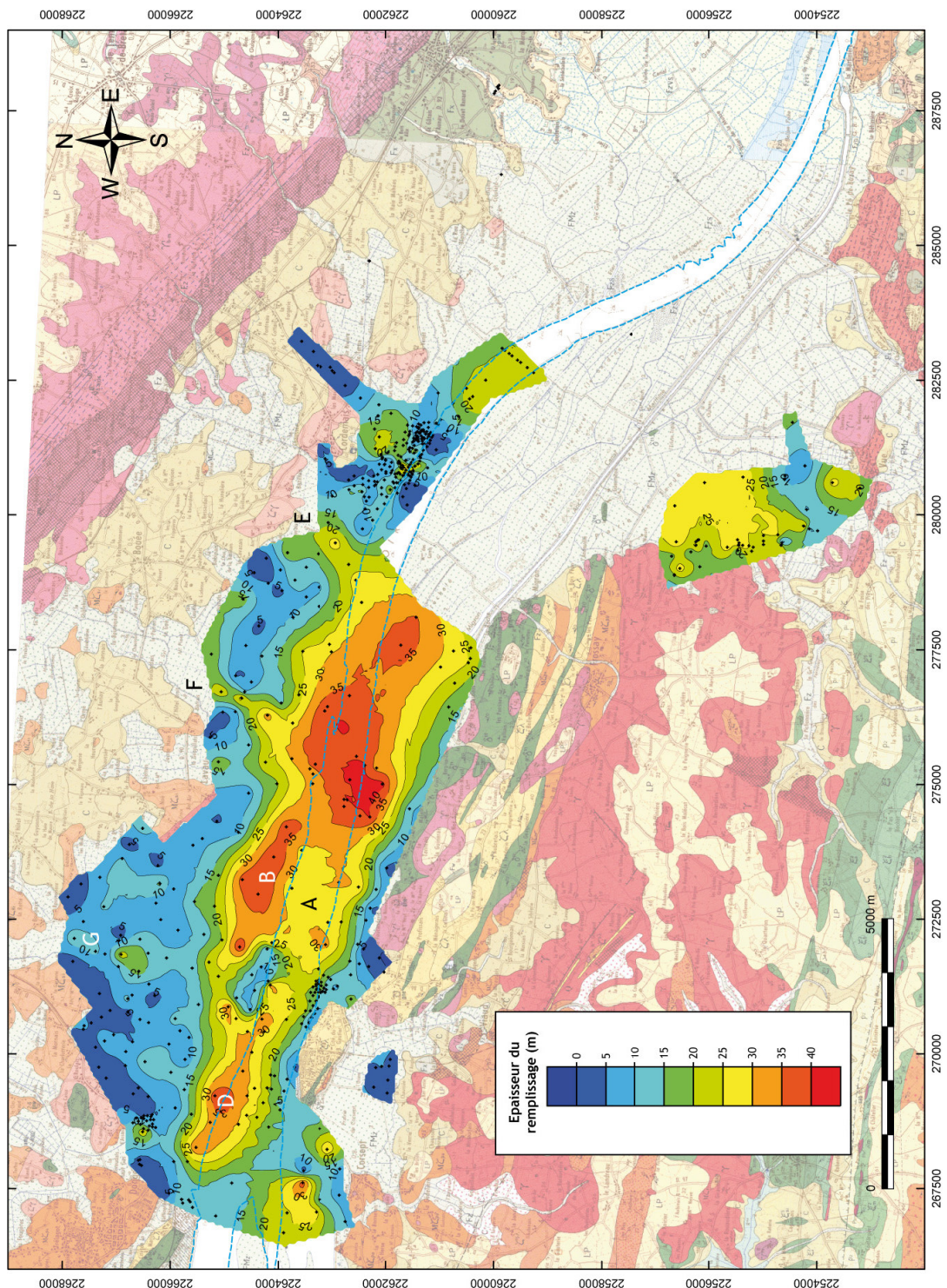


Figure 21 - Carte de l'épaisseur de remplissage alluvionnaire

4.1.2. Epaisseurs cumulées par lithologie

La réalisation de ces cartes consiste à sommer l'épaisseur d'une lithologie particulière ou d'un ensemble de lithologies proches au sein de chaque sondage. Une interpolation spatiale à partir de ces valeurs est ensuite réalisée sur le domaine d'étude. Dans le cas où aucune des lithologies cibles n'a été trouvée dans le sondage, la valeur de l'épaisseur cumulée associée au sondage est logiquement forcée à 0. Ce forçage introduit toutefois un biais dans le cas où le forage n'a pas atteint le socle ; toutefois le nombre de sondages concernés est faible sur le domaine d'étude.

La représentation en carte des épaisseurs cumulées par lithologie ou par regroupement de lithologie permet de visualiser le type de sédimentation dominante par zone.

Les zones blanches (lacunes) présentes dans les cartes obtenues correspondent à des zones sans information (pas de sondage), généralement bordées de sondages dans lesquels la lithologie ciblée est absente.

Dans la zone de l'estuaire, nous avons réalisé des cartes d'épaisseur cumulée pour les groupes lithologiques suivants :

- les blocs, galets et graviers,
- les sables et silts,
- les argiles,
- les vases,
- les tourbes.

On représente les épaisseurs cumulées par lithologie de deux manières différentes et complémentaires :

- *sensu stricto (s.s.)* : on ne prend en compte que les dépôts ayant un code lithologique particulier ;
- *sensu lato (s.l.)* : on prend en compte les dépôts ayant des codes lithologiques proches. Par exemple, les sables *sensu lato* comprendront tous les dépôts codés comme "sable ...", mais également tous ceux portant une indication de présence de sable : argile sableuse, vase sableuse, etc.

L'intérêt de réaliser des cartes à partir de lithologies *sensu lato* est de faire ressortir les grandes tendances lithologiques par zone mais aussi d'éliminer le filtre humain dû au caractère nécessairement subjectif de la description lithologique. Ainsi, la qualification d'un horizon en tant que « sable argileux » ou « argile sableuse » repose, dans le cas de ces forages BSS, non pas sur une mesure des pourcentages respectifs de sable et

d'argile, mais sur une évaluation par la personne en charge de la description du forage (filtre humain). Les cartes issues de regroupement de lithologies proches est donc une tentative de gommer ces disparités et ces artefacts.

Cartes des sables et silts

La carte des épaisseurs de sable *sensu stricto* (Figure 22) montre des zones à plus forte accumulation en marge du tracé actuel du lit mineur, là où le substratum est le plus profond. Ces dépôts sableux sur des morphologies en creux peuvent être interprétés comme des remplissages sableux de paléochenaux localisés sur les zones surcreusées lors du dernier cycle glaciaire voir au Tardiglaciaire. Les zones à plus forte épaisseur de sables sont bien visibles dans la Figure 22 (A, B, C, D et E) de part et d'autre du lit mineur.

L'épaisseur cumulée des sables *sensu stricto* peut atteindre 20 à 25 m, le maximum étant situé dans le paléochenal de la rive gauche, au niveau du point B.

La carte des épaisseurs de sables *sensu lato* confirme bien cette répartition spatiale et offre une représentation plus continue de ces dépôts à dominante sableuse. La continuité des dépôts confirme la présence de systèmes chenalisés.

Cette deuxième carte souligne par ailleurs une présence notable de sable dans les dépôts situés dans le passage entre les deux paléo-chenaux principaux, sous le lit mineur actuel (Figure 23, F) et selon un axe sécant par rapport à la Loire actuelle. A titre d'hypothèse, il est possible que la zone F (Figure 23) ait été le siège d'une sédimentation sableuse aussi épaisse et en continuité avec les points A et B et qu'elle ait été ultérieurement érodée et recoupée lors d'une phase incisive selon une bande qui correspondrait au lit mineur actuel. Les points A et B de la Figure 23 ne représenteraient que les reliquats de dépôts sableux préservés de l'érosion postérieure.

La zone riche en forages qui concerne le Marais de Vue montre très clairement la très faible quantité, voire l'absence de dépôts sableux, aussi bien *sensu stricto* que *sensu lato*. Cette lacune exprime la déconnexion de ce marais avec les apports détritiques ligériens et montre l'indépendance sédimentaire du marais par rapport à la Loire.

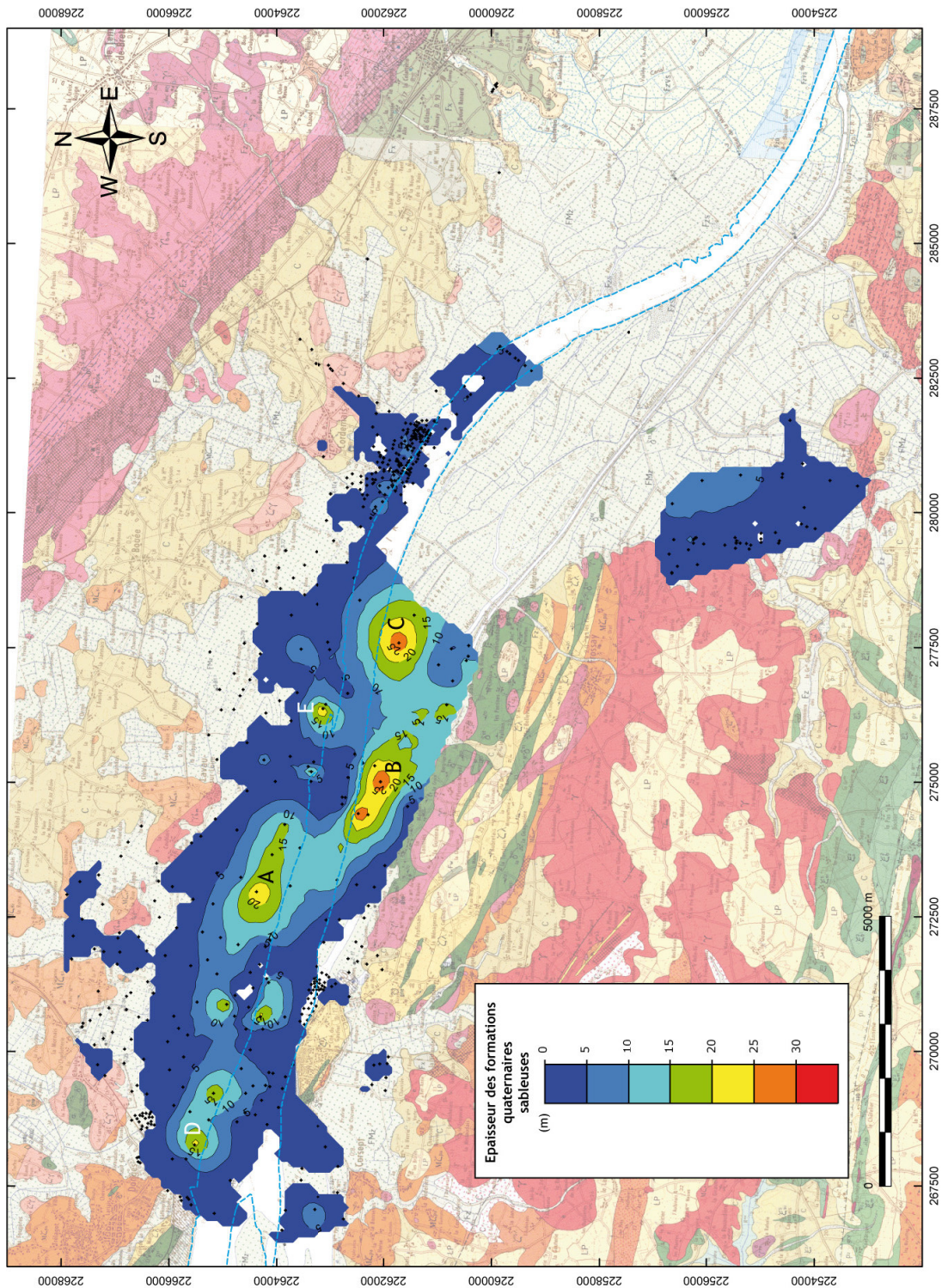


Figure 22 - Carte de l'épaisseur des formations sableuses (s.s.)

