HAL
open science

Les apports de la géomatique à la reconstitution des dynamiques fluviales de la Loire moyenne et des interactions sociétés -milieux fluviaux tardiglaciaires et holocènes (Val d'Orléans, Loiret)

Cyril Castanet

To cite this version:

Cyril Castanet. Les apports de la géomatique à la reconstitution des dynamiques fluviales de la Loire moyenne et des interactions sociétés -milieux fluviaux tardiglaciaires et holocènes (Val d'Orléans, Loiret). Cahier des thèmes transversaux ArScAn, 2008, VIII, pp.190-204. hal-02235847

HAL Id: hal-02235847

https://hal.science/hal-02235847

Submitted on 1 Aug 2019

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

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

Les apports de la géomatique à la reconstitution des dynamiques fluviales de la Loire moyenne et des interactions sociétés - milieux fluviaux tardiglaciaires et holocènes (Val d'Orléans, Loiret)

Cyril CASTANET
(ArScAn – Archéo Environnement.
et Laboratoire de Géographie Physique « Pierre Birot »
Universités de Paris I et Paris XII, CNRS)

Nous présentons les outils et les méthodes de la géomatique utilisés pour les caractérisations morphologiques et morphostratigraphiques en contexte fluviatile de manière complémentaire aux méthodes traditionnelles et des exemples de cette approche pour l'analyse des interactions sociétés-milieux en contexte de plaine alluviale sur le temps long des sociétés (les 15 derniers millénaires).

1 - CADRE D'ÉTUDE

Les dimensions spatiales et temporelles occupent une place centrale pour l'étude des réponses des systèmes fluviaux aux changements climatiques, environnementaux et sociaux comme dans celui de l'analyse des interactions sociétés-milieux sur le temps long (celui des derniers 15 000 ans, du Paléolithique supérieur à l'Actuel). Parmi les obstacles liés à l'étude des interactions entre les hydrosystèmes et les socio-systèmes [ou plus largement de l'Anthroposystème (Lévêque et al. 2003)], réside celui de la signification et de la représentativité des observations réalisées à une échelle spatio-temporelle d'analyse donnée. La perception du fonctionnement du système dans son ensemble est favorisée par la multiplication des échelles spatiales et temporelles d'étude choisies.

2 - SECTEUR D'ÉTUDE

Les recherches interdisciplinaires menées dans le bassin versant de la Loire sont hiérarchisées de l'échelle du bassin versant à l'échelle du site (unité de paysage fluvial, site archéologique) en passant par celles des sites ateliers (Loire amont, Loire moyenne, Loire aval) et des fenêtres d'étude, comme celle définie par le Programme Zone atelier Loire, sous la direction de Joëlle Burnouf, ArScAn – Archéo Environnement. (Burnouf and Garcin 2003, Lévêque et al. 2003). L'espace étudié est un élargissement de la plaine alluviale de la Loire moyenne orléanaise au sein duquel ont été préservées les archives sédimentaires des périodes étudiées. Il comprend le val d'Orléans et le val d'Ouzouer-sur-Loire (thèse en cours, C. Castanet). Il constitue une fenêtre d'étude au sein du site atelier « Loire moyenne ». Ce milieu de vie des sociétés est un espace dans lequel fut archivée la mémoire des dynamiques de l'hydrosystème et celle des interactions socio-environnementales. En ce sens, la géométrie, la nature et l'âge des corps sédimentaires alluviaux de ce val de Loire (intra-sites et hors-sites archéologiques[1]) constituent les archives sédimentaires des dynamiques et des paysages fluviaux anthropisés du passé. De la caractérisation géométrique du corps sédimentaire à celle des paysages fluviaux anthropisés, la composante spatiale est omniprésente.

Les méthodologies d'études adoptées sont issues des sciences de la nature (Sciences de

1 - Notion de « tissu(s) archéologique continu » au-delà de la notion de site archéologique BURNOUF J. 1998. Du paysage à l'interaction de l'homme et du milieu : l'environnement du village. *In*: *Le village médiéval et son environnement*, p. 471-490. Paris: Sorbonne Ed. .

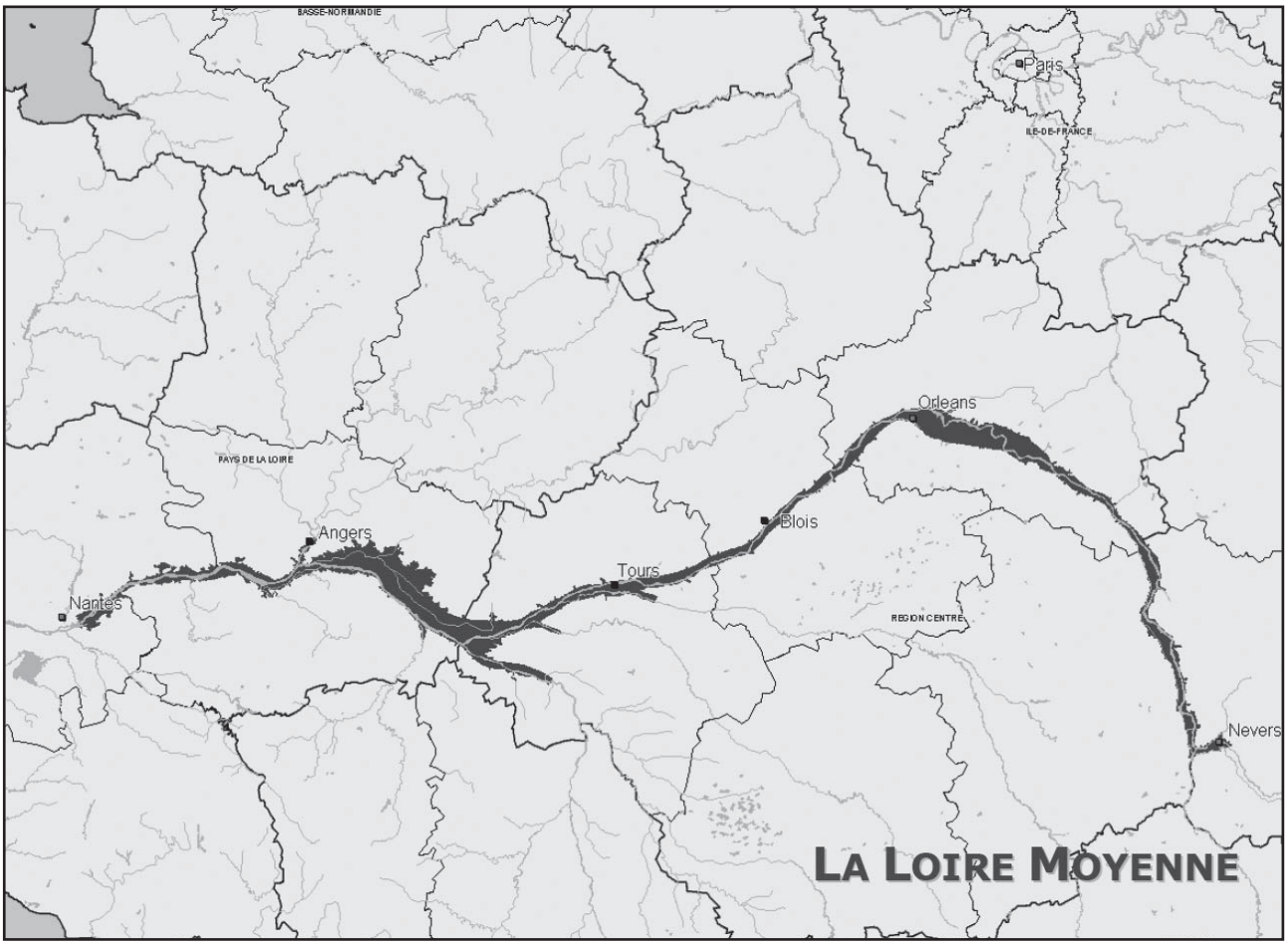

Fig. 1 : Délimitation de la zone de relevé LIDAR en Loire moyenne. Source DIREN Centre.

la Terre et de l'Univers) et des sciences de l'homme et de la société (Géographie Physique et Archéologie). Dans chacune d'elles, la géomatique occupe une large place parmi les techniques d'analyse spatiale. La géomatique est définie comme l'ensemble de techniques de traitement informatique des données géographiques dont certaines peuvent provenir de la télédétection aérospatiale [Arrêté du 27 Décembre 1994, Journal Officiel (Deschamp 2002)]. Ces techniques incluent celles de l'acquisition et de la restitution sous forme de cartes, d'images ou de fichiers de données.

