

Université de Bourgogne  
École doctorale LISIT 491 – Artheis UMR CNRS 6298

Thèse  
Pour obtenir le grade de  
Docteur de l'Université de Bourgogne  
Discipline : Sciences de la Terre

Par  
Ronan Steinmann

Date : 2 juillet 2015

L'INFLUENCE CLIMATIQUE ET  
ANTHROPIQUE SUR TROIS COURS D'EAU  
BOURGUIGNONS :  
GÉOARCHÉOLOGIE DE SITES DE FRANCHISSEMENT SUR LA  
LOIRE, LA SAÔNE ET LE DOUBS AU COURS DE L'HOLOCÈNE

Volume 2 : Illustrations et Annexes

Directeur de thèse  
Jean-Pierre Garcia

Coencadrante  
Annie Dumont

Jury :

BARRAL PH., Professeur – Université de Franche-Comté	Examineur
BECK C., Professeur – Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis	Examinatrice
CASTANET C., Maître de Conférences – U. Paris 8 Vincennes Saint-Denis	Examineur
CUBIZOLLE H., Professeur – Université Jean Monnet Saint-Étienne	Rapporteur
DUMONT A., Ingénieur de recherche – Ministère de la Culture, DRASSM	Coencadrante
GARCIA J.-P., Professeur – Université de Bourgogne	Directeur de thèse
SALVADOR P.-G., Professeur – Université de Lille 1	Rapporteur



*« Alors, je fis part à Charcot de l'étonnement que m'avait causé la conduite des rivières, que j'avais vues couler hors des endroits désignés à leurs cours par la carte.*

*« Ce sont les rivières qui ont tort de n'être pas à leur place », me dit le grand explorateur. »*

Alexandra David-Néel, transcription d'un enregistrement de 1957



## **Droits de diffusion des images utilisées pour les figures**

Sauf mention contraire, toutes les figures présentées ici ont été réalisées par R. Steinmann, et ne sont pas reproductibles sans son autorisation. Lorsqu'elles sont tirées d'une autre publication, mais totalement reprises, la référence d'origine est toujours mentionnée. Dans le cas contraire, il s'agit d'un travail original.

Certaines images, dont les droits n'étaient pas acquis par l'auteur, ont été supprimées de cette version, et ne sont disponibles que sur la version imprimée déposée à la Bibliothèque Universitaire de l'Université de Bourgogne, ou auprès de l'auteur. Elles sont signalées par un cadre grisé, et leur légende mentionne toujours la publication originale dont elles sont tirées.

Les fonds de cartes géologiques ont été reproduits avec l'aimable autorisation du BRGM, et à ce titre, nous remercions tout particulièrement M. Denis Thiéblemont.

Les documents provenant de l'IGN ont été fournis et utilisés dans le cadre de la licence Recherche qui met gratuitement à disposition les données, et les fonds sont donc reproduits ici au titre des recherches publiables.

Les documents de la BNF utilisés ici proviennent de la plate-forme « Gallica » et sont tous libres de droits.

Les documents d'archives ont pu être reproduits grâce à l'aimable autorisation :

- des Archives Départementales de Saône-et-Loire
- des Archives Départementales du Cher
- des Archives Départementales de l'Allier
- des Archives Départementales de Côte-d'Or
- des Archives municipales de La Charité-sur-Loire



# LISTE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1 : A - Le pont romain de Chassenard (Allier) et ses environs (B) ; cliché A. Dumont et P. Moyat (Dumont et al. 2006, p. 32). **30**
- Figure 2 : Variables de contrôle de la dynamique alluviale (d'après Schumm 1977, p. 19). **31**
- Figure 3 : « Échelles temporelles de l'ajustement des différentes composantes géomorphologiques du chenal. Les longueurs présentées en ordonnées sont indicatives et s'appliquent plutôt aux cours d'eau de la zone tempérée » (d'après Knighton, 1984, dans Malavoi et Bravard 2010, p. 12) . **31**
- Figure 5 : Classification des systèmes alluviaux à partir des tracés en plan (Campy et Macaire 2003, p. 245). **32**
- Figure 4 : Classification des styles alluviaux de Rosgen, 1996 (dans Nabet 2013, p. 347). **32**
- Figure 6 : Fonctionnement des principaux styles alluviaux. **33**
- Figure 8 : Densité de population du territoire français métropolitain et principaux tracés fluviaux. **34**
- Figure 7 : Principales composantes des transferts sédimentaires à l'échelle du bassin versant (Hoffmann *et al.* 2010, p. 91). **34**
- Figure 9 : Interrelations des différents paramètres de contrôle du système fluvial (d'après Knighton 1998, p. 2). **35**
- Figure 10 : Profondeurs de la limite croûte-manteau (lignes rouges en km) sur le fond topographique continental et océanique français ; principales zones en soulèvement (triangles rouges), stables (cercles bleus) et subsidentes (triangles jaunes) ; valeurs de déformation en mm/an, durées au-dessous en milliers d'années (Guennoc et Lenôtre 2009, p. 47). **36**
- Figure 11 : Échelles temporelles des cycles climatiques terrestres (Ruddiman 2001, p. 6) ; A - 300 derniers Ma ; B - 3 derniers Ma ; C - 50 000 dernières années ; D - 1000 dernières années. **36**
- Figure 12 : Fluctuations des températures de l'Antarctique au cours des 800 000 dernières années par rapport à l'actuel (Jouzel *et al.* 2007, p. 794), carotte de glace du Dome C (courbe rouge). Corrélations observées avec les enregistrements groënlandais du carottage NorthGRIP (en vert) et les stades isotopiques marins (en bleu).  $T_1$  à  $T_{IX}$  : transitions. **37**
- Figure 13 : Variations climatiques de l'hémisphère nord au cours des 50 000 dernières années (Errico *et al.* 2012, p. 130) ; a - insolation ( $W/m^2$ ) ; b - volume de glace par rapport au volume

d'eau mondial ; c - teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (en ppm) ; d - GIS (Greenland Isotopic Stages) ; d - températures atmosphériques au-dessus du Groënland ; e - évolution de la forêt méditerranéenne dans son ensemble (gris), sans les conifères (noir) et pour le chêne seul (blanc) ; f - plantes semi-désertiques ; H1 à H5 - Événements de Heinrich ; bandes grisées verticales : événements froids.. **38**

Figure 14 : Cartes de la répartition du permafrost au nord-ouest de l'Europe entre 24 000 et 21000 BP (à gauche) et lors du Dryas ancien (à droite). D'après la modélisation des températures atmosphériques annuelles maximales (Renssen et Vandenberghe 2003, p. 219). Ligne noire épaisse : limites des calottes glaciaires : ligne noire épaisse discontinue : limites des permafrosts continu (température maximale annuelle de - 8°C) et discontinu (température maximale annuelle de - 4°C) ; ligne noire fine discontinue : littoral. **39**

Figure 15 : Répartition des différents domaines de la cryosphère lors du Dernier Maximum Glaciaire en France d'après les observations de structures périglaciaires (d'après Mercier 2013, pl. XIX). **39**

Figure 16 : Limites de la calotte glaciaire (1) et du pergélisol (2) au cours du Dernier Maximum Glaciaire aux latitudes moyennes de l'Europe (Vandenberghe *et al.* 2004, p. 395). Les glaciers de tailles plus réduites d'Europe centrale et méridionale ne sont pas représentés. **40**

Figure 17 : Typologie des rivières périglaciaires en fonction du couvert végétal, des caractéristiques du permafrost et des apports sédimentaires (d'après Vandenberghe 2001, p. 120). **40**

Figure 18 : Phénomènes périglaciaires et variations de la température annuelle après le Dernier Maximum Glaciaire entre 50 et 53 ° de latitude nord (Belgique et Pays-Bas) ; Renssen et Vandenberghe 2003, p. 220 ; ET - Tuf D'Eltville ; E - surfaces d'érosion ; IS - période interglaciaire. **41**

Figure 19 : Variations des températures moyennes annuelles et des mois les plus chauds (juillet) et les plus froids (janvier) en Europe de l'ouest au cours du Pléniglaciaire Weichsélien, reconstituées par une approche multiproxies d'enregistrements paléoclimatiques (Vandenberghe *et al.* 2004, p. 400). **41**

Figure 20 : Modèle d'évolution de la température, de la densité du couvert végétal, de l'évapotranspiration (E), des précipitations (P) et des processus sédimentaires associés en domaine alluvial au cours des phases glaciaire et interglaciaire (Vandenberghe 1993 dans Miall 2006, p. 449). **42**

Figure 21 : Modèle simplifié de la formation des terrasses alluviales de la vallée de la Somme au cours d'un cycle interglaciaire-glaciaire (Antoine *et al.* 2000, p. 191). **42**

Figure 23 : A - Évolution du taux de δ<sup>18</sup>O atmosphérique dans le carottage GRIP du Groënland avec les événements stadias (GS) et interstadias (GI) de Björck *et al.* 1998 (d'après Renssen *et al.* 2001, p. 157) ; B - Correspondance avec la chronostratigraphie continentale (d'après



- Vandenberghé et al. 2013, p. 97). **43**
- Figure 22 : Évolution de la limite entre les eaux tempérées et les eaux subpolaires ou polaires de la fin de la dernière glaciation au début de l'Holocène (Magny 1995, p. 134). **43**
- Figure 24 : Schéma de synthèse de l'évolution des grandes vallées du Bassin parisien au cours du Tardiglaciaire (Pastre *et al.* 2000, p. 110). **44**
- Figure 25 : Évolution des températures au centre du Groënland (carottage GISP2) durant les 50000 dernières années ; données NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/2475>, Alley 2000). **45**
- Figure 26 : Évolution des principaux paramètres influençant le climat au cours de l'Holocène (Wanner *et al.* 2011, p. 3117) ; a - variations de l'insolation sous contrôle orbital sur deux sites de chaque hémisphère (Berger 1978); b - activité volcanique au cours des 6000 dernières années d'après les concentrations en sulfates mesurées sur les carottes de glace du Groënland (en bleu) et de l'Antartique (en rouge : Wanner *et al.* 2008) ; c - fluctuations de l'activité solaire mises en évidence par les concentrations de <sup>10</sup>Be dans les glaces polaires (Steinhilber *et al.* 2009) d - augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> (IPCC 2007) ; barres verticales bleues : événements froids de l'Holocène (Wanner *et al.* 2011) ; fond et bas du graphique, partition du climat de l'Holocène. **45**
- Figure 27 : D'après Magny 2004, p. 75 ; indice de circulation polaire (PCI, positif : climat plus froid) ; variations du <sup>14</sup>C atmosphérique résiduel ; fluctuations des niveaux lacustres aux latitudes moyennes européennes ; indice de charriage des glaces dans l'Atlantique Nord. **46**
- Figure 28 : Schéma de synthèse des changements du régime hydrologique et du taux de sédimentation au cours des 15000 dernières années dans les vallées d'Europe Centrale (Starkel 1983, p. 225). **46**
- Figure 29 : Principales périodes d'activité alluviale importante des bassins de la Loire et du Rhône au cours de l'Holocène comparées à d'autres enregistrements paléoclimatiques (Lespez 2013, p. 60). **47**
- Figure 30 : Les cortèges polliniques du Tardiglaciaire et de l'Holocène (Bichet et Campy 2013, p. 143 ; d'après Richard et Begeot 1999). **47**
- Figure 31 : Localisation des zones étudiées. **48**
- Figure 32 : Localisation des secteurs étudiés au sein des hydro-écorégions de France métropolitaine (Wasson *et al.* 2002). **49**
- Figure 33 : Les principales régions climatiques de France (carte Météo France ; [http://pluiesextremes.meteo.fr/aper\\_r2.html](http://pluiesextremes.meteo.fr/aper_r2.html)). **49**

- Figure 34 : Évolution holocène des températures d'après les assemblages polliniques dans les régions européennes recoupées par les bassins versants étudiés (d'après Davis et al. 2003, pp. 1707-1708) . **50**
- Figure 36 : A - Dispositif d'acquisition des données LiDAR (fiche produit 3 DREAL Centre, 2006) ; B - Nuage de points brut obtenu (Nuninger *et al.* 2010, SIG & DAO programme LIEP-PEC ® MSHE C.N. Ledoux, C. Fruchart). **51**
- Figure 35 : Débits journaliers et caractéristiques des écoulements de la Loire à Digoin (57 ans de mesures) lors des prises de vue utilisées sur la fenêtre d'étude de la Loire amont. **51**
- Figure 37 : Visualisation des données LiDAR ; A - Altitudes seules ; B - Modelé du terrain mis en évidence par un modèle d'ombrage avec seize sources d'aclairement ; C - Combinaison des deux couches pour former une « Swiss view » représentant les altitudes avec le modelé. **52**
- Figure 38 : A - Sites de mesure des lignes d'eau ; B - Altitude du fleuve selon le régime aux sites choisis ; C - Altitude moyenne selon le régime aux sites choisis ; D - Boîtes à moustaches des valeurs de pentes entre deux sites de mesure choisis. **53**
- Figure 39 : Élaboration du modèle de pente à soustraire au MNT LiDAR ; A - Construction de la droite de régression à partir des points mesurés au sommet de la tranche d'eau ; B - Création de points le long de la droite, attribution des valeurs d'altitudes, copie parallèle des points pour encadrer l'emprise du MNT LiDAR et génération de courbes de niveau entre les points aux mêmes altitudes ; C - Génération du modèle de pente à partir des courbes de niveau créées en B. **54**
- Figure 40 : MNT LiDAR avant (à gauche) et après (à droite) soustraction des altitudes moyennes du sommet de la tranche d'eau. **55**
- Figure 41 : A - Exemple de raster de distance de coût sur la fenêtre d'étude du Doubs aval ; B - Distribution cumulée des valeurs de distance de coût ; C - Comparaison des cartes géologiques et de la limite dessinée à partir du raster en A (Fleury 1982 ; Fleury et Clozier 1985). **56**
- Figure 42 : Génération des polygones de Thiessen à partir des bordures du lit majeur et digitalisation de la ligne centrale. **57**
- Figure 43 : Génération de perpendiculaires à la ligne centrale du lit majeur à intervalles réguliers ; découpage des lignes obtenues par l'emprise du lit majeur pour obtenir des mesures régulières de la largeur de ce dernier ; tri manuel pour exclure les mesures aberrantes (ici, à gauche et à droite, des surlargeurs dues à des zones de confluence). **57**
- Figure 44 : Paramètres morphométriques mesurés à partir des tracés digitalisés. **58**
- Figure 45 : Les différents dispositifs de mesure de la résistivité électrique et les facteurs géométriques G correspondants (d'après Marescot 2006, p. 27). **58**

- Figure 46 : Qualités des différents paramètres de l'enregistrement de la résistivité électrique selon le dispositif choisi (d'après Samouëlian et al. 2005, p. 182) ; + : faible sensibilité ; ++++ : forte sensibilité. **58**
- Figure 47 : Correspondances lithologiques et granulométriques des valeurs de résistivité apparente. **59**
- Figure 48 : Acquisition des profils de tomographie électrique (clichés M. Foucher) ; A - Console et batterie auxiliaire pour l'injection du courant ; B - électrode ; C - câble reliant les électrodes et la console. **60**
- Figure 49 : Acquisition de la résistance en plan à l'aide d'un dispositif pôle-pôle (cliché R. Steinmann). **60**
- Figure 51 : Effets de quelques structures archéologiques sur le champ magnétique F à différentes latitudes (Breiner 1999, p. 48) ;  $k$  = susceptibilité magnétique par unité de volume. **61**
- Figure 50 : Magnétomètre à vapeur de césium G858 ; A1 - ampoule supérieure ; A2 - ampoule inférieure ; B - console d'enregistrement et interface de paramétrage ; C - batteries ; D - connectiques d'alimentation des ampoules et d'acheminement des données ; E - contrepoids. **61**
- Figure 52 : Les différents lithofaciès (à gauche) composant les éléments architecturaux des dépôts alluviaux (à droite) ; d'après Miall 2006, pp. 79, 93 et 171. **62**
- Figure 53 : Éléments architecturaux constitutifs des dépôts alluviaux selon le style du cours d'eau (à gauche) et échelles de temps des processus sédimentaires en milieu alluvial (à droite) ; d'après Miall 2006, pp. 82 et 199-200. **63**
- Figure 54 : Natures des échantillons ayant fait l'objet d'une datation radiocarbone dans le cadre de cette étude. **64**
- Figure 55 : Susceptibilité magnétique des matériaux en fonction de leur comportement magnétique (d'après Dearing 1999, p. 38). **64**
- Figure 56 : Topographie du bassin versant de la Loire. **65**
- Figure 57 : Profil longitudinal de la Loire avec les emplacements des principaux affluents et agglomérations. **65**
- Figure 58 : Géologie du bassin de la Loire. **66**
- Figure 59 : Principales lithologies le long du profil de la Loire (d'après Lino *et al.* 2000). **67**
- Figure 60 : Évolution des débits moyens bruts et spécifiques du bassin de la Loire d'après les données de la Banque Hydro. **67**

- Figure 62 : Répartition saisonnière des débits de la Loire sur l'ensemble du bassin versant (données Banque Hydro). **68**
- Figure 61 : Précipitations moyennes dans le bassin de la Loire (d'après Rodrigues 2004, p. 48). **68**
- Figure 63 : Les principales morphologies adoptées par la Loire (d'après Rodrigues 2004, p. 52). **69**
- Figure 64 : Fenêtre d'étude de la Loire amont. **69**
- Figure 65 : Géologie de la fenêtre d'étude de la Loire amont (d'après Donzeau *et al.* 2006a ; 2006b). **70**
- Figure 66 : Extrait de la carte géologique au 1/50000<sup>e</sup> à la sortie du défilé d'Iguerande (Bouiller *et al.* 1990a). **70**
- Figure 67 : Principales caractéristiques morphologiques de l'amont vers l'aval de la fenêtre d'étude de la Loire amont à partir des données de la BD ALTI IGN 25m ; A - Profil en long, pente et sinuosité du lit mineur ; B - Profil en long, pente et largeur du lit majeur ; C - Relief local et positions des points kilométriques relatifs aux mesures présentées. **71**
- Figure 68 : Caractéristiques hydrologiques de la Loire aux stations de mesure de Villerest et Digoin (données Banque Hydro). **72**
- Figure 69 : Débits bruts moyens de la Loire et de ses affluents au cours de l'année entre Villerest et Digoin (données Banque Hydro). **72**
- Figure 70 : Emprises des différentes fenêtres étudiées (rectangles oranges) sur les cartes représentant les limites territoriales à la fin de l'Âge du Fer (A, Barral *et al.* 2002, p. 276) et aux IIe-IIIe siècle ap. J.-C. (B, d'après Kasprzyk *et al.* 2012, p. 109, conception P. Nouvel et M. Kasprzyk). **73**
- Figure 71 : Maisons fortes, mottes castrales et chemins médiévaux entre Marcigny et Digoin (d'après Escoffier 2007, p. 74). **74**
- Figure 72 : Les limites territoriales entre Iguerande et Avrilly sur les cartes modernes et contemporaines. **75**
- Figure 73 : Environs du site d'Avrilly et position des vestiges au sein des communes de la fenêtre d'étude. **76**
- Figure 74 : Les vestiges découverts dans le lit mineur actuel de la Loire à Avrilly (clichés R. Steinmann) ; A - Cône d'érosion d'un pieu sujet à la dessiccation en période d'étiage ; B - Alignement de pieux venant renforcer une ancienne berge ?. **76**

Figure 75 : Plan et âges des vestiges du lit de la Loire à Avrilly (d'après Dumont *et al.* 2011c, pp. 331-332) ; LB = ligne de berge supposée ; intervalles des âges radiocarbone corrigés indiqués à 2 sigmas. **77**

Figure 76 : Les vestiges d'implantations médiévales connues et une potentielle nouvelle structure mise en évidence par l'ombrage pondéré selon seize directions d'un MNT LiDAR à l'Hôpital-le-Mercier ; position de la commune (en gris) et de l'emprise affichée (en rouge) au sein de la fenêtre d'étude. **78**

Figure 77 : Environs du site de Chassenard et position des vestiges au sein des communes de la fenêtre d'étude. **78**

Figure 78 : Plan et âges des vestiges du lit de la Loire à Chassenard (d'après Dumont *et al.* 2011b, pp. 339-340) ; intervalles des âges radiocarbone corrigés indiqués à 2 sigmas. **79**

Figure 79 : Fenêtre d'étude de la Loire moyenne. **80**

Figure 81 : Correspondances observables entre la vallée de la Loire moyenne à La Charité-sur-Loire (A) et le type fonctionnel 2c (B), observé entre le Bec d'Allier et Briare (Bazin et Gautier 1996, p. 380). **81**

Figure 80 : Contexte géologique de la fenêtre d'étude de la Loire moyenne Menot *et al.* 1997a ; 1997b) ; A - Schéma structural ; B - Coupe géologique de synthèse. **81**

Figure 82 : Principales caractéristiques morphologiques de l'amont vers l'aval de la fenêtre d'étude de la Loire moyenne à partir des données de la BD ALTI IGN 25m ; A - Relief local et positions des points kilométriques relatifs aux mesures présentées ; B - Profil en long, pente et largeur du lit majeur ; C - Profil en long et pente du lit mineur (indice de sinuosité du thalweg principal sur la fenêtre d'étude : 1,06). **82**

Figure 83 : Caractéristiques hydrologiques de la Loire aux stations de mesure de Cours-les-Barres et Gien (données Banque Hydro). **83**

Figure 85 : Les vestiges du pont de bois découverts dans le bras secondaire de la Loire à l'ouest de l'île du Faubourg (d'après Dumont *et al.* 2010). **85**

Figure 86 : Topographie du bassin versant de la Saône. **86**

Figure 87 : Profils longitudinaux de la Saône et du Doubs avec les emplacements des principaux affluents et agglomérations. **86**

Figure 88 : Géologie du bassin versant de la Saône. **87**

Figure 89 : A - Âges et structuration des principaux terrains géologiques de la Bresse (d'après Petit 1993, p. 16) ; B - Le remplissage Cénozoïque de la Bresse (Lefavrais-Raymond 1962 ;

- Sittler 1965 dans Petit 1993, p. 17) ; C - Les différentes étapes de remplissage de la Bresse depuis la fin du Pliocène (Bonvalot *et al.* 1984 dans Astrade 2005, p. 56). **88**
- Figure 90 : Répartition saisonnière des débits de la Saône (A) et du Doubs (B) sur l'ensemble du bassin versant (données Banque Hydro). **89**
- Figure 91 : Évolution des débits moyens bruts et spécifiques du bassin versant de la Saône et du Doubs d'après les données de la Banque Hydro. **89**
- Figure 92 : Les onze tronçons de la Saône différenciés par un jeu de variables liées à l'énergie du cours d'eau (Astrade 2005, p. 134). **90**
- Figure 93 : La sectorisation du Doubs (d'après Terrel *et al.* 2006, p. 38). **90**
- Figure 94 : Fenêtre d'étude de la Saône amont. **91**
- Figure 95 : Principales caractéristiques morphologiques de l'amont vers l'aval de la fenêtre d'étude de la Loire moyenne à partir des données de la BD ALTI IGN 25m ; A - Relief local et positions des points kilométriques relatifs aux mesures présentées ; B - Profil en long, pente et largeur du lit majeur ; C - Profil en long et pente du lit mineur (indice de sinuosité du thalweg principal sur la fenêtre d'étude : 1,51). **92**
- Figure 96 : Caractéristiques hydrologiques de la Saône et de l'Ognon avant et après leur confluence aux stations de mesure d'Auxonne, Ray-sur-Saône et Pesmes (données Banque Hydro). **93**
- Figure 97 : Environs de Pontailleur-sur-Saône et position de l'emprise au sein de la fenêtre d'étude de la Saône amont. **94**
- Figure 98 : Plan de répartition et datations des vestiges de franchissement découverts dans le lit de la Saône à Pontailleur-sur-Saône (d'après Dumont *et al.* 2011f). **95**
- Figure 99 : Fenêtre d'étude du Doubs aval. **96**
- Figure 100 : Principales caractéristiques morphologiques de l'amont vers l'aval de la fenêtre d'étude du Doubs aval à partir des données de la BD ALTI IGN 25m ; A - Profil en long, pente et sinuosité du lit mineur ; B - Profil en long, pente et largeur du lit majeur ; C - Relief local et positions des points kilométriques relatifs aux mesures présentées. **97**
- Figure 101 : Caractéristiques hydrologiques de la Saône et du Doubs avant et après leur confluence aux stations de mesure de Pagny-la-Ville, Neublans et Chalon-sur-Saône (données Banque Hydro). **98**
- Figure 102 : Environs du site de Pontoux et position des vestiges au sein des communes de la fenêtre d'étude. **99**

- Figure 103 : Emplacement supposé du franchissement de Pontoux sur la Table de Peutinger (exemplaire original de la bibliothèque nationale d'Autriche (<http://data.onb.ac.at/rec/AL00161171>)). **99**
- Figure 104 : Le pont romain de Pontoux (Dumont *et al.* 2008b, pp. 39 - 40) A - Plan de répartition et datations des vestiges de franchissement découverts dans le lit du Doubs ; B - Plan d'ensemble et restitution des piles disparues lors des dragages ; C - Mode de construction du pont de Stepperg sur le Danube, analogue à celui de Pontoux (Dumont *et al.* 2008b, p. 26). **100**
- Figure 105 : Âges des unités alluviales quaternaires de la fenêtre d'étude d'après les datations disponibles. **101**
- Figure 106 : Carte et coupe de synthèse des unités allostratigraphiques quaternaires de la Loire et de l'Arroux. **102**
- Figure 107 : Localisation des secteurs ayant fait l'objet d'études géoarchéologiques au sein de la fenêtre. **103**
- Figure 108 : Évolution en plan du lit actif de la Loire au cours des deux derniers siècles dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier ; le tracé sombre est toujours le plus ancien des deux. **104**
- Figure 109 : Le secteur étudié sur la Carte des Cassini levée et révisée ici entre 1758 et 1760. **105**
- Figure 110 : Les paléoméandres visibles en rive droite dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier. **105**
- Figure 111 : Bloc 3D et graphique réalisés à partir des altitudes LiDAR dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier. **106**
- Figure 112 : Âges des formations alluviales quaternaires à l'Hôpital-le-Mercier avec les points d'observation et de datation (Straffin 2000, Colls *et al.* 2001) ; données de forage de la Banque du Sous-Sol et localisation des coupes de synthèse du lit majeur. **107**
- Figure 113 : Détail des lithologies rencontrées sur les forages de la Banque du Sous-Sol (BSS su BRGM) à l'Hôpital-le-Mercier. **108**
- Figure 114 : Coupes sédimentologiques de synthèse de la vallée de la Loire à l'Hôpital-le-Mercier réalisées à partir des données disponibles (BSS, LiDAR, BD ALTI 25m, Straffin 2000 et Colls *et al.* 2001). **109**
- Figure 115 : Les dépôts de la fin de la dernière glaciation à l'Hôpital-le-Mercier (point d'observation 6/9/3a ou 6/22/96 dans Straffin 2000) ; accumulation de barres sableuses et graveleuses à litages en auges, mises en place par un système en tresse. Cliché R. Steinmann. **110**

- Figure 116 : MNT LiDAR avant et après redressement de la pente et soustraction de l'altitude moyenne du fleuve actuel (l'Hôpital-le-Mercier). **111**
- Figure 117 : Altitudes relatives de la vallée de la Loire à l'Hôpital-le-Mercier en douze classes distribuées selon l'intervalle géométrique réel (A) et arrondi (B). **112**
- Figure 118 : Chronologie relative et phasage des surfaces (B) réalisés à partir de la vectorisation des paléochenaux et des données LiDAR (A), ainsi que des données de datation des terrasses quaternaires (l'Hôpital-le-Mercier). **113**
- Figure 119 : Localisation et valeur des paramètres morphométriques servant à calculer l'indice de sinuosité minimal des paléochenaux visibles en surface du lit majeur à l'Hôpital-le-Mercier. **114**
- Figure 120 : Localisation des points d'observation et analyses réalisées sur la sédimentation (l'Hôpital-le-Mercier). **115**
- Figure 121 : Sédimentation observable près de la surface de la séquence 1 aux points T1, T2 et T5 LPE (l'Hôpital-le-Mercier). **115**
- Figure 122 : Profil de la résistivité électrique apparente réalisé au sommet de la séquence 1 à l'Hôpital-le-Mercier et son interprétation. **116**
- Figure 123 : Remplissage du paléoméandre de la séquence 2 au lieu-dit La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (points K1 à K21 LGU). **117**
- Figure 124 : Positions des carottages et des marques de crues sur le MNT LiDAR et extension maximale de l'inondation de 1846 (l'Hôpital-le-Mercier). **118**
- Figure 125 : Remplissage du paléoméandre de la séquence 2 au lieu-dit La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (points T3, K4 et T4 LGU). **119**
- Figure 126 : Proposition de coupe de synthèse du remplissage du paléoméandre de la séquence 2 au lieu-dit La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (datations extraites des points T3, K5, K4 et T4 LGU, altitudes tirées du MNT LiDAR entre les points T3 et T4 LGU). **120**
- Figure 127 : Sédimentation observée aux points T1 LGU ainsi que T1 et T2 LB à l'Hôpital-le-Mercier ; clichés de remise en contexte des forages T1 LB et LGU (Ronan Steinmann) et localisation des observations sur le MNT LiDAR. **121**
- Figure 128 : Remplissage du paléoméandre de la séquence 4 au lieu-dit La Grève dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier (point K1 LG). **122**
- Figure 129 : Ensemble des datations radiocarbone réalisées à l'Hôpital-le-Mercier ; groupes d'âges et enregistrements climatiques globaux. **123**



Figure 130 : Bilan des datations radiocarbone de l'Hôpital-le-Mercier réparties par carottages et par groupes. **124**

Figure 131 : Diagramme pollinique de synthèse du remplissage d'un paléoméandre appartenant à la séquence 2 au lieu-dit la Guinchère (point K21, commune de l'Hôpital-le-Mercier) ; d'après Doyen 2013. **125**

Figure 132 : Synthèse regroupant les données palynologiques, les âges radiocarbone, la susceptibilité magnétique et la corrélation des unités sédimentaires observées dans le remplissage du paléoméandre de La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (points K4 et K21 LGU) ; comparaison du phasage obtenu avec les enregistrements climatiques globaux. **126**

Figure 133 : Diagramme âge-profondeur du remplissage du paléoméandre de la séquence 2 à La Guinchère (L'Hôpital-le-Mercier) ; diagramme réalisé sous le logiciel R avec le code « CLAM » (Blaauw 2010) ; éléments de datation et unités sédimentaires des points K4 et K21 LGU ; phases chronologiques établies par l'étude des remplissages et datations de l'ensemble du secteur . **127**

Figure 134 : Synthèse des phases d'activité alluviale accrue observées et datées dans le remplissage du paléoméandre de La Guinchère (l'Hôpital-le-Mercier) au regard d'enregistrements paléoclimatiques globaux et de la dynamique alluviale de la Loire moyenne. **128**

Figure 135 : A - Carte des unités allostratigraphiques du Quaternaire (d'après Straffin 2000, Colls et al. 2001) comparées au phasage réalisé à partir du traitement des données LiDAR et de la chronologie relative des paléochenaux dans le secteur étudié B - Coupe et datations OSL de sédiments de la séquence 5 (d'après Straffin *et al.* 1999, p. 278 ; Straffin 2000, p. 95) ; l'Hôpital-le-Mercier. **129**

Figure 136 : Âges et extension des séquences mises en évidence dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier au regard de l'évolution des températures par rapport à l'actuel. **130**

Figure 137 : A - Plan des anciennes occupations de la butte de Cée (Chassenard) et de ses alentours (De la Faige et De la Boutresse 1896, p. 593) B - Géoréférencement du plan et position de la butte de Cée par rapport aux vestiges retrouvés dans le lit de la Loire. **131**

Figure 138 : Positions et lithologies des sondages de la Banque du Sous-Sol utilisables dans le secteur d'étude de Chassenard ; âges des différentes surfaces d'après les données disponibles. **132**

Figure 139 : Morphologie de la butte de Cée (Chassenard), de ses environs et du lit majeur en rive gauche de la Loire au niveau des vestiges découverts dans le chenal. **133**

Figure 140 : Traitements du MNT LiDAR aux alentours du hameau de Cée en rive gauche de la Loire à Chassenard ; A - Modelé du terrain mis en évidence par la fusion de seize cartes d'ombrage avec des directions de sources d'éclairage différentes B - Exposition de la surface

du MNT.	<b>134</b>
Figure 141 : MNT LiDAR du secteur de Chassenard avant et après redressement de la pente et soustraction de l'altitude moyenne du fleuve actuel.	<b>135</b>
Figure 142 : Altitudes relatives de la vallée de la Loire à Chassenard en douze classes distribuées selon l'intervalle géométrique arrondi.	<b>136</b>
Figure 143 : Chronologie relative et phasage des surfaces (B) dans le secteur de Chassenard, réalisés à partir de la vectorisation des paléochenaux et les données LiDAR (A), ainsi que des données de datation des terrasses quaternaires.	<b>137</b>
Figure 144 : A - Les argiles réduites compactes comblant sur deux mètres le paléoméandre attribué à la séquence 2 au pied de la butte de Cée à Chassenard (cliché R. Steinmann) ; B - position du prélèvement.	<b>138</b>
Figure 145 : Évolution en plan du lit actif de la Loire au cours des deux derniers siècles dans le secteur de Chassenard.	<b>139</b>
Figure 146 : Les vestiges de Chassenard replacés sur les prises de vue de 1946 et 1954 ; régime hydrologique correspondant à la station de Villerest ; l'étendue connue des structures archéologiques est encore enfouie dans la berge.	<b>140</b>
Figure 147 : Plus hautes eaux connues à Digoin depuis 1846 (Pardé 1928 et données de la Banque Hydro).	<b>140</b>
Figure 148 : Extraits du plan cadastral napoléonien du bord de la Loire à Chassenard avant (A, 1837) et après (B, 1847) la crue de 1846 ; ADA 3P 3055.	<b>141</b>
Figure 149 : Le méandre de Bécheron (Varenne-Saint-Germain) sur la Carte d'état-major révisée (A et B, ADSL GF 1 Fi 26/3) et la feuille Charolles de la Carte de France (C, ADSL 1 Fi 13/14).	<b>141</b>
Figure 150 : Localisation des arbres carottés et détail des calculs menés pour dater l'abandon du méandre de Bécheron (Varenne-Saint-Germain).	<b>142</b>
Figure 151 : Les sédiments observables sur la rive concave de la Loire au niveau des vestiges archéologiques de Chassenard.	<b>143</b>
Figure 152 : Photographies des unités sédimentaires observées sur la rive gauche de la Loire au niveau des vestiges du pont romain et de la pêcherie médiévale de Chassenard (clichés R. Steinmann).	<b>144</b>
Figure 153 : Les carrés de prospection investigués au magnétomètre à Chassenard et la position vestiges archéologiques retrouvés dans le lit actuel de la Loire.	<b>145</b>

- Figure 154 : Carte des variations du pseudo-gradient magnétique acquise à Chassenard. **146**
- Figure 155 : Anomalies ponctuelles (A) et traces de labours (B) détectées au magnétomètre à Chassenard. **147**
- Figure 156 : A - Proposition d'interprétation des anomalies magnétiques surfaciques détectées à Chassenard ; B - Les paléochenaux mis en évidence par le MNT LiDAR superposés à la carte du pseudo-gradient magnétique. **148**
- Figure 157 : A - Position des tranchées de sondage et des profils de tomographie électriques par rapport aux vestiges immergés de Chassenard sur la carte du pseudo-gradient magnétique ; B - Plan de détail des tranchées et modelé du terrain environnant. **149**
- Figure 158 : Stratigraphie observée sur la coupe est dans la tranchée de sondage 1 (Chassenard). **150**
- Figure 160 : Les graviers marquant la présence d'éventuelles traces de mise en culture (coupe ouest de la tranchée 1, Chassenard). **151**
- Figure 159 : Photographies de certaines unités observées dans la tranchée 1 à Chassenard (clichés R. Steinmann) ; A - pendage des lits graveleux de l'US 2 tronquée par un paléochenal avant la mise en place de l'US 3 ; B - les recharges de cailloutis de voirie dans l'angle nord-est de la tranchée 1. **151**
- Figure 161 : Mise en contexte des éventuelles traces d'agriculture observées en bordure des recharges de voirie médiévales et affectant la fin du comblement du paléochenal observé au sud de la tranchée 1 (Chassenard ; cliché R. Steinmann). **152**
- Figure 162 : Stratigraphie observée sur la coupe est dans la tranchée de sondage 2 (Chassenard). **153**
- Figure 163 : Profils de résistivité électrique acquis en rive gauche de la Loire, à proximité des tranchées de sondage de Chassenard. **154**
- Figure 164 : Positions des vestiges antiques découverts dans le lit de la Loire à Avrilly, du lit mineur du fleuve au XIX<sup>e</sup> siècle et des prospections géophysiques réalisées en rive droite . **155**
- Figure 165 : Les vestiges archéologiques d'Avrilly et les surfaces prospectées sur la Carte de la Loire levée entre 1848 et 1854 (DREAL Centre). **155**
- Figure 166 : Carte des variations du pseudo-gradient magnétique acquise à Avrilly. **156**
- Figure 167 : Anomalies ponctuelles et traces de parcellaires sur le magnétogramme (A) et la photographie aérienne de 1967 (B) ; commune d'Avrilly. **157**

Figure 168 : Anomalies surfaciques et traces de parcellaires sur le magnétogramme (A) et le MNT LiDAR corrigé (B). **158**

Figure 169 : Correspondance éventuelle de l'anomalie du pseudo-gradient magnétiques n°6 avec une limite parcellaire du cadastre napoléonien de Vindecy levé en 1828 (ADSL 3P 5541). **159**

Figure 170 : Sédimentation observable sur la rive droite de la Loire immédiatement en amont des vestiges immergés d'Avrilly. **160**

Figure 171 : Localisation (A), lithologie (B) et corrélation (C) des dépôts alluviaux en rive droite de la Loire (Vindecy) d'après les données de forage de la BSS. **161**

Figure 172 : Évolution en plan du lit actif de la Loire au cours des deux derniers siècles dans le secteur d'Avrilly-Baugy. **162**

Figure 173 : A - Un des pieux extraits à Avrilly sur la première ligne ayant pu former une protection de berge à la fin de l'âge du Fer (B, d'après Dumont *et al.* 2008a, p. 25) ; l'analyse dendrochronologique indique que ce pieu (n°5) a été abattu en 54 av. J.-C. (Lavier 2008, p. 46). **163**

Figure 174 : MNT LiDAR du secteur d'Avrilly-Baugy avant et après redressement de la pente et soustraction de l'altitude moyenne du fleuve actuel. **164**

Figure 175 : Altitudes relatives de la vallée de la Loire dans le secteur Avrilly-Baugy en douze classes distribuées selon l'intervalle géométrique arrondi. **165**

Figure 176 : Chronologie relative et phasage des surfaces (B) réalisés à partir de la vectorisation des paléochenaux et des données LiDAR (A), ainsi que des données de datation des terrasses quaternaires (secteur Avrilly-Baugy). **166**

Figure 177 : Le remplissage d'un paléochenal de la séquence 3 au lieu-dit « La Pierre » (Baugy). **167**

Figure 178 : A - Âges des formations alluviales quaternaires du secteur avec les sites d'observation et de datation (Straffin 2000, Colls *et al.* 2001) ; B - remise en contexte d'une datation effectuée sur un tronc pris dans une barre de graviers et galets (Straffin et Blum 2002a, p. 424). **168**

Figure 179 : A - Âges des formations alluviales quaternaires du secteur de Digoin avec les points d'observation et de datations (Straffin 2000, Colls *et al.* 2001) ; B - Natures lithologiques des dépôts fini-weichséliens de l'Arroux et de la Loire (Straffin 2000, pp. 213 et 214). **169**

Figure 180 : La sédimentation observée au sommet de la terrasse T5 après la mise en place des barres de galets et l'abandon du système en tresse. **169**

Figure 181 : A - Localisation du réseau de structures excavées dans la terrasse weichsélienne à Digoïn ; B - Coupe de synthèse et altitudes atteintes par les implantations (d'après Shenk dans Maza et al. 2011, p. 237) ; C - Différences d'altitudes entre le fleuve et le fond de la structure F48, la plus profonde (Données Dreal Centre). **170**

Figure 182 : Positions des forages portant des informations d'altitude de l'aquifère dans les données de la Banque du Sous-Sol au plus près du site archéologique fouillé à Digoïn en 2010 par la société Archéodunum. **171**

Figure 183 : Tableau de synthèse des différences d'altitudes entre le fond de la structure maçonnée F 48 (Fig 181) et de l'aquifère atteint lors des forages de la Banque du Sous-Sol. **171**

Figure 184 : Évolution des principaux paramètres morphométriques sur la fenêtre de la Loire amont au cours des deux derniers siècles ; calculs effectués à partir de la digitalisation du chenal sur les documents disponibles. **172**

Figure 185 : Îles végétalisées et barres sableuses en période de basses eaux à La Charité-sur-Loire (clichés du lit mineur pris le 4 août 2007) ; mesures hydrologiques correspondantes à la station de Cours-les-Barres.. **173**

Figure 186 : Projet d'aménagement de la rive gauche de la Loire (commune de La Chapelle-Montlinard) en aval de l'île du Faubourg dans la continuité de la Levée d'Espagne, signé les 1<sup>er</sup> et 15 mai 1784 (ADC C118). **174**

Figure 187 : Formes fluviales figurées au niveau de la ville de La Charité-sur-Loire sur les documents anciens consultés. **175**

Figure 188 : Migration du centre du thalweg de la Loire entre 1850 et 2002 de La Charité-sur-Loire à l'aval de Pouilly-sur-Loire (d'après Grivel 2008, p. 243). **176**

Figure 189 : Coupes topographiques transversales de la vallée de la Loire de l'amont vers l'aval de la ville de La Charité-sur-Loire. **177**

Figure 190 : Emplacements et âges des vestiges archéologiques retrouvés dans le lit actuel de la Loire à la Charité-sur-Loire (d'après Dumont *et al.* 2010 ; 2011e ; 2013) ; intervalles de datation maximums (95,4 %) après correction des âges radiocarbone avec la courbe IntCal13 (Reimer et al. 2013). **178**

Figure 191 : Synthèse de l'ensemble des datations radiocarbone obtenues sur les vestiges de La Charité-sur-Loire - A : Graphique de densité des probabilités de datation des différents échantillons - B : Forme de la courbe de correction des âges radiocarbone - C : Graphique de densité des probabilités cumulées - D : Histogramme de fréquence des intervalles de confiance à 99,7 % croisant une année calendaire. **179**

Figure 192 : Altitudes du fond du chenal principal de la Loire à La Charité-sur-Loire (Nabet

- 2013, p. 245). **180**
- Figure 193 : Évolution du profil en long du fond du lit entre 2005 et 2011 (d'après Nabet 2013, p. 254) à La Charité-sur-Loire. **180**
- Figure 194 : Plan de 1785 (« Plan de continuation de la levée d'Espagne ») montrant pour la première fois l'extension actuelle de la chevette de la rive gauche à l'extrémité amont de l'île du Faubourg à La Charité-sur-Loire (ADC C 118, dans Dumont *et al.* 2010, p. 81) ; évolution postérieure de la sédimentation en aval de cet aménagement. **181**
- Figure 195 : Exemple de pont biais (à gauche) et d'un pont « classique » (à droite), les deux à travée simple. Atlas de Trudaine pour la Généralité de Soissons, Tome I, 1769, feuille 34, AN CP/F/14/8503. **182**
- Figure 196 : Emplacement des vestiges du pont médiéval ainsi que du lieu-dit du Pont de la Batte à La Chapelle-Montlinard sur la carte IGN actuelle et sur une carte non datée, où il correspond à un ponceau au-dessus du Ruisseau d'Argenvières ou de Châteauvert (178?, ADC C118, dans Dumont *et al.* 2010, p. 82). **182**
- Figure 197 : Axe du franchissement et direction générale de l'écoulement associé au milieu du XIII<sup>e</sup> siècle entre La Charité-sur-Loire et La Chapelle-Montlinard. **183**
- Figure 198 : Ensemble des vestiges médiévaux et hypothèse de la forme en plan du chenal au milieu du XIII<sup>e</sup> siècle entre La Charité-sur-Loire et La Chapelle-Montlinard. **183**
- Figure 199 : Localisation des observations sédimentologiques sur la fenêtre de la Loire moyenne. **184**
- Figure 200 : Évolution de la forme en plan du chenal et des différentes composantes géomorphologiques du lit moyen depuis 1850 au niveau et en aval de La Charité-sur-Loire (Nabet 2013, p. 195) ; les bancs de sable ne sont pas figurés. **185**
- Figure 201 : Successions sédimentologiques observées sur l'île du Pont de la Batte aux points T2 et T3 PDLB (La Chapelle-Montlinard). **186**
- Figure 202 : Coupes AB et CD sur la bordure orientale de l'île du Pont de la Batte dans l'axe du pont médiéval (commune de La Chapelle-Montlinard). **187**
- Figure 203 : Processus de formation des antidunes et morphologie des structures sédimentaires ainsi créées (Allen 1982a, p. 414). **188**
- Figure 204 : Morphologie de l'île du Pont de la Batte (La Chapelle-Montlinard) en 1957 au niveau du prélèvement daté à 285 cm de profondeur au point T3 PDLB. **188**
- Figure 205 : Vues de la ville de La Charité-sur-Loire, de l'île du Faubourg et du fleuve au XVII<sup>e</sup>

siècle depuis la rive gauche - A : Zeiller 1655-1661, Pars IV, pp. 11-12 - B : Gravure de C. Chastillon (1559-1616) publiée dans *La topographie française* (Dumont *et al.* 2009, p. 113). **189**

Figure 206 : Coupe EF sur la bordure occidentale de l'île du Faubourg dans l'axe du pont médiéval (commune de La Charité-sur-Loire). **190**

Figure 207 : Successions sédimentologiques observées sur l'île du Faubourg aux points T1 et T7 LCHIF (commune de La Charité-sur-Loire). **191**

Figure 208 : Succession sédimentologique observée au point K1 LCHIF entre les pieux de fondation d'un moulin sur piles (La Charité-sur-Loire). **192**

Figure 209 : Coupe de synthèse basée sur la corrélation de l'ensemble des points observés dans l'axe des vestiges du pont médiéval (La Chapelle-Montlinard et La Charité-sur-loire). **193**

Figure 210 : Chronologie relative des différentes générations de chenaux en surface du lit majeur à La Chapelle-Montlinard. **194**

Figure 211 : Évolution des débits depuis 1850 à la station de Givry Fourchambault, d'après Grivel 2008, p. 428 (E. Gautier à partir de données SHC DIREN Centre et Réseau Cristal) - A : Maxima journaliers > 1000 m<sup>3</sup>/s (débit à plein bord) - B : Répartition des débits par saison. **195**

Figure 212 : Synthèse des paramètres morphométriques de la fenêtre de la Saône amont mesurés grâce aux documents anciens - A : Position du centre du chenal principal au cours du temps - B : Évolution temporelle des principaux paramètres morphométriques - C : Évolution de l'indice de sinuosité de l'amont vers l'aval au cours du temps - D : Largeur du chenal sur la fenêtre étudiée. **196**

Figure 213 : La Vieille Saône en amont de Pontailler-sur-Saône sur les plans anciens consultés. **197**

Figure 214 : Les différents chenaux présents au niveau de la ville de Pontailler-sur-Saône sur les cartes anciennes (ovales rouges), dont un comblé en 1858, entre la Vieille Saône et la Saône (Dumont *et al.* 2011, p. 24). **198**

Figure 215 : Contexte géologique de la fenêtre d'étude de Pontailler-sur-Saône (à partir des données de la Banque du Sous-Sol ainsi que des cartes géologiques de Rat *et al.* 1982 et Chauve *et al.* 1983). **199**

Figure 216 : Localisation des carottages réalisés à Pontailler-sur-Saône et logs des points TX2, TX3 et K1 PONT N. **200**

Figure 217 : Logs des points TZ2, TZ1 et TW1 observés à Pontailler-sur-Saône. **201**

Figure 218 : Logs des points TX1, TY2 et TY1 observés à Pontailleur-sur-Saône.	<b>202</b>
Figure 219 : Ensemble des datations radiocarbone effectuées sur la fenêtre d'étude de la Saône amont.	<b>203</b>
Figure 220 : Les différents clichés aériens examinés pour expliquer l'épaisseur des dépôts très récents datés par radiocarbone sur la fenêtre d'étude de la Saône amont.	<b>204</b>
Figure 221 : Synthèse des observations menées sur la rive convexe du méandre de la Vieille Saône immédiatement en amont de l'agglomération de Pontailleur-sur-Saône.	<b>205</b>
Figure 222 : Âges des derniers abandons des chenaux visibles en surface de la plaine alluviale de la Saône en amont de la ville de Pontailleur-sur-Saône.	<b>206</b>
Figure 223 : Relief de la bordure orientale du Fossé bressan et clichés infrarouges de la basse vallée du Doubs (campagnes IGN de 1998 et 2000) ; A et B - absence de traces de migration latérale en surface du lit majeur à l'exception d'un paléoécandre (A) ; C à H - nombreuses traces de chenaux en surface de la plaine alluviale du Doubs après son entrée dans le Fossé bressan en aval de Dole (H). Importante migration latérale sur le temps long s'achevant immédiatement en aval des deux méandres de Longepierre (C) ; I - Absence d'indices de migration en amont de Dole.	<b>207</b>
Figure 224 : Position de l'axe Sennecey-La Serre au sein du Fossé bressan et croisement de cet axe avec le tracé du Doubs au niveau des méandres de Longepierre (d'après Clair 1976, p. 180).	<b>208</b>
Figure 225 : Synthèse des paramètres morphométriques mesurés grâce aux documents anciens sur la fenêtre d'étude du Doubs aval ; A - Évolution de l'indice de sinuosité de l'amont vers l'aval au cours du temps ; B - Largeur du chenal sur la fenêtre étudiée ; C - Position du centre du chenal principal au cours du temps ; D - Évolution temporelle des principaux paramètres morphométriques.	<b>209</b>
Figure 226 : Contexte géologique, localisation et types des points d'observation sur la fenêtre de la basse vallée du Doubs.	<b>210</b>
Figure 227 : Coupe de berge réalisée au Terreau (Pontoux).	<b>211</b>
Figure 228 : Coupe de berge réalisée en rive gauche à Sermesse.	<b>212</b>
Figure 229 : Les différentes unités sédimentaires observables sur les berges du Doubs actuel entre Pontoux et Saunières ; datations radiocarbone associées.	<b>213</b>
Figure 230 : Illustration de synthèse des unités observables sur les rives du Doubs de Pontoux à Saunières.	<b>214</b>



Figure 231 : Figures d'échappement d'eau liées à la destruction du pont de Saunières ?.	<b>214</b>
Figure 233 : Paléochenal de La Morte (Sermesse) sur la Carte des Cassini.	<b>215</b>
Figure 232 : - A et B : Altitudes du sommet de la tranche d'eau en 1930 ( <a href="http://geodesie.ign.fr/">http://geodesie.ign.fr/</a> ) et en 2001 (profils transversaux obtenus sur le site internet de l'Observatoire des Inondations du Doubs, aujourd'hui inactif). Aucune des périodes de relevé ne correspond à des crues connues..	<b>215</b>
- C : Évolution des débits moyens annuels du Doubs à Neublans avec sa courbe de tendance linéaire montrant une quasi-absence de progression globale des débits..	<b>215</b>
Figure 234 : Carottage réalisé à la Morte (Sermesse). Distribution des probabilités de datation radiocarbone sur l'échantillon K1 LM 213 selon la courbe de correction utilisée..	<b>216</b>
Figure 235 : Morphologie actuelle de La Barre à Saunières et emplacements des carottages ; A - Altitudes mesurées au GPS différentiel et noms des différents carottages avec les âges radiocarbone du début de la décantation argileuse (95,4 %) ; B - Les différentes entités géomorphologiques observées sur le terrain et grâce aux données d'altitude ; C - Morphologie générale des barres vue de la terrasse (cliché R. Steinmann) ; D - Emplacements des différents creux propices à la décantation mis en évidence en B sur le cliché général.	<b>217</b>
Figure 236 : Carottage K1 LBA réalisé à La Barre (Saunières).	<b>218</b>
Figure 237 : Carottage K10 LBA réalisé à La Barre (Saunières).	<b>219</b>
Figure 238 : Carottage K11 LBA réalisé à La Barre (Saunières).	<b>220</b>
Figure 240 : Répartition des probabilités de datation des âges radiocarbone prélevés à la base des argiles décantées à l'abri du chenal actif du Doubs au regard des phases de haut niveau des lacs de moyenne latitude ouest-européens (dans Magny 2004, p. 73).	<b>221</b>
Figure 239 : Morphologie de La Barre à Saunières en période de hautes eaux, bien qu'avec des débits inférieurs à ceux des crues biennales à la station de Neublans (données Banque Hydro).	<b>221</b>
Figure 241 : Localisation et types des investigations menées au niveau du pont romain de Pontoux.	<b>222</b>
Figure 242 : Mise en évidence du paléochenal en bordure du lit majeur à Pontoux en période de hautes eaux, bien qu'avec des débits inférieurs à ceux des crues biennales à la station de Neublans (données Banque Hydro).	<b>222</b>
Figure 243 : Position du pont romain de Pontoux sur les plans contemporains et persistance de la connexion du chenal latéral en bordure du lit majeur avec le lit actif.	<b>223</b>

- Figure 244 : Anomalies du pseudo-gradient magnétique en rive droite et au droit du pont romain sur la commune de Charnay-lès-Chalon. **224**
- Figure 246 : Cartographie de la résistivité apparente en rive gauche du Doubs au droit de l'axe du pont romain de Pontoux. **225**
- Figure 245 : Positions de la nécropole mérovingienne de Charnay-lès-Chalon et de vestiges de voirie en surface des champs au regard de la zone prospectée en rive droite près du pont romain de Pontoux. **225**
- Figure 247 : Anomalies de la carte de la résistivité comparées au cadastre actuel (Commune de Pontoux, Feuille 000 A 02, [www.cadastre.gouv.fr](http://www.cadastre.gouv.fr)). **226**
- Figure 248 : Profils de résistivité électrique acquis en rive gauche du Doubs au droit du pont romain de Pontoux. **227**
- Figure 249 : Natures des successions sédimentologiques constituant la barre en rive gauche du pont romain de Pontoux d'après les trois forages réalisés ; aspect des sables homogénéisés observés dans les forages et localisation de ces derniers. **228**
- Figure 250 : Coupe EF réalisée en bordure du lit majeur du Doubs à Pontoux. **229**
- Figure 251 : Vue en plan du sondage comprenant la coupe EF (Pontoux). **230**
- Figure 252 : Localisation des tests superficiels à la tarière réalisés à Pontoux. **231**
- Figure 253 : Exemples des nombreux éléments anthropiques visibles sur le premier mètre des tarières T6 à T17 (Pontoux). **231**
- Figure 254 : Coupes de synthèse de l'évolution holocène de la rive gauche du Doubs sur la base de l'ensemble des informations obtenues (Pontoux). **232**
- Figure 255 : Synthèse de l'ensemble des datations radiocarbone, remaniées comprises ; A - Graphique de densité des probabilités cumulées ; B - Forme de la courbe de correction des âges radiocarbone ; C - Histogramme de fréquence des intervalles de confiance à 99,7 % croisant une année calendaire (ensemble des échantillons datés). **233**
- Figure 256 : Synthèse de l'ensemble des datations radiocarbone à l'exception des échantillons remaniés ; A - Graphique de densité des probabilités cumulées ; B - Soustraction des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; C - Division des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; D - Histogramme de fréquence des intervalles de confiance à 99,7 % croisant une année calendaire. **234**
- Figure 257 : Synthèse des datations radiocarbone obtenues sur la fenêtre d'étude de la Loire

amont à l'exception des échantillons remaniés ; A - Graphique de densité des probabilités cumulées ; B - Soustraction des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; C - Division des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; D - Histogramme de fréquence des intervalles de confiance à 99,7 % croisant une année calendaire. **235**

Figure 258 : Synthèse des datations radiocarbone obtenues à La Charité-sur-Loire, à l'exception des échantillons remaniés ; A - Graphique de densité des probabilités cumulées ; B - Soustraction des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; C - Division des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; D - Histogramme de fréquence des intervalles de confiance à 99,7 % croisant une année calendaire. **236**

Figure 259 : Synthèse des datations radiocarbone obtenues sur la fenêtre d'étude de la Saône amont, à l'exception des échantillons remaniés ; A - Graphique de densité des probabilités cumulées ; B - Soustraction des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; C - Division des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; D - Histogramme de fréquence des intervalles de confiance à 99,7 % croisant une année calendaire. **237**

Figure 260 : Synthèse des datations radiocarbone obtenues dans la basse vallée du Doubs à l'exception des échantillons remaniés ; A - Graphique de densité des probabilités cumulées ; B - Soustraction des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; C - Division des probabilités cumulées des échantillons acquis par les probabilités de la courbe « simulée » ; D - Histogramme de fréquence des intervalles de confiance à 99,7 % croisant une année calendaire. **238**

Figure 261 : Synthèse de l'évolution de la dynamique alluviale sur les quatre fenêtres d'étude. **239**

Figure 263 : Différence entre les chenaux méandriformes et en tresse en fonction de la pente et du débit à plein bord ; chenaux rectilignes et anastomosés également indiqués (Knighton 1998, p. 209). **240**

Figure 262 : Altitudes du sommet des terrasses alluviales quaternaires de l'amont vers l'aval (Straffin 2000, p. 53) ; fenêtre d'étude de la Loire amont. **240**

Figure 264 : Contexte géomorphologique, localisation et datations radiocarbone obtenues sur deux chenaux abandonnés par la Saône en aval de Seurre. **241**

Figure 265 : Principales phases d'augmentation de la dynamique alluviale sur les fenêtres considérées au regard des résultats obtenus sur les bassins versants de la Loire ou du Rhône et d'enregistrements de la variabilité climatique holocène. **242**

Figure 266 : Principaux âges *ante quem* et *post quem* des abandons de chenaux étudiés par

fenêtre d'étude comparés aux phases de hauts niveaux des lacs d'Europe occidentale et centrale des latitudes moyennes. **243**

Figure 267 : Évolution de la forme en plan du lit actif de la Loire amont au cours des deux derniers siècles à partir des documents cartographiques anciens et des photographies aériennes ; méandre de « Grand Pré », Luneau-Vindecy. **244**

Figure 269 : Évolution de l'aspect de surface de la plaine alluviale sur la berge convexe du méandre de « Grand Pré », fenêtre de la Loire amont. **245**

Figure 268 : Données hydrologiques des crues de 2003 et 2008 sur la Loire amont (ISL 2009). **245**

Figure 270 : Effets de la crue de 2008 sur la forme du lobe de crevasse au niveau de la rive convexe du méandre de « Grand Pré » (Loire amont) ; clichés R. Steinmann. **246**

Figure 271 : Données de crues historiques ; A - Histogrammes de fréquence des inondations mentionnées dans les sources historiques par période de cinquante ans sur les cours d'eau étudiés (données en Annexe 3 d'après Champion 1858-1864 ; Astrade 2005 ; Sauty 2007 ; Castanet 2008) ; B - Groupement des événements mentionnés dans Champion 1858-1864 par *clusters* (périodes de hautes fréquences, en rose ; Ollive 2007, p. 118). **247**

Figure 272 : Probabilités cumulées des terminus *ante quem* et *post quem* des âges d'abandon des chenaux étudiés par fenêtre d'étude comparés aux phases de hauts niveaux lacustres (Magny 2004), ainsi qu'aux principales périodes d'inondations européennes au cours de l'Holocène (Macklin *et al.* 2006). **248**

Figure 273 : Classes d'élévation de la surface du sol par rapport à l'altitude moyenne du sommet de la tranche d'eau sur la fenêtre d'étude de la Loire amont. **249**

Figure 274 : Préservation différentielle des chenaux à l'Hôpital-le-Mercier (A) - B : caractéristiques typiques d'une vallée sous contrôle d'un basculement latéral (Holbrook et Schumm 1999, p. 300). **250**

Figure 275 : Effets des déformations du profil en long d'un cours d'eau sur la forme en plan (A ; d'après Schumm 2005, p. 109) - B : Exemple du profil de la basse vallée du Doubs. **250**

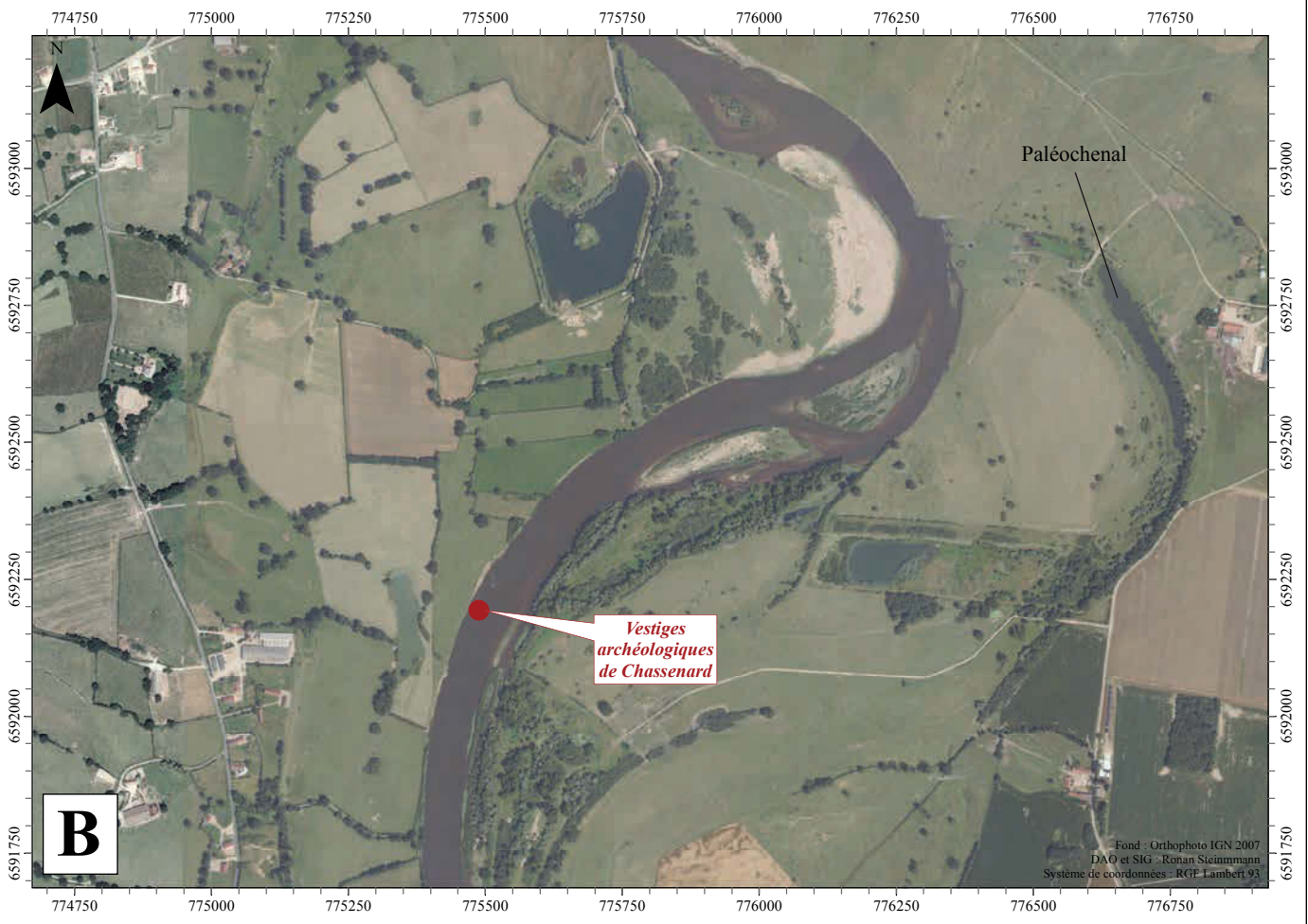
Figure 276 : Synthèse des phases d'activité importante de la dynamique alluviale de la Loire au regard des données palynologiques obtenues sur les tourbières du Massif central oriental (d'après Cubizolle *et al.* 2012). **251**

Figure 277 : Synthèse des phases d'activité importante de la dynamique alluviale de la Saône et du Doubs au regard des données palynologiques obtenues sur les tourbières du Massif jurassien (d'après Gauthier et Richard 2008). **252**

- Figure 278 : Principales étapes de l'aménagement de la Saône de 1700 à nos jours (Astrade 2005, pp. 66-67). **253**
- Figure 279 : Comparaison de l'emprise des lits actifs à deux siècles d'intervalle sur la fenêtre d'étude de la Loire amont. **254**
- Figure 280 : Comparaison de l'emprise des lits actifs à deux siècles d'intervalle sur la fenêtre d'étude de la Loire moyenne. **255**
- Figure 281 : Comparaison de l'emprise des lits actifs à deux siècles d'intervalle sur la fenêtre d'étude de la Saône amont. **256**
- Figure 282 : Comparaison de l'emprise des lits actifs à deux siècles d'intervalle sur la fenêtre d'étude du Doubs aval. **257**
- Figure 283 : Fond du chenal de la Loire et aménagements proches de la berge du fleuve il y a deux siècles (Avrilly, Loire amont). **258**
- Figure 284 : Les effets de la crue de 2008 sur la berge concave de Chassenard au niveau des vestiges du pont romain. **259**
- Figure 285 : Surfaces érodées en deux siècles sur la fenêtre de la Loire amont ; A - exemples de surfaces digitalisées et extraits de la légende de la Carte de Coumes ; B - Types de surfaces sur l'ensemble du tronçon étudié ; C - Valeurs et grandeurs traduisant l'érosion du paysage du milieu du XIXe siècle. **260**
- Figure 286 : Diagramme chronostratigraphique et potentiel archéologique d'une section de la vallée de la Loire sur la fenêtre d'étude amont. **261**
- Figure 287 : Distribution du potentiel archéologique par type de site sur une section de vallée de la fenêtre d'étude de la Loire amont. **262**



Figure 1 : A - Le pont romain de Chassenard (Allier) et ses environs (B) ; cliché A. Dumont et P. Moyat (Dumont et al. 2006, p. 32)



**FLUVIAL SYSTEM VARIABLES (FROM SCHUMM AD LICHTY, 1965)**

**Drainage system variables**

1. Time
2. Initial relief
3. Geology (lithology, structure)
4. Climate
5. Vegetation (type and density)
6. Relief or volume of system above baselevel
7. Hydrology (runoff and sediment yields per unit area within Zone 1)
8. Drainage network morphology
9. Hillslope morphology
10. Hydrology (discharge of water and sediment to Zones 2 and 3)
11. Depositional system morphology and sediment characteristics (Zone 2)
12. Depositional system morphology and sediment characteristics (Zone 3)

Figure 2 : Variables de contrôle de la dynamique alluviale (d'après Schumm 1977, p. 19)

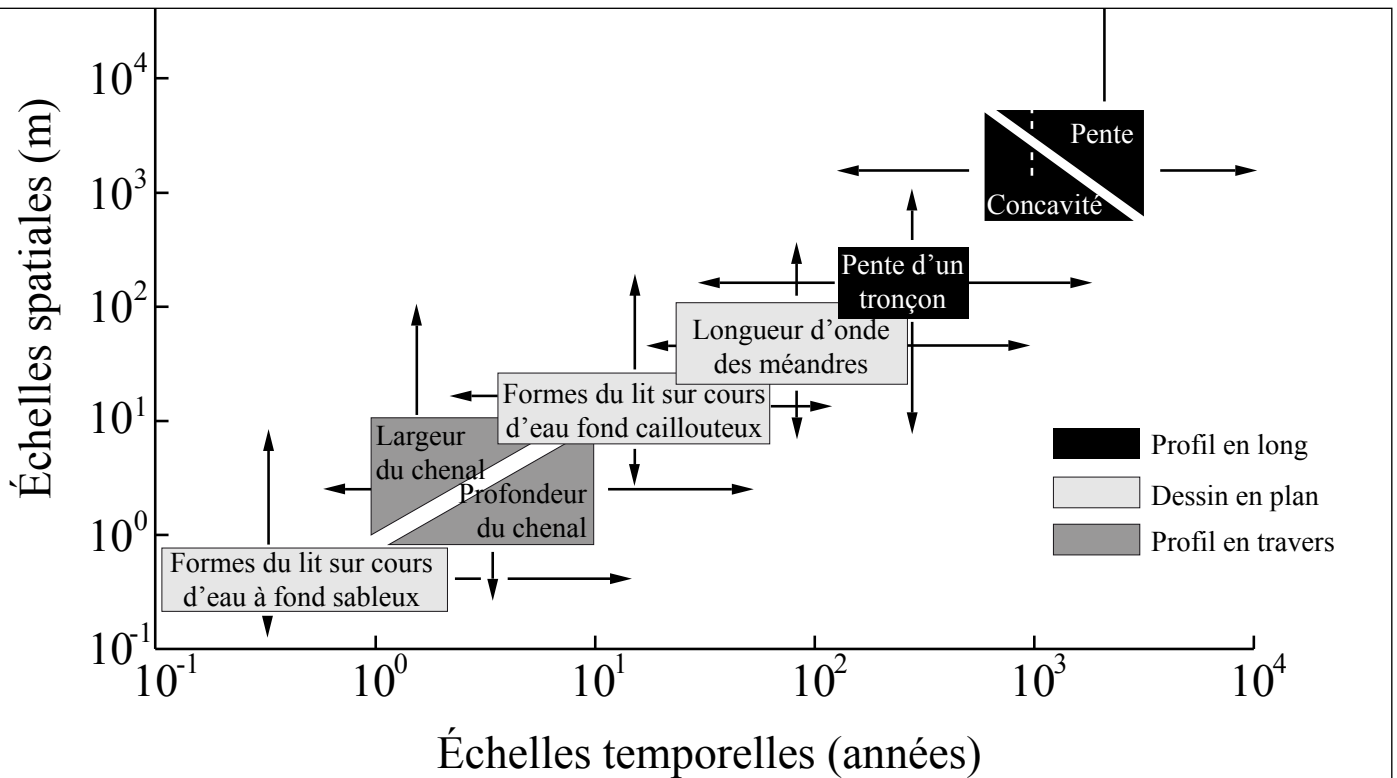


Figure 3 : « Échelles temporelles de l'ajustement des différentes composantes géomorphologiques du chenal. Les longueurs présentées en ordonnées sont indicatives et s'appliquent plutôt aux cours d'eau de la zone tempérée » (d'après Knighton, 1984, dans Malavoi et Bravard 2010, p. 12)

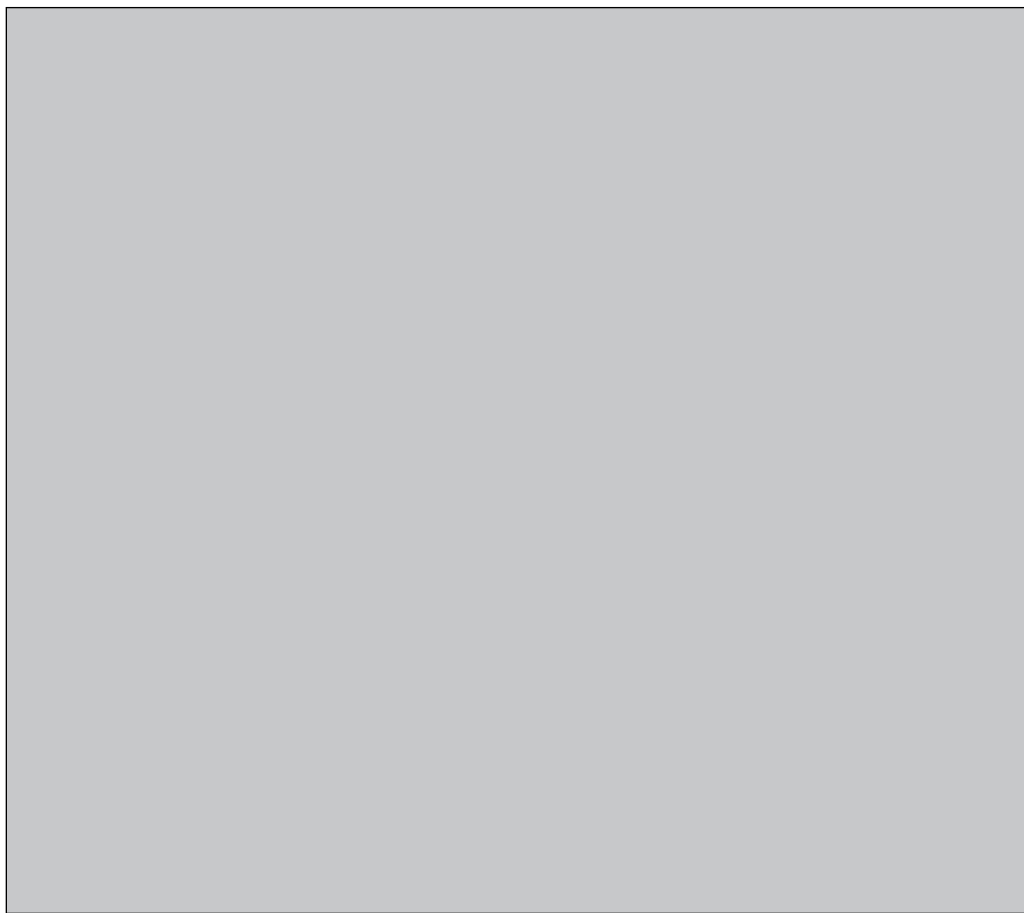


Figure 5 : Classification des systèmes alluviaux à partir des tracés en plan (Campy et Macaire 2003, p. 245)

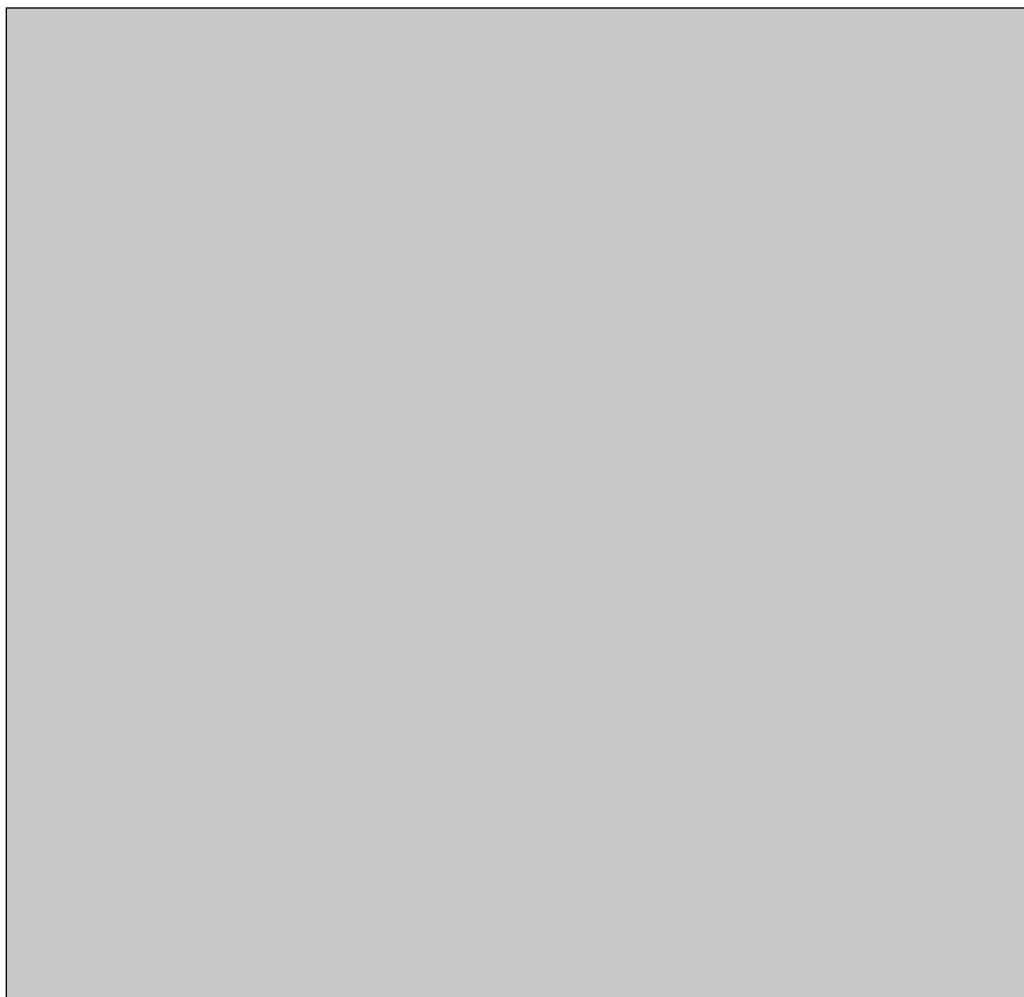


Figure 4 : Classification des styles alluviaux de Rosgen, 1996 (dans Nabet 2013, p. 347)



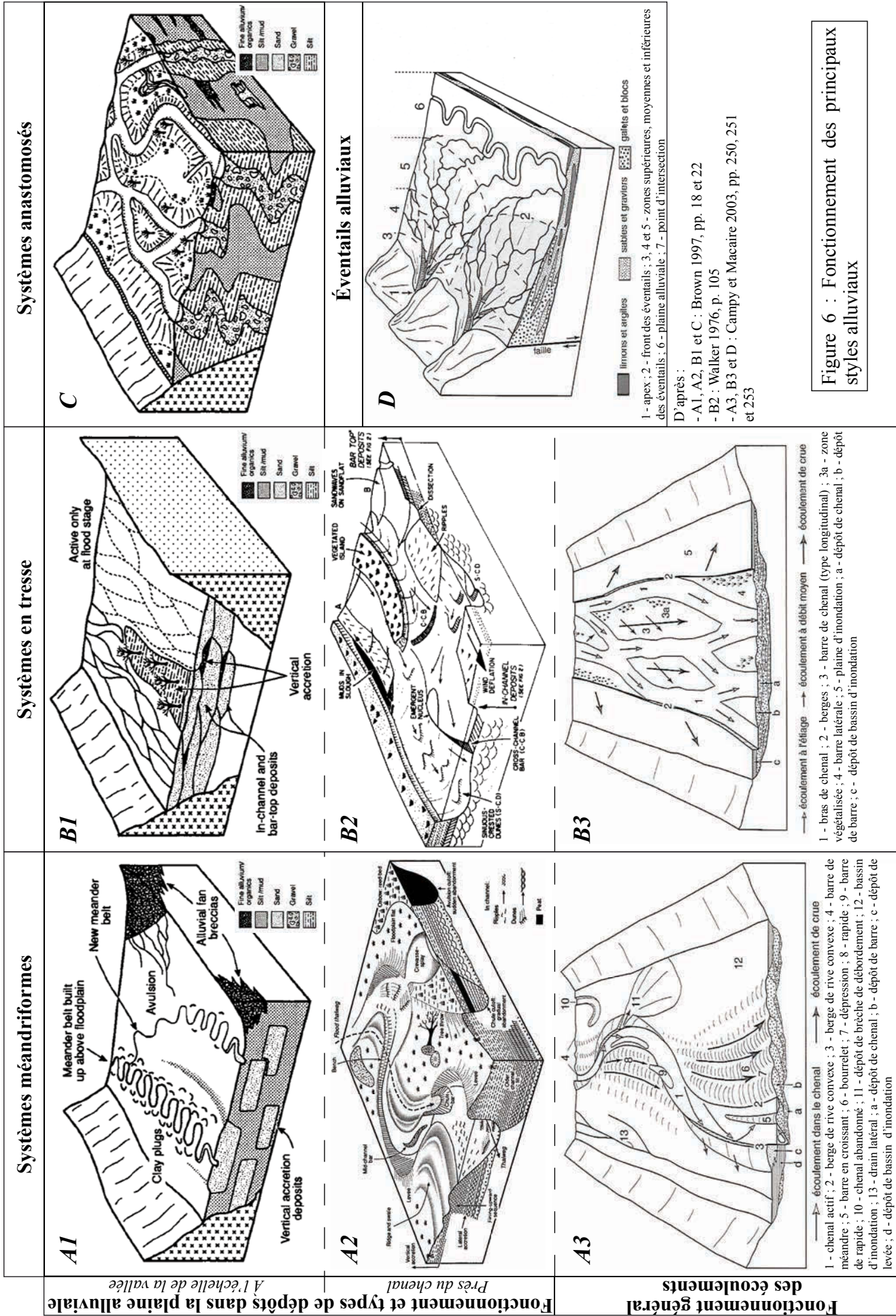


Figure 6 : Fonctionnement des principaux styles alluviaux

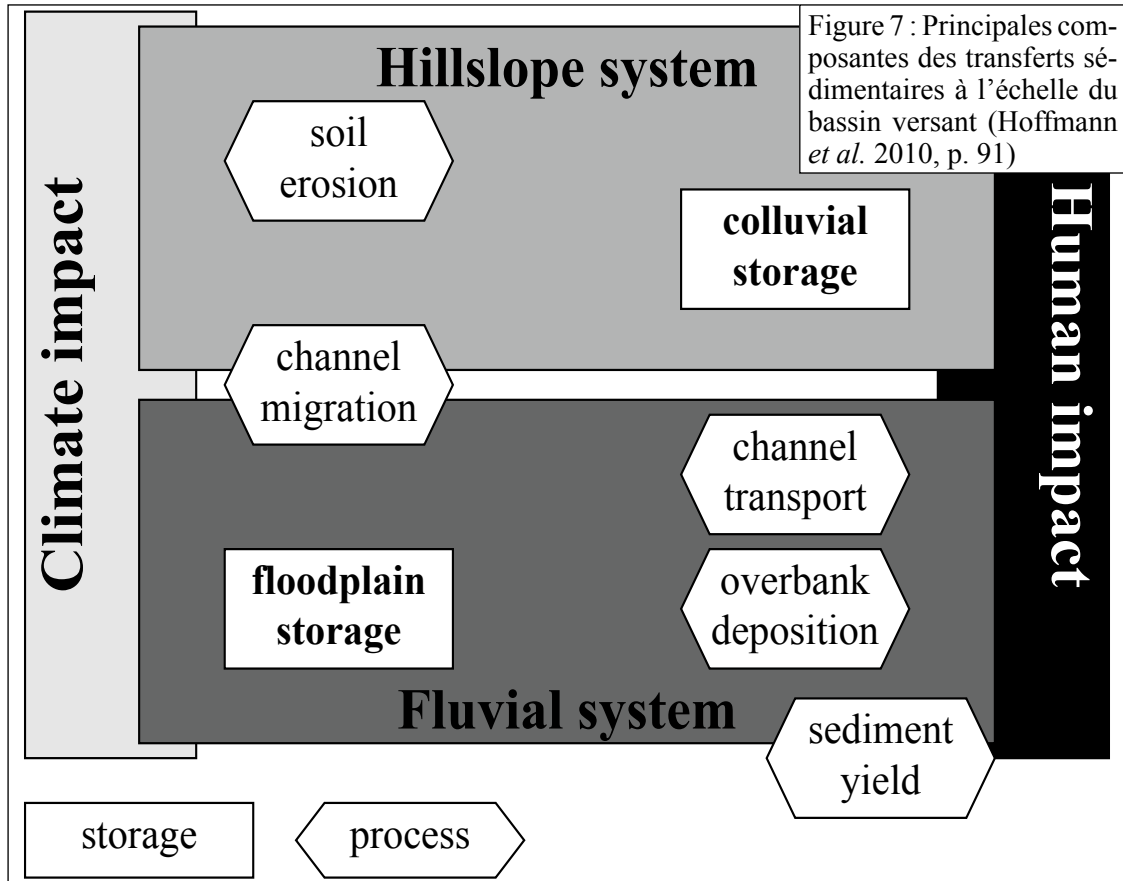
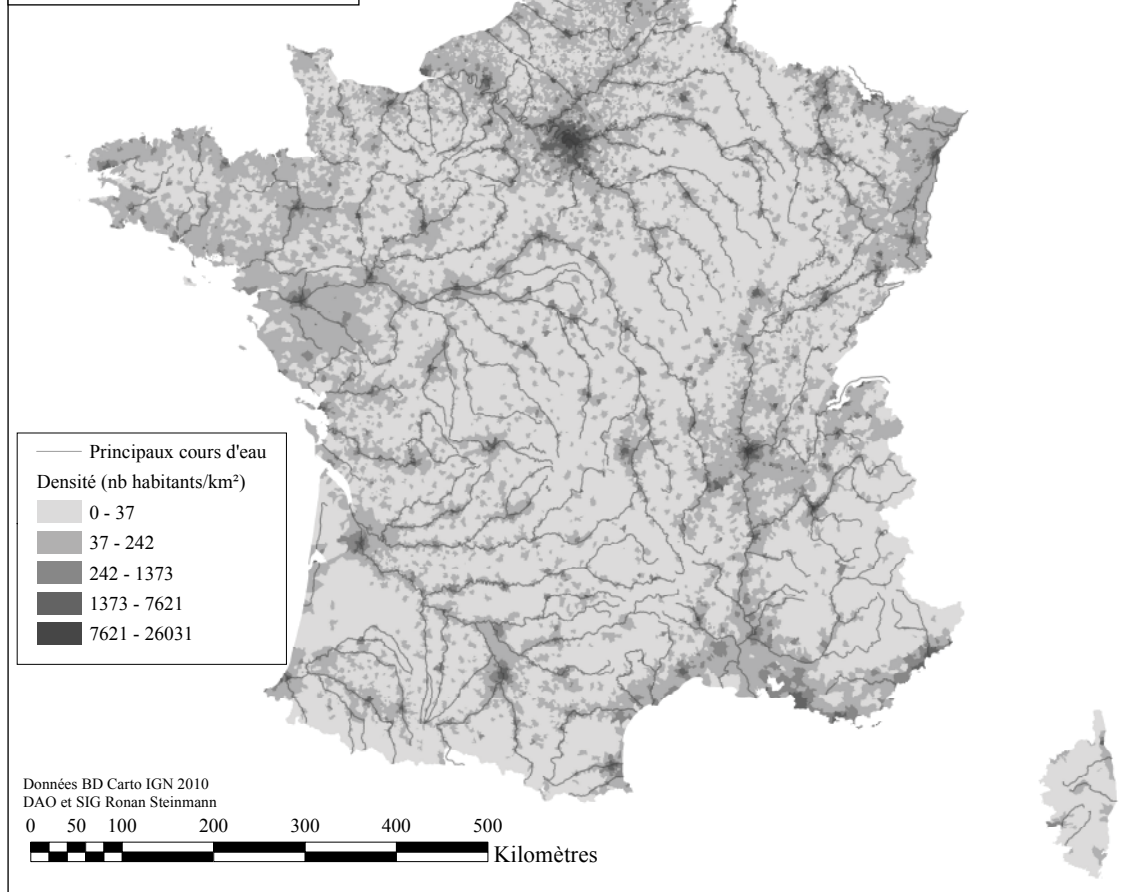