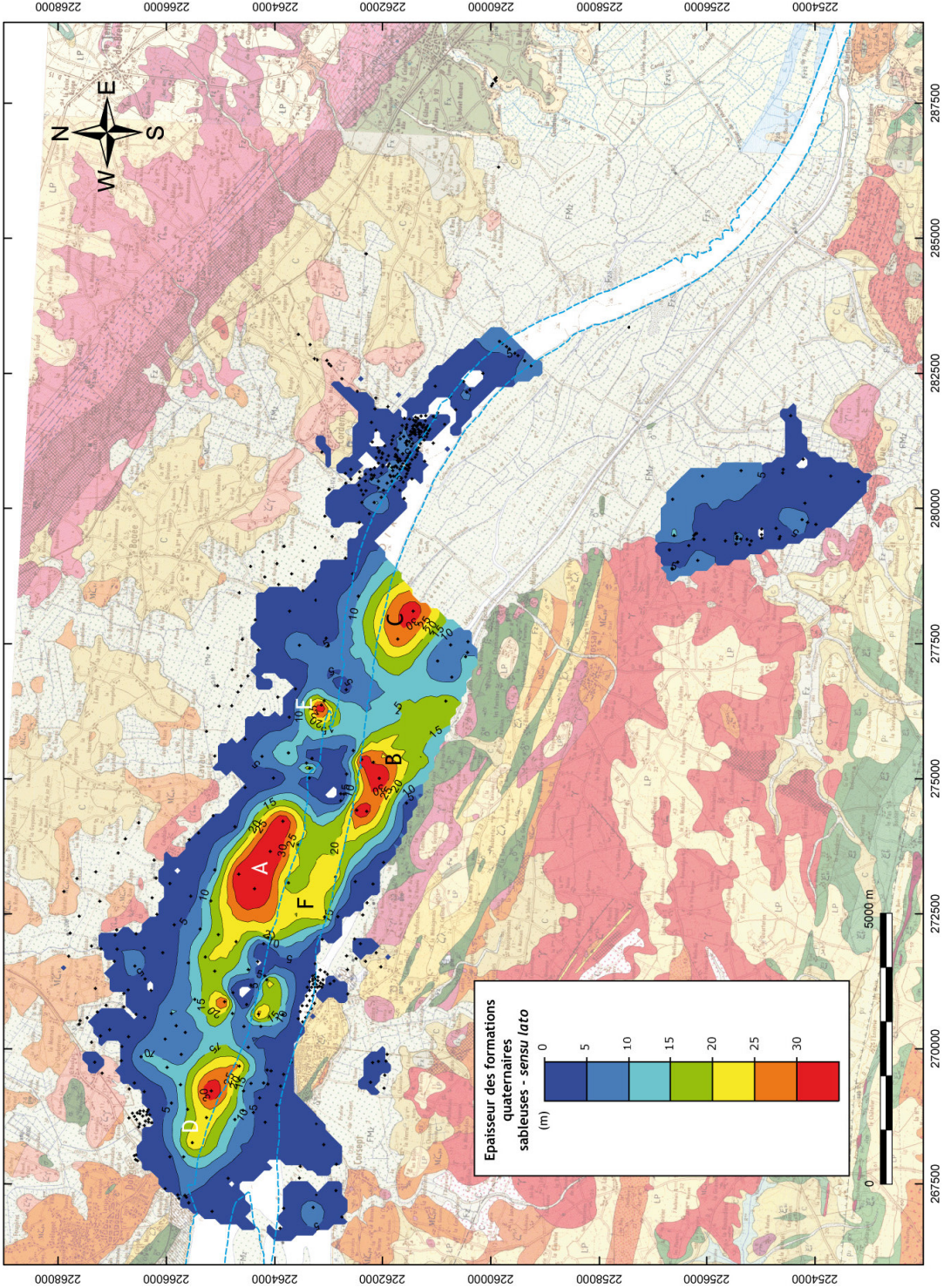


Figure 23 - Carte de l'épaisseur des formations sableuses (s.l.)

Argiles

Les cartes d'épaisseur des argiles montrent deux zones de concentration, l'une dans le système Loire en rive droite du lit mineur actuel et l'autre dans la zone du Marais de Vue (Figure 24 et Figure 25, A et B). La carte des épaisseurs cumulées d'argiles *sensu lato* obéit au même schéma que celle des argiles *sensu stricto* et ne fait que le confirmer.

La zone d'épaisseur maximale des argiles en Loire (supérieure ou égale à 20m) s'aligne sur l'un des paléochenaux de la rive droite et montre très clairement qu'il s'agit d'une tendance argileuse dans le remplissage de cette paléomorphologie (A). En rive gauche du lit mineur de la Loire par contre, les argiles sont présentes mais dans une moindre proportion et sur un domaine assez réduit. Il est intéressant de noter que, bien que les sables semblent être présents dans tous les paléochenaux incisés dans le substratum, que ce soit en rive droite ou en rive gauche, les argiles sont nettement plus inféodées au paléochenal de la rive droite.

Dans le Marais de Vue, les argiles sont bien représentées et occupent une large part du remplissage des dépressions du substratum (B).

Enfin, nous notons que l'extension générale de la zone ayant été le siège d'une sédimentation argileuse est un peu plus large au Nord-Ouest de la zone d'étude (Marais NE de Donges) que celle des dépôts à dominante sableuse.

Vases

Les deux cartes d'épaisseur des vases (Figure 26 et Figure 27) sont très proches et montrent assez curieusement une faible organisation spatiale. Une zone assez large de plus forte épaisseur de vase est à noter sous le lit mineur de la Loire à l'Est de Paimboeuf, en amont du seuil (A), sur une zone déprimée du substratum mais où l'épaisseur de sédiment est relativement faible (Figure 20 et Figure 21).

Des zones un peu plus épaisses de vase apparaissent aux débouchés des marais de rive droite et semblent connectées à ceux-ci (B).

Par ailleurs, il faut noter la présence de nombreuses zones blanches sans vases qui réalisent un mitage de la carte. Ces zones à absence de vases sont en grande partie situées sur ou à proximité immédiate des zones à forte accumulation de sable ; il semble exister une anti-corrélation au moins partielle entre ces deux formations lithologiques.

Enfin, seule la partie nord de la zone traitée du Marais de Vue montre quelques forages où l'épaisseur de vase est significative (C).

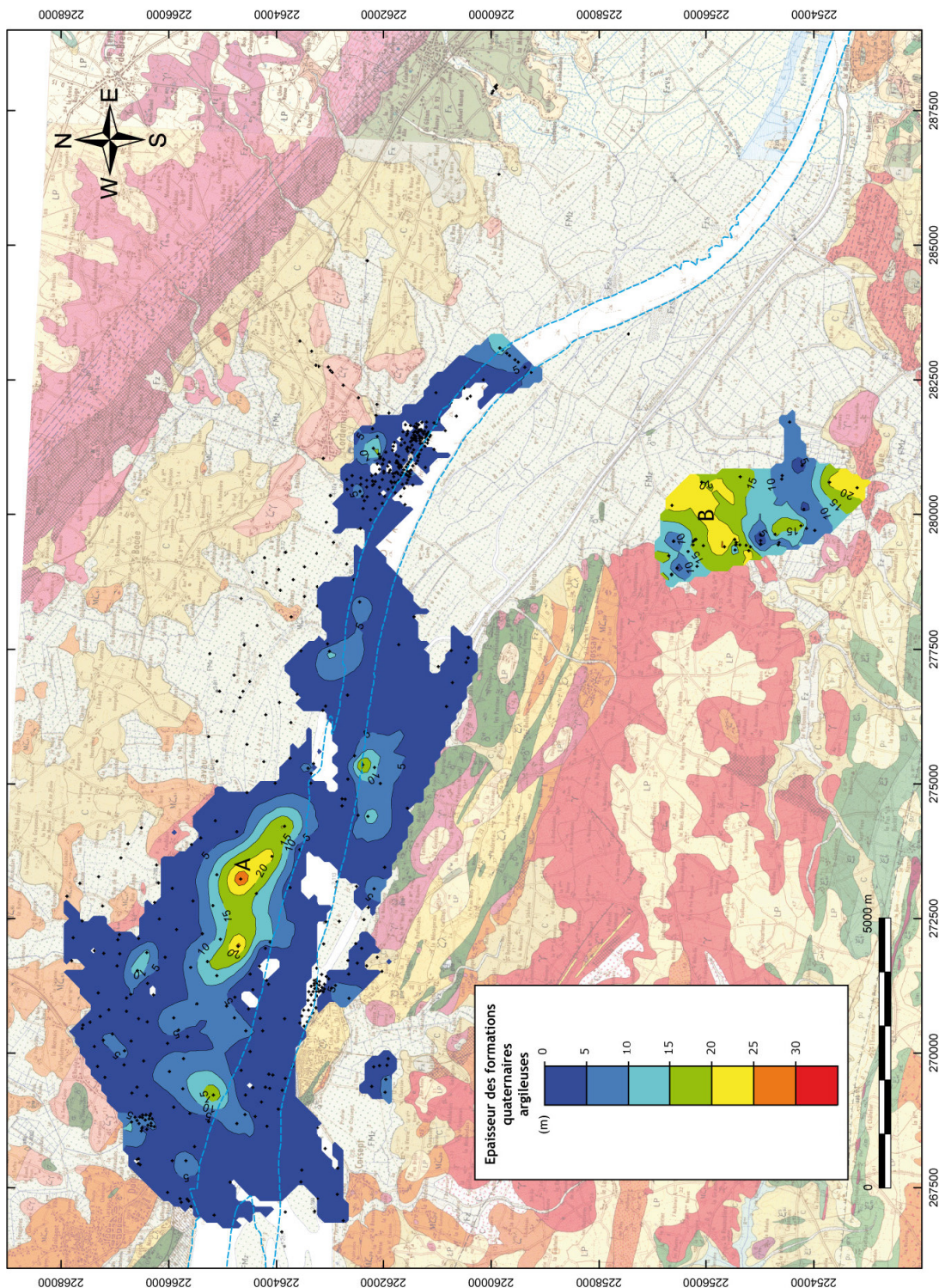


Figure 24 - Carte de l'épaisseur des formations argileuses (s.s.)