3. CARACTÉRISATION MORPHOLOGIQUE DES MILIEUX FLUVIATILES TARDIGLACIAIRES ET HOLOCÈNES

L'étude morphologique de la plaine alluviale constitue un travail préliminaire à l'identification des paléoformes fluviales préservées dans le lit majeur du fleuve (au sein de la plaine d'inondation actuelle). Diverses composantes du milieu sont ici considérées. Il s'agit par exemple de la microtopographie, du réseau hydrographique actuel et subactuel (celui des trois derniers siècles), de la nature et de l'humidité des sols alluviaux ou encore de la nature des associations végétales en présence. Les morphologies de l'aménagement de l'espace (parcellaire, endiguement…) constituent aussi des indices utiles à la l'identification de paléoformes d'écoulement.

3.1. Acquisition et analyse d'un modèle numérique de terrain LIDAR

Les modèles numériques de terrain LIDAR (« LIght Detection And Ranging », « Radar

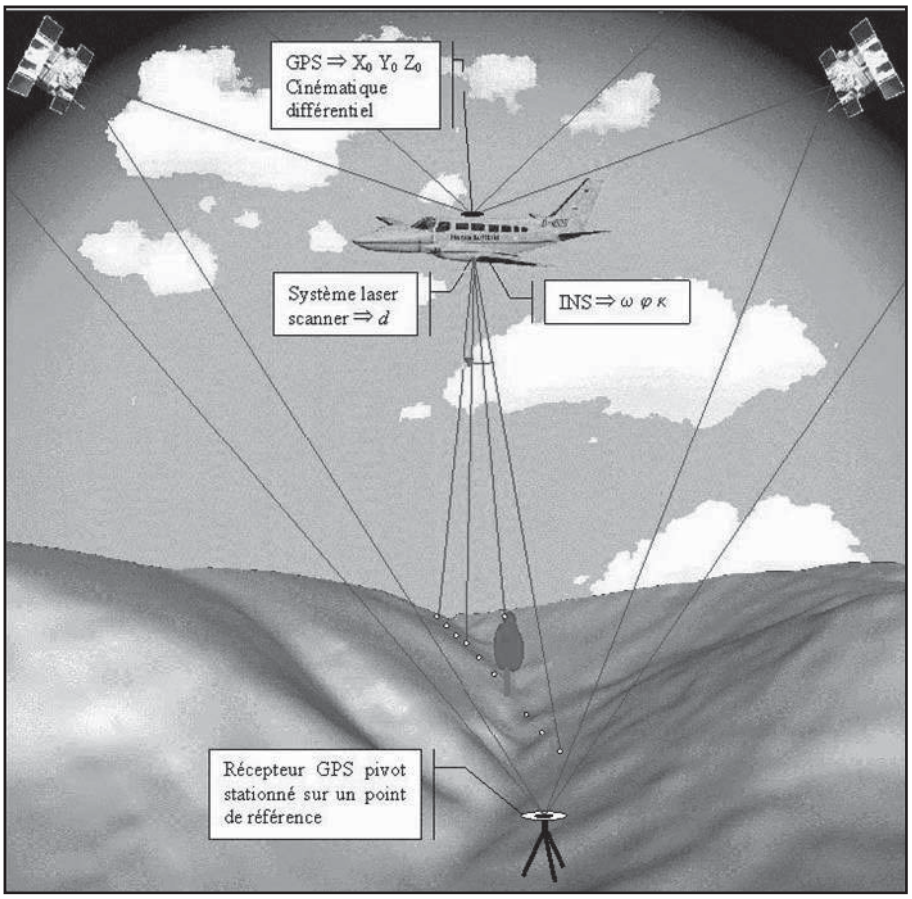

Fig. 2 : Technique du relevé LIDAR. Source ©Eurosense

laser aéroporté » ou « lasergrammétrie ») ont comme singularité une haute résolution spatiale tri-dimentionnelle. Dans les contextes de plaines alluviales aux reliefs souvent très peu contrastés, comme celle de la Loire, ils apportent un regard nouveau sur le modelé fluvial. Aujourd'hui, leur application à l'étude des plaines d'inondation françaises est encore parcimonieuse. Cela semble lié, en partie, à la nouveauté de l'application des méthodes et des techniques impliquées et au coût financier nécessaire à cette application.

Les données traitées dans le cadre de cette étude ont été acquises lors d'un levé de la topographie à l'aide d'un radar laser (ou scanner laser) aéroporté. L'acquisition des mesures a été réalisée par la société néerlandaise TerraImaging BV en 2002 et en 2003. Le maître d'ouvrage de cette investigation est la DIREN Centre (Ramirez 2003) (Figure 1). Les coordonnées de chaque point levé à la surface terrestre peuvent être calculées en déterminant, d'une part la position de l'avion, et d'autre part, les distance et direction entre le scanner et le point mesuré. Trois éléments majeurs composent le système : un radar laser, un GPS et une centrale inertielle (Figure 2). Ces technologies et ces méthodes d'acquisition permettent de relever un semi de points d'une densité supérieure à 1 point pour 4 m^2 soit environ 500 000 mille points pour une dalle de 1 km / 1 km (Figure 3A).

Dans le cadre de cette étude, une diversité de MNT en mode raster (ou matrice d'altitudes) a été réalisée. Elle répond à des exigences d'échelle puis de résolution horizontale et de précision altimétrique variables. Afin d'estimer la valeur des altitudes aux nœuds de la grille et selon un compromis entre le volume de données brutes et la résolution souhaitée nous avons

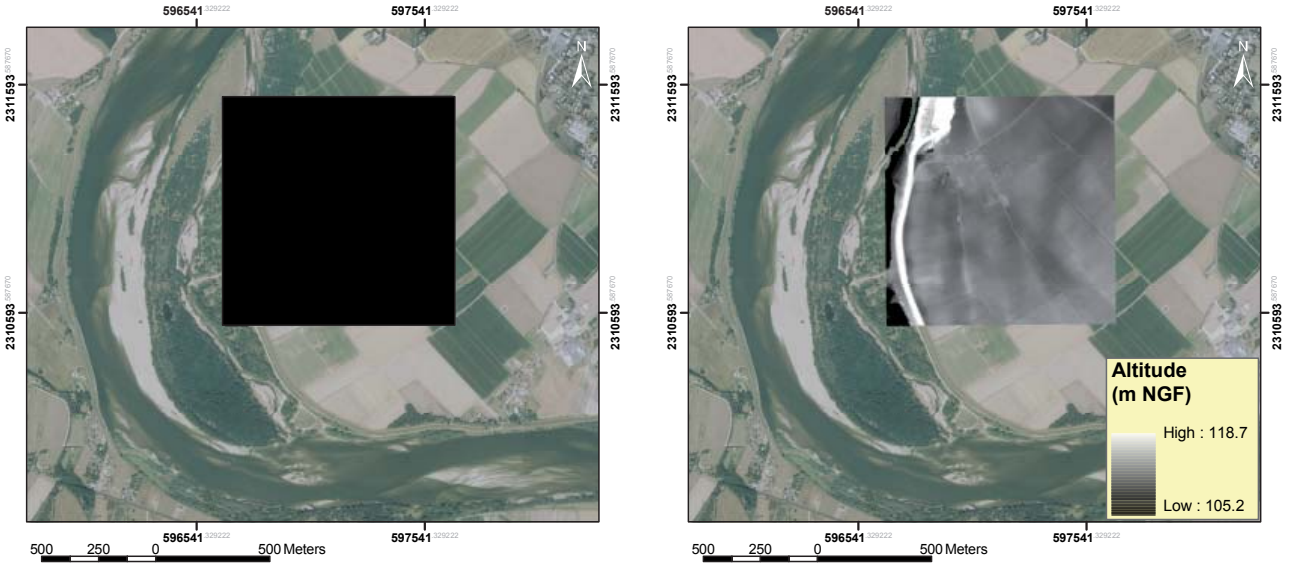

Fig. 3 : Elaboration du MNT LIDAR dans la convexité du méandre de Saint-Benoît-sur-Loire, Loiret. Arrière plan : orthophotographies aériennes 2002 (Source DIREN Centre).
A : Semi de données (dalle de 1 km/1 km). La forte densité des points de mesure ne permet pas de les distinguer individuellement à cette échelle d'observation.
B : MNA raster résultant de l'interpolation (algorithme Minimum Curvature).

alternativement choisi deux interpolateurs : un interpolateur de la famille des fonctions splines (l'algorithme *Minimum Curvature*) et un interpolateur géostatistique[2] (le kriggeage, cf. Annexe 1). La densité du semi est telle que la précision altimétrique du MNT atteint 15 cm (Coudercy, Gautheron, and Delahaye 2003) (Figures 3A et 3B). Compte tenu du volume de données traité, une automatisation du traitement a été élaborée (programmation réalisée par L. Aubry, UMR 7041 ARSCAN). Les MNT furent réalisés avec le logiciel Surfer 8.0 (Golden Software Inc.). L'importation des grilles avec un Système d'Information Géographique (SIG créé avec ArcGis 8.3 de Esri) a nécessité l'utilisation de l'utilitaire Grid Convert V 1.0 (Geospatial Designs).