Figure 8 : Densité de population du territoire français métropolitain et principaux tracés fluviaux



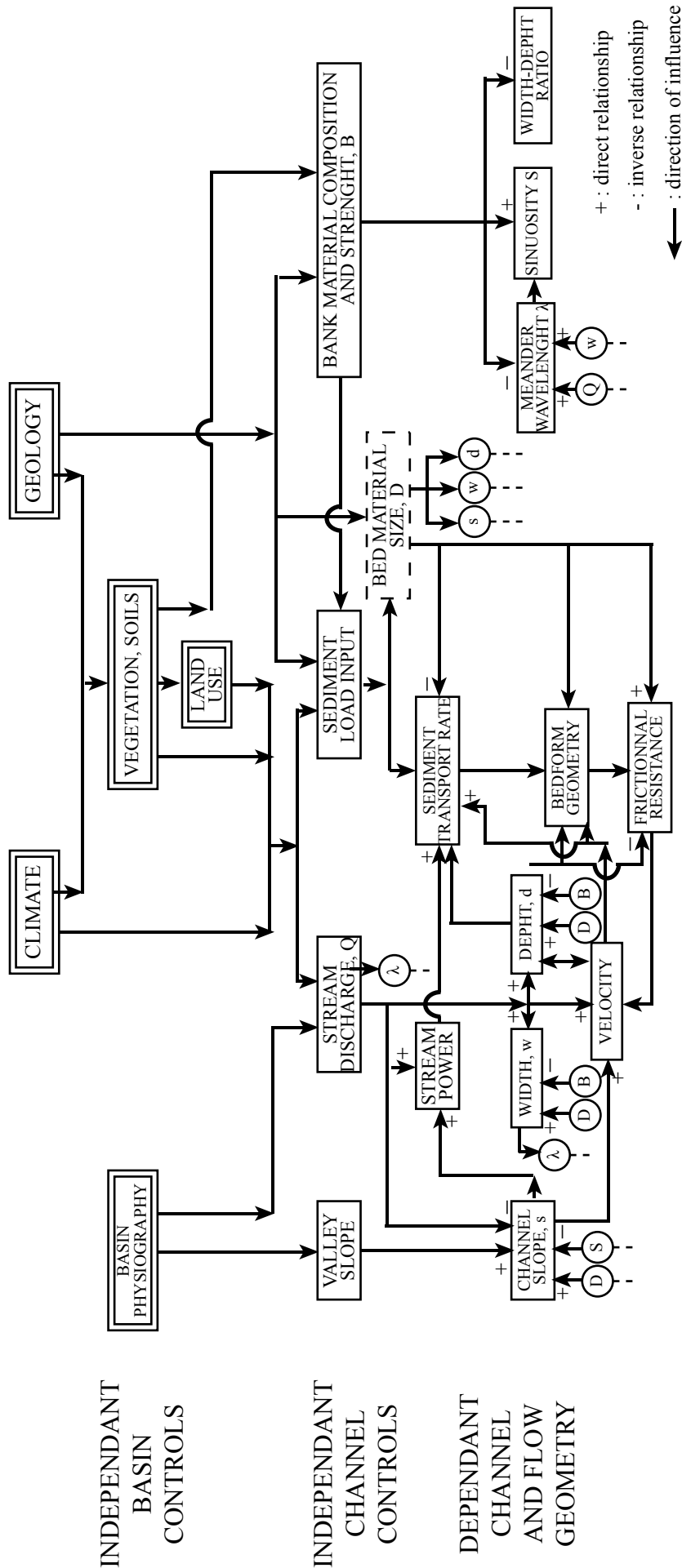


Figure 9 : Interrelations des différents paramètres de contrôle du système fluvial (d'après Knighton 1998, p. 2)

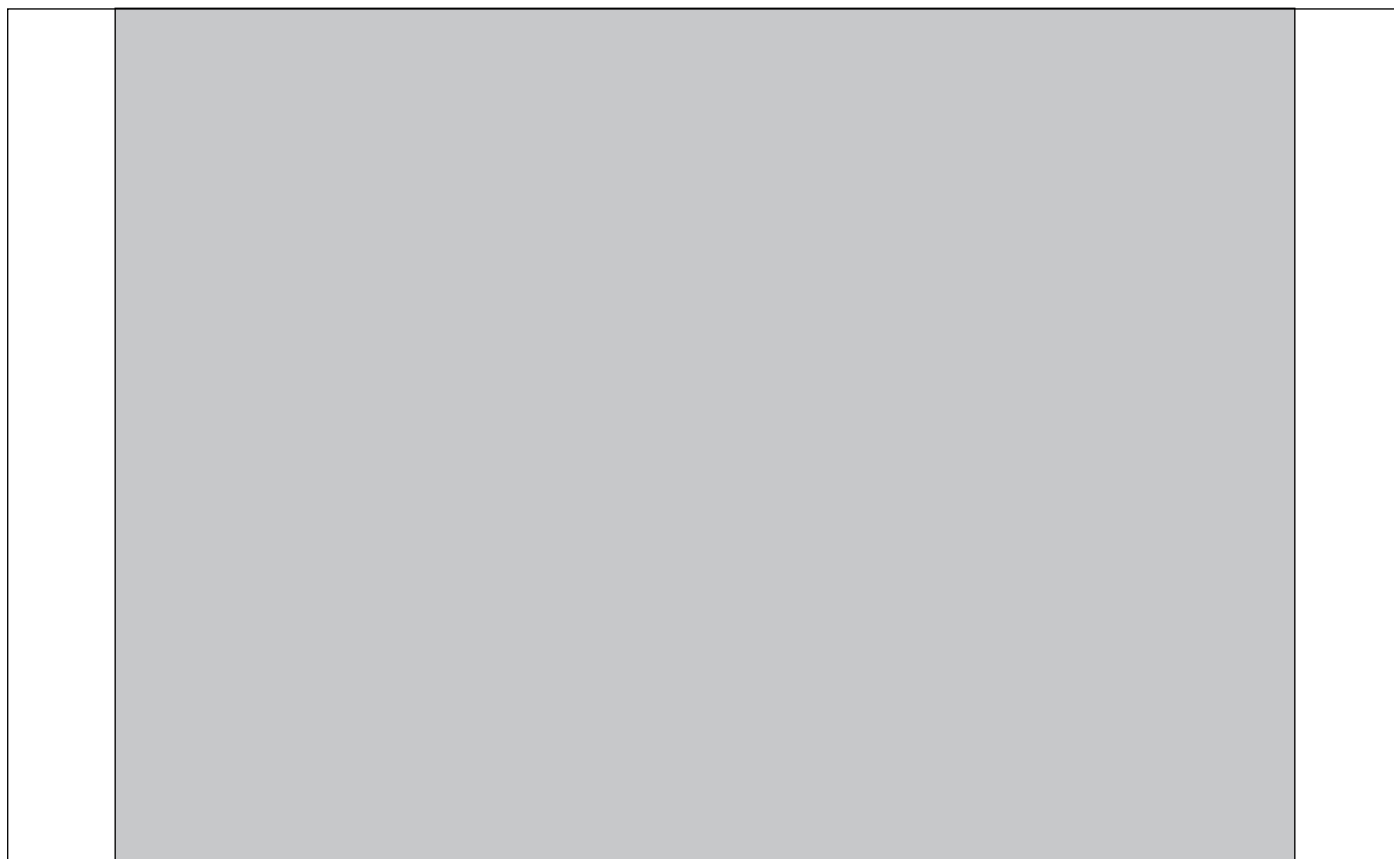


Figure 10 : Profondeurs de la limite croûte-manteau (lignes rouges en km) sur le fond topographique continental et océanique français ; principales zones en soulèvement (triangles rouges), stables (cercles bleus) et subsidentes (triangles jaunes) ; valeurs de déformation en mm/an, durées au-dessous en milliers d'années (Guennoc et Lenôtre 2009, p. 47)

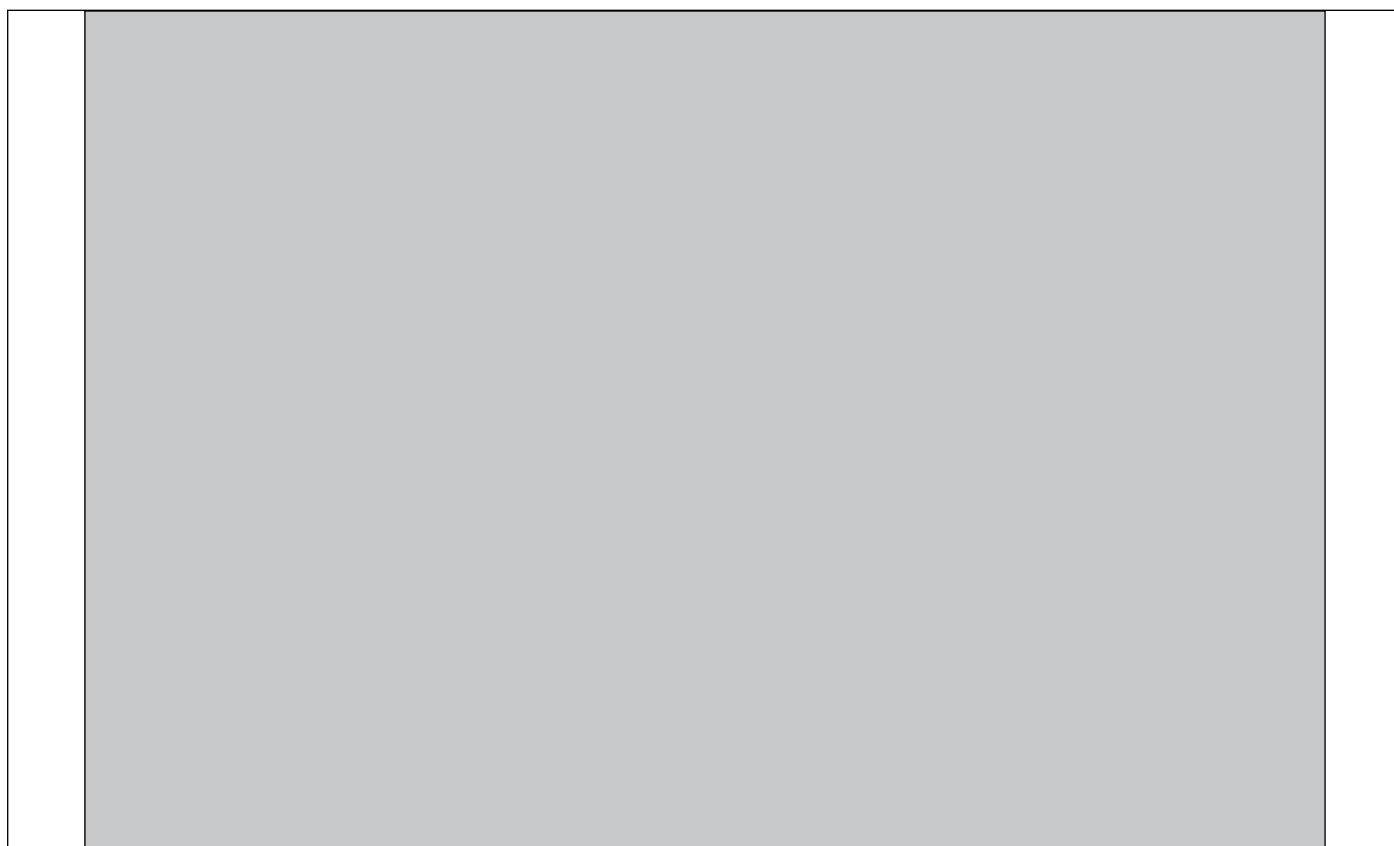


Figure 11 : Échelles temporelles des cycles climatiques terrestres (Ruddiman 2001, p. 6) ; A - 300 derniers Ma ; B - 3 derniers Ma ; C - 50 000 dernières années ; D - 1000 dernières années

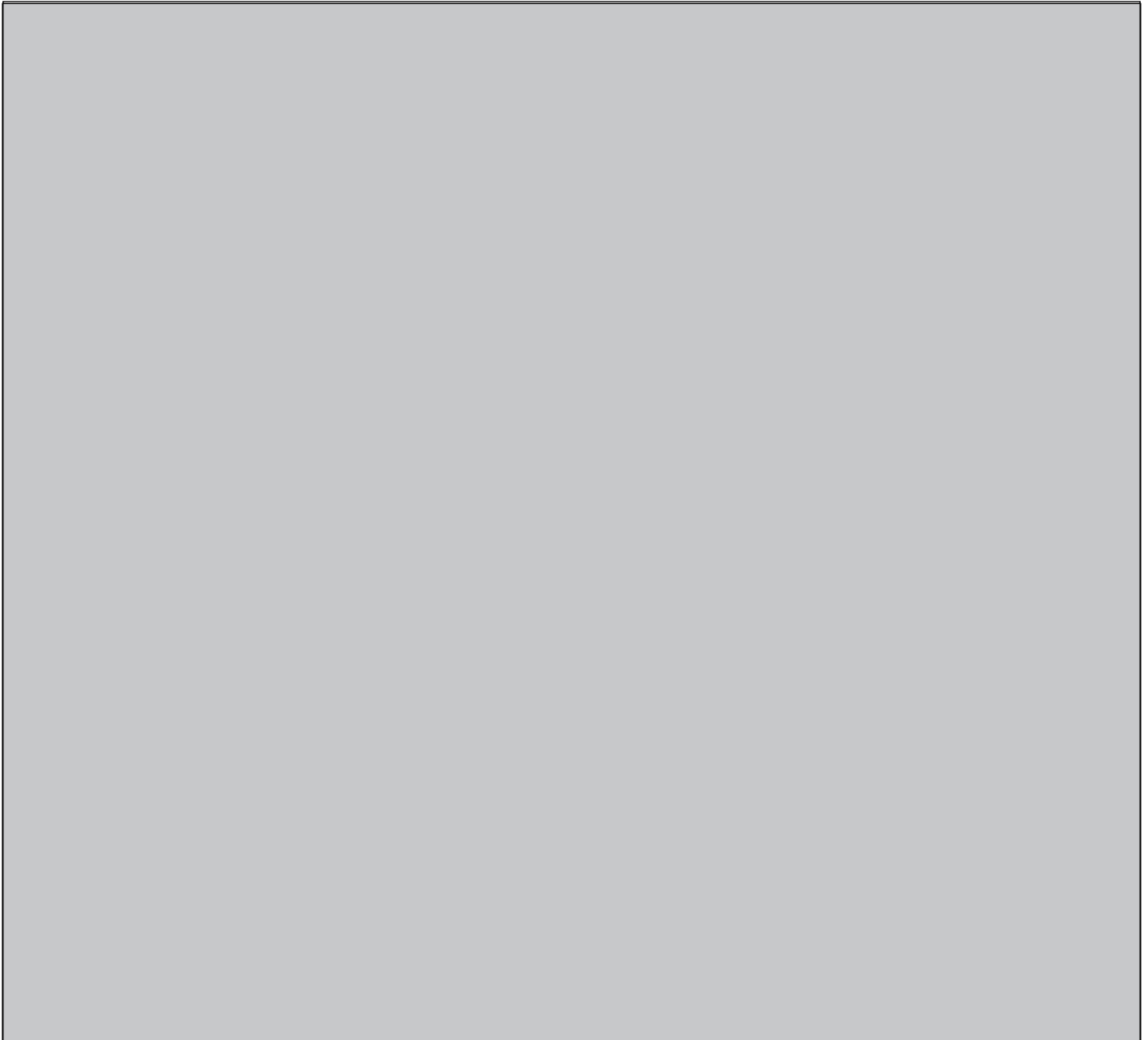


Figure 12 : Fluctuations des températures de l'Antarctique au cours des 800 000 dernières années par rapport à l'actuel (Jouzel *et al.* 2007, p. 794), carotte de glace du Dome C (courbe rouge). Corrélations observées avec les enregistrements groënlandais du carottage NorthGRIP (en vert) et les stades isotopiques marins (en bleu). T<sub>I</sub> à T<sub>IX</sub> : transitions

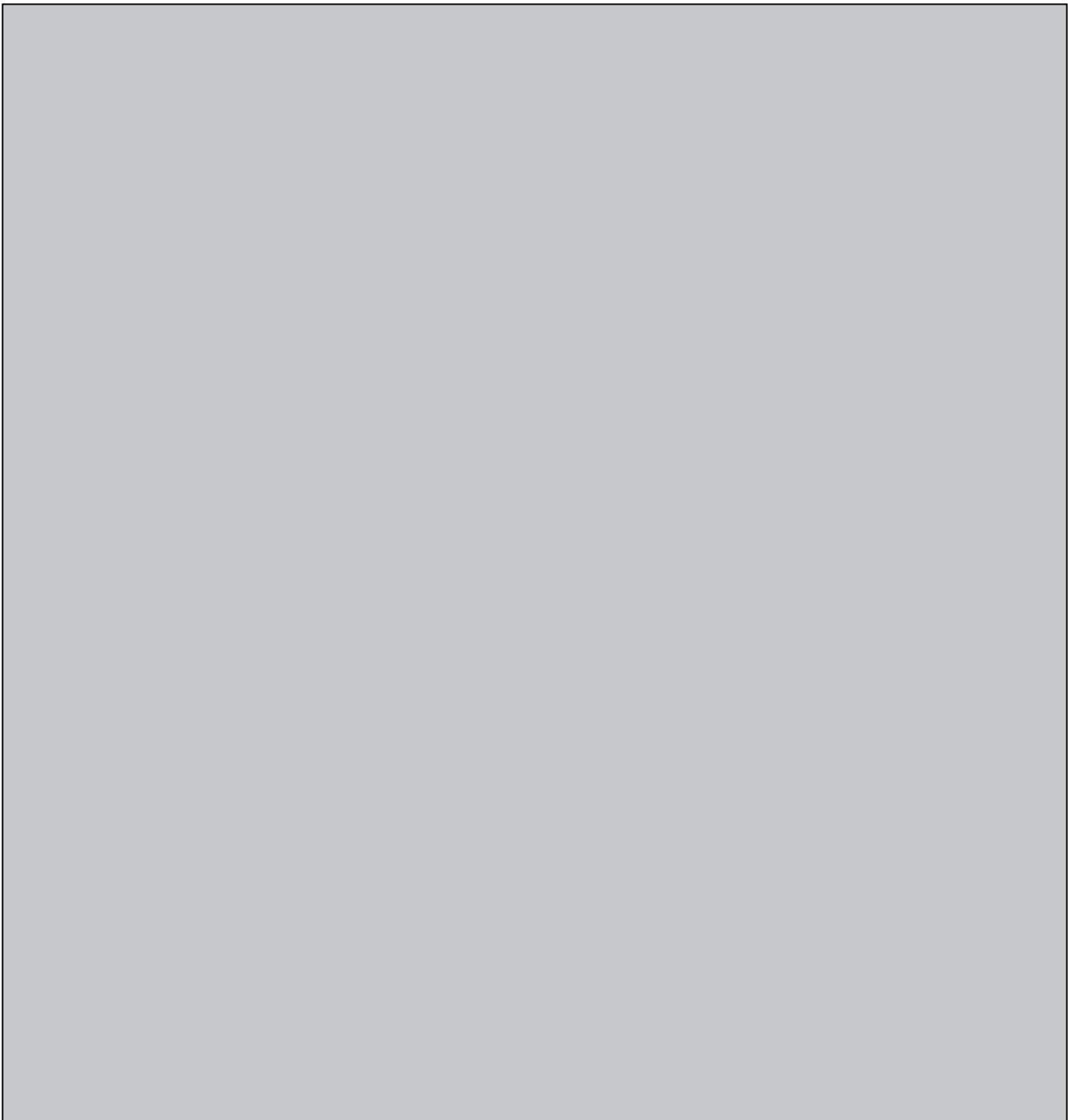


Figure 13 : Variations climatiques de l'hémisphère nord au cours des 50 000 dernières années (Errico *et al.* 2012, p. 130) ; a - insolation ( $W/m^2$ ) ; b - volume de glace par rapport au volume d'eau mondial ; c - teneur en  $CO_2$  dans l'atmosphère (en ppm) ; d - GIS (Greenland Isotopic Stages) ; d - températures atmosphériques au-dessus du Groënland ; e - évolution de la forêt méditerranéenne dans son ensemble (gris), sans les conifères (noir) et pour le chêne seul (blanc) ; f - plantes semi-désertiques ; H1 à H5 - Événements de Heinrich ; bandes grisées verticales : événements froids.



Figure 14 : Cartes de la répartition du permafrost au nord-ouest de l'Europe entre 24 000 et 21000 BP (à gauche) et lors du Dryas ancien (à droite). D'après la modélisation des températures atmosphériques annuelles maximales (Renssen et Vandenberghe 2003, p. 219). Ligne noire épaisse : limites des calottes glaciaires ; ligne noire épaisse discontinue : limites des permafrosts continu (température maximale annuelle de - 8°C) et discontinu (température maximale annuelle de - 4°C) ; ligne noire fine discontinue : littoral

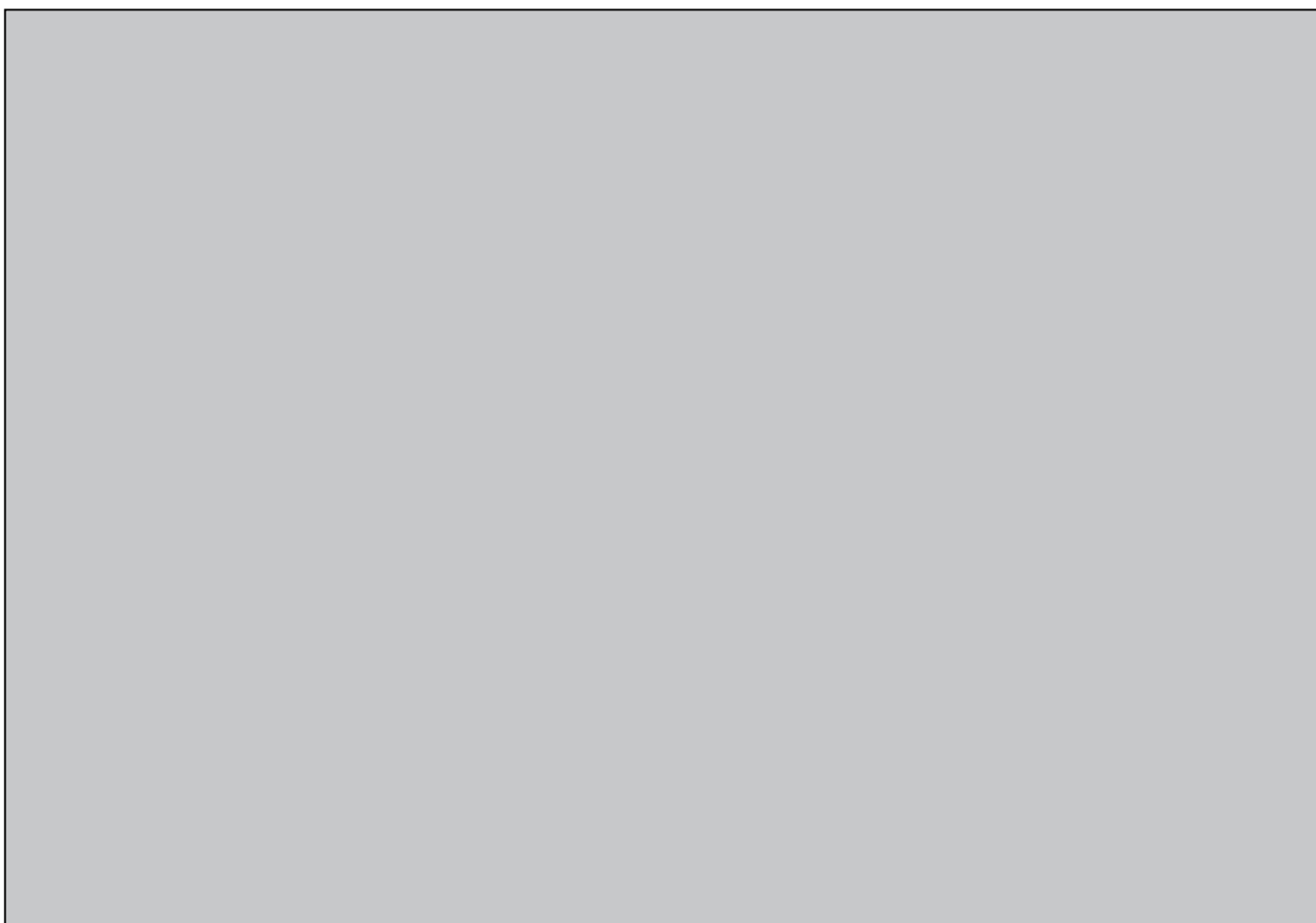


Figure 15 : Répartition des différents domaines de la cryosphère lors du Dernier Maximum Glaciaire en France d'après les observations de structures périglaciaires (d'après Mercier 2013, pl. XIX)



Figure 16 : Limites de la calotte glaciaire (1) et du pergélisol (2) au cours du Dernier Maximum Glaciaire aux latitudes moyennes de l'Europe (Vandenberghe *et al.* 2004, p. 395). Les glaciers de tailles plus réduites d'Europe centrale et méridionale ne sont pas représentés

		No vegetation	Patchy vegetation	Continuous vegetation
Permafrost (partial to continuous)	low stream power/ sedim. supply high	BRAIDED	BRAIDED	MEANDERING ANABRANCHING
Partial permafrost: deep seasonal frost	low stream power/ sedim. supply high		ANABRANCHING	MEANDERING BRAIDED

Figure 17 : Typologie des rivières périglaciaires en fonction du couvert végétal, des caractéristiques du permafrost et des apports sédimentaires (d'après Vandenberghe 2001, p. 120)



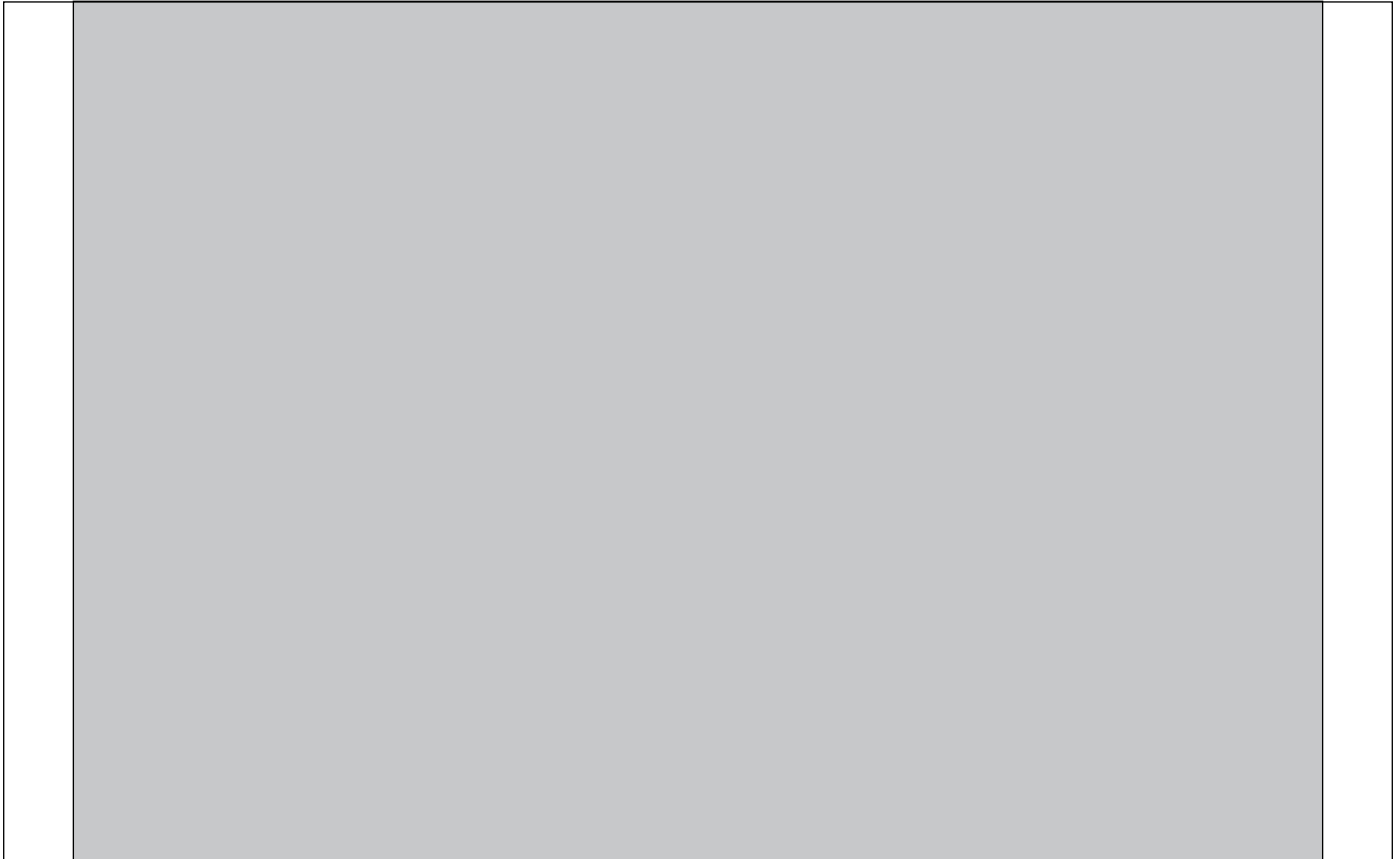


Figure 18 : Phénomènes périglaciaires et variations de la température annuelle après le Dernier Maximum Glaciaire entre 50 et 53 ° de latitude nord (Belgique et Pays-Bas) ; Renssen et Vandenberghe 2003, p. 220 ; ET - Tuf D'Eltville ; E - surfaces d'érosion ; IS - période interglaciaire

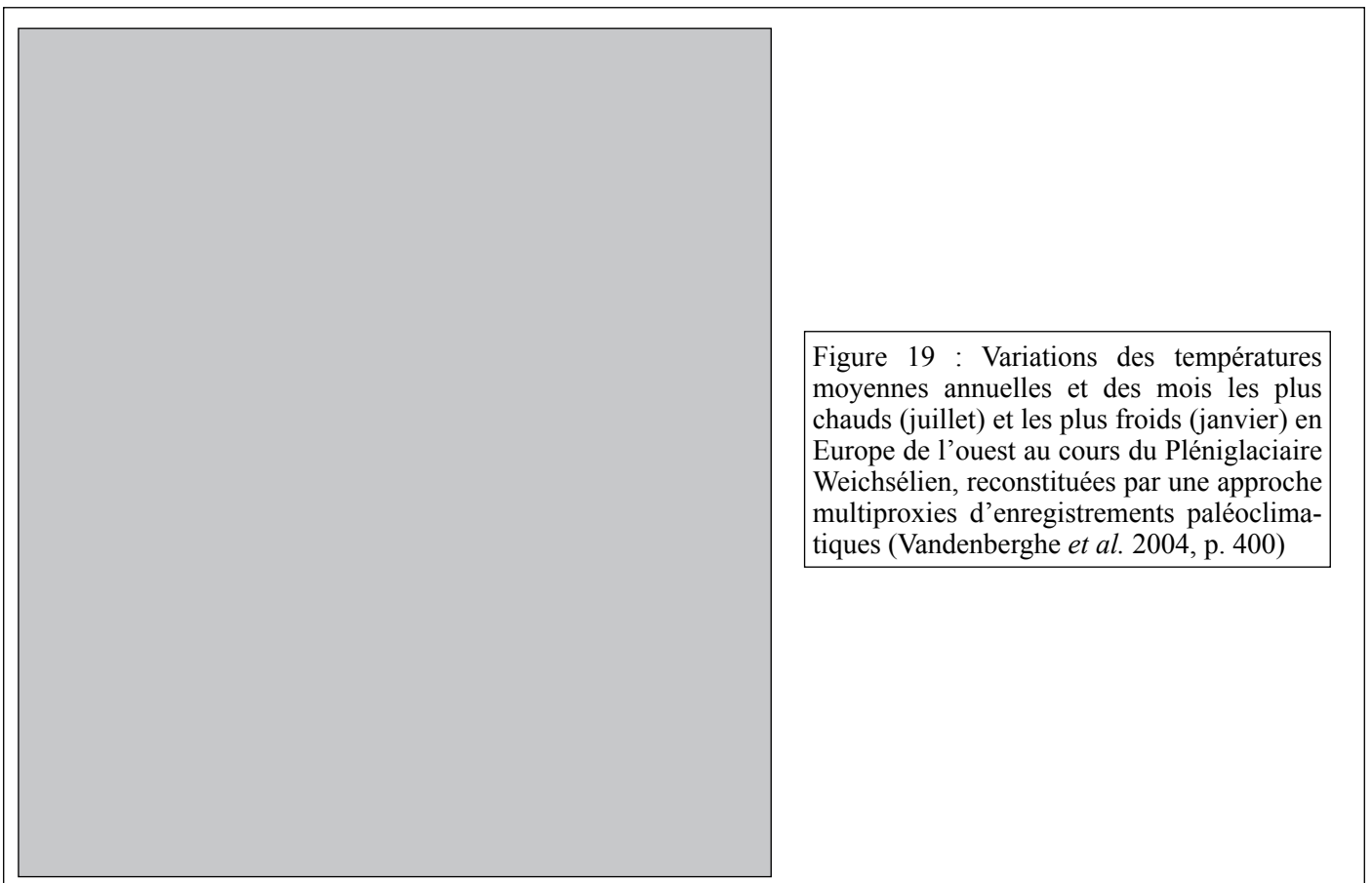


Figure 19 : Variations des températures moyennes annuelles et des mois les plus chauds (juillet) et les plus froids (janvier) en Europe de l'ouest au cours du Pléniglaciaire Weichsélien, reconstituées par une approche multiproxies d'enregistrements paléoclimatiques (Vandenberghe *et al.* 2004, p. 400)



Figure 20 : Modèle d'évolution de la température, de la densité du couvert végétal, de l'évapotranspiration (E), des précipitations (P) et des processus sédimentaires associés en domaine alluvial au cours des phases glaciaire et interglaciaire (Vandenberghe 1993 dans Miall 2006, p. 449)

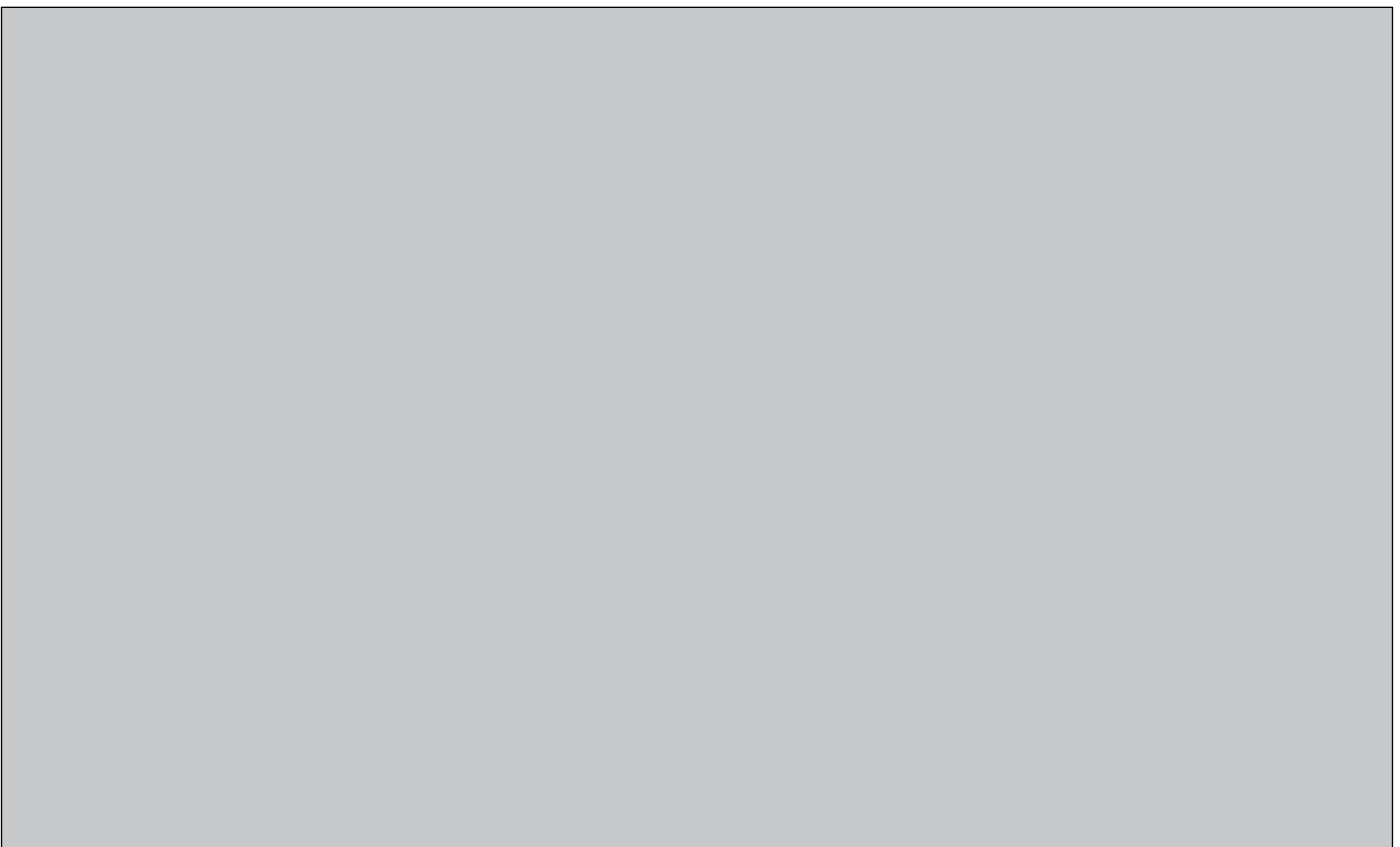


Figure 21 : Modèle simplifié de la formation des terrasses alluviales de la vallée de la Somme au cours d'un cycle interglaciaire-glaciaire (Antoine *et al.* 2000, p. 191)



Figure 22 : Évolution de la limite entre les eaux tempérées et les eaux subpolaires ou polaires de la fin de la dernière glaciation au début de l'Holocène (Magny 1995, p. 134)

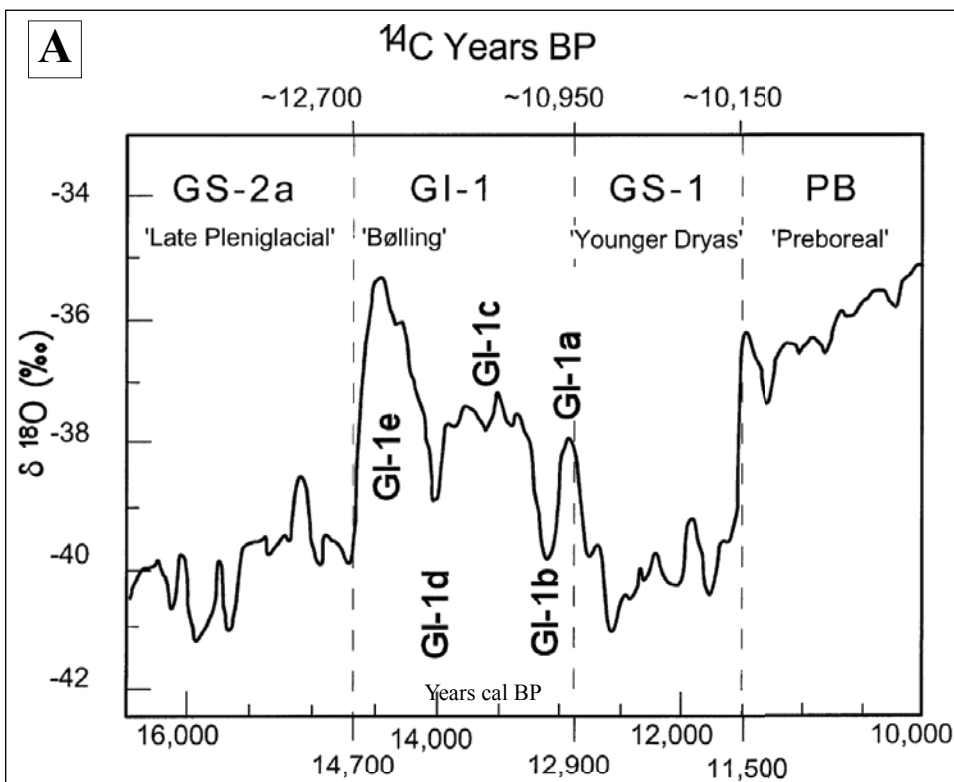
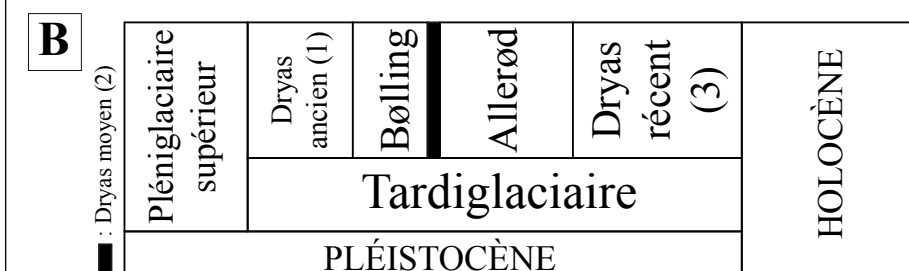


Figure 23 : A - Évolution du taux de δ ¹⁸O atmosphérique dans le carottage GRIP du Groënland avec les événements stadias (GS) et interstadias (GI) de Björck *et al.* 1998 (d'après Renssen *et al.* 2001, p. 157) ; B - Correspondance avec la chronostratigraphie continentale (d'après Vandenberghe *et al.* 2013, p. 97)



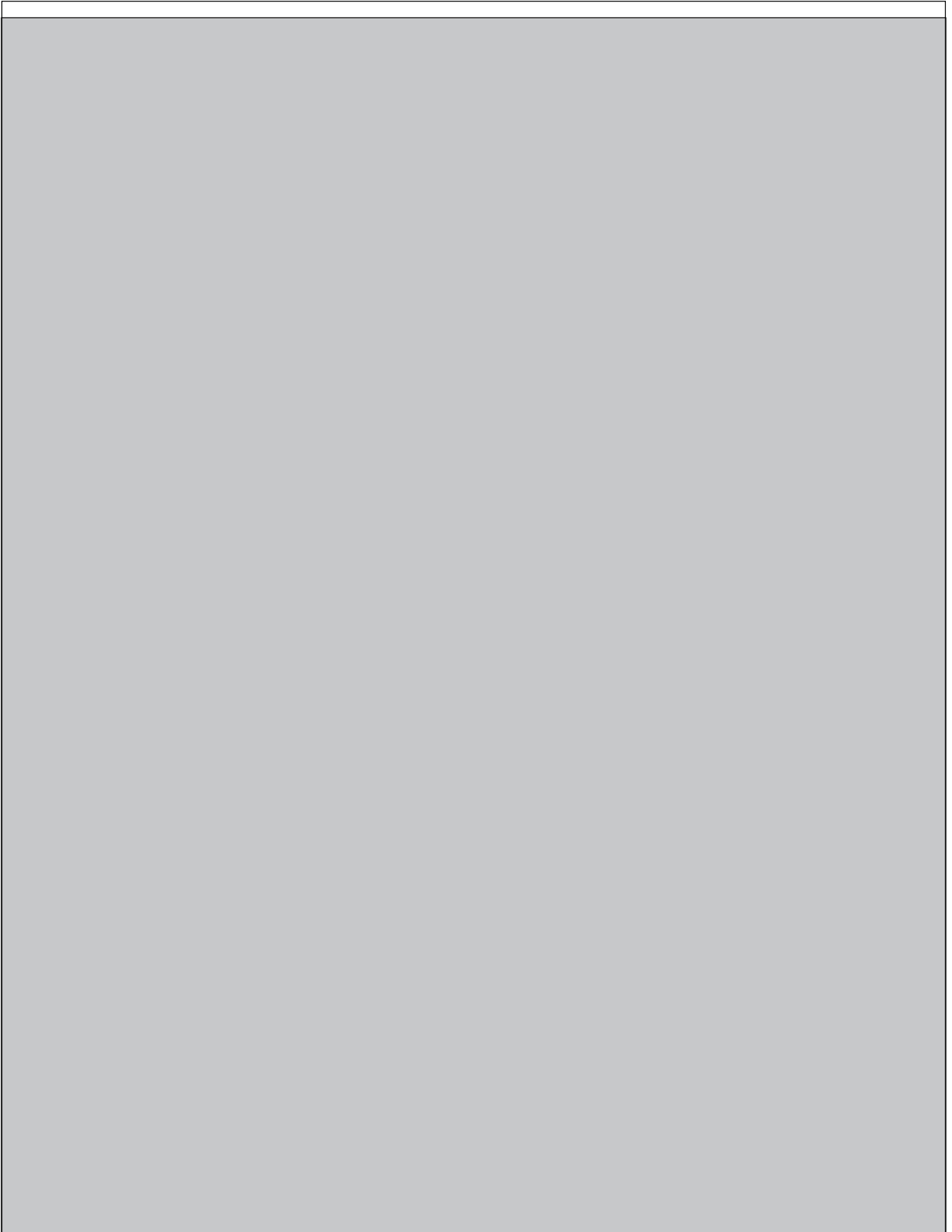


Figure 24 : Schéma de synthèse de l'évolution des grandes vallées du Bassin parisien au cours du Tardiglaciaire (Pastre *et al.* 2000, p. 110)

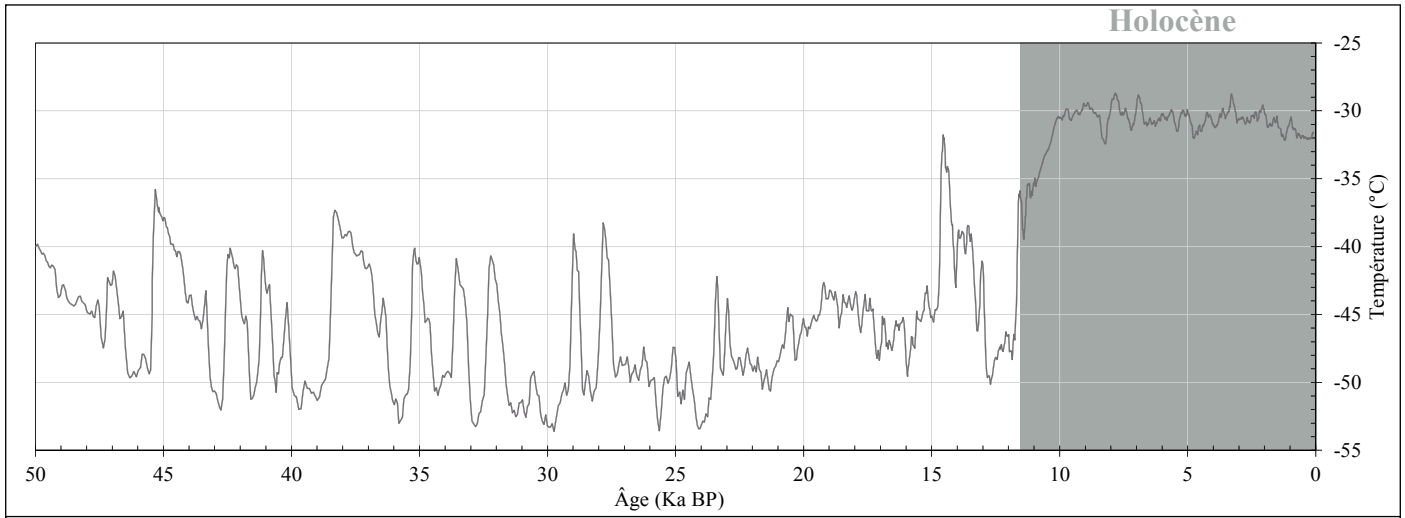


Figure 25 : Évolution des températures au centre du Groënland (carottage GISP2) durant les 50000 dernières années ; données NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/2475>, Alley 2000)

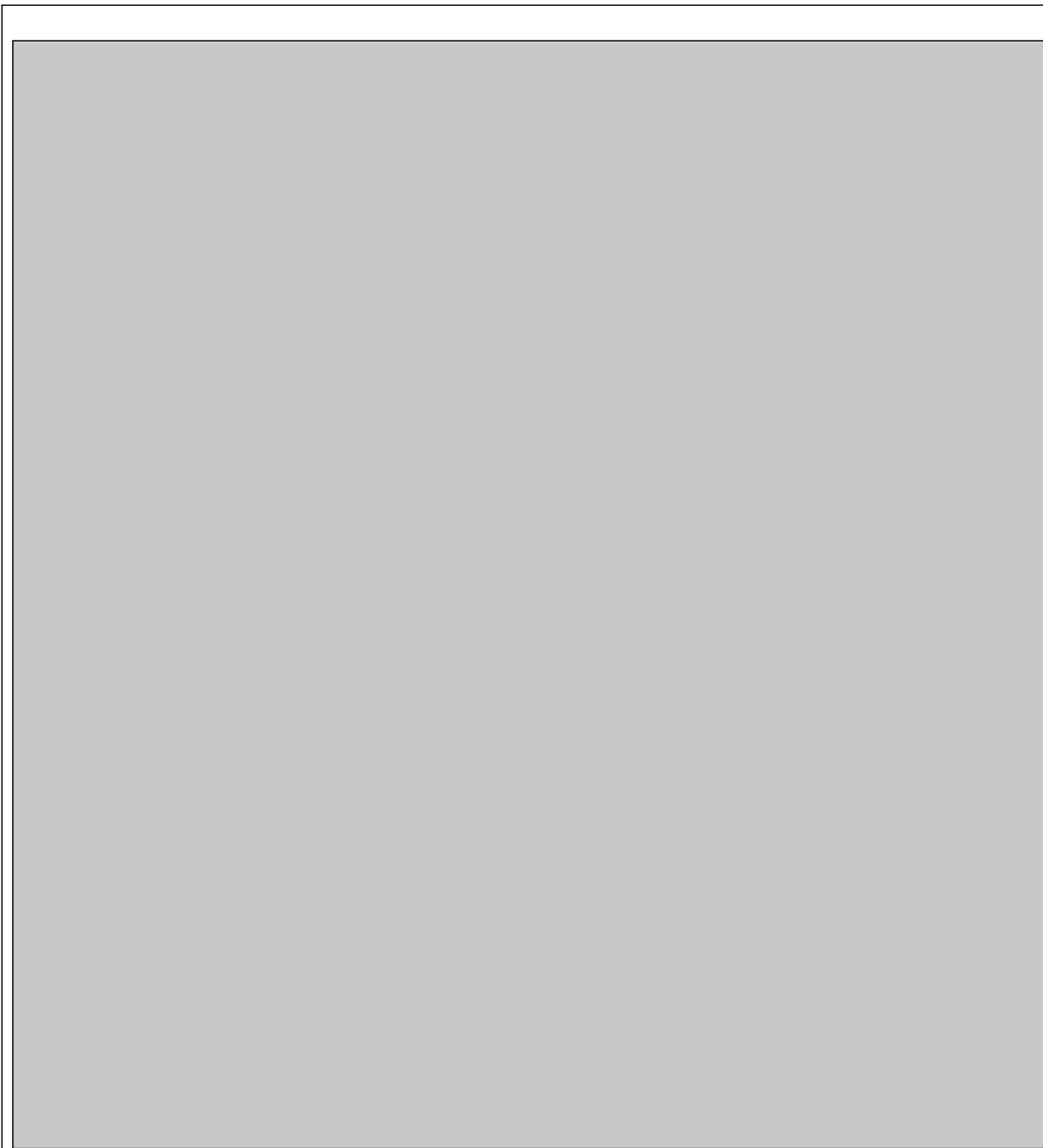


Figure 26 : Évolution des principaux paramètres influençant le climat au cours de l'Holocène (Wanner *et al.* 2011, p. 3117) ; a - variations de l'insolation sous contrôle orbital sur deux sites de chaque hémisphère (Berger 1978); b - activité volcanique au cours des 6000 dernières années d'après les concentrations en sulfates mesurées sur les carottes de glace du Groënland (en bleu) et de l'Antartique (en rouge : Wanner *et al.* 2008) ; c - fluctuations de l'activité solaire mises en évidence par les concentrations de <sup>10</sup>Be dans les glaces polaires (Steinhilber *et al.* 2009) d - augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> (IPCC 2007) ; barres verticales bleues : événements froids de l'Holocène (Wanner *et al.* 2011) ; fond et bas du graphique, partition du climat de l'Holocène



Figure 27 : D'après Magny 2004, p. 75 ; indice de circulation polaire (PCI, positif : climat plus froid) ; variations du  $^{14}\text{C}$  atmosphérique résiduel ; fluctuations des niveaux lacustres aux latitudes moyennes européennes ; indice de charriage des glaces dans l'Atlantique Nord

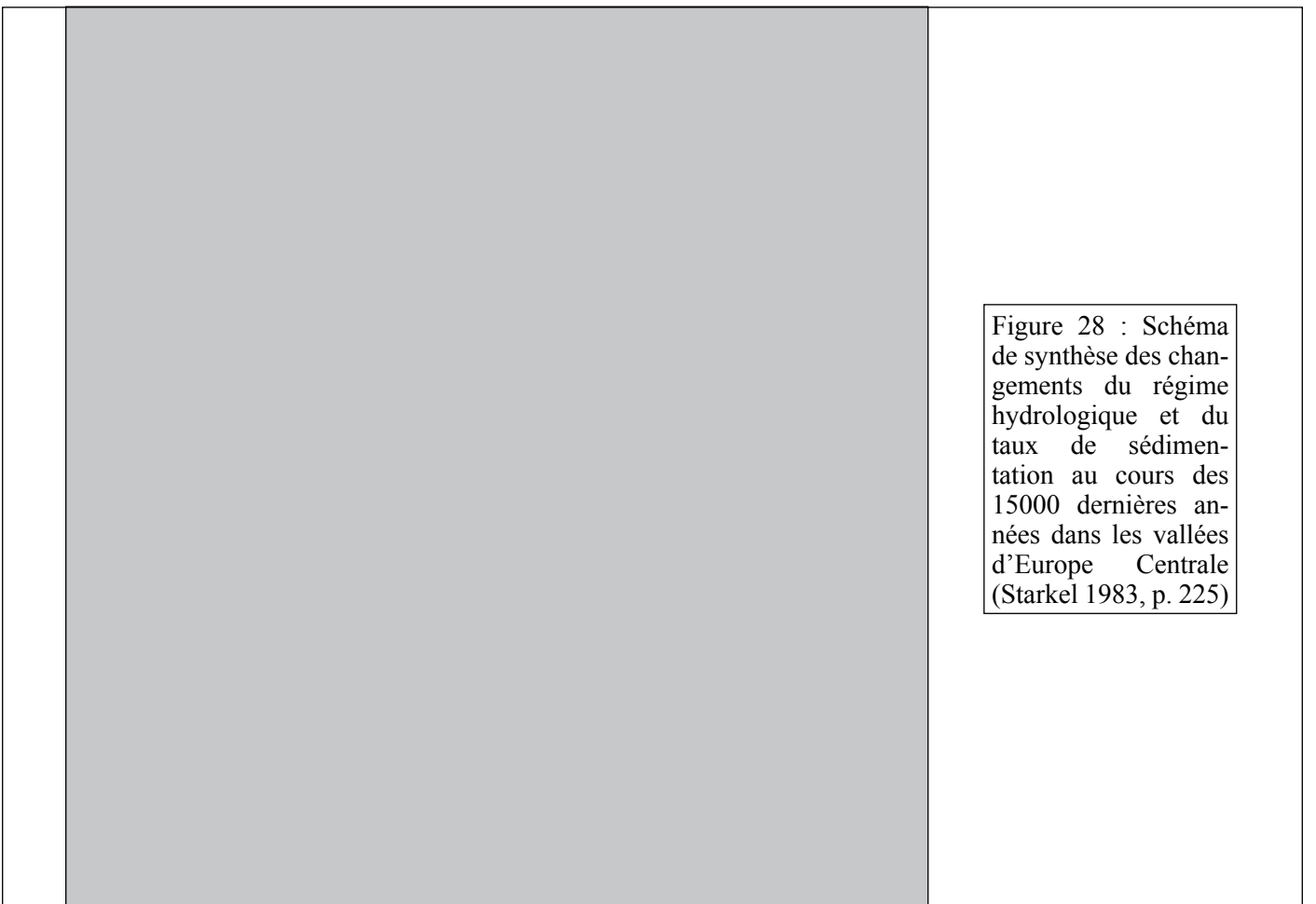


Figure 28 : Schéma de synthèse des changements du régime hydrologique et du taux de sédimentation au cours des 15000 dernières années dans les vallées d'Europe Centrale (Starkel 1983, p. 225)

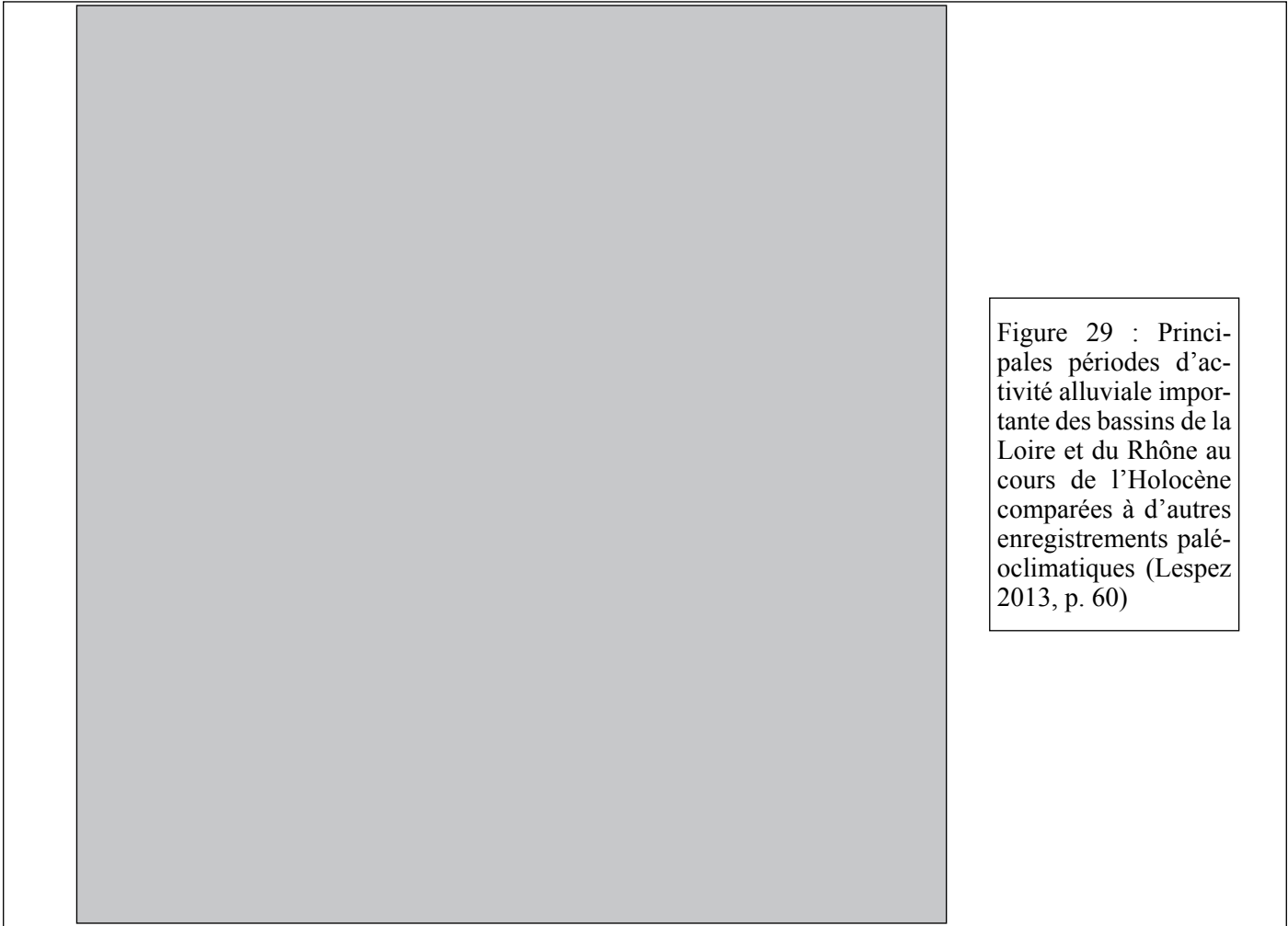


Figure 29 : Principales périodes d'activité alluviale importante des bassins de la Loire et du Rhône au cours de l'Holocène comparées à d'autres enregistrements paléoclimatiques (Lespez 2013, p. 60)

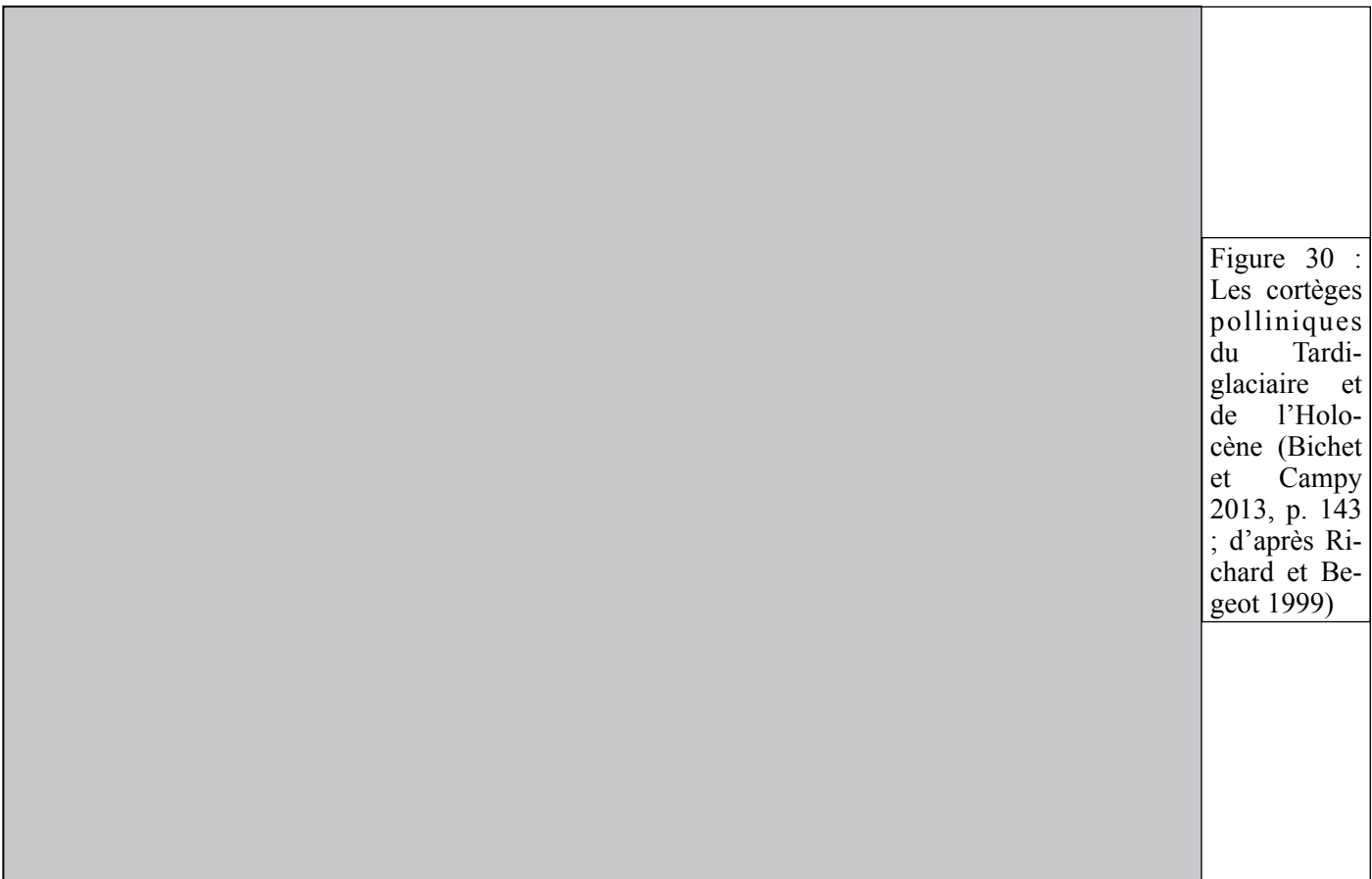
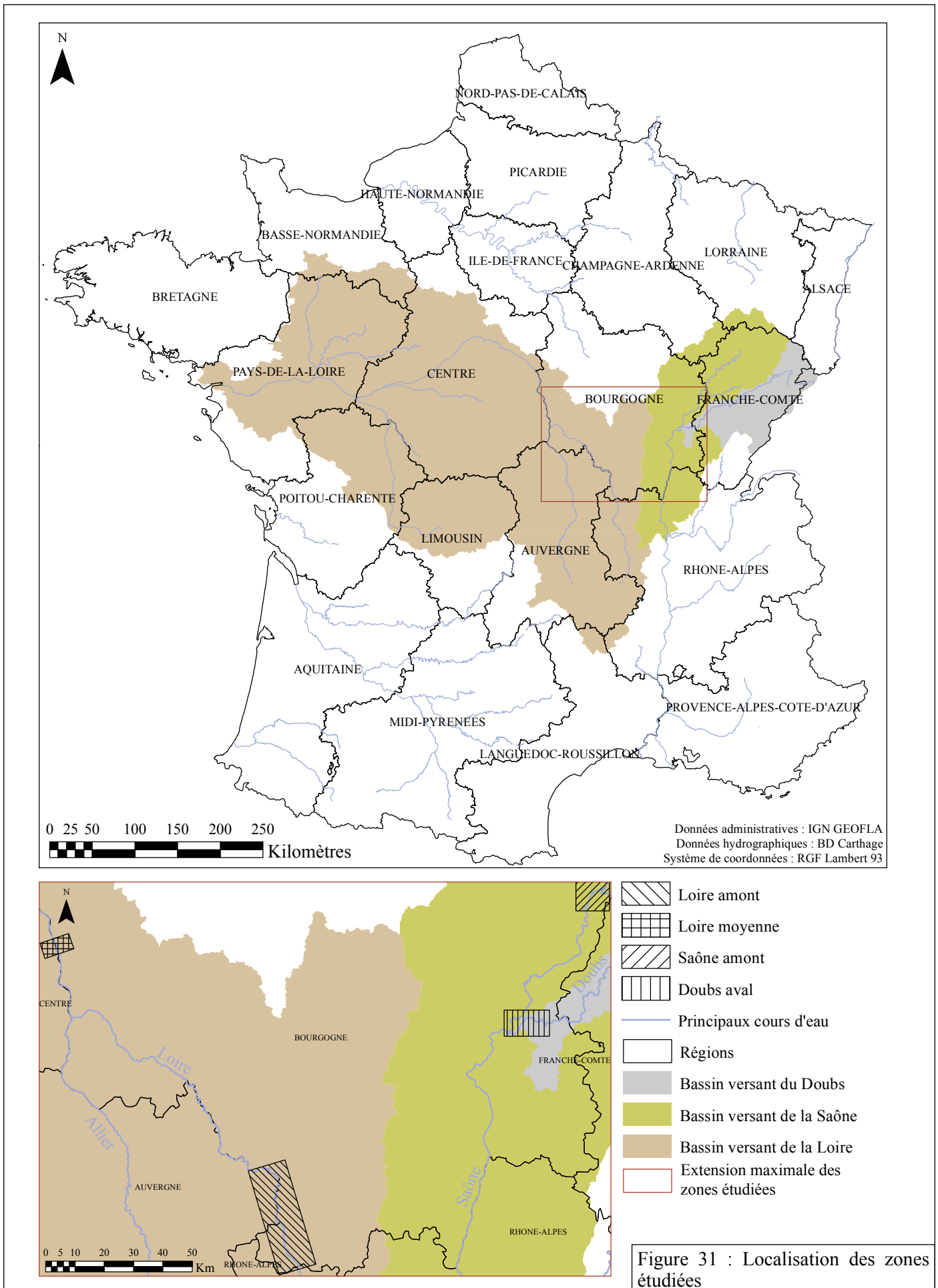


Figure 30 : Les cortèges polliniques du Tardiglaciaire et de l'Holocène (Bichet et Campy 2013, p. 143 ; d'après Richard et Begeot 1999)





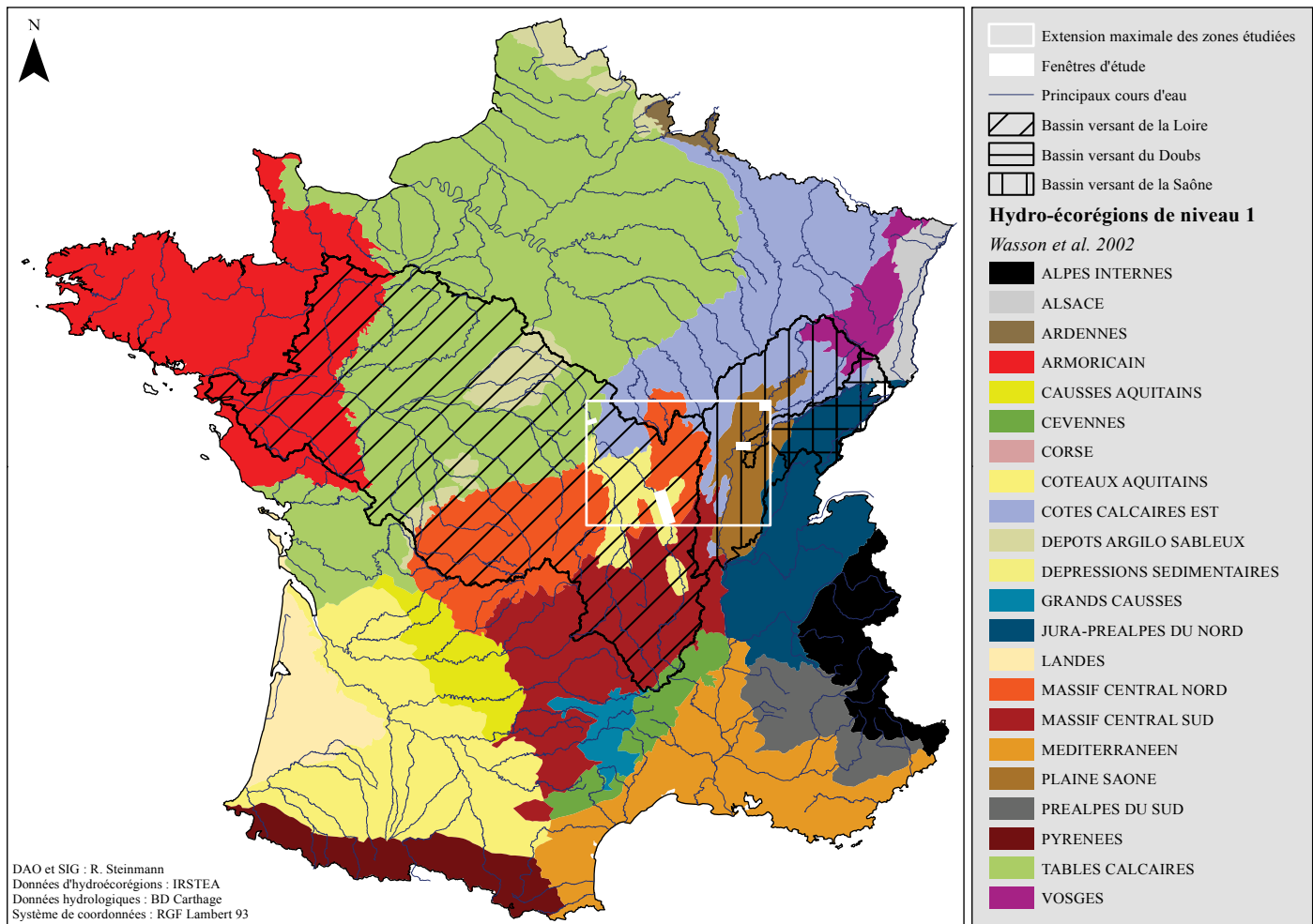


Figure 32 : Localisation des secteurs étudiés au sein des hydro-écórégions de France métropolitaine (Wasson *et al.* 2002)

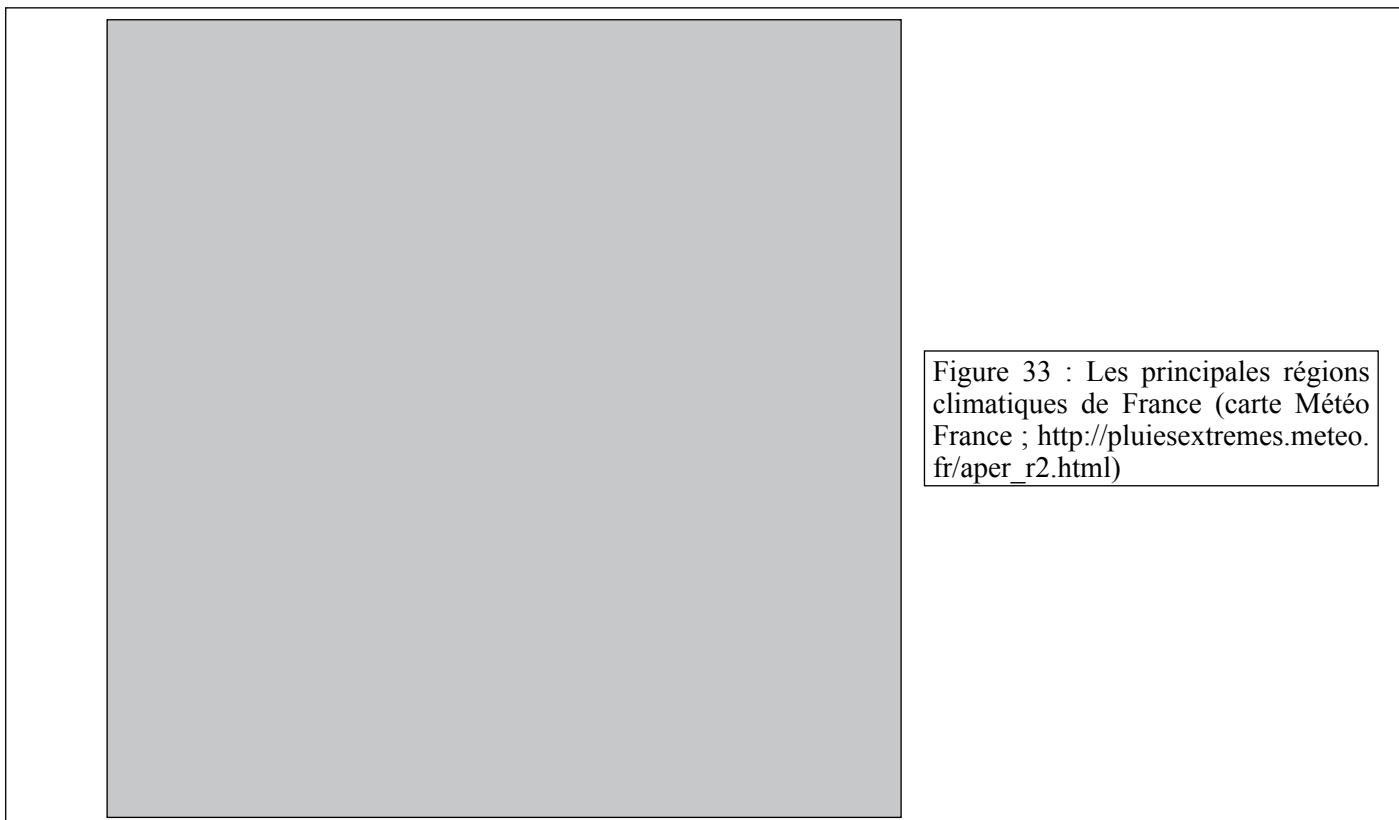


Figure 33 : Les principales régions climatiques de France (carte Météo France ; [http://pluiesextremes.meteo.fr/aper\\_r2.html](http://pluiesextremes.meteo.fr/aper_r2.html))

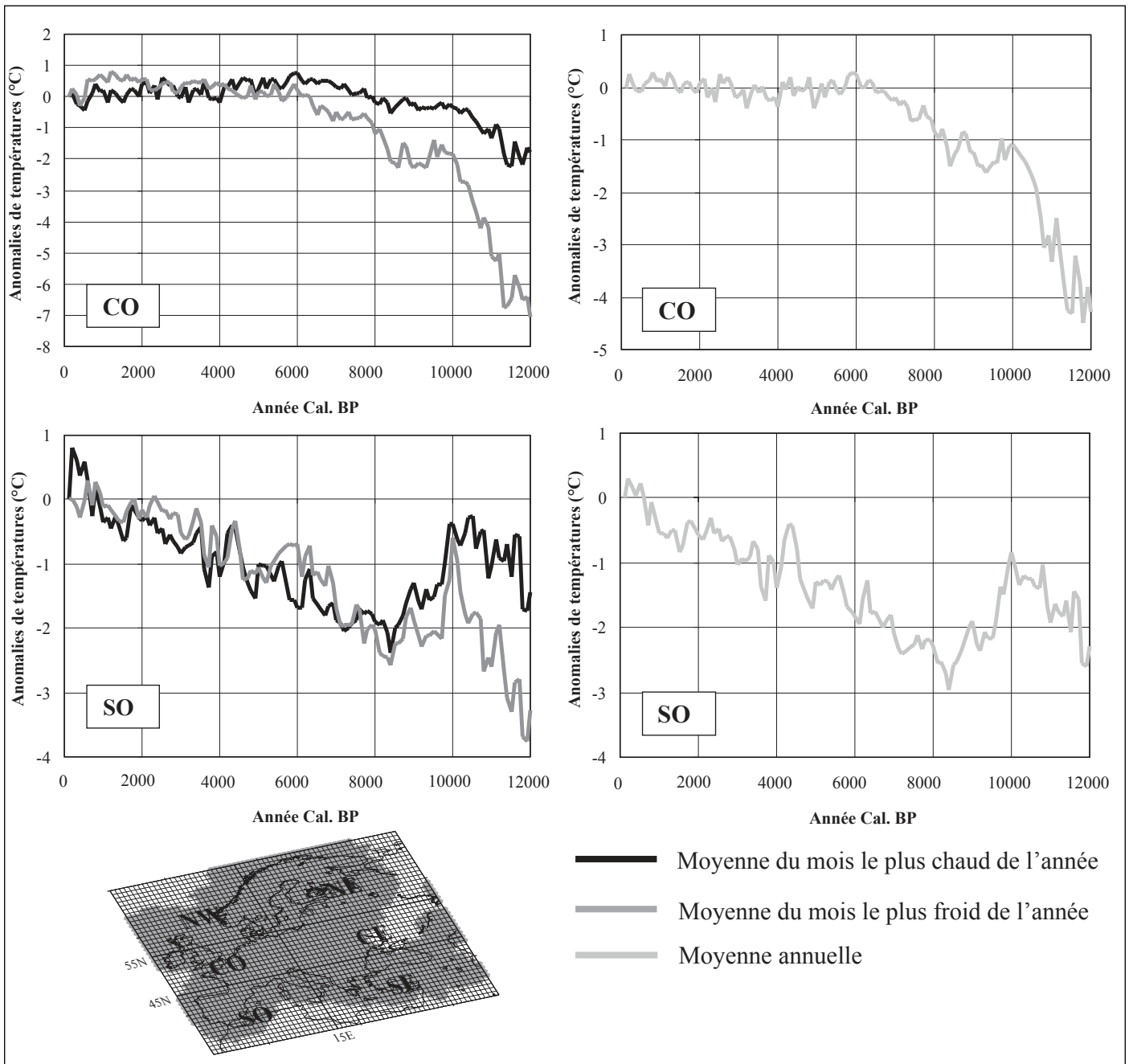


Figure 34 : Évolution holocène des températures d'après les assemblages polliniques dans les régions européennes recoupées par les bassins versants étudiés (d'après Davis et al. 2003, pp. 1707-1708)