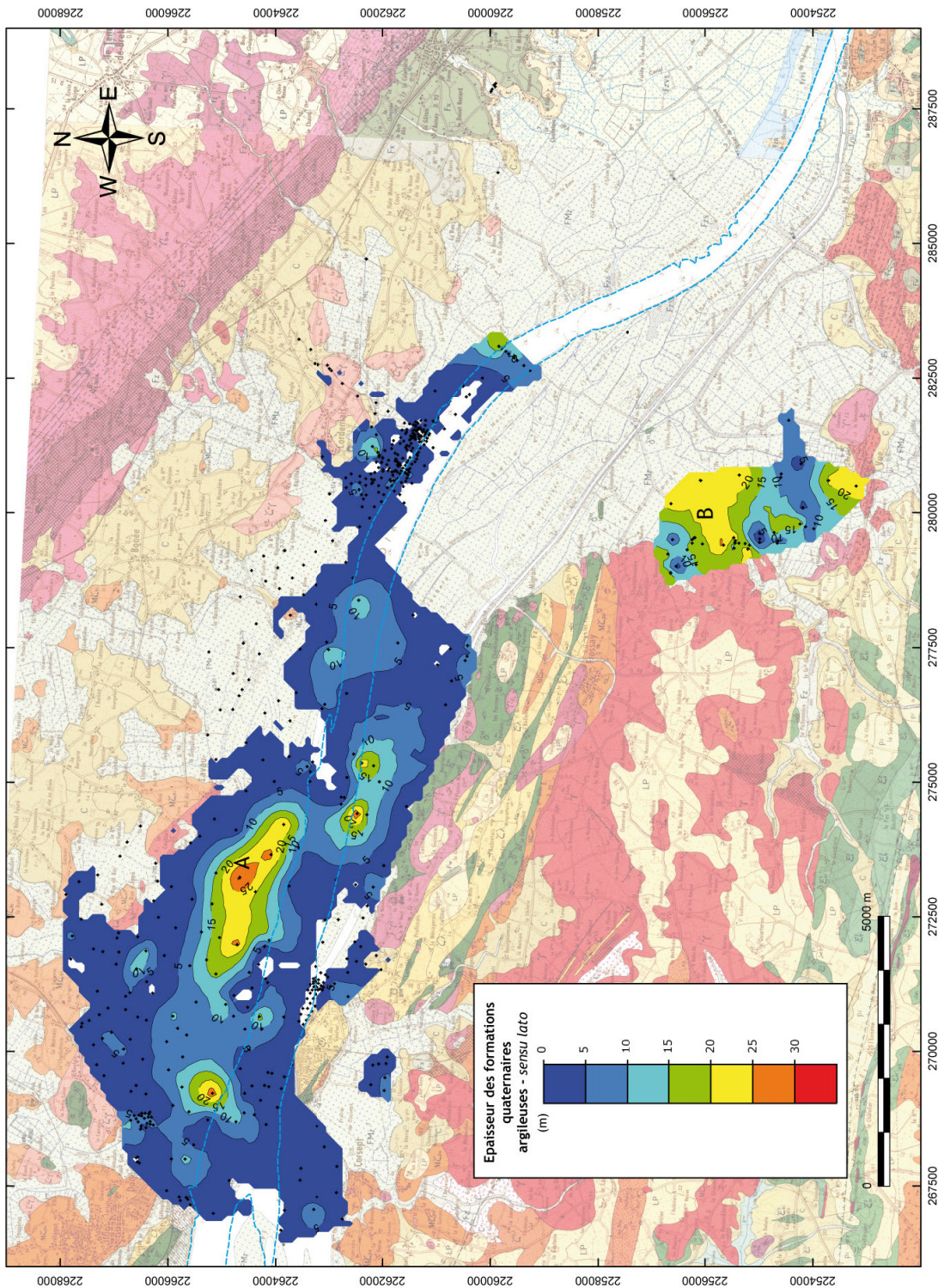


Figure 25 - Carte de l'épaisseur des formations argileuses (s.l.)

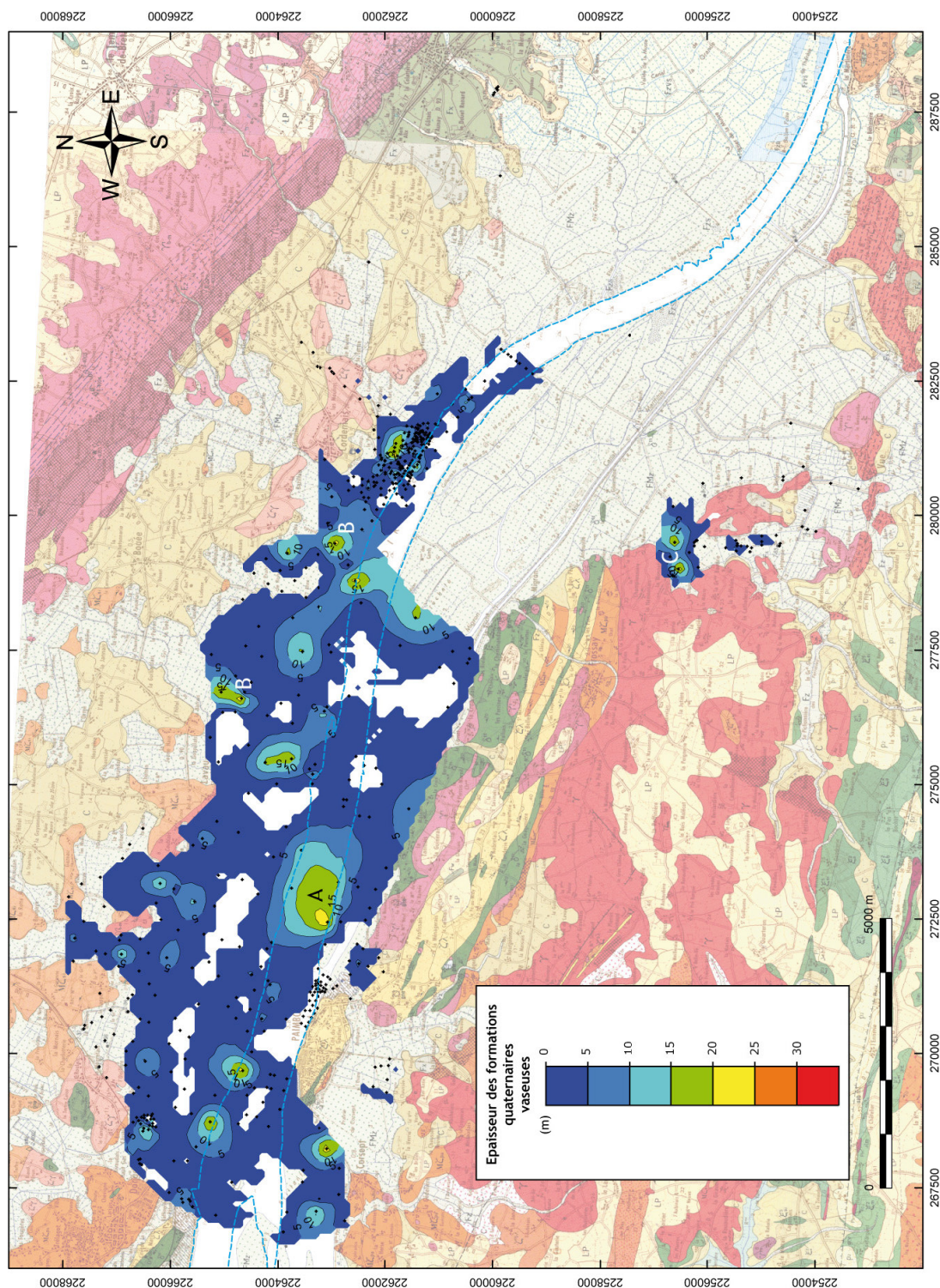


Figure 26 - Carte de l'épaisseur des vases (s.s.)

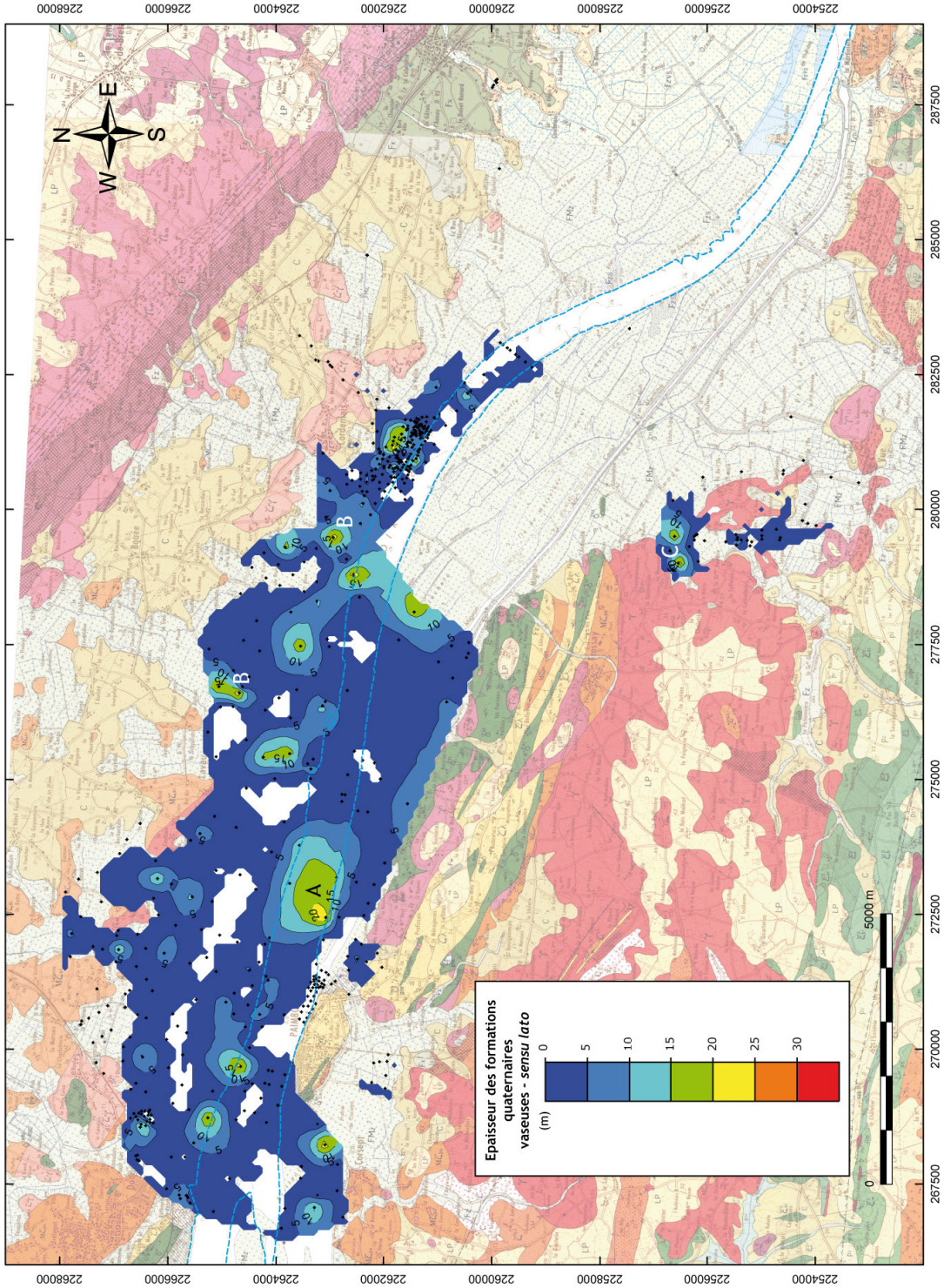


Figure 27 - Carte de l'épaisseur des vases (s.l.)

Formations graveleuses

La carte de l'épaisseur des formations graveleuse *sensu stricto* (Figure 28) montre que les niveaux associés à ces lithologies (graviers, galets et blocs) sont rares et qu'une grande partie des forages n'en contiennent pas. Seuls les forages situés dans le lit majeur au nord de Frossay jusqu'à l'Est de Paimboeuf en signalent généralement sur une épaisseur infra-métrique, mis à part trois forages qui en signalent des épaisseurs pluri-métriques (A).

La carte des épaisseurs des formations graveleuses *sensu lato* (Figure 29) est par contre très différente et montre une répartition spatiale beaucoup plus étendue. Les épaisseurs atteintes par ces formations y sont nettement supérieures notamment en rive droite de la Loire dans le lit majeur (A). De même, alors que ces formations à blocs, galets et graviers étaient quasi-absente du Marais de Vue, la prise en compte de la mention graveleuse, à graviers... dans les champs des codes lithologiques permet d'en voir apparaître quelques mètres sur des secteurs localisés.

Tourbes et argiles tourbeuses

La carte des épaisseurs des tourbes et argiles tourbeuses (Figure 30) montre que ces formations organiques sont rares sur l'espace étudié et sont principalement localisées sur les marges de l'estuaire. En effet, à part quelques forages sous le canal Martigné à Donges Est, en rive droite, les tourbes sont concentrés dans le Marais de Vue où l'épaisseur de tourbe (et formations assimilées) peut atteindre 5 m (A).