Les MNT créés à diverses échelles spatiales emboîtées de la plaine alluviale du val d'Orléans sont exploités de diverses manières. Nous travaillons notamment sur des dérivés morphologiques du MNT : la pente, l'orientation, la convexité des pentes ou encore la direction et accumulation des flux. Les calculs sont réalisés à l'aide des logiciels Surfer 8.0 et d'Hydro Tools d'ArcGIS 8.3 (Esri). Des traitements supplémentaires visant à améliorer la qualité des modélisations sont en cours de réalisation (Challis 2006).

Le modelé fluvial dont le relief est très peu contrasté dans les vals de Loire restait jusqu'ici modestement perçu sur le terrain à partir des cartes IGN25 ou de la base des données altimétriques de l'IGN (Figure 4A). Compte tenu de l'importante surface couverte et de la haute résolution spatiale tridimensionnelle atteinte par le Modèle Numérique d'Altitude (Figure 4B), un nouveau regard est porté sur le modelé fluvial. Diverses paléoformes d'écoulement sont identifiées. Leur analyse morphométrique permet d'apporter de premiers éléments d'identification des dynamiques fluviales survenues : paléo-bandes de tressage (chevelu de chenaux séparés par des îles), paléo-trains de méandres (chenaux uniques méandriformes).

2 - Annexe 1.

L'identification des paléoformes fluviales préservées dans le lit majeur du fleuve est favorisée par le croisement d'indices microtopographiques du modelé et d'indices relatifs à la nature du réseau hydrographique, à l'humidité des sols ou à l'occupation des sols actuels et des derniers siècles. Nous faisons ainsi appel aux méthodes et aux techniques de la photo-interprétation et de la carto-interprétation.

3.2. Photo-interprétation et carto-interprétation en milieu alluvial

La télédétection et la photo-interprétation apportent des données sur le degré d'humidité des sols alluviaux, le couvert végétal et le parcellaire actuel du val (images satellitaires SPOT et Landsat, ortho-photos aériennes des missions IGN 1960, 1975, 2002). Le traitement des photographies aériennes sous le logiciel Photoshop CS permet notamment de faire ressortir le contraste d'hydromorphie des sols existant au sein de la mosaïque fluviale[3] (renforcement des constrastes, réglage de la luminosité, d'après(Salvador 2005). Ces contrastes des propriétés des sols constituent des indicateurs précieux de la localisation et de la morphologie des paléochenaux de la Loire (Figure 5). Ces derniers constituent un lieu d'archivage sédimentaire privilégié au sein de la plaine d'inondation.

Parallèlement, la carto-interprétation nous indique notamment l'organisation du réseau hydrographique actuel, celui du XXème siècle et plus modestement celui du XIXème siècle : carte IGN25, carte géologique au 1/50 000 BRGM, carte pédologique, carte de 1850 (Ponts.et.Chaussées 1848-1854), carte de Cassini (milieu du XVIIIe s.).

3.3. Elaboration et utilisation du Système d'Information Géographique

L'utilisation du Système d'Information Géographique (SIG) favorise l'analyse spatiale à différentes échelles (multiscalaire) :

- échelle du site, soit intra-site archéologique (exemple de pieux d'un aménagement de berge), soit intra-unité de paysage fluvial (exemple de paléoberge, paléomouille)
- échelle de la plaine alluviale (exemple de l'état de l'occupation de l'espace alluvial et de l'état de la mosaïque paysagère pour une période culturelle et une chronozone données)
- échelle du bassin versant du fleuve (exemple des territoires en présence et de l'hydrosystème considéré dans sa globalité).

Le SIG créé regroupe l'ensemble des données acquises sur le terrain géomorphologiques, sédimentologiques, géophysiques, archéologiques. En outre, il rassemble des bases de données thématiques sur les gisements archéologiques (Patriarche – SRA Centre) et les sondages géologiques, ainsi que des données « descriptives » diverses : ortho-photographies aériennes, photographies aériennes obliques, images satellitaires, MNT LIDAR, cartes actuelles et anciennes.

Le géoréférencement de chacune des données favorise une analyse croisée au sein du SIG (ArcGIS 8.3, Esri).

4 - CARACTÉRISATION MORPHOSTRATIGRAPHIQUE

4.1. Constitution d'une base de données de sondages géologiques

Une base de données de 1220 sondages géologiques concernant l'intégralité du stock alluvial du val d'Orléans et le val d'Ouzouer-sur-Loire a été réalisée (logiciel Access). Elle regroupe les données issues de la Banque de données du Sous-Sol du BRGM (BSS-BRGM : 700 sondages, (Giot and Gaultier 1999) (Figure 7), de centres d'études géotechniques et d'entreprises d'exploitation des alluvions (CETE de Blois, Entreprise Morillon-Corvol, 400 sondages) et de sondages réalisés dans le cadre de notre étude

3 - Une mosaïque relative à la diversité des unités de paysages fluviaux et à la diversité des milieux de sédimentation actuels et fossiles.

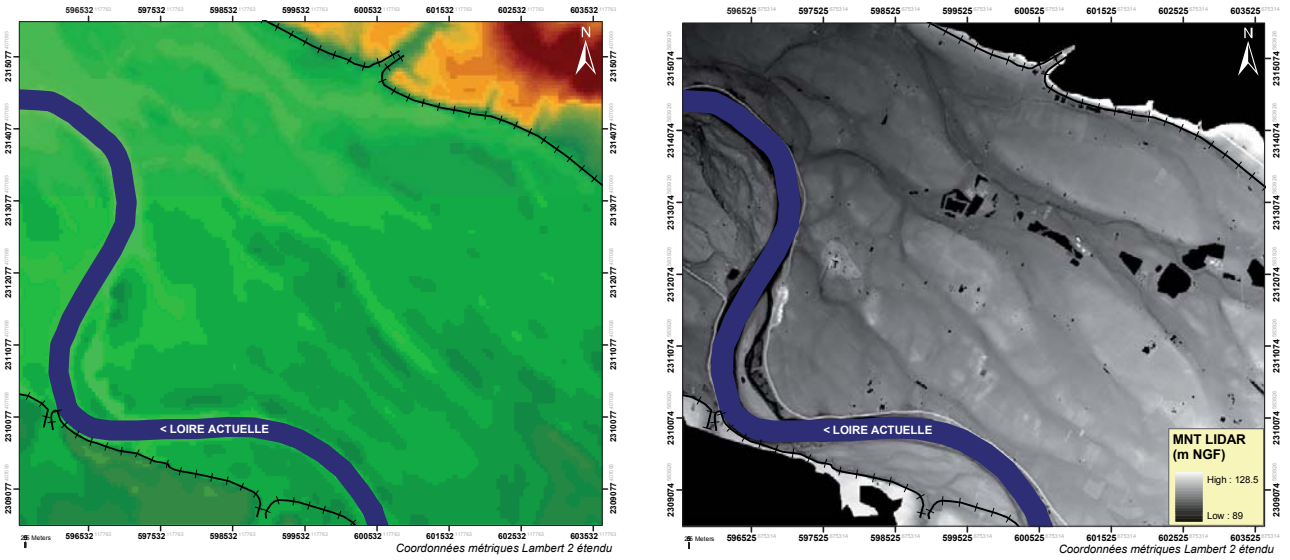

Fig. 4 : Comparaison des résolutions et précisions altimétriques des MNT BDALTI (IGN) (Fig. A) et MNT LIDAR (Données brutes, Diren Centre) (Fig. B) dans la plaine alluviale de la Loire moyenne (Val d'Ouzouer, Secteur de Saint-Benoît-sur-Loire).