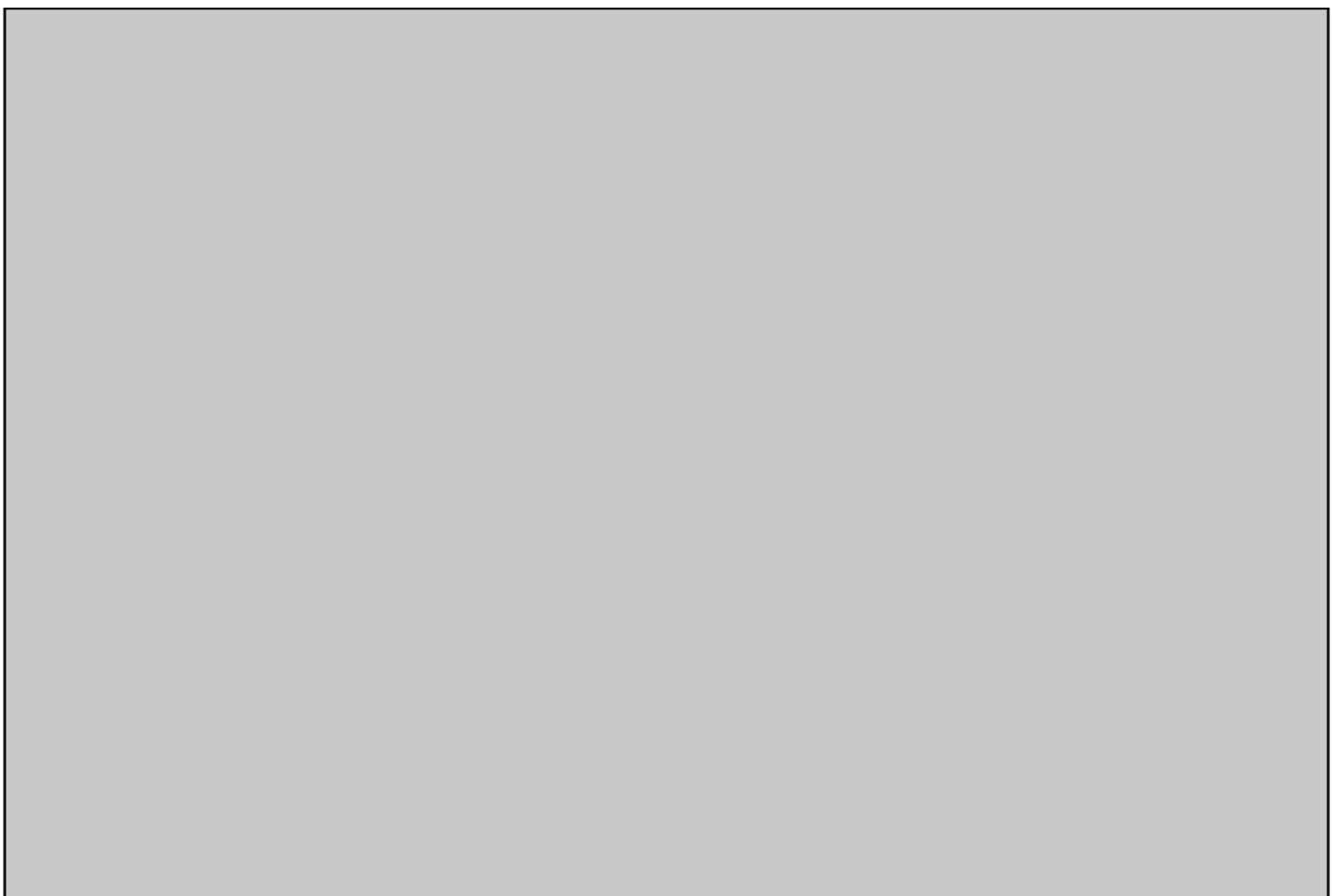
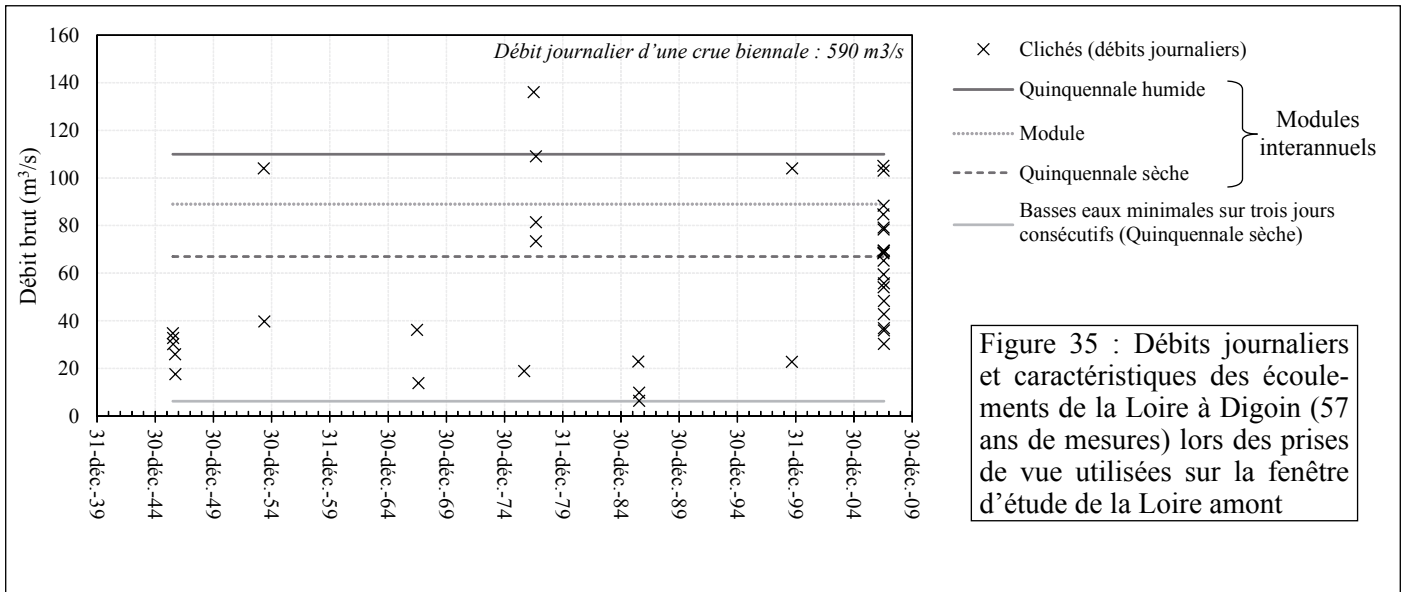
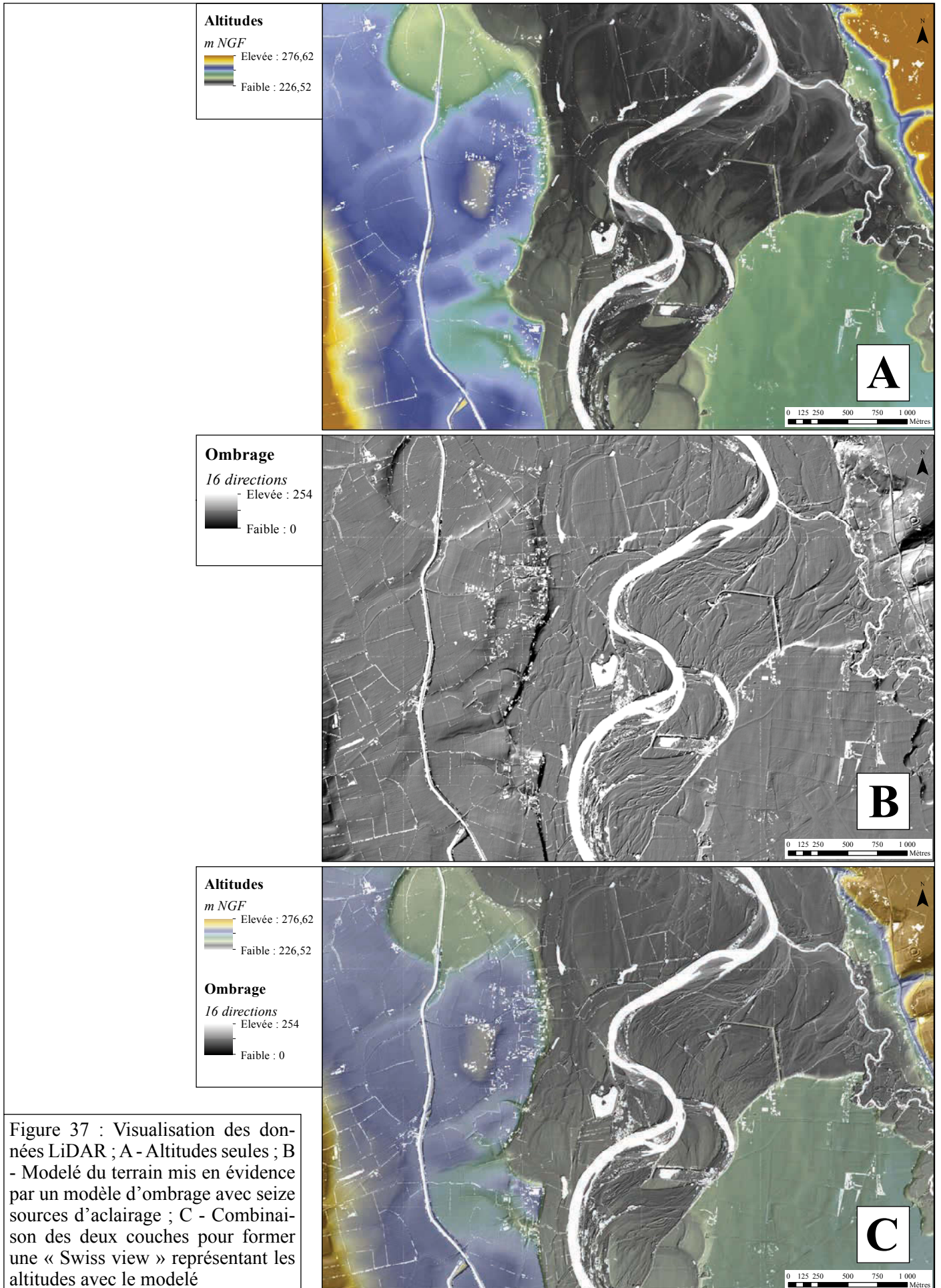


Figure 36 : A - Dispositif d'acquisition des données LiDAR (fiche produit 3 DREAL Centre, 2006) ; B - Nuage de points brut obtenu (Nuninger *et al.* 2010, SIG & DAO programme LIEPPEC ® MSHE C.N. Ledoux, C. Fruchart)



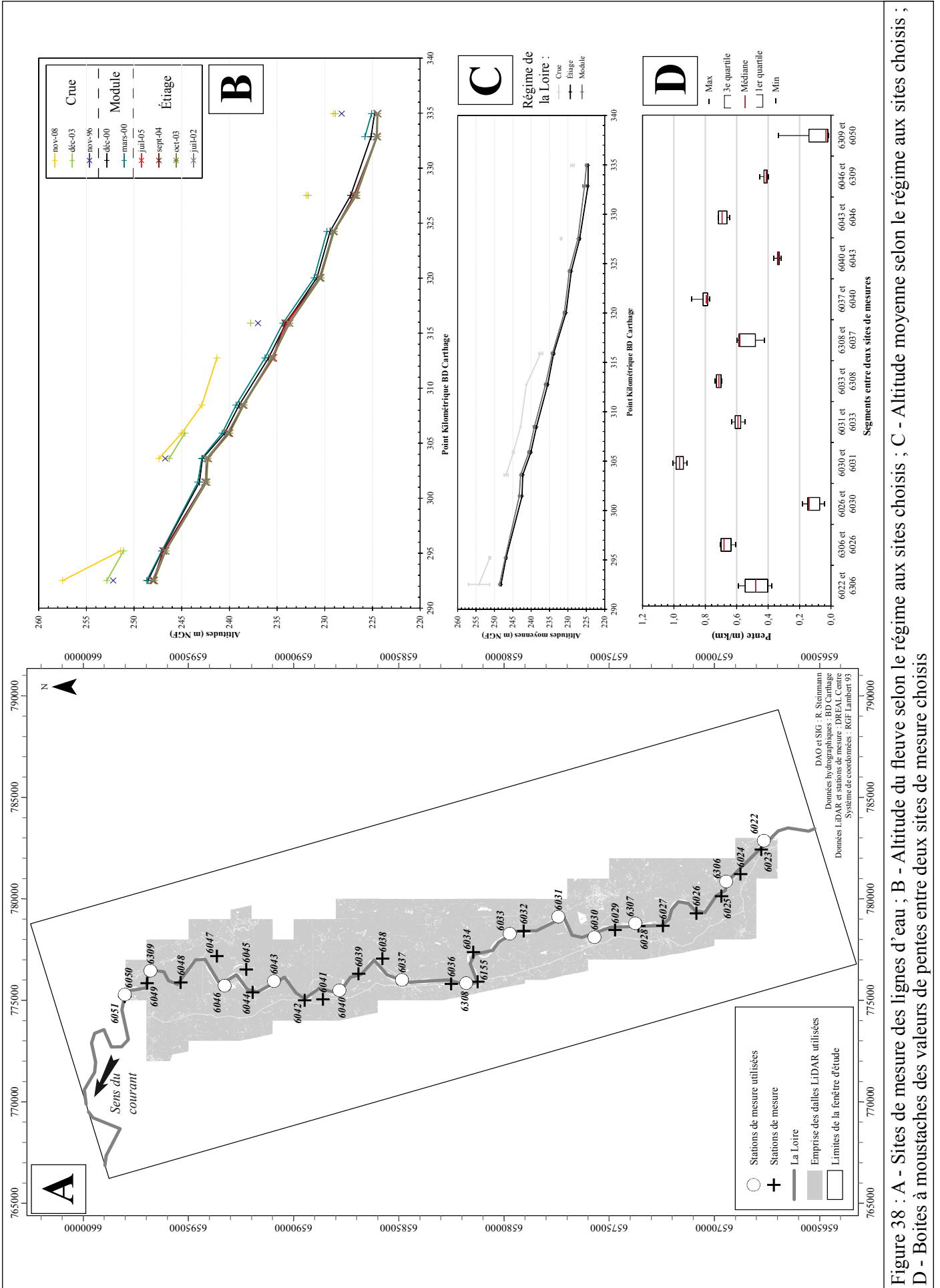


Figure 38 : A - Sites de mesure des lignes d'eau ; B - Altitude du fleuve selon le régime aux sites choisis ; C - Altitude moyenne selon le régime aux sites choisis ; D - Boîtes à moustaches des valeurs de pentes entre deux sites de mesure choisis

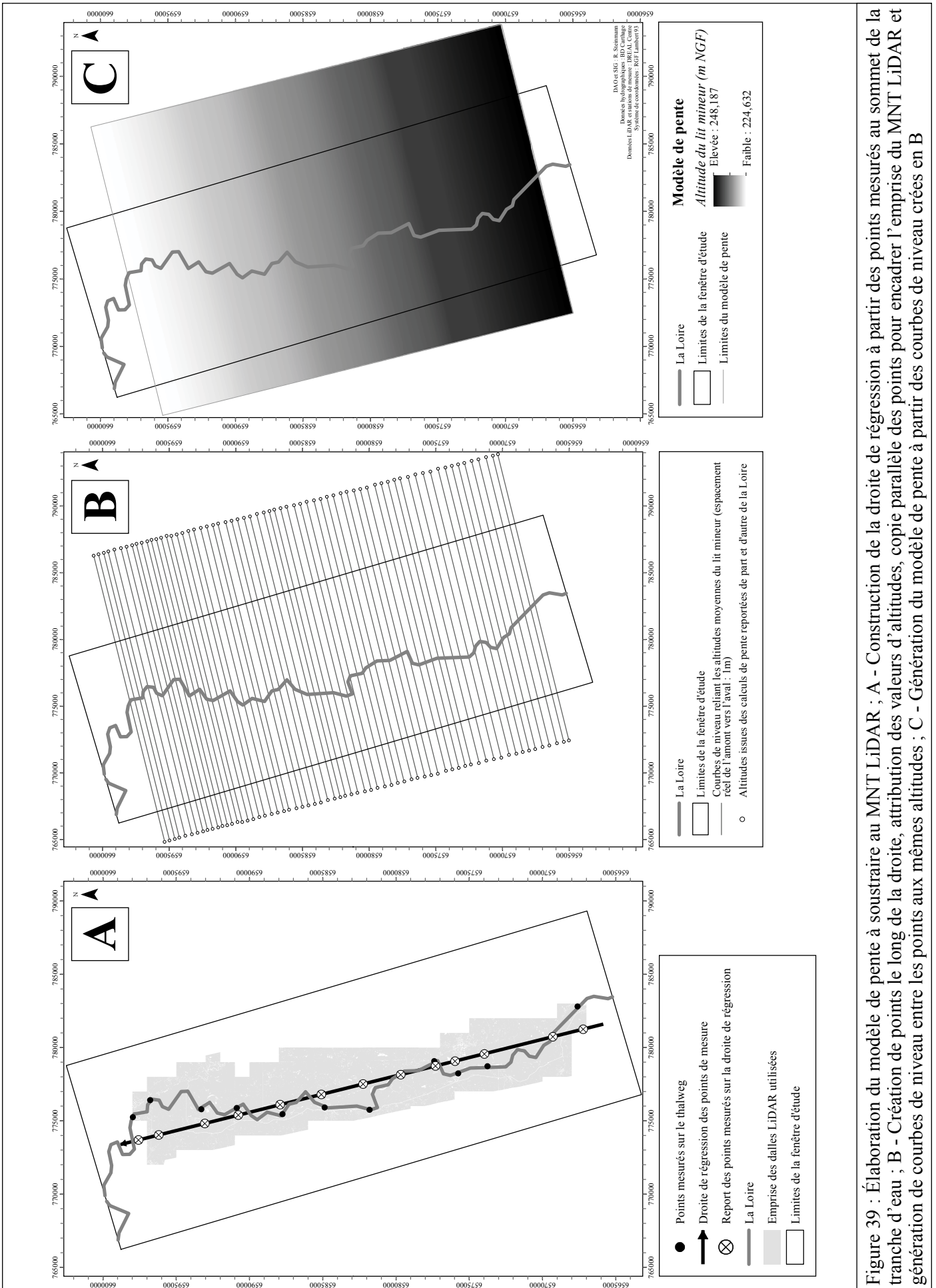


Figure 39 : Élaboration du modèle de pente à soustraire au MNT LiDAR ; A - Construction de la droite de régression à partir des points mesurés au sommet de la tranche d'eau ; B - Création de points le long de la droite, attribution des valeurs d'altitudes, copie parallèle des points pour encadrer l'emprise du MNT LiDAR et génération de courbes de niveau entre les points aux mêmes altitudes ; C - Génération du modèle de pente à partir des courbes de niveau créées en B

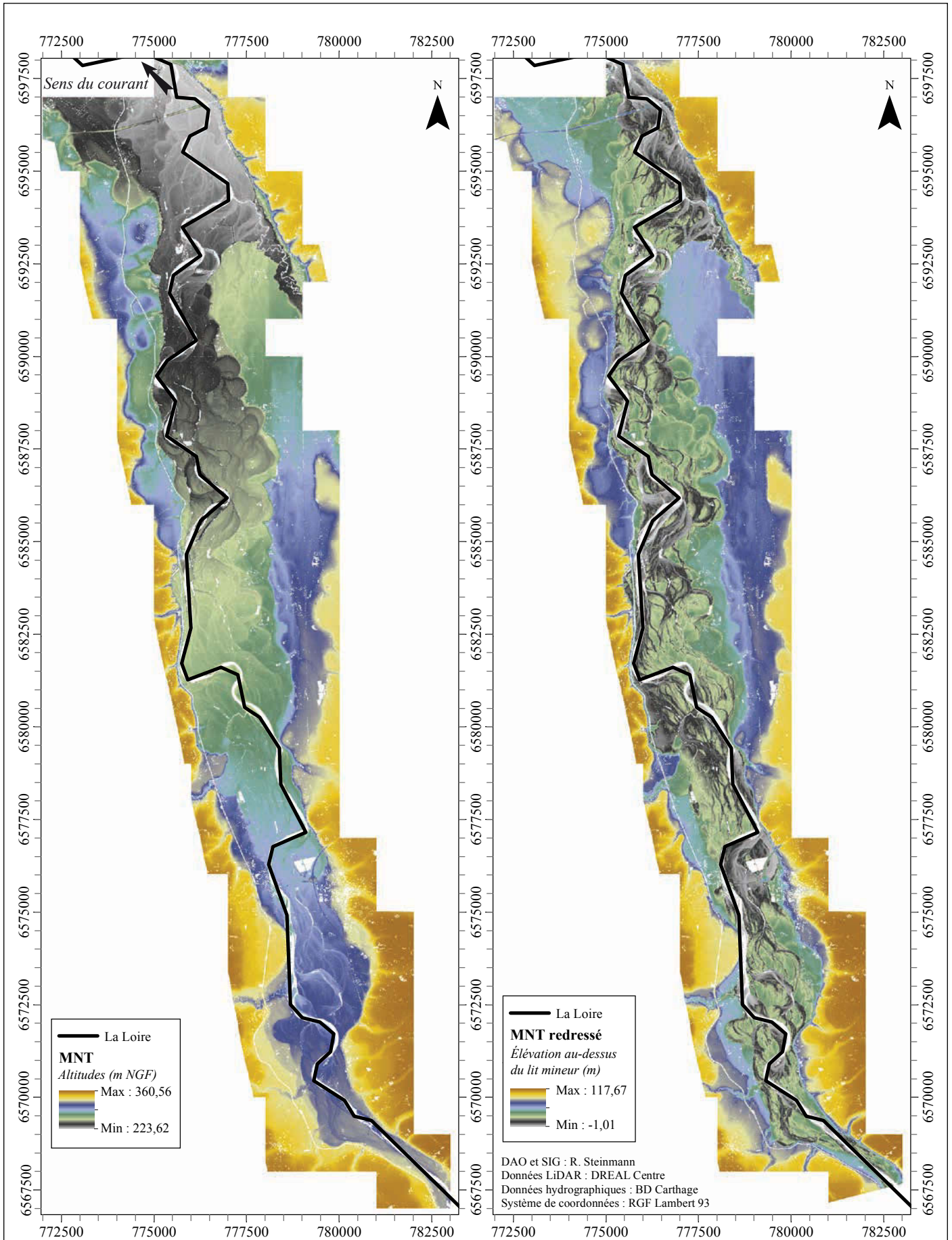


Figure 40 : MNT LiDAR avant (à gauche) et après (à droite) soustraction des altitudes moyennes du sommet de la tranche d'eau

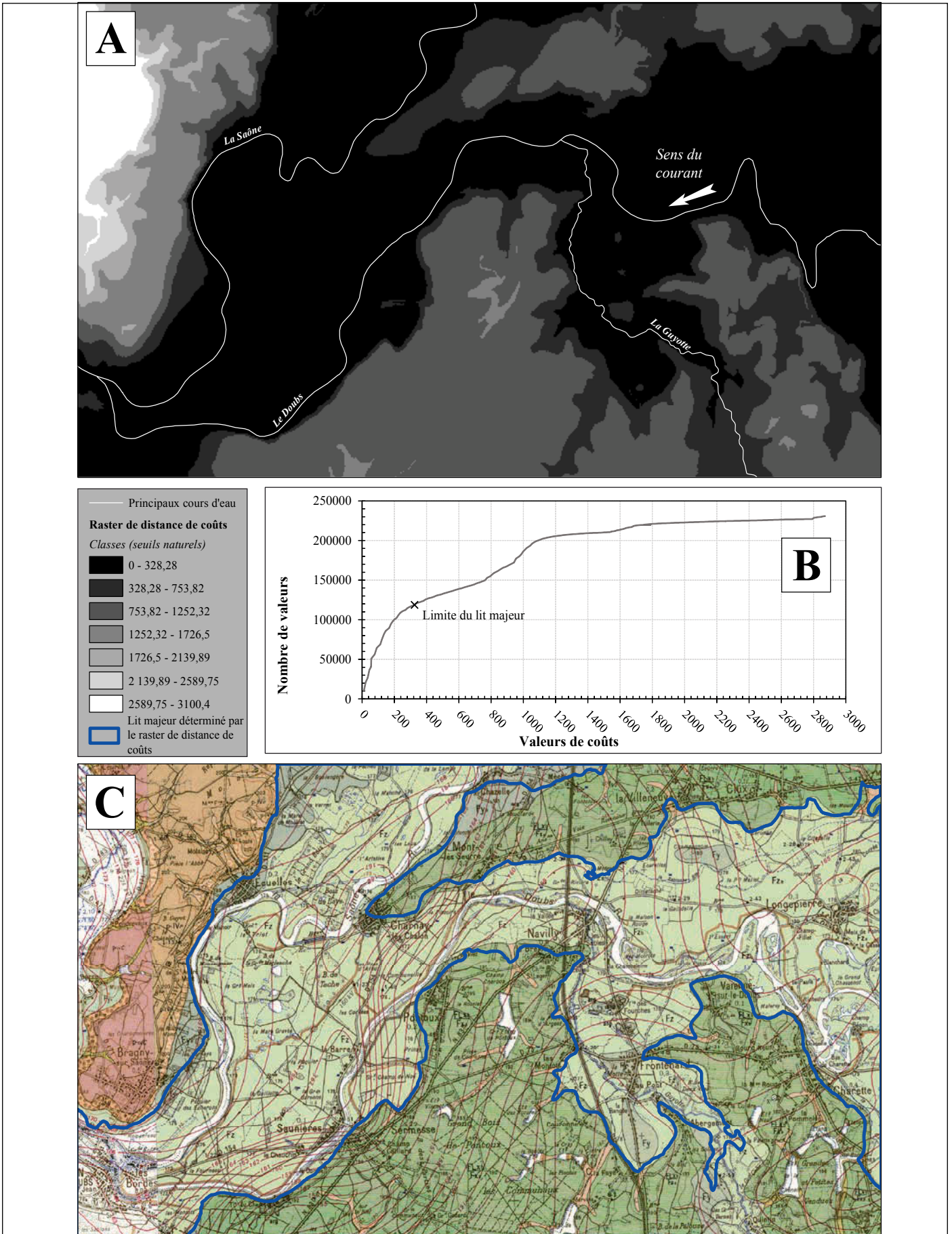


Figure 41 : A - Exemple de raster de distance de coût sur la fenêtre d'étude du Doubs aval ; B - Distribution cumulée des valeurs de distance de coût ; C - Comparaison des cartes géologiques et de la limite dessinée à partir du raster en A (Fleury 1982 ; Fleury et Clozier 1985)



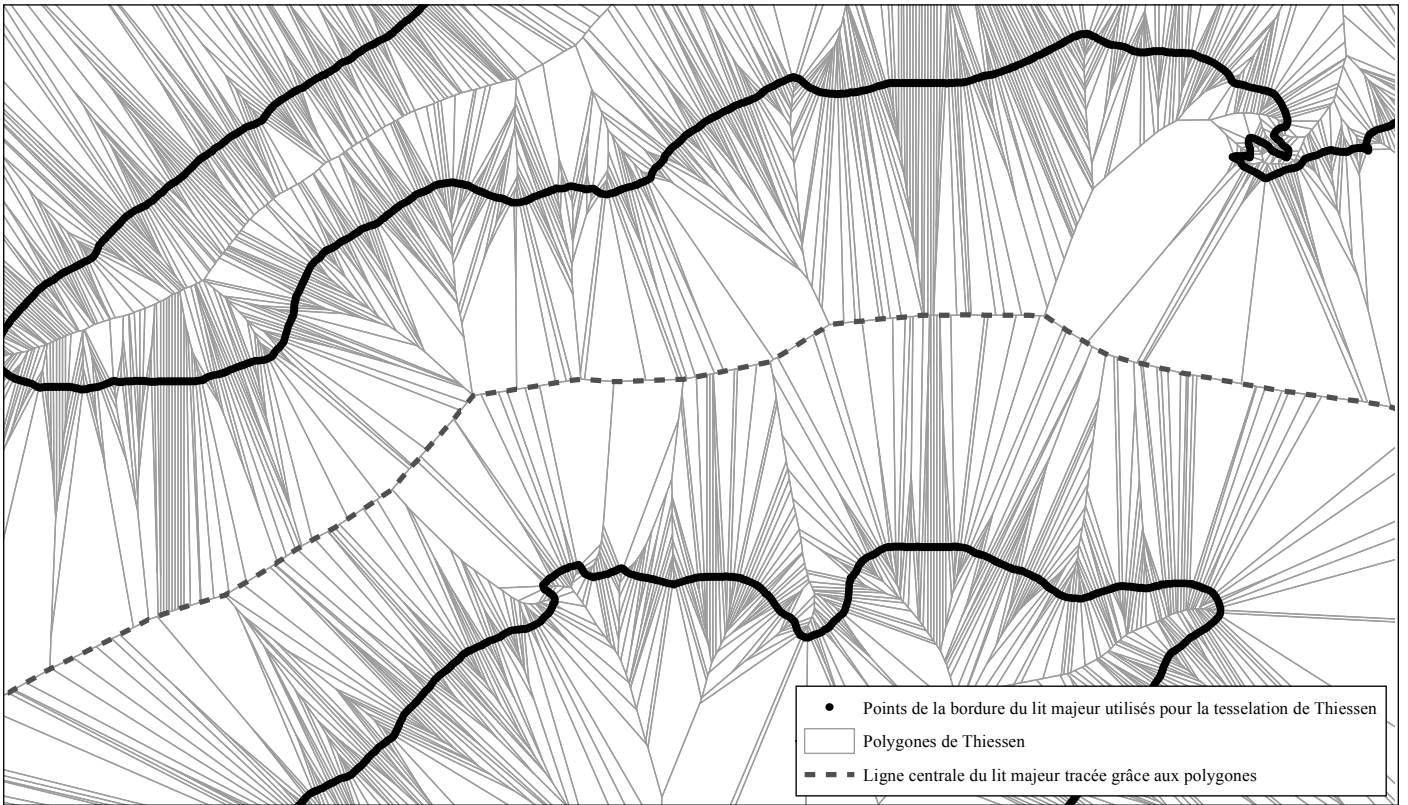


Figure 42 : Génération des polygones de Thiessen à partir des bordures du lit majeur et digitalisation de la ligne centrale

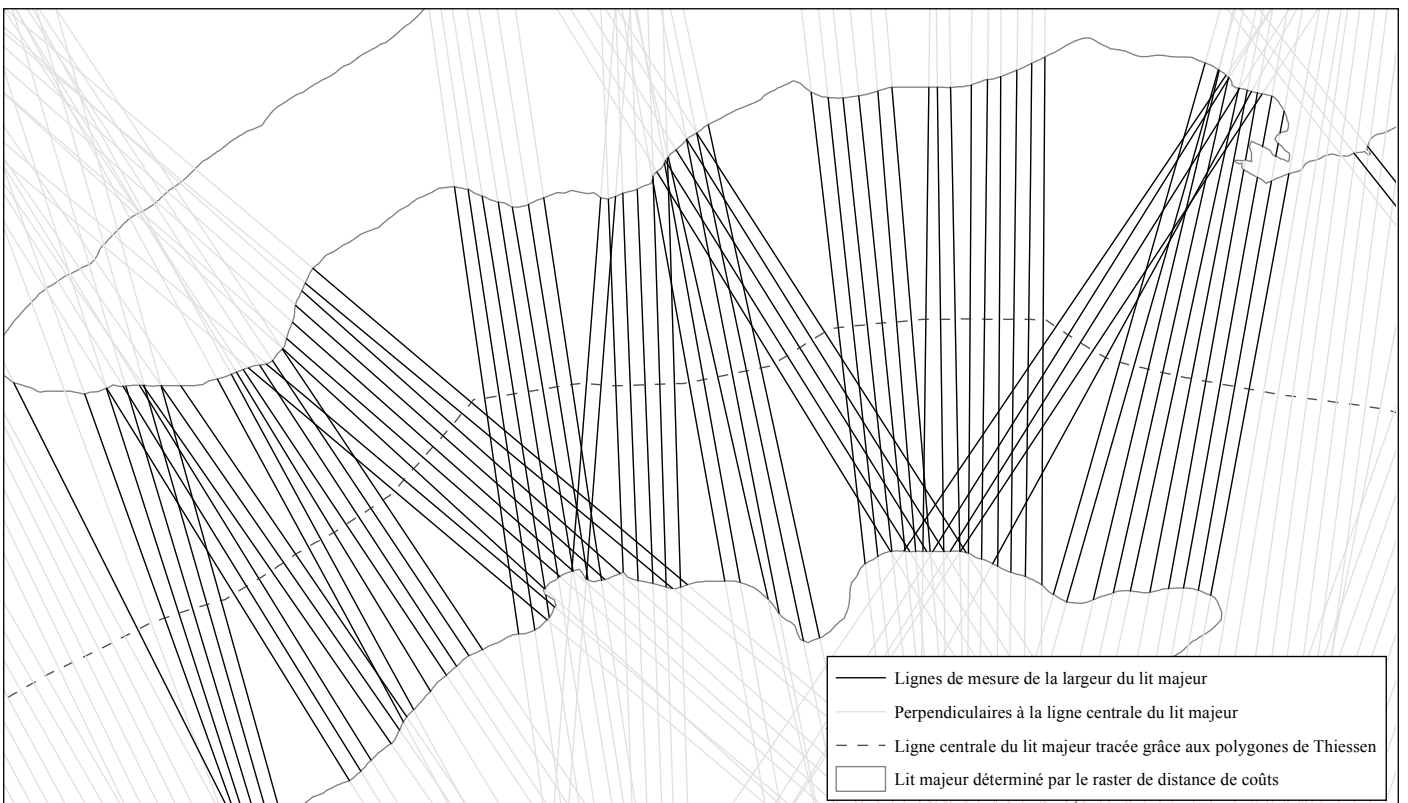


Figure 43 : Génération de perpendiculaires à la ligne centrale du lit majeur à intervalles réguliers ; découpage des lignes obtenues par l'emprise du lit majeur pour obtenir des mesures régulières de la largeur de ce dernier ; tri manuel pour exclure les mesures aberrantes (ici, à gauche et à droite, des surlargeurs dues à des zones de confluence)

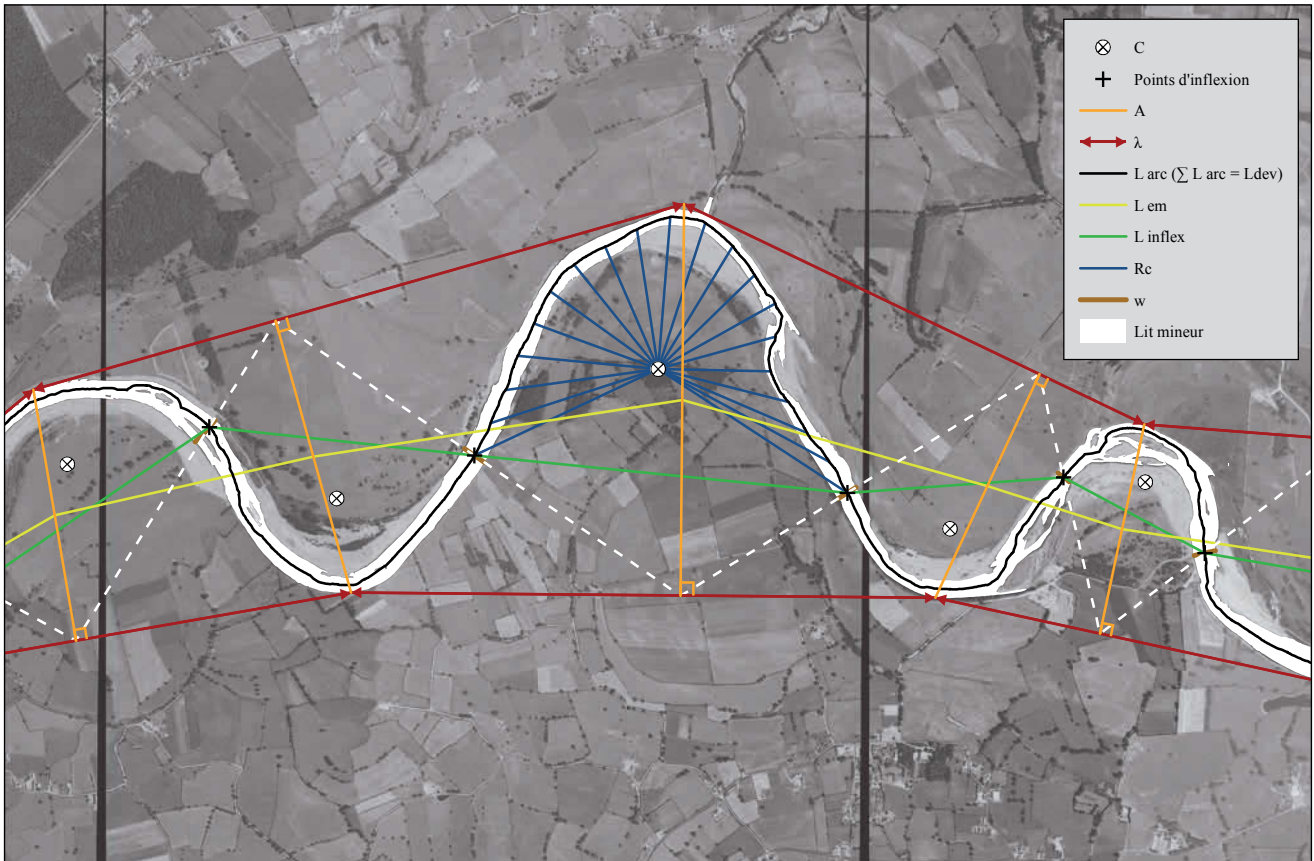
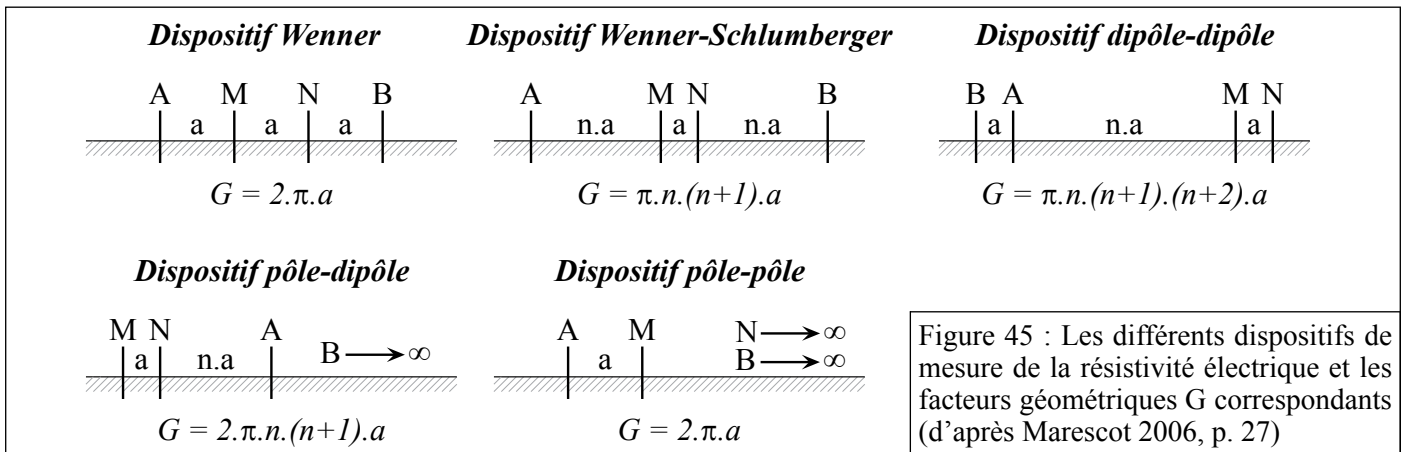
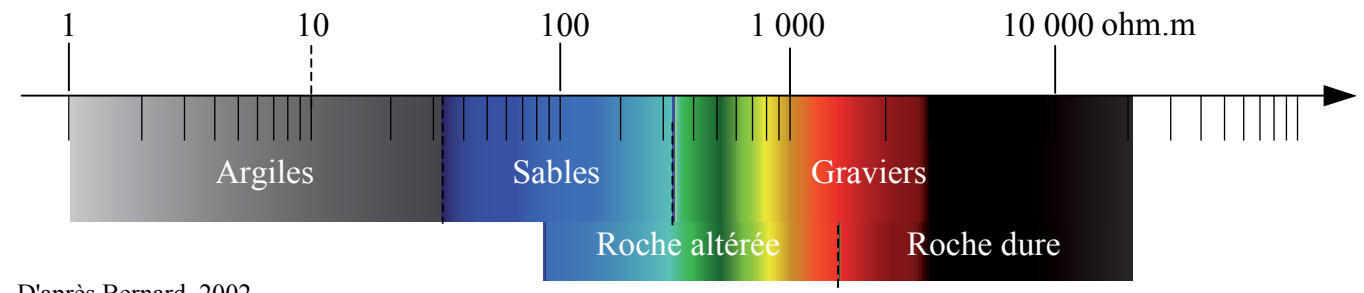


Figure 44 : Paramètres morphométriques mesurés à partir des tracés digitalisés



Paramètres \ Dispositif	<i>Wenner</i>	<i>Wenner-Schlumberger</i>	<i>dipôle-dipôle</i>	<i>pôle-pôle</i>	<i>pôle-dipôle</i>	Figure 46 : Qualités des différents paramètres de l'enregistrement de la résistivité électrique selon le dispositif choisi (d'après Samouëlian et al. 2005, p. 182) ; + : faible sensibilité ; ++++ : forte sensibilité
précision des structures horizontales du panneau	++++	++	+	++	++	
précision des structures verticales du panneau	+	++	++++	++	+	
profondeur d'investigation	+	++	+++	++++	+++	
couverture horizontale des données	+	++	+++	++++	+++	
force du signal	++++	+++	+	++++	++	

Échelle de la résistivité des matériaux du sous-sol



D'après Bernard, 2002

→ LA RESISTIVITE DES ROCHES DEPEND DE :

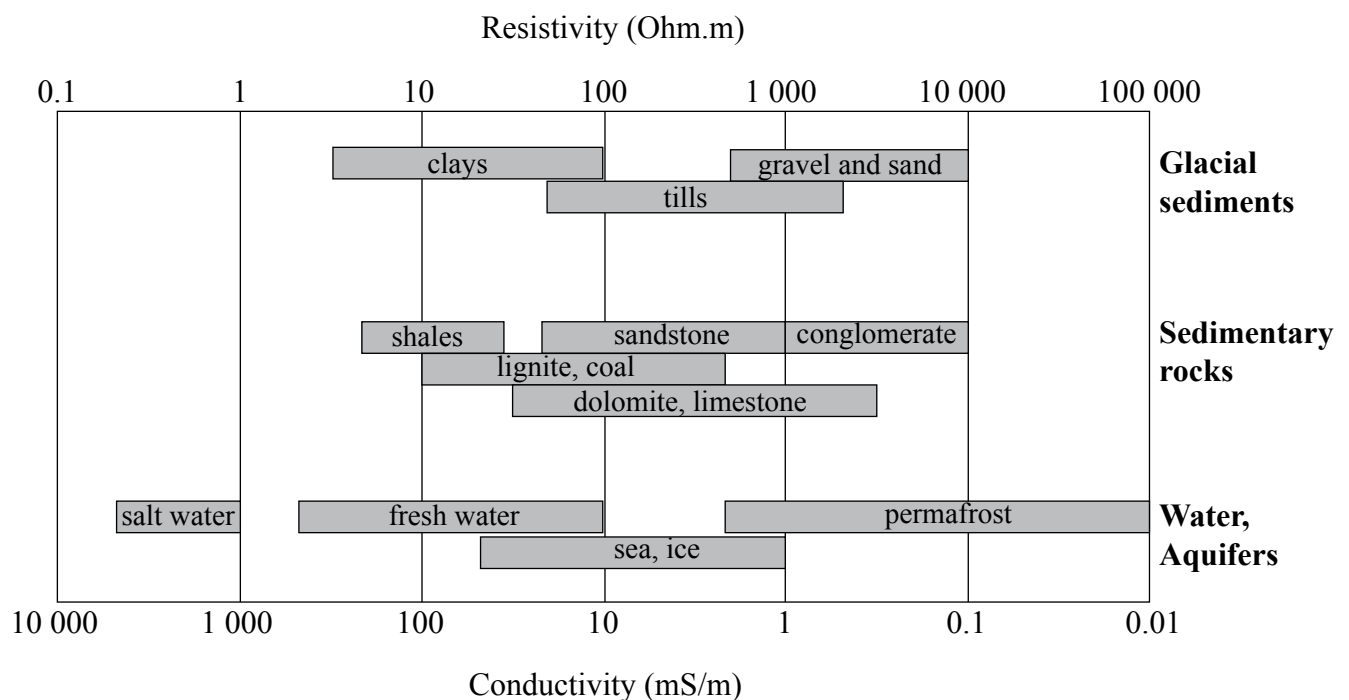
- LA TENEUR EN EAU (Porosité)
- LA RESISTIVITE DE L'EAU
- LA TENEUR EN ARGILE
- LA TENEUR EN MINERAUX METALLIQUES

→ VALEURS DE RESISTIVITE DES ROCHES :

0.1	ohm.m	eau salée
1	ohm.m	sulphures massifs
10	ohm.m	argile
100	ohm.m	sables, marnes
1 000	ohm.m	sable sec, calcaire
10 000	ohm.m	granite, basalte

D'après Bernard, 2002

Typical ranges of electrical resistivities of earth materials (after modified Palacky, 1987)



D'après Samouëlian *et al.* 2005

Figure 47 : Correspondances lithologiques et granulométriques des valeurs de résistivité apparente

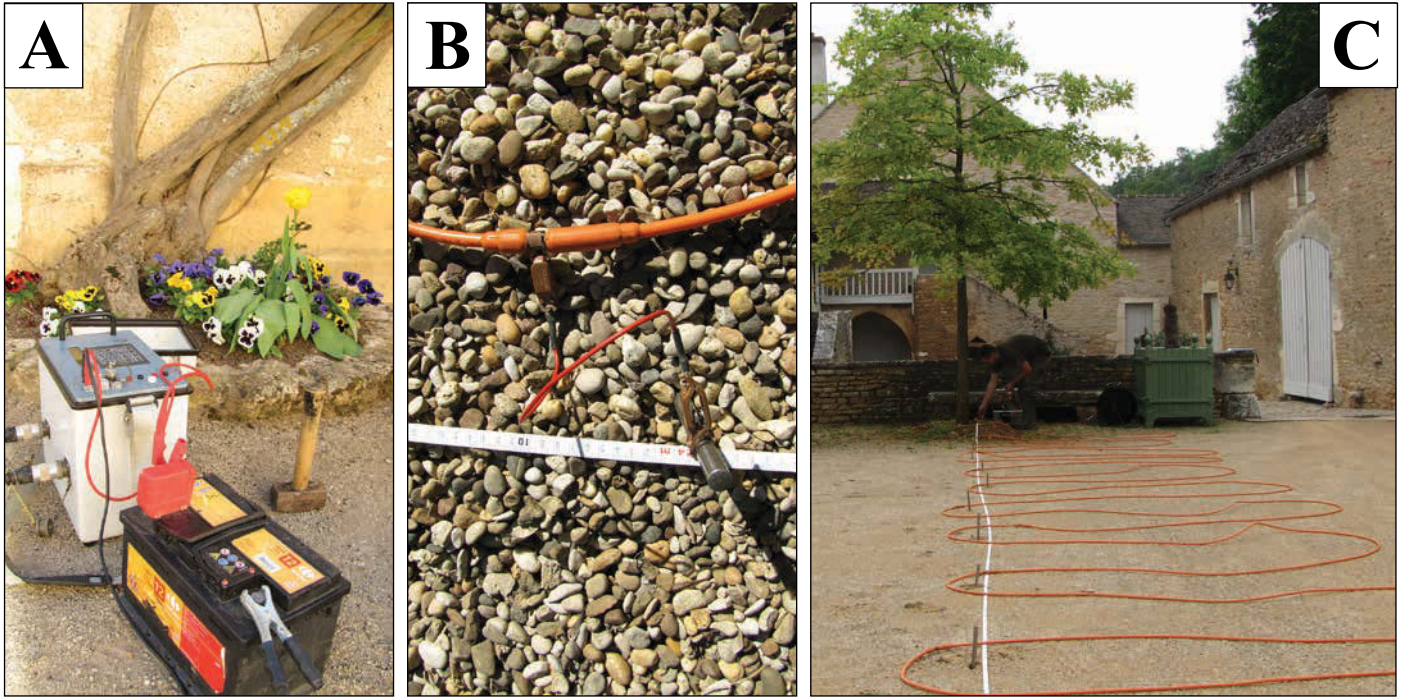


Figure 48 : Acquisition des profils de tomographie électrique (clichés M. Foucher) ; A - Console et batterie auxiliaire pour l'injection du courant ; B - électrode ; C - câble reliant les électrodes et la console



Figure 49 : Acquisition de la résistance en plan à l'aide d'un dispositif pôle-pôle (cliché R. Steinmann)

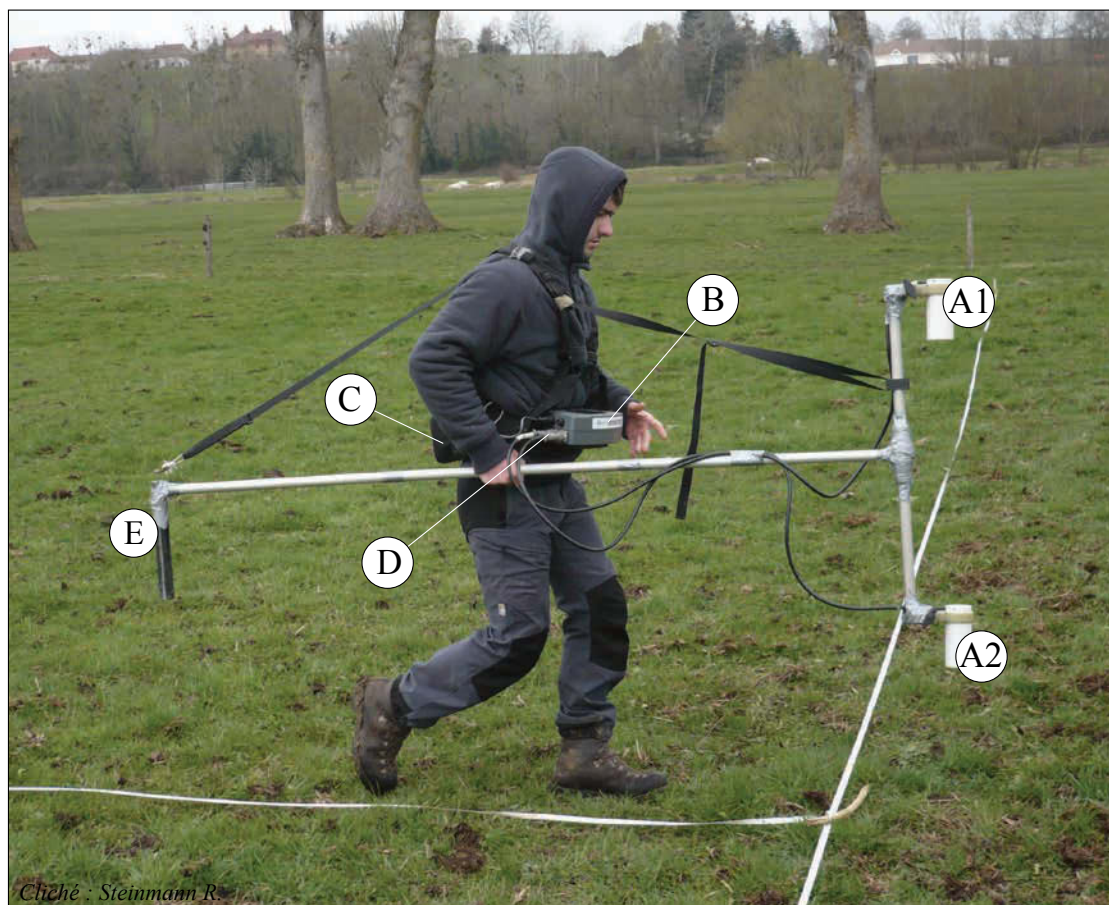


Figure 50 : Magné-  
tomètre à vapeur de  
césium G858 ; A1 -  
ampoule supérieure  
; A2 - ampoule infé-  
rieure ; B - console  
d'enregistrement et  
interface de paramé-  
trage ; C - batteries  
; D - connectiques  
d'alimentation des  
ampoules et d'ache-  
minement des don-  
nées ; E - contre-  
poids

*Cliché : Steinmann R.*

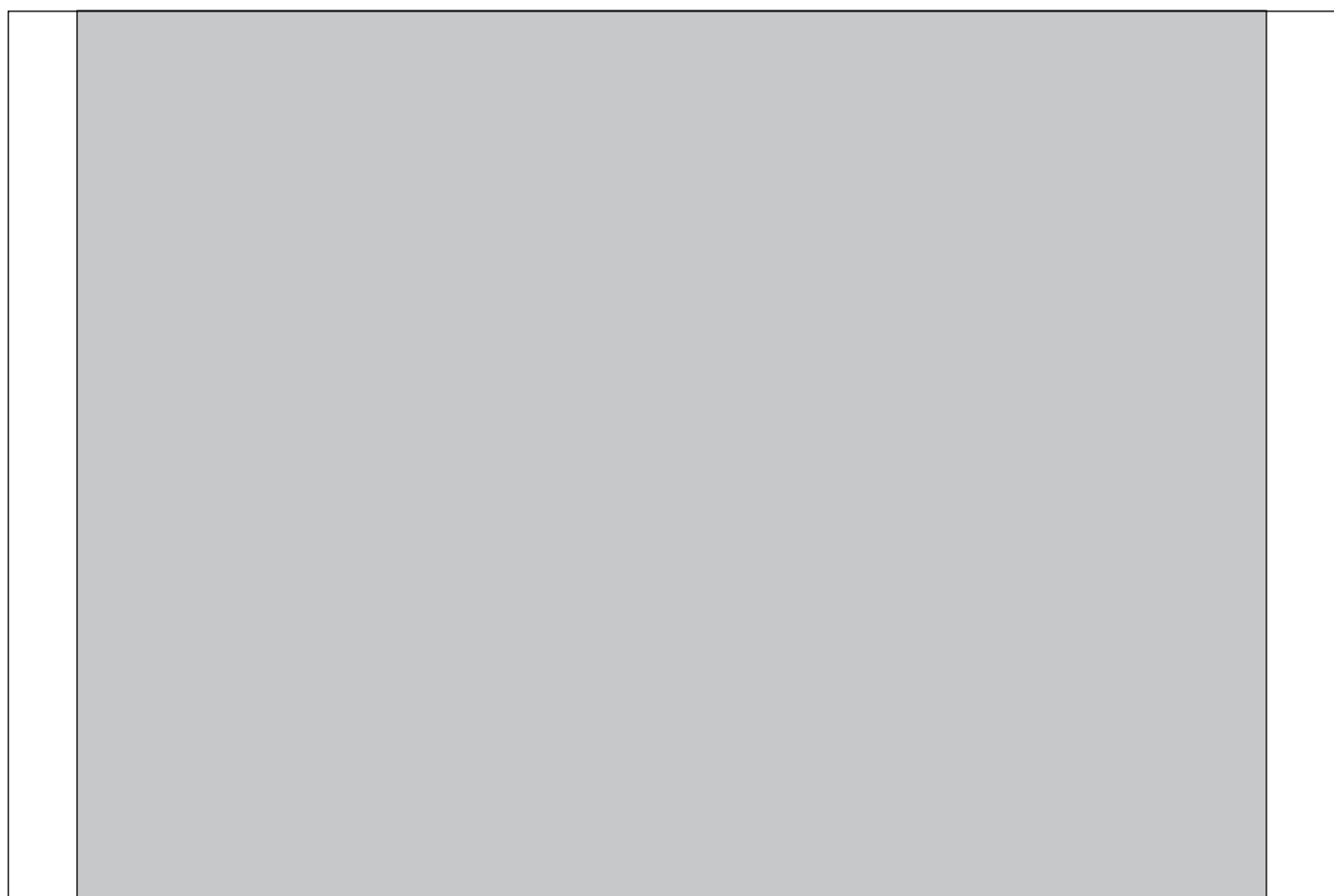


Figure 51 : Effets de quelques structures archéologiques sur le champ magnétique  $F$  à différentes latitudes (Breiner 1999, p. 48) ;  $k$  = susceptibilité magnétique par unité de volume

Figure 52 : Les différents lithofaciès (à gauche) composant les éléments architecturaux des dépôts alluviaux (à droite) ; d'après Miall 2006, pp. 79, 93 et 171

Element	Symbol	Principal facies assemblage	Geometry and relationships
Channels	CH	Any combination	Finger, lens or sheet ; concave-up erosional base ; scale and shape highly variable ; internal concave-up 3rd-order erosion
Gravel bars and bedforms	GB	Gm, Gp, Gt	Lens, blanket ; usually tabular bodies ; commonly interbedded with SB
Sandy bedforms	SB	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lens, sheet, blanket, wedge, occurs as channel fills, crevasse splays, minor bars
Downstream-accretion macroform	DA	St, Sp, Sh, Sl, Sr, Se, Ss	Lens resting on flat or channeled base, with convex-up 3rd-order internal erosion surfaces and upper 4th-order bounding surface
Lateral-accretion macroform	LA	St, Sp, Sh, Sl, Se, Ss, less commonly Gm, Gt, Gp	Wedge, sheet, lobe ; characterized by internal lateral-accretion 3rd-order surfaces
Scour hollows	HO	Gh, Gt, St, Sl	Scoop-shaped hollow with asymmetric fill
Sediment gravity flows	SG	Gmm, Gmg, Gci, Gcm	Lobe, sheet, typically interbedded with GB
Laminated sand sheet	LS	Sh, Sl ; minor Sp, Sr	Sheet, blanket
Overbank fines	FF	Fm, Fl	Thin to thick blankets ; commonly interbedded with SB ; may fill abandoned channels

Clastic architectural elements of the overbank environment

Element	Symbol	Lithology	Geometry	Interpretation
Levee	LV	Fl	Wedge up to 10 m thick, 3 km wide	Overbank flooding
Crevasse channel	CR	St, Sr, Ss	Ribbon up to a few hundred m wide, 5 m deep, 10 km long	Break in main channel margin
Crevasse splay	CS	St, Sr, Fl	Lens up to 10 x 10 km across, 2-6 m thick	Delta-like progradation from crevasse channel into floodplain
Floodplain fines	FF	Fsm, Fl, Fm, Fr	Sheet, may be many km in lateral dimensions, 10s of m thick	Deposits of overbank sheet flow, floodplain ponds and swamps
Abandoned channel	CH(FF)	Fsm, Fl, Fm, Fr	Ribbon comparable in scale to active channel	Product of chute or neck cutoff

Facies code	Facies	Sedimentary structures	Interpretation
Gmm	Matrix-supported, massive gravel	Weak grading	Plastic debris flow (high-strength, viscous)
Gmg	Matrix-supported gravel	Inverse to normal grading	Pseudoplastic debris flow (low strength, viscous)
Gci	Clast-supported gravel	Inverse grading	Clast-rich debris flow (high strength), or pseudoplastic debris flow (low strength)
Gcm	Clast-supported massive gravel	-	Pseudoplastic debris flow (inertial bedload, turbulent flow)
Gh	Clast-supported, crudely bedded gravel	Horizontal bedding, imbrication	Longitudinal bedforms, lag deposits, sieve deposits
Gt	Gravel, stratified	Trough cross-beds	Minor channel fills
Gp	Gravel, stratified	Planar cross-beds	Transverse bedforms, deltaic growths from older bar remnants
St	Sand, fine to very coarse, may be pebbly	Solitary or grouped trough cross-beds	Simuous-crested and linguoid (3-D) dunes
Sp	Sand, fine to very coarse, may be pebbly	Solitary or grouped planar cross-beds	Transverse and linguoid bedforms (2-D dunes)
Sr	Sand, very fine to coarse	Ripple cross-lamination	Ripples (lower flow regime)
Sh	Sand, very fine to coarse, may be pebbly	Horizontal lamination parting or streaming lineation	Plane-bed flow (critical flow)
Sl	Sand, very fine to coarse, may be pebbly	Low-angle (< 15°) cross-beds	Scour fills, humpback or washed-out dunes, antidunes
Ss	Sand, fine to very coarse, may be pebbly	Broad, shallow scours	Scour fill
Sm	Sand, fine to coarse	Massive, or faint lamination	Sediment-gravity flow deposits
Fl	Sand, silt, mud	Fine lamination, very small ripples	Overbank, abandoned channel, or waning flood deposits
Fsm	Silt, mud	Massive	Backswamp or abandoned channel deposits
Fm	Mud, silt	Massive, desiccation cracks	Overbank, abandoned channel, or drape deposits
Fr	Mud, silt	Massive, roots, bioturbation	Root bed, incipient soil
c	Coal, carbonaceous mud	Plant, mud films	Vegetated swamp deposits
p	Paleosol carbonate (calcite, siderite)	Pedogenic features: nodules, filaments	Soil with chemical precipitation

Grp	Time scale of process (a)	Examples of processes	Instantaneous sedimentation rate (m/ka)	Fluvial, deltaic depositional units	Rank and characteristics of bounding surfaces
1	10 <sup>-6</sup>	Burst-sweep cycle		Lamina	0th-order lamination surface
2	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-4</sup>	Bedform migration	10 <sup>5</sup>	Ripple (macroform)	1st-order, set bounding surface
3	10 <sup>-3</sup>	Bedform migration	10 <sup>5</sup>	Diurnal dune increment, reactivation surface	1st-order, set bounding surface
4	10 <sup>-2</sup> - 10 <sup>-1</sup>	Bedform migration	10 <sup>4</sup>	Dune (mesoform)	2nd-order, coset bounding surface
5	10 <sup>0</sup> - 10 <sup>1</sup>	Seasonal events, 10-years flood	10 <sup>2-3</sup>	Macroform growth increment	3rd-order, dipping 5-20° in direction of accretion
6	10 <sup>2</sup> - 10 <sup>3</sup>	100-year flood, channel and bar migration	10 <sup>2-3</sup>	Macroform, e.g., point bar, levee, splay, immature paleosol	4th-order, convex-up macroform top, minor channel scour, flat surface bounding floodplain elements
7	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>4</sup>	Long-term geomorphic processes, e.g. channel avulsion	10 <sup>0</sup> - 10 <sup>1</sup>	Channel, delta lobe, mature paleosol	5th-order, flat to concave-up channel base
8	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	5th-order (Milankovitch) cycles, response to fault-pulse	10 <sup>-1</sup>	Channel belt, alluvial fan, minor sequence	6th-order, flat, regionally extensive, or base of incised valley
9	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>	4th-order (Milankovitch) cycles, response to fault pulse	10 <sup>-1</sup> - 10 <sup>-2</sup>	Major dep. System, fan tract, sequence	7th-order, sequence boundary ; flat, regionally extensive, or base of incised valley
10	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup>	3rd-order cycles, Tectonics and eustatic processes	10 <sup>-1</sup> - 10 <sup>-2</sup>	Basin-fill complex	8th-order, regional disconformity

Figure 53 : Éléments architecturaux constitutifs des dépôts alluviaux selon le style du cours d'eau (à gauche) et échelles de temps des processus sédimentaires en milieu alluvial (à droite) ; d'après Miall 2006, pp. 82 et 199-200

Style name	Sinuosity <sup>1</sup>	Braiding parameter <sup>2</sup>	Sediment type	Characteristic elements <sup>3</sup>
Gravel braided with sediment-gravity flows	Low	High	Gravel, minor sand	SG, (GB, SB)
Shallow gravel braided "Scott type"	Low	High	Gravel, minor sand	GB, (SB)
Deep gravel braided "Donjek type"	Low to int.	Int. To high	Gravel, minor sand, fines	GB, SB, DA, (FF)
Gravel wandering	Int. To high	Int.	Gravel, minor sand, fines	GB, DA, LA, (SB, FF)
Gravel meandering	High	Low to int.	Gravel, minor sand, fines	GB, LA, FF, (SB)
2 - Sand-dominated, high sinuosity rivers				
Gravel-sand meandering (the "coarse-grained meandering" model)	Int. To high	Low to int.	Sand, pebbly	SB, LA, FF, (GB)
Sandy meandering (the "classic" meandering model)	High	Low	Sand, minor fines	LA, SB, FF, LV, CR, CS, FF, (CH)
Ephemeral sandy-meandering	High	Low	Sand, minor fines	LA, SB, (FF)
Fine-grained meandering	High	Low	Fine sand, silt, mud	LA, SB, FF, LV, CR, CS, FF, (CH)
Anastomosed	Low to high	High	Sand, fines	SB, CH, (LA), FF, LV, CR, CS
3 - Sand-dominated, low-sinuosity rivers				
Low sinuosity braided-meandering with alternate bars	Low	Low	Sand	DA-LA, SB, FF
hallow perennial braided "Platte type"	Low to int.	High	Sand	SB, (FF)
Deep perennial braided "S. Saskatchewan type"	Low to int.	Int. To high	Sand, minor fines	DA, LA, SB, (FF)
High-energy, sand-bed braided	Low to int.	Int. To high	Sand, minor fines	DA, SB, HO, (FF)
Sheetflood distal braided	Low	High	Sand, minor fines	SB, (FF)
Flashy, ephemeral sheetflood "Bijou Creek type"	Low	High	Sand, minor fines	LS, (FF)

1 : low < 1,2 ; intermediate 1,2 to 1,5 ; high > 1,5

2 : low < 1 ; intermediate 1 to 3 ; high > 3

3 : () = minor components ; CH only if in significant proportion

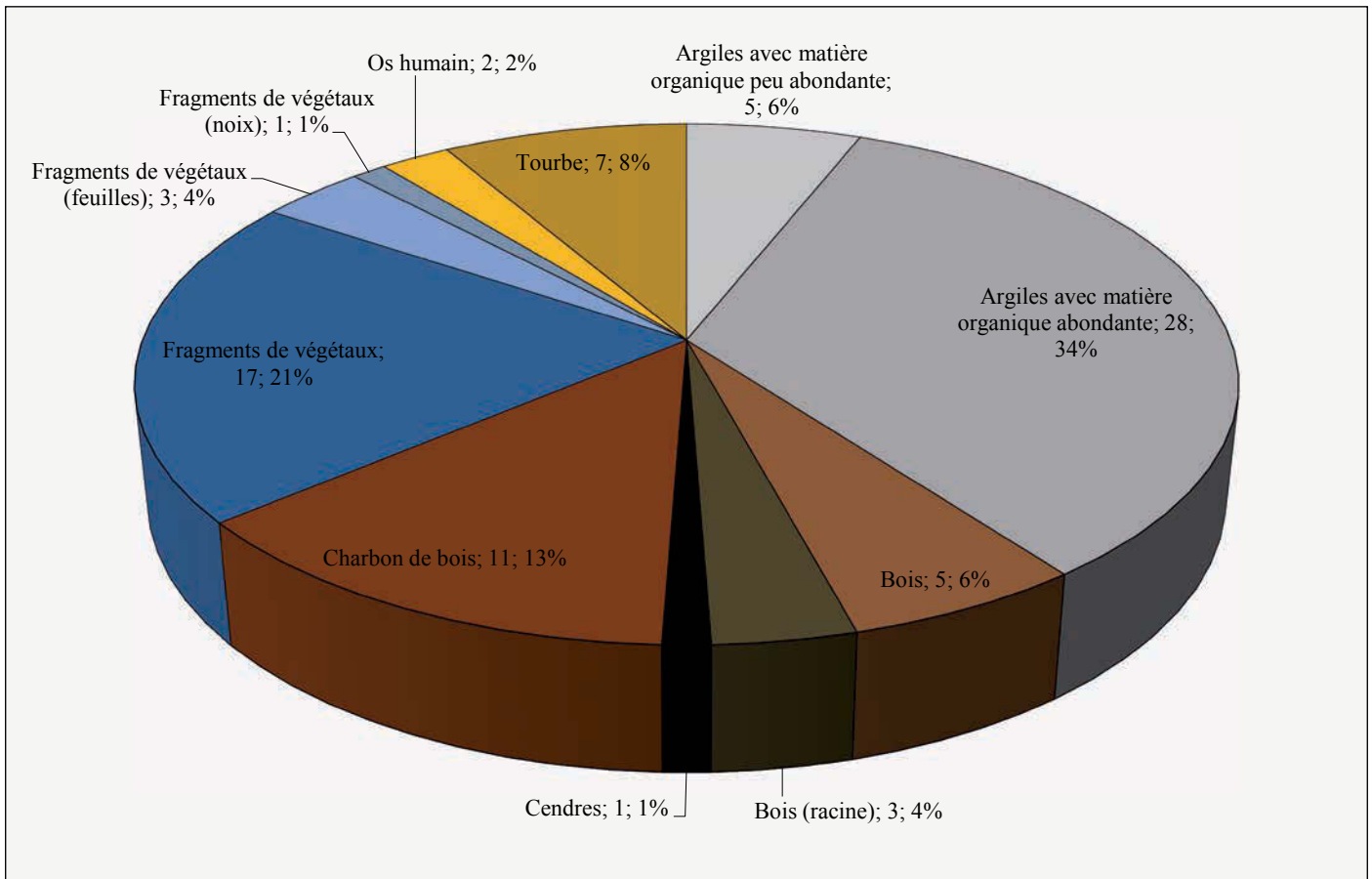


Figure 54 : Natures des échantillons ayant fait l'objet d'une datation radiocarbone dans le cadre de cette étude

<b>Ferromagnetic</b>	Strong positive resistivity <i>e.g; pure iron, nickel, chromium</i>
<b>Ferrimagnetic</b>	Strong positive resistivity <i>Some iron oxides and sulphides, e.g. magnetite, maghemite, pyrrhotite, greigite</i>
<b>Canted antiferromagnetic</b>	Moderate positive susceptibility <i>Some iron oxides, e.g. hematite, goethite</i>
<b>Paramagnetic</b>	Weak positive susceptibility <i>Many Fe-containing minerals and salts, e.g. biotite, olivine, ferrous sulphate</i>
<b>Diamagnetic</b>	Weak negative susceptibility <i>e.g. water, organic matter, plastics, quartz, feldspars, calcium carbonate</i>

Figure 55 : Susceptibilité magnétique des matériaux en fonction de leur comportement magnétique (d'après Dearing 1999, p. 38)



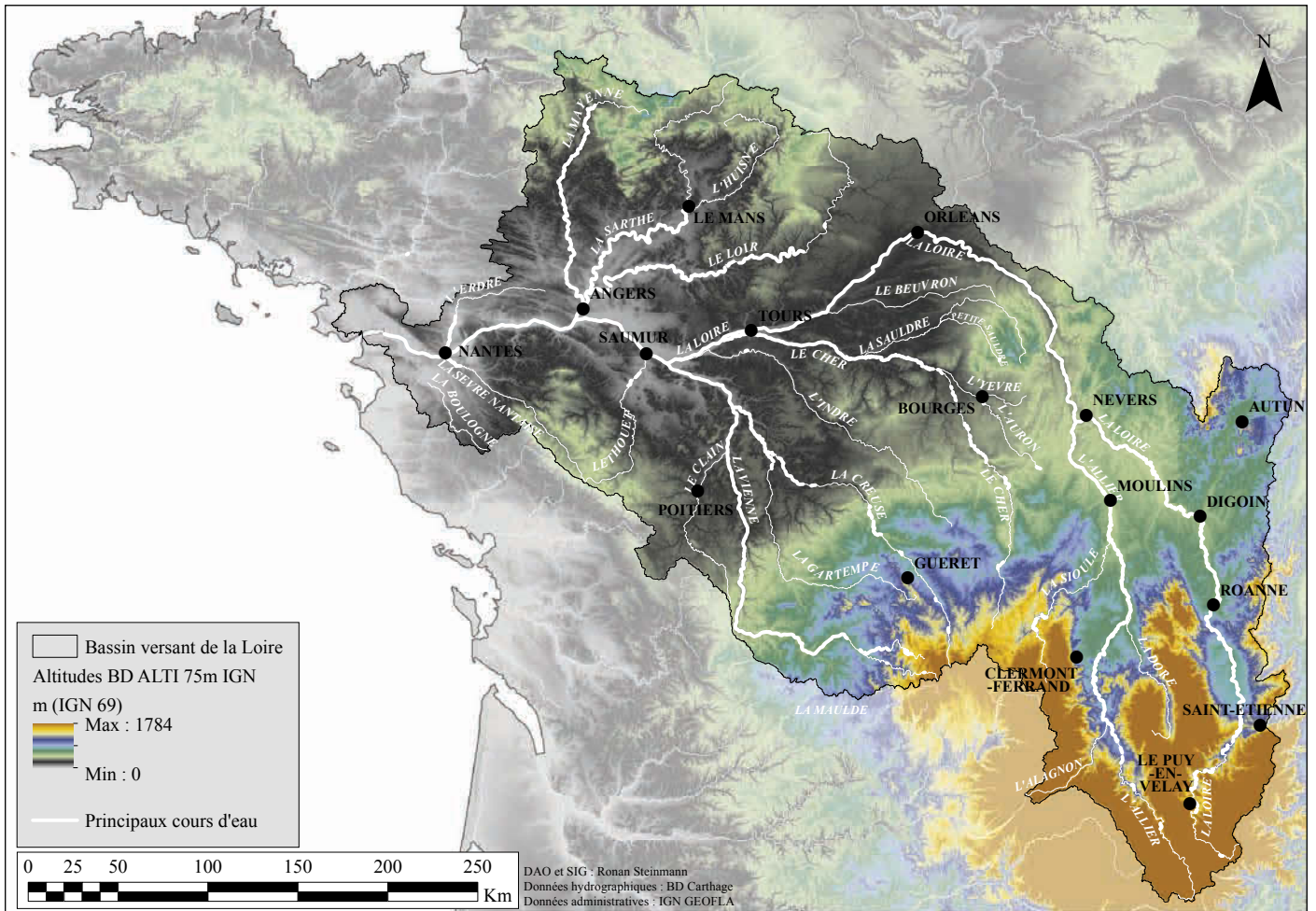


Figure 56 : Topographie du bassin versant de la Loire

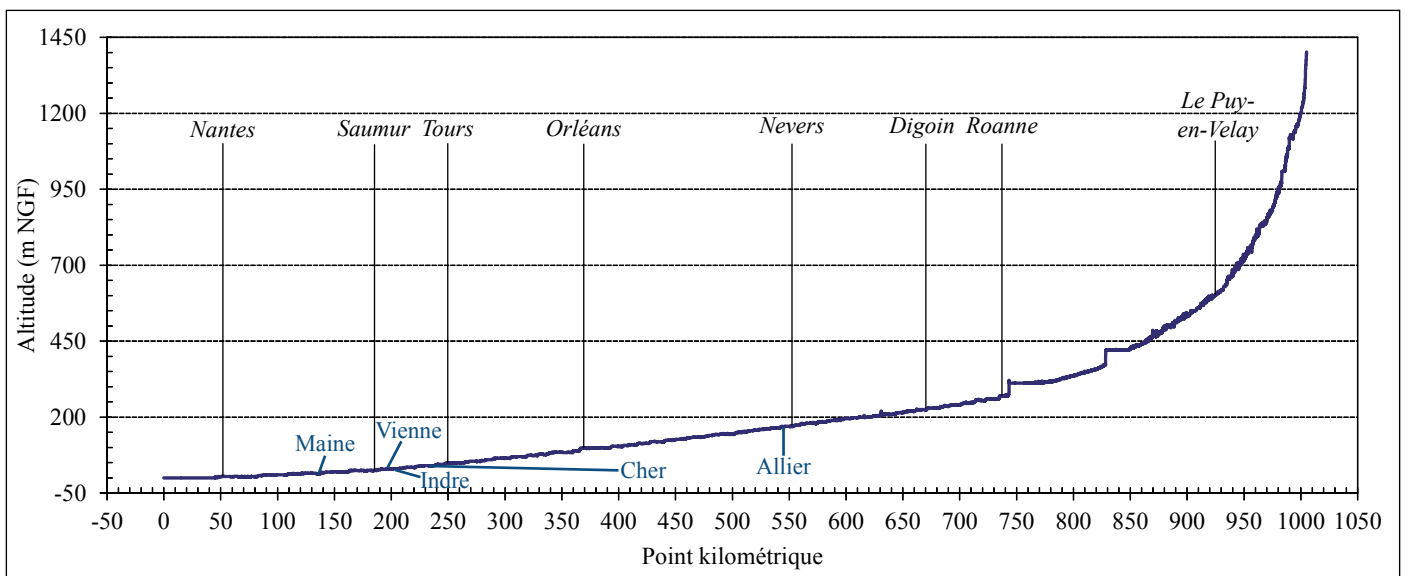
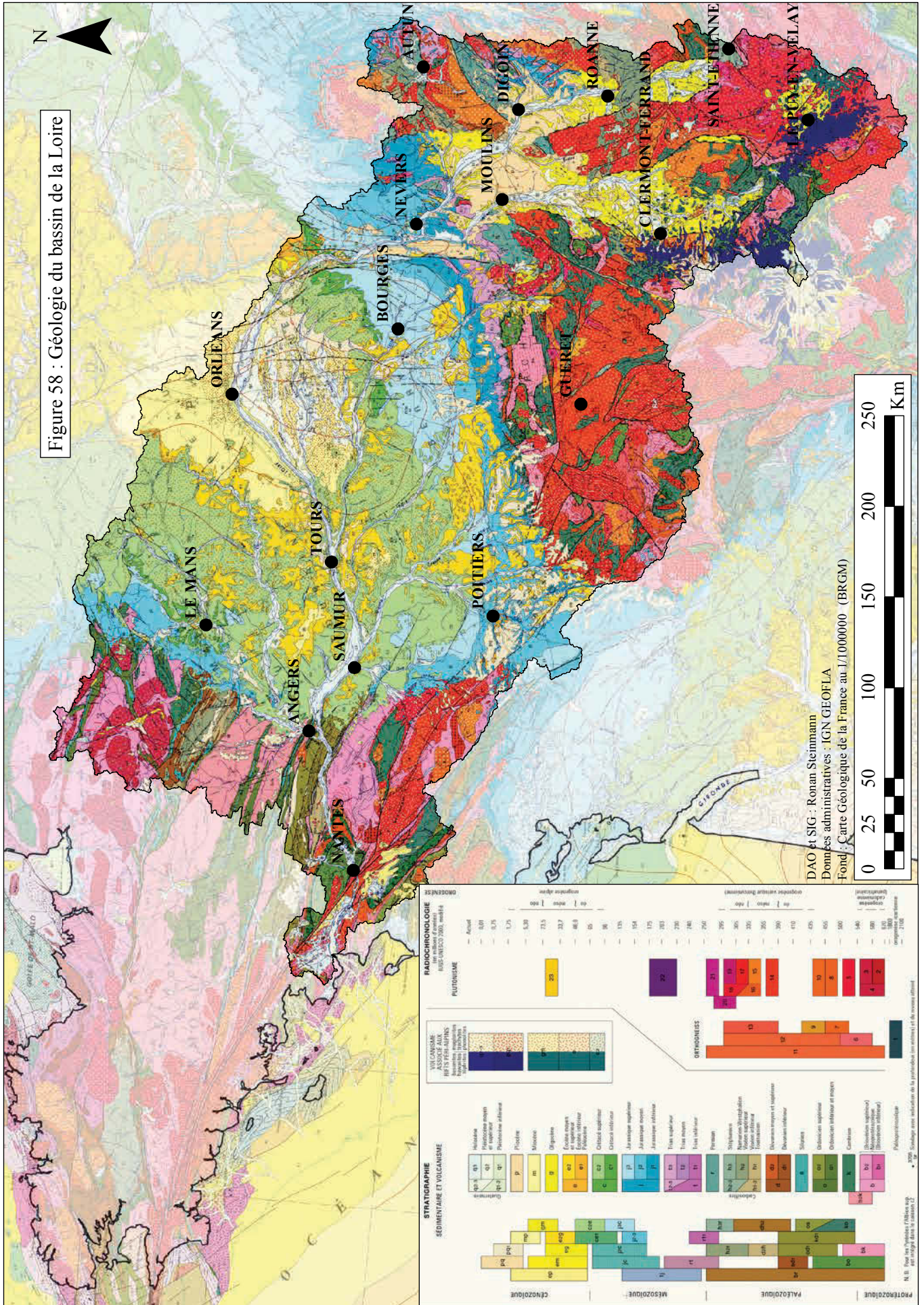


Figure 57 : Profil longitudinal de la Loire avec les emplacements des principaux affluents et agglomérations



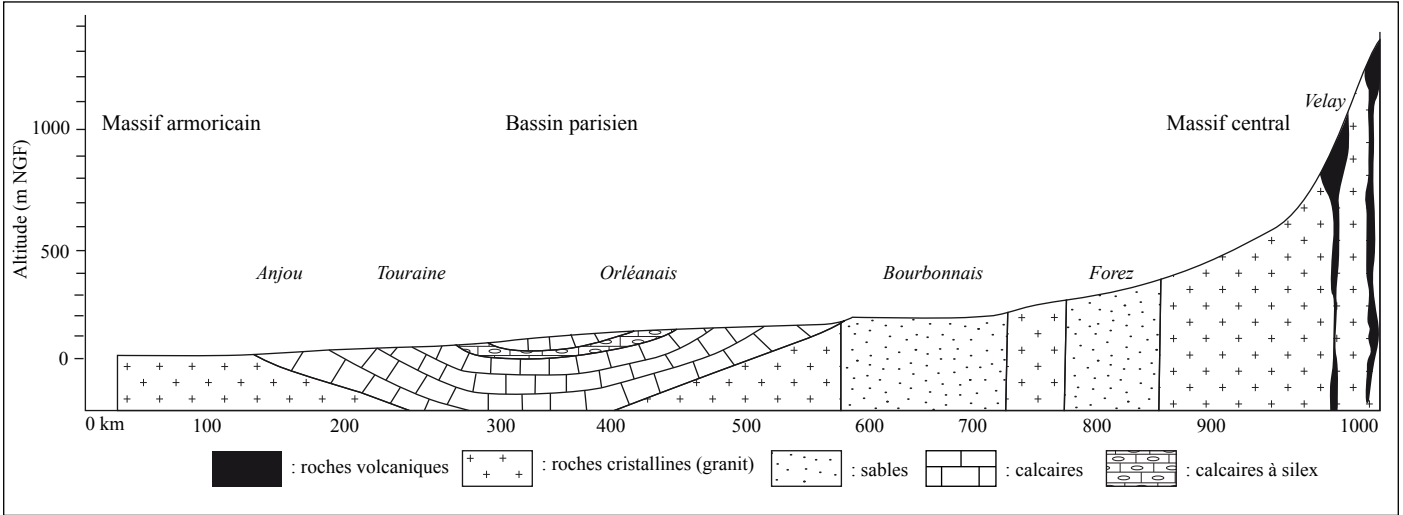


Figure 59 : Principales lithologies le long du profil de la Loire (d'après Lino *et al.* 2000)