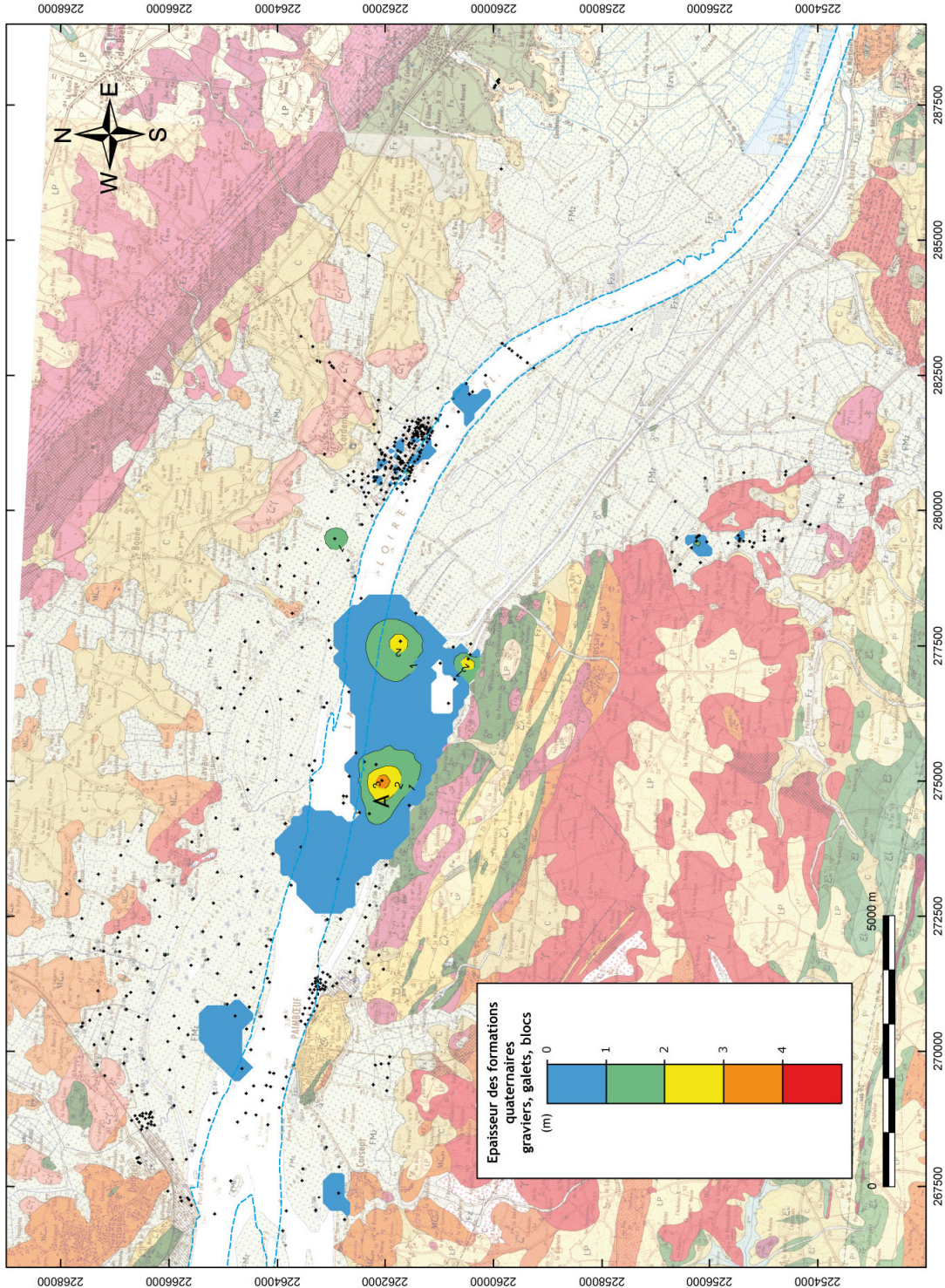


Figure 28 - Carte de l'épaisseur des formations graveleuses (s.s.)

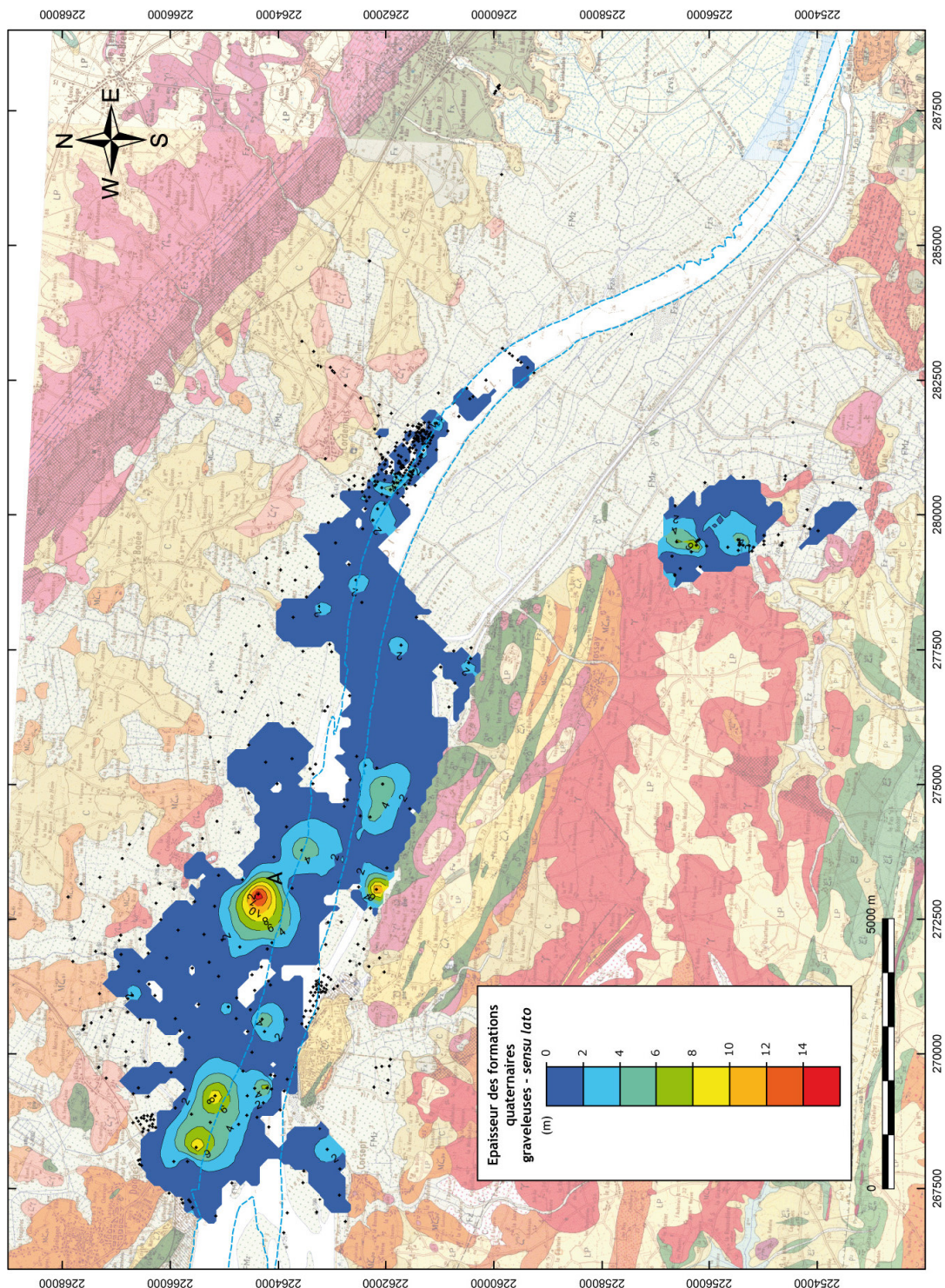


Figure 29 - Carte de l'épaisseur des formations graveleuses (s.l.)

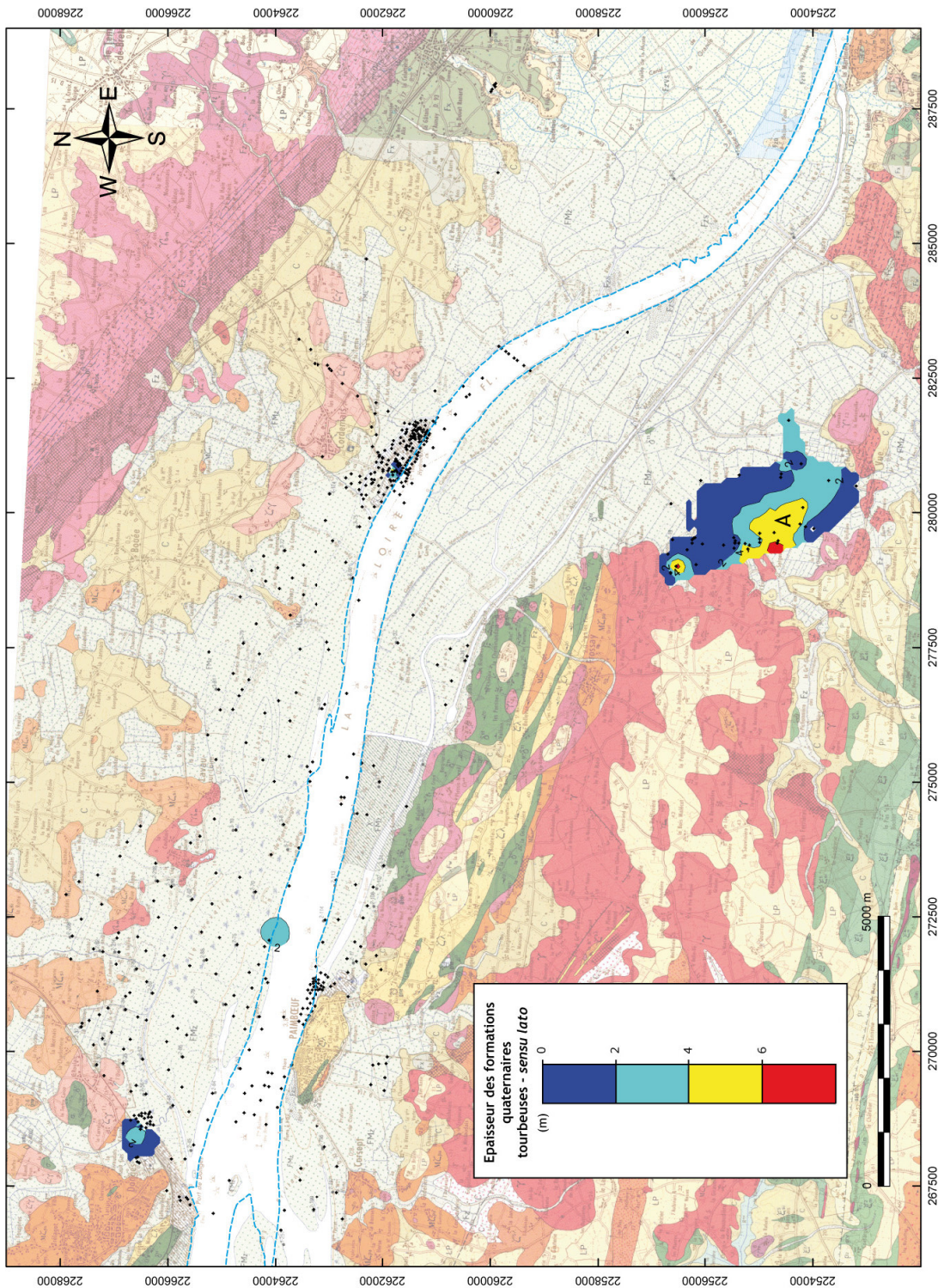


Figure 30 - Carte des épaisseurs des tourbes et argiles tourbeuses

4.2. LES COUPES DE REFERENCE

Plusieurs coupes transverses et longitudinales ont été réalisées sur le secteur d'étude, leurs positions figurent sur la Figure 31. Seules les plus intéressantes sont présentées ci-dessous.

La représentation de sondages sur des transects de la vallée met en évidence l'extrême variabilité des dépôts dans ce domaine estuarien et illustre la forte irrégularité du toit du substratum sous les alluvions.

L'une des difficultés de l'interprétation de ces transects réside dans l'espacement des sondages qui est généralement bien supérieur à celui de certaines morphologies et qui ne permet pas de corrélérer de proche en proche les horizons lithologiques. De surcroît, le domaine estuarien comme le domaine fluvial plus amont, se caractérise par une très forte variabilité spatiale des lithologies ; des corrélations entre les faciès sur de grandes distances ne sont pas réalisables. Enfin, l'absence de forages de référence sur la zone d'étude, comprenant des descriptions fines ainsi que des éléments de datations, ne facilite pas la tâche et ne permet pas à l'heure actuelle d'attribution chronologique fiable aux horizons rencontrés.