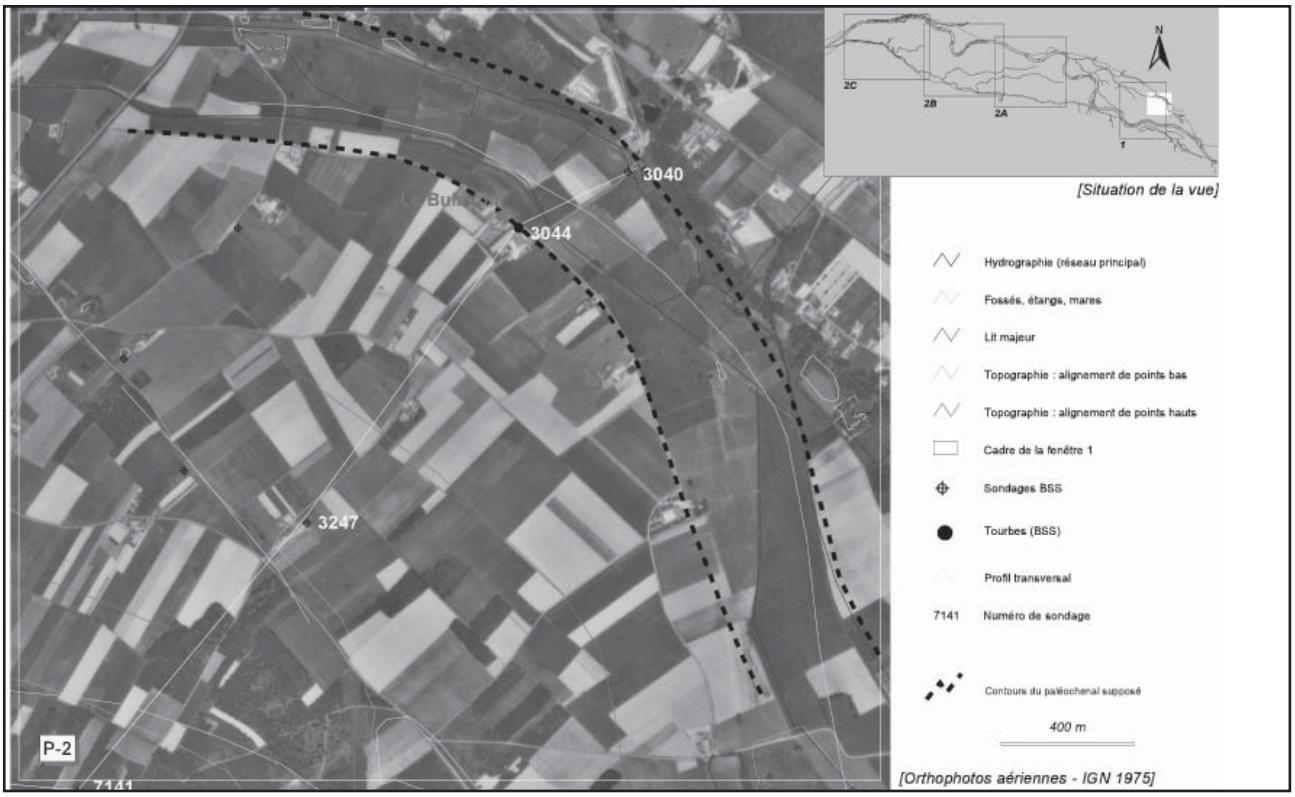

Fig. 5 : Contrastes d'hydromorphie des sols perçus sur une orthophotographie aérienne (IGN 1975). Les pointillés sont positionnés dans les secteurs de forts gradients latéraux d'humidité supposés des sols. Ils soulignent les paléoberges d'un paléochenal de la Loire (selon des observations complémentaires de terrain).

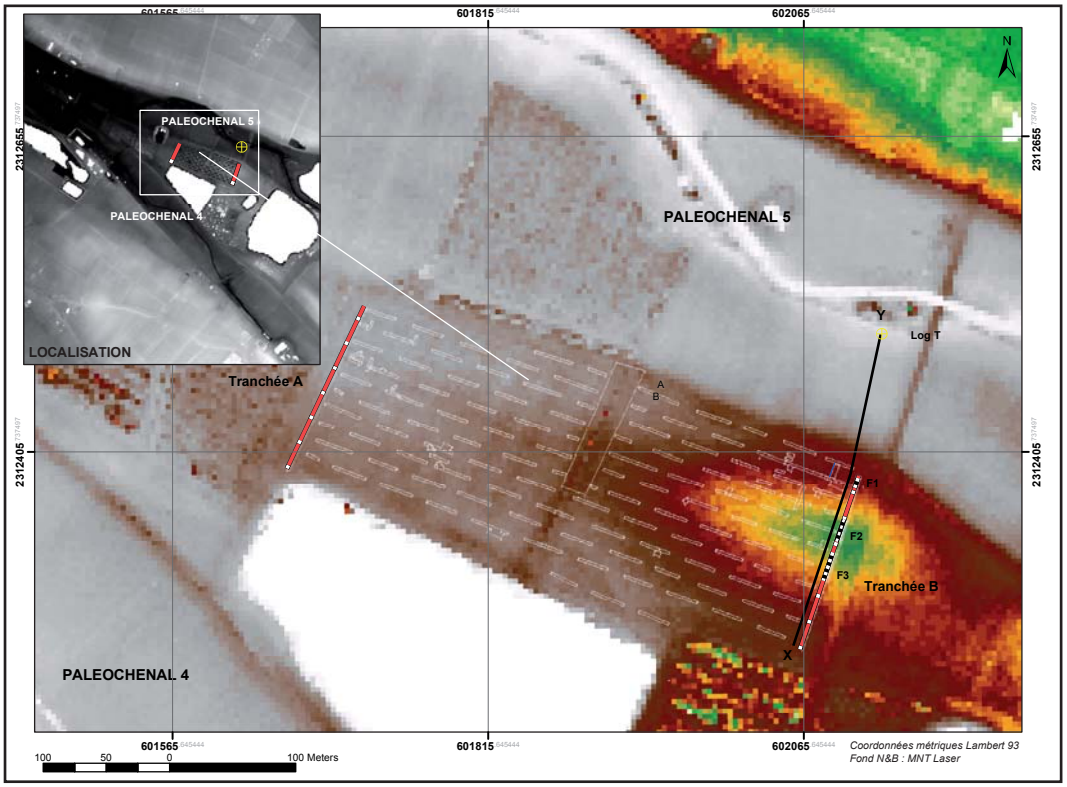

Fig. 6 : Spatialisation des données géoarchéologiques à proximité immédiate d'une opération de diagnostic archéologique. Occupations du Mésolithique, de l'âge du Bronze final IIb et de la période gallo-romaine (Ier-IIième s.) sur une montille située en zone de confluence de deux paléochenaux holocènes de la Loire.

(120 sondages géologiques : tarière à main et carottier motorisé). L'architecture de la base de données comprenant les sondages réalisés dans le cadre de cette étude intègre les champs relatifs au géoréférencement, à la date et aux conditions techniques de réalisation du sondage, au numéro du sondage, aux caractéristiques des unités ou passes identifiées : profondeur, puissance, couleur, nature, texture, structure, inclusions, porosité, oxydo-réduction, bioturbation, code lithologique. Les champs retenus pour la caractérisation des autres sondages sont ceux de la BSS-BRGM : géoréférencement, numéro de sondage, profondeur et puissance des passes, texture, couleur, nom de la formation, code lithologique, code stratigraphique. La précision verticale du MNT Lidar permet un calage altitudinal des têtes de forage de bonne qualité. Cette précision est nécessaire à la spatialisation de formations géologiques superficielles relativement peu épaisses.

Cette base de données est exploitée de diverses manières. Des requêtes ponctuelles d'unités stratigraphiques recherchées peuvent être réalisées (ex : requêtes des unités tourbeuses, des unités sableuses, d'un *bed rock* de lithologie calcaire ou argileuse, etc…). Les traitements réalisés visent essentiellement la spatialisation de l'information. La réalisation de logs stratigraphiques (« colonnes » stratigraphiques) autorise une vision 1D de l'organisation morphosédimentaire. Des coupes reconstituées sont réalisées selon des profils transversaux et longitudinaux en lignes droites ou brisées, elles permettent une vision morphostratigraphique 2D. Les logiciels utilisés pour la spatialisation 1D et 2D des dépôts sont GDM 5.1 (BRGM) ou Excel (Microsoft) et Illustrator CS (Adobe). Le premier d'entre eux présente l'avantage de représenter, à la volée, les logs stratigraphiques des sondages initialement sélectionnés selon un transect. La