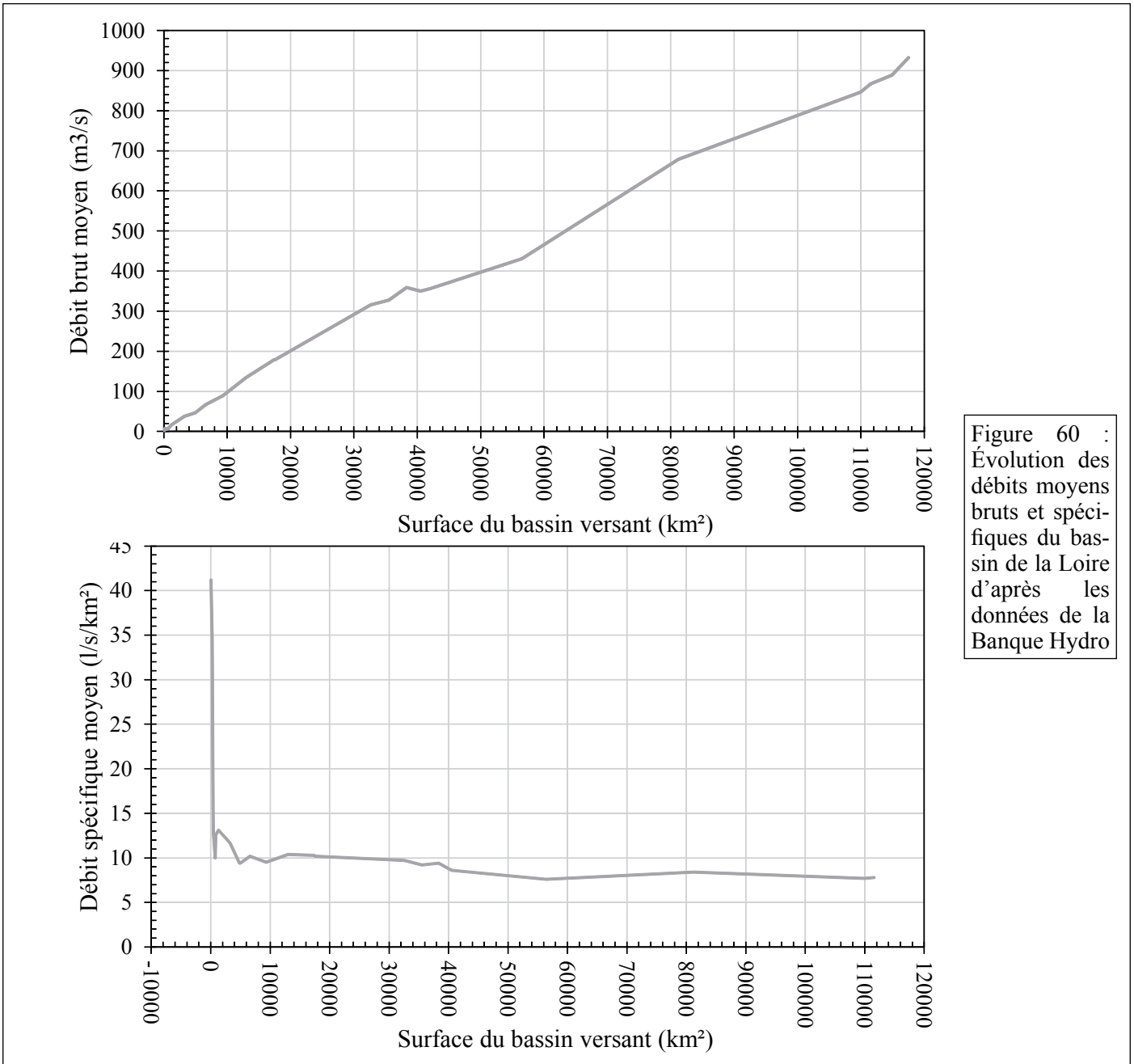
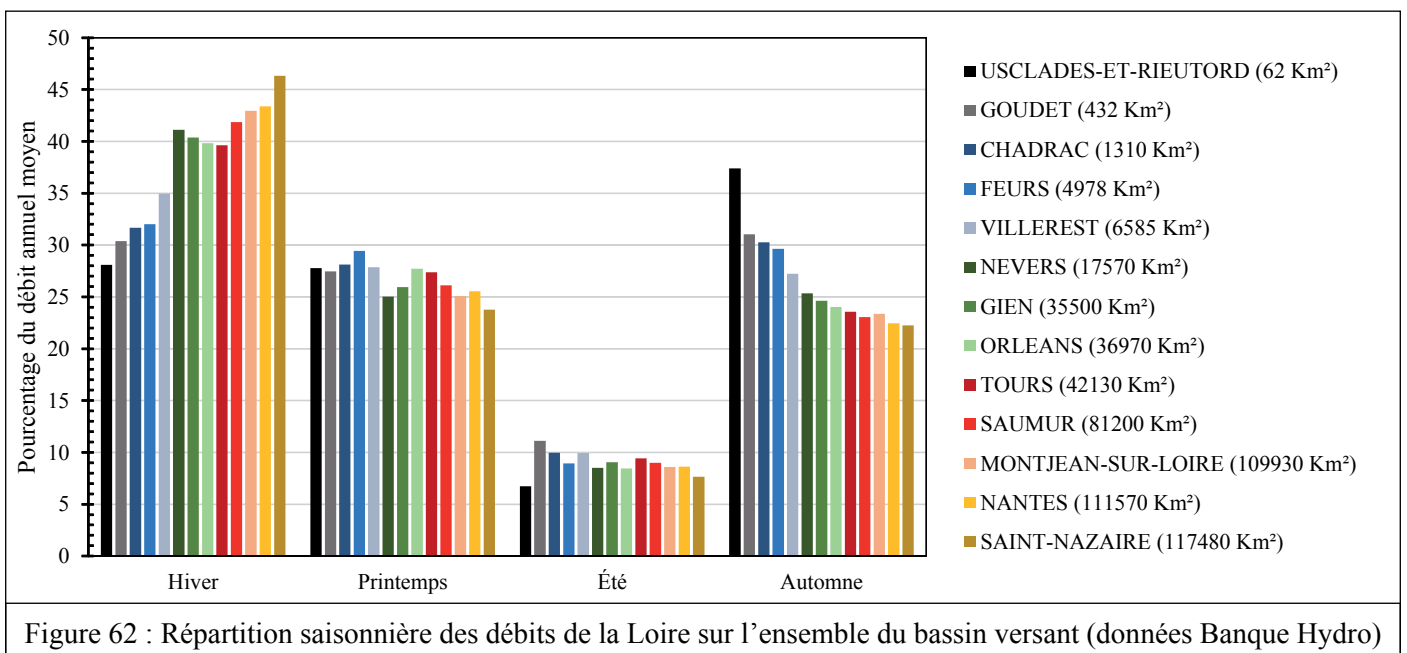
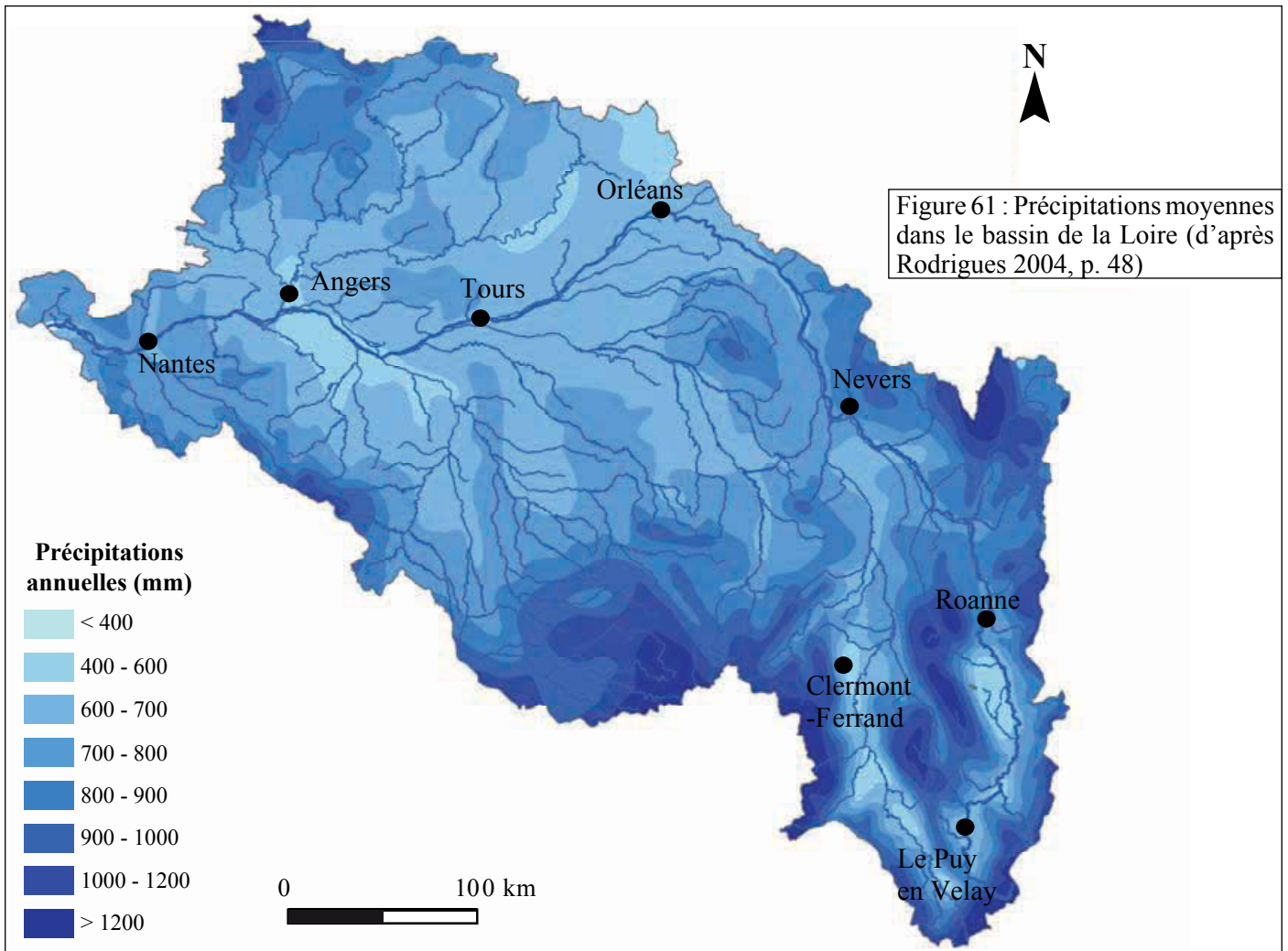


Figure 60 : Évolution des débits moyens bruts et spécifiques du bassin de la Loire d'après les données de la Banque Hydro



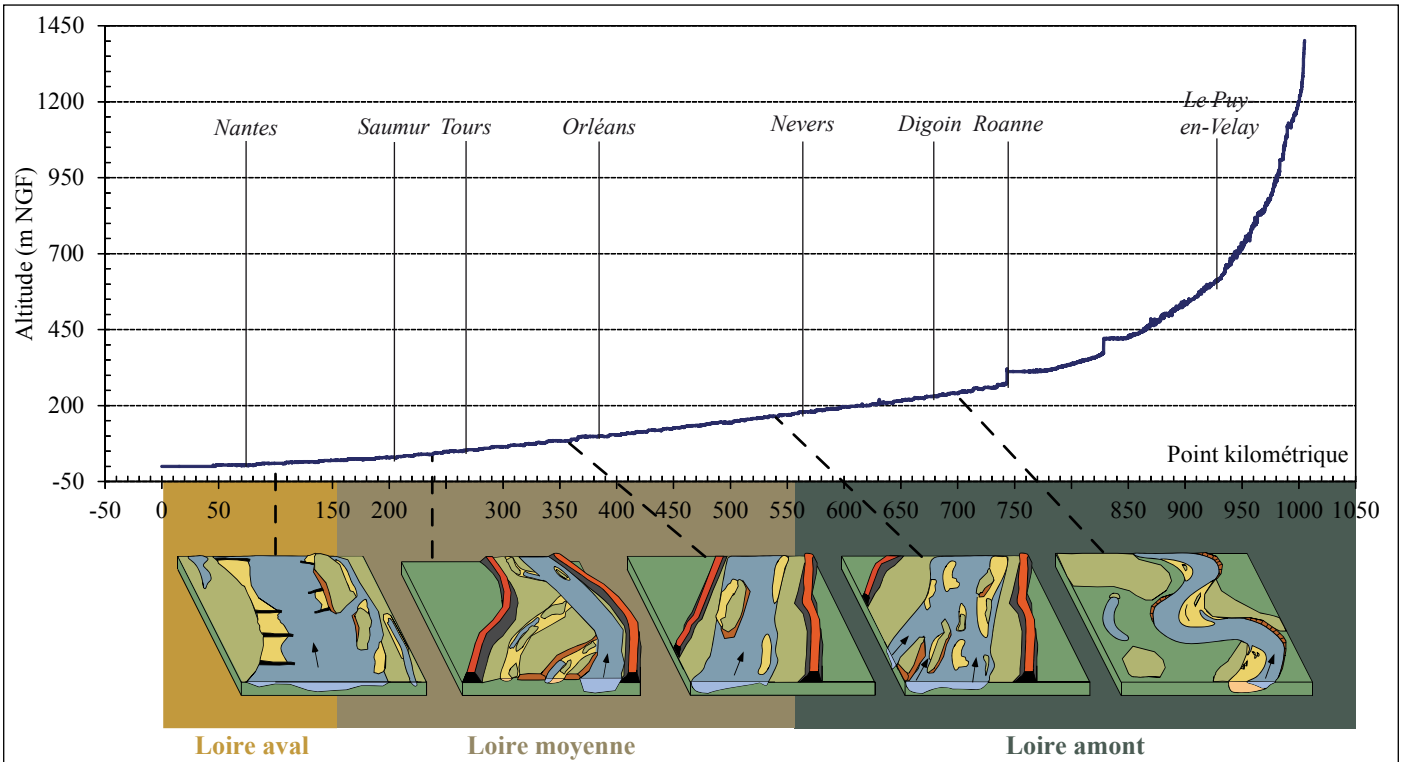


Figure 63 : Les principales morphologies adoptées par la Loire (d'après Rodrigues 2004, p. 52)

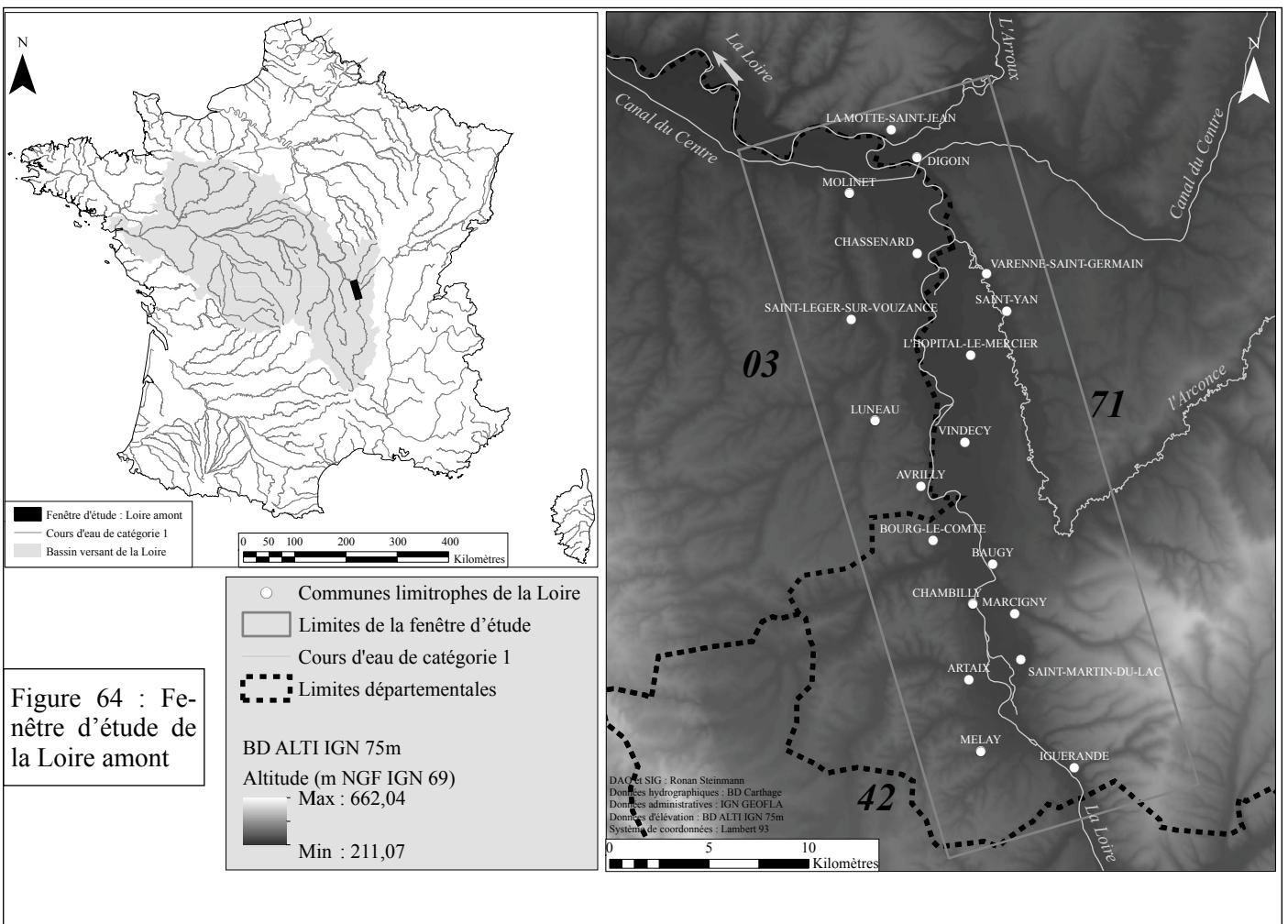


Figure 64 : Fenêtre d'étude de la Loire amont

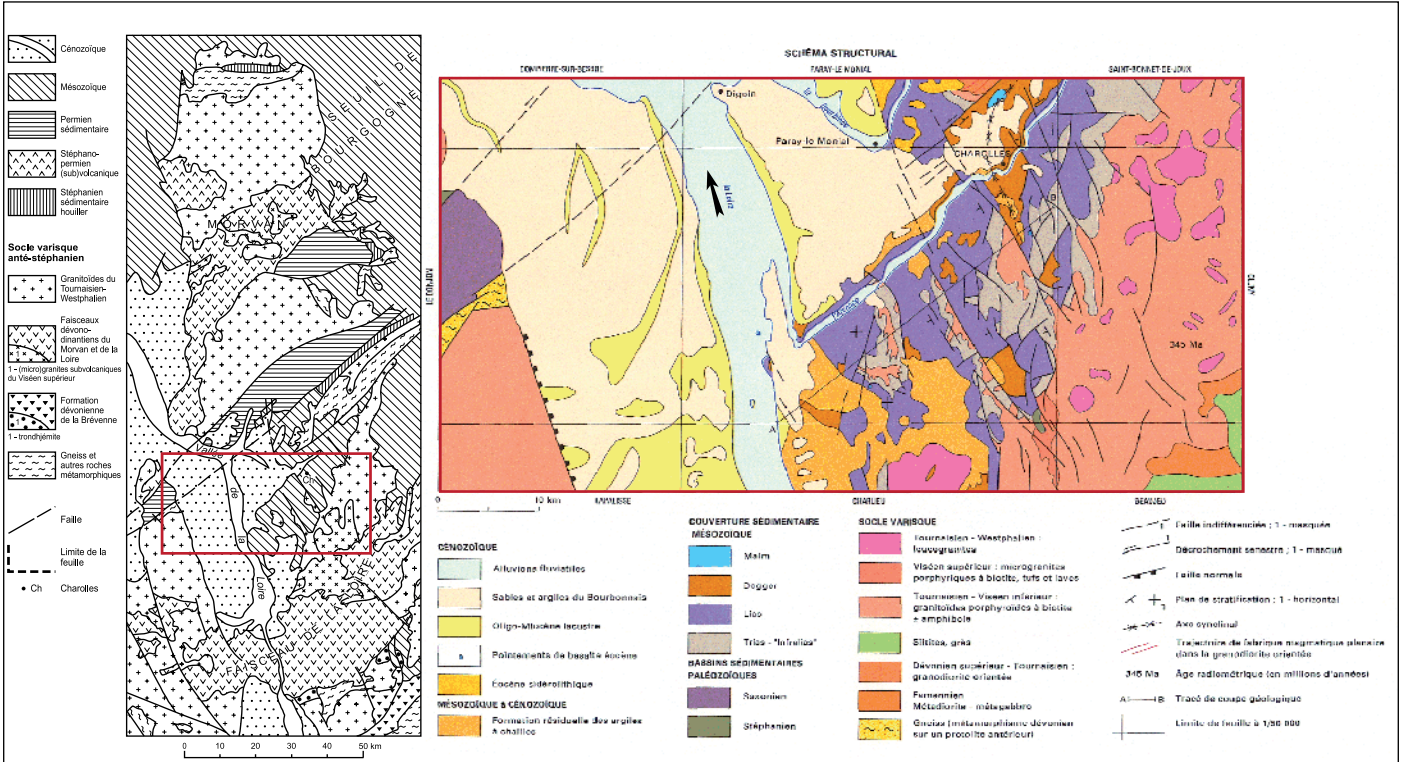


Figure 65 : Géologie de la fenêtre d'étude de la Loire amont (d'après Donzeau *et al.* 2006a ; 2006b)

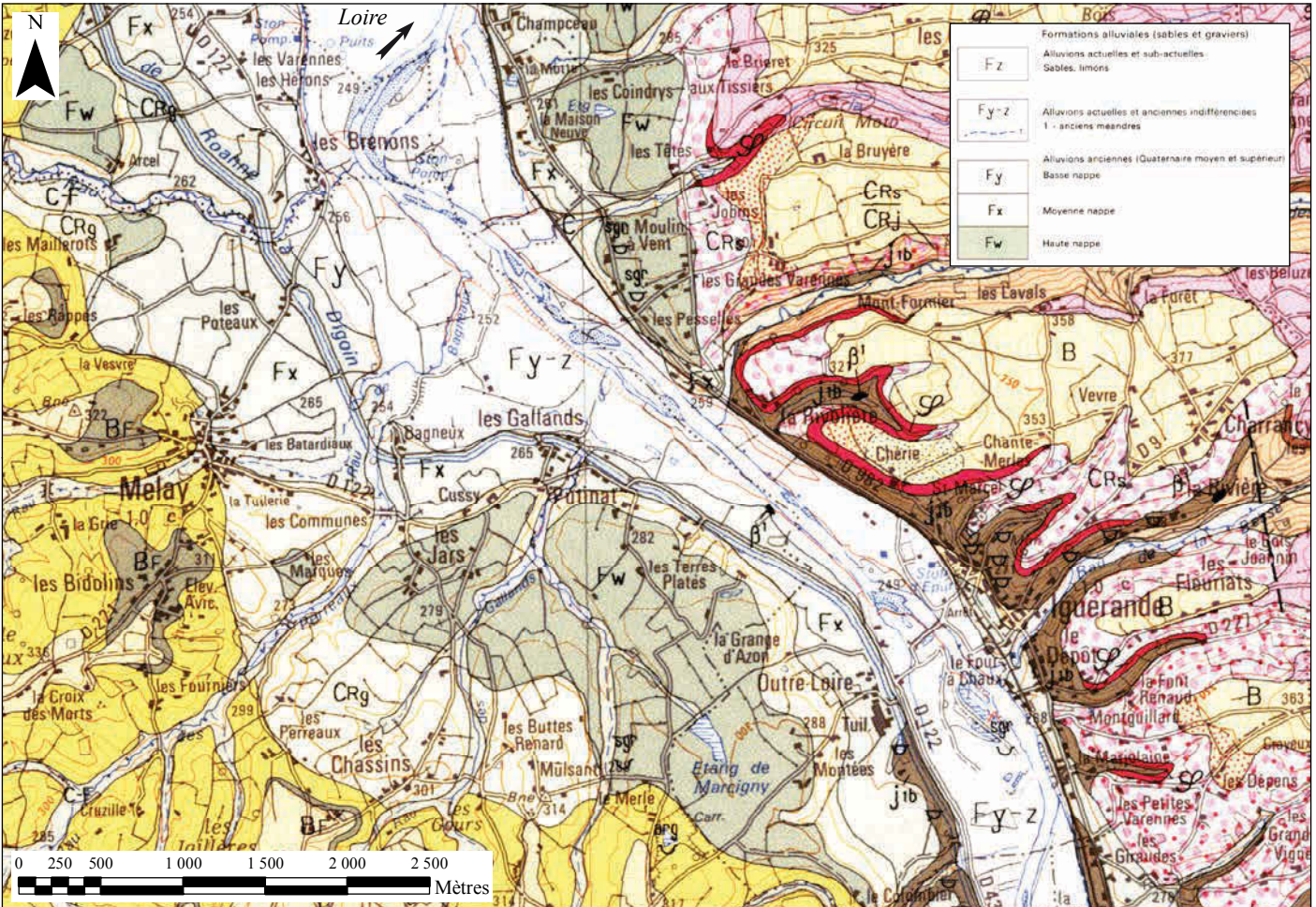


Figure 66 : Extrait de la carte géologique au 1/50000° à la sortie du défilé d'Iguerande (Bouiller *et al.* 1990a)

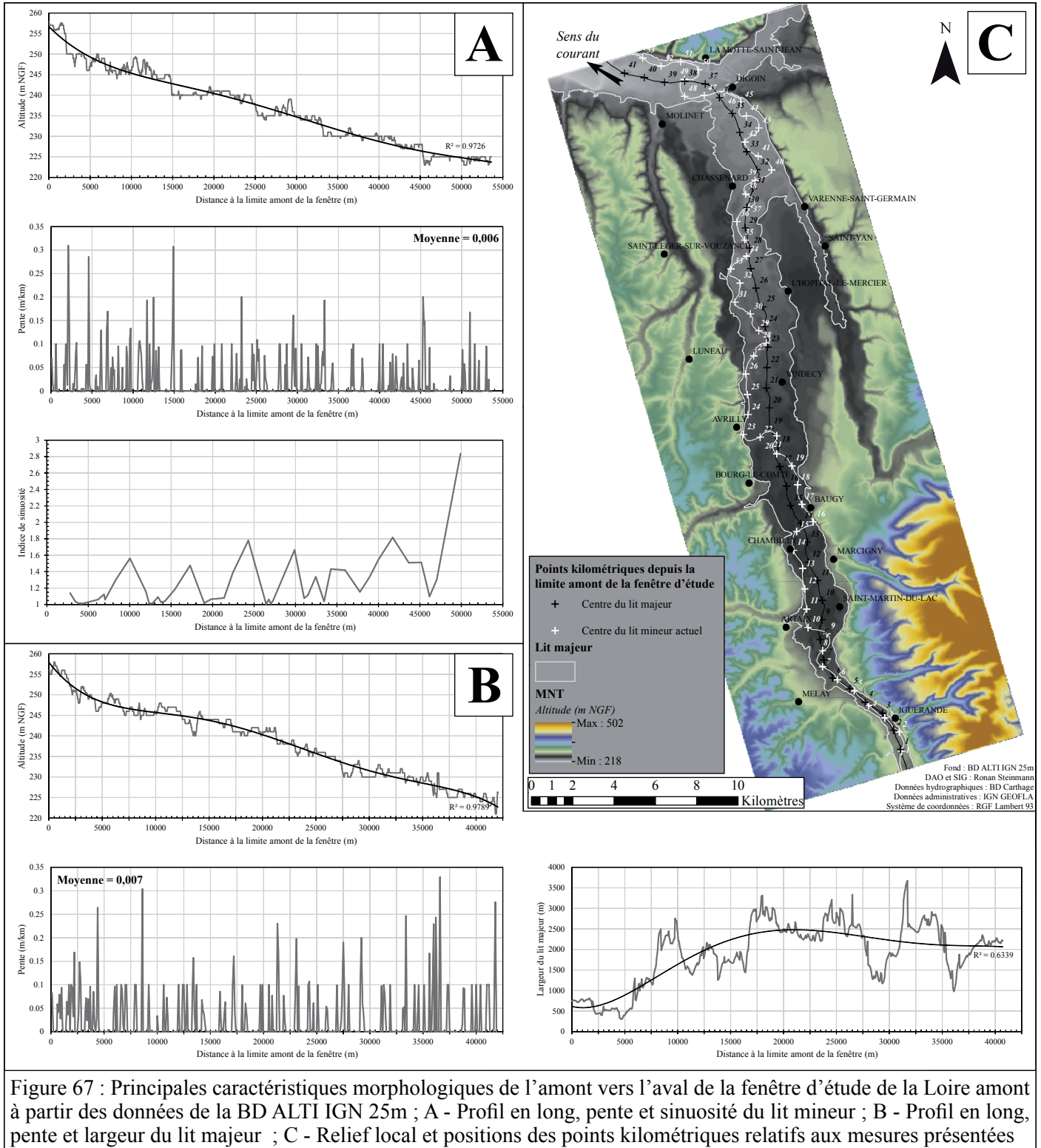


Figure 67 : Principales caractéristiques morphologiques de l'amont vers l'aval de la fenêtre d'étude de la Loire amont à partir des données de la BD ALTI IGN 25m ; A - Profil en long, pente et sinuosité du lit mineur ; B - Profil en long, pente et largeur du lit majeur ; C - Relief local et positions des points kilométriques relatifs aux mesures présentées

### CHAPITRE III - FENÊTRES D'ÉTUDE DU BASSIN VERSANT DE LA LOIRE

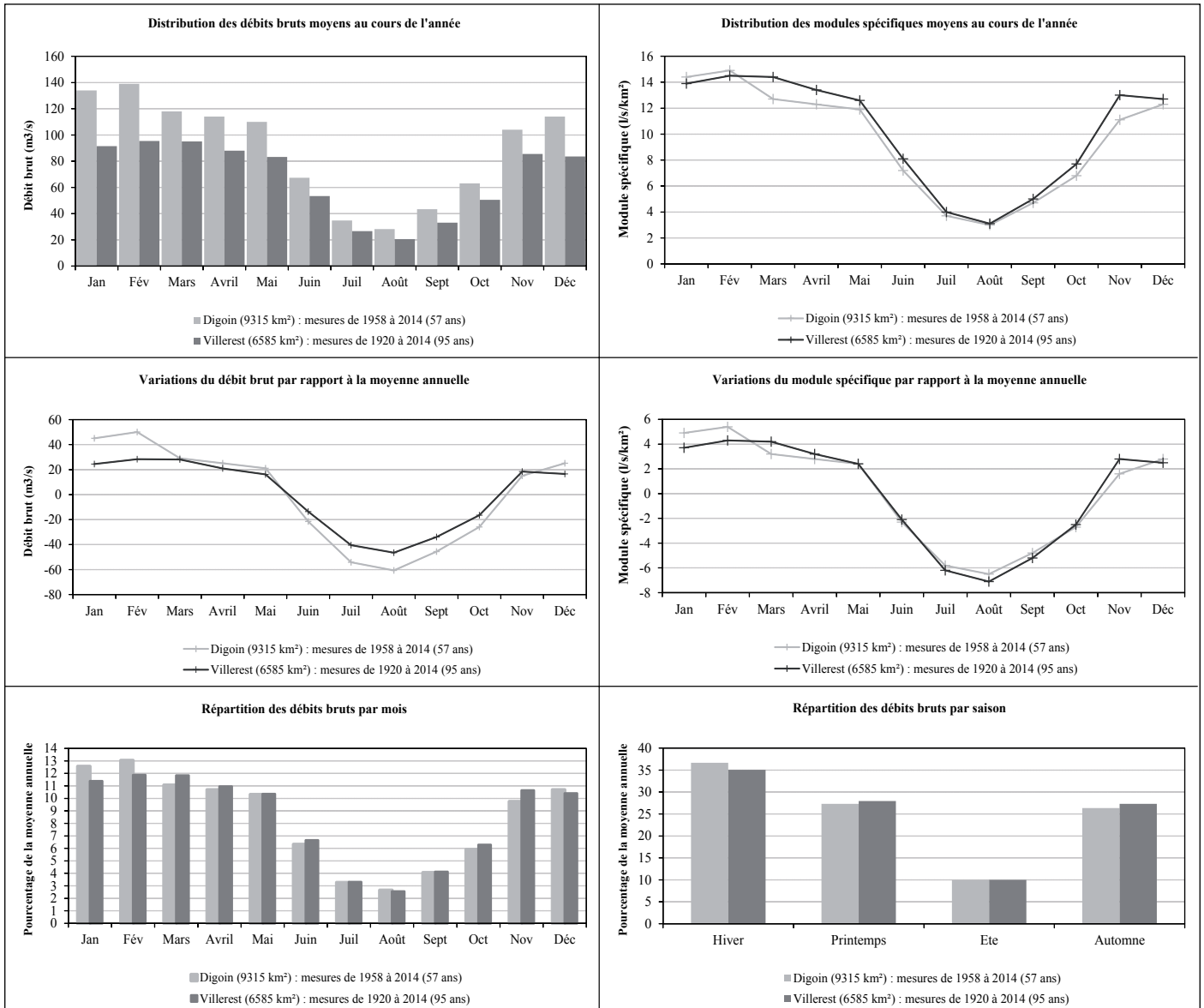


Figure 68 : Caractéristiques hydrologiques de la Loire aux stations de mesure de Villerest et Digoin (données Banque Hydro)

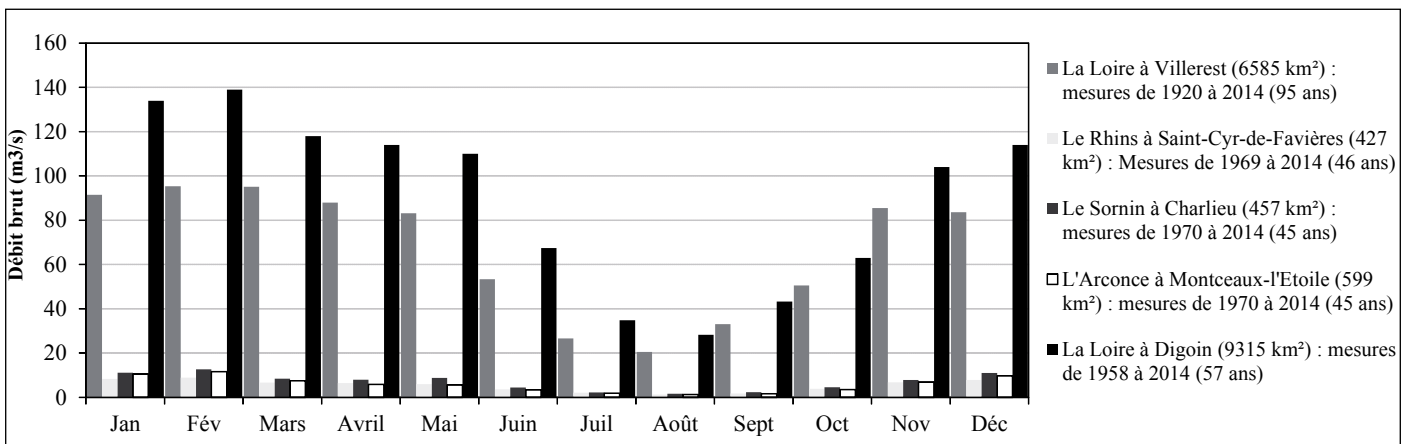


Figure 69 : Débits bruts moyens de la Loire et de ses affluents au cours de l'année entre Villerest et Digoin (données Banque Hydro)



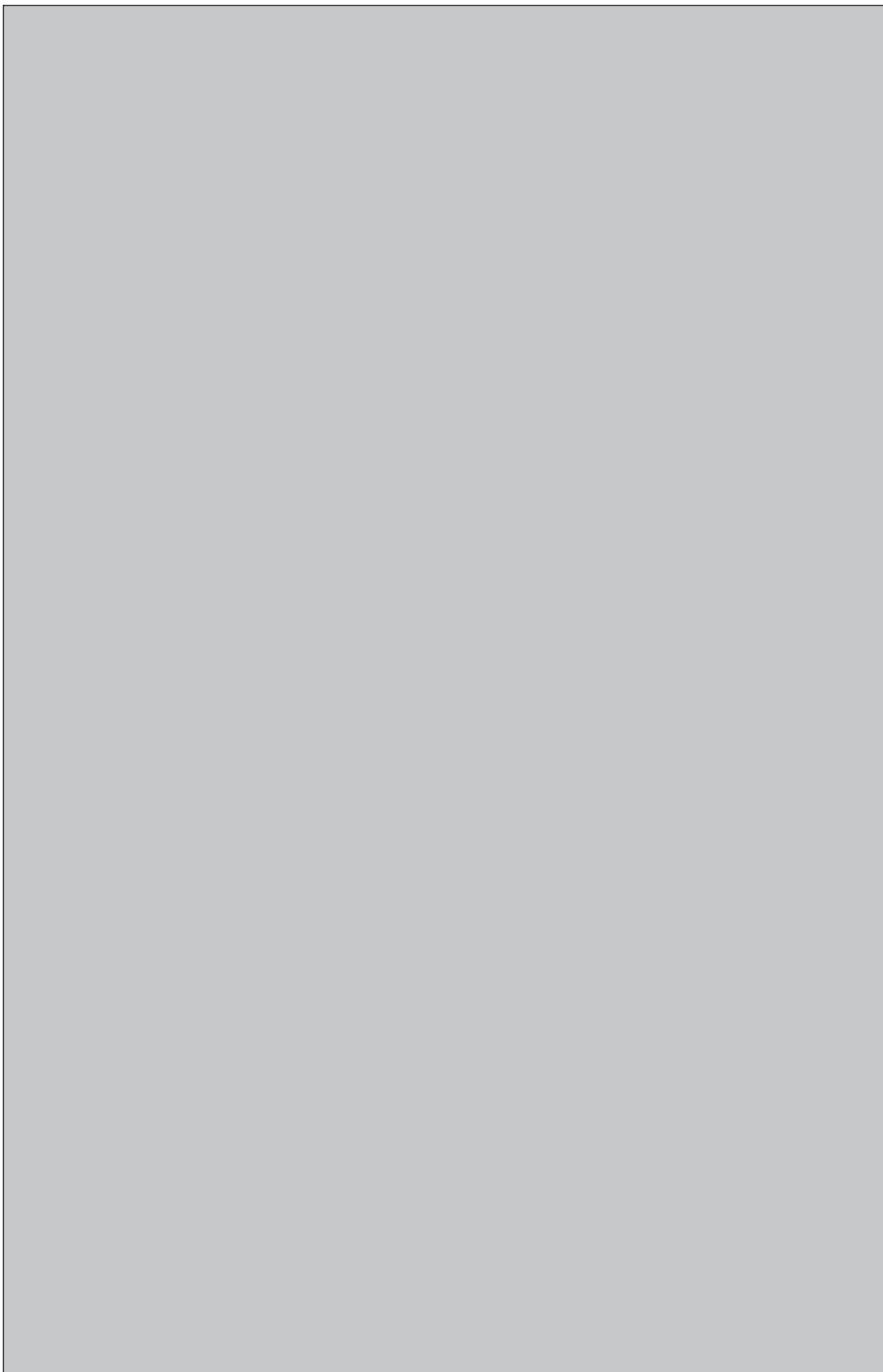


Figure 70 : Emprises des différentes fenêtres étudiées (rectangles oranges) sur les cartes représentant les limites territoriales à la fin de l'Âge du Fer (A, Barral et al. 2002, p. 276) et aux Ile-IIIe siècle ap. J.-C. (B, d'après Kasprzyk et al. 2012, p. 109, conception P. Nouvel et M. Kasprzyk)

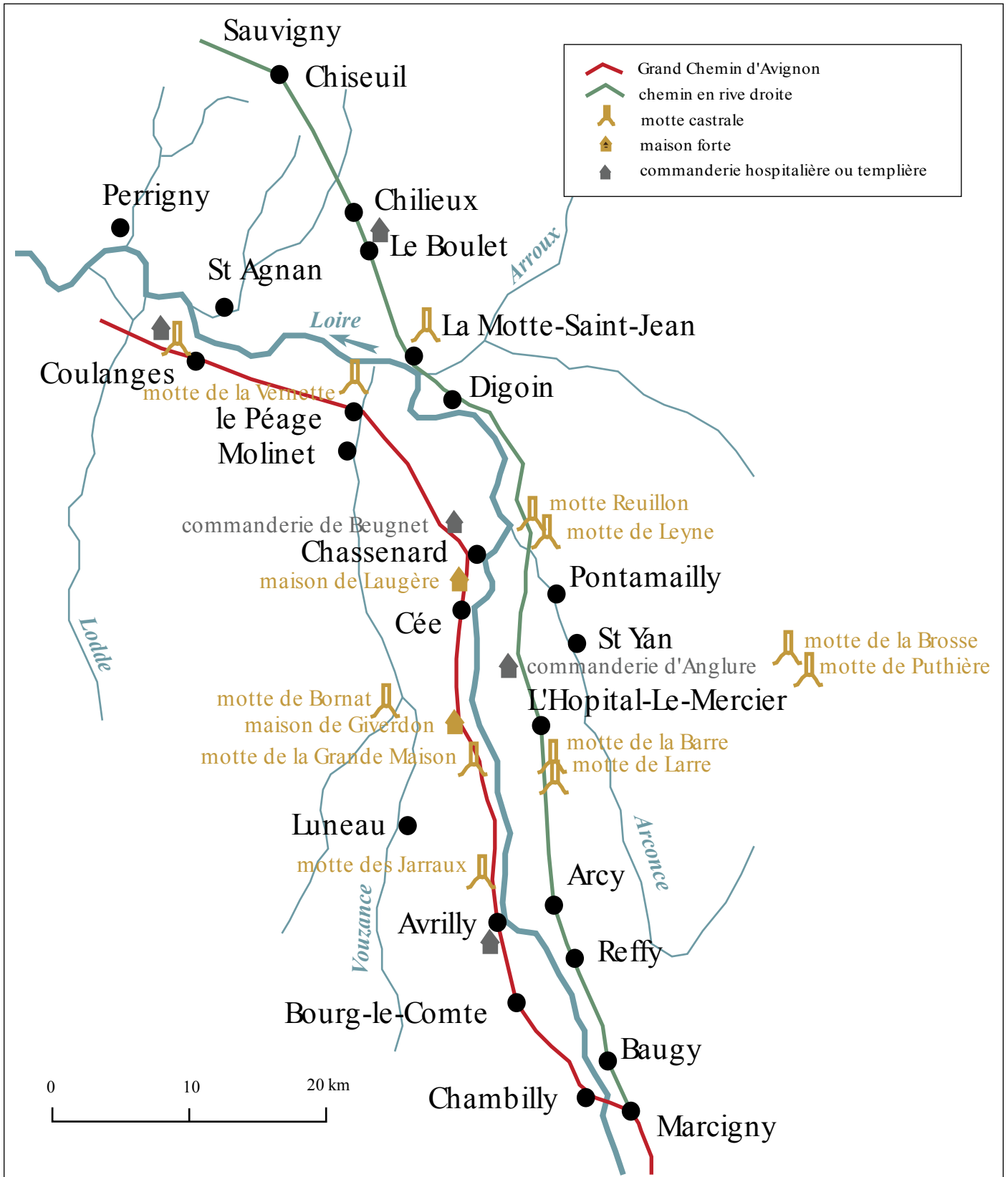


Figure 71 : Maisons fortes, mottes castrales et chemins médiévaux entre Marcigny et Digoin (d'après Escoffier 2007, p. 74)

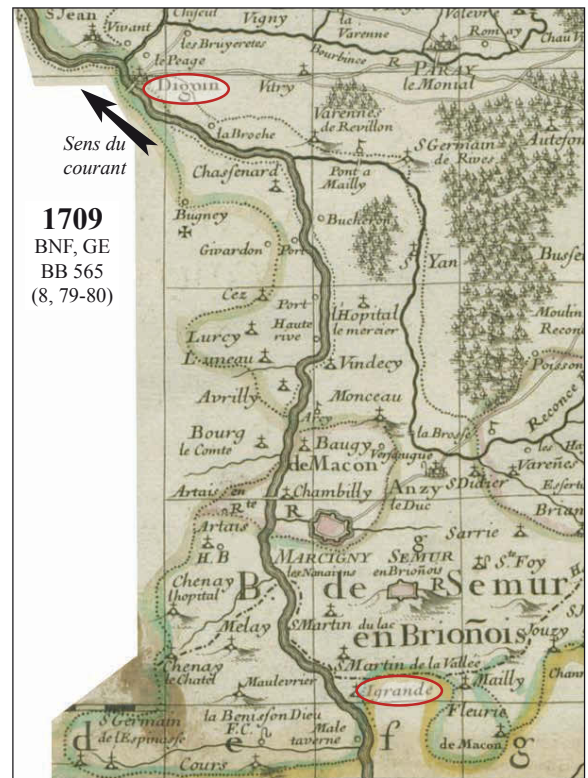
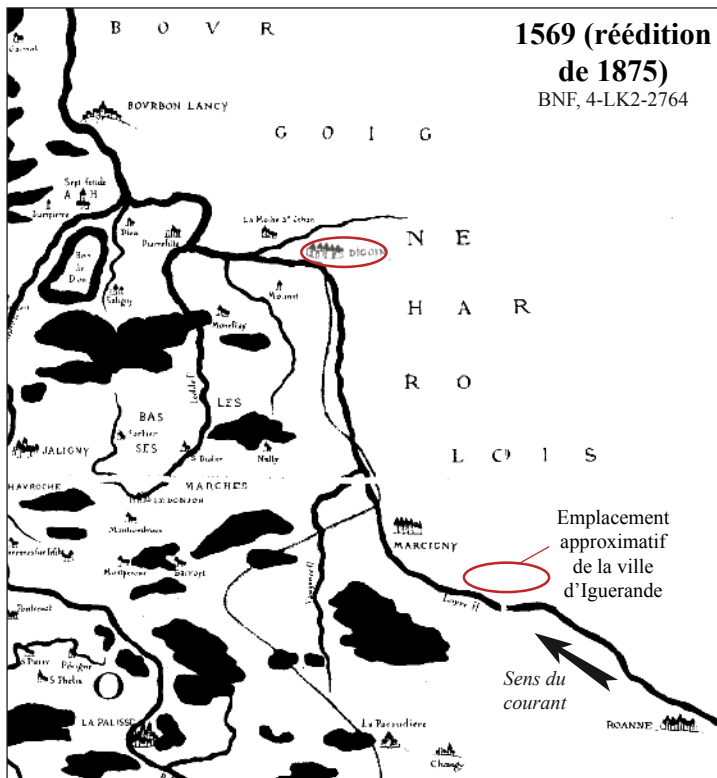


Figure 72 : Les limites territoriales entre Igouard et Avrilly sur les cartes modernes et contemporaines

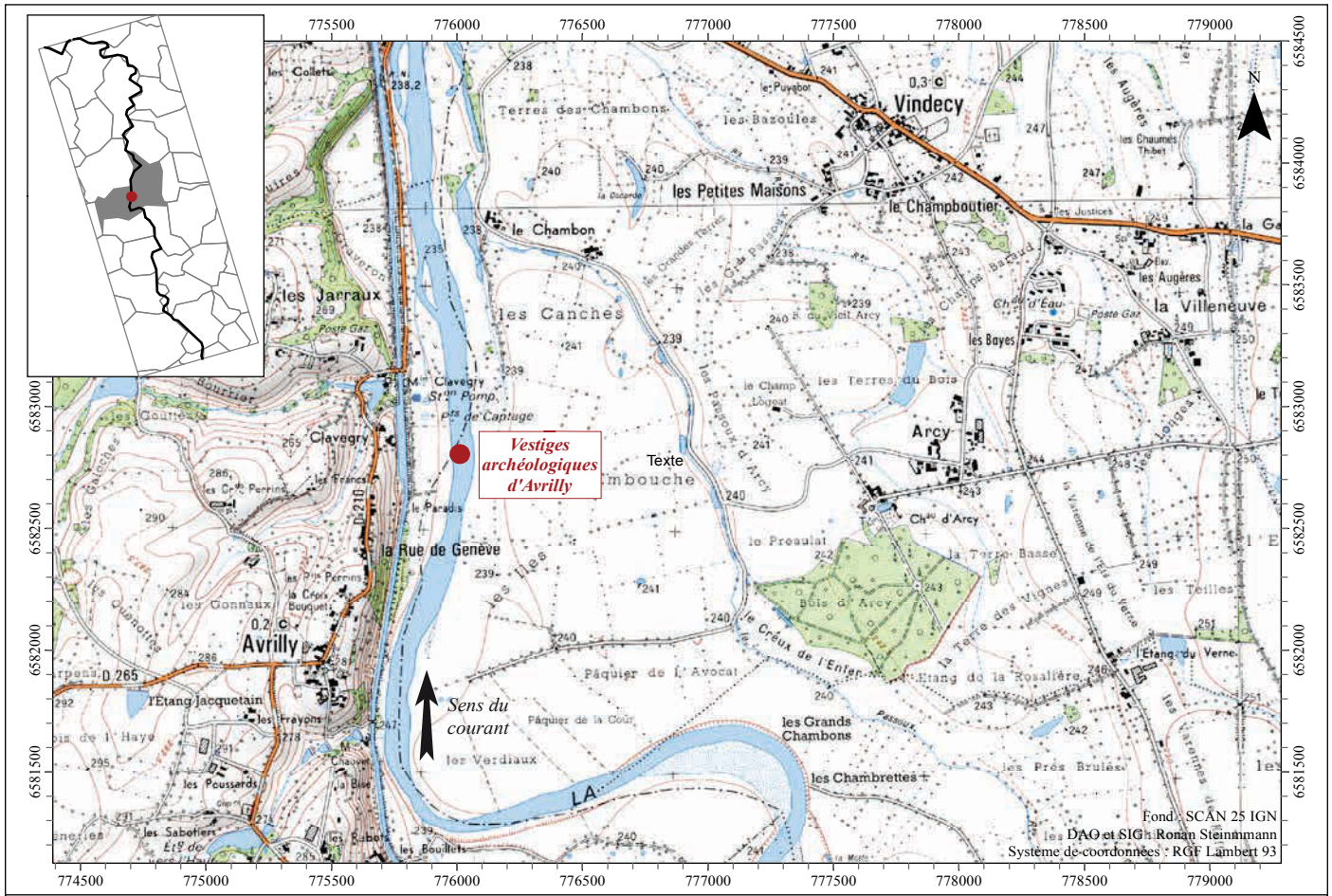


Figure 73 : Environs du site d'Avrilly et position des vestiges au sein des communes de la fenêtre d'étude

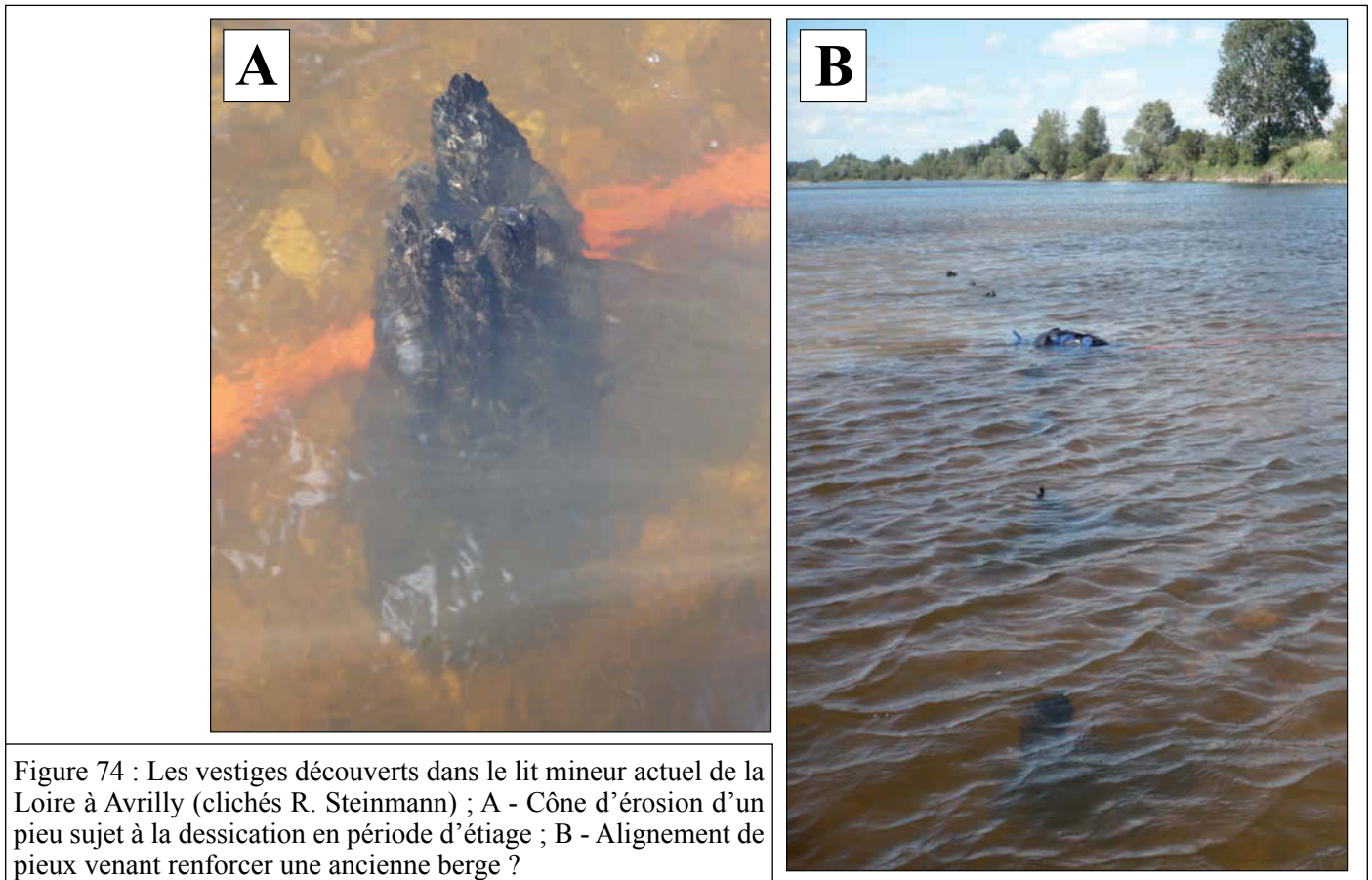
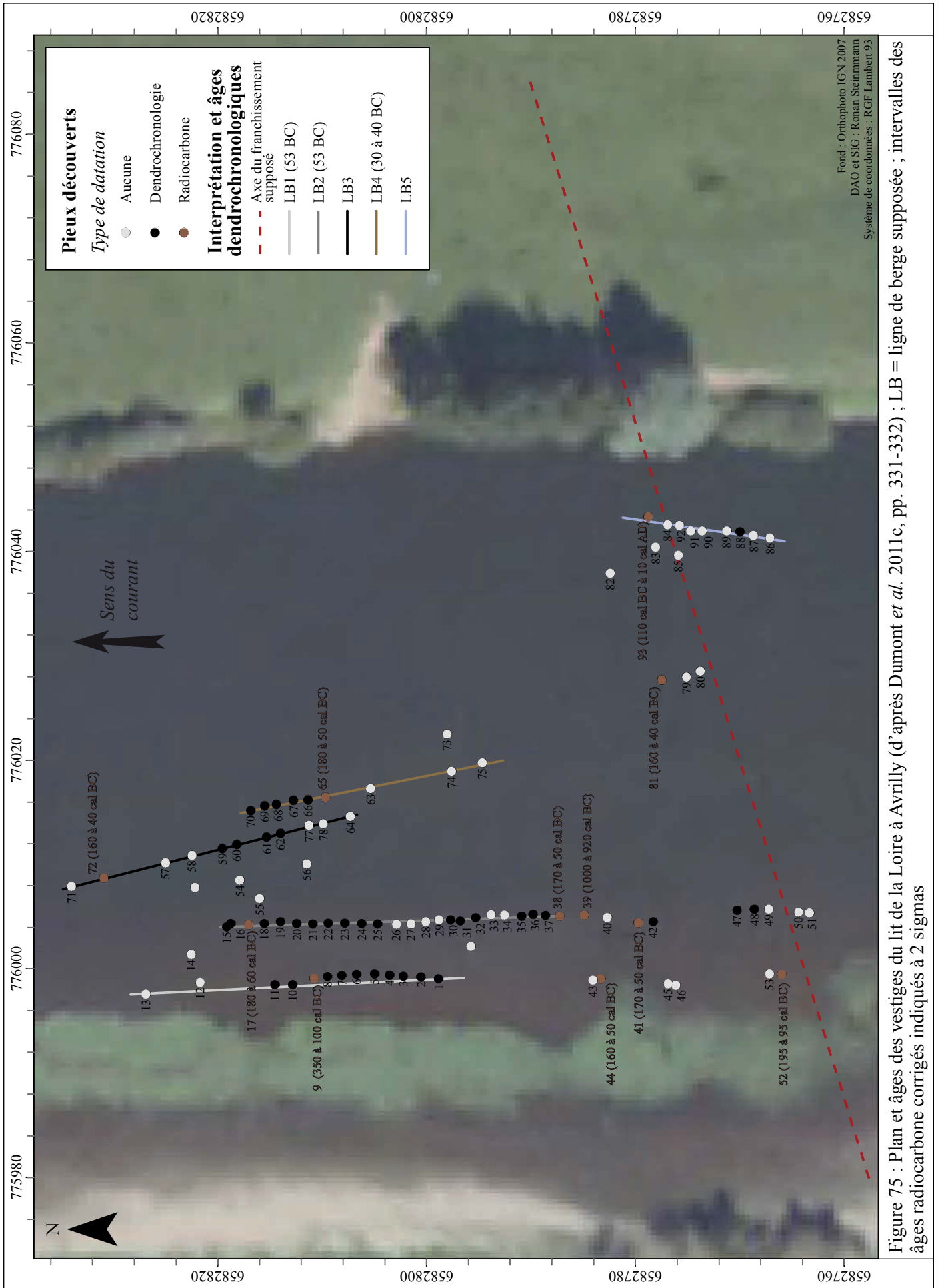


Figure 74 : Les vestiges découverts dans le lit mineur actuel de la Loire à Avrilly (clichés R. Steinmann) ; A - Cône d'érosion d'un pieu sujet à la dessiccation en période d'étiage ; B - Alignement de pieux venant renforcer une ancienne berge ?



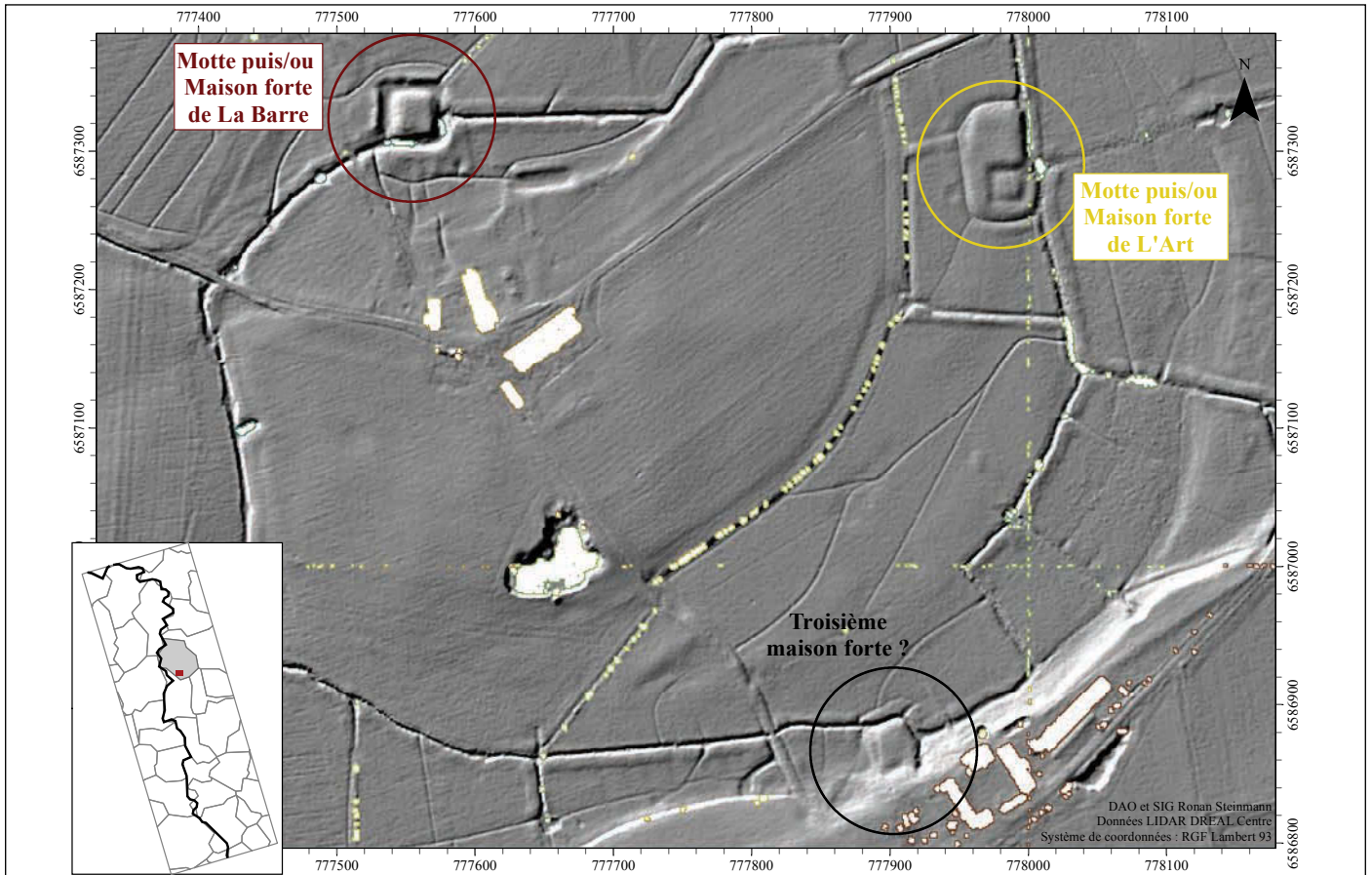


Figure 76 : Les vestiges d'implantations médiévales connues et une potentielle nouvelle structure mise en évidence par l'ombrage pondéré selon seize directions d'un MNT LiDAR à l'Hôpital-le-Mercier ; position de la commune (en gris) et de l'emprise affichée (en rouge) au sein de la fenêtre d'étude

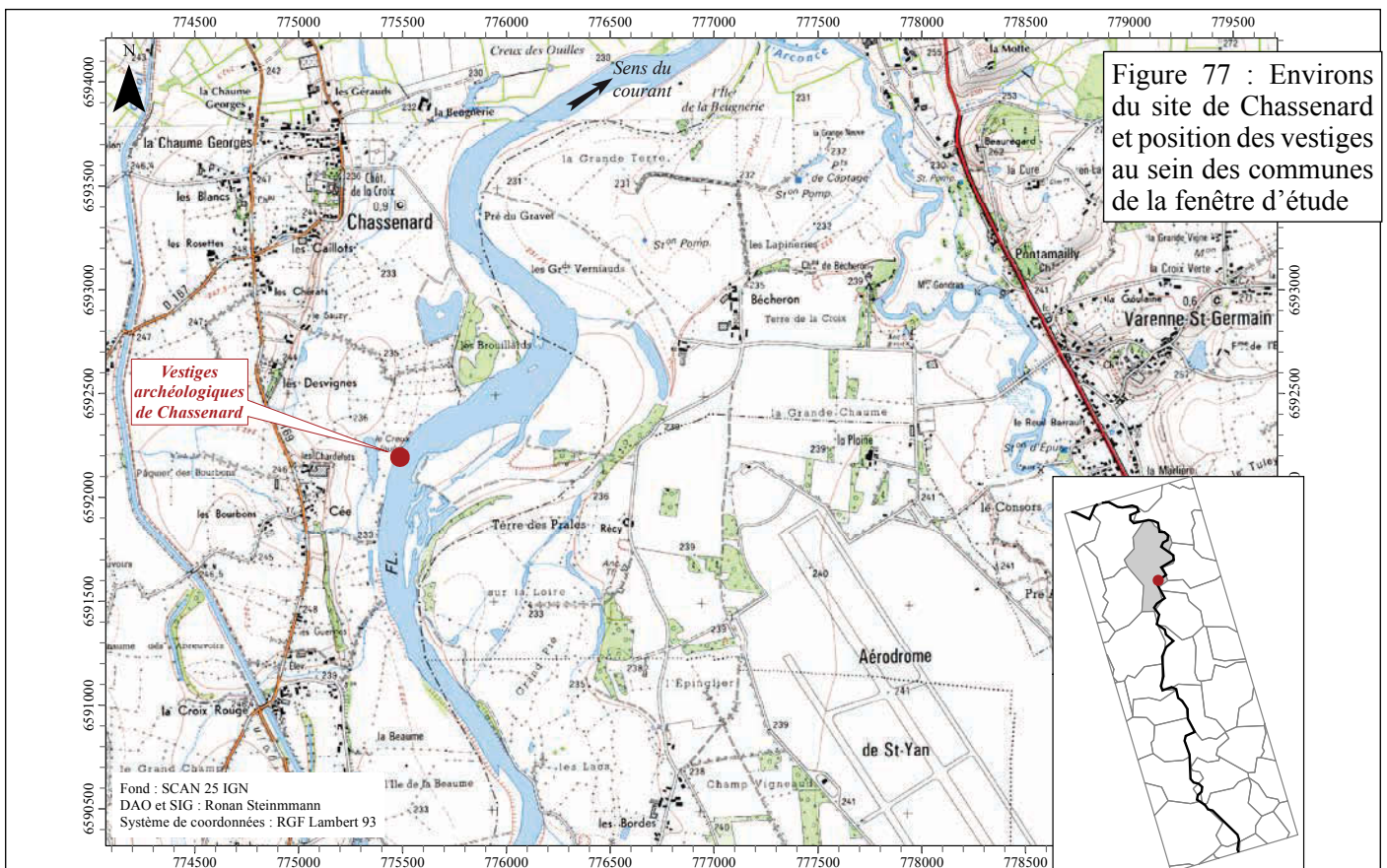
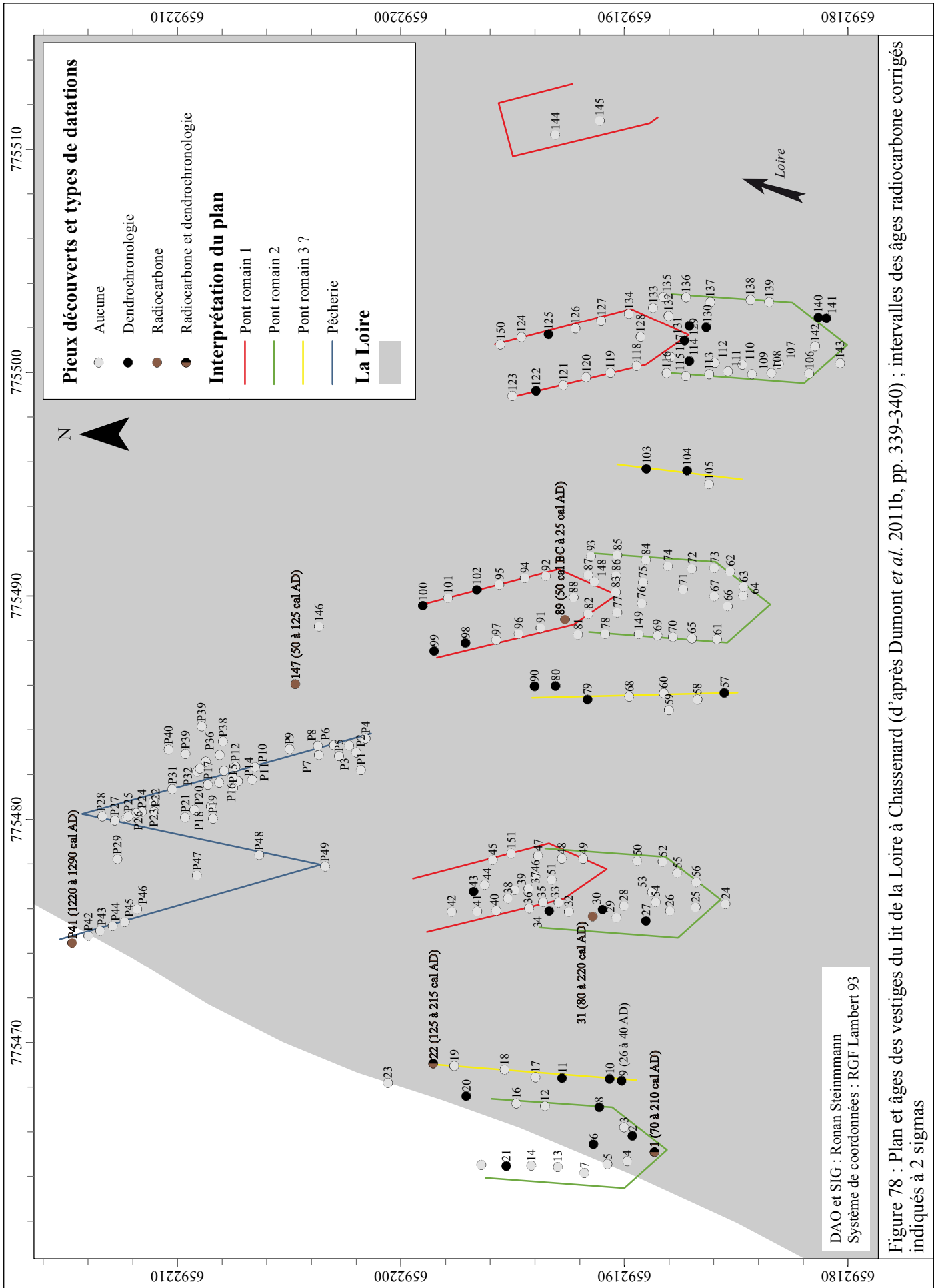


Figure 77 : Environs du site de Chassenard et position des vestiges au sein des communes de la fenêtre d'étude



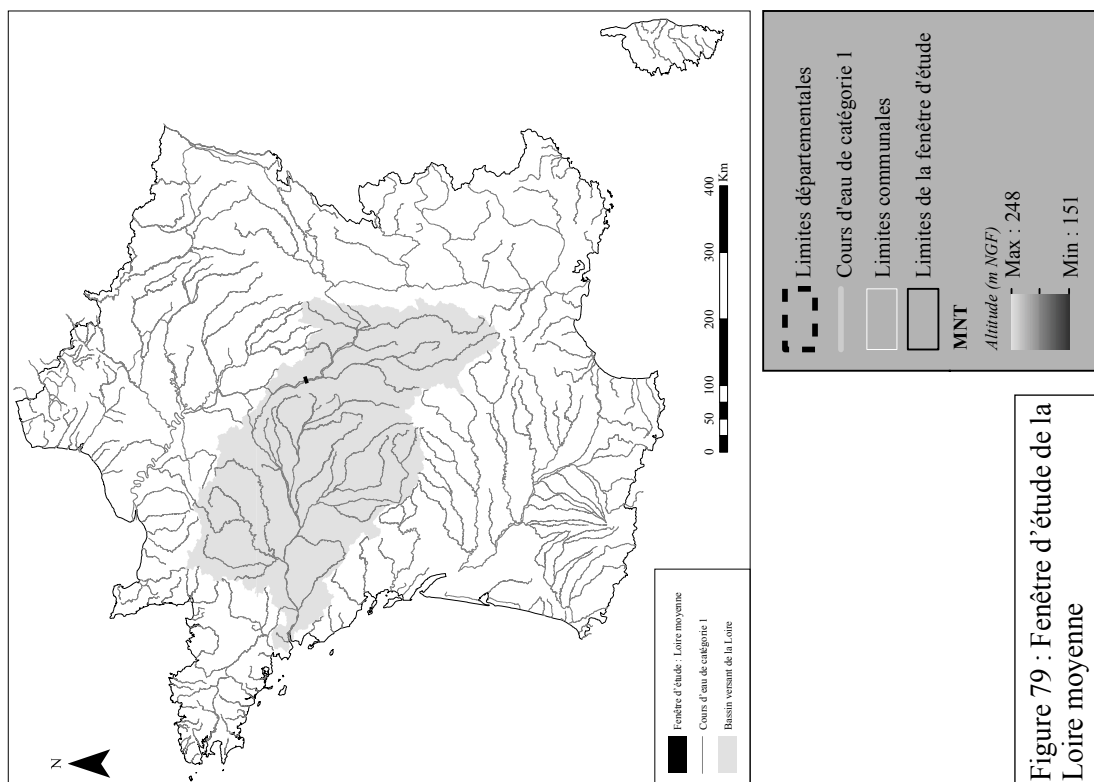


Figure 79 : Fenêtre d'étude de la Loire moyenne



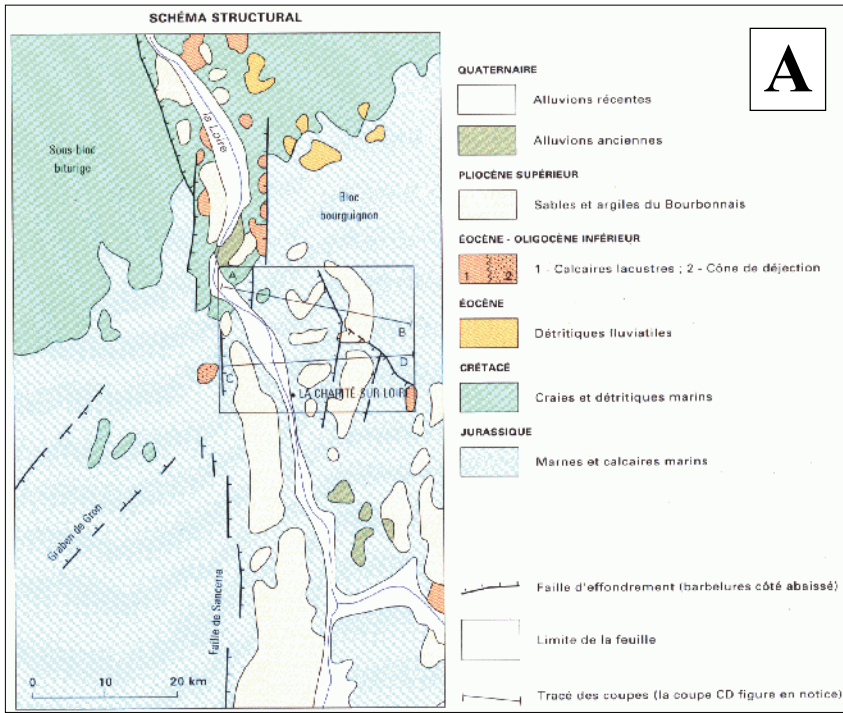
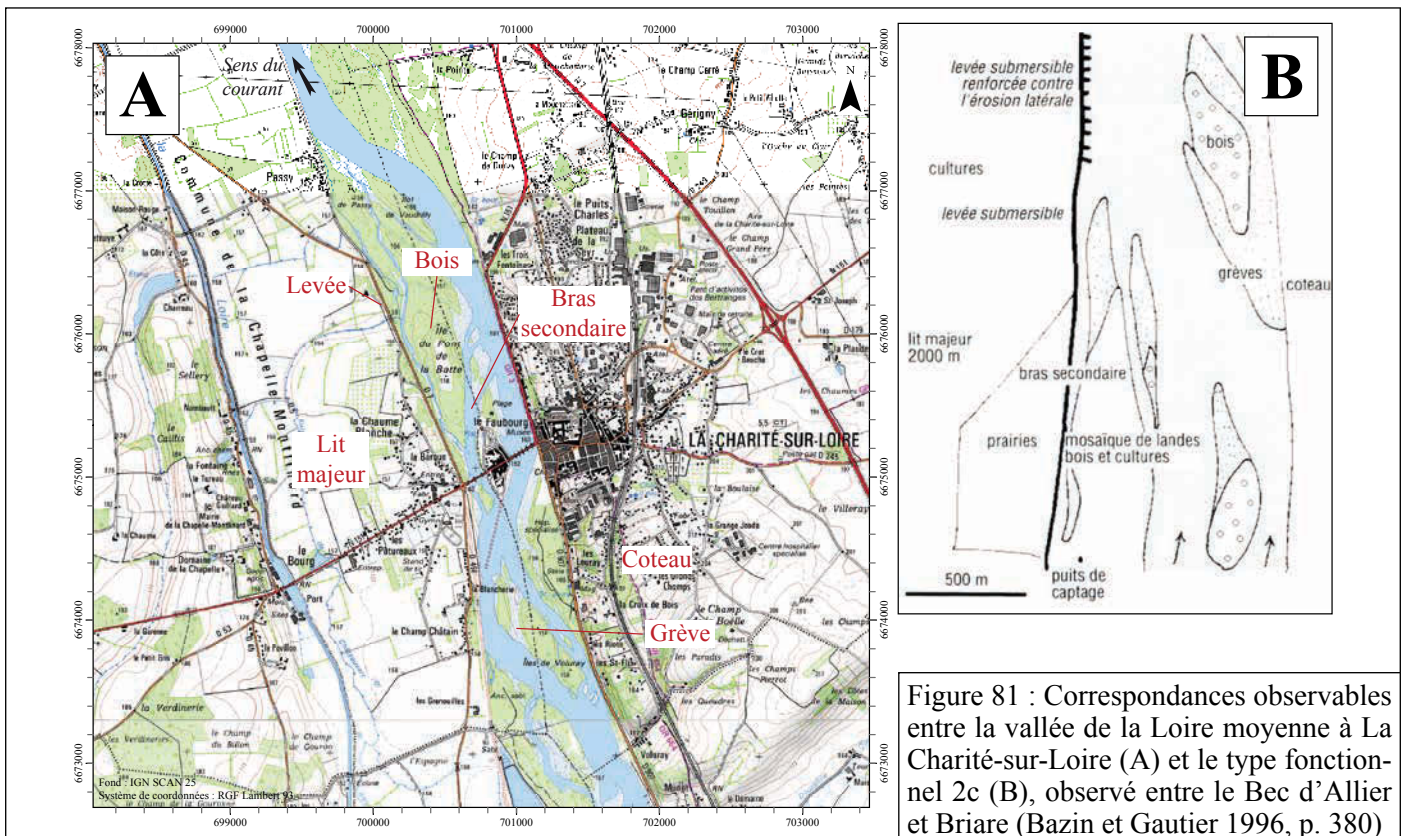
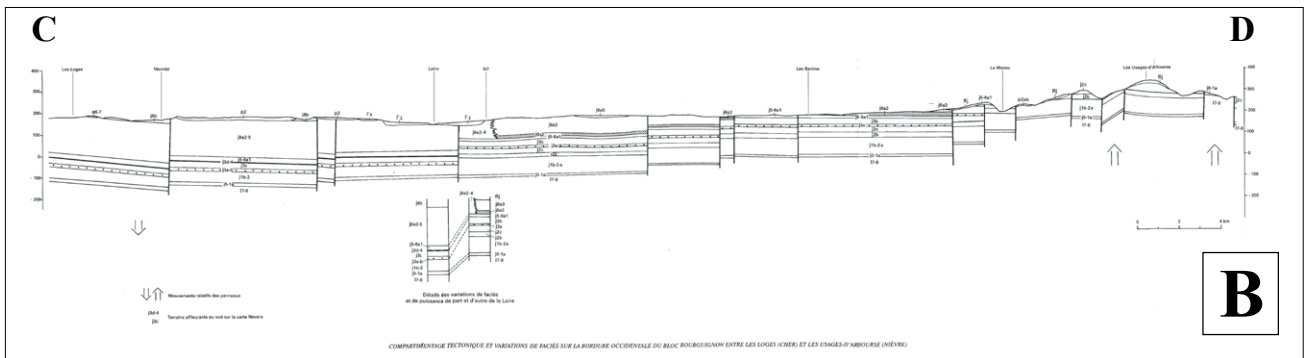


Figure 80 : Contexte géologique de la fenêtre d'étude de la Loire moyenne Menot et al. 1997a ; 1997b) ; A - Schéma structural ; B - Coupe géologique de synthèse