Une fois les coupes définies, les profils topographiques correspondants sont extraits du MNTU, afin d'avoir une représentation fine de la topographie mais aussi pour bien localiser la position du lit mineur. Le profil du substratum est reconstitué en s'appuyant à la fois sur l'information des sondages figurant sur les coupes (cote du substratum), mais également à partir du profil extrait de la surface d'interpolation du toit du substratum, ceci afin de représenter correctement les morphologies présentes entre les sondages sélectionnés sur la coupe.

La Figure 32 présente la palette des figurés lithologiques employés dans les coupes.

Les descriptions des coupes transversales sont présentées d'amont en aval.

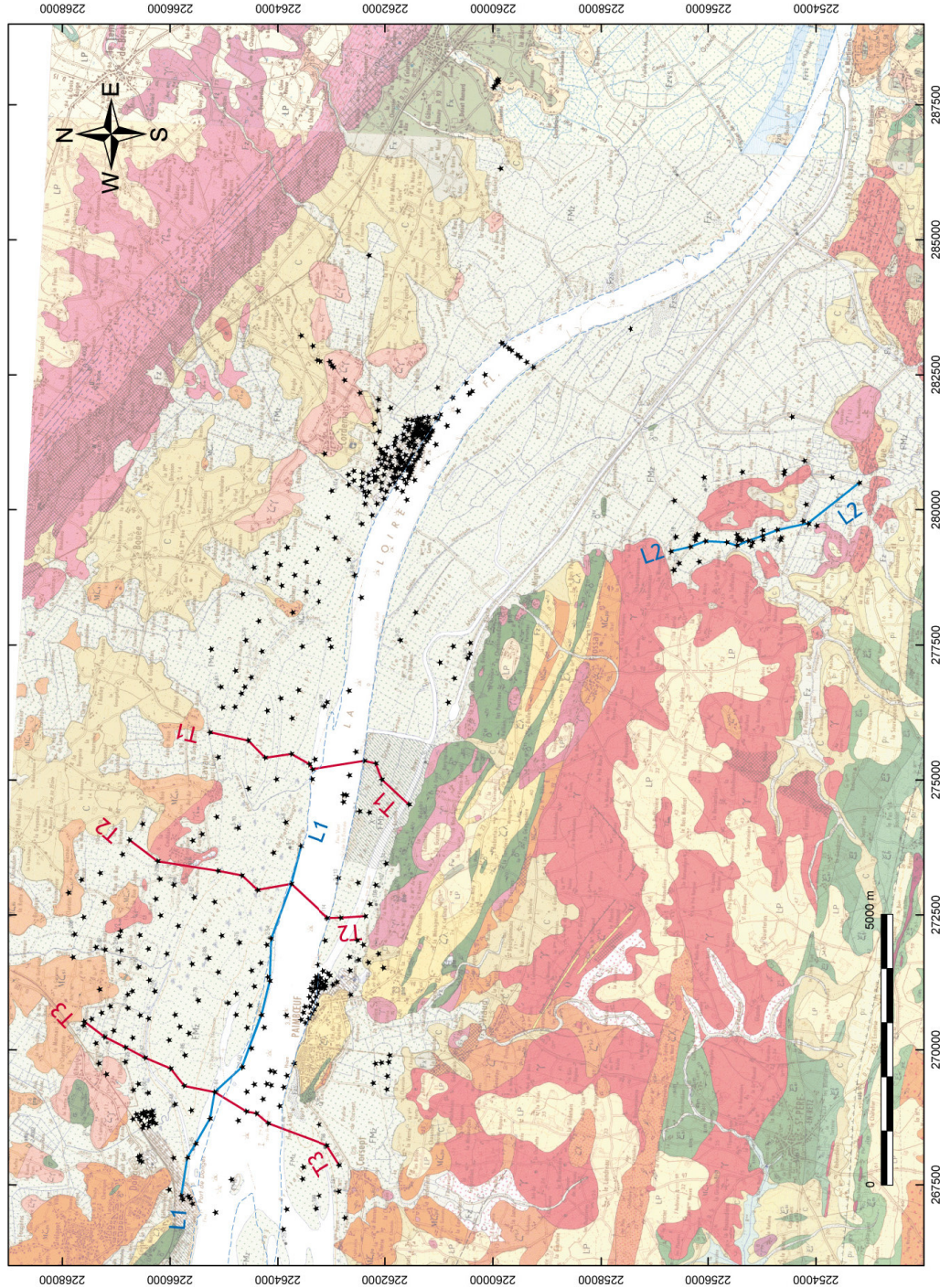


Figure 31 - Localisation des transects réalisés

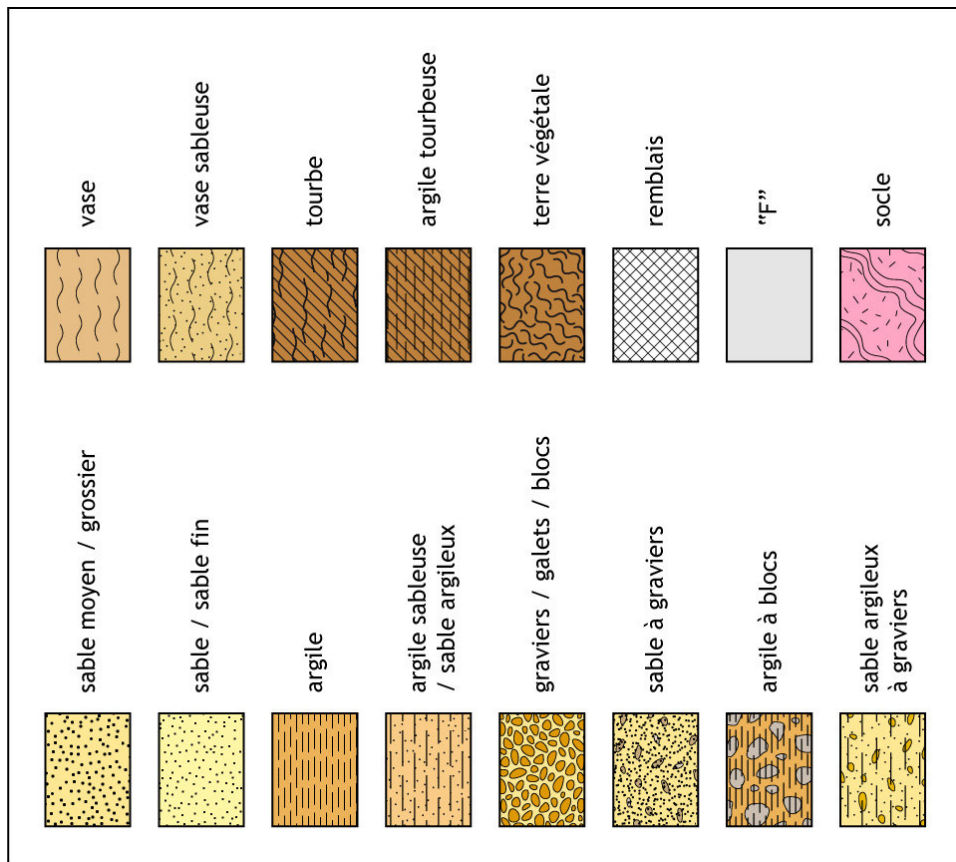


Figure 32 - Palette lithologique utilisée dans les coupes

4.2.1. Coupe transversale T1

Le transect T1 orienté SSW-NNE se situe à environ 1 km en amont de Lavau-sur-Loire et s'étend sur 9 km de long environ. Il recoupe 10 forages dont un seul n'a pas atteint le substratum (Figure 33).

Dans la zone de plus forte incision, le toit du substratum se situe pratiquement à la cote -40m. Le profil du toit du substratum montre une dissymétrie entre le flanc NNE et le flanc SSW, dont la pente est beaucoup plus raide. Le toit du socle ne présente pas de morphologie très contrastée, seul un modeste haut-fond d'environ 5 mètres y est observable dans la zone la plus profonde.

Le remplissage sédimentaire peut être scindé en trois secteurs selon leur dominante lithologique (du SSW an NNE) :

- Une zone étroite à sédimentation peu épaisse vaseuse reposant sur le socle par l'intermédiaire d'un niveau de sables plus ou moins grossiers ;
- Une large zone (4,5 km) à dominante sablo-argileuse localisée au dessus de la zone du maximum du creusement, l'épaisseur de sédiment est de l'ordre de la quarantaine de mètres. La base du remplissage est, dans les zones les plus profondes, constituée par un niveau de galets d'épaisseur plurimétrique, surmonté de niveaux sableux grossiers puis plus fins. Ces niveaux détritiques présentent des puissances variables, seul le forage le plus au NNE de cette zone n'a pas de niveaux grossiers à la base. Sur ces niveaux de base se développe une série à dominante sablo-argileuse au SSW qui passe latéralement au NNE à une série argilo-sableuse surmontée par des niveaux de vase. Au sein de ces argiles sableuses s'individualise un niveau pluri-métrique de sable grossier interprété comme une structure chenalisée. Le secteur SSW voit, dans sa partie supérieure, le développement d'une série à sables dominants qui semble présenter des emboîtements de chenaux, ce secteur correspond à l'amont de l'île du Carnet.
- Une zone en rive droite de la Loire qui correspond à la remontée progressive du substratum et correspond à une sédimentation à dominante vaseuse. Dans cet ensemble vaseux apparaissent deux niveaux à sables fin à moyen correspondant probablement à deux chenaux successifs.

4.2.2. Coupe transversale T2

La coupe T2 est localisée à environ 1,5 km en amont de Paimboeuf et s'étend sur 5,5 km de long environ.

Le substratum y montre deux profondes incisions atteignant l'altitude de -35/-37 m séparées par un haut fond peu marqué d'altitude -30 m (Figure 34). Ces deux incisions « jumelles » créent une dépression de 2,5 km de large, siège de l'essentiel de la sédimentation ligérienne. Cette dépression est limitée au NNE par une remontée

rapide du socle qui affleure jusqu'à +5/+7 m et isole une dépression marginale de faible profondeur (de l'ordre de 5 m). Les deux incisions majeures correspondent à deux phases d'enfoncement successives du chenal de la Loire au cours du Quaternaire récent. Compte tenu des cotes du substratum sous ces chenaux, ces morphologies n'ont pu se former que lors d'un bas niveau marin probablement durant le Weichsélien.

Le remplissage sédimentaire peut être divisé en trois secteurs (du SSW au NNE) :

- Une zone à vases dominantes s'étend de l'extrémité de la coupe jusqu'à la limite NNE du haut fond et inclut le lit mineur actuel. La sédimentation débute sur le haut fond séparant les deux incisions majeures par une série de sables grossiers de plusieurs mètres d'épaisseur, qui n'apparaît pas dans le sondage traversant la série recouvrant l'incision SSW. Ces niveaux grossiers peuvent être interprétés comme le témoin d'une phase de sédimentation assez grossière, post-incision weichsélienne, qui aurait été ultérieurement érodé dans le chenal SSW à la faveur d'une courte reprise d'érosion. Ainsi, seuls les dépôts localisés sur les points les plus hauts auraient été préservés de l'érosion. La sédimentation est à forte dominante vaseuse, des niveaux plus grossiers peu épais apparaissent surtout à l'aplomb du haut fond. Quelques horizons tourbeux sont à noter dans la première partie du remplissage et correspondent à l'individualisation de petites tourbières au sein même de l'estuaire. Seul un niveau sableux est noté sur plusieurs forages à des altitudes comparables et pourrait être corrélé d'un sondage à l'autre.
- Une zone à argiles sableuses dominantes au sein desquelles les niveaux détritiques sont plus nombreux. Les niveaux de sables plus ou moins grossiers semblent s'organiser en chenaux dont l'un semble assez épais et manifeste donc la pérennisation d'un chenal à dynamique sédimentaire plus vigoureuse. A la base du remplissage de la seconde incision, des équivalents latéraux des sables grossiers présents sur le haut fond apparaissent sous une lithologie de sable argileux à galets puis de sable et graviers. Les relations entre ces sables et les niveaux plus grossiers présents sur le haut fond sont difficiles à déterminer en l'absence d'arguments chronologiques.
- Au NNE, une petite dépression se développe, séparée de l'estuaire sensu stricto par la remontée du socle affleurant. La nature exacte du remplissage de cette dépression peu profonde ne peut être déterminée du fait de l'imprécision de la description sur les logs de forages (« Alluvions »)

4.2.3. Coupe transversale T3

Cette coupe a été réalisée en aval et passe à environ 700 m de Paimboeuf. Elle s'étend sur 6 km et regroupe douze forages, dont les trois qui sont localisés dans le lit mineur de la Loire n'ont pas atteint le substratum (Figure 35).