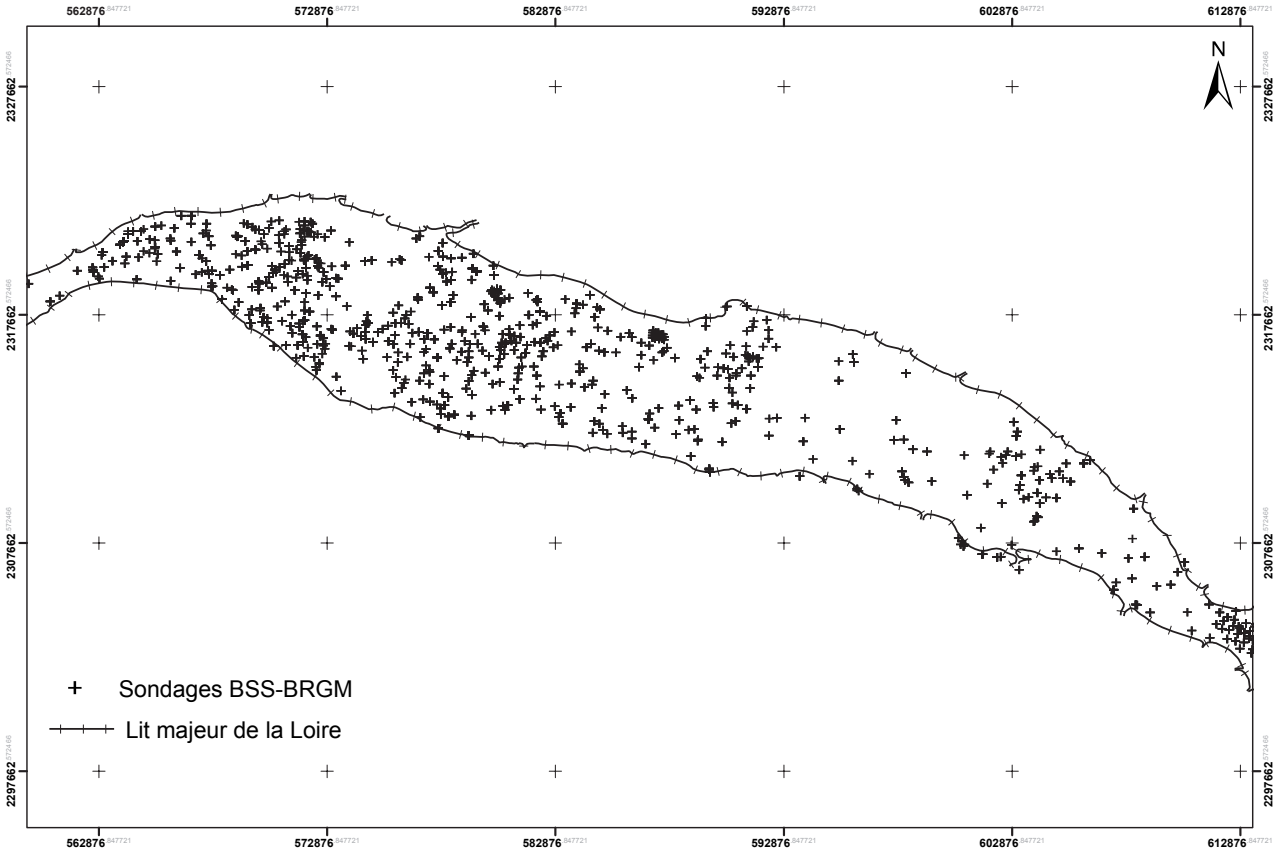

Fig. 7 : Localisation des sondages géologiques de la Banque de données du Sous-Sol du BRGM dans le val d'Orléans.

rapidité d'exécution du traitement fait de ce logiciel un bon outil d'analyse de l'organisation géométrique des dépôts.

4.2. Modélisation spatiale avec analyse géostatistique des corps sédimentaires de la plaine alluviale

La qualité des interprétations paléo-hydrodynamiques et du cadre chronostratigraphique proposé repose, en partie, sur la qualité de la modélisation spatiale des principaux corps sédimentaires alluviaux.

La forte densité des sondages géologiques à l'échelle du val d'Orléans permet d'initier une approche « 3D » de l'organisation morphostratigraphique des corps sédimentaires alluviaux identifiés. Cette approche a déjà été réalisée dans d'autres vals de Loire (Carcaud et al. 2002). Elle permet ici une modélisation spatiale :

- de la puissance des corps sédimentaires
- de la topographie des interfaces des corps sédimentaires

-- topographie du toit du *bed rock* (ici, les formations tertiaires de Beauce et de Sologne constituent le substrat sur lequel reposent les dépôts alluviaux) (Figures 8 et 9)]

-- topographie du toit des dépôts détritiques grossiers, moyens et fins relativement à la couverture topographique (MNT LIDAR) en tous points du val d'Orléans. Cependant, la précision du modèle est fonction de la densité initiale des sondages géologiques. Ainsi, certains secteurs font l'objet d'une modélisation spatiale plus fine (montille de Bonnée, paléochenaux de Saint-Benoît-sur-Loire).

D'autre part, cette modélisation permet une

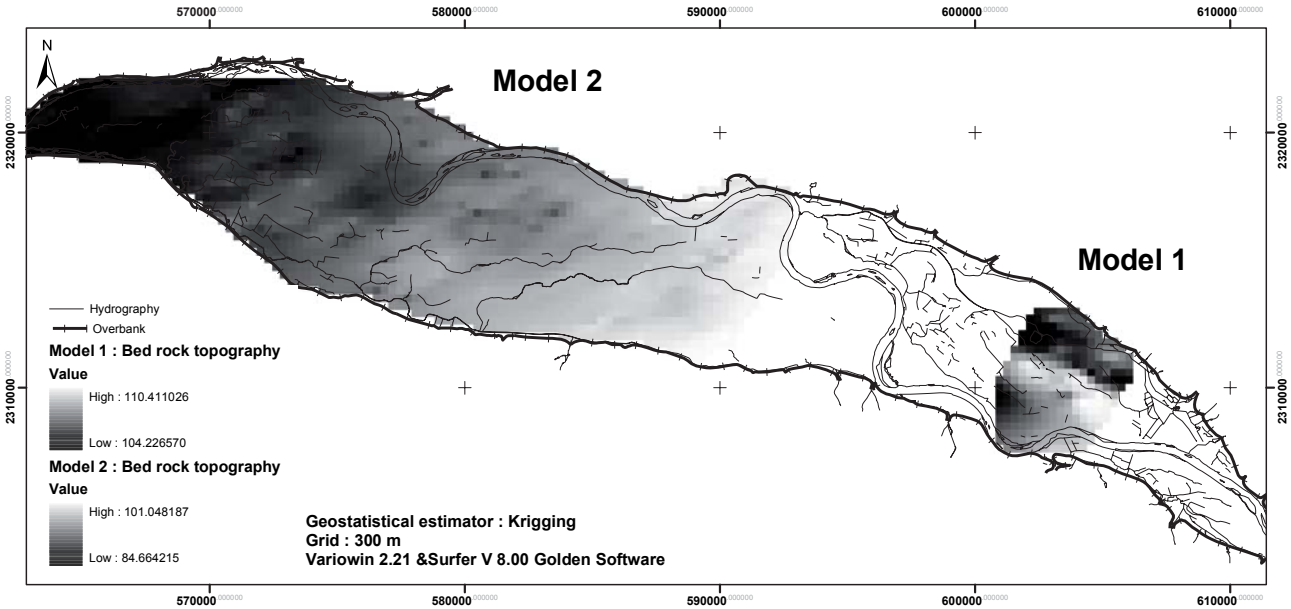

Fig. 8 : Modélisation spatiale avec analyse géostatistique de la topographie du toit du bed-rock (val d'Orléans et val d'Ouzouer-sur-Loire).

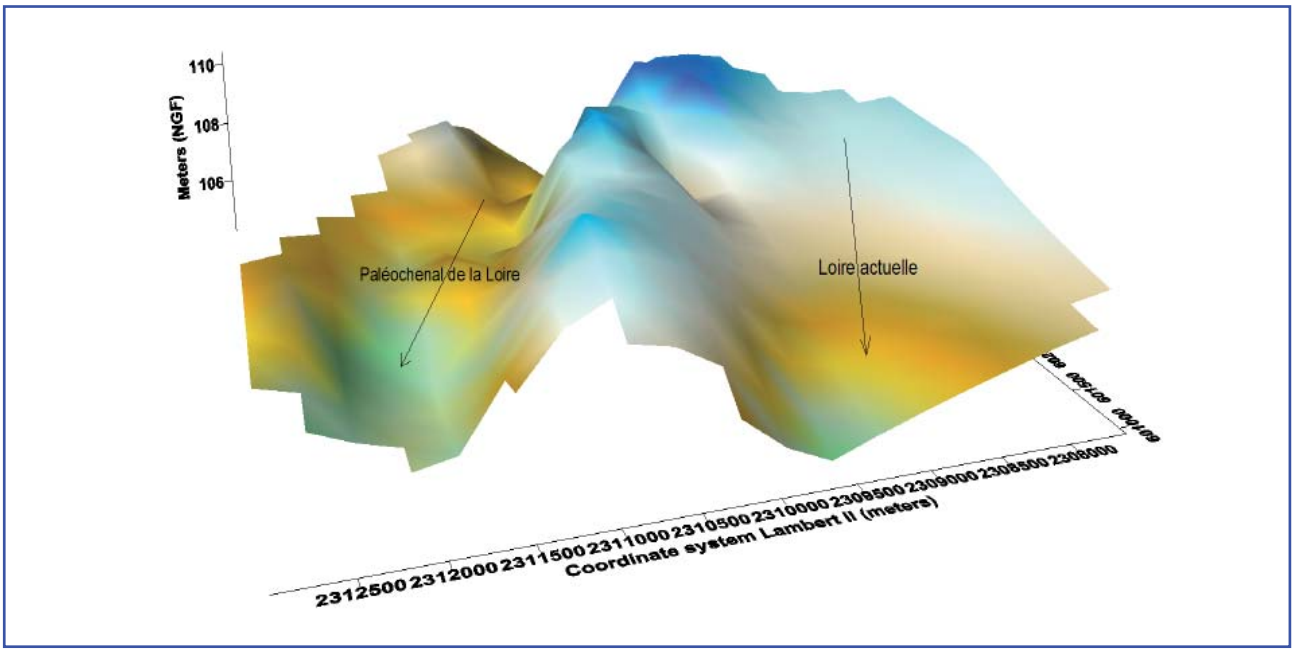

Fig. 9 : Topographie du toit du substrat tertiaire (formation de Sologne) dans le secteur de Bonnée (val d'Ouzouer-sur-Loire). Vue en « 3D ».