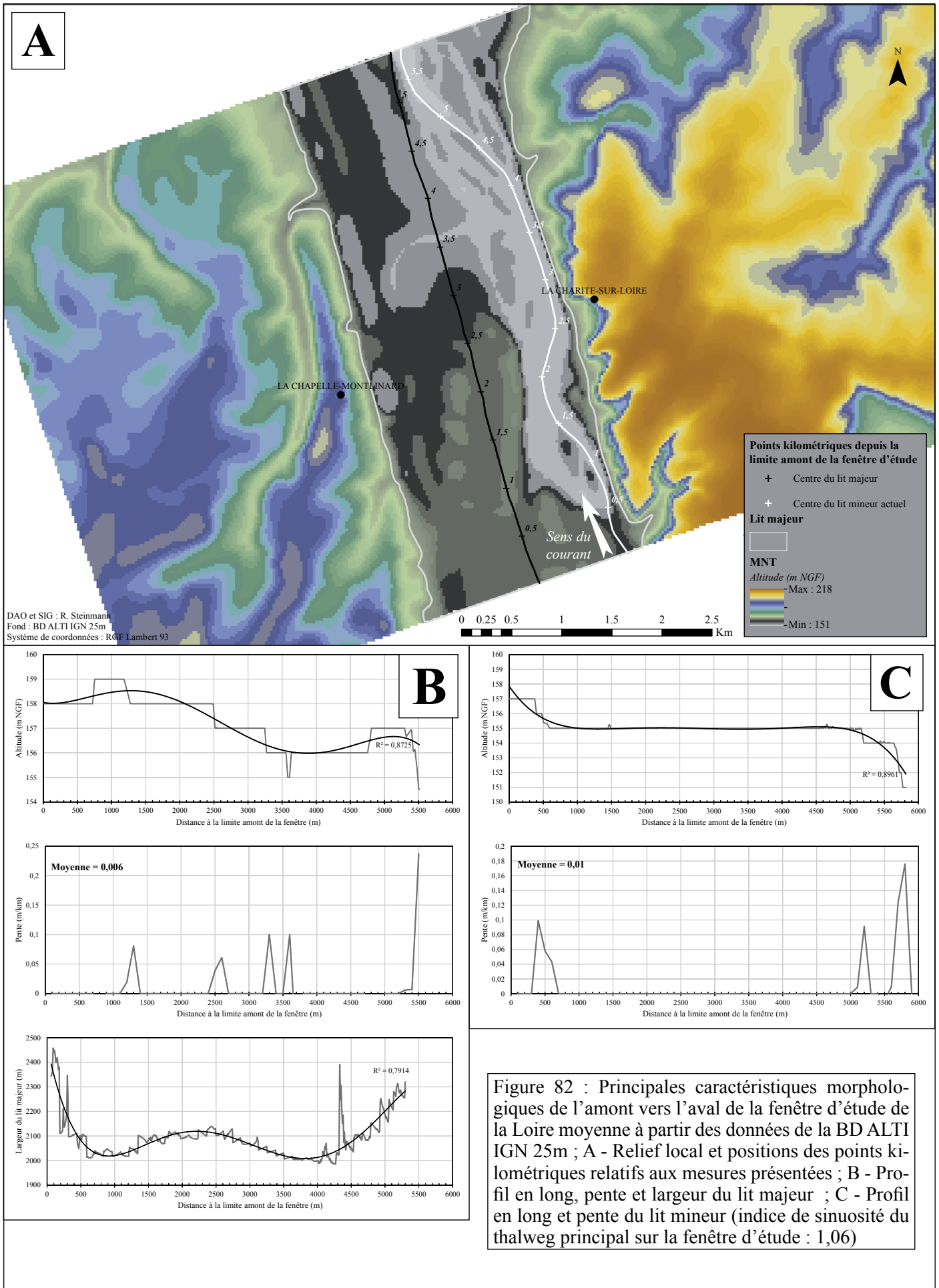
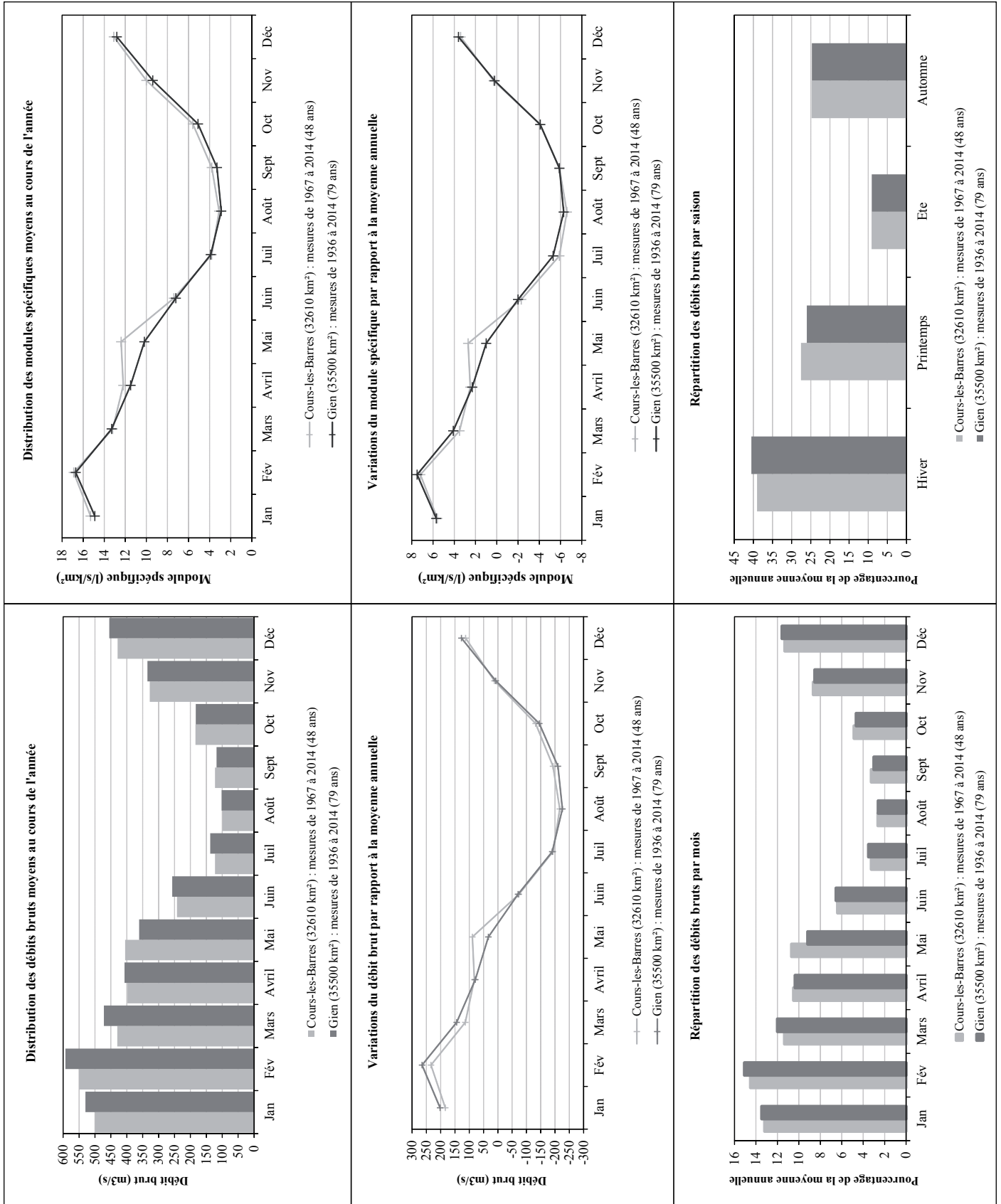


Figure 83 : Caractéristiques hydrologiques de la Loire aux stations de mesure de Cours-les-Barres et Gien (données Banque Hydro)



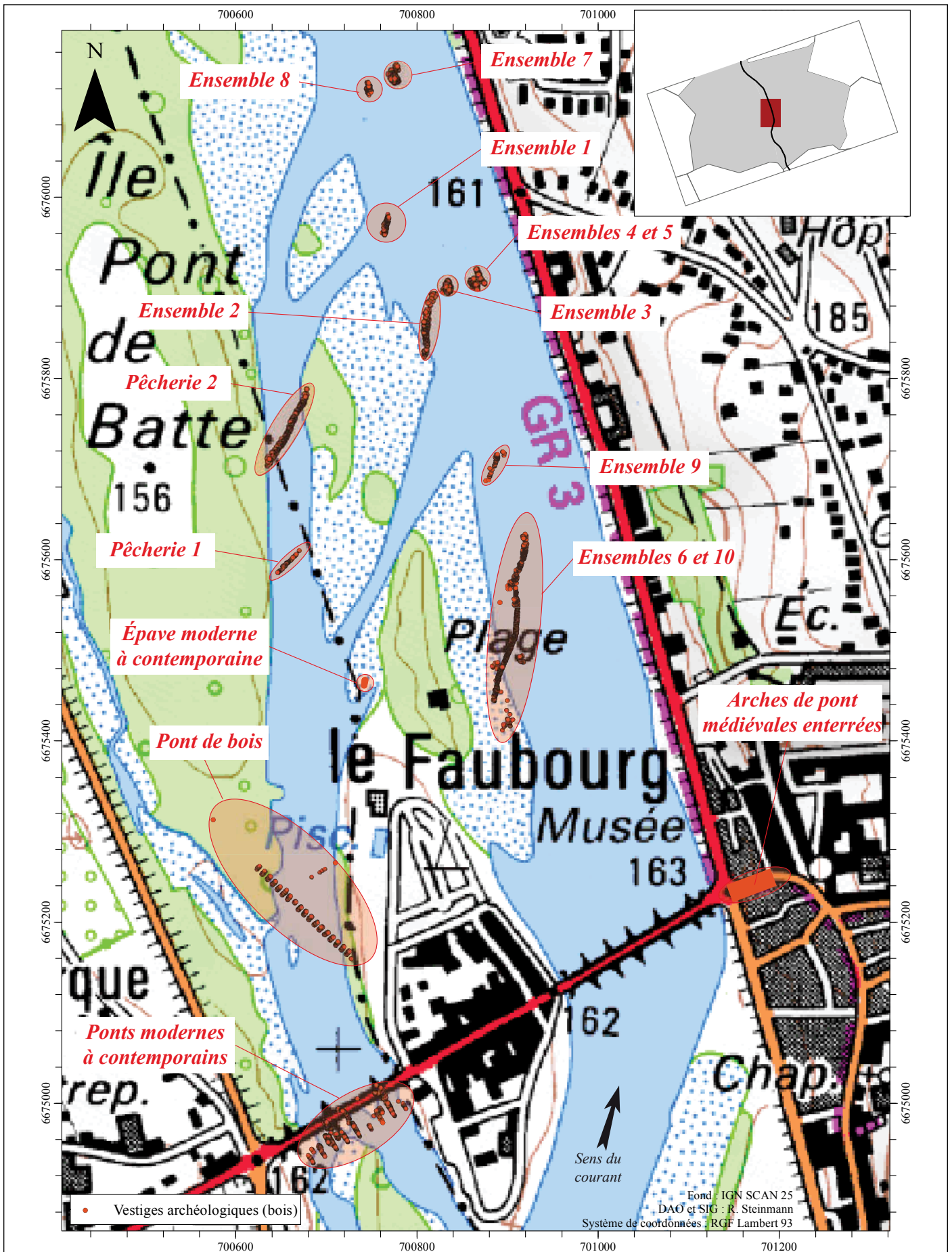


Figure 84 : Les implantations retrouvées dans le lit de la Loire moyenne (d'après Dumont *et al.* 2010) ; position des vestiges au sein des communes de la fenêtre d'étude

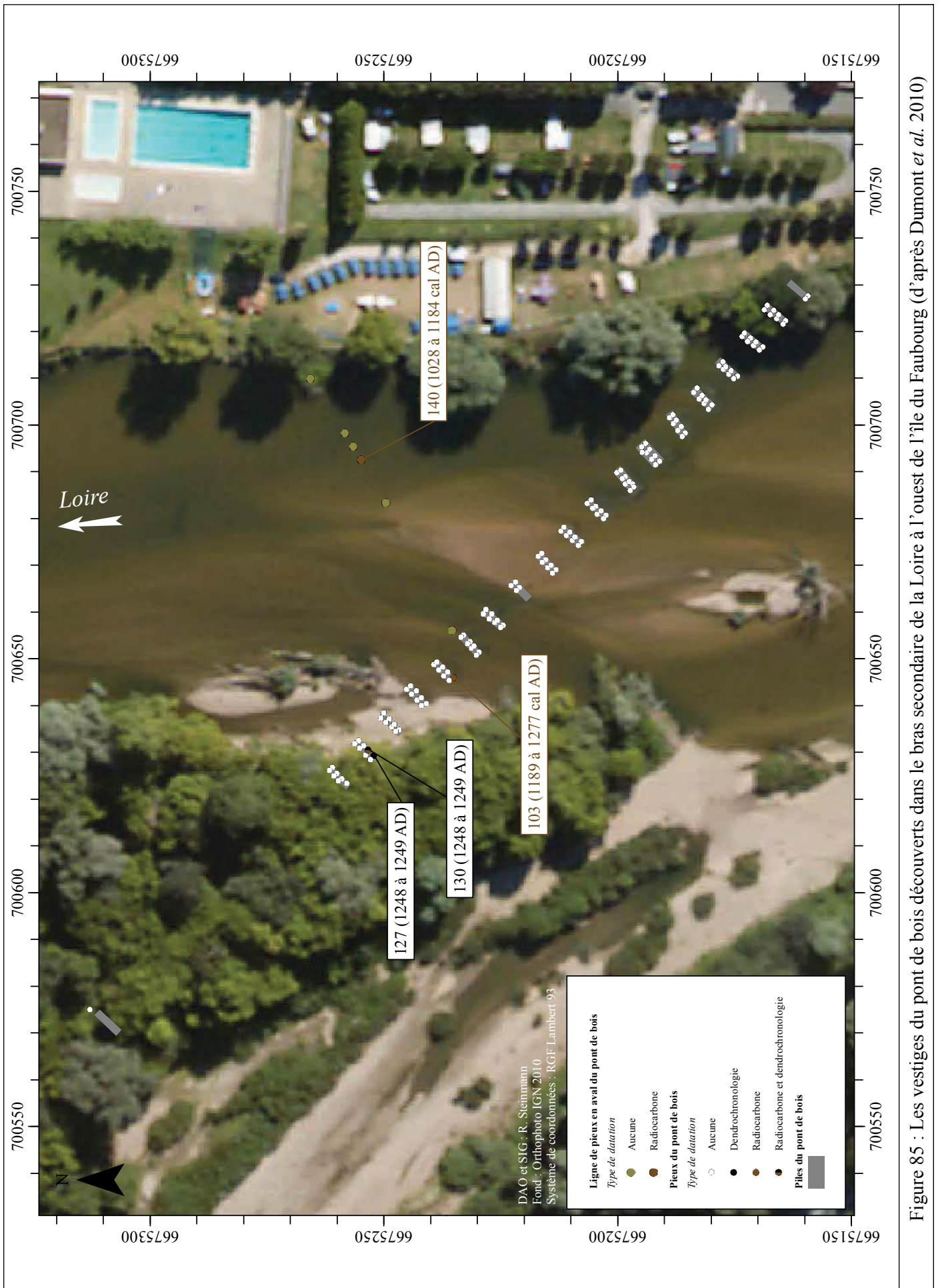
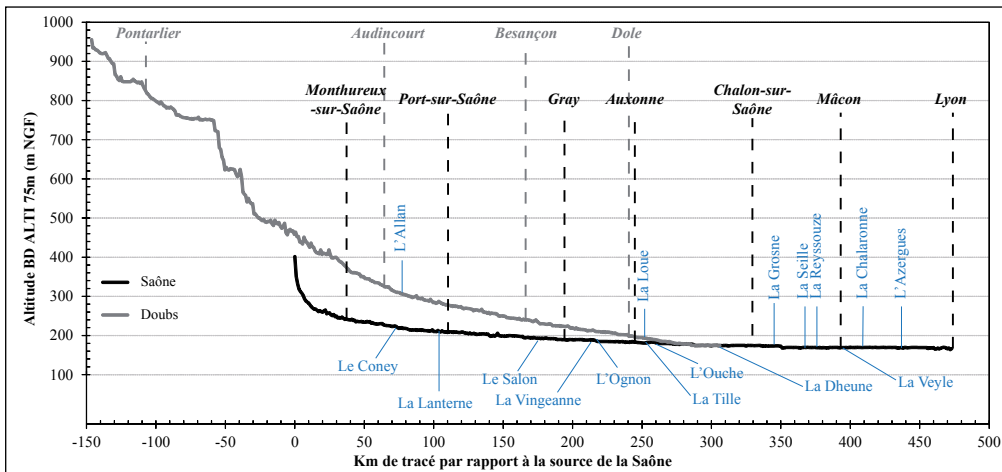
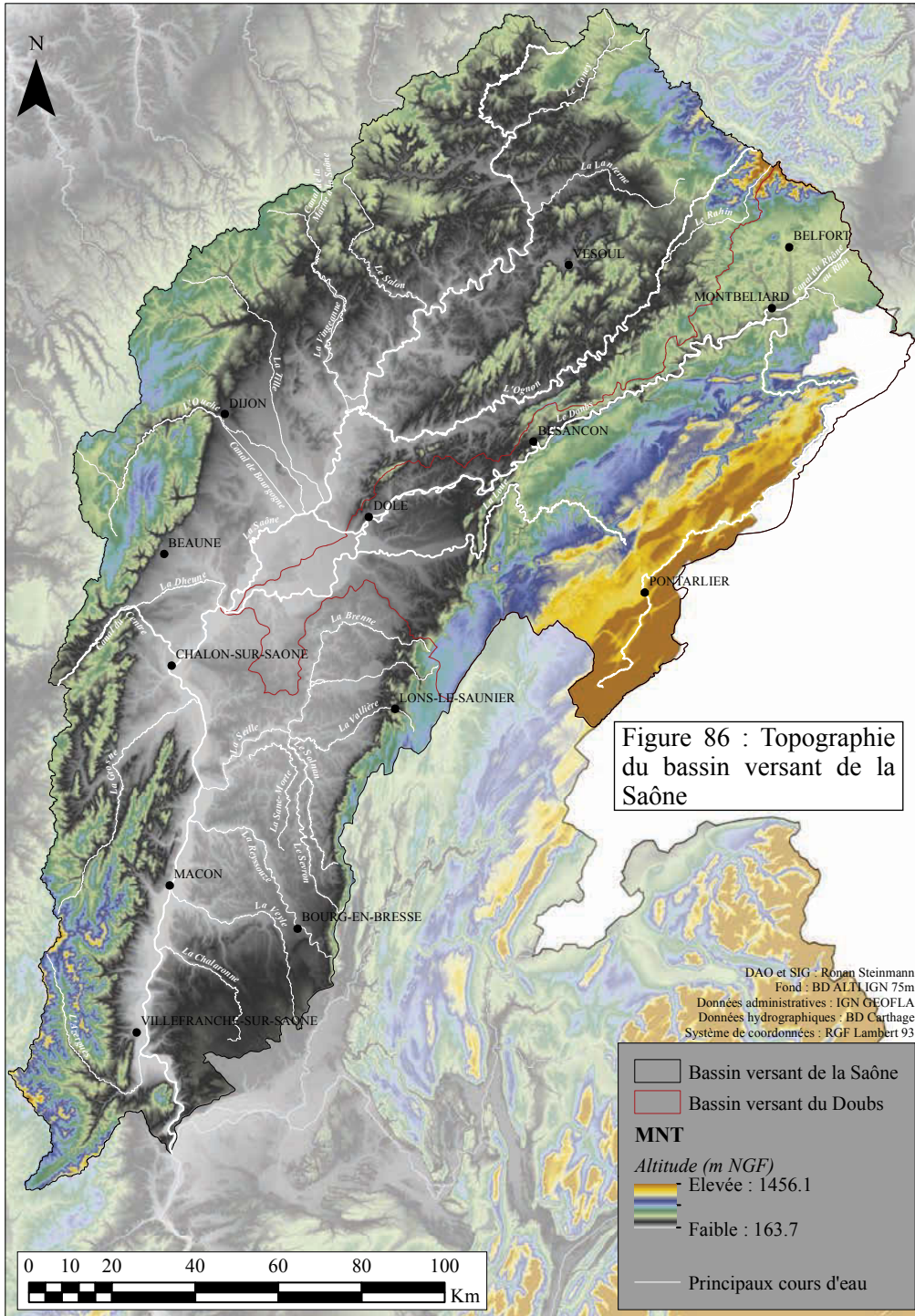


Figure 85 : Les vestiges du pont de bois découverts dans le bras secondaire de la Loire à l'ouest de l'île du Faubourg (d'après Dumont *et al.* 2010)



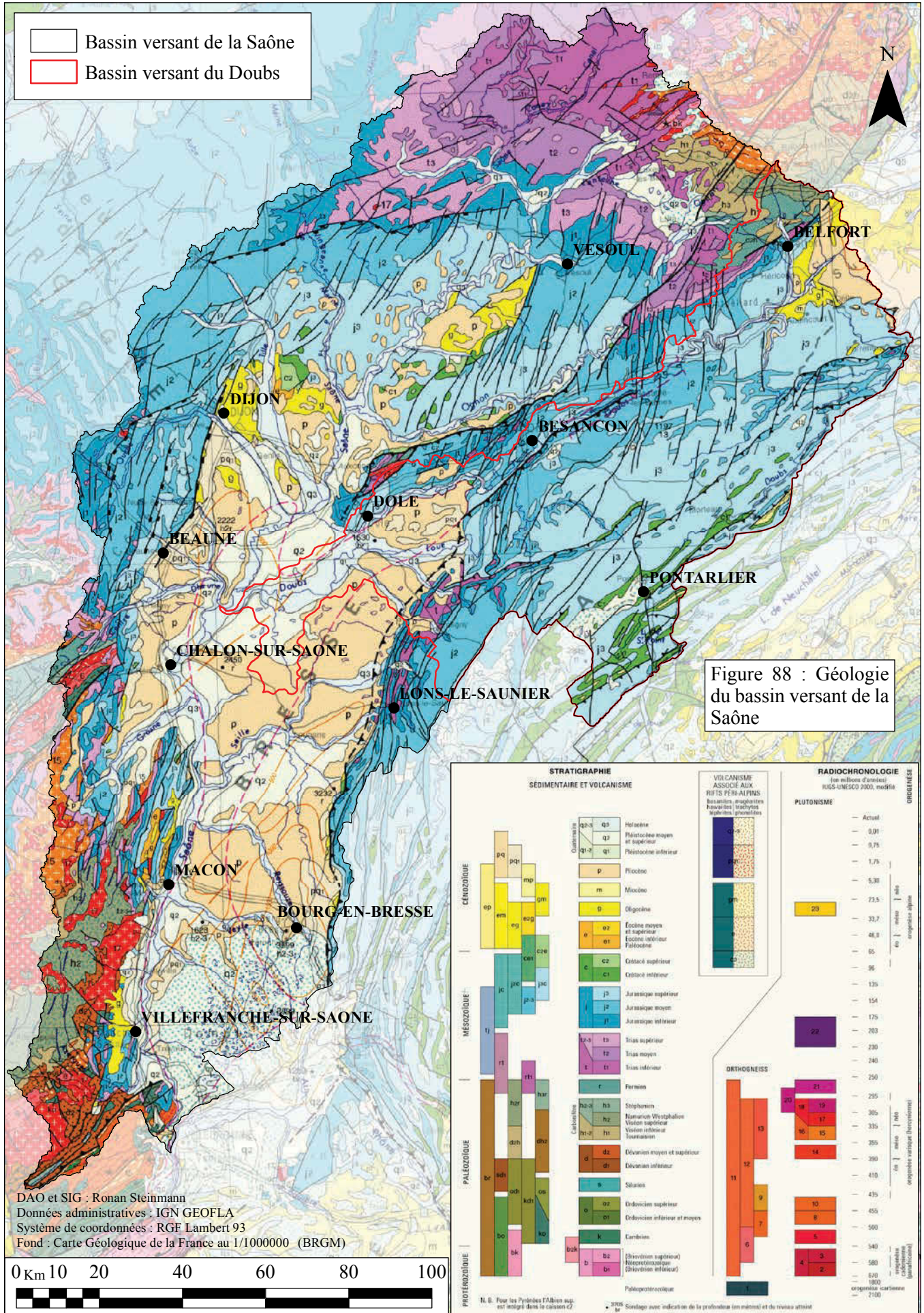


Figure 88 : Géologie du bassin versant de la Saône

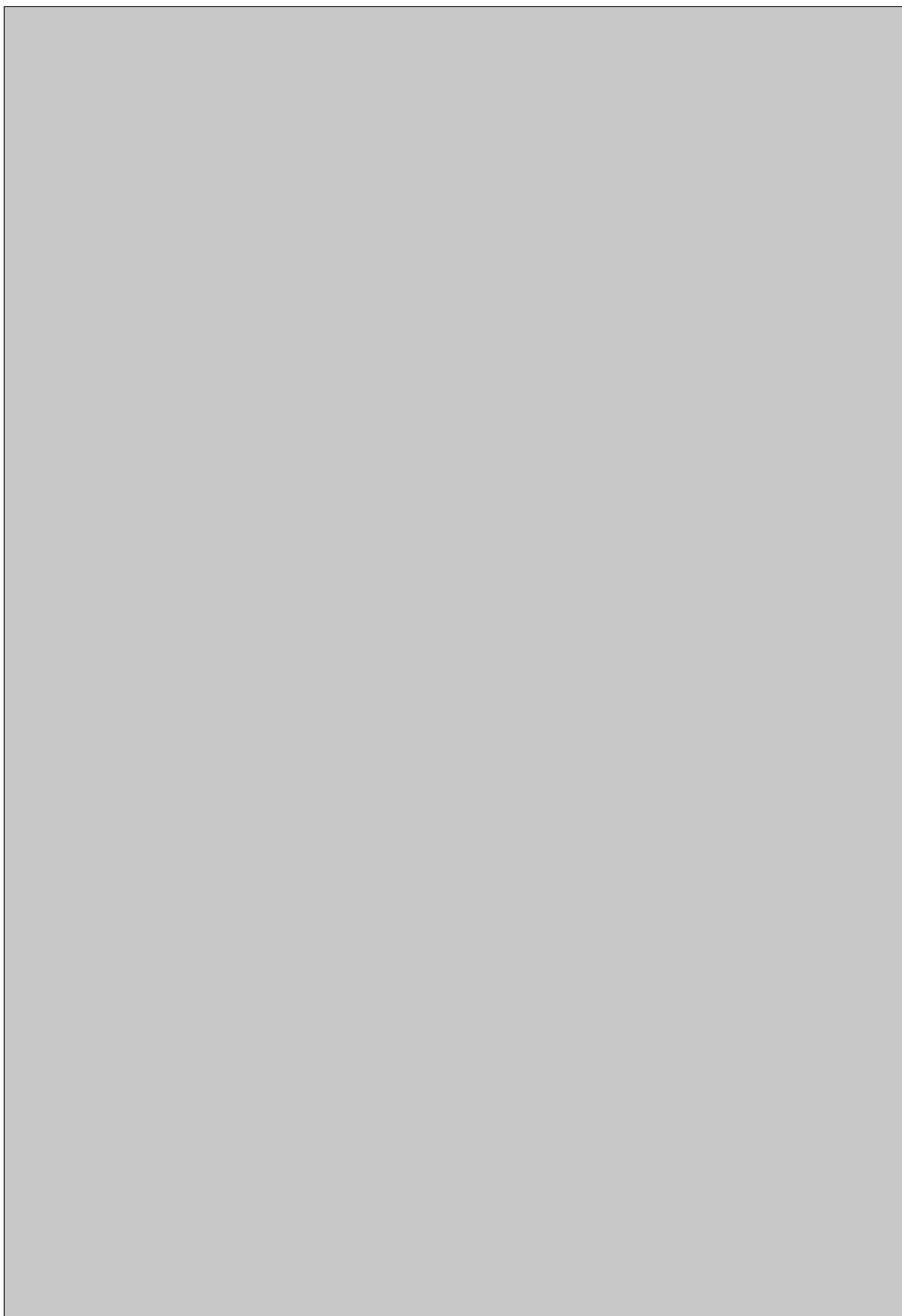


Figure 89 : A - Âges et structuration des principaux terrains géologiques de la Bresse (d'après Petit 1993, p. 16) ; B - Le remplissage Cénozoïque de la Bresse (Lefavrais-Raymond 1962 ; Sittler 1965 dans Petit 1993, p. 17) ; C - Les différentes étapes de remplissage de la Bresse depuis la fin du Pliocène (Bonvalot *et al.* 1984 dans Astrade 2005, p. 56)



Figure 90 : Répartition saisonnière des débits de la Saône (A) et du Doubs (B) sur l'ensemble du bassin versant (données Banque Hydro)

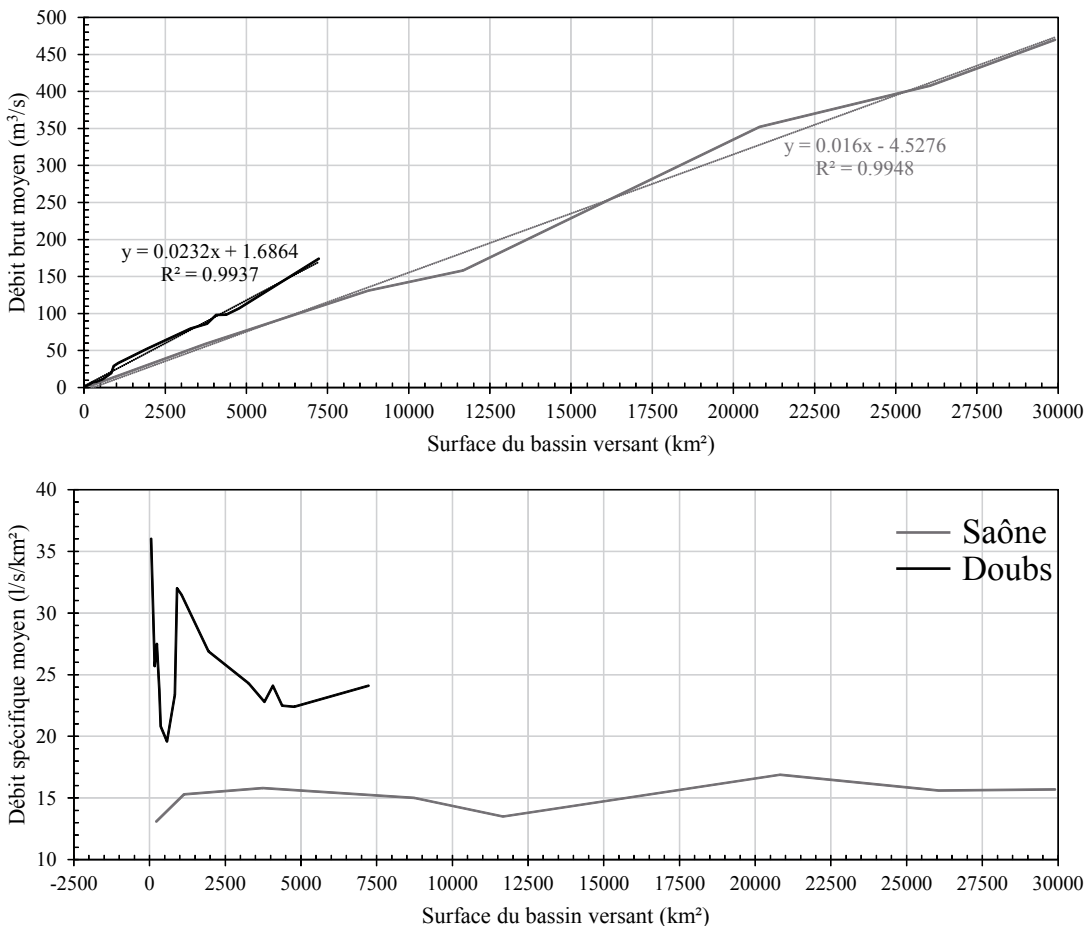
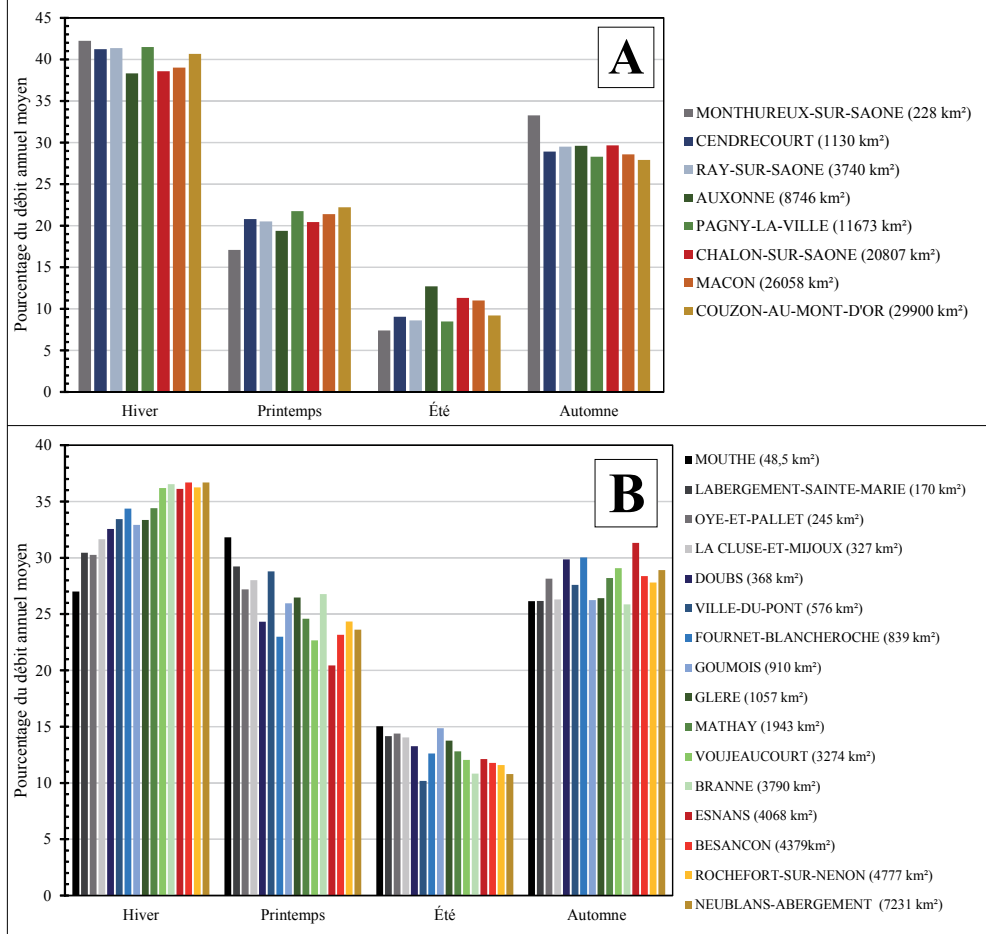


Figure 91 : Évolution des débits moyens bruts et spécifiques du bassin versant de la Saône et du Doubs d'après les données de la Banque Hydro

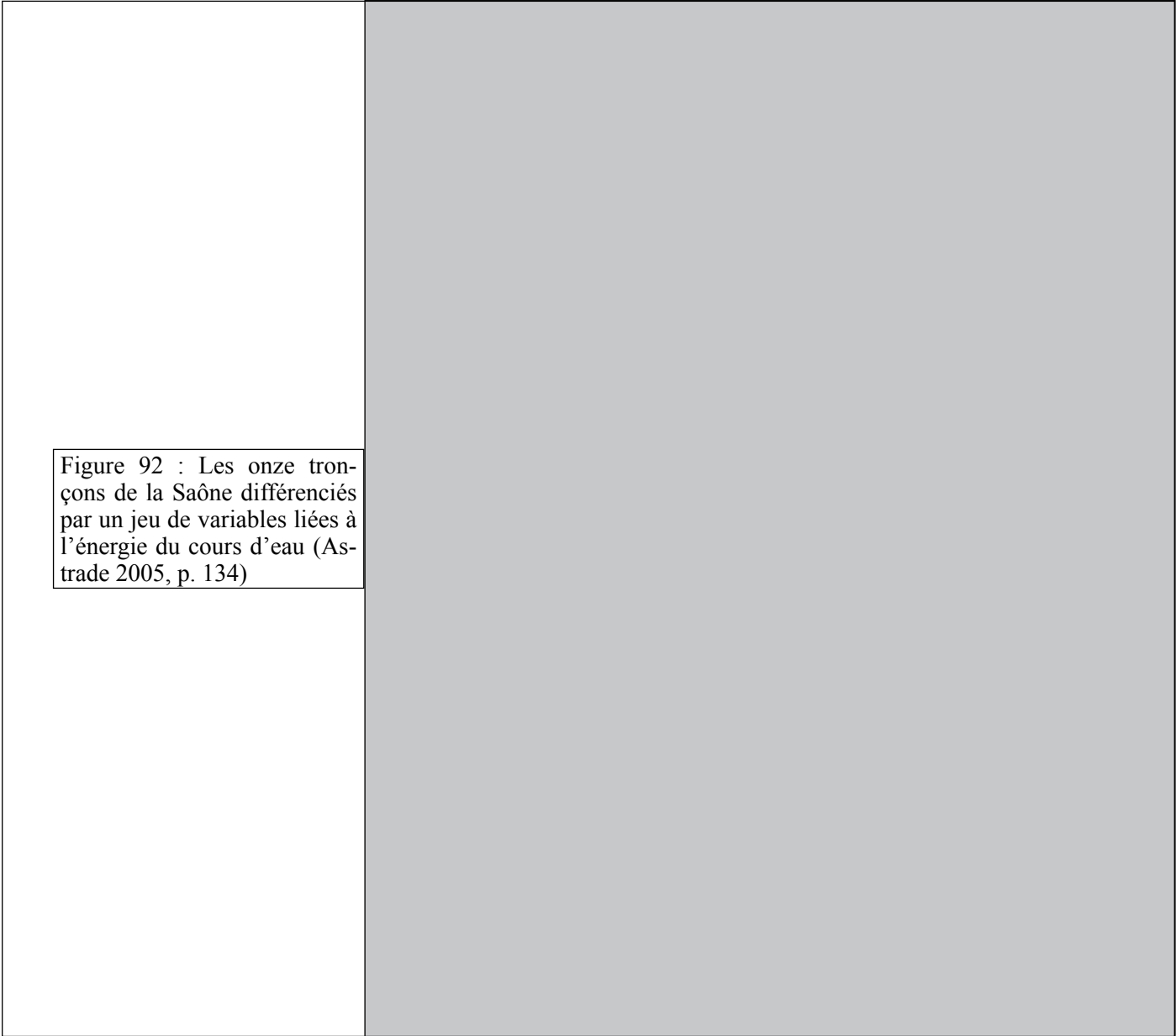


Figure 92 : Les onze tronçons de la Saône différenciés par un jeu de variables liées à l'énergie du cours d'eau (Astrade 2005, p. 134)

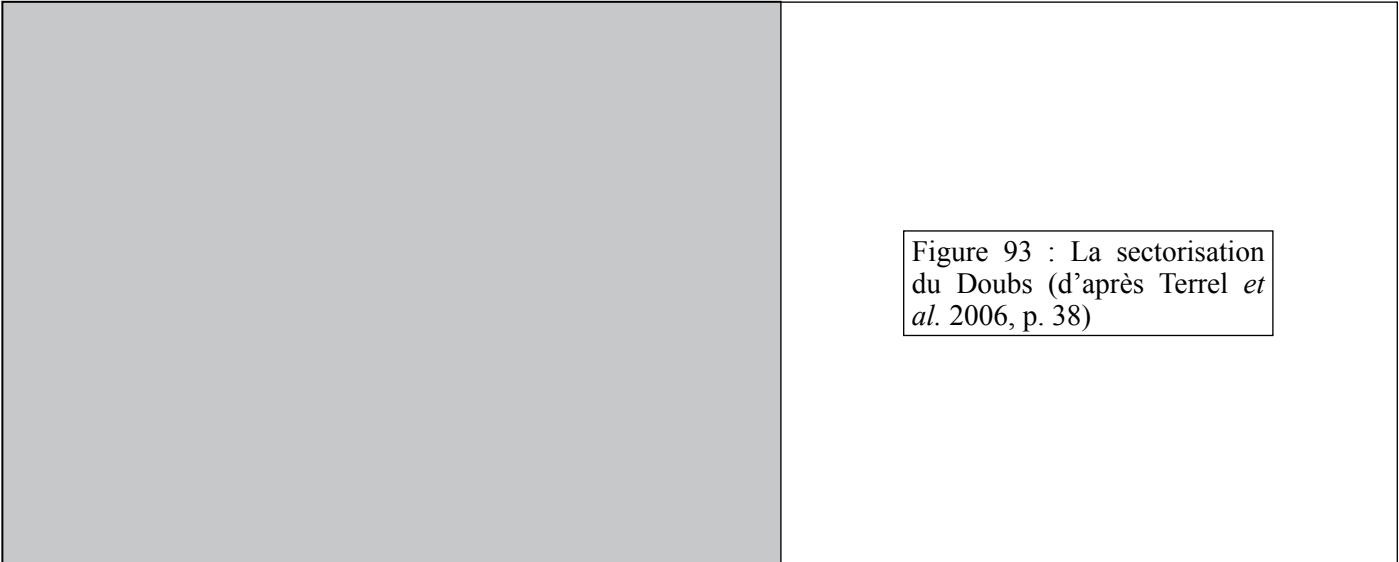
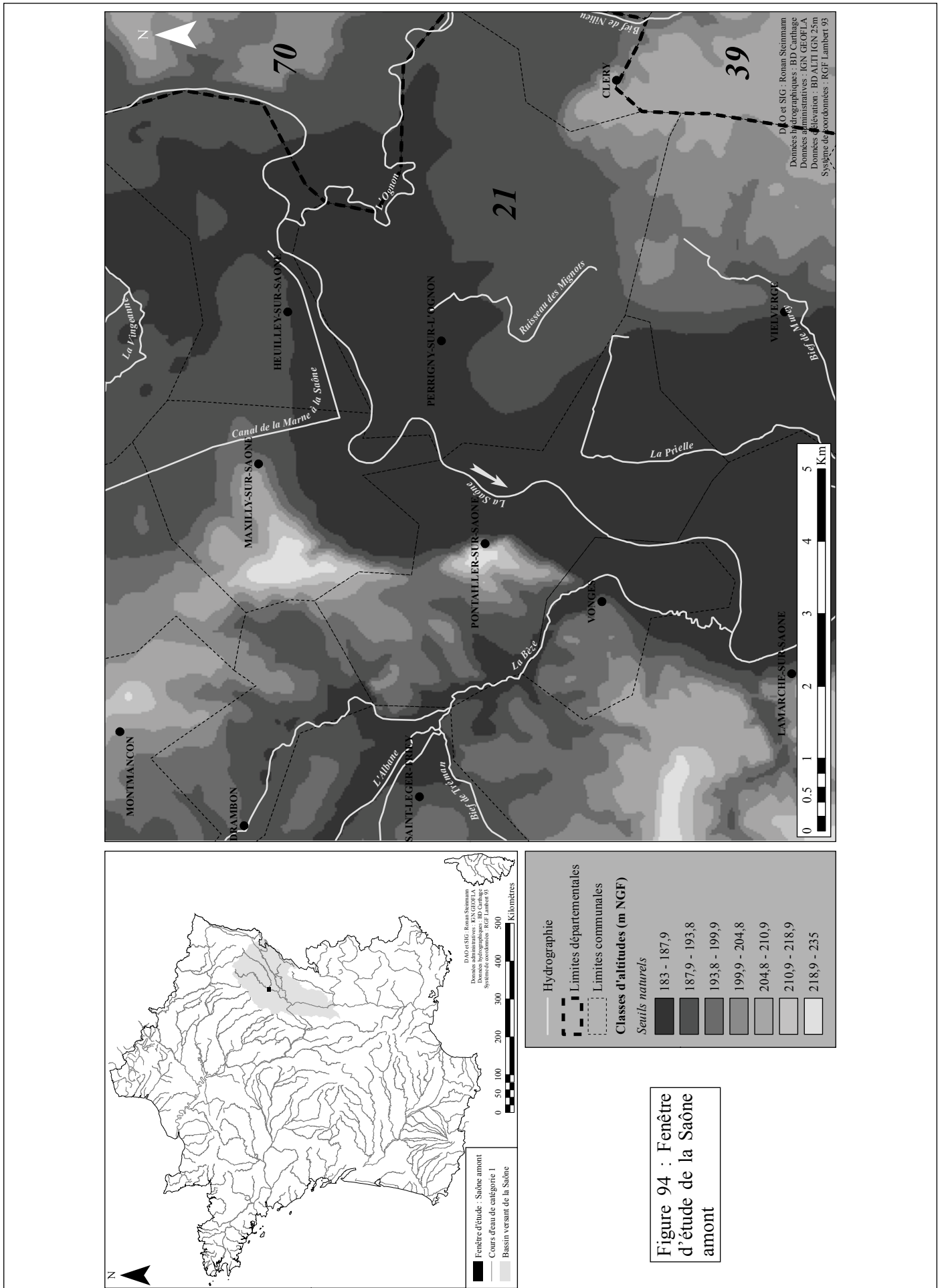
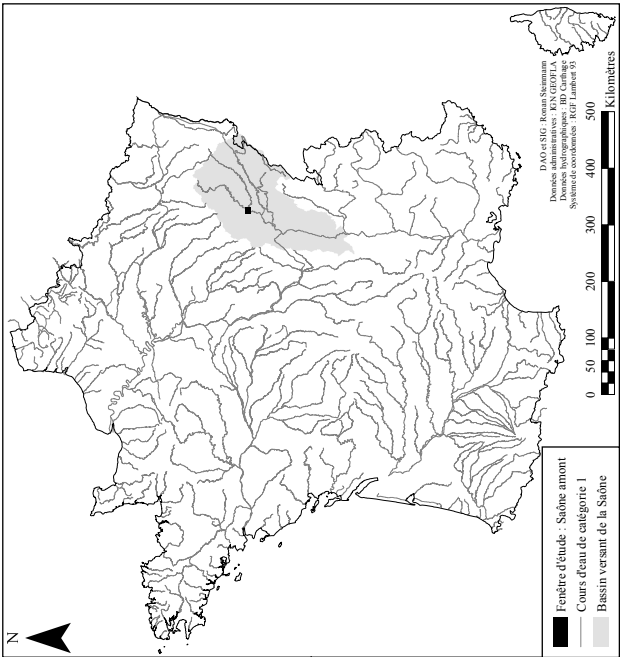


Figure 93 : La sectorisation du Doubs (d'après Terrel *et al.* 2006, p. 38)

# CHAPITRE IV - FENÊTRES D'ÉTUDE DU BASSIN VERSANT DE LA SAÔNE



DfO et SIG : Roman Steinmann  
 Données hydrographiques : BD Carthage  
 Données administratives : IGN GEOFLA  
 Données d'élevation : BD ALTI IGN 25m  
 Système de coordonnées : RGF Lambert 93



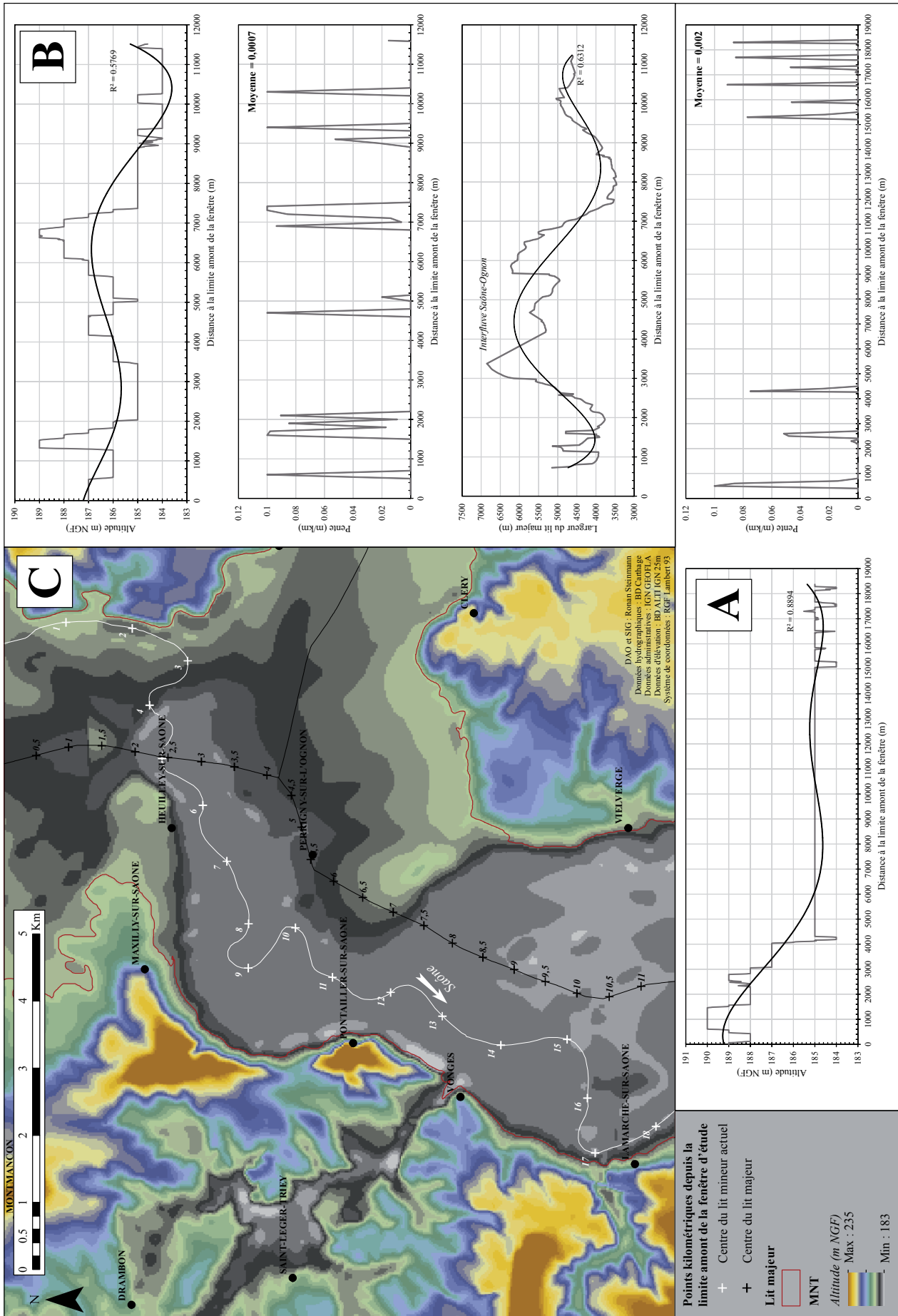
**Hydrographie**

- Limites départementales
- - - Limites communales

**Classes d'altitudes (m NGF)**

Seuils naturels	Altitude Range (m NGF)
1	183 - 187,9
2	187,9 - 193,8
3	193,8 - 199,9
4	199,9 - 204,8
5	204,8 - 210,9
6	210,9 - 218,9
7	218,9 - 235

Figure 94 : Fenêtre d'étude de la Saône amont



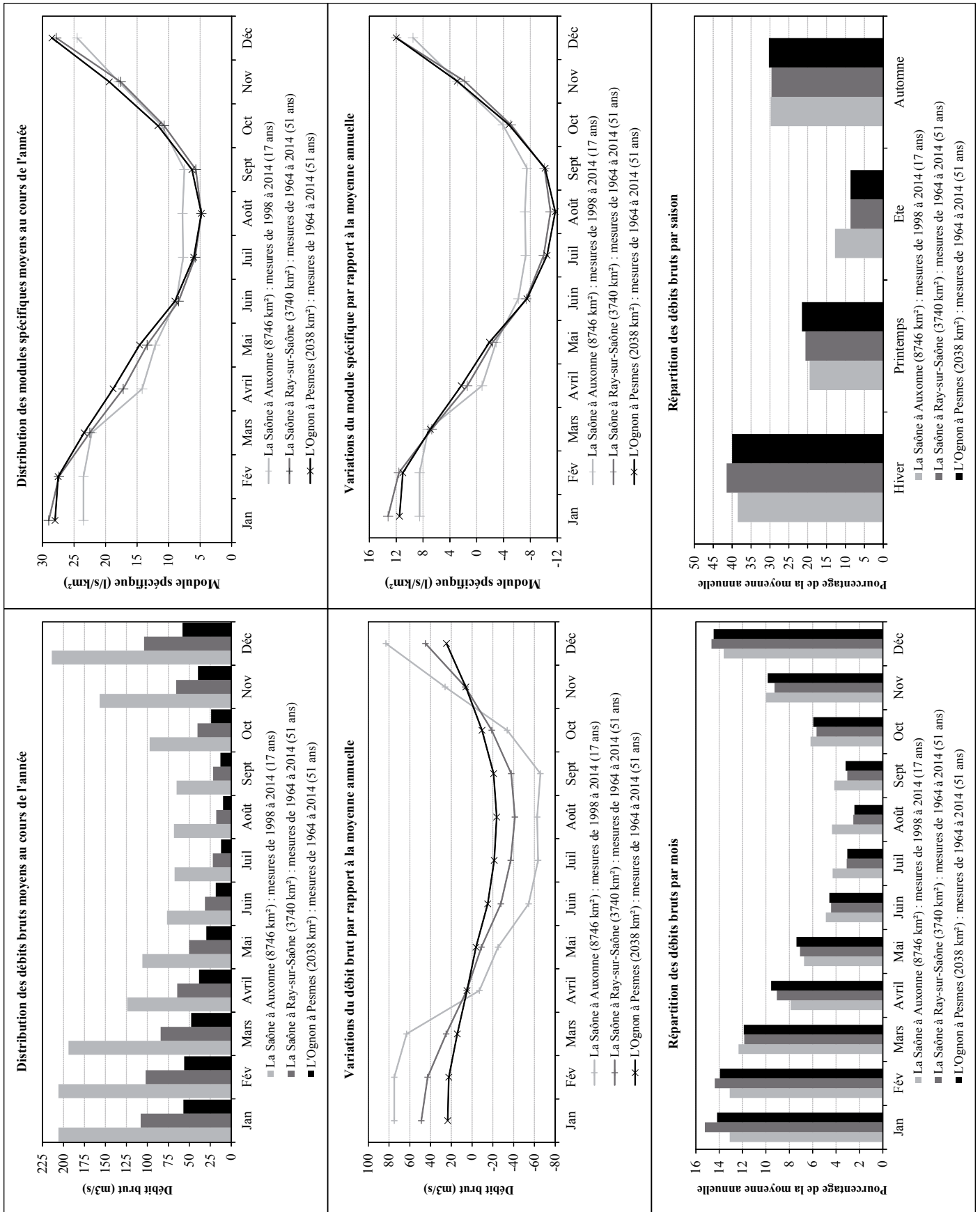


Figure 96 : Caractéristiques hydrologiques de la Saône et de l'Ognon avant et après leur confluence aux stations de mesure d'Auxonne, Ray-sur-Saône et Pesmes (données Banque Hydro)

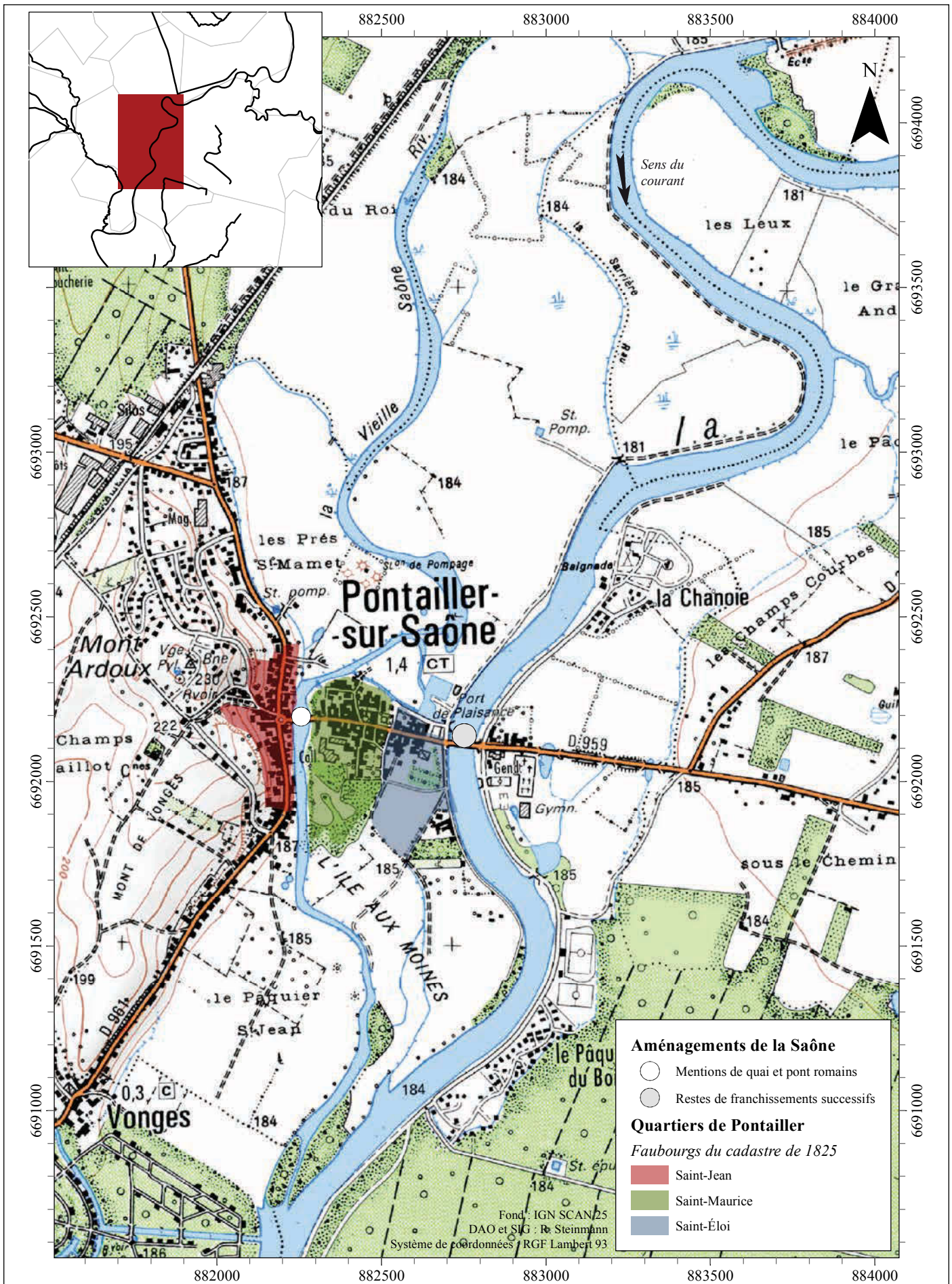


Figure 97 : Environs de Pontailier-sur-Saône et position de l'emprise au sein de la fenêtre d'étude de la Saône amont

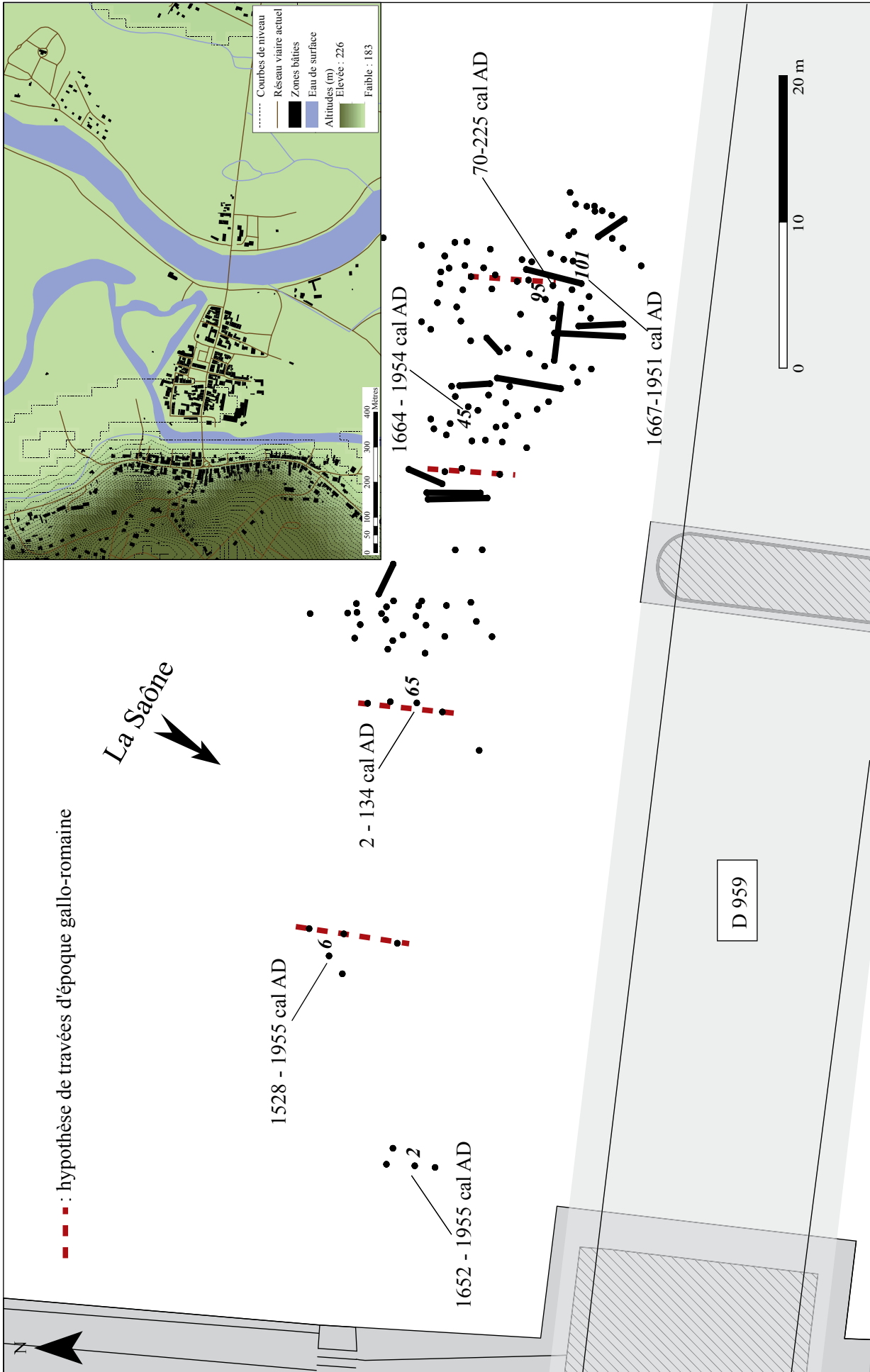


Figure 98 : Plan de répartition et datations des vestiges de franchissement découverts dans le lit de la Saône à Pontailleur-sur-Saône (d'après Dumont *et al.* 2011f)

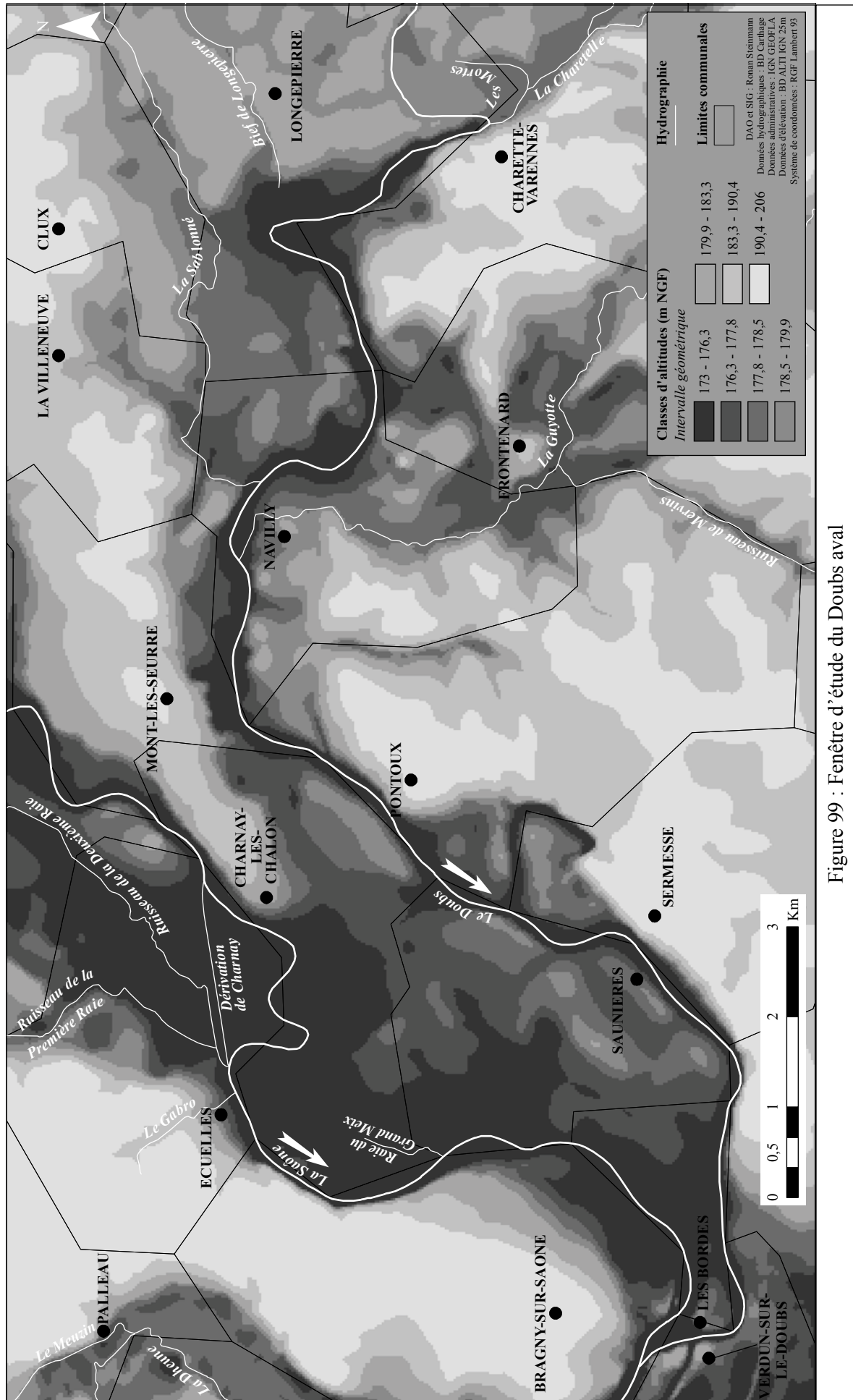


Figure 99 : Fenêtre d'étude du Doubs aval



# CHAPITRE IV - FENÊTRES D'ÉTUDE DU BASSIN VERSANT DE LA SAÔNE

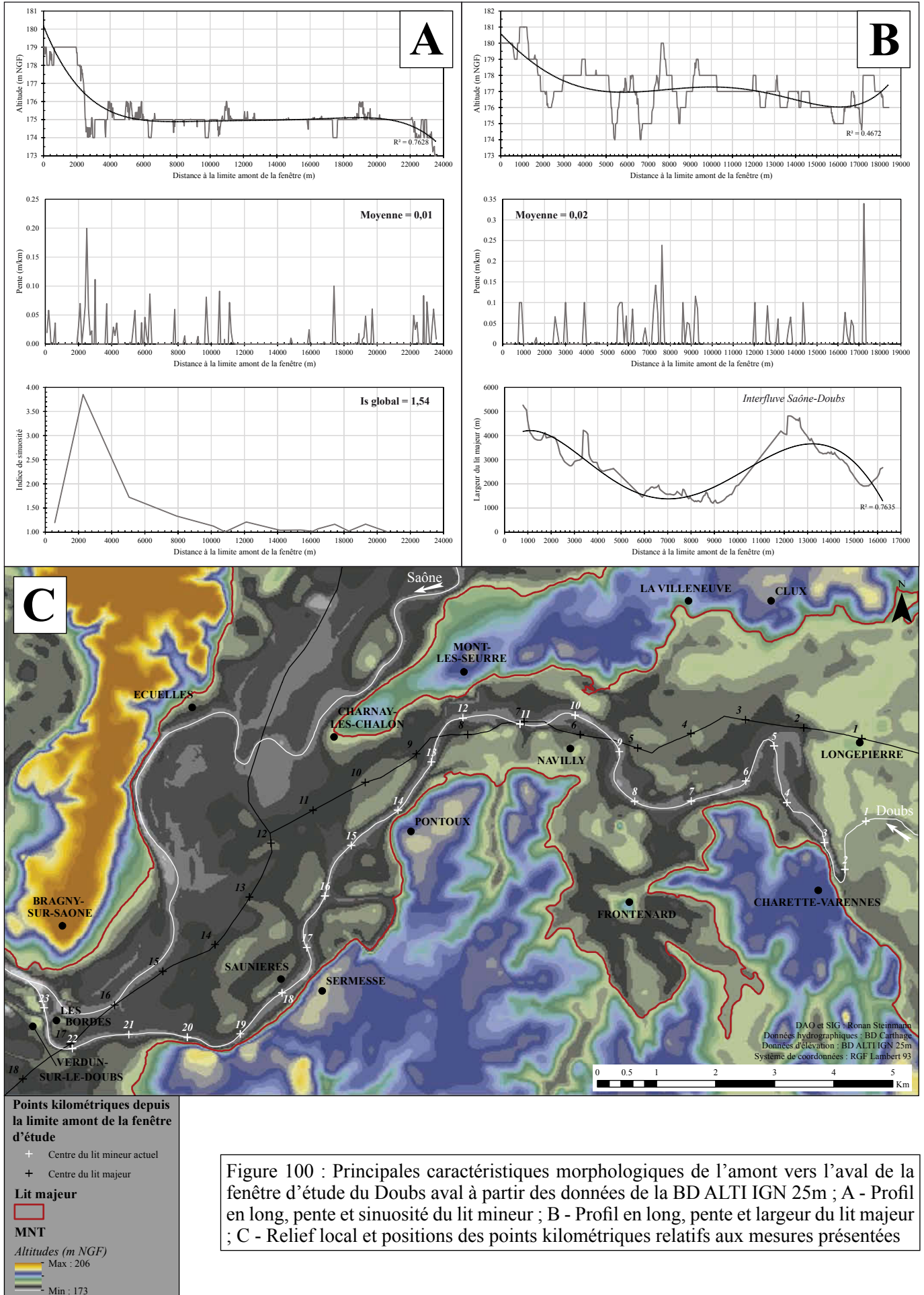


Figure 100 : Principales caractéristiques morphologiques de l'amont vers l'aval de la fenêtre d'étude du Doubs aval à partir des données de la BD ALTI IGN 25m ; A - Profil en long, pente et sinuosité du lit mineur ; B - Profil en long, pente et largeur du lit majeur ; C - Relief local et positions des points kilométriques relatifs aux mesures présentées

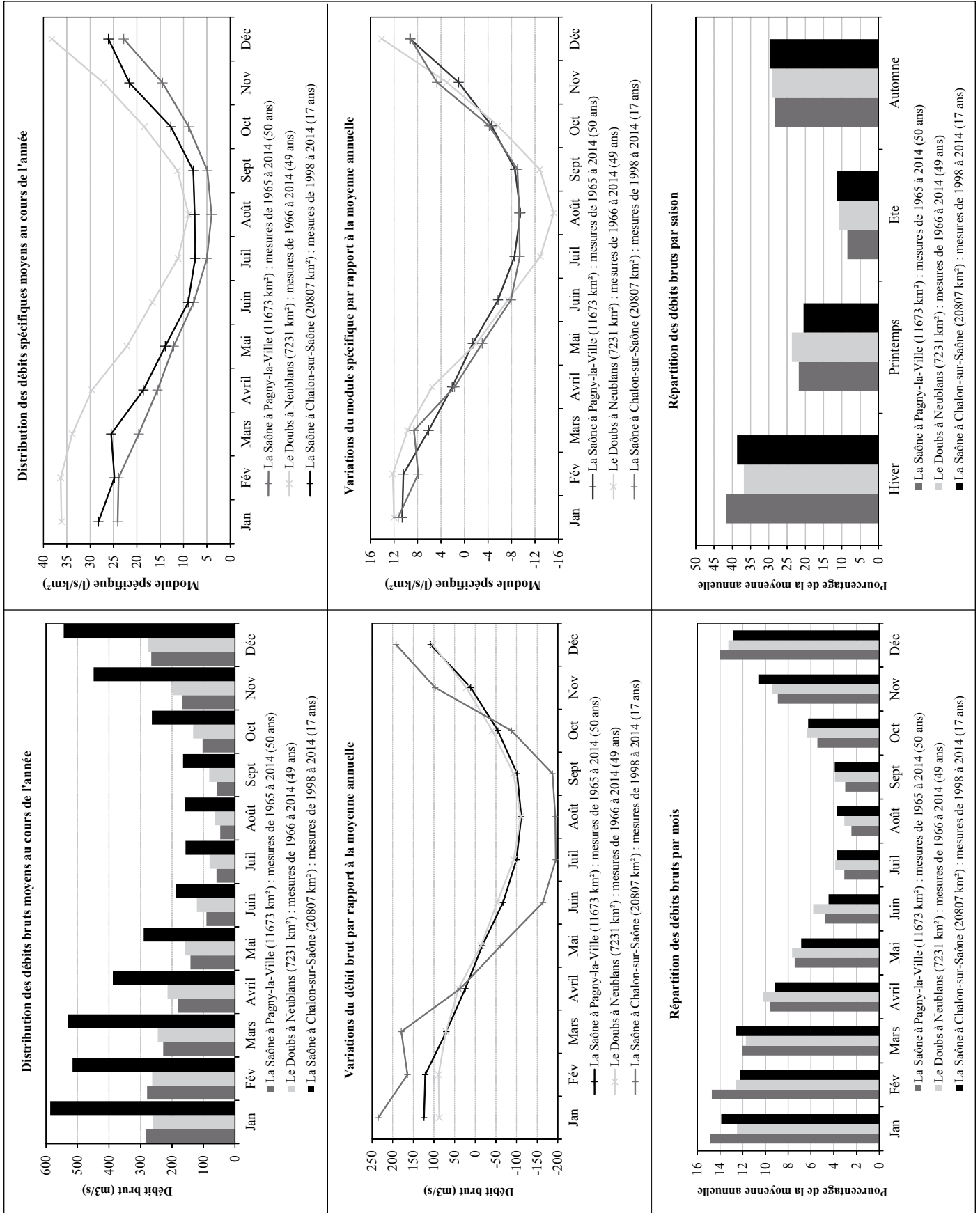


Figure 101 : Caractéristiques hydrologiques de la Saône et du Doubs avant et après leur confluence aux stations de mesure de Pagny-la-Ville, Neublans et Chalon-sur-Saône (données Banque Hydro)

## CHAPITRE IV - FENÊTRES D'ÉTUDE DU BASSIN VERSANT DE LA SAÔNE

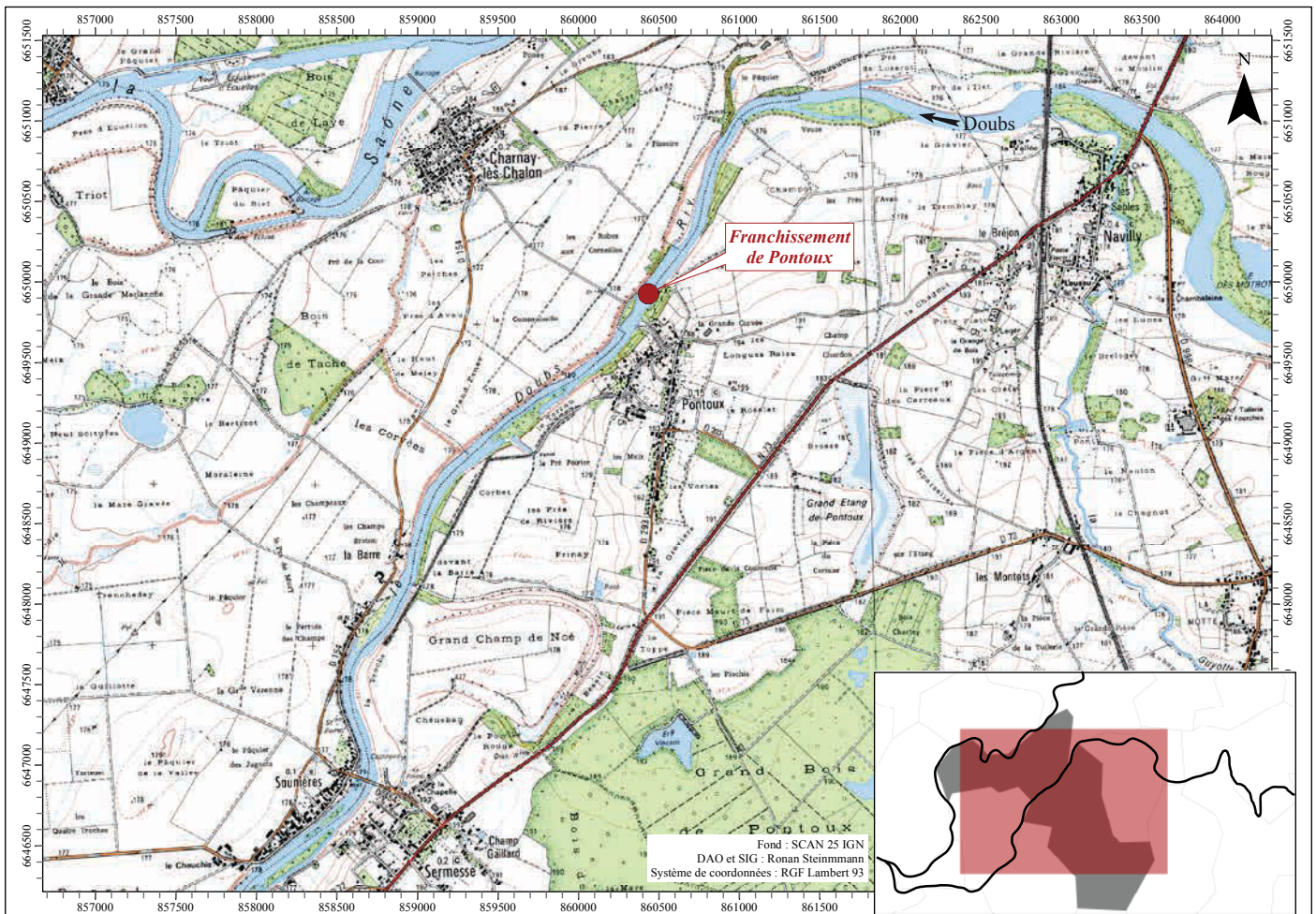


Figure 102 : Environs du site de Pontoux et position des vestiges au sein des communes de la fenêtre d'étude

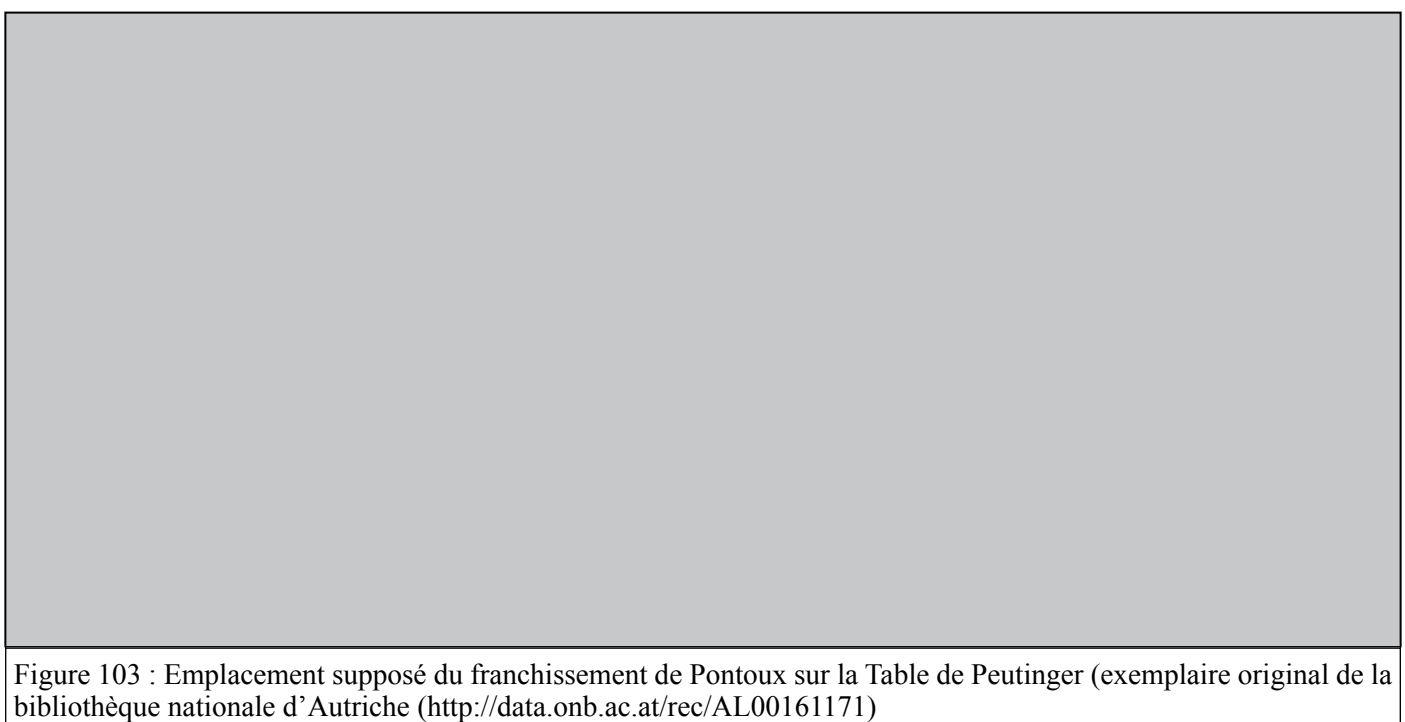


Figure 103 : Emplacement supposé du franchissement de Pontoux sur la Table de Peutinger (exemplaire original de la bibliothèque nationale d'Autriche (<http://data.onb.ac.at/rec/AL00161171>))

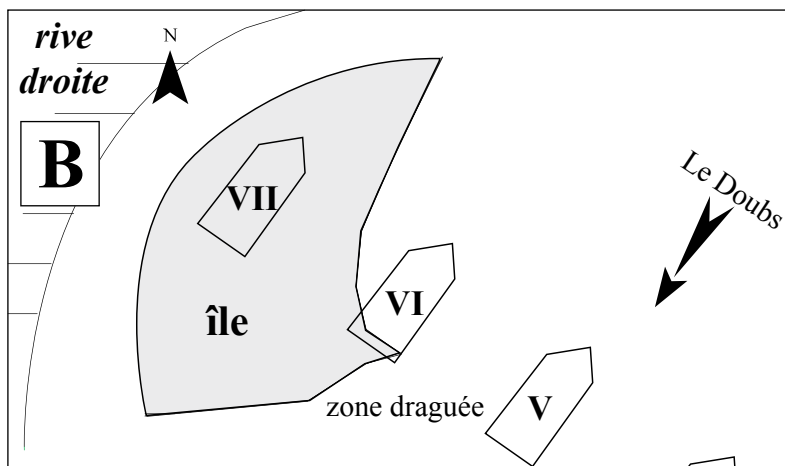
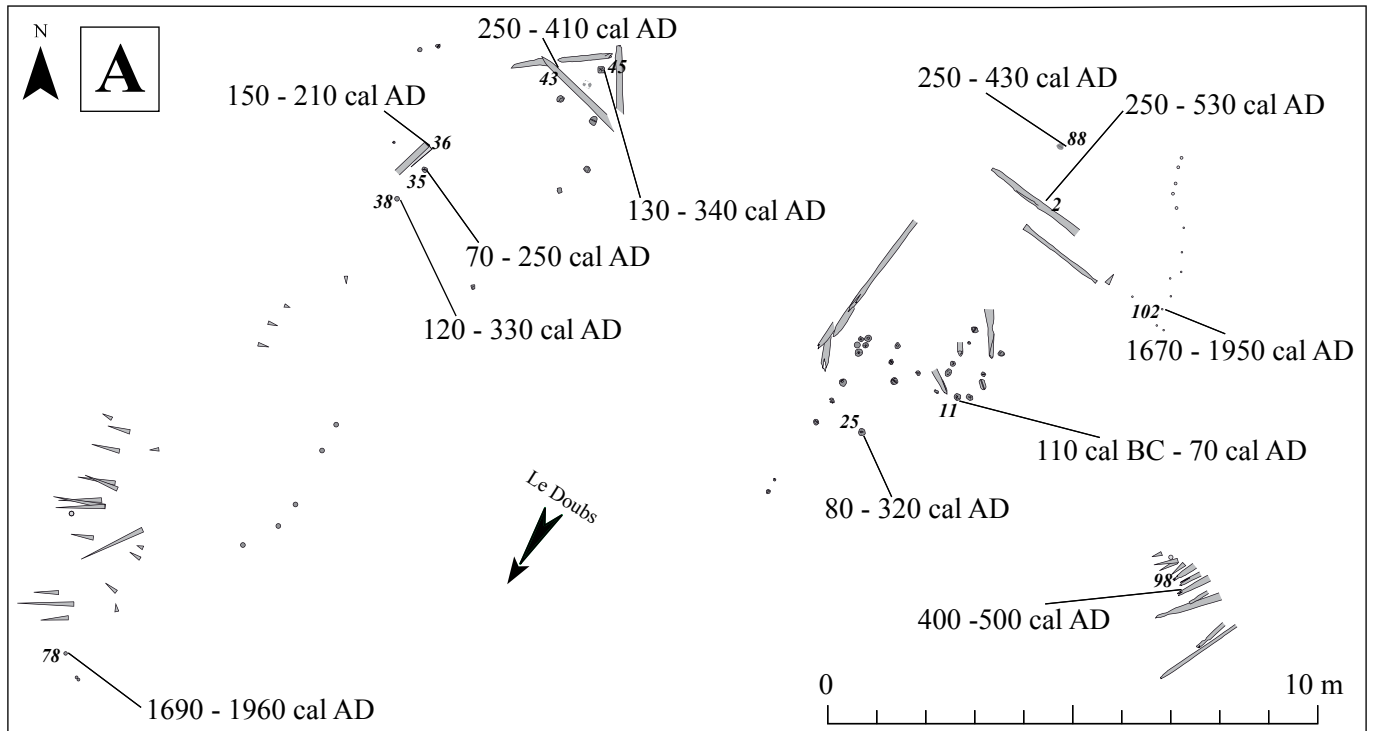
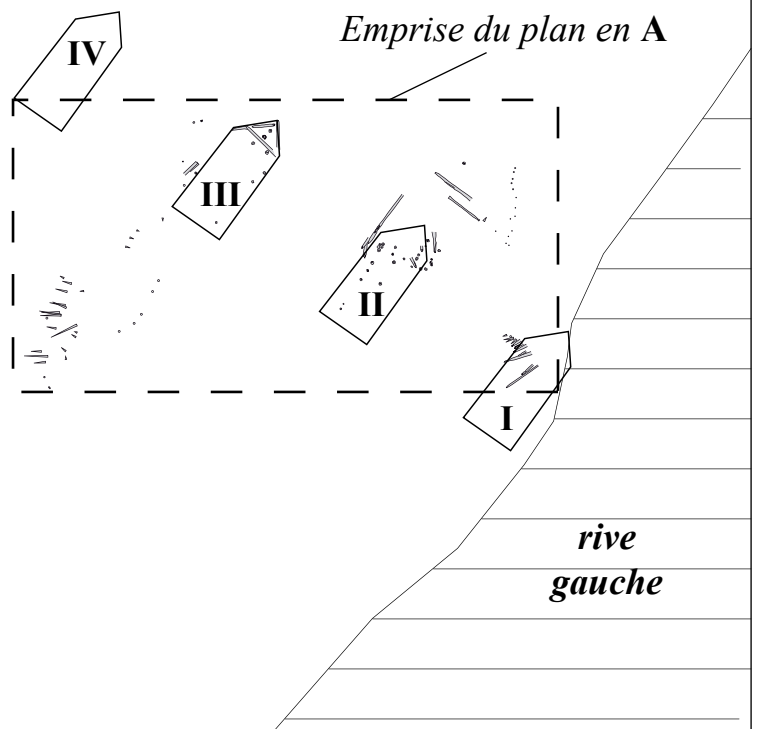
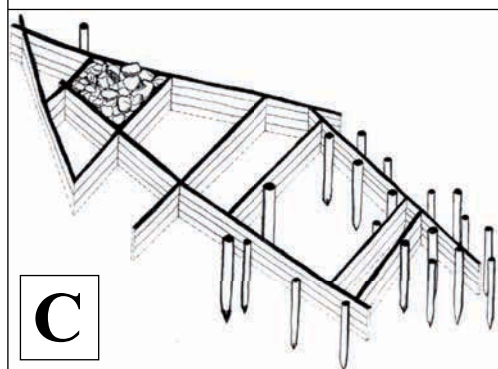