Le toit du substratum y est irrégulier et montre deux grands domaines :

- la moitié SSW présente deux fortes incisions. La plus au Sud forme une gouttière assez fermée qui atteint la côte -27 m, la seconde est plus large et atteint la côte -37 m environ. Cette dernière incision est légèrement décalée vers le Nord par rapport au lit mineur de la Loire.
- La moitié NNE correspond à un plateau du socle dont l'altitude varie aux alentours de -5 à -7 m et présente des irrégularités formant des buttes sous les alluvions.

Comme pour le transect T2, l'âge de cette incision est attribué au dernier cycle glaciaire du Weichsélien.

Le plateau de socle correspond lui à une érosion plus modeste engendrée par les petits affluents en rive droite de la Loire, qui, au cours de cette période, ont tenté d'adapter leur profil par rapport au niveau de base local.

Le remplissage sédimentaire peut être divisé en quatre secteurs (du SSW au NNE) :

- Un secteur SSW jusqu'à la rive gauche du lit mineur actuel qui est le siège d'une sédimentation à vase dominante. La base du remplissage sédimentaire y montre un niveau de sables argileux.
- Latéralement, les vases passent à un ensemble à dominante argilo-sableuse assez large qui s'étend sur environ 3 km à partir de la rive gauche de la Loire. La base du remplissage dans le paléochenal est composée de sables grossiers puis plus fins qui correspondent à la reprise de la sédimentation post glaciaire. L'ensemble de la série sus-jacente est constitué de sables argileux / argiles sableuses au sein desquelles s'individualisent des systèmes chenalisés à remplissage plus grossier. Ces horizons plus grossiers se retrouvent à plusieurs profondeurs au sein d'un même sondage et à des altitudes différentes entre chaque forage. Il ne s'agit donc pas d'épisodes plus grossiers synchrones sur tout le domaine qui auraient caractérisé une augmentation de la dynamique fluviale généralisée. Nous interprétons ces structures comme la signature de la migration spatio-temporelle de chenaux divagants.
- Une étroite zone à sédimentation vaseuse dominante s'individualise et correspond à l'établissement d'une petite vasière latérale en bordure du domaine estuarien.
- Enfin, les dépôts les plus au NNE sont à dominante argileuse. A la base de ce remplissage une séquence peu épaisse d'argile tourbeuse est à noter. Elle correspond à la mise en place d'une petite tourbière s'installant dans une dépression du substratum.

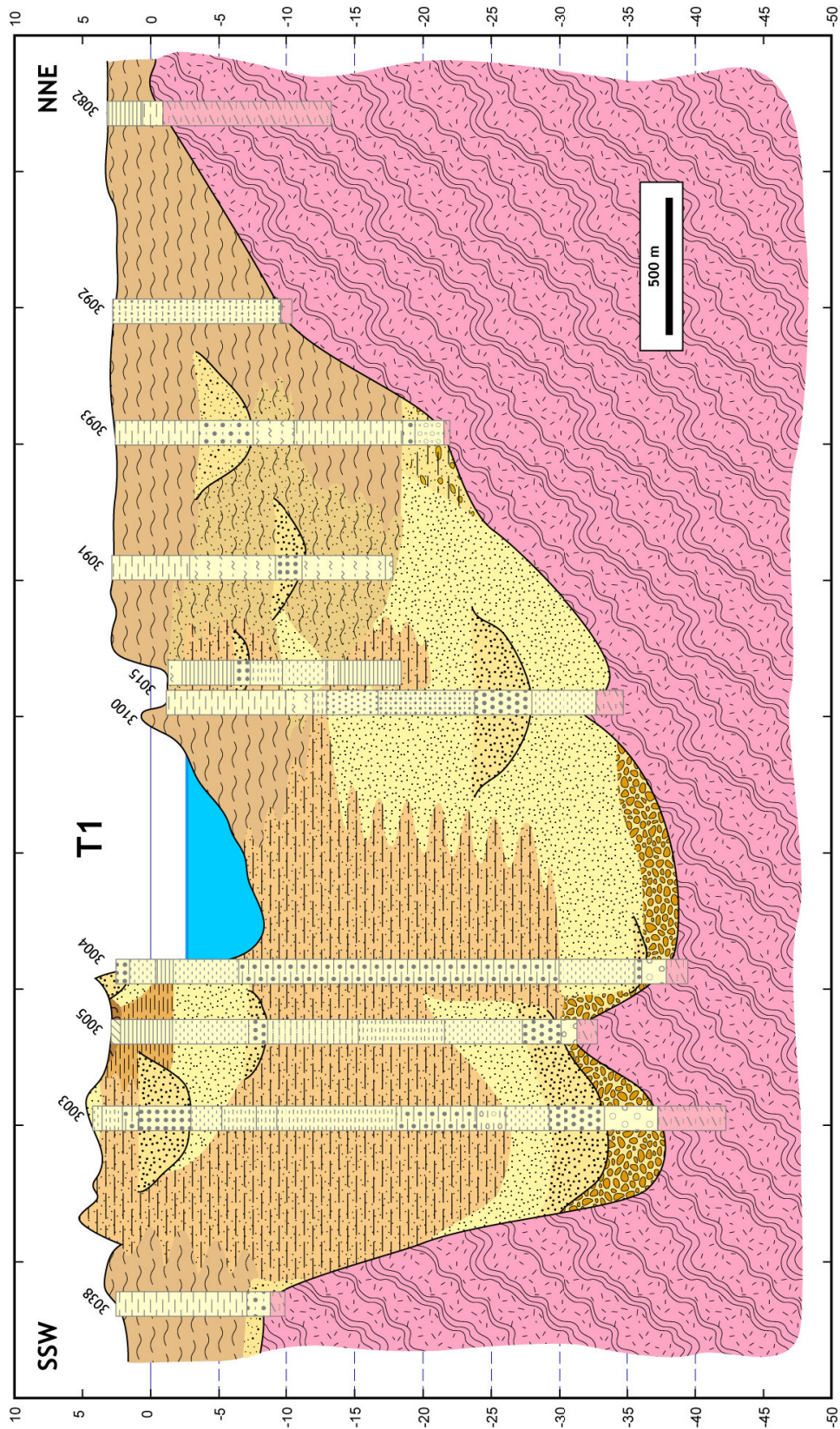


Figure 33 - Coupe transversale T1 (ordonnées : altitude en m NGF)