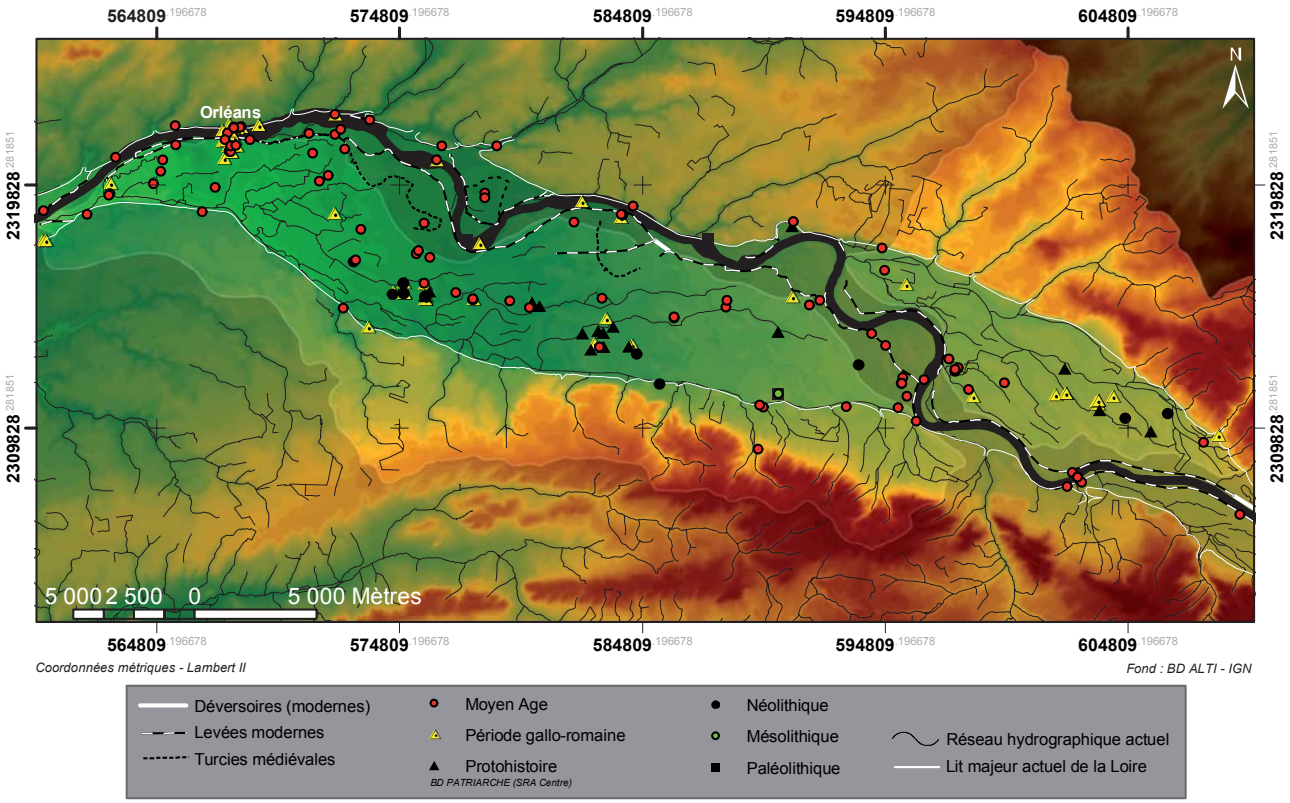

Fig. 10 : Carte archéologique du Paléolithique supérieur à l'Actuel indiquant l'occupation de la plaine alluviale et les aménagements du fleuve

estimation du volume des dépôts.

La modélisation spatiale réalisée intègre une analyse géostatistique afin d'appréhender la structure spatiale du phénomène étudié (Annexe 1).

4.3. Analyse de la distribution spatiale des séquences à fort potentiel du point de vue de la reconstitution des paléo-milieux

Dans les vals de la Loire moyenne, les archives sédimentaires riches en matière organique sont relativement rares. Elles occupent cependant une place importante dans les reconstitutions paléoenvironnementales réalisées. Aussi, la prospection de ces dépôts a nécessité le croisement de l'ensemble des méthodes permettant la caractérisation du modelé de la plaine puis de la nature et de l'organisation morhostratigraphique des dépôts.

La distribution spatiale des séquences limono-argileuses et tourbeuses au sein de la plaine alluviale est estimée. Des tests de corrélation sont réalisés entre les diverses variables sédimentologiques (qualitatives et quantitatives), topographiques (MNT et ses dérivés morphologiques) et géophysiques (conductivité apparente). Il existe, au niveau de certains paléochenaux de la Loire, une assez bonne corrélation linéaire entre les valeurs de conductivité apparente et, d'une part, la puissance des dépôts tourbeux et limono-argileux de leur séquence de comblement et, d'autre part, la topographie (Castanet *et al.*, 2007a).

Cette approche permet d'intégrer les résultats de l'analyse morphologique à ceux de l'analyse morphostratigraphique dans le but d'affiner la spatialisation de l'informati on sédimentologique et les méthodes de prospections géoarchéologiques.