Figure 104 : Le pont romain de Pontoux (Dumont *et al.* 2008b, pp. 39 - 40) A - Plan de répartition et datations des vestiges de franchissement découverts dans le lit du Doubs ; B - Plan d'ensemble et restitution des piles disparues lors des dragages ; C - Mode de construction du pont de Stepperg sur le Danube, analogue à celui de Pontoux (Dumont *et al.* 2008b, p. 26)



**Datations radiocarbone (revues d'après Straffin 2000)**

	Terrasse	Code échantillon	AGE BP non corrigé	Incertitude	Âge calibré à 95,4% cal BC/AD (Oxcal 4.1, Curve IntCal09)
<b>LOIRE</b>	T2	Tx8571	1270	40	662 à 869 cal AD
	T3	Tx8568	2990	40	1386 à 1059 cal BC
	T3	Tx8240	3040	50	1418 à 1130 cal BC
	T3	Tx8574	3290	50	1688 à 1453 cal BC
	T3	Tx8573	3680	60	2274 à 1896 cal BC
<b>ARROUX</b>	T2	Tx8570	200	50	1530 à 1955 cal AD
	T2	Tx8569	500	50	1306 à 1476 cal AD
	T2	Tx8572	1420	60	442 à 766 cal AD
	T4	Tx8239	5590	60	4541 à 4338 cal BC

**Datations OSL (revues d'après Colls *et al.* 2001)**

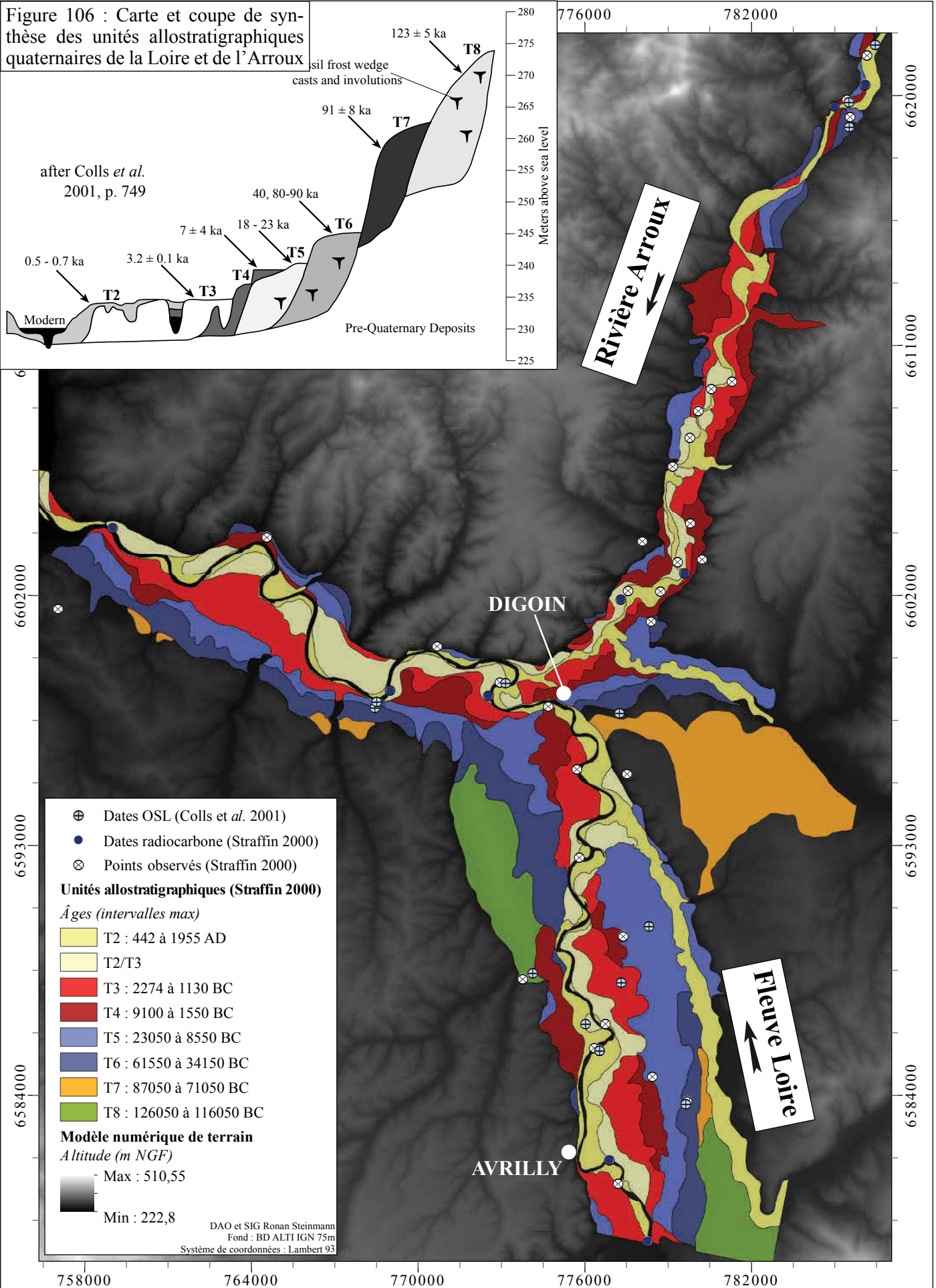
	Terrasse	Code échantillon	Âge BP	Incertitude	Âge BC/AD
<b>LOIRE</b>	T2	19\1	350	70	1530 à 1670 AD
	T2	19\1	300	60	1590 à 1710 AD
	T2	1026\2	500	400	1050 à 1850 AD
	T2	1021\1	680	40	1230 à 1310 AD
	T5	1024\1	20600	1800	20450 à 16850 BC
	T5	18\1	18900	1400	18350 à 15550 BC
	T5	1025\2	17800	2400	18250 à 13450 BC
	T5	20\1	21200	1200	20450 à 18050 BC
	T6	1022\1	39800	3700	41550 à 34150 BC
	T6	1023\2	61000	2500	61550 à 56550 BC
	T6	17\1	49000	5000	52050 à 42050 BC
	T7	31\1	81000	8000	87050 à 71050 BC
	T8	16\1	123000	5000	126050 à 116050 BC
<b>ARROUX</b>	T3	21\1	3200	100	1350 à 1150 BC
	T4	1020\2	7300	3800	9150 à 1550 BC
	T5	14\1	11100	600	9750 à 8550 BC
	T5	15\1	23200	1800	23050 à 19450 BC
	T5	15\2	19300	1700	19050 à 15650 BC

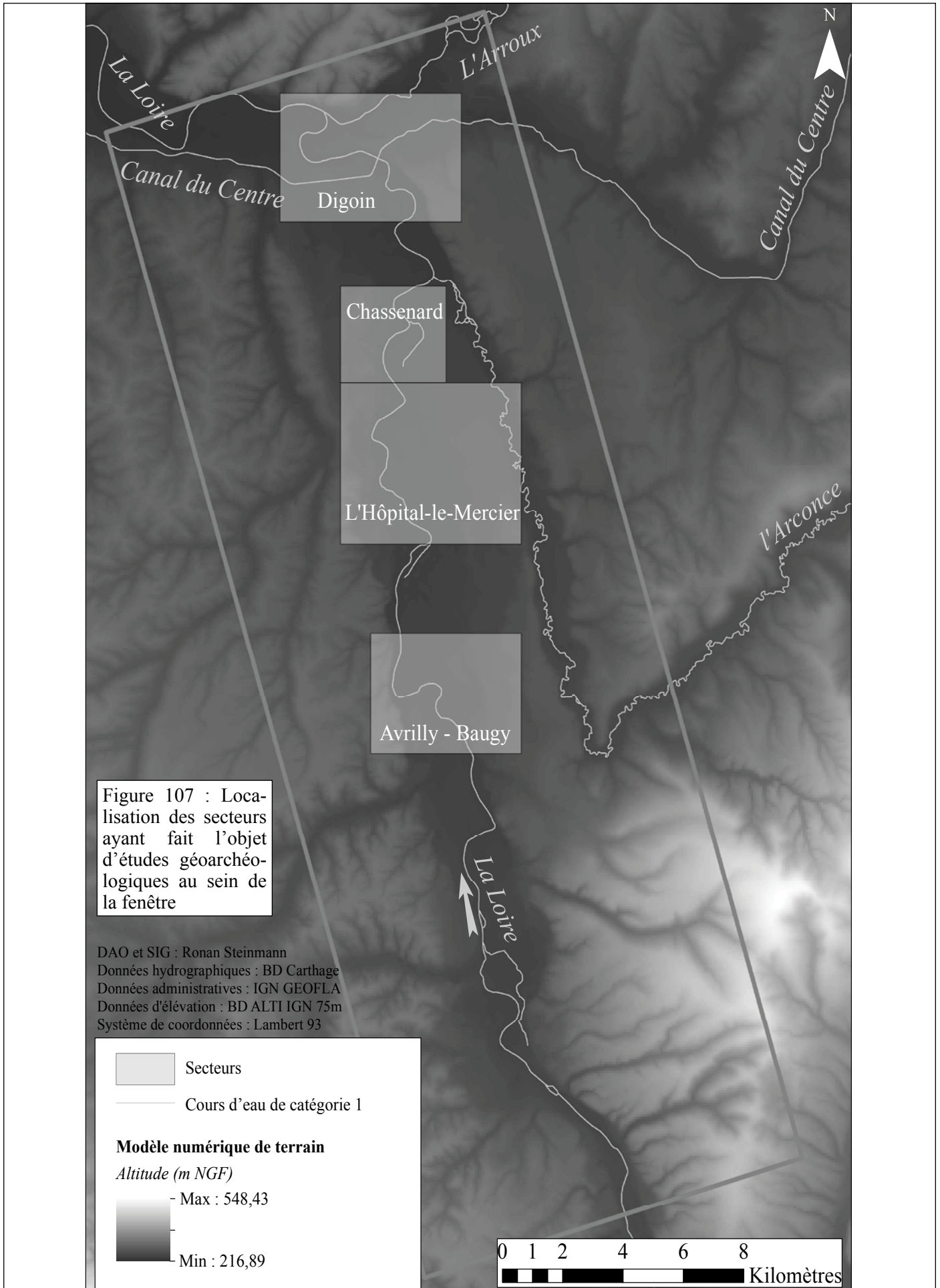
**BILAN (Loire et Arroux)**

Terrasse	Nombre de dates OSL		Nombre de dates radiocarbone		Fourchette des dates fournies
	Arroux aval	Loire	Arroux aval	Loire	
<b>T2</b>	0	4	3	1	442 à 1955 AD
<b>T3</b>	1	0	0	4	2274 à 1130 BC
<b>T4</b>	1	0	1	0	9100 à 1550 BC
<b>T5</b>	3	4	0	0	23050 à 8550 BC
<b>T6</b>	0	3	0	0	61550 à 34150 BC
<b>T7</b>	0	1	0	0	87050 à 71050 BC
<b>T8</b>	0	1	0	0	126050 à 116050 BC

Figure 105 : Âges des unités alluviales quaternaires de la fenêtre d'étude d'après les datations disponibles

Figure 106 : Carte et coupe de synthèse des unités allostratigraphiques quaternaires de la Loire et de l'Arroux





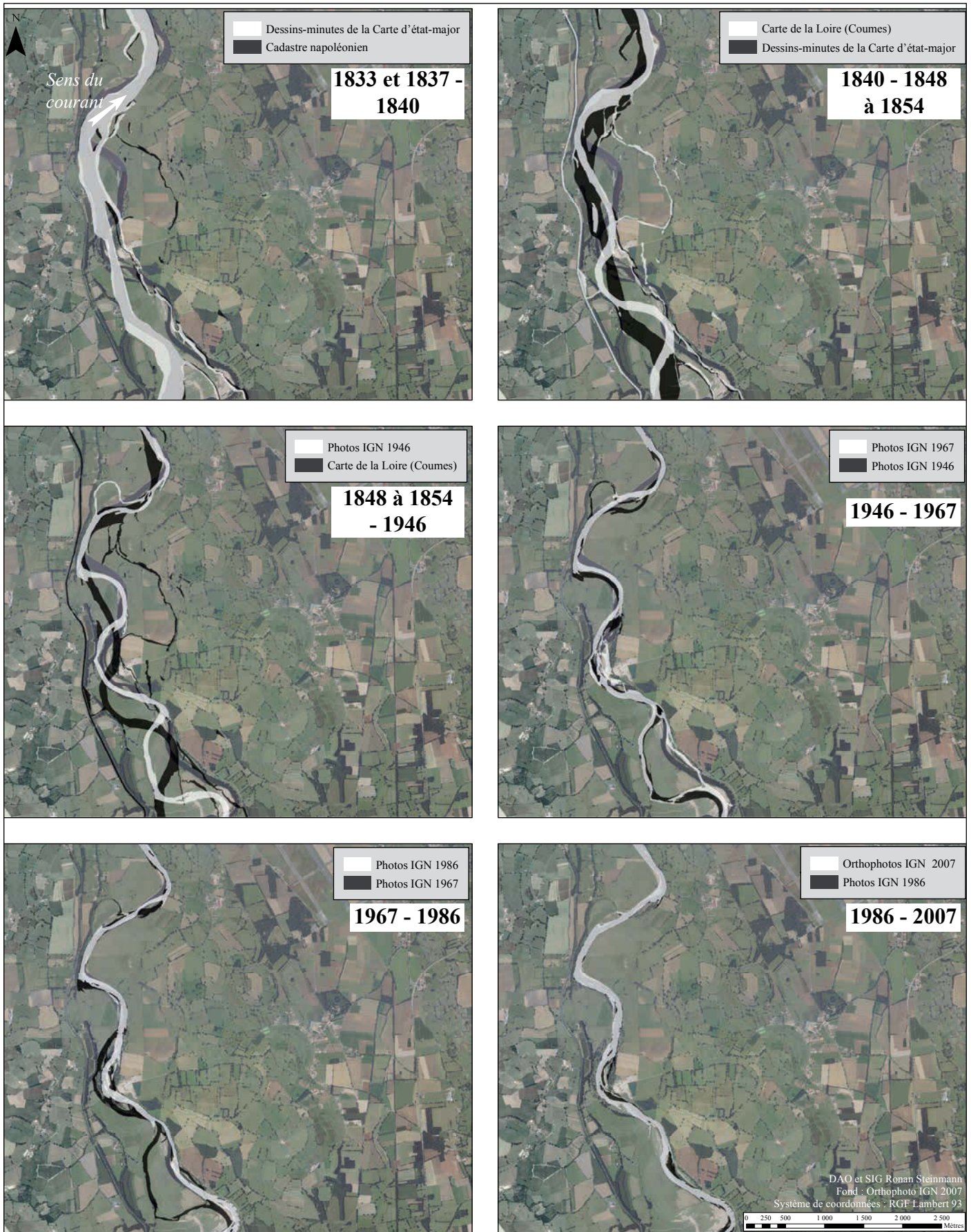


Figure 108 : Évolution en plan du lit actif de la Loire au cours des deux derniers siècles dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier ; le tracé sombre est toujours le plus ancien des deux



CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT

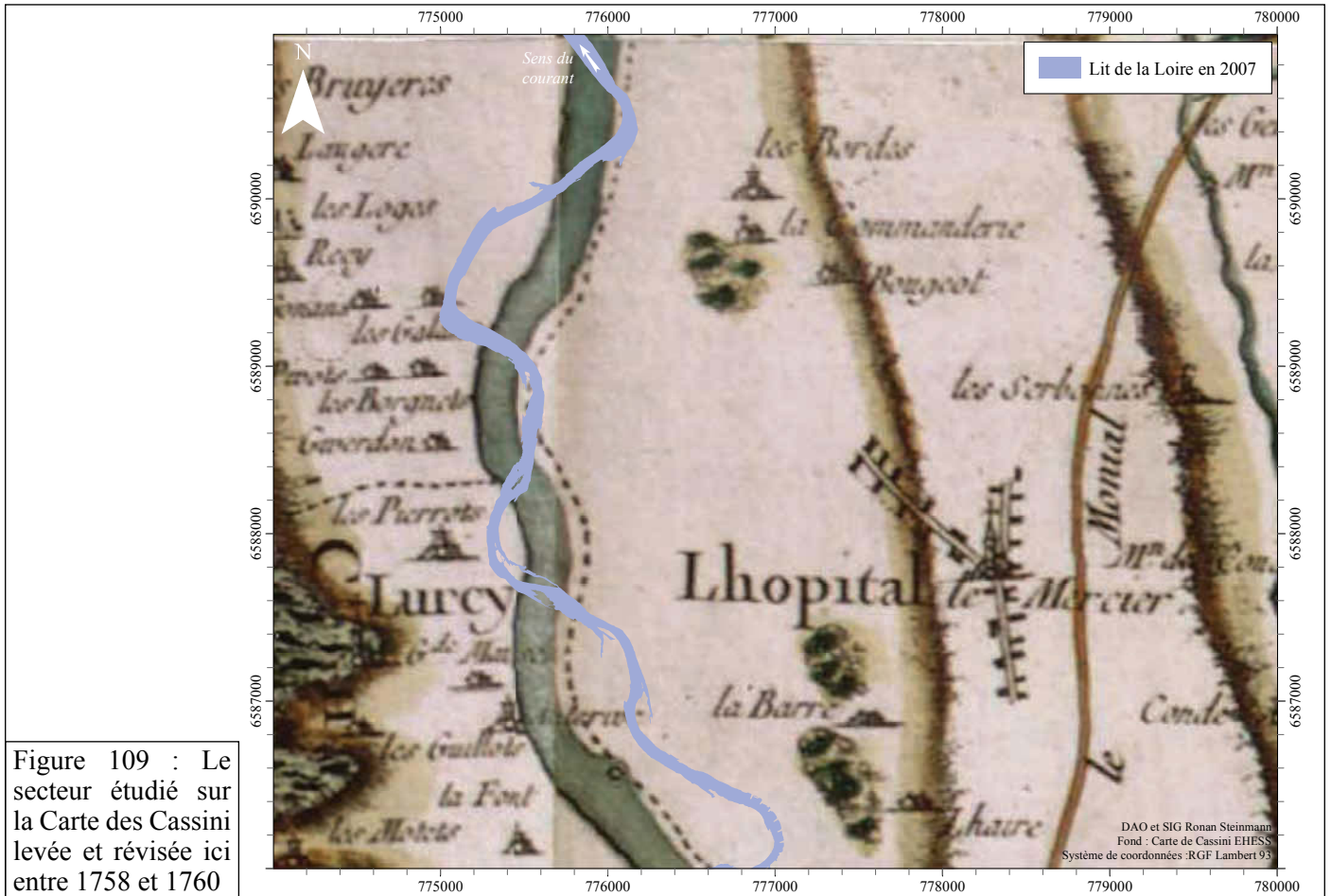


Figure 109 : Le secteur étudié sur la Carte des Cassini levée et révisée ici entre 1758 et 1760

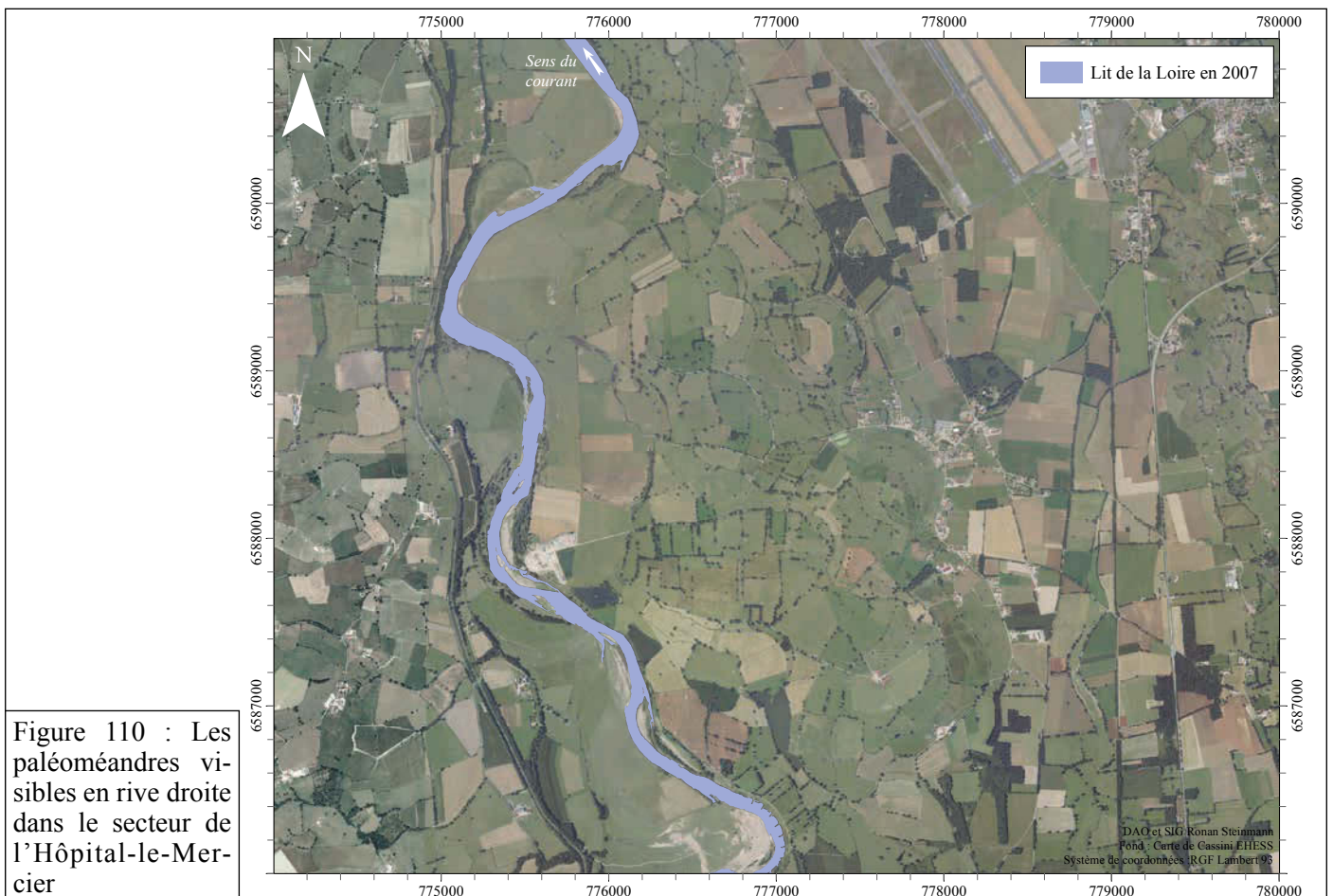
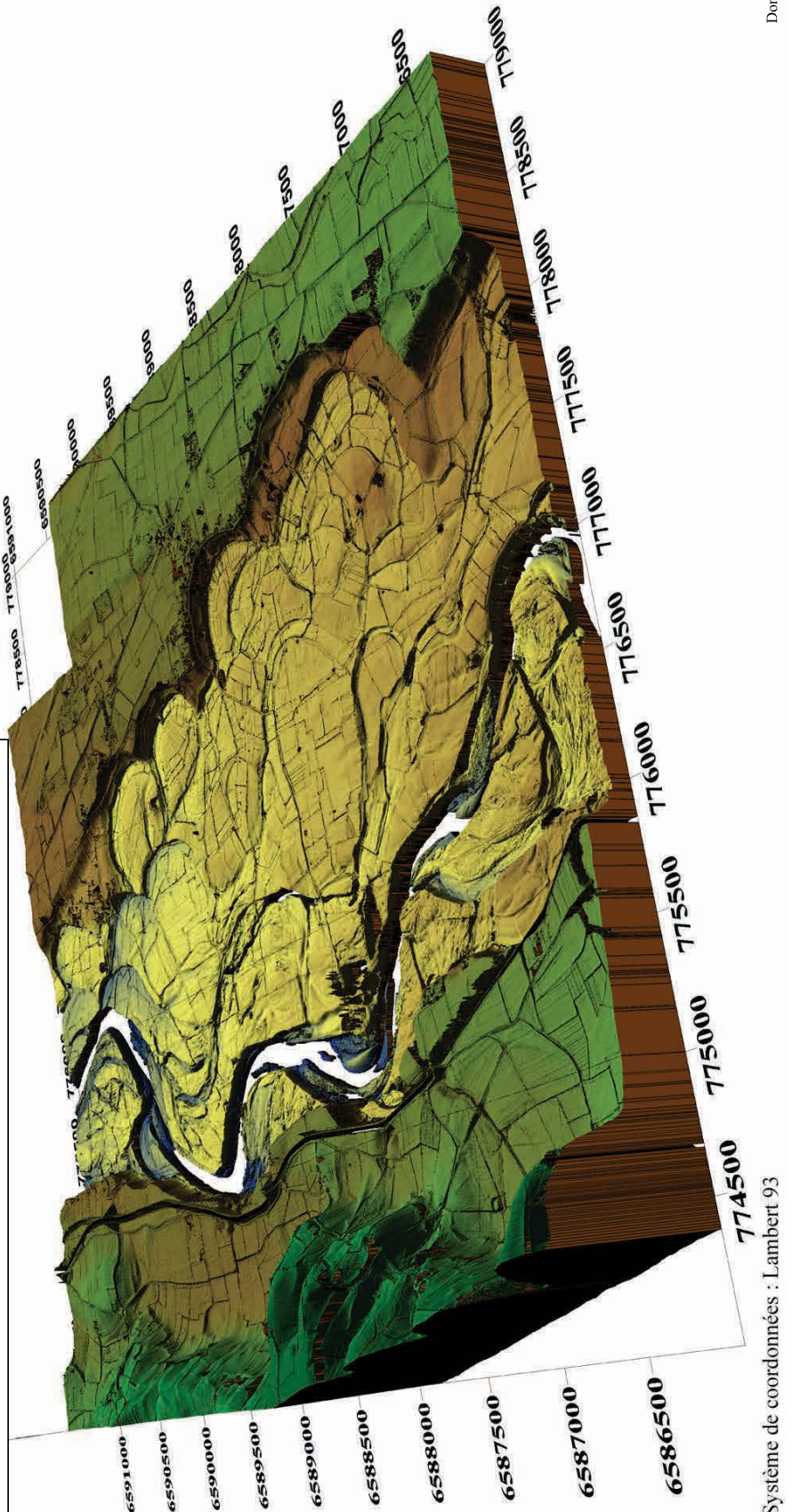
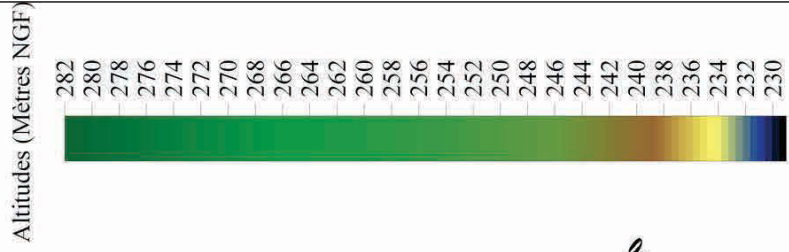
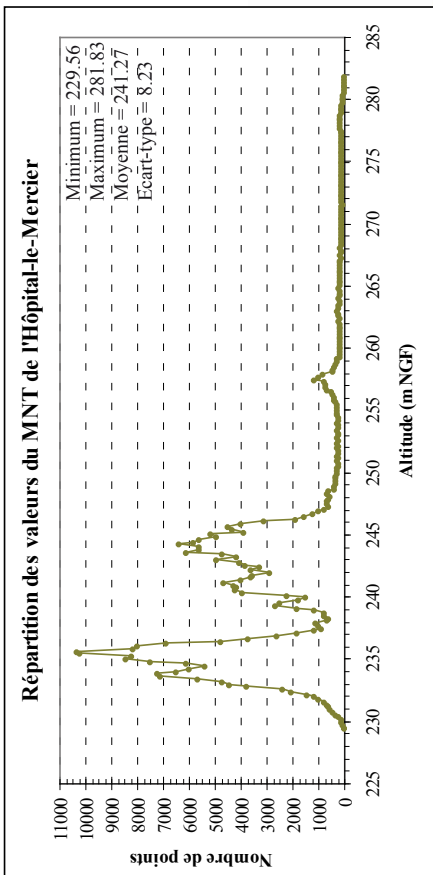


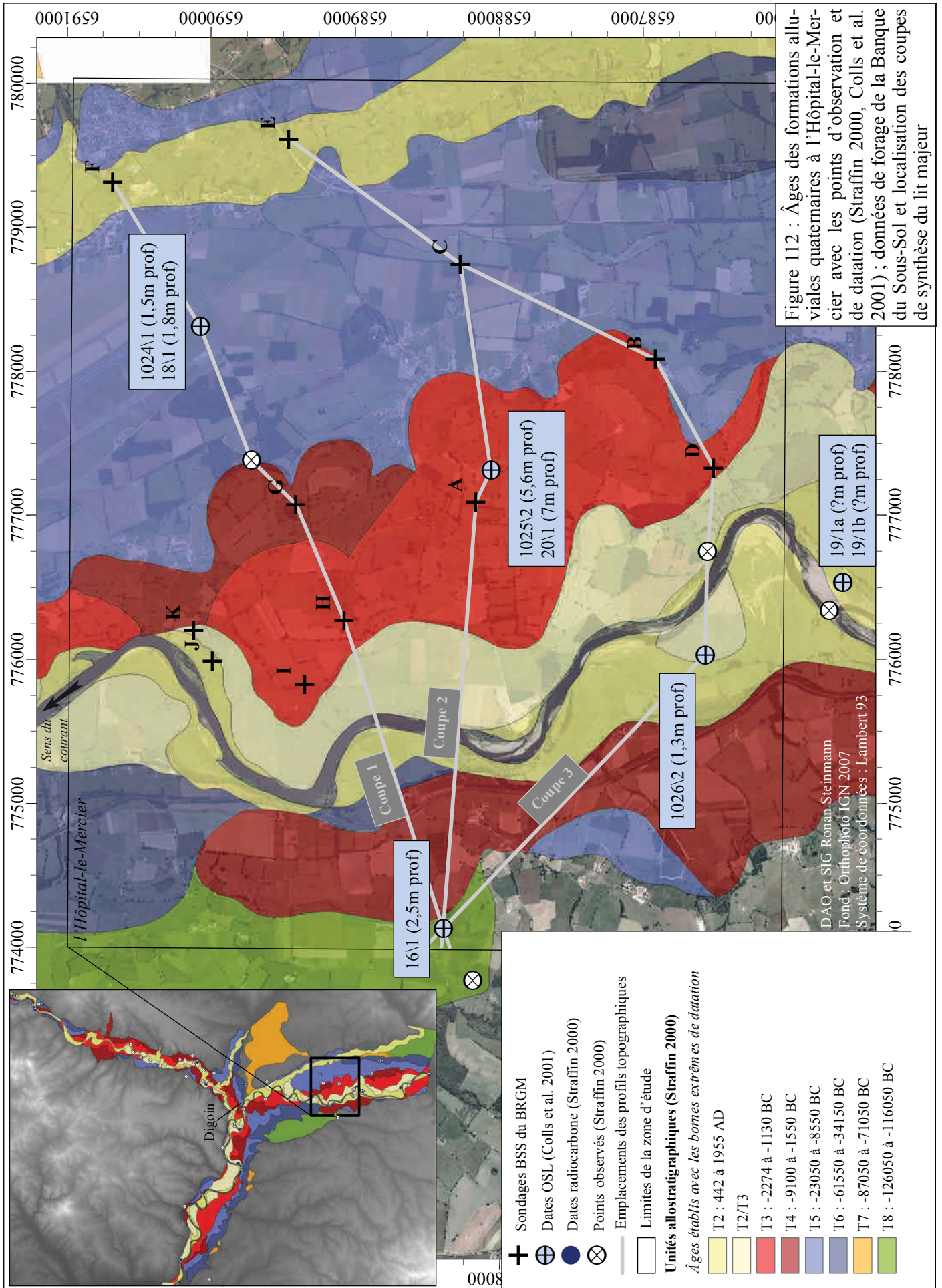
Figure 110 : Les paléoméandres visibles en rive droite dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier

Figure 111 : Bloc 3D et graphique réalisés à partir des altitudes LiDAR dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier



Traitement Roman Steinmann  
Données LIDAR : DREAL Centre

Système de coordonnées : Lambert 93



CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT

LOG A (CODE BRGM 06231X0114)			LOG B (CODE BRGM 06231X0113)		
Profondeur	Lithologie	Stratigraphie	Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0 à 0,3 m	TERRE VEGETALE	ACTUEL	De 0 à 0,3 m	TERRE VEGETALE	ACTUEL
De 0,3 à 1,9 m	ARGILE MARRON PEU PLASTIQUE	QUATERNAIRE	De 0,3 à 2,3 m	SABLE FIN ARGILEUX GRAVELEUX	QUATERNAIRE
De 1,9 à 3,2 m	LIMON TOURBEUX GRIS-BLEU	QUATERNAIRE	De 2,3 à 3,5 m	SABLE FIN A GROSSIER	QUATERNAIRE
De 3,2 à 7 m	SABLE GRAVIERS	QUATERNAIRE	De 3,5 à 8 m	SABLE GRAVELEUX GRIS	QUATERNAIRE
De 7 à 8 m	SABLE GRAVELEUX LEGEREMENT ARGILEUX	QUATERNAIRE	De 8 à 8,2 m	ARGILE VERDATRE SABLEUSE	AQUITANIEN
De 8 à 8,2 m	ARGILE JAUNE COMPACTE	AQUITANIEN			
LOG C (CODE BRGM 06231X0117)			LOG D (CODE BRGM 06231X0112)		
Profondeur	Lithologie	Stratigraphie	Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0 à 0,3 m	TERRE VEGETALE	ACTUEL	De 0 à 0,2 m	TERRE VEGETALE	ACTUEL
De 0,3 à 1,7 m	SABLE TRES FIN JAUNE	QUATERNAIRE	De 0,2 à 2,1 m	ARGILE MARON SABLEUSE	QUATERNAIRE
De 1,7 à 7,2 m	SABLE GRAVELEUX	QUATERNAIRE	De 2,1 à 3,3 m	SABLE MOYEN GRAVELEUX	QUATERNAIRE
De 7,2 à 9,5 m	SABLE TRES ARGILEUX JAUNE COMPACT	QUATERNAIRE	De 3,3 à 7 m	SABLE GRAVIERS	QUATERNAIRE
			De 7 à 7,4 m	ARGILE JAUNE SABLEUSE	AQUITANIEN
LOG E (CODE BRGM 06231X0111)			LOG F (CODE BRGM 06231X0003)		
Profondeur	Lithologie	Stratigraphie	Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0 à 2,4 m	REMBLAI	ACTUEL	De 0 à 0,2 m	TERRE VEGETALE	ACTUEL
De 2,4 à 3,4 m	LIMON SABLEUX MARRON	QUATERNAIRE	De 0,2 à 0,8 m	ARGLE ROUGEATRE	QUATERNAIRE
De 3,4 à 4,4 m	SABLE GROSSIER PEU ARGILEUX	QUATERNAIRE	De 0,8 à 2 m	SABLE ROUGE TRES ARGILEUX	QUATERNAIRE
De 4,4 à 7,9 m	SABLE GROSSIER GALETS	QUATERNAIRE	De 2 à 2,5 m	SABLE GRAVIERS PEU ARGILEUX	QUATERNAIRE
De 7,9 à 10,4 m	ARGILE JAUNE SABLEUSE COMPACTE	AQUITANIEN	De 2,5 à 2,7 m	LIMON BLEU SABLE GRAVIERS	QUATERNAIRE
			De 2,7 à 4,7 m	SABLE GRAVIERS	QUATERNAIRE
LOG G (CODE BRGM 06231X0116)			De 4,7 à 4,9 m	SABLE ARGILEUX BLEU GRAVIERS	QUATERNAIRE
Profondeur	Lithologie	Stratigraphie	De 4,9 à 5,3 m	ARGILE JAUNE	AQUITANIEN
De 0 à 0,2 m	TERRE VEGETALE	ACTUEL			
De 0,2 à 1,8 m	ARGILE JAUNE PANACHEE GRIS COMPACTE SECHE	QUATERNAIRE	LOG H (CODE BRGM 06231X0115)		
De 1,8 à 2,2 m	ARGILE SABLEUSE VERDATRE	QUATERNAIRE	Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 2,2 à 4 m	SABLE ET GRAVIERS GRIS PEU ARGILEUX	QUATERNAIRE	De 0 à 0,2 m	TERRE VEGETALE	ACTUEL
De 4 à 7,4 m	SABLE ET GRAVIERS JAUNE PROPRE	QUATERNAIRE	De 0,2 à 0,8 m	ARGILE SABLEUSE MARRON	QUATERNAIRE
De 7,4 à 7,7 m	ARGILE JAUNE SECHE TRES COMPACTE	AQUITANIEN	De 0,8 à 3,5 m	SABLE GRAVIERS PEU ARGILEUX	QUATERNAIRE
			De 3,5 à 6,3 m	SABLE GRAVIERS PROPRE	QUATERNAIRE
LOG I (CODE BRGM 06231X0035)			De 6,3 à 6,5 m	ARGILE SABLEUSE VERDATRE COMPACTE	AQUITANIEN
Profondeur	Lithologie	Stratigraphie			
De 0 à 0,2 m	SUPERF: TERRE	QUATERNAIRE	LOG J (CODE BRGM 06231X0032)		
De 0,2 à 1,9 m	ALLUV: SABLE, FIN MOYEN JAUNE	QUATERNAIRE	Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 1,9 à 3,4 m	ALLUV: PRE/SABLE, MOYEN/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE	De 0 à 0,3 m	SUPERF: TERRE	QUATERNAIRE
De 3,4 à 3,7 m	ALLUV: ARGILE, SILTEUX GRIS NOIR A-VEGETAUX	QUATERNAIRE	De 0,3 à 0,7 m	ALLUV: SABLE, MOYEN JAUNE ARGILEUX	QUATERNAIRE
De 3,7 à 5,8 m	ALLUV: PRE/SABLE, MOYEN GROSSIER/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE	De 0,7 à 2,9 m	ALLUV: PRE/SABLE, MOYEN JAUNE/GALET/GRAVIER/	QUATERNAIRE
De 5,8 à 6,2 m	ARGILE, JAUNE ROUX	AQUITANIEN	De 2,9 à 7 m	ALLUV: PRE/SABLE, MOYEN GROSSIER/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE
			De 7 à 7,3 m	MARNE, JAUNE	AQUITANIEN
LOG K (CODE BRGM 06231X0031)					
Profondeur	Lithologie	Stratigraphie	LOG K (CODE BRGM 06231X0031)		
De 0 à 0,4 m	SUPERF: TERRE	QUATERNAIRE	Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0,4 à 0,8 m	ALLUV: SABLE, FIN JAUNE	QUATERNAIRE	De 0 à 0,4 m	SUPERF: TERRE	QUATERNAIRE
De 0,8 à 2,6 m	ALLUV: PRE/SABLE, FIN MOYEN JAUNE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE	De 0,4 à 0,8 m	ALLUV: SABLE, FIN JAUNE	QUATERNAIRE
De 2,6 à 3,5 m	ALLUV: PRE/SABLE, GROSSIER JAUNE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE	De 0,8 à 2,6 m	ALLUV: PRE/SABLE, FIN MOYEN JAUNE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE
De 3,5 à 4,4 m	ALLUV: PRE/SABLE, MOYEN GROSSIER JAUNE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE	De 2,6 à 3,5 m	ALLUV: PRE/SABLE, GROSSIER JAUNE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE
De 4,4 à 5,2 m	ALLUV: PRE/SABLE, FIN GROSSIER/ARGILE, BRUN ROUX EN LENTILLE EN-PASSEE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE	De 3,5 à 4,4 m	ALLUV: PRE/SABLE, MOYEN GROSSIER JAUNE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE
De 5,2 à 5,5 m	ALLUV: PRE/SABLE, FIN GROSSIER/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE	De 4,4 à 5,2 m	ALLUV: PRE/SABLE, FIN GROSSIER/ARGILE, BRUN ROUX EN LENTILLE EN-PASSEE/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE
De 5,5 à 5,7 m	ARGILE, JAUNE ROUX	AQUITANIEN	De 5,2 à 5,5 m	ALLUV: PRE/SABLE, FIN GROSSIER/GRAVIER/GALET/	QUATERNAIRE
			De 5,5 à 5,7 m	ARGILE, JAUNE ROUX	AQUITANIEN

Figure 113 : Détail des lithologies rencontrées sur les forages de la Banque du Sous-Sol (BSS su BRGM) à l'Hôpital-le-Mercier

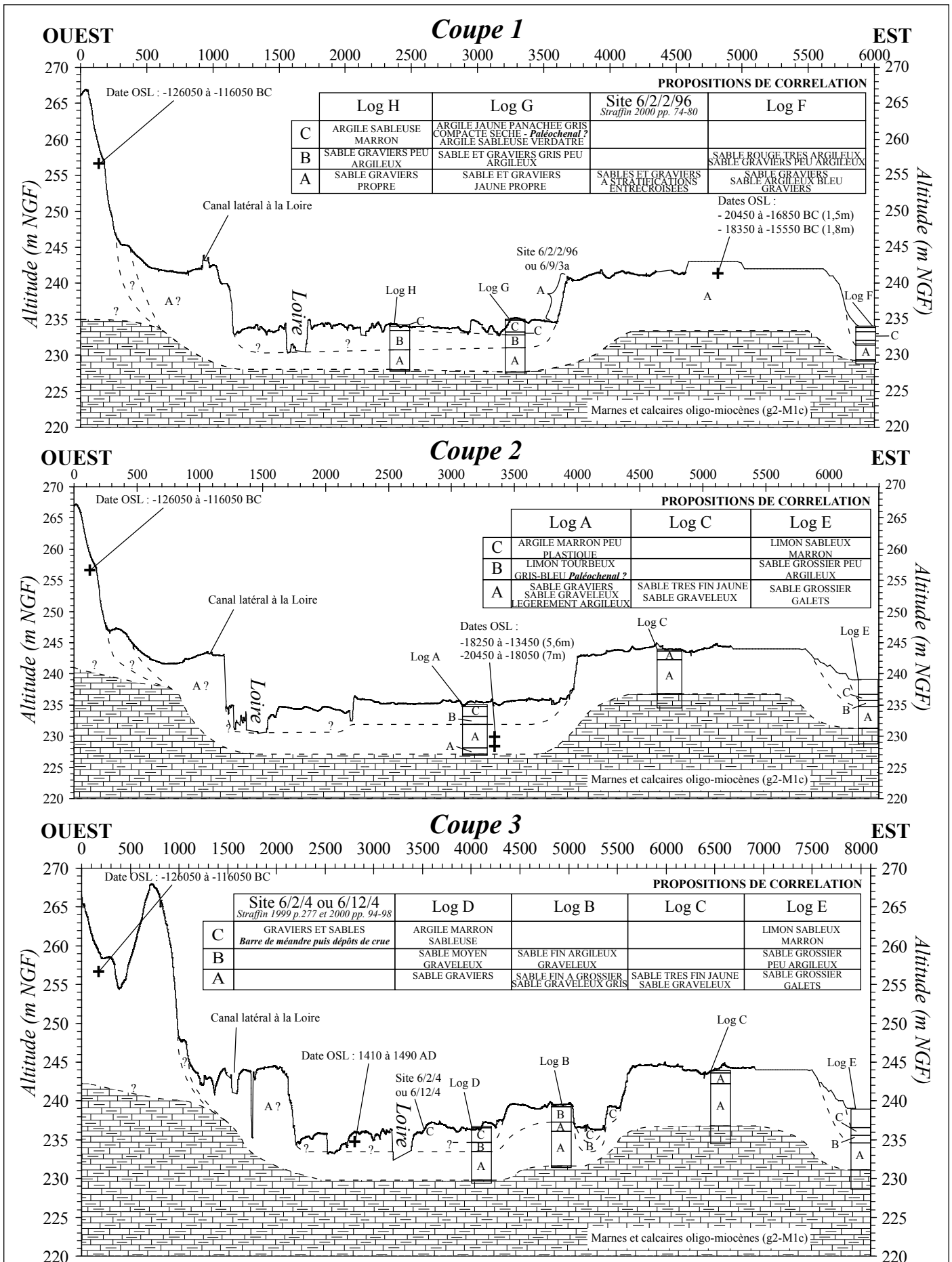


Figure 114 : Coupes sédimentologiques de synthèse de la vallée de la Loire à l'Hôpital-le-Mercier réalisées à partir des données disponibles (BSS, LiDAR, BD ALTI 25m, Straffin 2000 et Colls et al. 2001)



Figure 115 : Les dépôts de la fin de la dernière glaciation à l'Hôpital-le-Mercier (point d'observation 6/9/3a ou 6/22/96 dans Straffin 2000) ; accumulation de barres sableuses et graveleuses à litages en auges, mises en place par un système en tresse. Cliché R. Steinmann

CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT

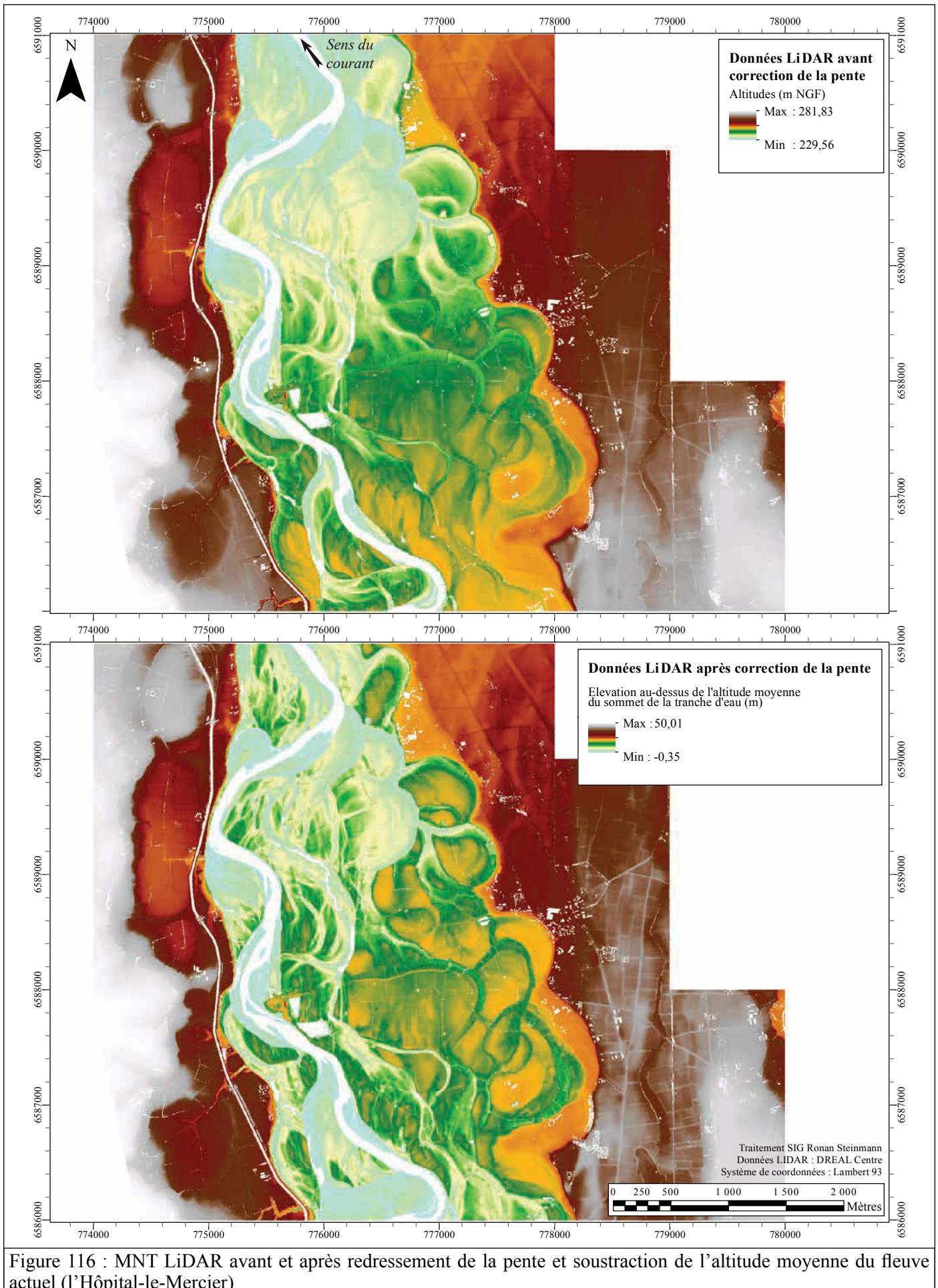


Figure 116 : MNT LiDAR avant et après redressement de la pente et soustraction de l'altitude moyenne du fleuve actuel (l'Hôpital-le-Mercier)

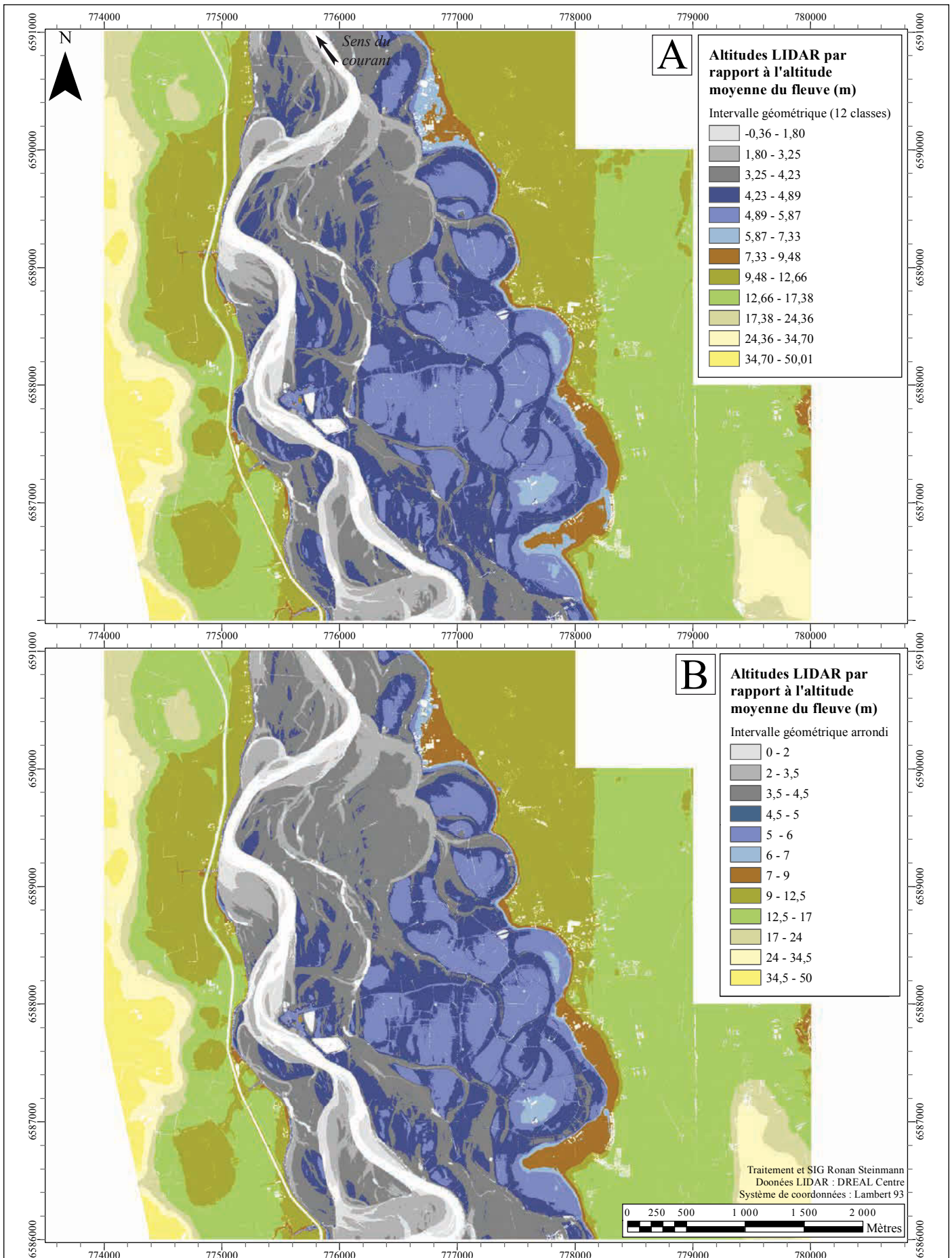


Figure 117 : Altitudes relatives de la vallée de la Loire à l'Hôpital-le-Mercier en douze classes distribuées selon l'intervalle géométrique réel (A) et arrondi (B)



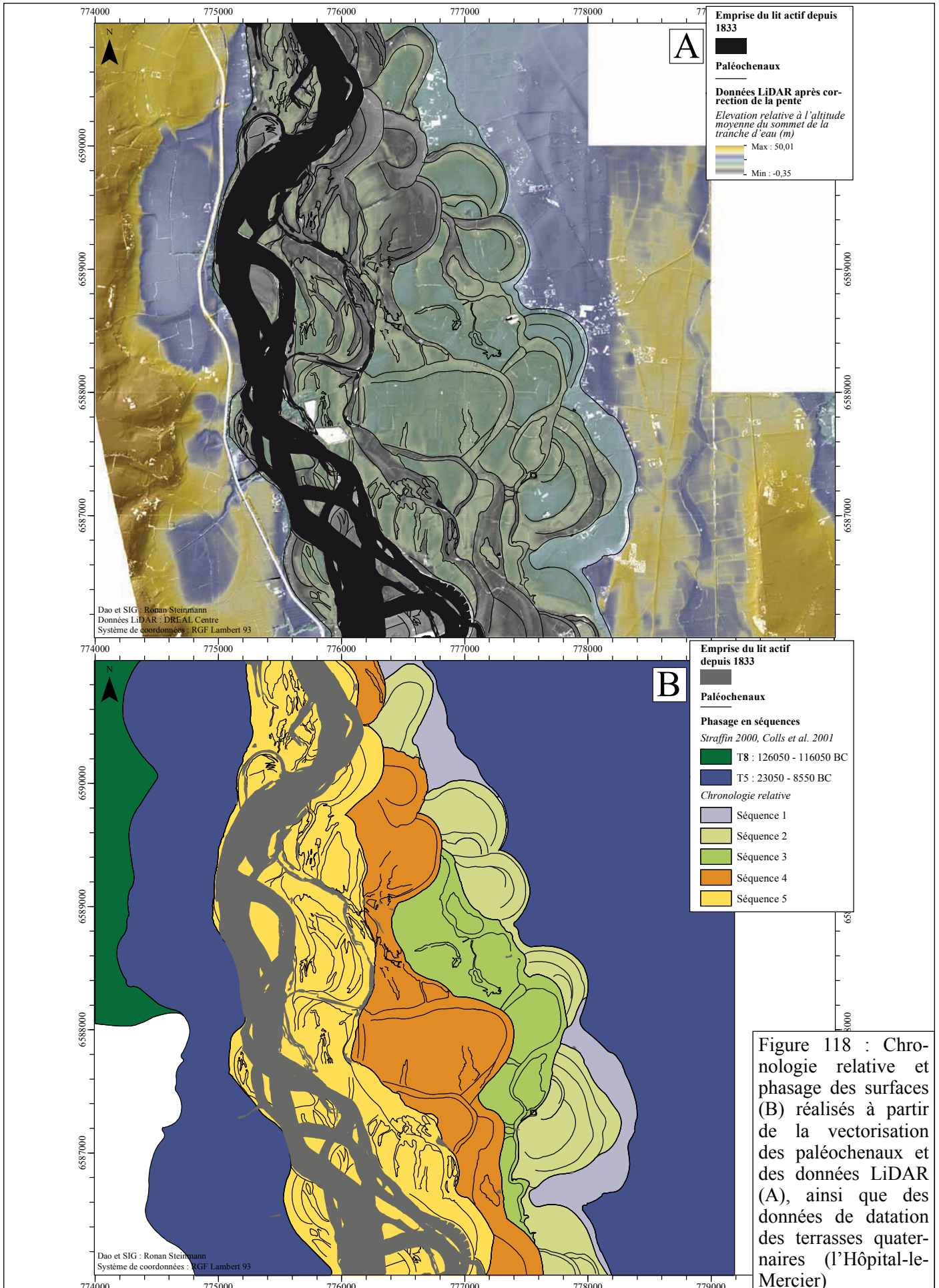


Figure 118 : Chronologie relative et phasage des surfaces (B) réalisés à partir de la vectorisation des paléochenaux et des données LiDAR (A), ainsi que des données de datation des terrasses quaternaires (l'Hôpital-le-Mercier)

Séquence	Code chenal	Mesures (m)						Indice Si minimum		
		Longueur développée du centre du lit (L)	Moyenne par séquence	Ecart-type par séquence	Distance minimale entre les extrémités (D)	Moyenne par séquence	Ecart-type par séquence	Valeur (L/D)	Moyenne par séquence	Ecart-type par séquence
1	S1C1	1918,71	1918,71		1498,49	1498,49		1,28	1,28	
2	S2C1	1522,75	942,45	366,78	1028,48	626,44	242,05	1,48	1,51	0,27
	S2C2	819,02			624,58			1,31		
	S2C3	1028,20			707,92			1,45		
	S2C4	920,84			609,00			1,51		
	S2C5	384,36			303,22			1,27		
	S2C6	979,52			485,46			2,02		
3	S3C1	3874,17	3874,17		3430,05			1,13	1,13	
4	S4C1	1174,11	1445,05	557,77	776,55	976,30	623,24	1,51	1,72	0,66
	S4C2	1942,32			1018,28			1,91		
	S4C3	988,42			729,97			1,35		
	S4C4	973,39			350,78			2,77		
	S4C5	2147,02			2005,92			1,07		
5	S5C1	1752,07	1688,27	919,26	909,26	1323,98	979,37	1,93	1,39	0,47
	S5C2	738,77			620,20			1,19		
	S5C3	2573,96			2442,48			1,05		

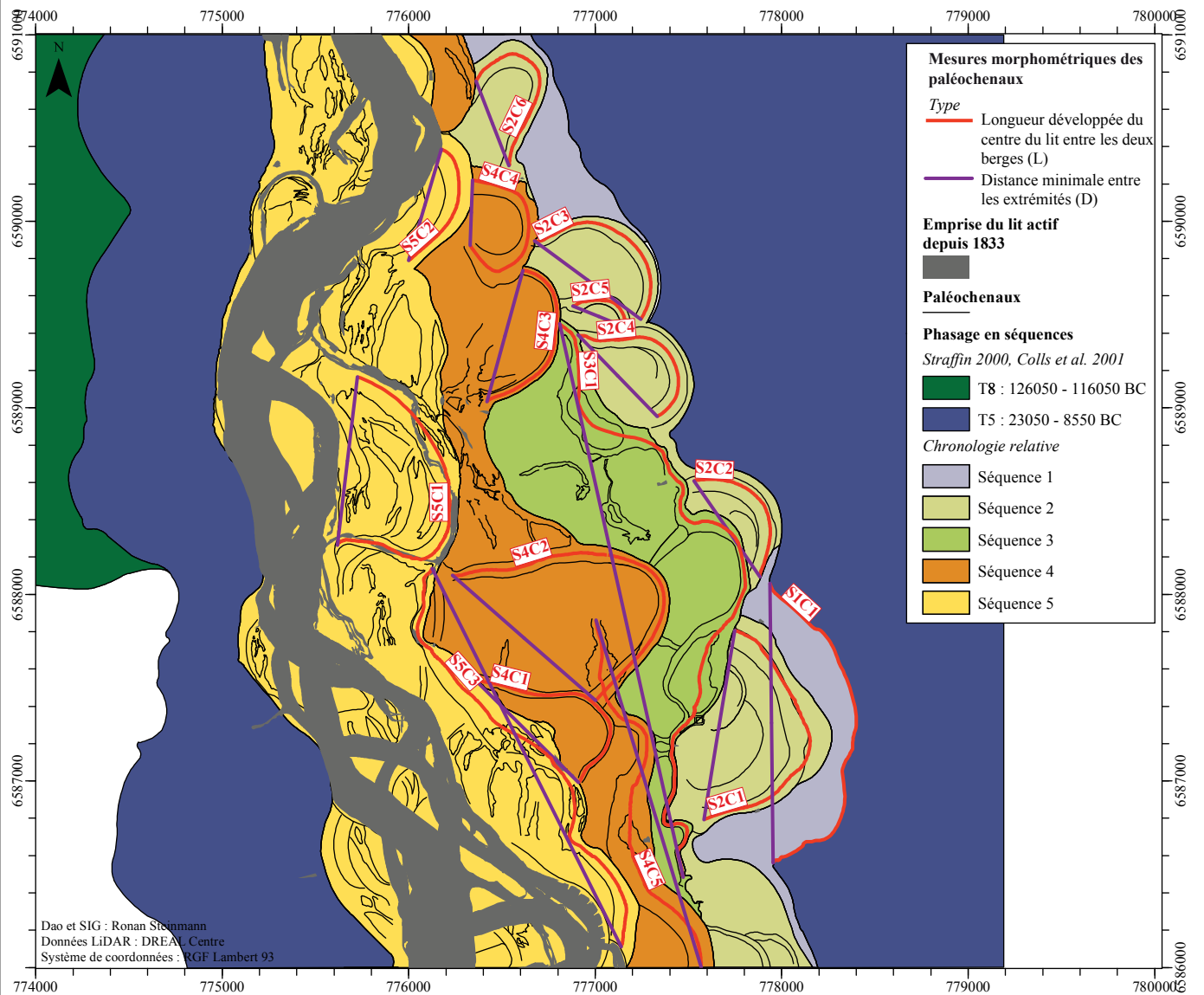


Figure 119 : Localisation et valeur des paramètres morphométriques servant à calculer l'indice de sinuosité minimal des paléochenaux visibles en surface du lit majeur à l'Hôpital-le-Mercier



Figure 120 : Localisation des points d'observation et analyses réalisées sur la sédimentation (l'Hôpital-le-Mercier)

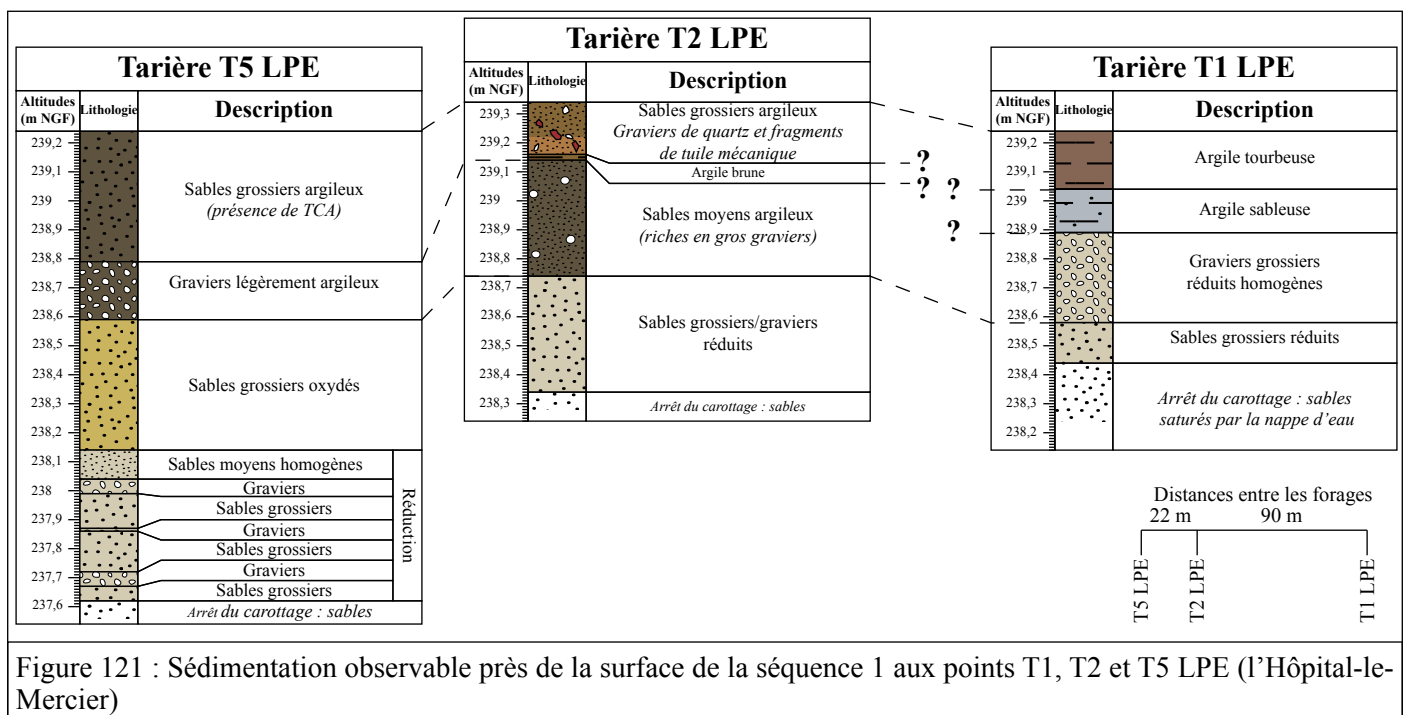


Figure 121 : Sédimentation observable près de la surface de la séquence 1 aux points T1, T2 et T5 LPE (l'Hôpital-le-Mercier)

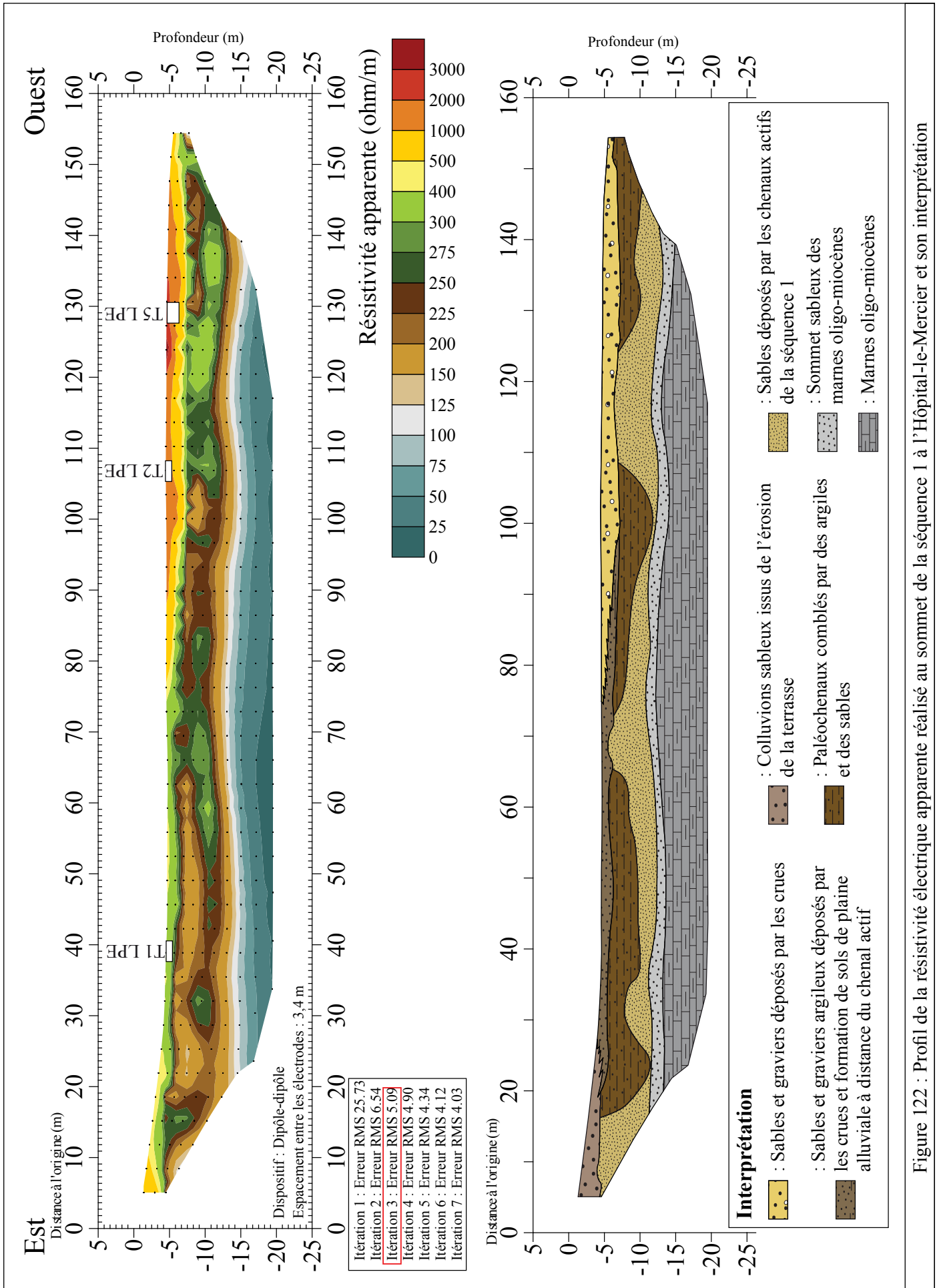
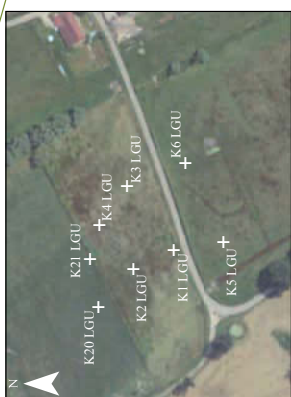
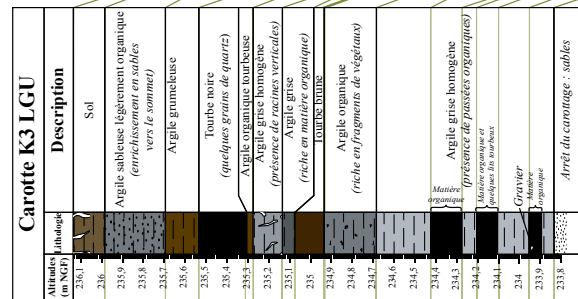
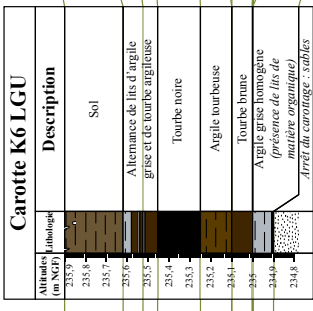
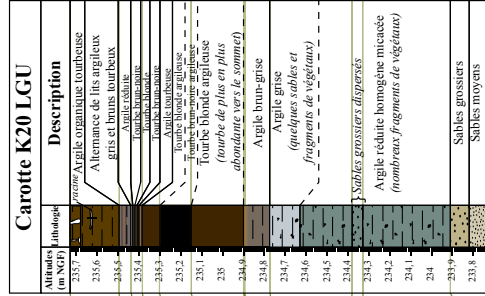
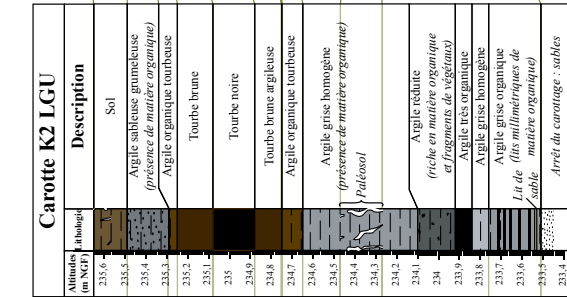
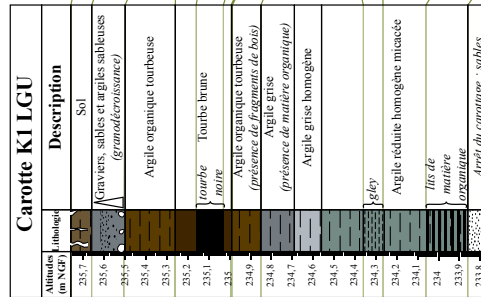
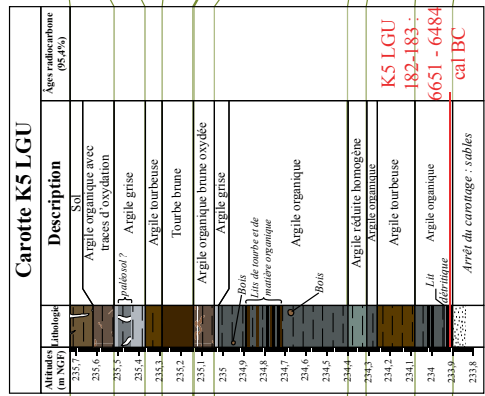
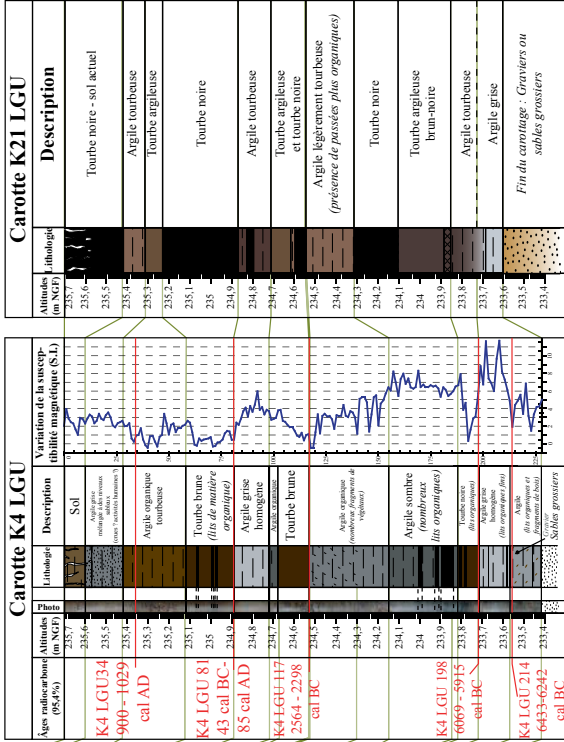


Figure 122 : Profil de la résistivité électrique apparente réalisé au sommet de la séquence 1 à l'Hôpital-le-Mercier et son interprétation

**Sud**



**Nord**



**Sud**

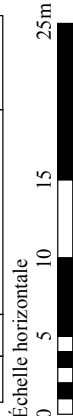


Figure 123 : Remplissage du paléoméandre de la séquence 2 au lieu-dit La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (points K1 à K21 LGU)

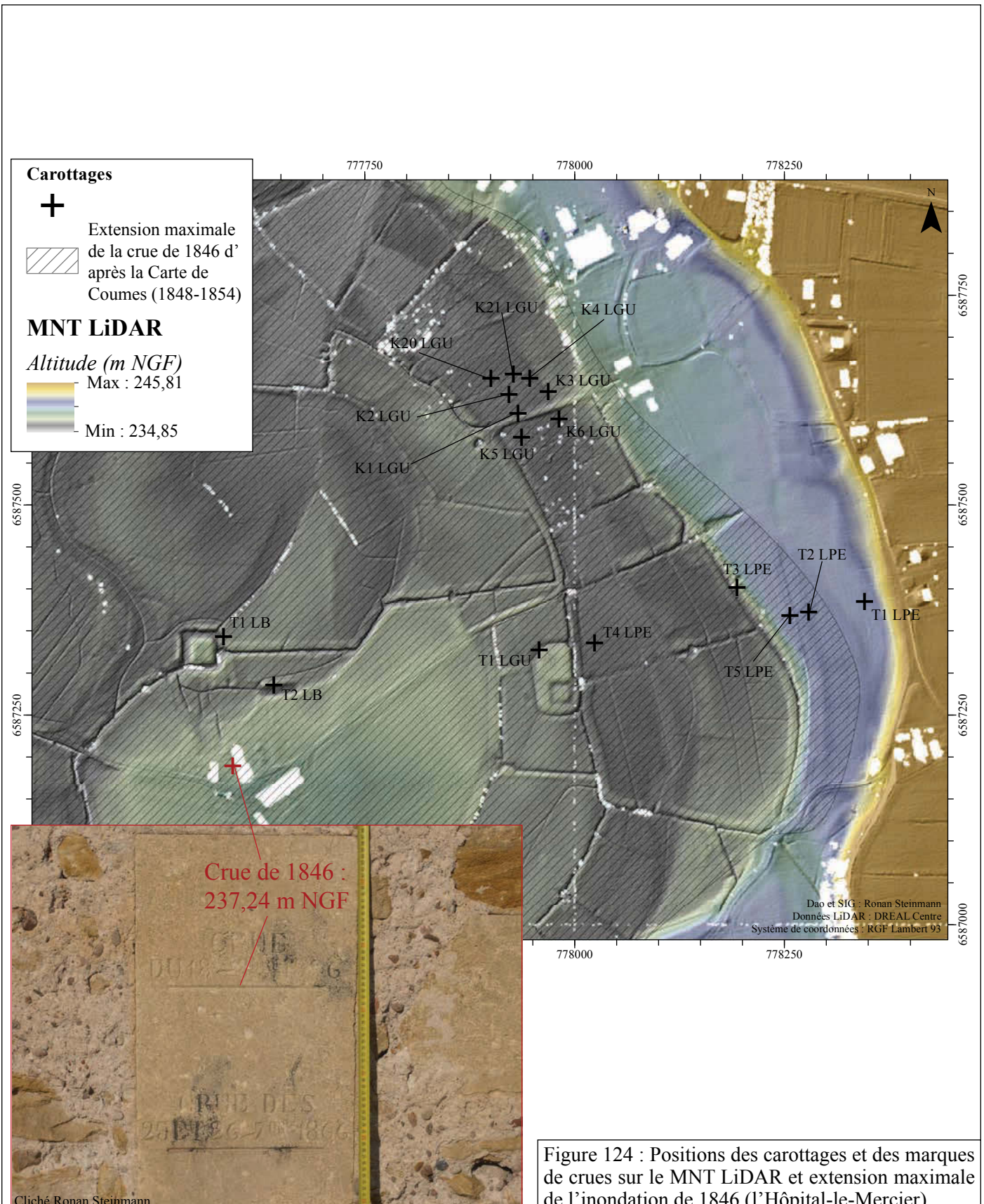


Figure 124 : Positions des carottages et des marques de crues sur le MNT LiDAR et extension maximale de l'inondation de 1846 (l'Hôpital-le-Mercier)

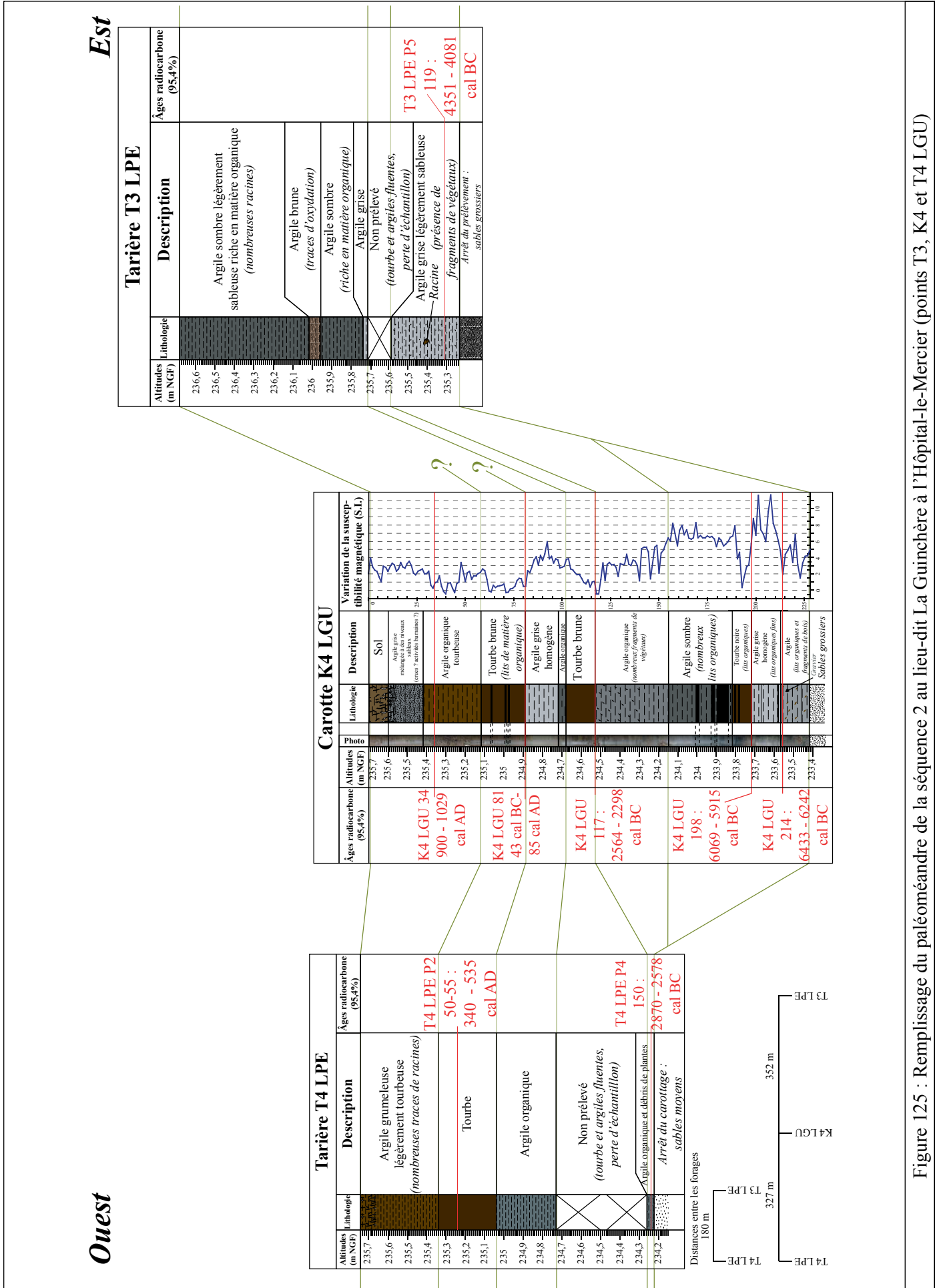


Figure 125 : Remplissage du paléoméandre de la séquence 2 au lieu-dit La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (points T3, K4 et T4 LGU)