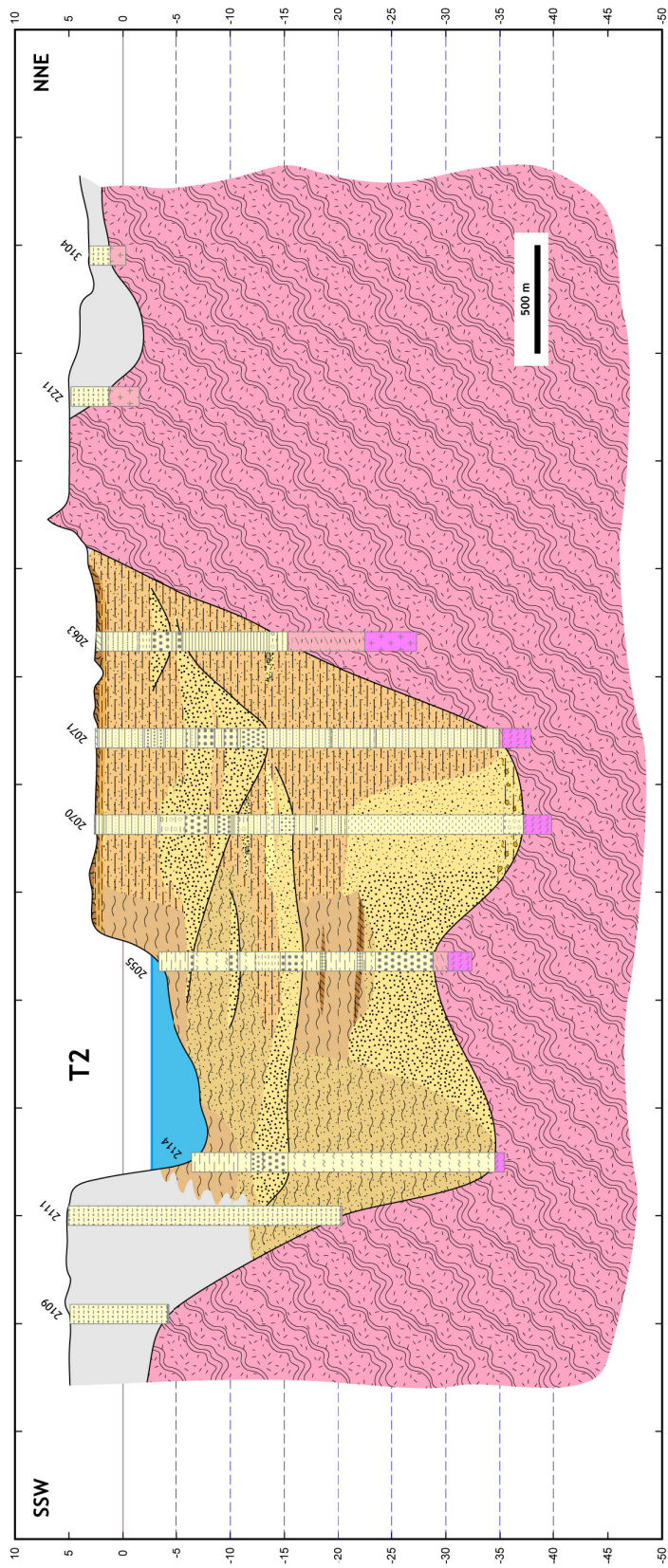


Figure 34 - Coupe transversale T2

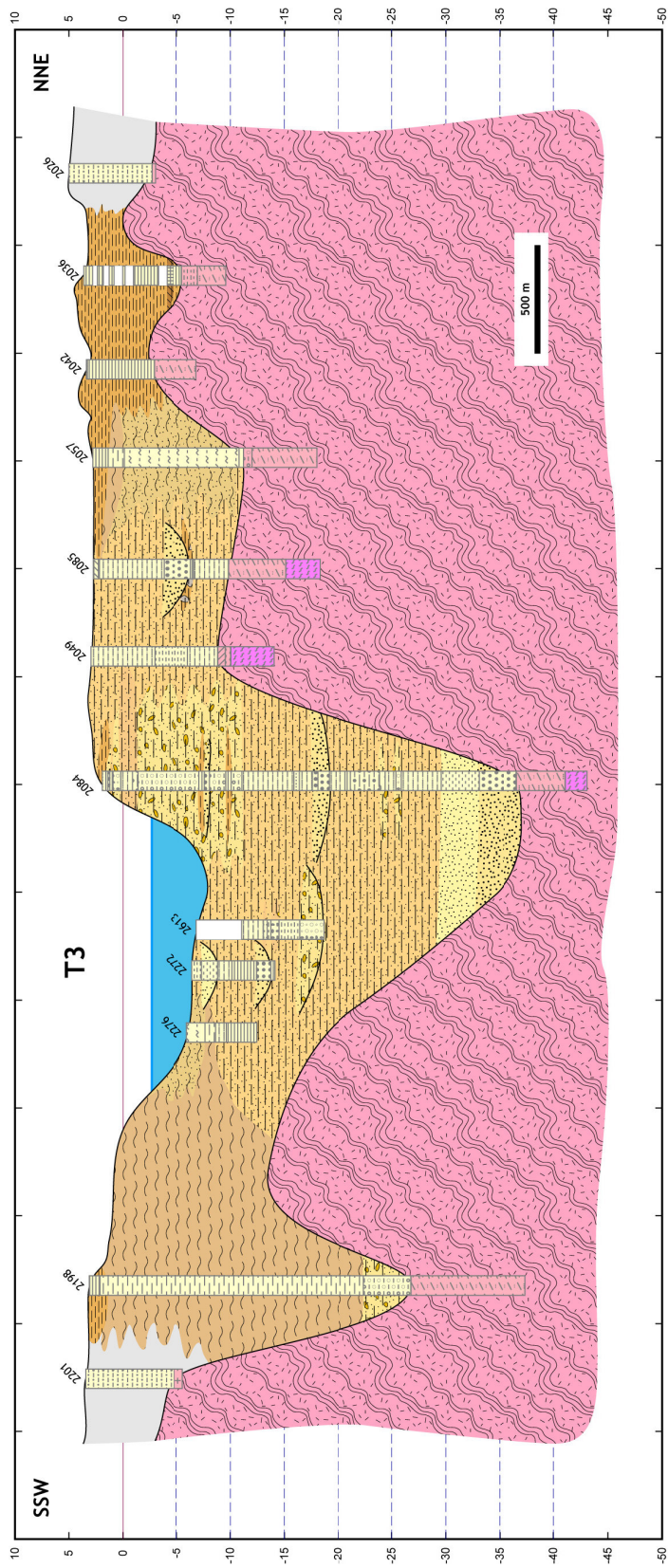


Figure 35 - Coupe transversale T3

4.2.4. Coupe longitudinale L1

Ce profil longitudinal suit la rive droite du lit mineur sur 7,5 km de l'île de Pierre Rouge amont jusqu'à l'amont immédiat de Donges. Le substratum y apparaît assez irrégulier même si cette coupe suit l'axe d'écoulement actuel (Figure 36). On y remarque notamment deux hauts-fonds dont l'un est bien marqué entre les sondages 2053 et 2054 (remontée de 15 m du toit du socle), ainsi qu'une remontée brutale du socle en amont immédiat du port de Donges.

La partie la plus à l'amont de la coupe révèle la présence, à la base du remplissage alluvionnaire, d'une série détritique grossière, d'environ 5 m d'épaisseur, pouvant contenir des blocs et des sables grossiers. Ces niveaux sont surmontés d'une série à vase sableuse dominante au sein de laquelle s'individualisent des horizons de sables plus ou moins grossiers et de fins horizons de sédiments organiques. Une certaine continuité des faciès est parfois observable d'un forage à l'autre pour les faciès détritiques du fait que la coupe est réalisée dans l'axe principal d'écoulement et qu'il est fréquent de recouper le même chenal en plusieurs points. A l'amont du haut-fond, nous notons un passage progressif à des faciès argileux dominants. C'est dans cette série, en appui sur le paléo-relief que s'observe, en base de série, un niveau d'argile tourbeuse de 3,7 m d'épaisseur. Ce dépôt correspond à l'installation pérenne d'une tourbière dans une zone à l'abri des apports détritiques du fleuve et appuyé contre le paléo-relief de socle.

A l'aval immédiat du haut-fond, la sédimentation est très différente et commence par une épaisse série à dominante sableuse (maximum 17 m) où s'individualisent des niveaux de sables plus grossiers ; cette unité est surmontée par des vases sableuses. L'épaisseur de cet ensemble sableux décroît rapidement vers l'aval pour céder la place aux vases qui deviennent prépondérantes. Ce secteur se caractérise par des vases sableuses épaisses de 25 m reposant sur un talon fin de sables et galets et surmonté par des niveaux récents (historiques) de sables grossiers.

A l'aval du forage 2050, la topographie remonte tandis que les vases deviennent plus argileuses puis repassent à des vases ; apparaissent en sommet de séquence des sables correspondant à des dépôts de chenaux.

Plus l'on se rapproche de la remontée du socle, plus les vases vont se réduire en épaisseur pour se limiter à la base des forages et être surmontées d'horizons détritiques montrant des alternances de sables grossiers et plus fins qui s'appuient sur le paléo-relief. Cette migration vers le haut et vers l'ESE est interprétée comme le déplacement dans le temps de la boucle d'un chenal majeur qui va peu à peu se rapprocher du tracé actuel du lit mineur.

Au passage sur le haut fond de socle, les faciès deviennent à dominance argileuse avec quelques intercalations sableuses tandis qu'en arrière, les dépôts deviennent franchement vaseux.

4.2.5. Transect longitudinal L2

Ce transect de 5 km de long recoupe le Marais de Vue selon un axe d'allongement NNW-SSW. Regroupant 10 forages, dont un seul n'atteint pas le substratum, cette coupe permet d'ores et déjà de visualiser la forte variabilité d'altitude de ce dernier (Figure 37).

Les nombreuses dépressions assez étroites marquées dans le substratum correspondent à d'anciennes incisions du socle par de petits thalwegs et affluents qui étaient obliques par rapport à l'axe de notre coupe. Ces incisions, dont l'amplitude va de quelques mètres à une dizaine de mètres, se sont probablement produites durant le dernier cycle glaciaire (Weichsélien). On note, à la base de certains forages, la présence sur le socle de dépôts détritiques sableux peu épais de granulométrie variée. Ce niveau détritique pourrait être attribué à une première phase sédimentaire post-glaciaire. L'absence de ces niveaux détritiques dans certains forages suggère leur érosion postérieure (reprise d'incision) ; en effet ce sont dans les forages localisés en fond de thalwegs que ces niveaux sont absents, là où ils auraient dû s'accumuler. La phase sédimentaire postérieure (Holocène) est à dominante argileuse et aboutit à l'enneigement des morphologies qui conduit au paysage très plat actuel. Au sein des argiles apparaissent de place en place de petites tourbières de faible extension et de petits systèmes chenalisés à remplissage plus détritique (argiles sableuses, sables argileux). Dans la partie supérieure du remplissage argileux, s'individualise une grande tourbière dont on peut estimer le maximum d'épaisseur à 8 m. Cette tourbière se suit bien d'un forage à l'autre et couvre probablement une grande partie de cette zone du marais.

Ce transect permet de caractériser le type de sédimentation que l'on peut s'attendre à trouver sous les zones périphériques de l'estuaire amont. La morphologie du substratum a été façonnée par les processus d'érosion liés aux variations de niveau de base local (la Loire), lui-même contrôlé par les variations eustatiques. La sédimentation est essentiellement liée aux processus locaux de versant (érosion de thalweg, apports détritiques), une sédimentation fine argileuse et parfois organique s'y développe. Les apports sédimentaires ligériens ne semblent pas y intervenir de façon significative.

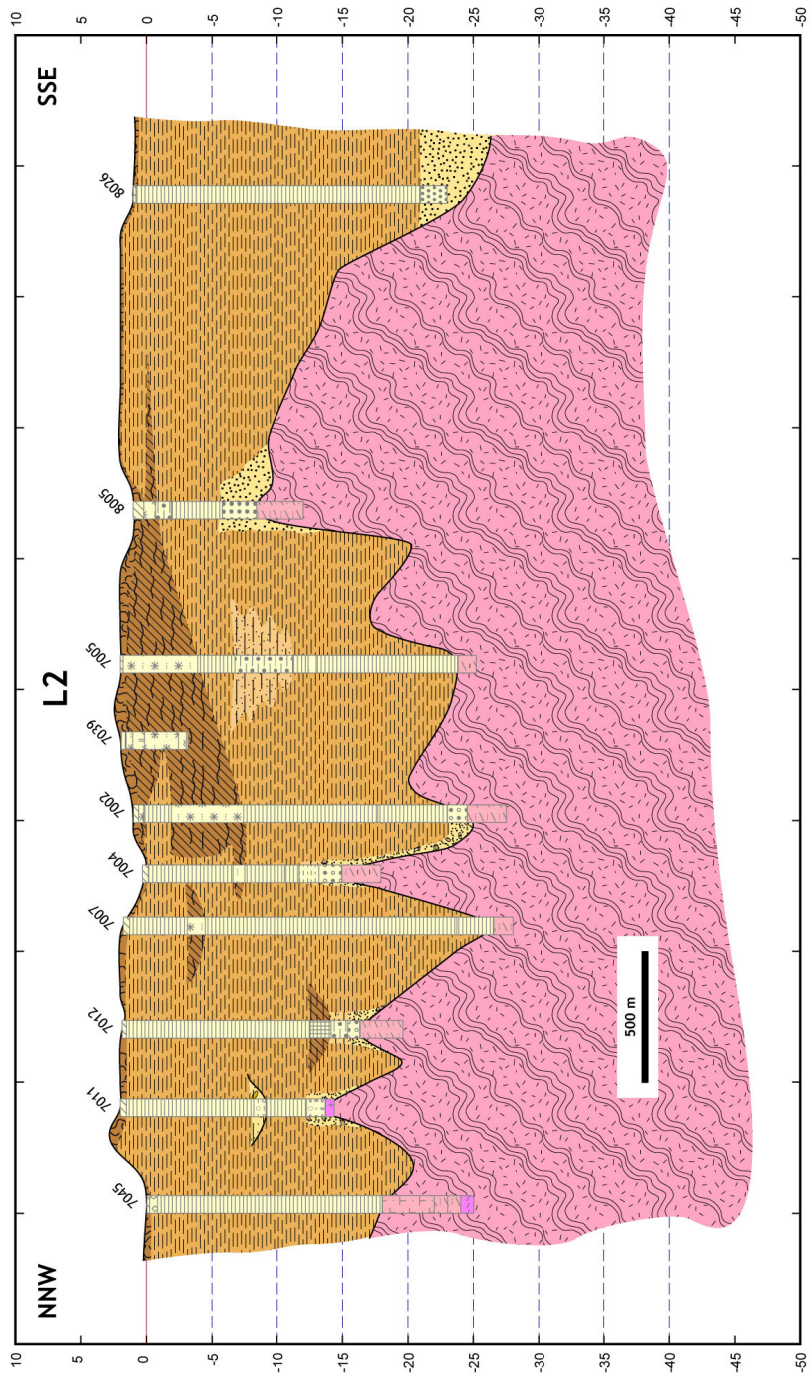


Figure 37 - Coupe longitudinale L2

5. Synthèse

La base de données de forages créée à l'occasion de ce projet, capitalise les connaissances sur le sous-sol de l'estuaire de la Loire du secteur compris entre l'Ouest du Pellerin et Paimboeuf.

L'analyse des 554 forages et les traitements réalisés montrent que la morphologie du socle sous les alluvions est extrêmement contrastée, avec notamment la présence de nombreux hauts-fonds partiellement ou totalement ennoyés par les alluvions récentes. On y décèle également de nombreux « sillons » qui correspondent à d'anciennes incisions de la Loire dans son substratum. Ces incisions résultent probablement de reprises d'érosion polyphasées de la Loire lors des bas niveaux marins du Quaternaire récent, notamment weichséliens. Sur les marges de l'estuaire, durant ces mêmes périodes de bas niveau eustatique, les modestes affluents de la Loire se sont eux aussi encaissés en tentant de s'aligner sur leur niveau de base local et créant ainsi des thalwegs au sein de « plateaux » de substratum qui restent suspendus par rapport au niveau du plancher alluvial de la Loire. C'est sur ces morphologies que s'installeront ultérieurement les marais et tourbières latérales.

La phase d'alluvionnement de la Loire est, elle aussi, complexe et polyphasée. Elle débute par des alluvions relativement grossières (graviers, sables et graviers, galets) qui sont partiellement conservées dans les forages. Ces dépôts correspondent à une phase de sédimentation grossière que l'on peut attribuer, à titre d'hypothèse, à la fin du dernier cycle glaciaire ou au Tardiglaciaire. Ces alluvions ont été érodées postérieurement et ne subsistent, le plus souvent, que sur des points hauts du socle.

L'essentiel du remplissage sédimentaire du secteur, attribué par déduction à l'Holocène, apparaît dominé par 3 pôles lithologiques : les sables (plus ou moins argileux), les argiles sableuses et les vases.