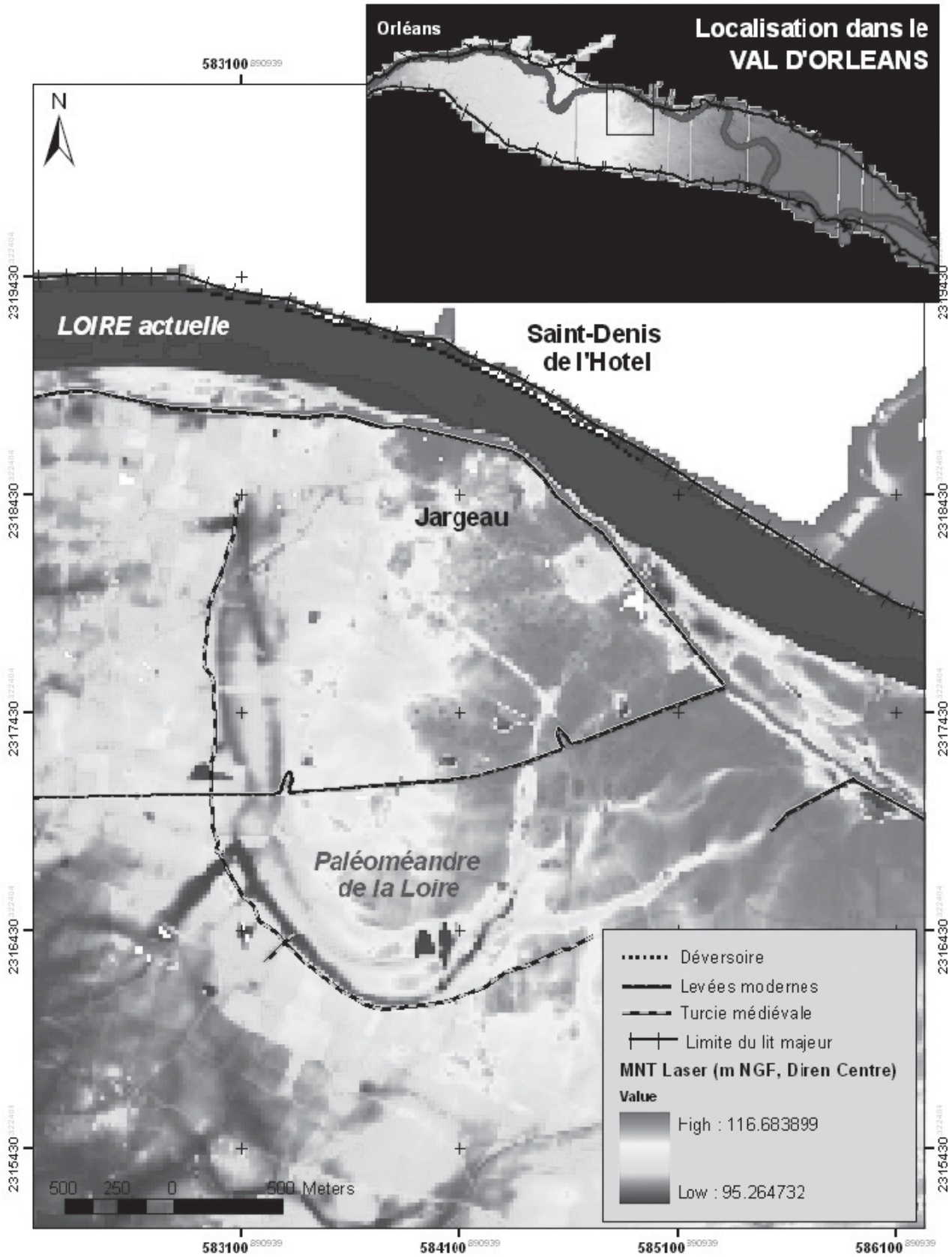

Fig. 11 : Générations d'endiguement médiévaux et modernes et de styles fluviaux dans le secteur de Jargeau (Val d'Orléans, Loiret).

Parallèlement, l'évolution de la dynamique des milieux fluviatiles est mise en regard de l'évolution l'occupation et de l'aménagement de la plaine par les sociétés.

5 - ANALYSE DES INTERACTIONS SOCIÉTÉS - MILIEUX FLUVIATILES

5.1. Occupation au sein de la mosaïque fluviale durant l'Holocène : exemple du val d'Orléans

L'analyse des interactions entre les sociétés riveraines du fleuve ou situées dans le bassin versant amont et la dynamique fluviale de la Loire sur le temps long de l'Holocène nécessite la caractérisation croisée de l'occupation et des aménagements de l'espace fluvial par les sociétés et de l'activité hydrosédimentaire du fleuve (Castanet *et al.,* 2007d). Cette approche est menée à l'échelle du site, de son environnement immédiat (quelques dizaines à une centaine de mètres (Figure 6) puis à l'échelle de la plaine alluviale (Figure 10).

L'identification de la mosaïque de corps sédimentaires hétérochrones constituant le lit majeur de la Loire permet la distinction des dépôts weichséliens pléniglaciaires des dépôts tardiglaciaires puis holocènes (Castanet *et al.*, 2007b). Les conditions pédologiques et hydrosédimentaires du milieu fluviatile durant l'holocène sont partiellement héritées des dynamiques weichséliennes. Cependant les rythmes du fleuve et les sociétés contribuent, durant l'Holocène, à la morphogenèse de la plaine (Castanet et al. sous presse a). A la mosaïque de corps sédimentaires est directement corrélée une hétérogénéité du potentiel archéologique.

5.2. Endiguement au Moyen Âge et à l'époque moderne

La Loire a connu un endiguement polyphasé depuis le Moyen Âge. Il a conduit à une rétraction de la largeur du lit endigué. A un lit endigué médiéval, temporaire, discontinu et submersible (assuré par les turcies) se surimpose un lit endigué moderne subcontinu et insubmersible (assuré par les levées).

Un élément de cet endiguement médiéval est actuellement observé au sud de la commune de Jargeau située actuellement en rive gauche de la Loire. Une turcie a été construite sur la levée naturelle de la berge située en rive gauche d'un méandre médiéval de la Loire. (Ce méandre présentait des caractéristiques morphométriques proches de l'actuel méandre de Bou situé quelques kilomètres en aval [caractérisation morphologique et morphostratigraphique en cours) (Figure 11)]. Après avoir recoupé ce méandre (recoupement antérieur au début de l'époque moderne, datation en cours), la Loire a fait l'objet d'un second endiguement majeur (levée moderne). (Au niveau du pont de Jargeau, depuis au moins le début de l'époque moderne, le rapport « largeur du lit endigué sur largeur du lit majeur » atteint 1/30ième). Il en résulte une très forte contrainte sur l'hydrosystème en période de forts débits entraînant notamment la rupture des digues juste en amont de la commune de Jargeau.

Plus généralement, la réalisation de ces ouvrages (turcies et levées) a constitué de nouvelles conditions pour l'hydrosystème et pour les sociétés. (Parmi les conséquences hydrosédimentaires, le chenal connaît une incision relative à l'augmentation de la vitesse et de la compétence des écoulements en période de crue puis à une diminution des sources d'alimentation latérale) Sur le plan des conséquences sociales, le développement urbain en arrière des levées, associé partiellement à l'oubli de l'aléa, augmente la vulnérabilité et conduit à un risque renforcé. Il s'agit ici d'un risque hérité (Garcin et al. 2006).

Les progrès récents des outils et des méthodes de la géomatique sont ici appliqués à l'étude des réponses des systèmes fluviaux aux changements climatiques, environnementaux et sociaux puis

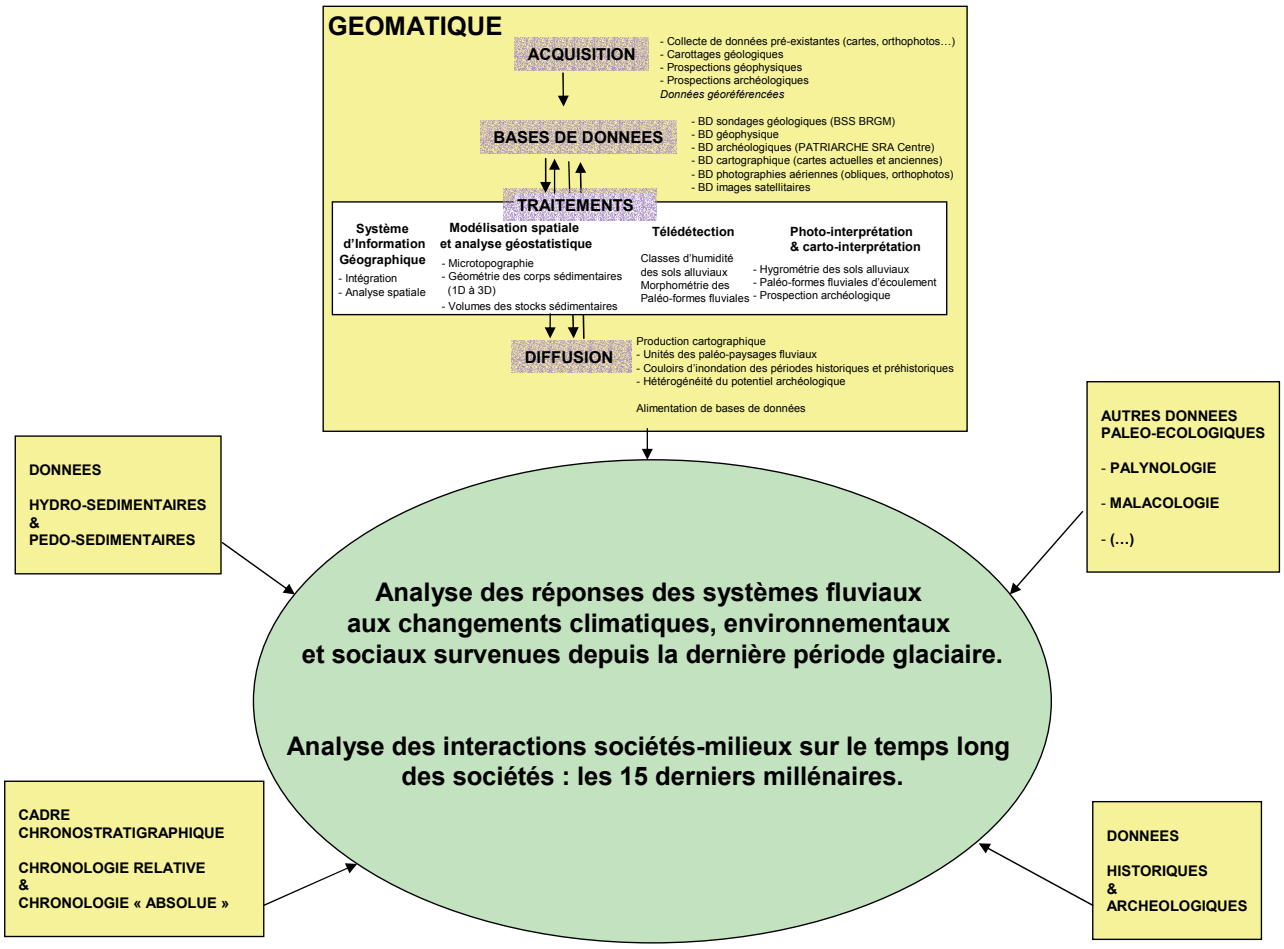

Fig. 12.