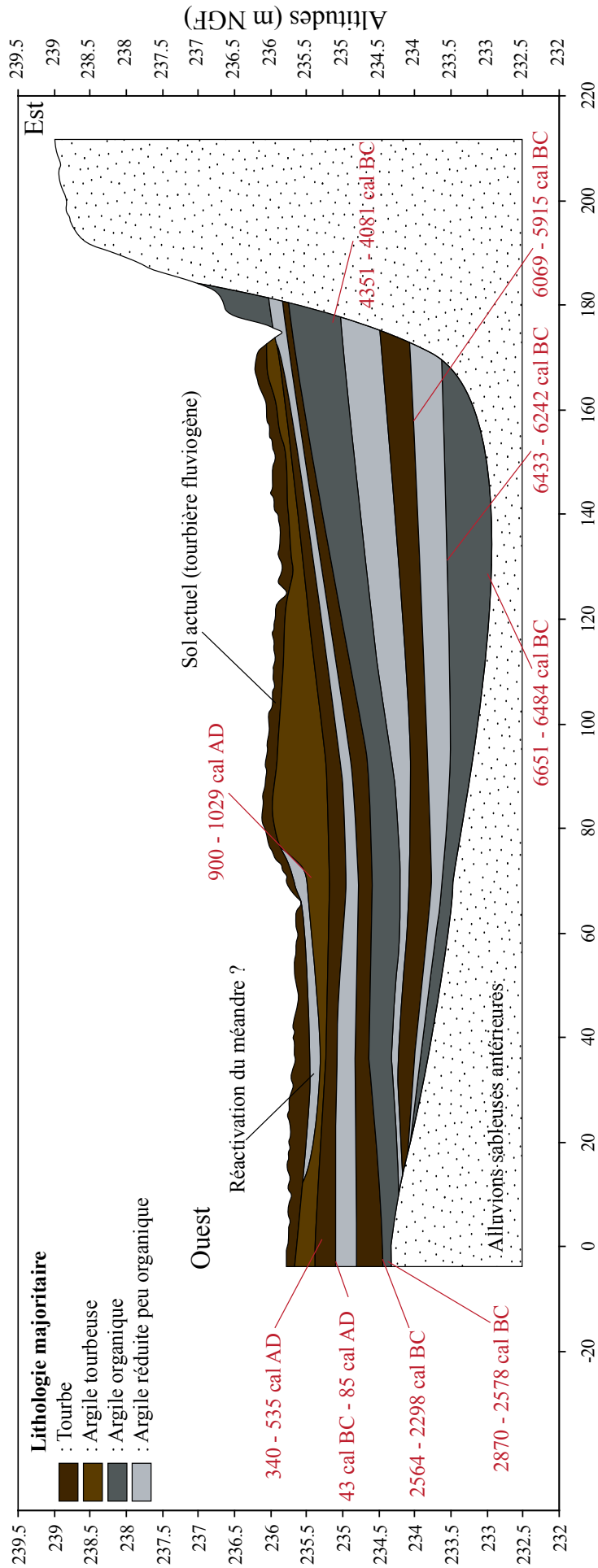


Figure 126 : Proposition de coupe de synthèse du remplissage du paléoméandre de la séquence 2 au lieu-dit La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (datations extraites des points T3, K5, K4 et T4 LGU, altitudes tirées du MNT LiDAR entre les points T3 et T4 LGU)



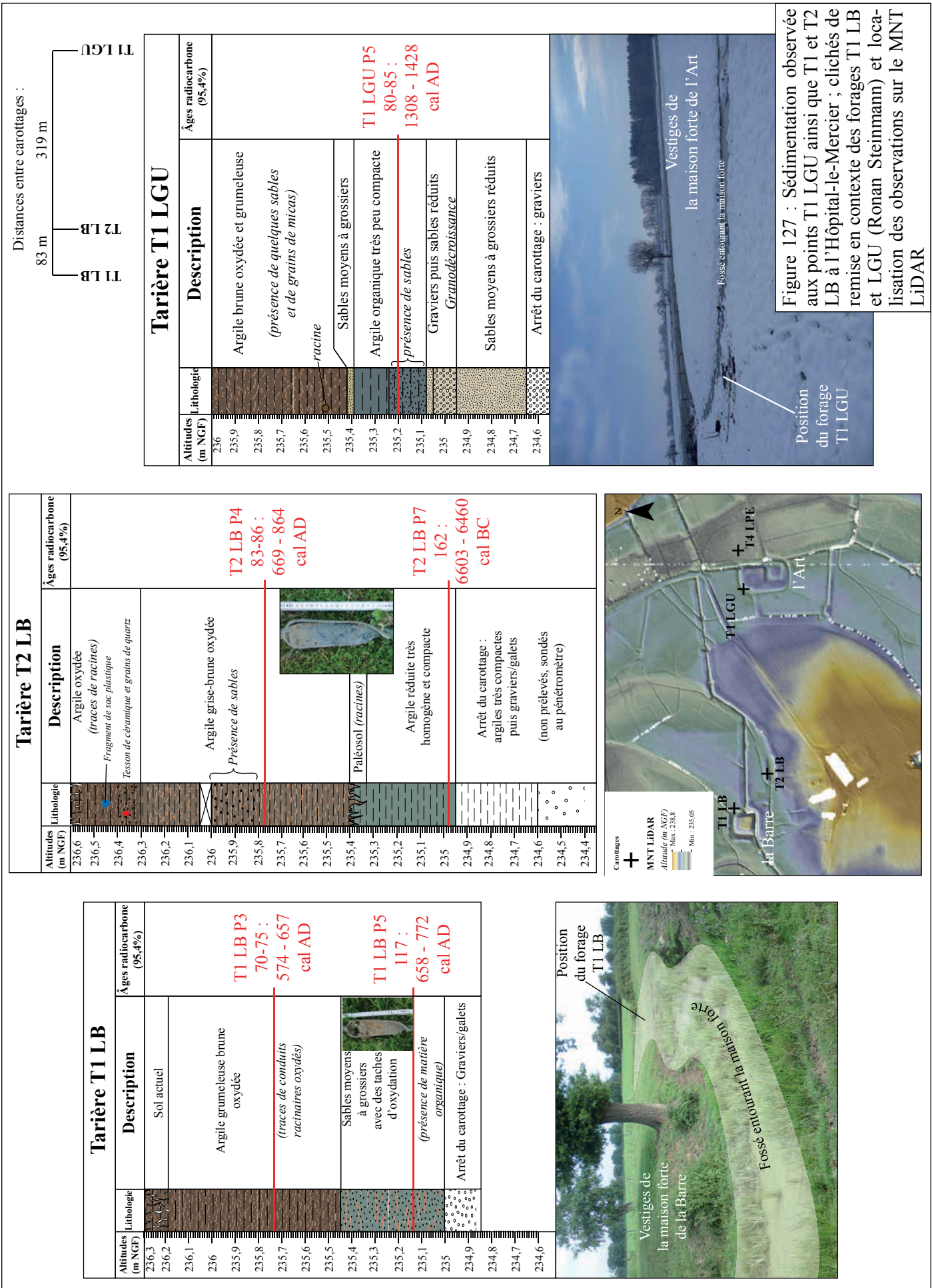


Figure 127 : Sédimentation observée aux points T1 LGU ainsi que T1 et T2 LB à l'Hôpital-le-Mercier ; clichés de remise en contexte des forages T1 LB et LGU (Ronan Steinmann) et localisation des observations sur le MNT LiDAR

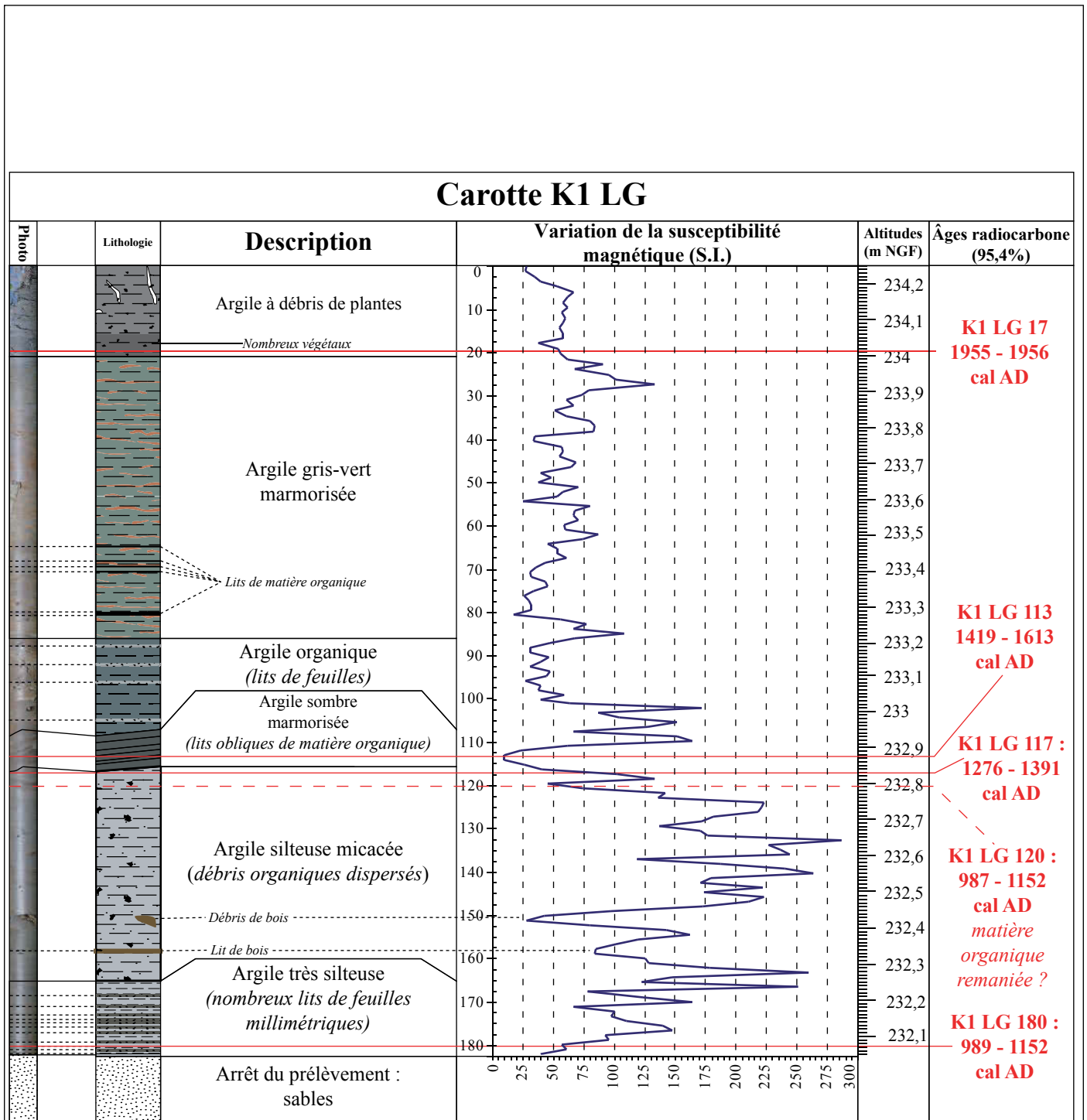


Figure 128 : Remplissage du paléoméandre de la séquence 4 au lieu-dit La Grève dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier (point K1 LG)

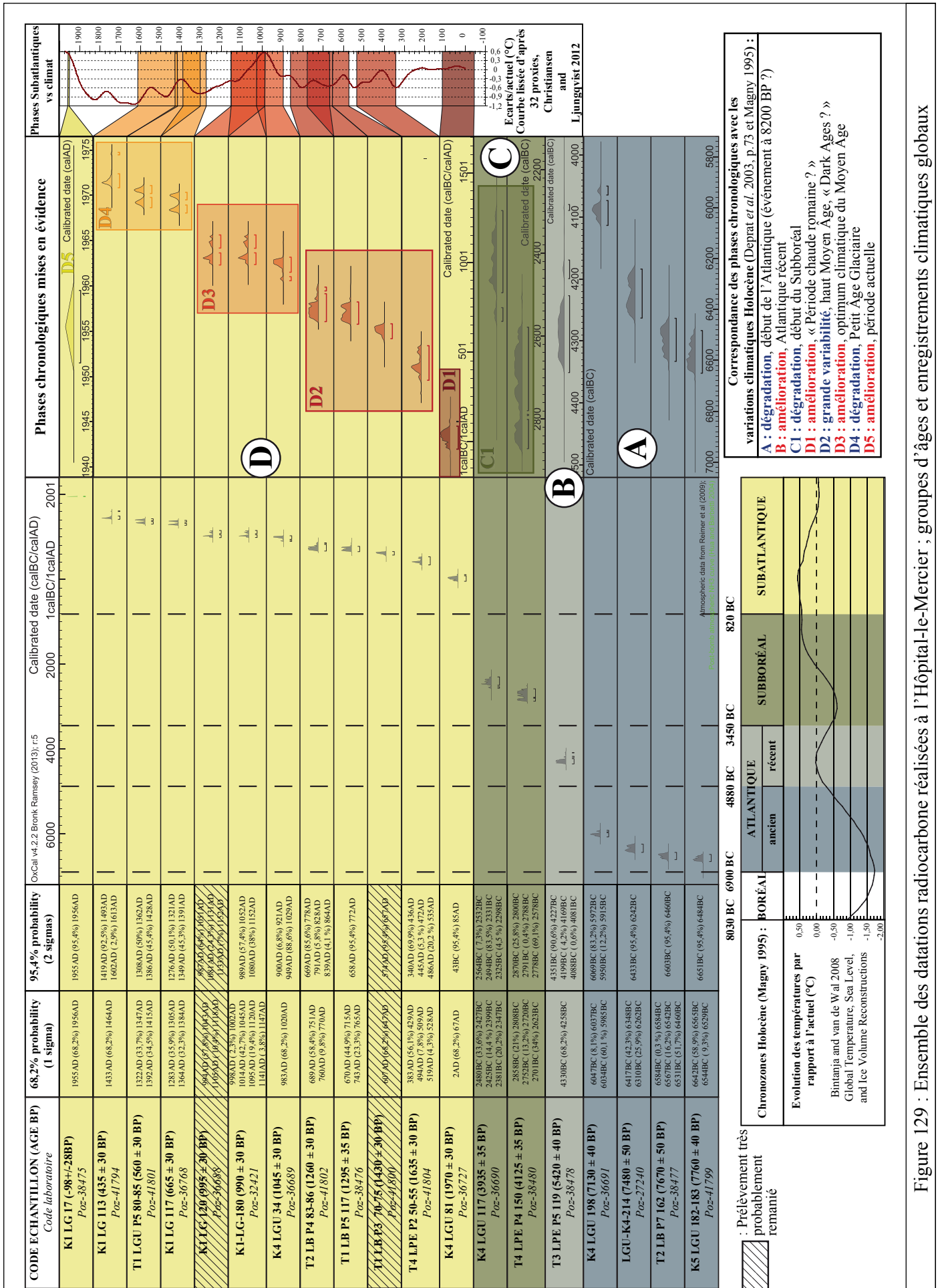


Figure 129 : Ensemble des datations radiocarbone réalisées à l'Hôpital-le-Mercier ; groupes d'âges et enregistrements climatiques globaux

CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT

	CODE ECHANTILLON (AGE BP) <i>Code laboratoire</i>	68,2% probability (1 sigma)	95,4% probability (2 sigmas)	Calibrated date (calBC/calAD)				Phase
				6000	4000	2000	1calBC/1calAD	
<b>K4 LGU</b>	<b>K4 LGU 34 (1045 ± 30 BP)</b> <i>Poz-36689</i>	983AD (68,2%) 1020AD	900AD (6,8%) 921AD 949AD (88,6%) 1029AD					<b>D3</b>
	<b>K4 LGU 81 (1970 ± 30 BP)</b> <i>Poz-36727</i>	2AD (68,2%) 67AD	43BC (95,4%) 85AD					<b>D1</b>
	<b>K4 LGU 117 (3935 ± 35 BP)</b> <i>Poz-36690</i>	2480BC (33,6%) 2427BC 2425BC (14,4%) 2399BC 2381BC (20,2%) 2347BC	2564BC (7,3%) 2532BC 2494BC (83,5%) 2331BC 2325BC (4,5%) 2298BC					<b>C1</b>
	<b>K4 LGU 198 (7130 ± 40 BP)</b> <i>Poz-36691</i>	6047BC (8,1%) 6037BC 6034BC (60,1%) 5985BC	6069BC (83,2%) 5972BC 5950BC (12,2%) 5915BC					<b>A</b>
	<b>LGU-K4-214 (7480 ± 50 BP)</b> <i>Poz-27240</i>	6417BC (42,3%) 6348BC 6310BC (25,9%) 6262BC	6433BC (95,4%) 6242BC					<b>A</b>
<b>K5 LGU</b>	<b>K5 LGU 182-183 (7760 ± 40 BP)</b> <i>Poz-41799</i>	6642BC (58,9%) 6565BC 6544BC (9,3%) 6529BC	6651BC (95,4%) 6484BC					<b>A</b>
<b>T3 LPE</b>	<b>T3 LPE P5 119 (5420 ± 40 BP)</b> <i>Poz-38478</i>	4330BC (68,2%) 4258BC	4351BC (90,6%) 4227BC 4199BC (4,2%) 4169BC 4088BC (0,6%) 4081BC					<b>B</b>
<b>T4 LPE</b>	<b>T4 LPE P2 50-55 (1635 ± 30 BP)</b> <i>Poz-41804</i>	383AD (56,1%) 429AD 494AD (7,8%) 509AD 519AD (4,3%) 528AD	340AD (69,9%) 436AD 445AD (5,3%) 472AD 486AD (20,2%) 535AD					<b>D2</b>
	<b>T4 LPE P4 150 (4125 ± 35 BP)</b> <i>Poz-38480</i>	2858BC (21%) 2808BC 2752BC (13,2%) 2720BC 2701BC (34%) 2623BC	2870BC (25,8%) 2800BC 2791BC (0,4%) 2788BC 2778BC (69,1%) 2578BC					<b>C1</b>
<b>K1 LG</b>	<b>K1 LG 17 (-98+/-28BP)</b> <i>Poz-38475</i>	1955AD (68,2%) 1956AD	1955AD (95,4%) 1956AD					<b>D5</b>
	<b>K1 LG 113 (435 ± 30 BP)</b> <i>Poz-41794</i>	1433AD (68,2%) 1464AD	1419AD (92,5%) 1493AD 1602AD (2,9%) 1613AD					<b>D4</b>
	<b>K1 LG 117 (665 ± 30 BP)</b> <i>Poz-36768</i>	1283AD (35,9%) 1305AD 1364AD (32,3%) 1384AD	1276AD (50,1%) 1321AD 1349AD (45,3%) 1391AD					<b>D4</b>
	<b>K1 LG 120 (995 ± 30 BP)</b> <i>Poz-36688</i>	994AD (57,3%) 1093AD 1105AD (10,4%) 1198AD	987AD (69%) 1051AD 1083AD (69,3%) 1153AD 1183AD (7%) 1152AD					<b>D3</b>
	<b>K1-LG-180 (990 ± 30 BP)</b> <i>Poz-32421</i>	998AD (2,3%) 1002AD 1014AD (42,7%) 1045AD 1095AD (19,4%) 1120AD 1141AD (3,8%) 1147AD	989AD (57,4%) 1052AD 1080AD (38%) 1152AD					<b>D3</b>
<b>T1 LGU</b>	<b>T1 LGU P5 80-85 (560 ± 30 BP)</b> <i>Poz-41801</i>	1322AD (33,7%) 1347AD 1392AD (34,5%) 1415AD	1308AD (50%) 1362AD 1386AD (45,4%) 1428AD					<b>D4</b>
<b>T1 LB</b>	<b>T1 LB P3 70-75 (1430 ± 30 BP)</b> <i>Poz-41800</i>	670AD (44,9%) 715AD 745AD (25,2%) 763AD	658AD (95,4%) 772AD					<b>D2</b>
	<b>T1 LB P7 117 (1295 ± 35 BP)</b> <i>Poz-38476</i>	607AD (68,2%) 647AD	574AD (95,4%) 657AD					<b>D2</b>
<b>T2 LB</b>	<b>T2 LB P4 83-86 (1260 ± 30 BP)</b> <i>Poz-41802</i>	689AD (58,4%) 751AD 760AD (9,8%) 770AD	669AD (85,6%) 778AD 791AD (5,8%) 828AD 839AD (4,1%) 864AD					<b>D2</b>
	<b>T2 LB P7 162 (7670 ± 50 BP)</b> <i>Poz-38477</i>	6584BC (0,3%) 6584BC 6567BC (16,2%) 6542BC 6531BC (51,7%) 6460BC	6603BC (95,4%) 6460BC					<b>A</b>

OxCal v4.2.2 Bronk Ramsey (2013); r:5

**Correspondance des phases chronologiques avec les variations climatiques Holocène** (Deprat *et al.* 2003, p.73 et Magny 1995) :

- A : dégradation**, début de l'Atlantique (événement à 8200 BP)
- B : amélioration**, Atlantique récent
- C1 : dégradation**, début du Subboréal
- D1 : amélioration**, «Période chaude romaine ?»
- D2 : grande variabilité**, haut Moyen Age, «Dark Ages ?»
- D3 : amélioration**, optimum climatique du Moyen Age
- D4 : dégradation**, petit âge glaciaire
- D5 : amélioration**, période actuelle

**Carottages**

- Analyse(s) effectuée(s) :
- Datation
  - Datation, mesure de la susceptibilité
  - Description sédimentologique uniquement
  - Palynologie
- Paléochenaux

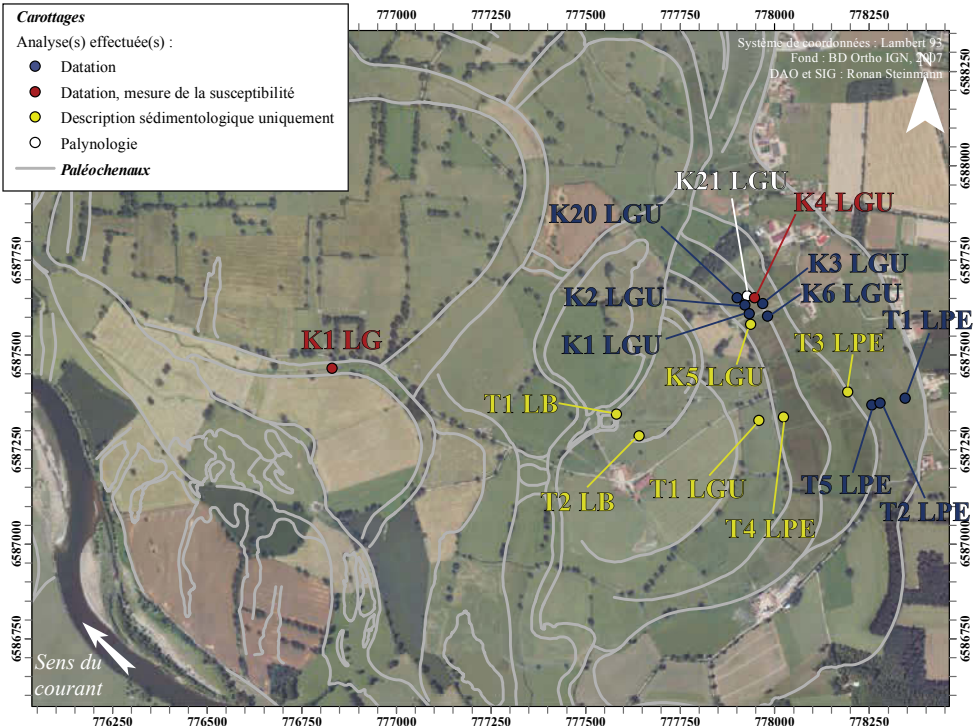


Figure 130 : Bilan des datations radiocarbone de l'Hôpital-le-Mercier réparties par carottages et par groupes

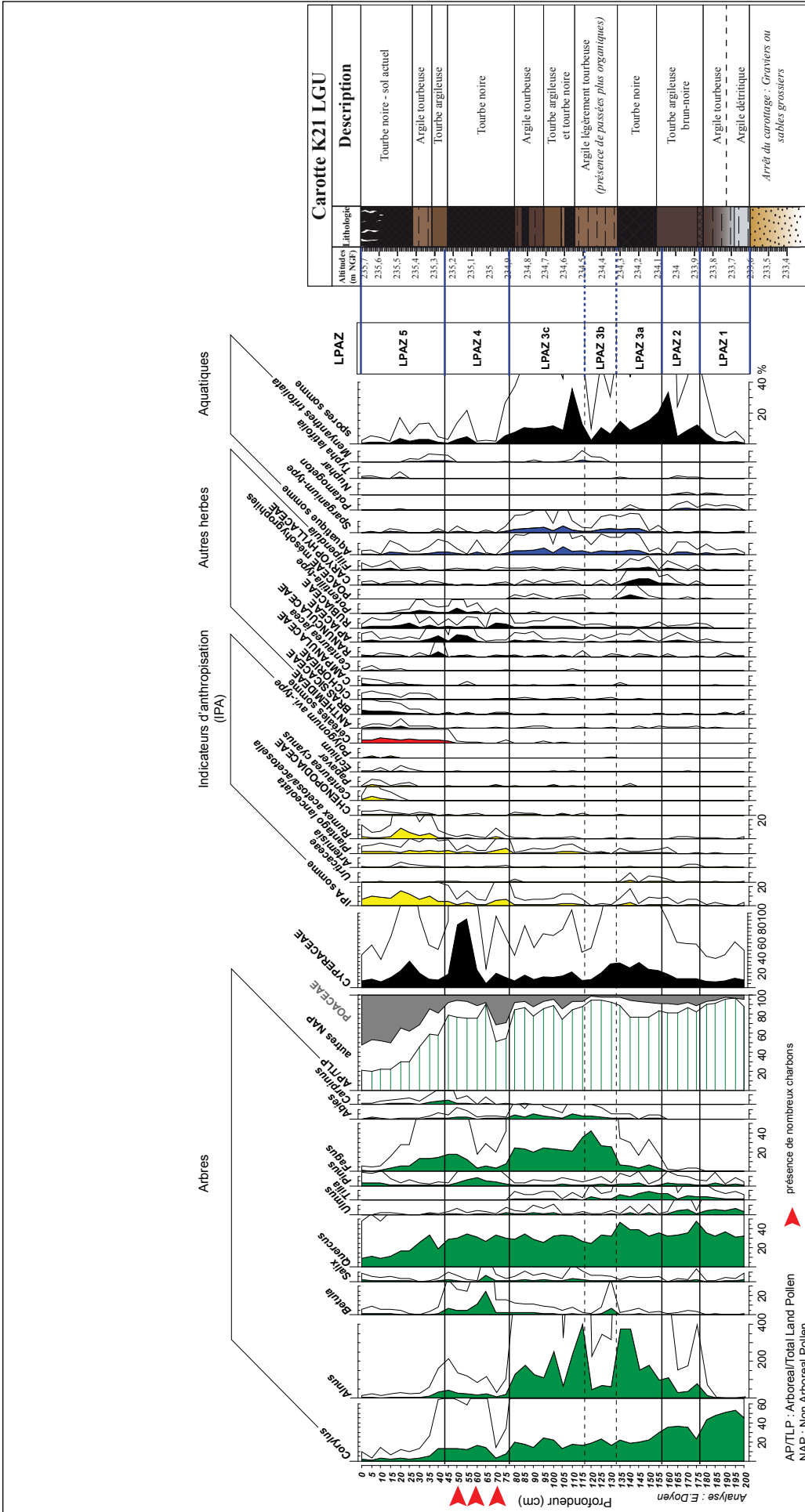


Diagramme pollinique simplifié (en % du paléoméandre K21-LGU. La courbe «céréale somme» regroupent Cerealia-type, Secale-type; la courbe «IPA somme» regroupent Urticaceae, Artemisia, Plantago lanceolata, Rumex acetosa/acetosella, Chenopodiaceae, Centaurea cyanus, Papaver, Echium, Polygonum aviculare; la courbe «Aquatique somme» regroupent Sparganium-type, Myriophyllum spicatum, Lemna minor, Myriophyllum spicatum, Alisma-type, Nymphaea, Potamogeton, Typha latifolia; la courbe «spores somme» regroupent monolètes, inlètes et Polypodium. Les courbes d'exagération correspondent à des facteurs \*5.

Figure 131 : Diagramme pollinique de synthèse du remplissage d'un paléoméandre appartenant à la séquence 2 au lieu-dit la Guinçhère (point K21, commune de l'Hôpital-le-Mercier) ; d'après Doyen 2013

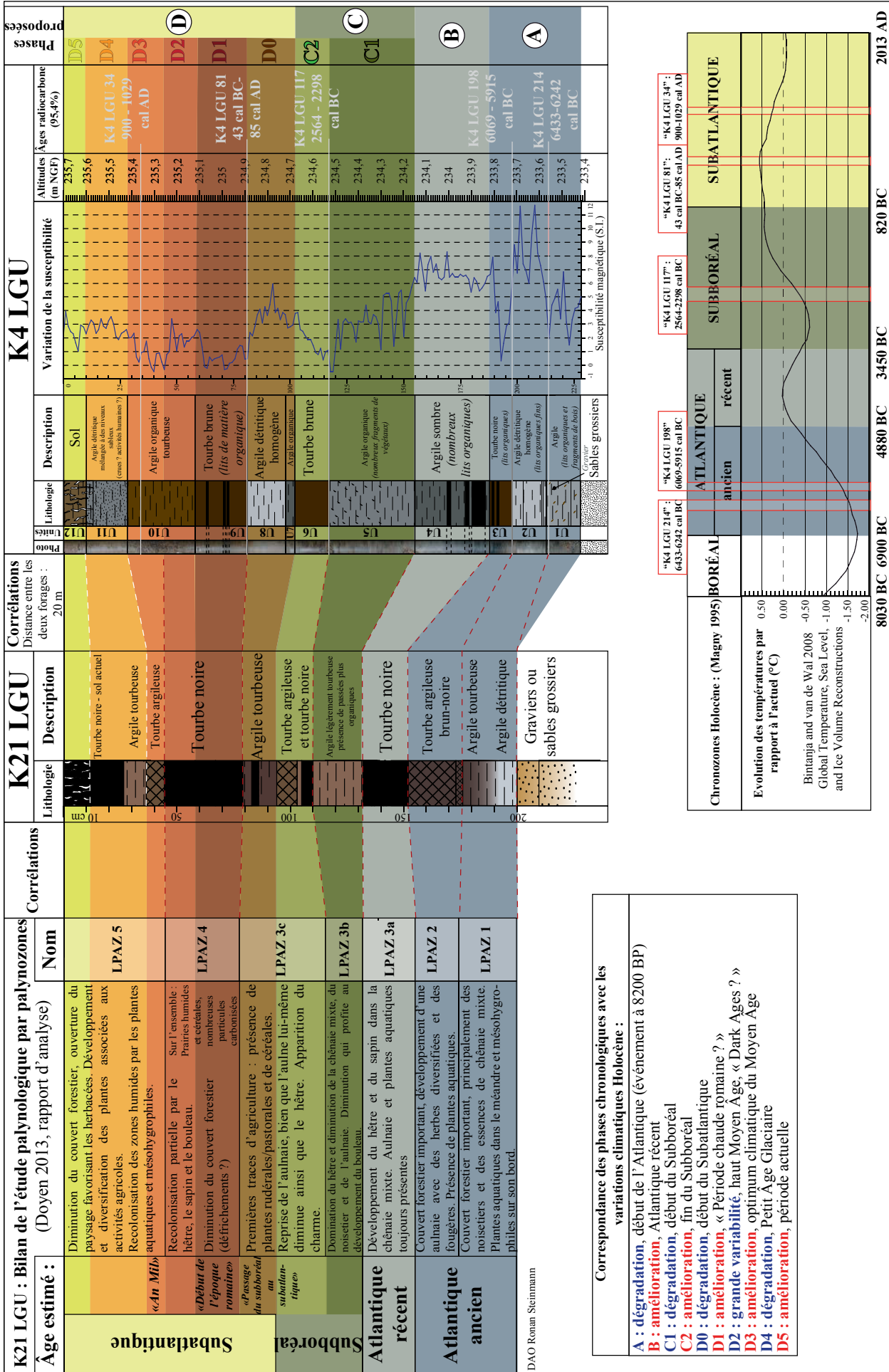


Figure 132 : Synthèse regroupant les données palynologiques, les âges radiocarbone, la susceptibilité magnétique et la corrélation des unités sédimentaires observées dans le remplissage du paléoméandre de La Guinchère à l'Hôpital-le-Mercier (points K4 et K21 LGU) ; comparaison du phasage obtenu avec les enregistrements climatiques globaux

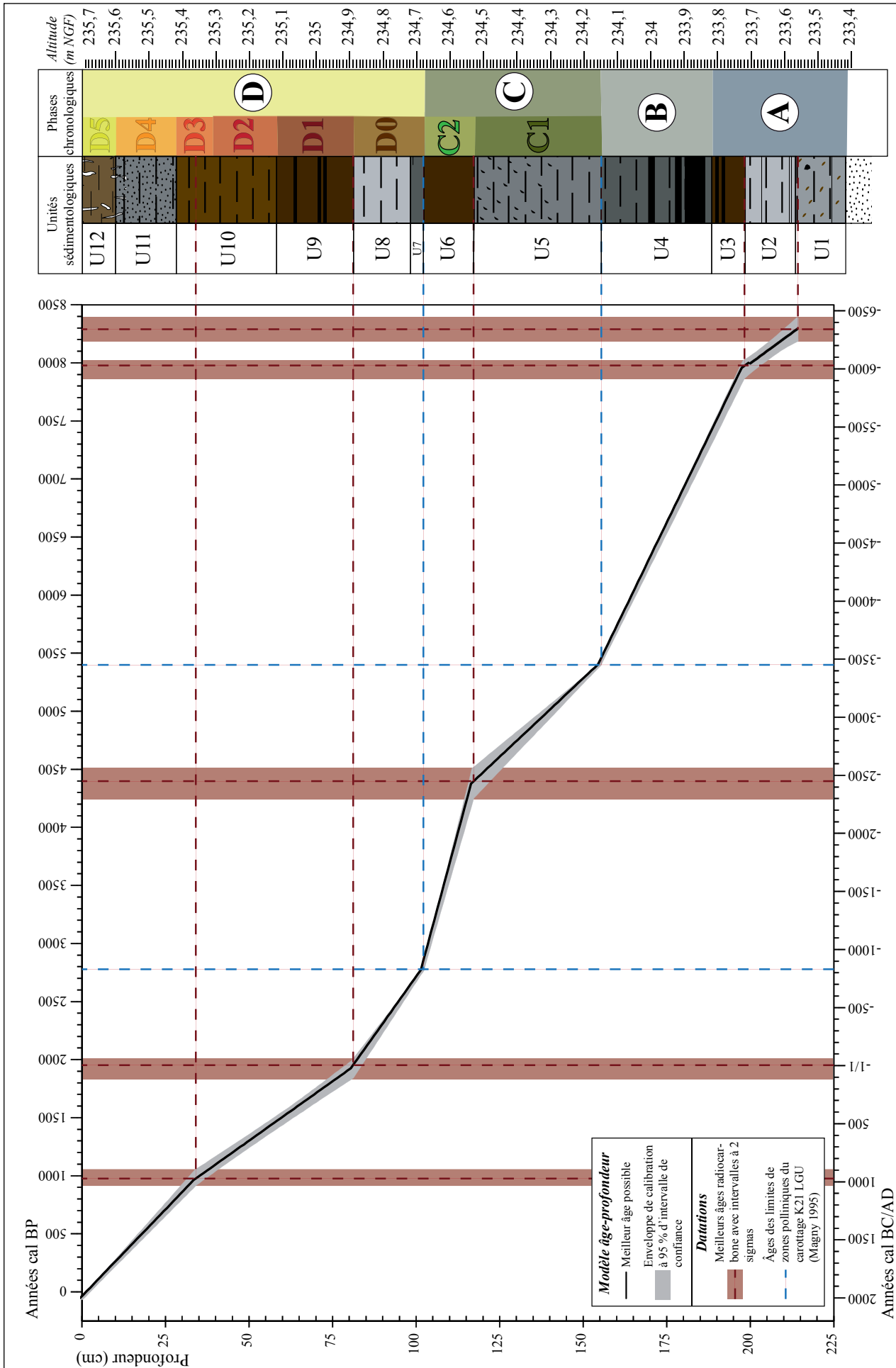


Figure 133 : Diagramme âge-profondeur du remplissage du paléoméandre de la séquence 2 à La Guinchère (L'Hôpital-le-Mercier) ; diagramme réalisé sous le logiciel R avec le code « CLAM » (Blaauw 2010) ; éléments de datation et unités sédimentaires des points K4 et K21 LGU ; phases chronologiques établies par l'étude des remplissages et datations de l'ensemble du secteur

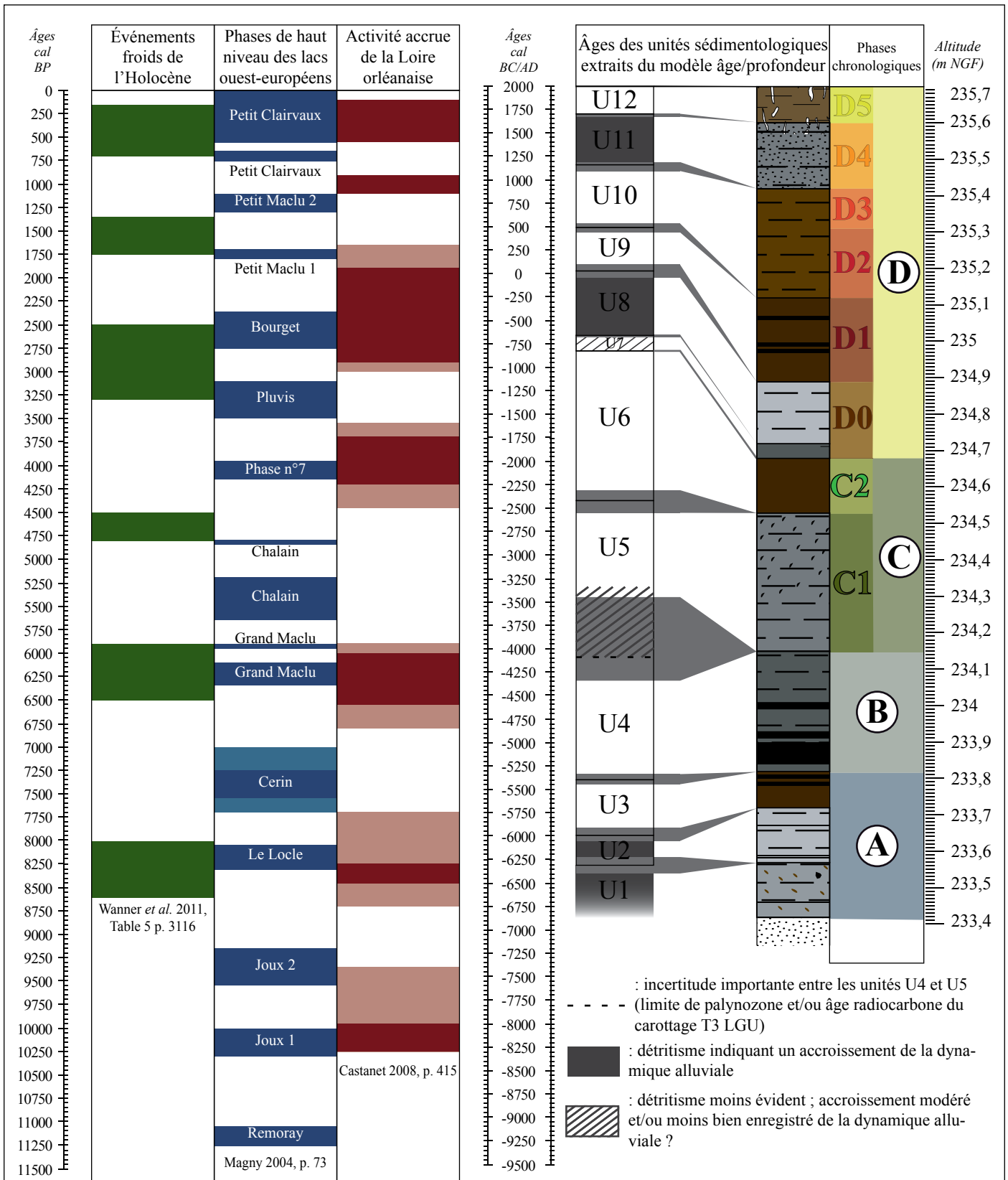


Figure 134 : Synthèse des phases d'activité alluviale accrue observées et datées dans le remplissage du paléoméandre de La Guinchère (l'Hôpital-le-Mercier) au regard d'enregistrements paléoclimatiques globaux et de la dynamique alluviale de la Loire moyenne



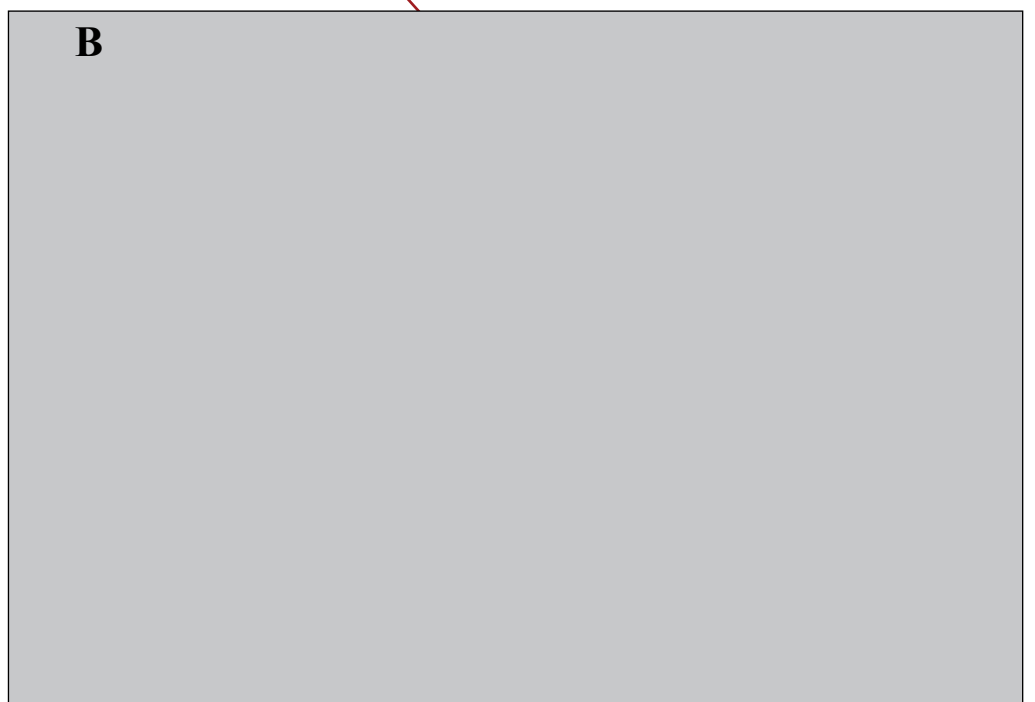
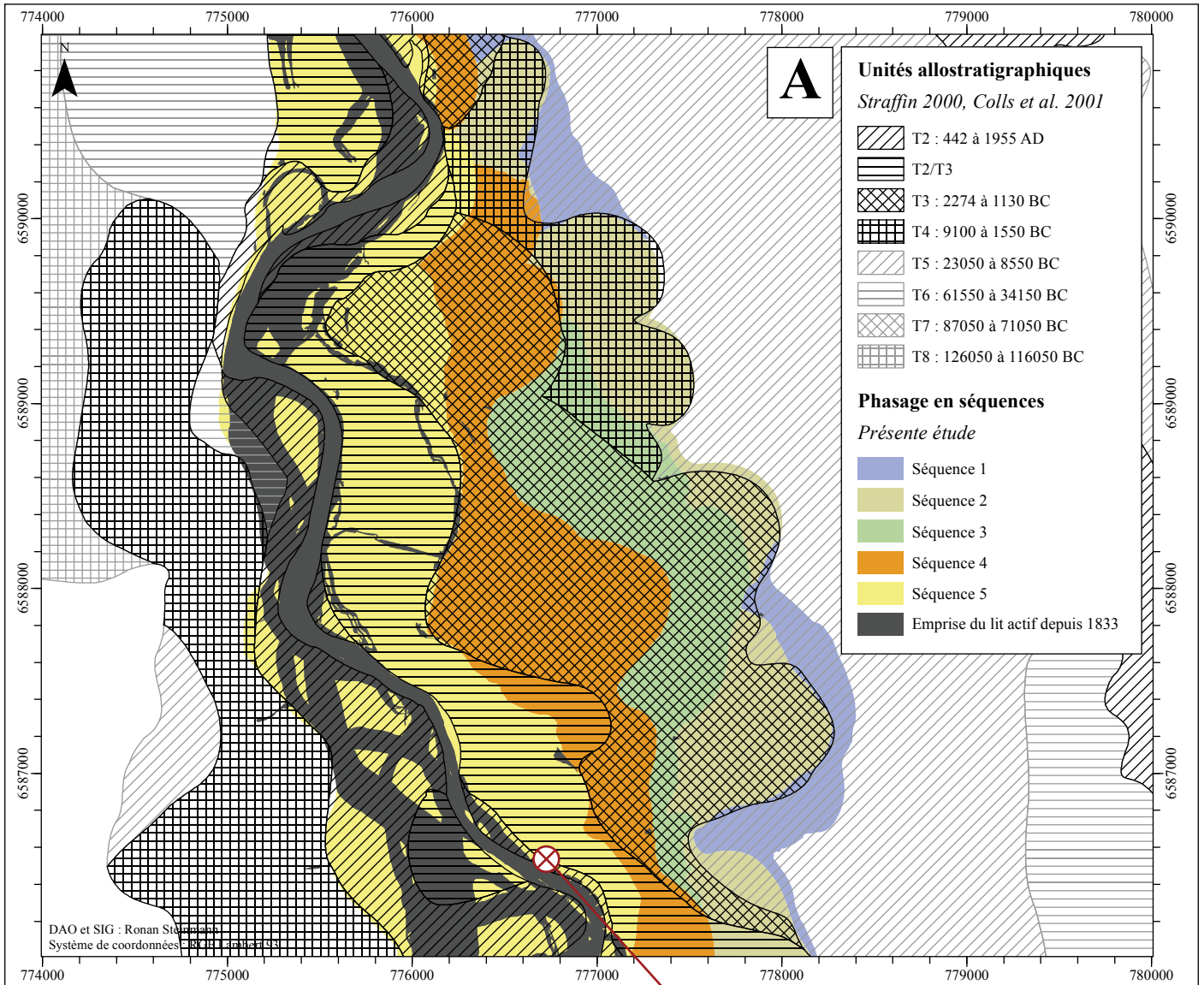


Figure 135 : A - Carte des unités allostratigraphiques du Quaternaire (d'après Straffin 2000, Colls et al. 2001) comparées au phasage réalisé à partir du traitement des données Li-DAR et de la chronologie relative des paléochenaux dans le secteur étudié B - Coupe et datations OSL de sédiments de la séquence 5 (d'après Straffin *et al.* 1999, p. 278 ; Straffin 2000, p. 95) ; l'Hôpital-le-Mercier

CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT

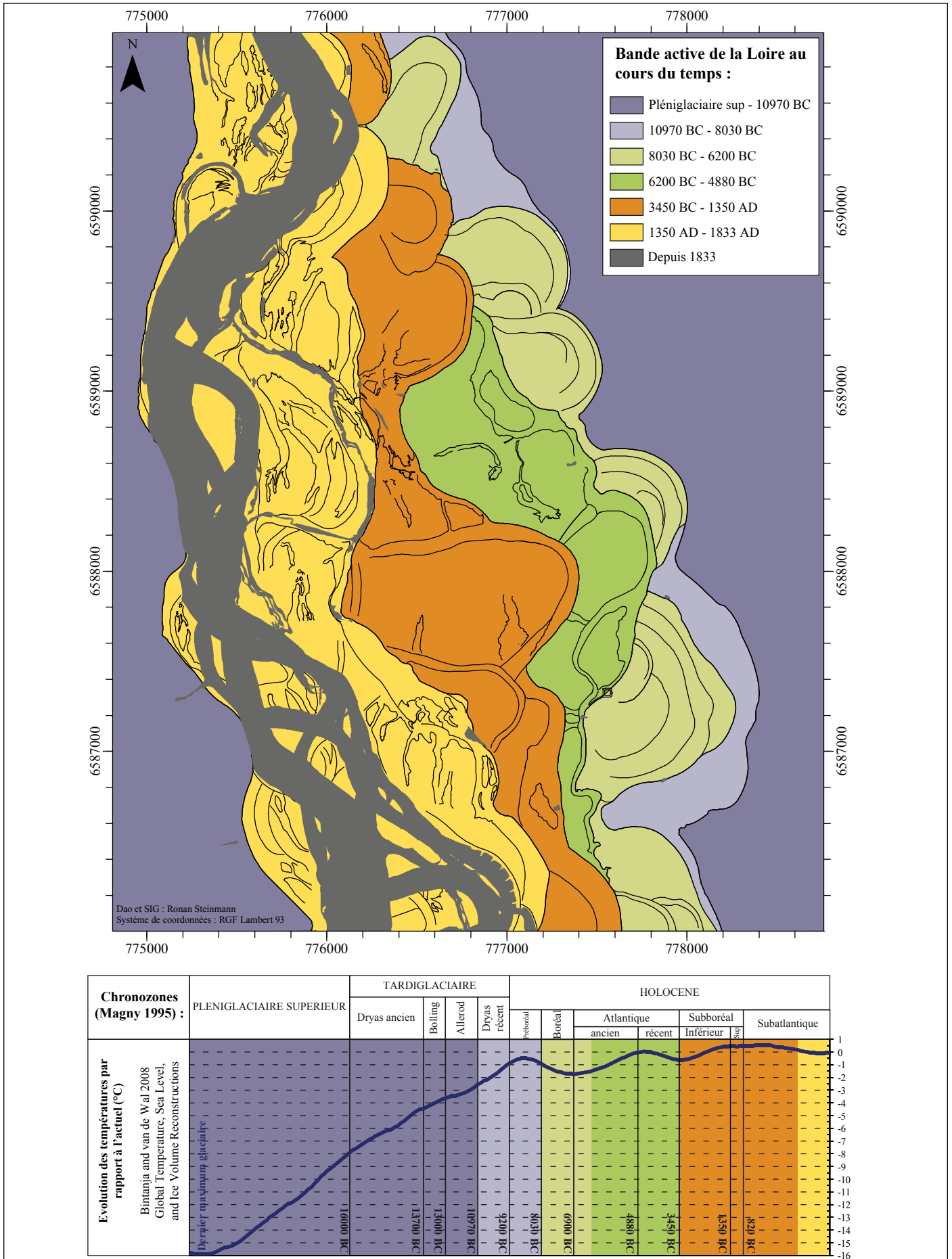


Figure 136 : Âges et extension des séquences mises en évidence dans le secteur de l'Hôpital-le-Mercier au regard de l'évolution des températures par rapport à l'actuel

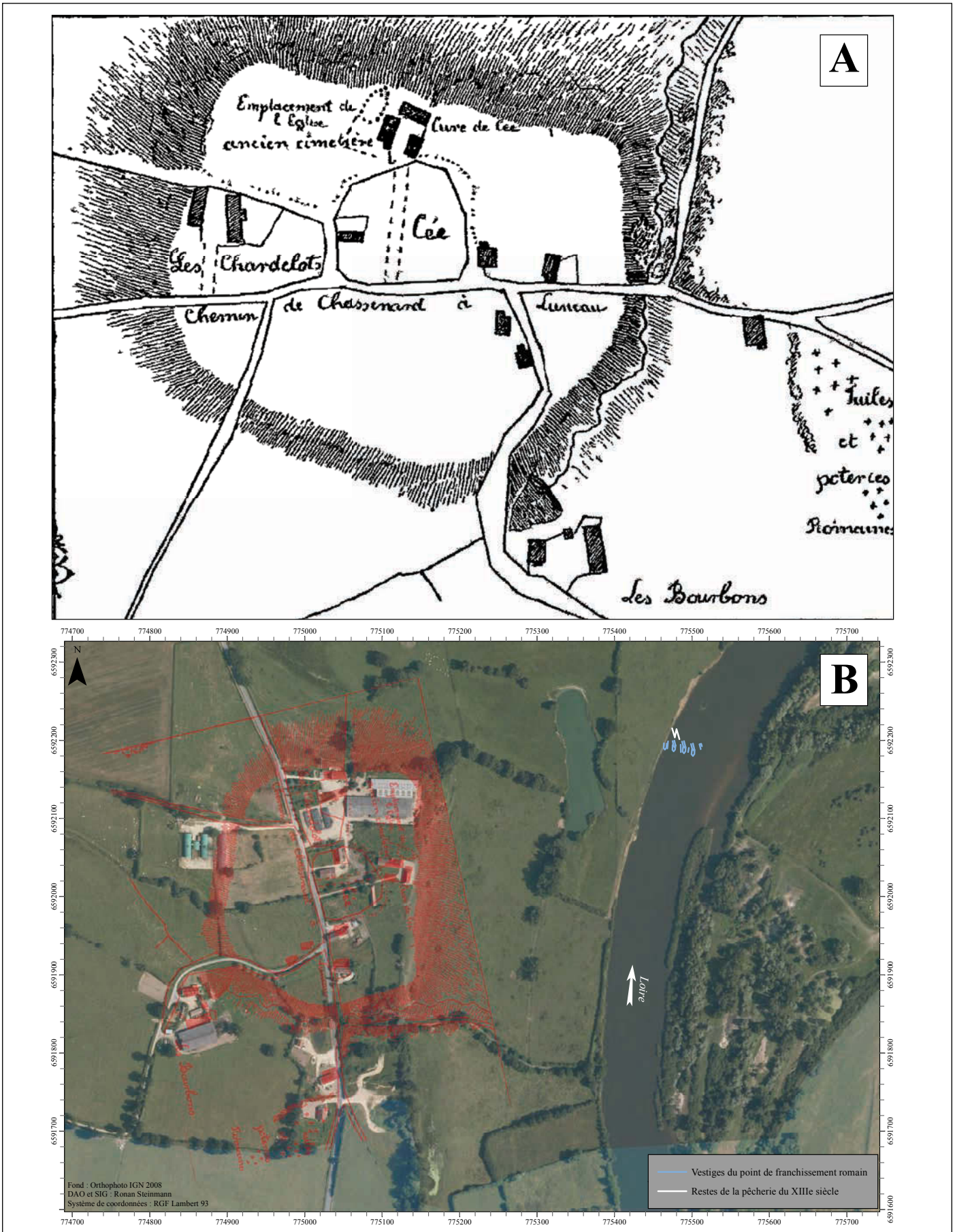


Figure 137 : A - Plan des anciennes occupations de la butte de Cée (Chassenard) et de ses alentours (De la Faige et De la Boutresse 1896, p. 593) B - Géoréférencement du plan et position de la butte de Cée par rapport aux vestiges retrouvés dans le lit de la Loire

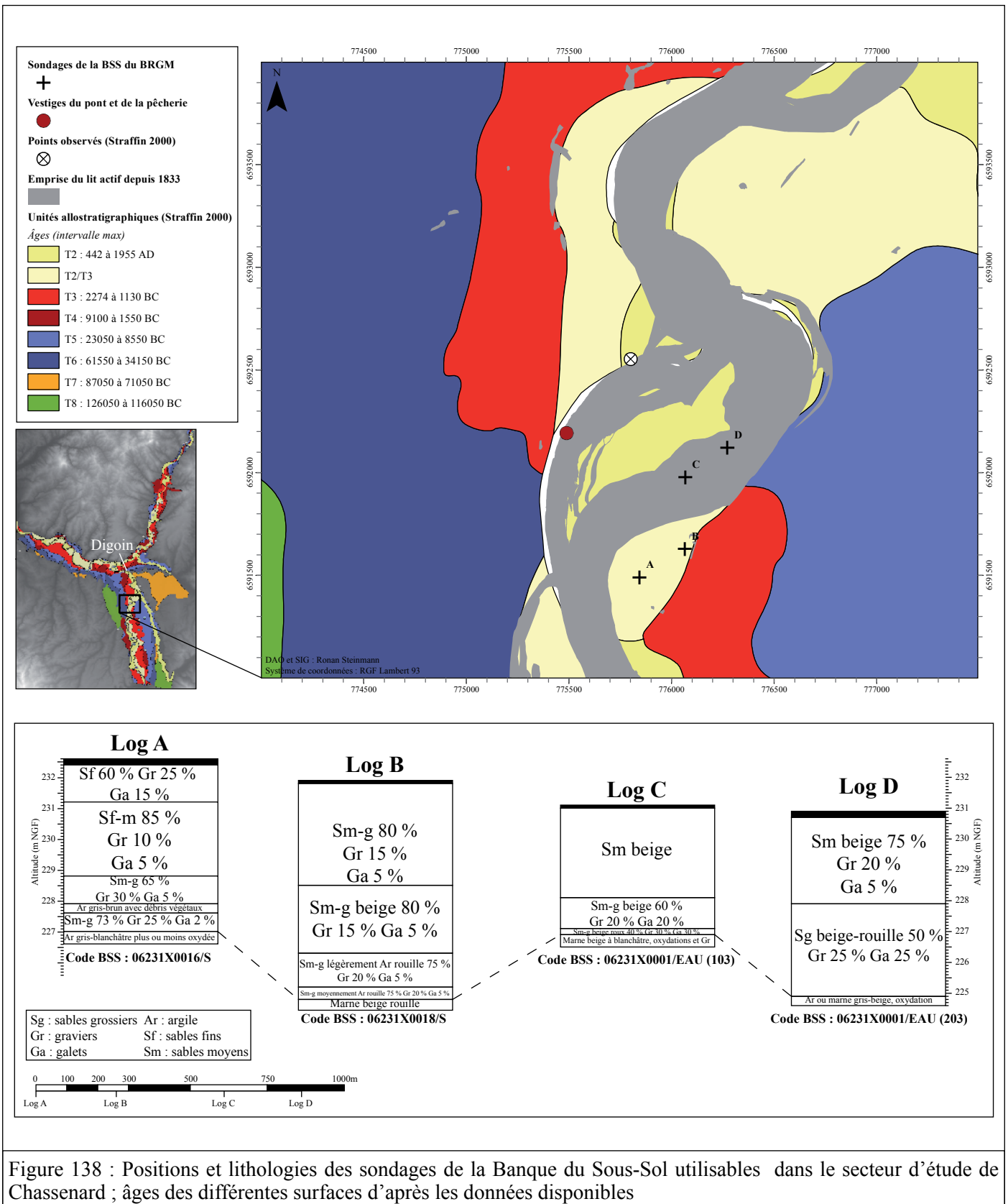


Figure 138 : Positions et lithologies des sondages de la Banque du Sous-Sol utilisables dans le secteur d'étude de Chassenard ; âges des différentes surfaces d'après les données disponibles

Figure 139 : Morphologie de la butte de Cée (Chassenard), de ses environs et du lit majeur en rive gauche de la Loire au niveau des vestiges découverts dans le chenal



Vestiges d'une retenue d'étang

**Structures archéologiques**

- Franchissement romain
- Pêcherie du XIII<sup>e</sup> siècle

**MNT LIDAR**

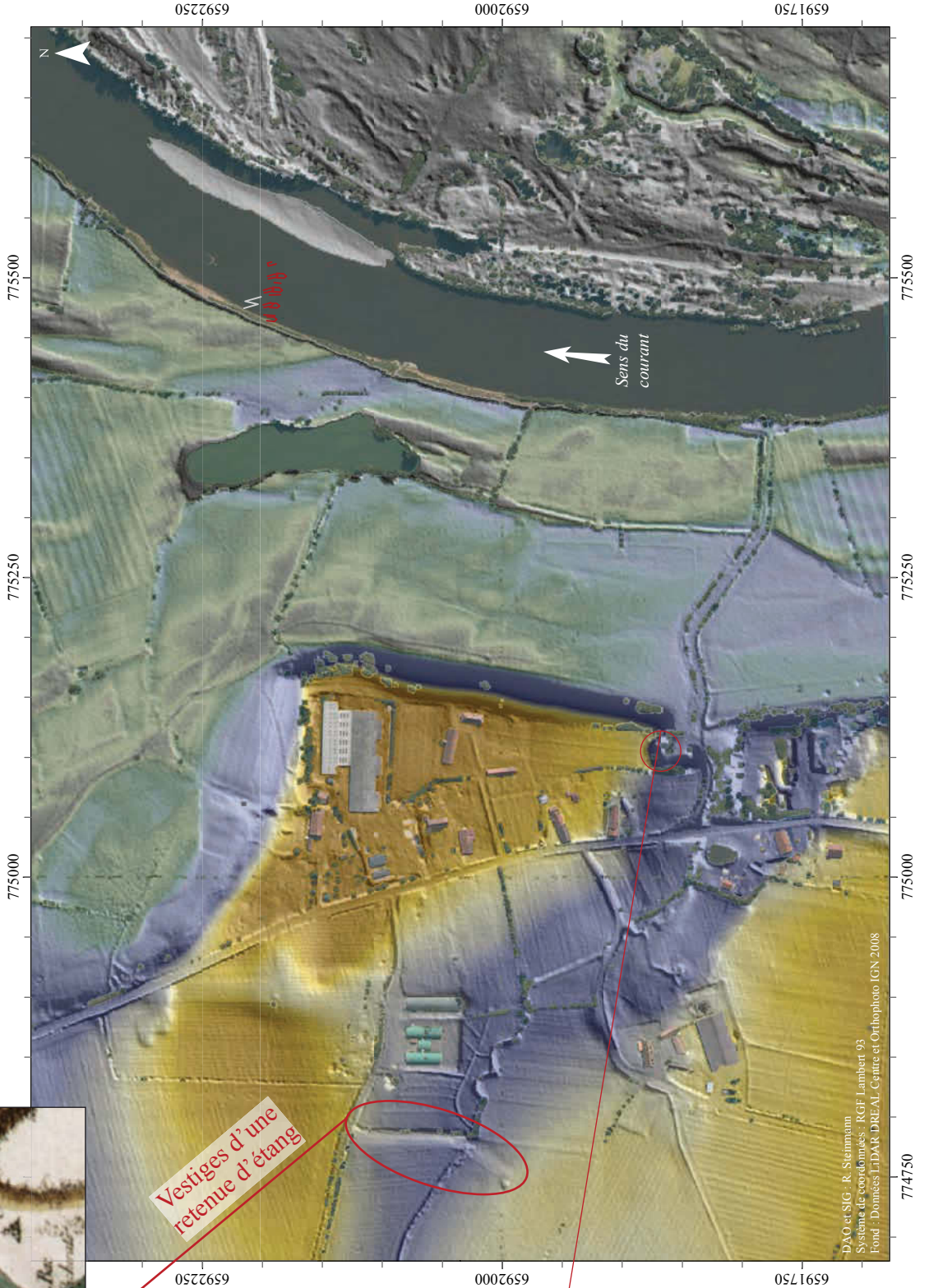
Altitude (m NGF)

Max : 246,64

Min : 229,07



Sommet de la terrasse weichselienne exploitée comme gravière



DAO et SIG : R. Stemmamm  
 Système de coordonnées : RGF Lambert 93  
 Fond : Données LIDAR DREAL Centre et Orthophoto IGN 2008

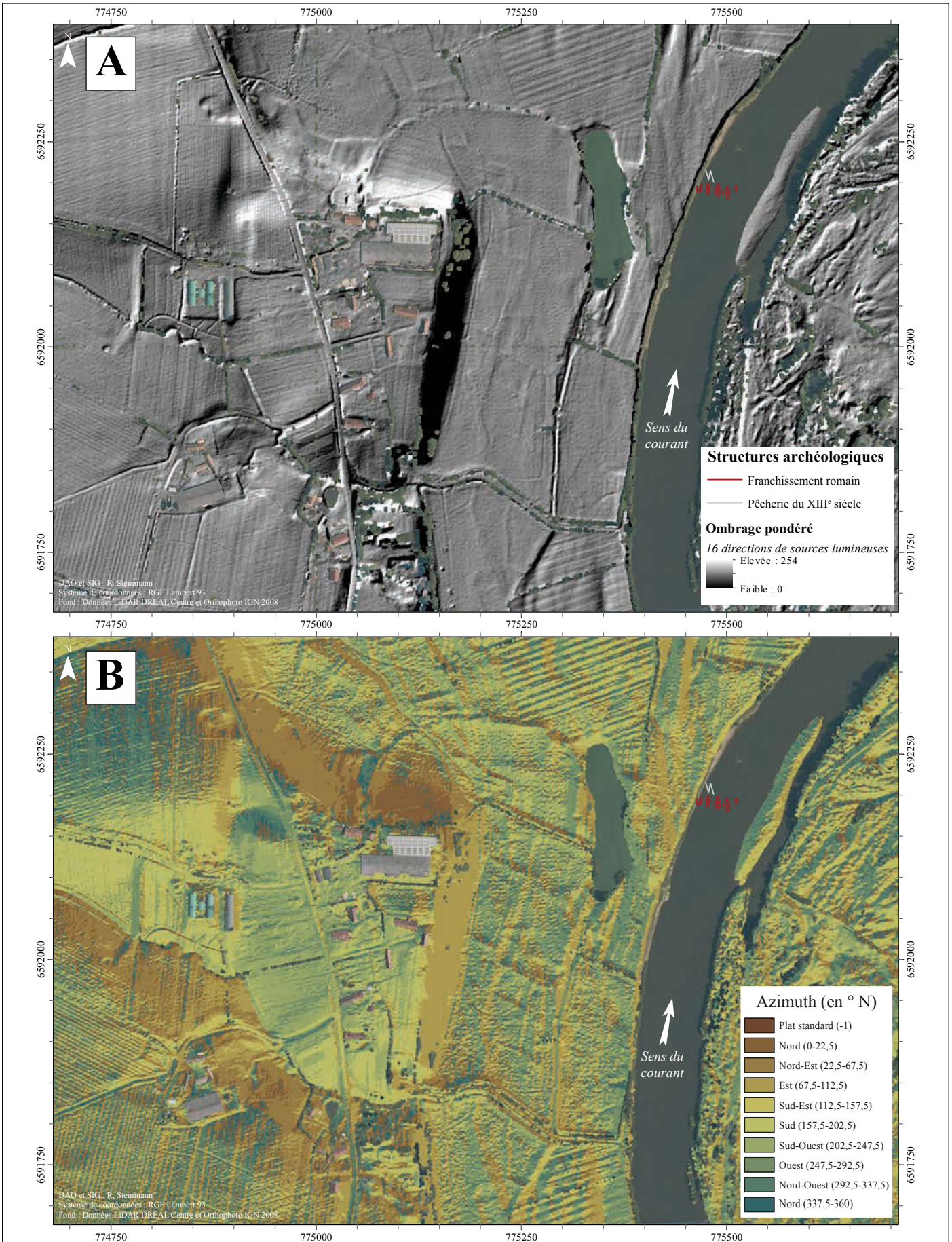


Figure 140 : Traitements du MNT LiDAR aux alentours du hameau de Cée en rive gauche de la Loire à Chassenard ; A - Modelé du terrain mis en évidence par la fusion de seize cartes d'ombrage avec des directions de sources d'éclairage différentes B - Exposition de la surface du MNT

## CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT

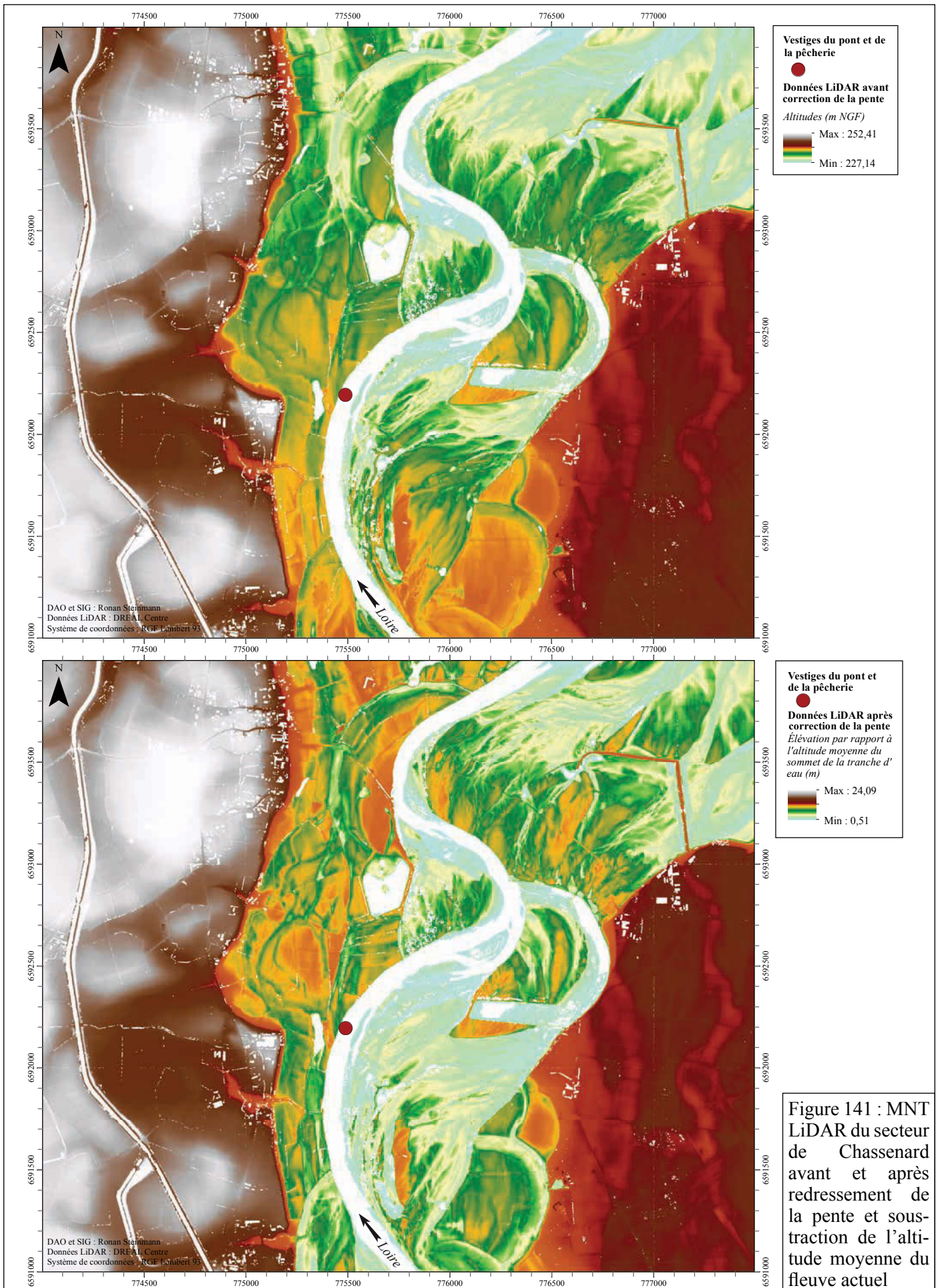
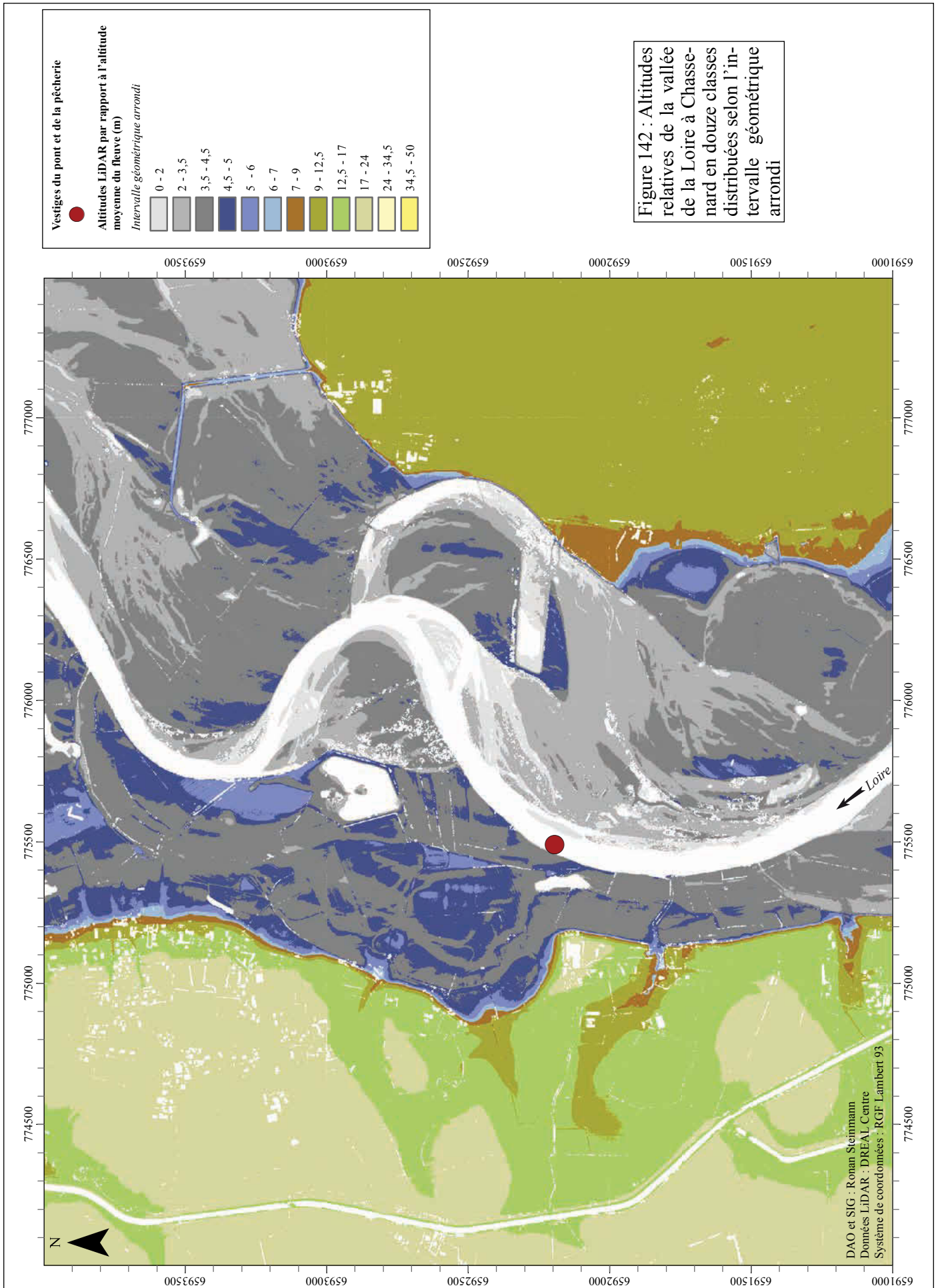


Figure 141 : MNT LiDAR du secteur de Chassenard avant et après redressement de la pente et sous-traction de l'altitude moyenne du fleuve actuel





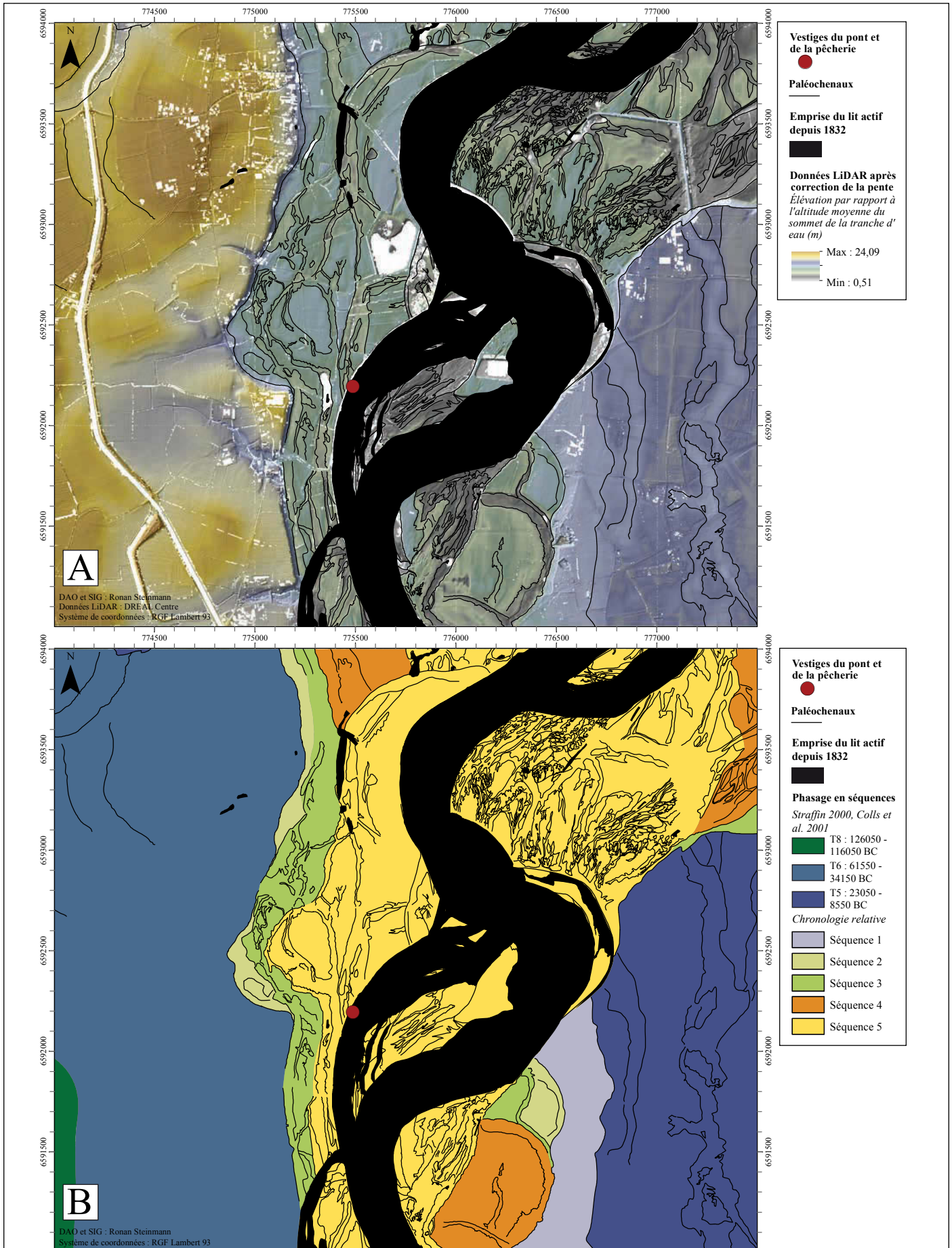


Figure 143 : Chronologie relative et phasage des surfaces (B) dans le secteur de Chassenard, réalisés à partir de la vectorisation des paléochenaux et les données LiDAR (A), ainsi que des données de datation des terrasses quaternaires