Les sables et les faciès plus grossiers à graviers et galets sont relativement rares et s'observent essentiellement en base de remplissage ou dans des systèmes chenalisés. Il est très difficile de les discriminer des niveaux détritiques de la phase d'alluvionnement fin du glaciaire / Tardiglaciaire en l'absence d'argument chronostratigraphique fiable. Les chenaux sableux, qui sont d'anciens lit mineurs où des bras de Loire, s'observent à différentes profondeurs dans les coupes, ils témoignent d'un hydrodynamisme local à énergie plus élevée que la plaine alluviale adjacente. Ces dépôts ne peuvent donc pas être, à priori, un indicateur d'une période durant laquelle tout l'estuaire aurait été le siège d'une sédimentation déritique dominante mais sont liés à un contexte sédimentologique local. Ces sables semblent rester fortement inféodés au tracé des lits mineurs successifs. Dans certaines coupes, la migration spatio-temporelle de ces chenaux à sables est bien visible et exprime la mobilité du tracé du lit au cours du temps. En-dehors des paléochenaux, le sable est présent de façon diffuse, en association avec les autres faciès. Sous les vasières et marais actuels, en marge du lit majeur, les sables n'apparaissent que sporadiquement.

Les argiles, quant à elles, sont bien représentées sur tout le domaine d'étude, elles assurent parfois une part importante du remplissage des chenaux au-dessus des sables. Il s'agit dans ce cas d'argiles sableuses. Les argiles sont aussi présentes dans les zones marginales telles que le Marais de Vue, mais sous un faciès moins sableux. Il s'agit alors d'argiles liées à un milieu palustre alimenté par les petits affluents locaux. Au sein de ces argiles peuvent apparaître des niveaux argilo-tourbeux ou tourbeux. Ces horizons indiquent alors le développement d'une sédimentation organique dans des tourbières (s.l.) qui sont, au moins partiellement, déconnectées du système fluvial.

Les vases sont disséminées sur tout l'espace mais selon une organisation spatiale relativement faible. On les retrouve aux débouchés des marais de rive droite où elles semblent être un peu plus épaisses que le niveau de fond. On retrouve aussi quelques accumulations importantes de vase dans la zone estuarienne même, sous le lit mineur actuel. Par contre, il faut noter de nombreuses zones où les vases n'apparaissent pas dans les forages. Ces zones « blanches » sont assez bien organisées spatialement et semblent être en anti-corrélation avec certaines zones de forte accumulation de sable, notamment certains chenaux. Là où elles sont présentes, les vases assurent parfois l'ensemble du remplissage. Dans ce cas, ces morphologies en creux ont piégés les vases ce qui implique que les paléochenaux correspondant soient restés déconnectés des apports ligériens directs. Enfin, on retrouve logiquement les vases dans les zones en marge de l'estuaire, là où le socle est peu profond (zone de vasières).

L'observation des coupes transversales et longitudinales montre nettement que le lit mineur de la Loire actuelle est incisé dans ses alluvions. Cette incision doit bien évidemment être mise en rapport avec l'ensemble des actions et aménagements historiques entrepris sur son cours pour favoriser la navigation.

Le style fluvial actuel apparaît donc comme assez différent de ce qui qu'il a été antérieurement où plusieurs chenaux peuvent coexister en même temps, divaguer et migrer latéralement au sein d'une large plaine d'inondation argilo-vaseuse.

Les forages et les coupes réalisées nous confirment, en partie, les éléments trouvés dans les publications. Ainsi, nous notons bien une phase de creusement, probablement polyphasée et datant vraisemblablement du dernier cycle glaciaire, surmontée par des dépôts assez grossiers qui restent à l'état de témoin dans quelques forages. L'Holocène est essentiellement une période de sédimentation et de colmatage des morphologies préalables. Par contre, la nature du remplissage sédimentaire ne nous paraît pas aussi homogène que celui de la séquence présentée par Alix (1969) qu'il qualifie lui-même de schématique. Quant à la géométrie et aux âges des dépôts estuariens présentés par Barbaroux en 1981, ils nous paraissent assez éloignés de ce que nous avons pu observer dans nos coupes. Certains événements auxquels des âges sont donnés, toujours par ce dernier auteur, bien que plausibles, ne nous paraissent pas assez étayés et aucun argument nouveau n'a été trouvé dans les coupes étudiées qui permettrait de confirmer ou d'infirmer ces âges.

Cette étude a permis de reconstituer *pro parte* le remplissage estuarien et d'émettre des hypothèses sur son histoire et sur son évolution temporelle. Cette interprétation reste cependant limitée du fait du manque de calage chronologique, de la densité

insuffisante des forages par rapport à la taille des structures sédimentaires et de la forte variabilité latérale des faciès.

Afin d'améliorer notre connaissance de l'évolution passée de l'estuaire, il serait intéressant, outre l'extension de la base de données aux secteurs amont et aval du segment étudié, d'engager soit :

- la réalisation d'un programme de recherche visant à réaliser une série de forages carottés dont les sédiments seraient étudiés et datés (palynologie, datations radiocarbone, sédimentologie etc.)
- le suivi et la datation systématique d'échantillons issus de forages (à finalités diverses) qui seraient réalisées dans l'estuaire. Cela implique au préalable un accord avec le maître d'œuvre du forage ainsi que le recueil d'informations supplémentaires.
- La réalisation d'une synthèse sur les estuaires. Celle-ci pourrait traiter des aspects lithostratigraphiques, sédimentologiques, chronologiques et paléoenvironnementaux, et toutes informations utiles susceptibles de nous aider à mieux cerner et interpréter l'évolution de l'estuaire de la Loire au cours du temps.

6. Bibliographie

Alix, Y. (1969). Morphologie du substratum et caractéristiques des alluvions de la vallée de la Loire en amont et en aval de Nantes. *Rapport BRGM*, 69SGL249BPL.

Barbaroux, L. (1981). Images paléogéomorphologiques de l'estuaire de la Loire depuis le Quaternaire, in *La Loire, axes perdus ?*, Presses de l'Université de Nantes, 15-65.

Barbaroux, L., Duplaix, S. & Visset, L. (1980). Les dépôts du Quaternaire récent (Atlantique-actuel) et le remaniement flandrien du Weichsélien dans la région de Saint-Nazaire (Loire-Atlantique). *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine*, 27, 61-85.

Barbaroux, L., Duplessy, J.C., Margerel, J.P. & Visset, L. (1974). Variations climatiques et sédimentologiques récentes (période Atlantique à Actuel) dans l'estuaire de la Loire. Mise en évidence d'épisodes lagunaires. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 278, 573-576.

Berger, A. (1992). Le climat de la Terre – Un passé pour quel avenir ? De Boeck Université. 479 p.

Berger, A. L. (1978). Long-term variations of caloric solar radiation resulting from the earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 9, 139-167.

Bernard, J. (1996). Paléoenvironnement du Pays de Retz et du marais breton-vendéen, *Université de Nantes*.

Burnouf, J., Carcaud, N., Garcin, M., Giot, D., Galinie, H., Rodier, X., Blin, C., Taberly, C., Marlet, O., (2003) – Fluvial metamorphosis of the Loire river during Holocene : variability of natural factors and the answers of the societies (Tours case study, France). Alluvial archeology in Europe, Balkema édit.p 163-173, 7 fig.

Carcaud, N. (2004). D'espace et de temps : un itinéraire de recherche et d'enseignement sur les anthroposystèmes fluviaux, *Habilitation à diriger des recherches, Angers*.

Cyprien, A.L. & Visset, L. (2000). « Le Port » à Cordemais (Loire-Atlantique) : histoire de la végétation et anthropisation. *Revue d'Archéométrie*, 24, 85-93.

Cyprien, A.L., Visset, L. & Carcaud, N. (2004). Evolution of vegetation landscapes during the Holocene in the central and downstream Loire basin (Western France). *Veget. Hist. Archaeobot.*, 13, 181-196.

Garcin, M., Carcaud, N., Gautier, E., Burnouf, J., Castanet C., Fouillet N. (2006) - Impacts des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. PUC - Sous presse

Garcin, M., Farjanel, G., Giot, D. (2001) - Eléments radiochronologiques et palynologiques sur les alluvions du lit majeur de la Loire (Val d'Avaray, Loir-et-Cher, France). *Quaternaire*, 12, (1-2), p.69-88.

Garcin, M., Giot, D., Farjanel, G., Gourry, J.C., Kloppmann, W., Negrel, Ph. (1999) – Late glacial and Holocene deposits in the Middle Loire River, the Val d'Avaray case study (Loir et Cher, France). *C. R. Acad. Sci. Paris.*, Série IIa, 329, 405-412..

L'Helgouac'h, J., Visset, L., Sellier, D., Peridy, P. & Bernard, J. (2001). L'occupation humaine autour de l'estuaire de la Loire du VIe au IIIe millénaire dans son cadre géomorphologique et paléoenvironnemental. *Revue archéologique de l'Ouest*, 9, 9-34.

Lambeck, K. (1997). Sea-level change along the French Atlantic and Channel coast since the time of Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 129, 1-22.

Limasset, O. (1988). Structure géologique de la partie « aval » de l'île Beaulieu (Nantes, Loire-Atlantique). *Rapport BRGM*, 88SGN708PAL.

Milankovitch, M. (1941). Canon of Insolation and the Ice-Age Problem. Royal Serbian Academy, Belgrade, Yugoslavia.

Morzadec-Kerfourn, M.T. (1974). Variations de la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire. Analyse pollinique de dépôts organiques littoraux. *Mémoires de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, 17, 208 p.

Ottmann, F., Alix, Y., Limasset, J.C. & Limasset, O. (1968). Sur "le lit ancien" de la Loire dans son cours inférieur. *Bull. BRGM*, 1, 2, 26-56.

Ouguerram, A. & Visset, L. (2001). Histoire de la végétation et première mise en évidence d'un milieu marin pendant l'Holocène dans la vallée de l'Erdre et le Val de Gesvres (bassin versant de la Loire, Massif Armoricaïn, France). *Quaternaire (Paris)*, 12, 189-199.

Pinot, J.P. (1974). Le précontinent breton entre Penmarc'h, Belle-Ile et l'escarpement continental : Etude géomorphologique, *Université de Brest*.

Pirazzoli, P.A. (1991). World atlas of Holocene sea-level changes. *Elsevier Oceanography series*, 58, 69-82.

Prigent, D., Visset, L., Morzadec-Kerfourn, M.T. & Lautridou, J.P. (1983). Human occupation of the submerged coast of the Massif Armoricaïn and postglacial sea level changes, in *Symposium Proceedings of La Jolla (Californie)*, Academic press, 303-324.

Ters, M., Planchais, N. & Azema, C. (1968). L'évolution de la basse vallée de la Loire, à l'aval de Nantes, à la fin du Würm et pendant la transgression flandrienne. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 3, 217-246.

Visset, L. (1979). Recherches palynologiques sur la végétation pléistocène et holocène de quelques sites du district phytogéographique de Basse-Loire. *Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France, supplément hors-série*, , 282 p.

Visset, L. (1982). Nouvelles recherches palynologiques (Boreal-actuel) dans les Marais de Briere; Ile d'Errand en Saint-Malo-de-Guersac (Loire-Atlantique-France). *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 19, 29-38.

Visset, L. (1985). Dernières données pollenanalytiques et radiométriques du golfe Briéron. *Ecologia Mediterranea*, XI, 1, 107-116.

Visset, L. (1988). The Briere Marshlands: A palynological survey. *New Phytologist*, 110, 409-424.

Visset, L., Cyprien, A.L., Carcaud, N., Bernard, J. & Ouguerram, A. (2005). Paysage végétal dans le bassin de la Loire moyenne du Tardiglaciaire à l'Actuel. *J. Bot. Soc. Bot. France*, 29, 41-51.

Visset, L., Girardclos, O. & Lambert, G.N. (1994). La forêt de chênes sur tourbe, à l'île d'Errand, dans les marais de Brière (Massif Armoricaïn, France); palynologie et premiers résultats dendrochronologiques.. *Quaternaire*, 5, 69-77.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Pays de la Loire
1, rue des Saumonières
BP 92 342
44323 NANTES Cedex 3 - France
Tél. : 02 51 86 01 51