à l'analyse des interactions sociétés-milieux en contexte alluvial sur le temps long des sociétés (les 15 derniers millénaires). Les méthodes traditionnelles visant les caractérisations morphologiques et morphostratigraphique des plaines alluviales trouvent ici de nouvelles perspectives d'analyses spatiales. La construction et l'analyse de Modèles Numériques de Terrain LIDAR, la carto-interprétation et la photo-interprétation, l'utilisation de Systèmes d'Informations Géographiques, la gestion de bases de données ou encore la modélisation spatiale avec analyse géostatistique apportent, individuellement et de manière intégrée, un regard nouveau sur l'organisation morphosédimentaire des fonds de vallées et leur dynamique, sous le contrôle de facteurs géodynamiques et anthropiques, durant le Tardiglaciaire et l'Holocène (Figure 12).

La plupart des figures sont éditées en couleurs sur le web (http://www.mae.u-paris10.fr/Cahiers/index.htm)

BIBLIOGRAPHIE

AUBRY L. 2003. *Acquisition, traitement et restitution des données d'une reconnaissance archéologique : la ville gallo-romaine du Vieil-Evreux*, Spécialité : Sciences de la Terre. Paris, Thèse de doctorat de l'Université Paris 6.

BURNOUF J., GARCIN M. 2003. *Zone Atelier Bassin Versant de la Loire. Evolution dans le long terme d'un*

anthroposystème (Holocène jusqu'à l'Actuel), Rapport d'activité 2002-2003, CNRS-PEVS/SEDD: 73.

CARCAUD N., GARCIN M., VISSET L., MUSCH J. et BURNOUF J. 2002. Nouvelle lecture de l'évolution des paysages fluviaux à l'Holocène dans le bassin de la Loire moyenne, *In :* BRAVARD J.-P. et MAGNY M. *Les fleuves ont une histoire, paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15000 ans.* 71-84, Paris.

CASTANET C., BURNOUF J., GARCIN M., CARCAUD N., CYPRIEN A.L., VISSET L.; et VELLA M.A. 2007 b. Dynamique hydrosédimentaire tardiglaciaire et holocène du réseau hydrographique secondaire du val d'Orléans, interactions entre les facteurs géodynamiques et anthropiques. *In : Actes du colloque « Des rivières, des hommes, une longue histoire «*. SIARCE, 4 et 5 Novembre 2005, Corbeil-Essones.

CASTANET C., BURNOUF J., GARCIN M., CYPRIEN A.L., LAMOTHE M., CAMERLYNCK C., CARCAUD N. 2007d. Holocene societies - fluvial environments interactions in the Middle Loire River alluvial plain (Val d'Orléans, France). *In : Quaternary International*, Volumes 167-168, Supplement 1, 63.

CASTANET C., GARCIN M., LAMOTHE M., CAMERLYNCK C., CYPRIEN A.L., BURNOUF J., CARCAUD N. 2007a, Response of the middle Loire River to climatic and environmental changes during the last 30 000 years (Val d'Orléans, France). *In : Quaternary International*, Volumes 167-168, Supplement 1, 62-63.

CASTANET C.. CAMERLYNCK C., VELLA M.A., GARCIN M. et BURNOUF J. 2007c. Approche géophysique, sédimentologique et géomorphologique intégrée pour la caractérisation des dynamiques fluviales de la Loire survenues durant les derniers 25 000 ans (Val d'Orléans, Loiret). *In : Actes du 6ème Colloque GEOFCAN*, Bondy.

CHALLIS K. 2006. Airborne Laser Altimetry in alluviated landscapes. *In : Archaeological Prospection* 13: 103-127.

COUDERCY L., GAUTHERON A., DELAHAYE A.. 2003. Un M.N.T. de haute précision sur la Loire inondable, *DIREN Centre, Conseil National de l'Information Géographique*.

DESCHAMP P. 2002. Glossaire informatique des termes publiés au Journal Officiel par la Commission Générale de Terminologie et de Néologie le 22 Septembre 2000., http://www-rocq.inria.fr/qui/Philippe.Deschamp/RETIF/20000922-tout.html.

GARCIN M., CARCAUD N., GAUTIER E., BURNOUF J., CASTANET C. ET FOUILLET N. 2006, Impacts des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. *In* : ALLEE P. et LESPEZ L. *L'Erosion entre Société, Climat et Paléoenvironnement* , Table Ronde en l'honneur du Professeur NEBOIT-GUILHOT R., les 25-27 mars 2004. (Presses Universitaires Blaise Pascal. Collection Nature & Sociétés,) 225-236.

GIOT D. et GAULTIER S. 1999. Lit majeur de la Loire de Nevers à Angers. Réalisation d'une base de données de forages., BRGM - *Equipe pluridisciplinaire d'assistance aux maîtres d'ouvrage Plan Loire Grandeur Nature*.

LEVEQUE C., MUXART T., ABBADIE L., WEILL A. et VAN DER LEEUW S. 2003. L'anthroposystème : entité structurelle et fonctionnelle des interactions sociétés-milieux.*In : Quelles natures voulons-nous ? Pour une approche socio-écologique du champ de l'environnement.* Actes du colloque du PEVS, Lille 11-14 Novembre 2001.

MARCOTTE D. 2005. Cours de Géostatistique, de Probabilités & Statistiques et de Géostatistique minière. Ecole Polytechnique de Montréal, http://geo.polymtl.ca/%7Emarcotte/.

Ponts.et.Chaussées (1848-1854). «Carte du cours de la rivière Loire (DIREN Centre).

RAMIREZ V. 2003. *Levée par laser aéroporté sur la Loire moyenne. Automatisation des processus de contrôle*. Mémoire en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur. Ecole Supérieure des Géomètres Topographes, Le Mans.

NOTES :

Le krigeage est une méthode d'interpolation réalisée selon une approche probabiliste. Il s'agit d'une interpolation qui estime les valeurs aux points non échantillonnés par une combinaison des données (contrairement aux méthodes d'interpolation basée sur une approche déterministe[4]). Les poids des échantillons sont

4 - Dans les méthodes d'interpolation déterministe, la fonction de structure (fonction de pondération) est choisie à priori. Ces méthodes ne

pondérés par une fonction de structure qui est issue des données. Sont ainsi prises en compte les distances, les valeurs et les corrélations. La fonction n'est pas fixée *a priori* mais suite à l'analyse du variogramme. La valeur estimée en un point est le produit d'un processus sous-jacent, il fournit une variance d'estimation. Elle permet d'appréhender la structure spatiale du phénomène étudié. En ce sens, le krigeage s'inscrit dans une démarche d'analyse géostatistique des données.

L'analyse géostatistique par kriggeage comprend trois principaux temps d'analyse (Aubry 2003), (Marcotte 2005) : l'étude variographique (1), la validation croisée des modèles (2) puis le calcul du modèle (3).

1. L'étude variographique permet de modéliser les variations spatiales des données dans l'espace par une fonction mathématique. Les paramètres de cette modélisation sont utilisés pour le calcul de l'estimateur de krigeage. Dans un premier temps, il est nécessaire de définir les paramètres de calcul du variogramme expérimental : direction préférentielle de calcul [Logiciel Variowin 2.21 (Y. Pannatier)], pas d'échantillonnage, tolérance angulaire (Logiciel Surfer 8.0, Golden Software Inc.). Secondairement, la fonction qui modélise le mieux le comportement des variogrammes est définie. Elle détermine le modèle variographique.

2. La validation croisée des modèles vise à estimer la performance des divers estimateurs et des modèles variographiques élaborés précédemment. Son principe consiste en un calcul de chaque donnée par l'estimateur choisi en ne tenant compte que des autres données puis en une comparaison de la valeur estimée avec la valeur considérée comme vraie. Une étude statistique sur les résidus (ou erreurs) est réalisée pour l'ensemble des données (Logiciel Surfer 8.0, Golden Software Inc.).

3. Le calcul du modèle est réalisé par krigeage ordinaire, cet estimateur géostatistique fournit une estimation locale de la variable régionalisée (Logiciel Surfer 8.0, Golden Software Inc.).

fournissent pas d'informations sur la variance d'estimation (DRAPEAU L. 2000 « Statistiques et interpolations dans les SIG » *in « Towards the Use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries »,* COPEMED).