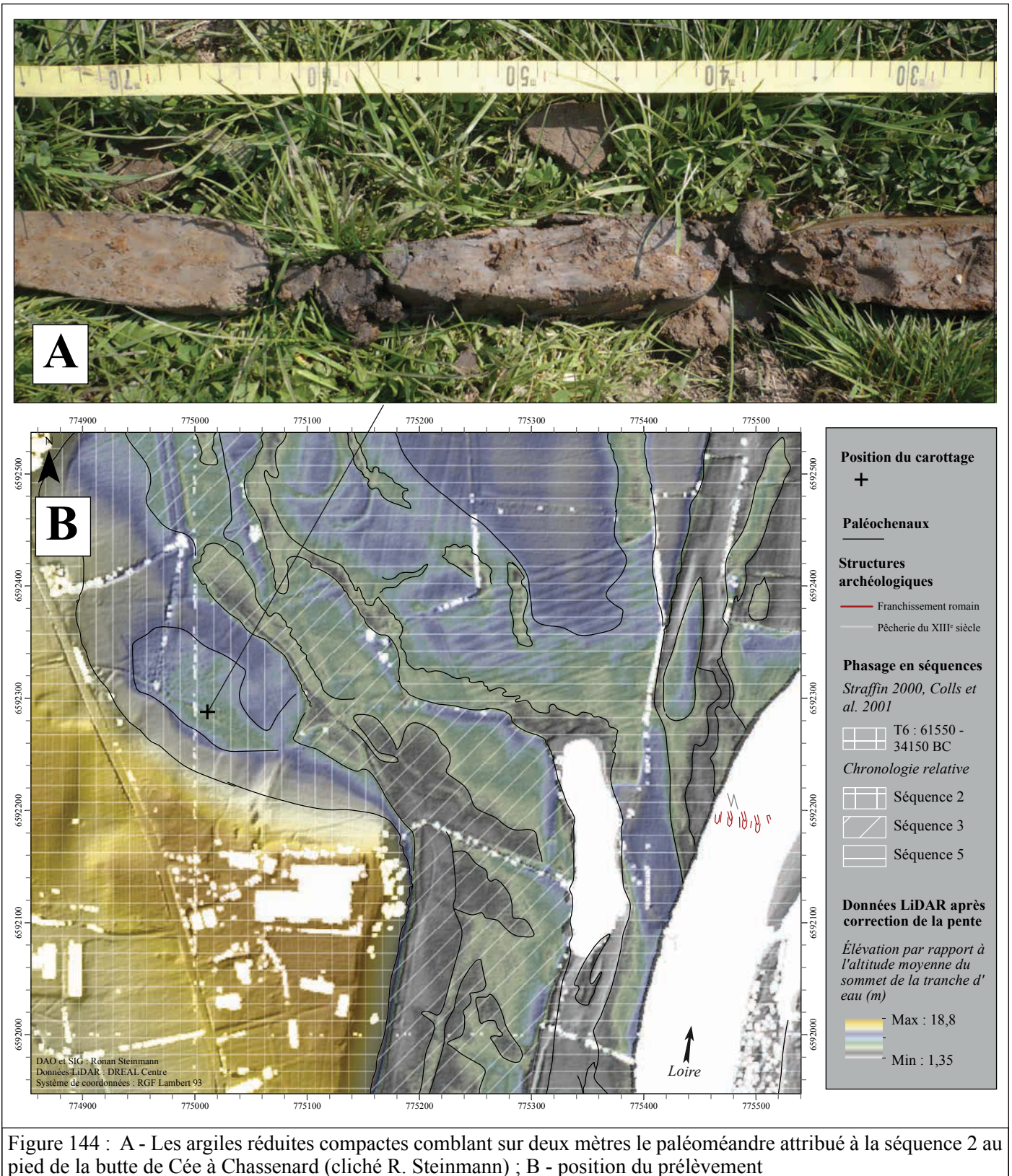
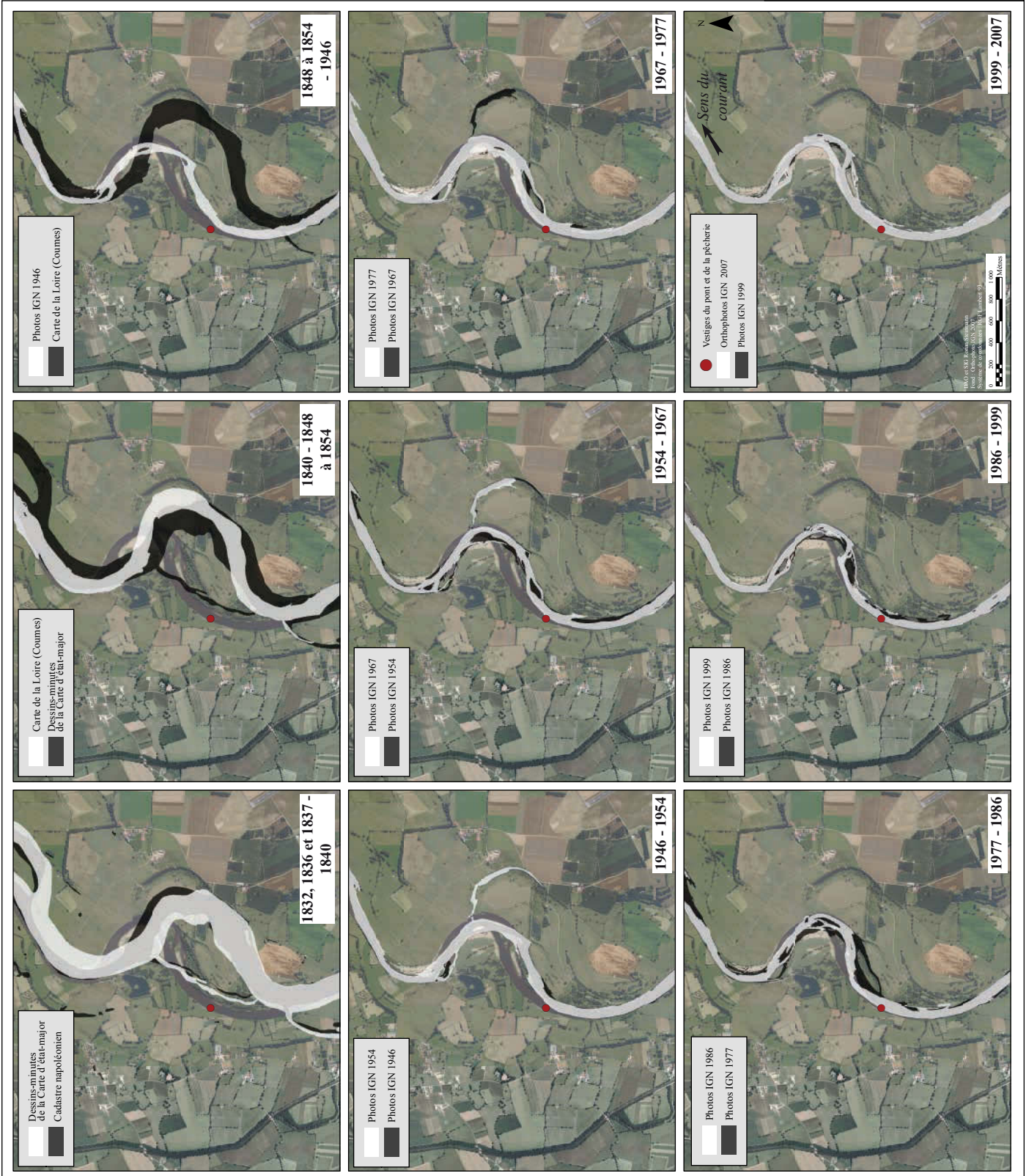


Figure 144 : A - Les argiles réduites compactes comblant sur deux mètres le paléoméandre attribué à la séquence 2 au pied de la butte de Cée à Chassenard (cliché R. Steinmann) ; B - position du prélèvement

Figure 145 : Evolution en plan du lit actif de la Loire au cours des deux derniers siècles dans le secteur de Chassenard



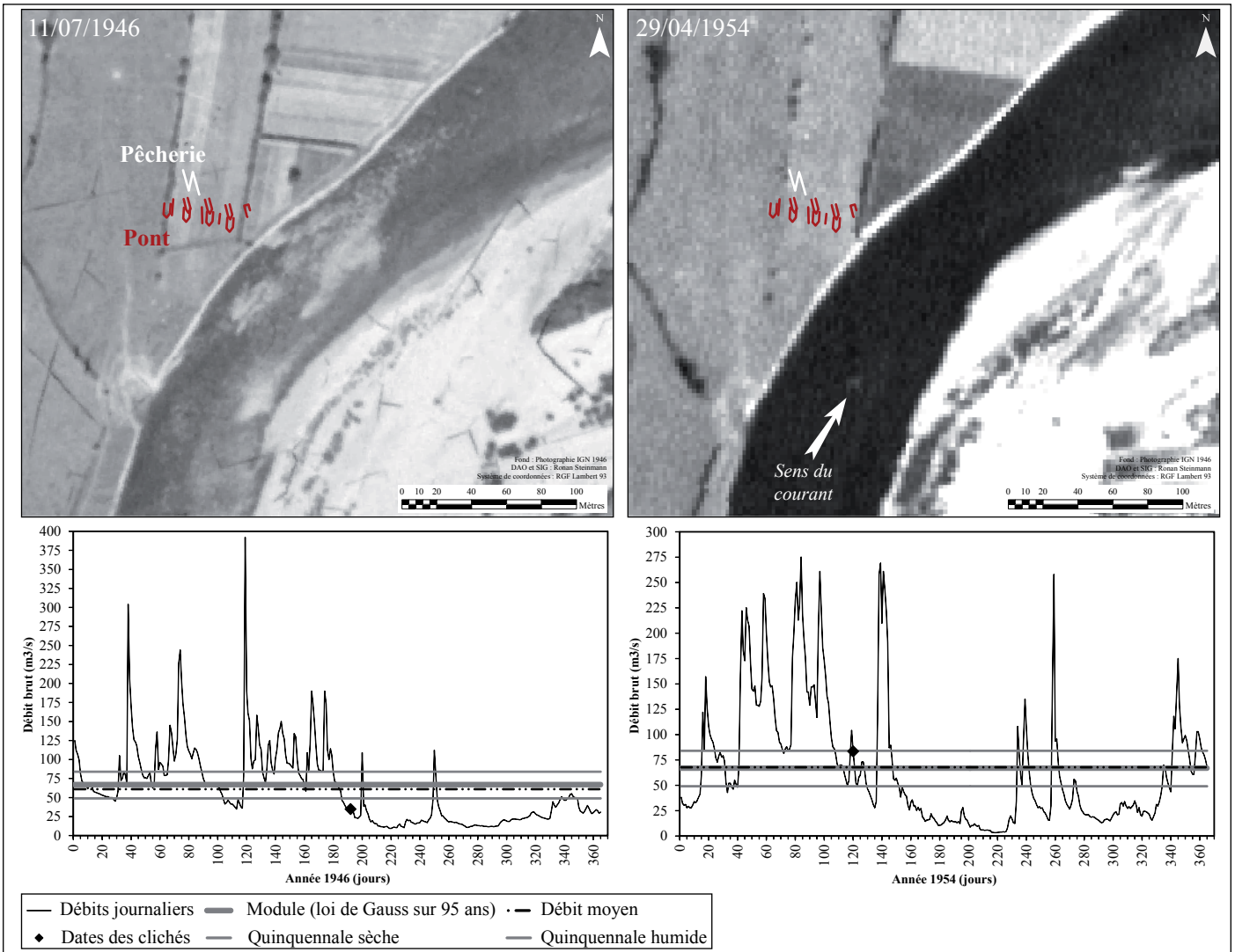


Figure 146 : Les vestiges de Chassenard replacés sur les prises de vue de 1946 et 1954 ; régime hydrologique correspondant à la station de Villersrest ; l'étendue connue des structures archéologiques est encore enfouie dans la berge

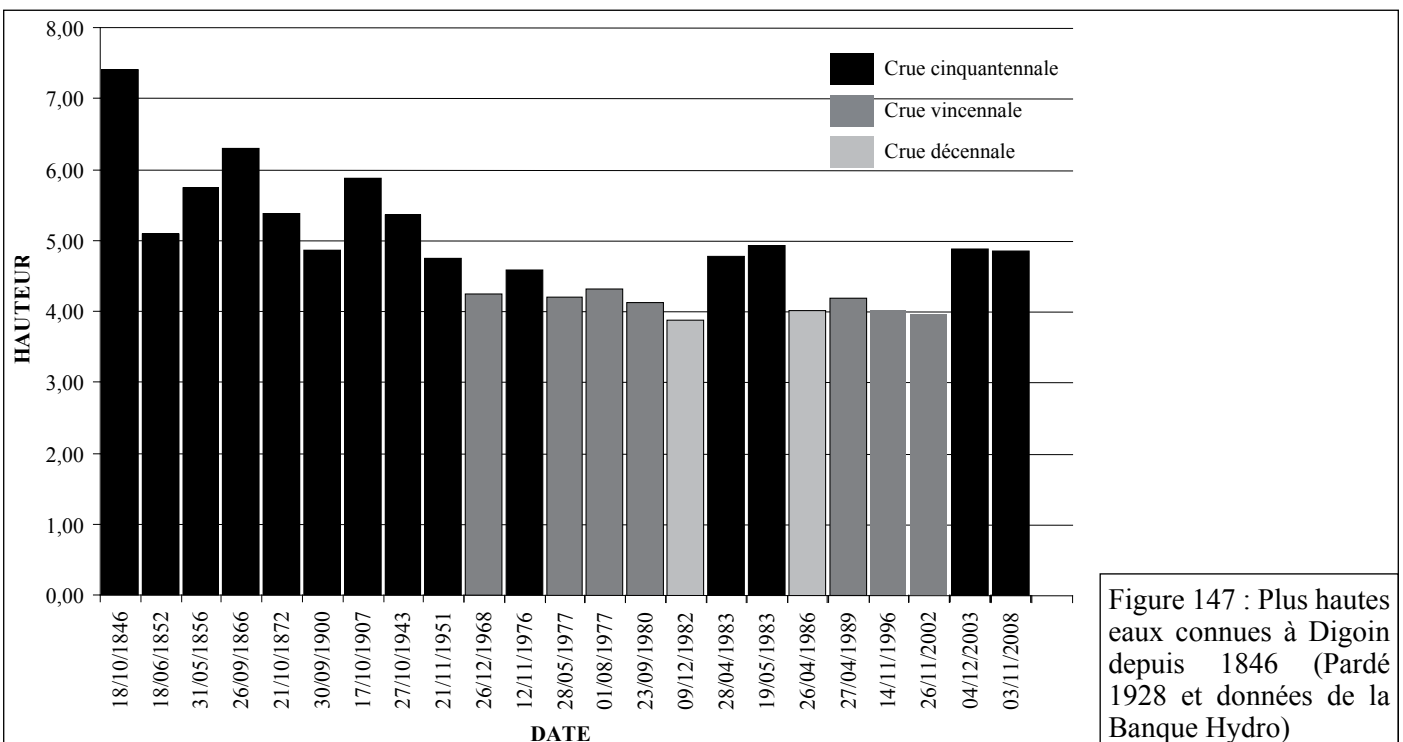


Figure 147 : Plus hautes eaux connues à Digoin depuis 1846 (Pardé 1928 et données de la Banque Hydro)

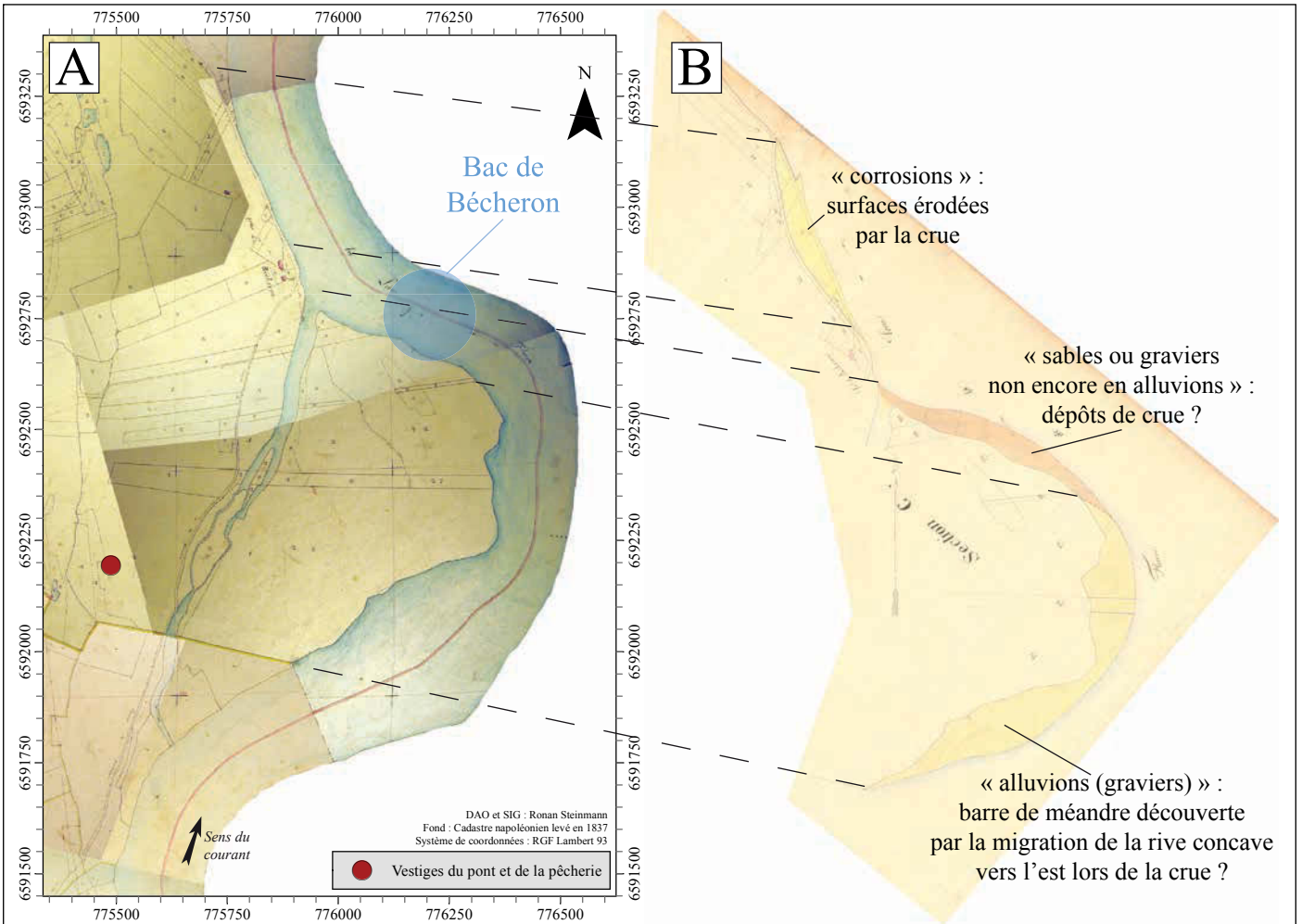


Figure 148 : Extraits du plan cadastral napoléonien du bord de la Loire à Chassenard avant (A, 1837) et après (B, 1847) la crue de 1846 ; ADA 3P 3055

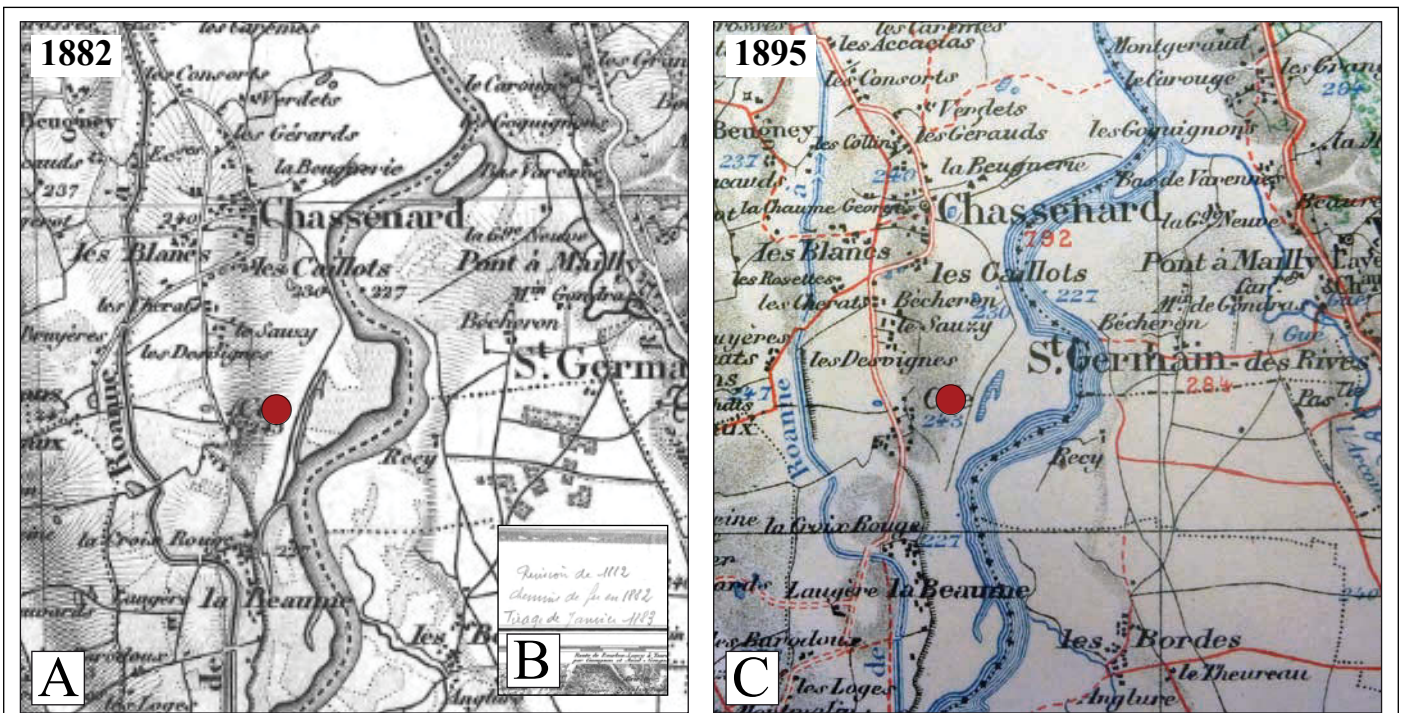
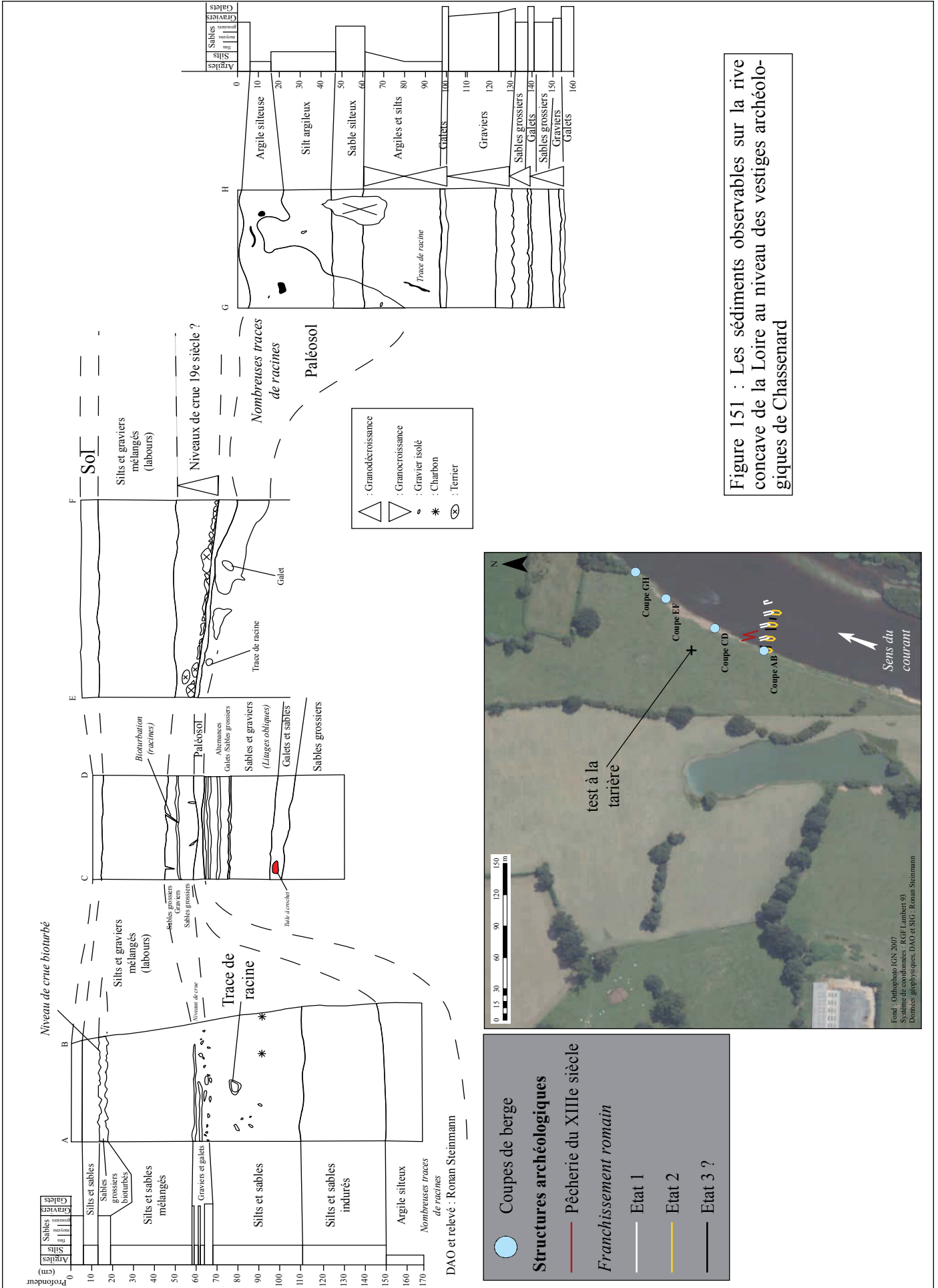


Figure 149 : Le méandre de Bécheron (Varenne-Saint-Germain) sur la Carte d'état-major révisée (A et B, ADSL GF 1 Fi 26/3) et la feuille Charolles de la Carte de France (C, ADSL 1 Fi 13/14)



Code arbre	x (L93)	y (L93)	Essence	Circonférence (cm)	Rayon	Longueur carottée (cm)	Nb cernes carotte	Nb cernes/cm	Âge estimé	Date vs Nov 2007	Âge de pousse AD	Vitesse de pousse cm/an
Chêne 1	776474	6592439	Chêne	146	23,24	21,1	73,6	3,49	81,05	1926,87	1926 - 1927	0,29
Chêne 2	776252	6592423	Chêne	225	35,81	19,5	44,6	2,29	81,90	1926,02	1925 - 1926	0,44
Peuplier 3	776202	6592396	Peuplier	540	85,94	24,2	45,2	1,87	160,52	1847,40	1847	0,54
Chêne 4	776195	6592360	Chêne	180	28,65	23,8	53,2	2,24	64,04	1943,88	1943 - 1944	0,45
Saule 6	776068	6592340	Saule	163	25,94	24,2	36,8	1,52	39,45	1968,47	1968	0,66

Figure 150 : Localisation des arbres carottés et détail des calculs menés pour dater l'abandon du méandre de Bécheron (Varenne-Saint-Germain)





Sommet sableux des barres de tresse graveleuses



Stratifications en auges des barres de tresse graveleuses



Sables déposés par la crue de 2008 récemment colonisés par les herbacées



Dépôt argileux hydromorphe pédogénéisé comblant un ancien chenal de dimensions réduites



Aspect des dépôts remaniés par les activités agricoles et/ou la pédogenèse

Figure 152 : Photographies des unités sédimentaires observées sur la rive gauche de la Loire au niveau des vestiges du pont romain et de la pêcherie médiévale de Chassenard (clichés R. Steinmann)



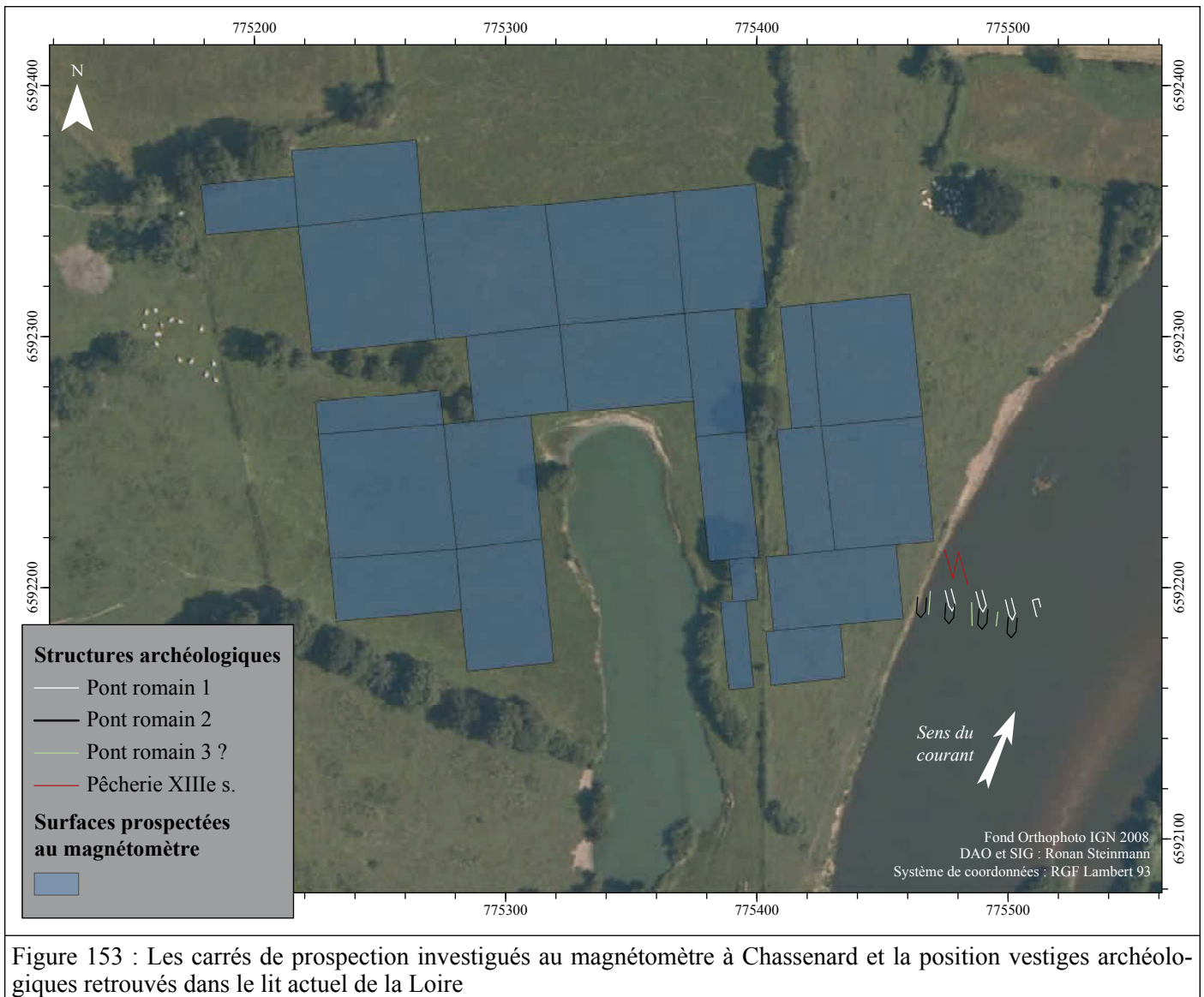


Figure 153 : Les carrés de prospection investigués au magnétomètre à Chassenard et la position vestiges archéologiques retrouvés dans le lit actuel de la Loire

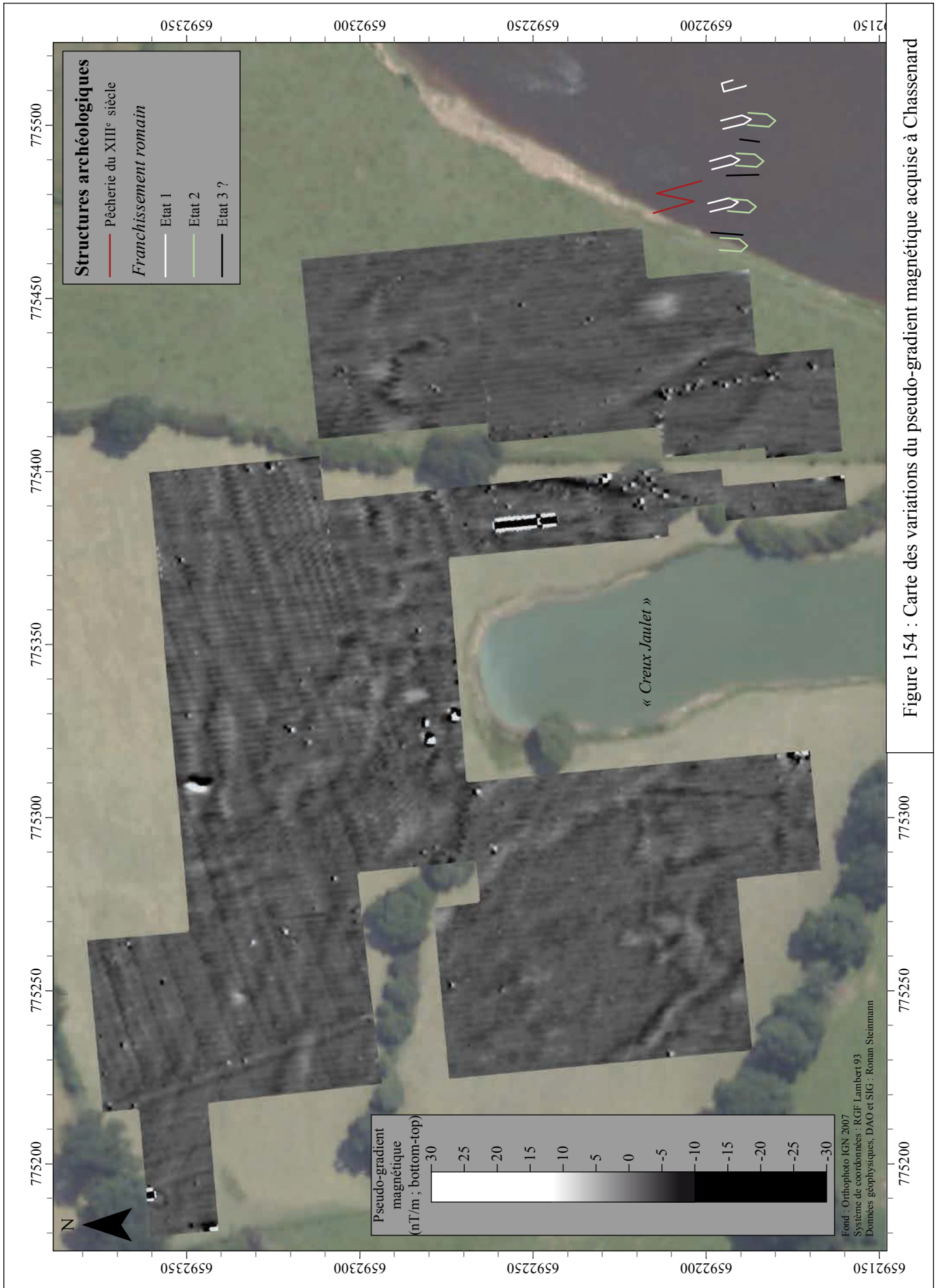


Figure 154 : Carte des variations du pseudo-gradient magnétique acquise à Chassenard

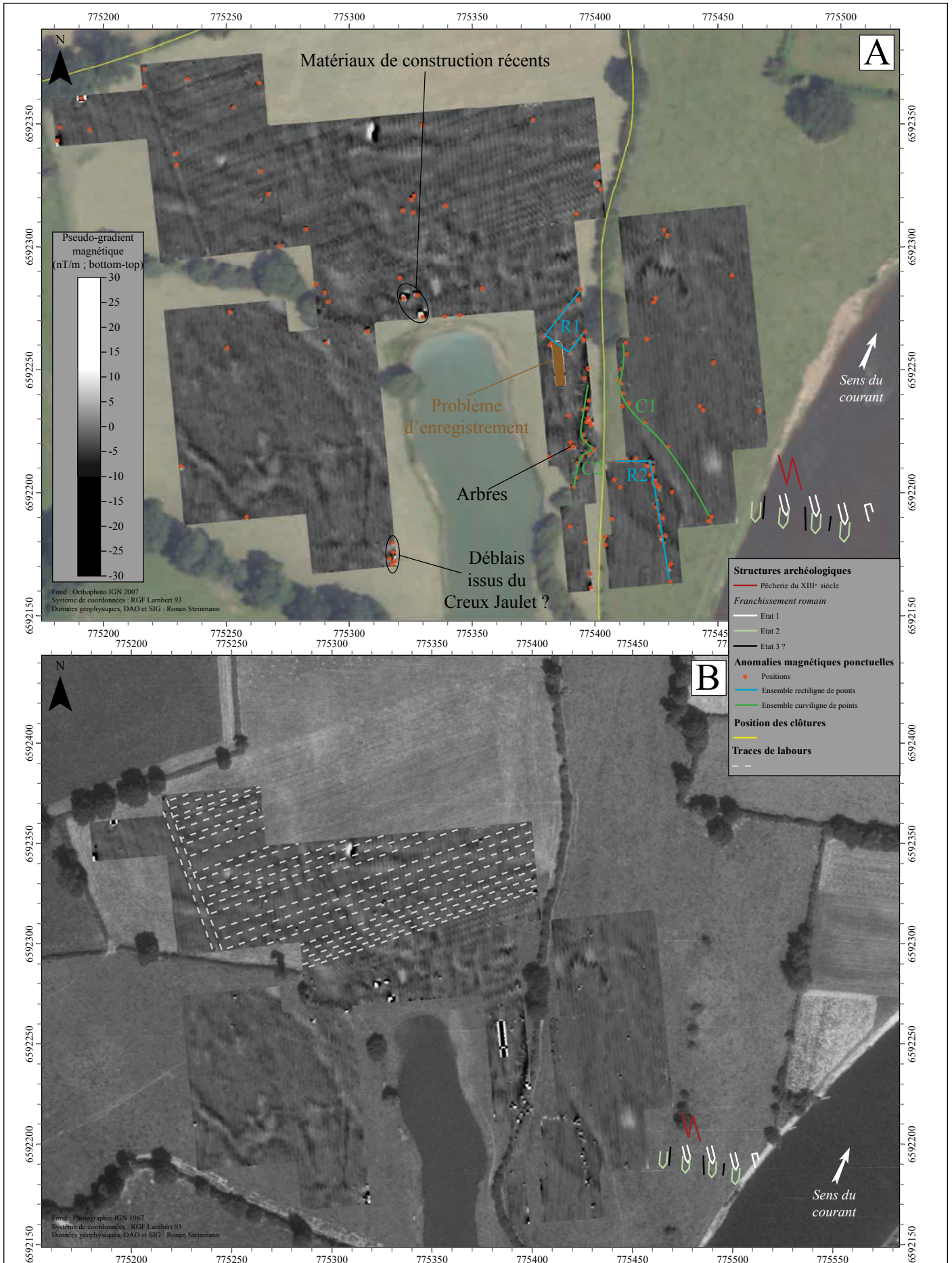


Figure 155 : Anomalies ponctuelles (A) et traces de labours (B) détectées au magnétomètre à Chassenard

## CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT



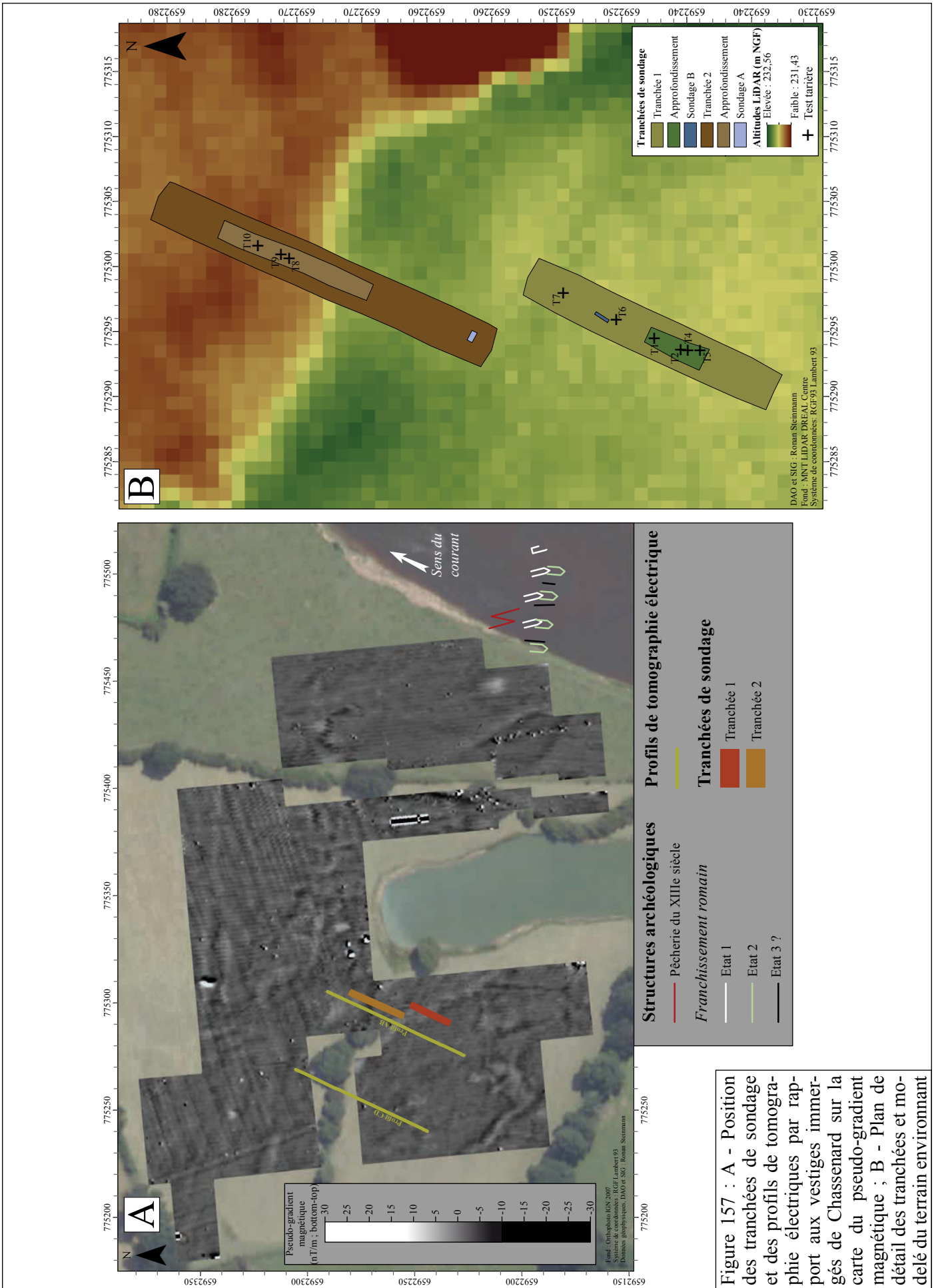


Figure 157 : A - Position des tranchées de sondage et des profils de tomographie électrique par rapport aux vestiges immergés de Chassenard sur la carte du pseudo-gradient magnétique ; B - Plan de détail des tranchées et modalités du terrain environnant

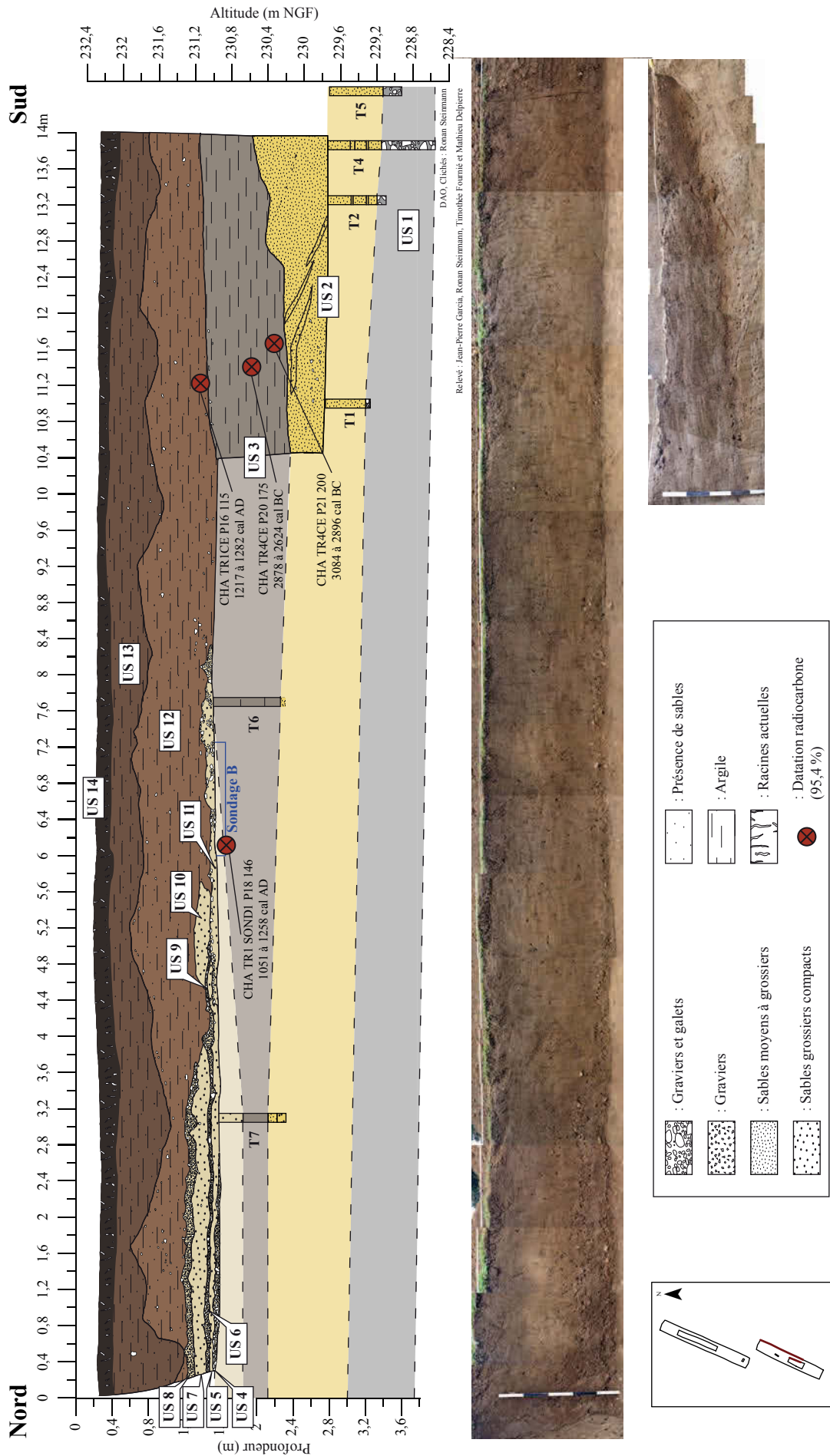
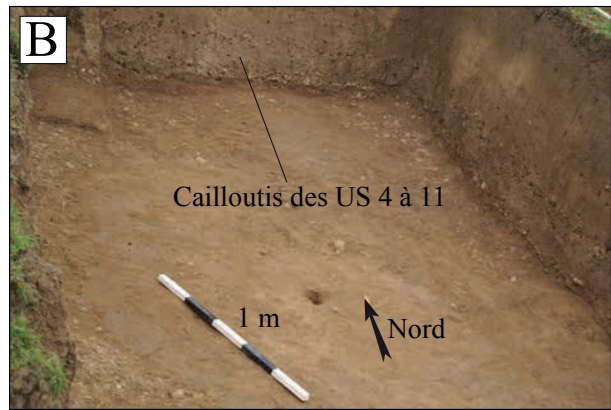
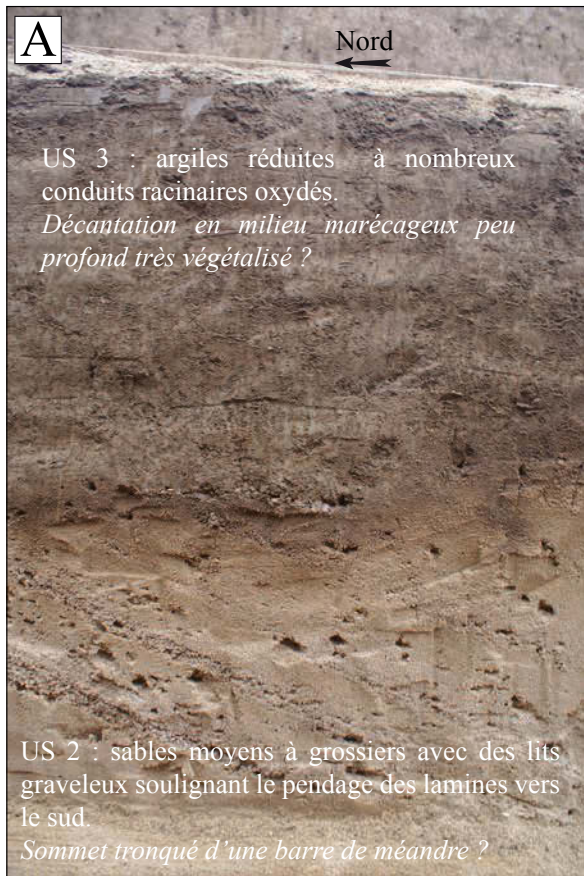
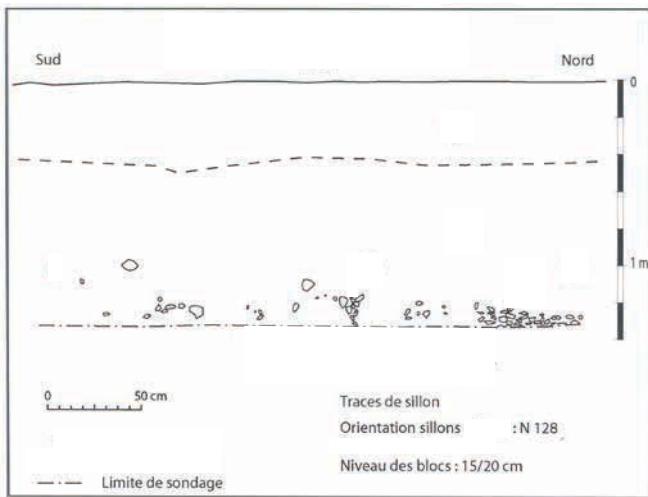


Figure 158 : Stratigraphie observée sur la coupe est dans la tranchée de sondage 1 (Chassenard)



50 cm

Figure 159 : Photographies de certaines unités observées dans la tranchée 1 à Chassenard (clichés R. Steinmann) ; A - pendage des lits graveleux de l'US 2 tronquée par un paléochenal avant la mise en place de l'US 3 ; B - les recharges de cailloutis de voirie dans l'angle nord-est de la tranchée 1



(D.A.O. Delpierre, Milot)

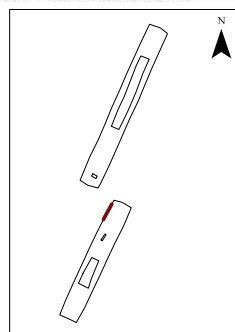


Figure 160 : Les graviers marquant la présence d'éventuelles traces de mise en culture (coupe ouest de la tranchée 1, Chassenard)



Cliché : Ronan Steinmann

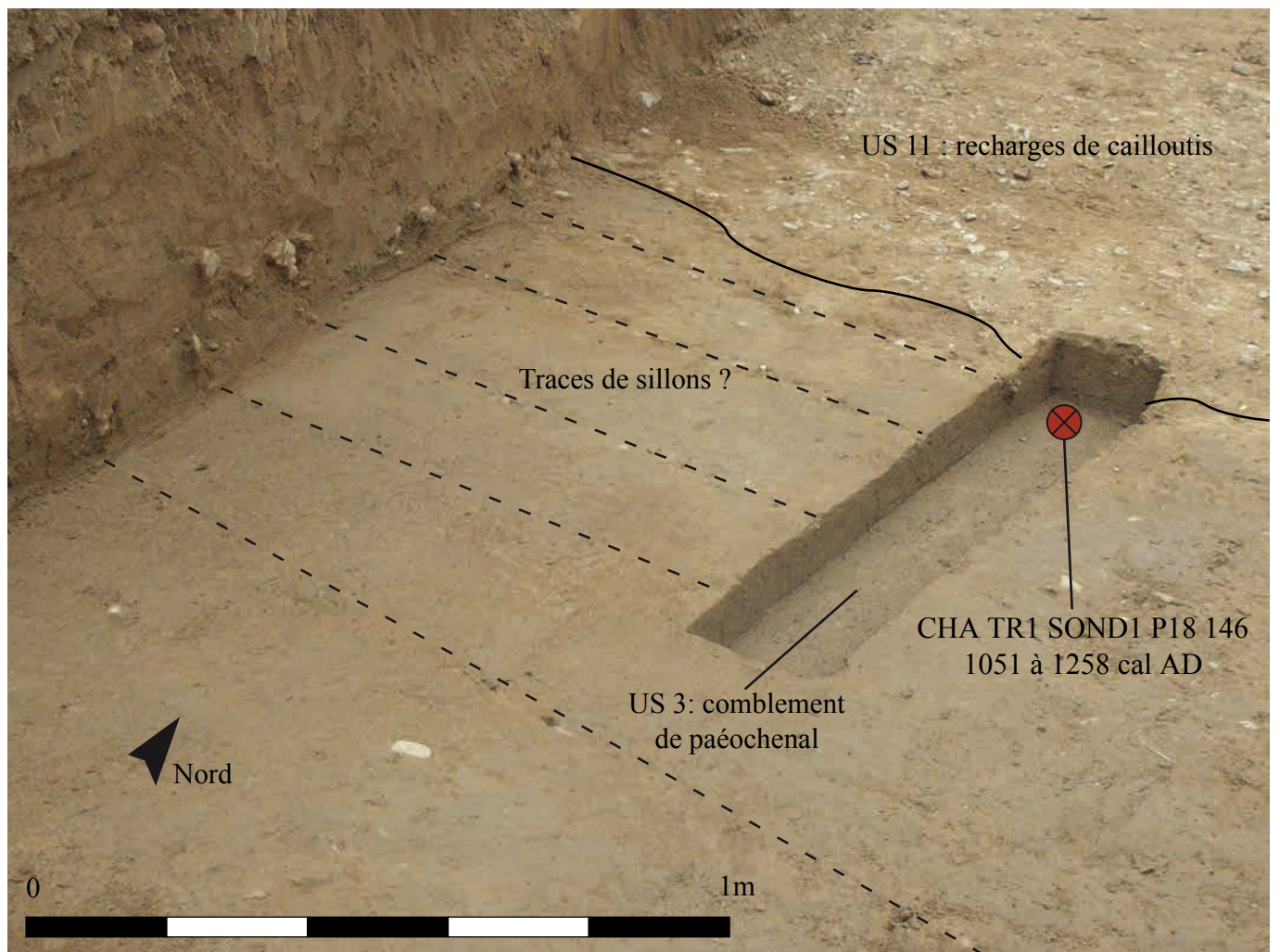
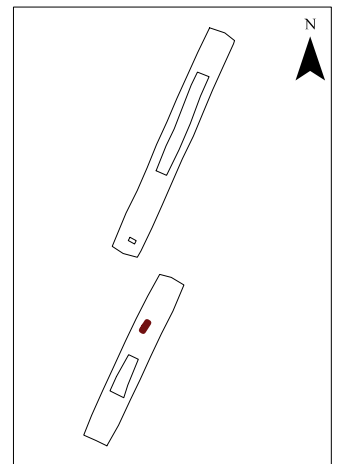


Figure 161 : Mise en contexte des éventuelles traces d'agriculture observées en bordure des recharges de voirie médiévales et affectant la fin du comblement du paléochenal observé au sud de la tranchée 1 (Chassenard ; cliché R. Steinmann)





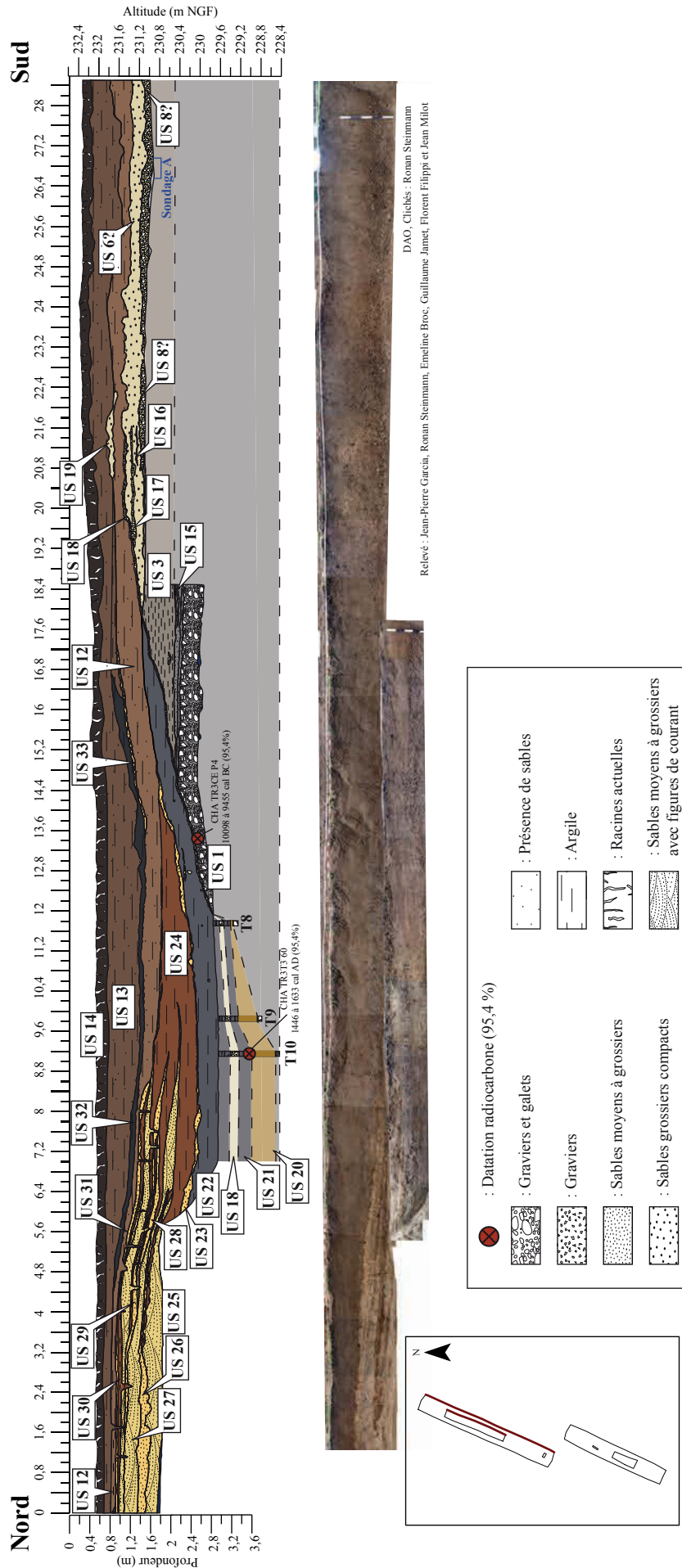


Figure 162 : Stratigraphie observée sur la coupe est dans la tranchée de sondage 2 (Chassenard)

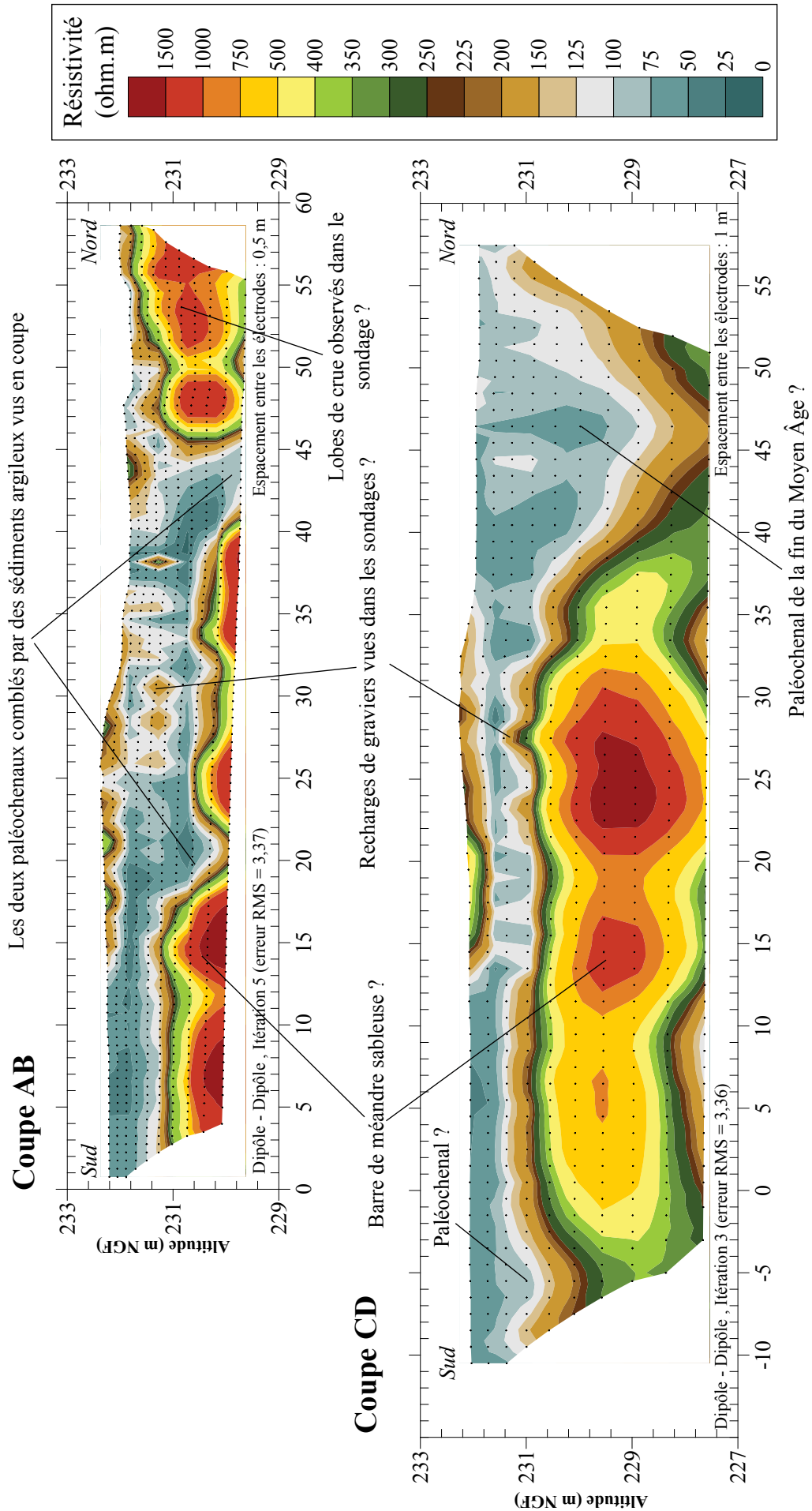


Figure 163 : Profils de résistivité électrique acquis en rive gauche de la Loire, à proximité des tranchées de sondage de Chassenard

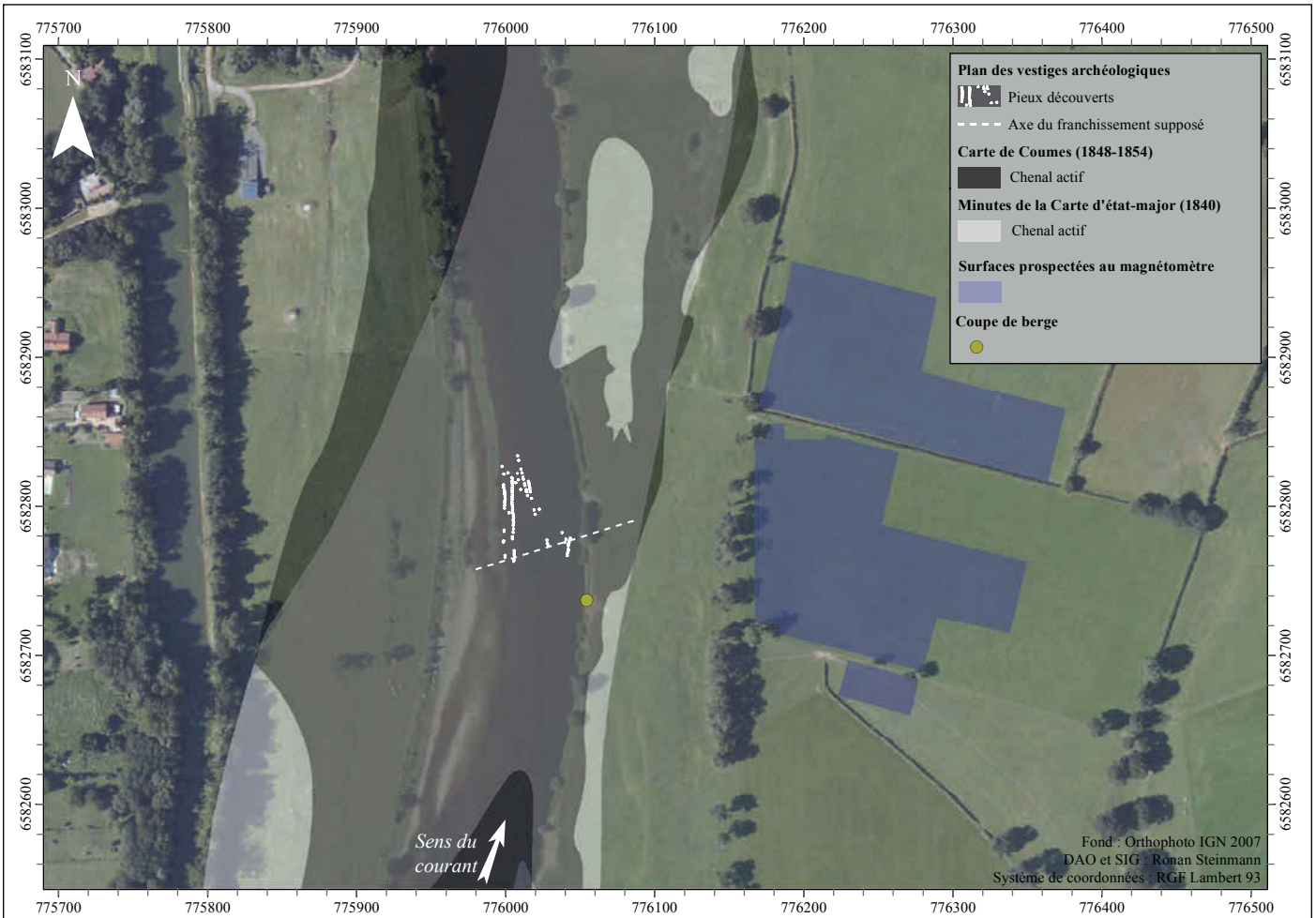


Figure 164 : Positions des vestiges antiques découverts dans le lit de la Loire à Avrilly, du lit mineur du fleuve au XIX<sup>e</sup> siècle et des prospections géophysiques réalisées en rive droite

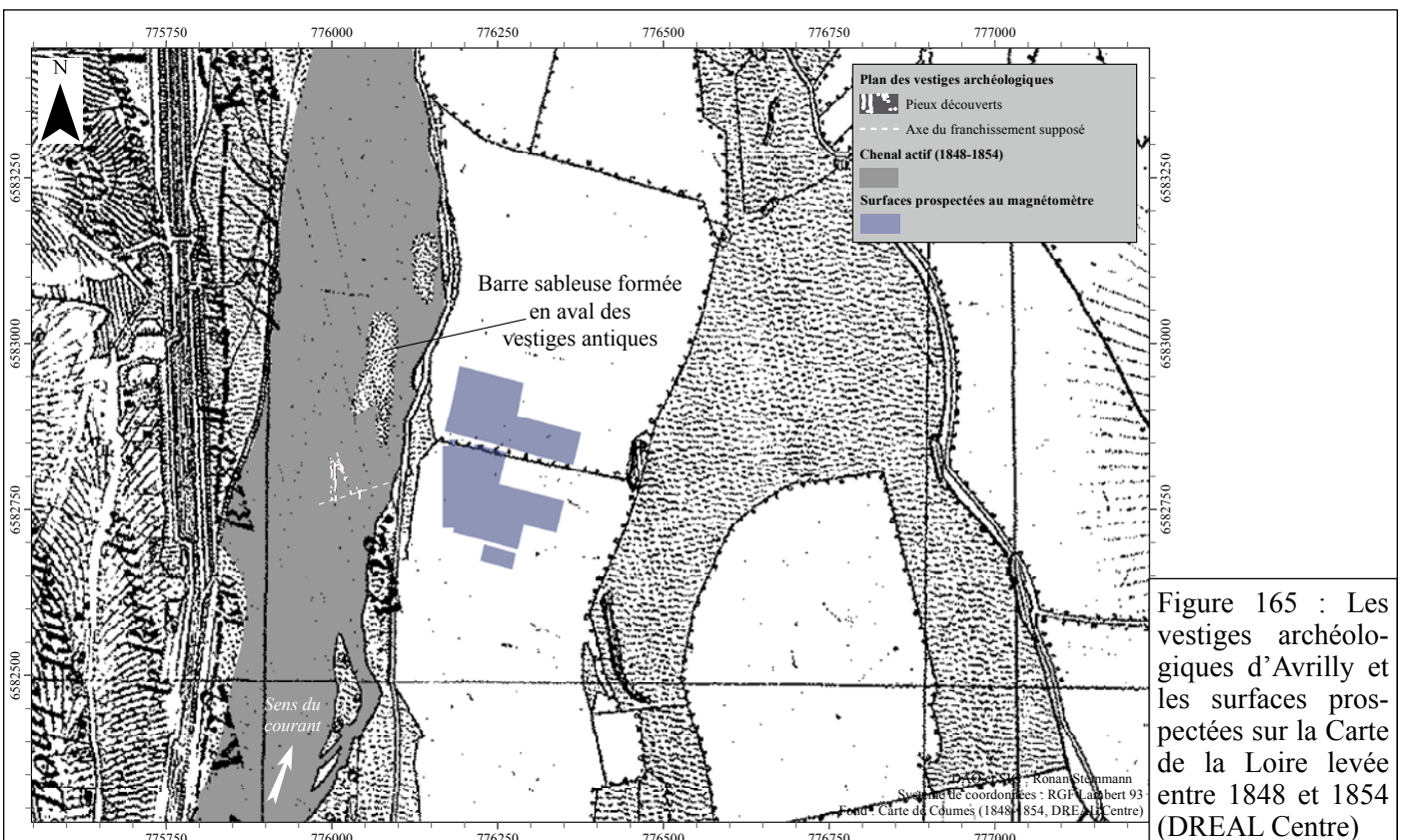
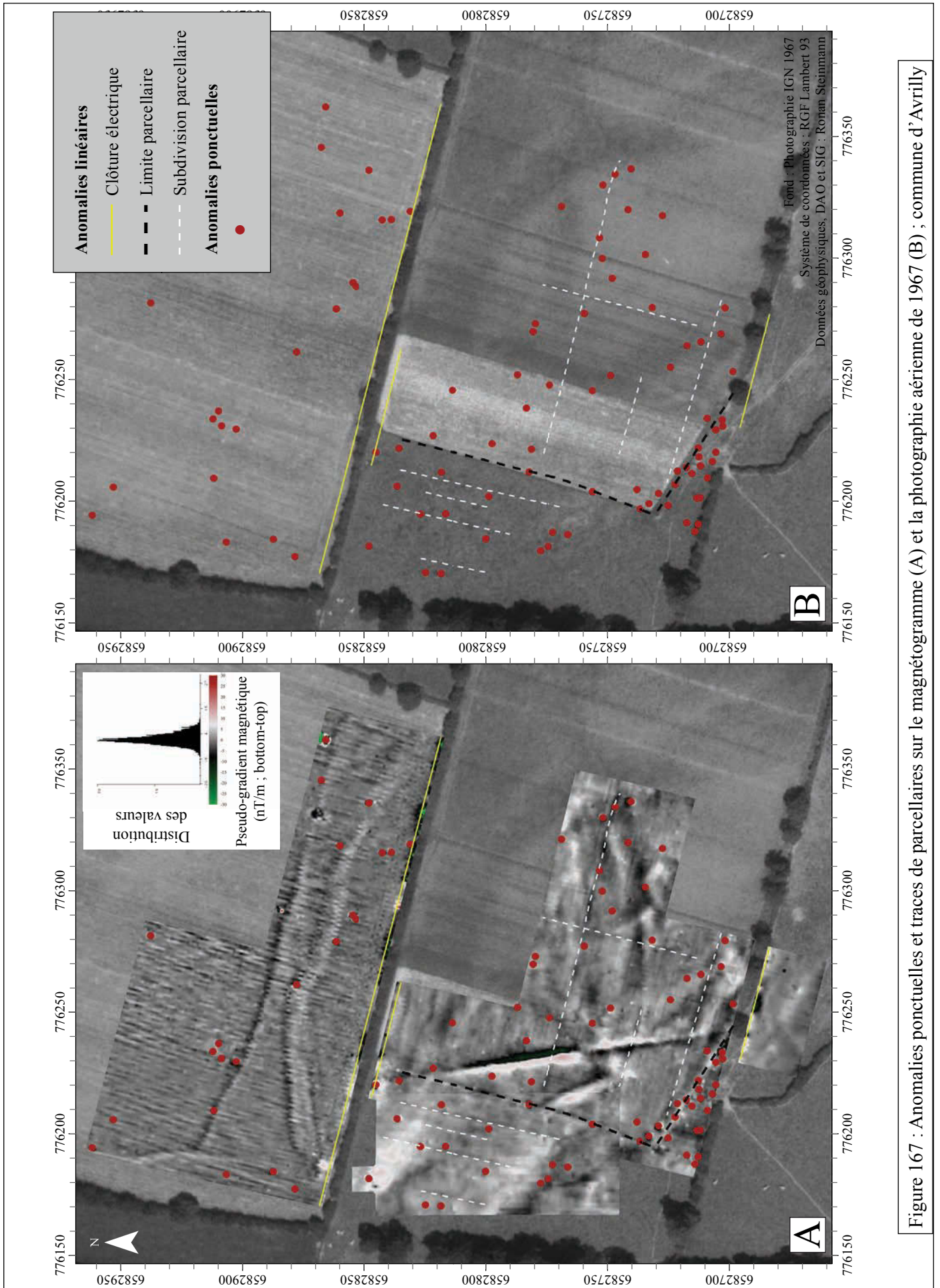


Figure 165 : Les vestiges archéologiques d'Avrilly et les surfaces prospectées sur la Carte de la Loire levée entre 1848 et 1854 (DREAL Centre)



Figure 166 : Carte des variations du pseudo-gradient magnétique acquise à Avrilly



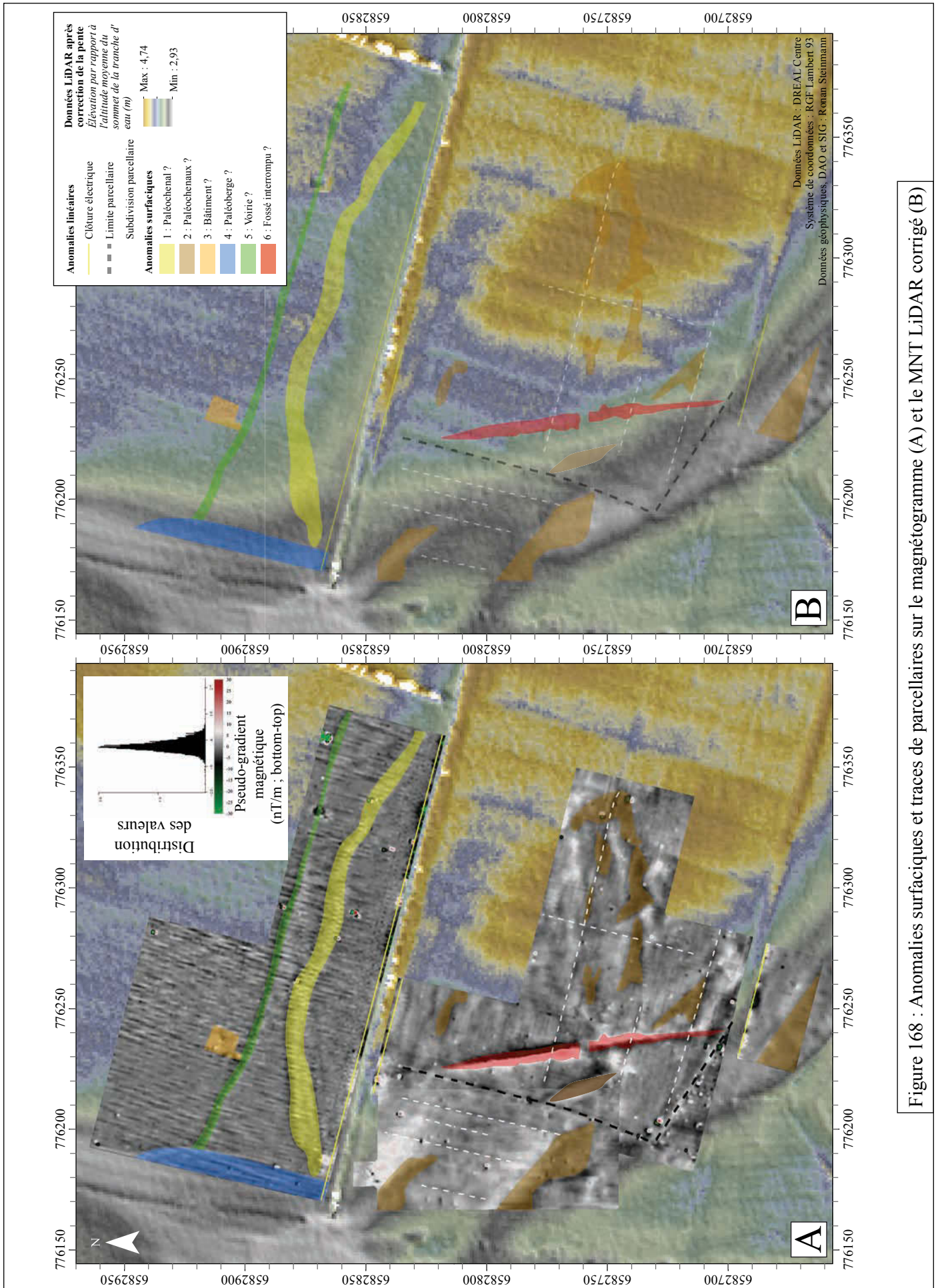
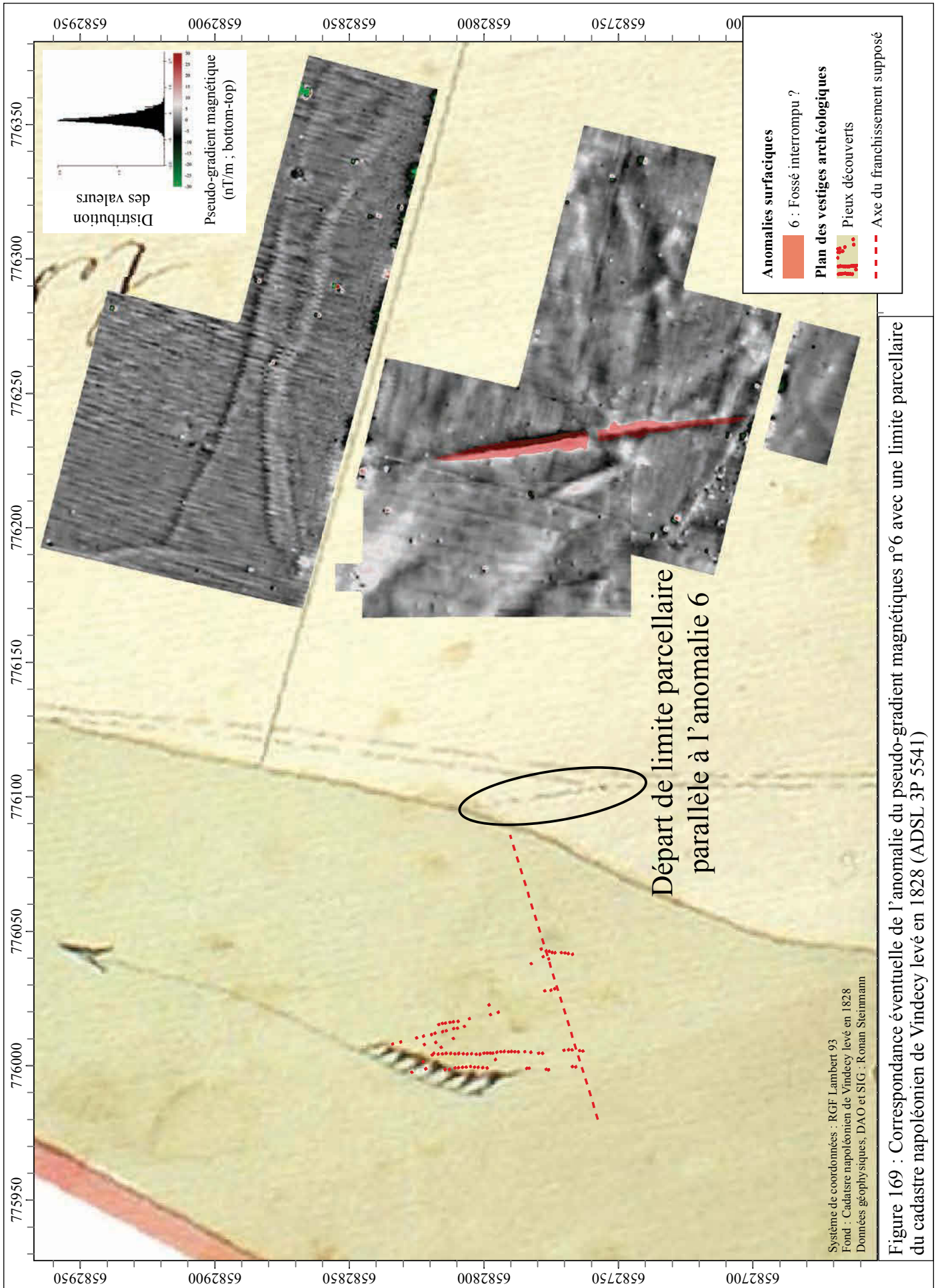


Figure 168 : Anomalies surfaciques et traces de parcelles sur le magnétogramme (A) et le MNT LiDAR corrigé (B)



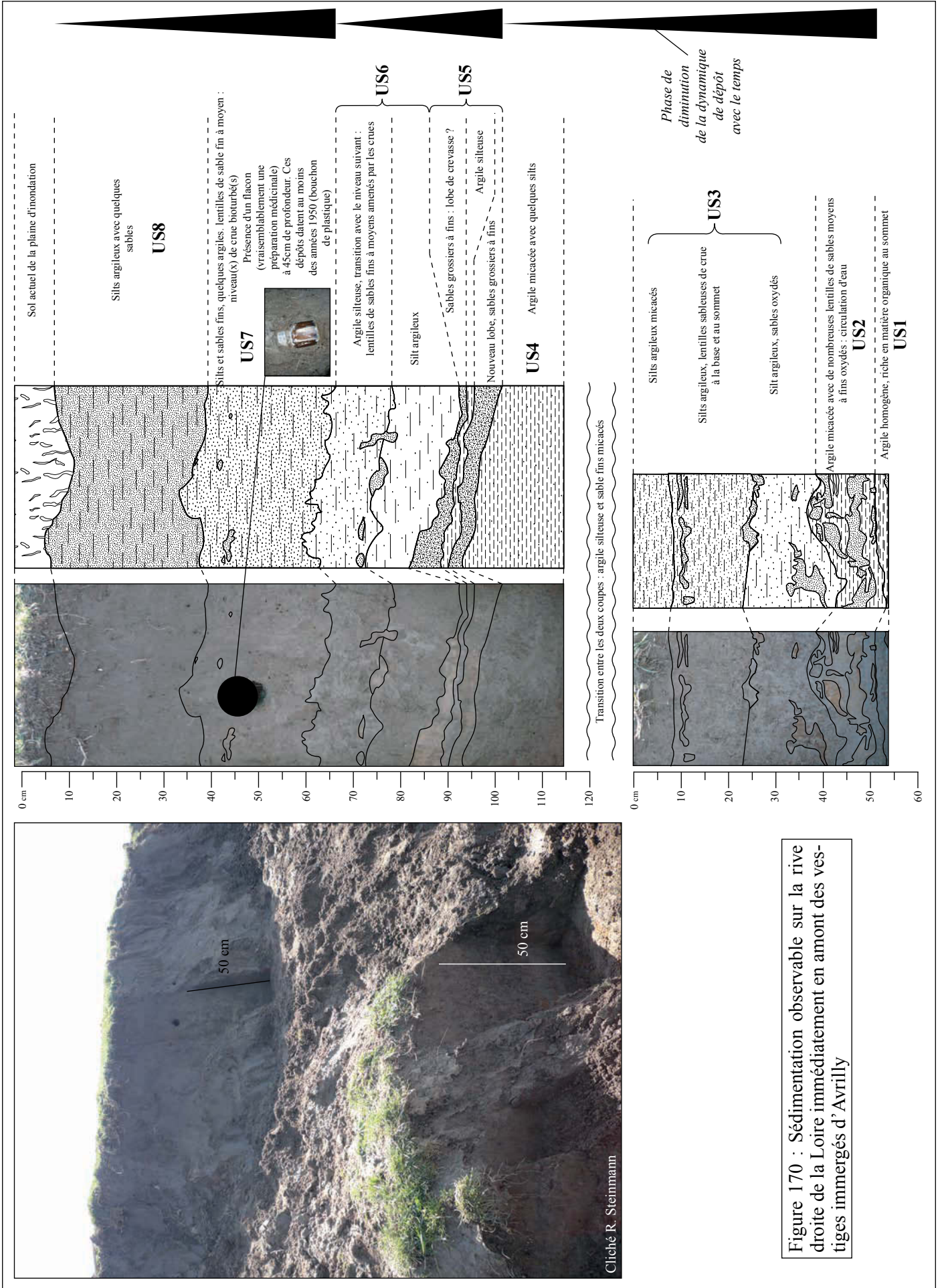


Figure 170 : Sédimentation observable sur la rive droite de la Loire immédiatement en amont des vestiges immergés d'Avrilly



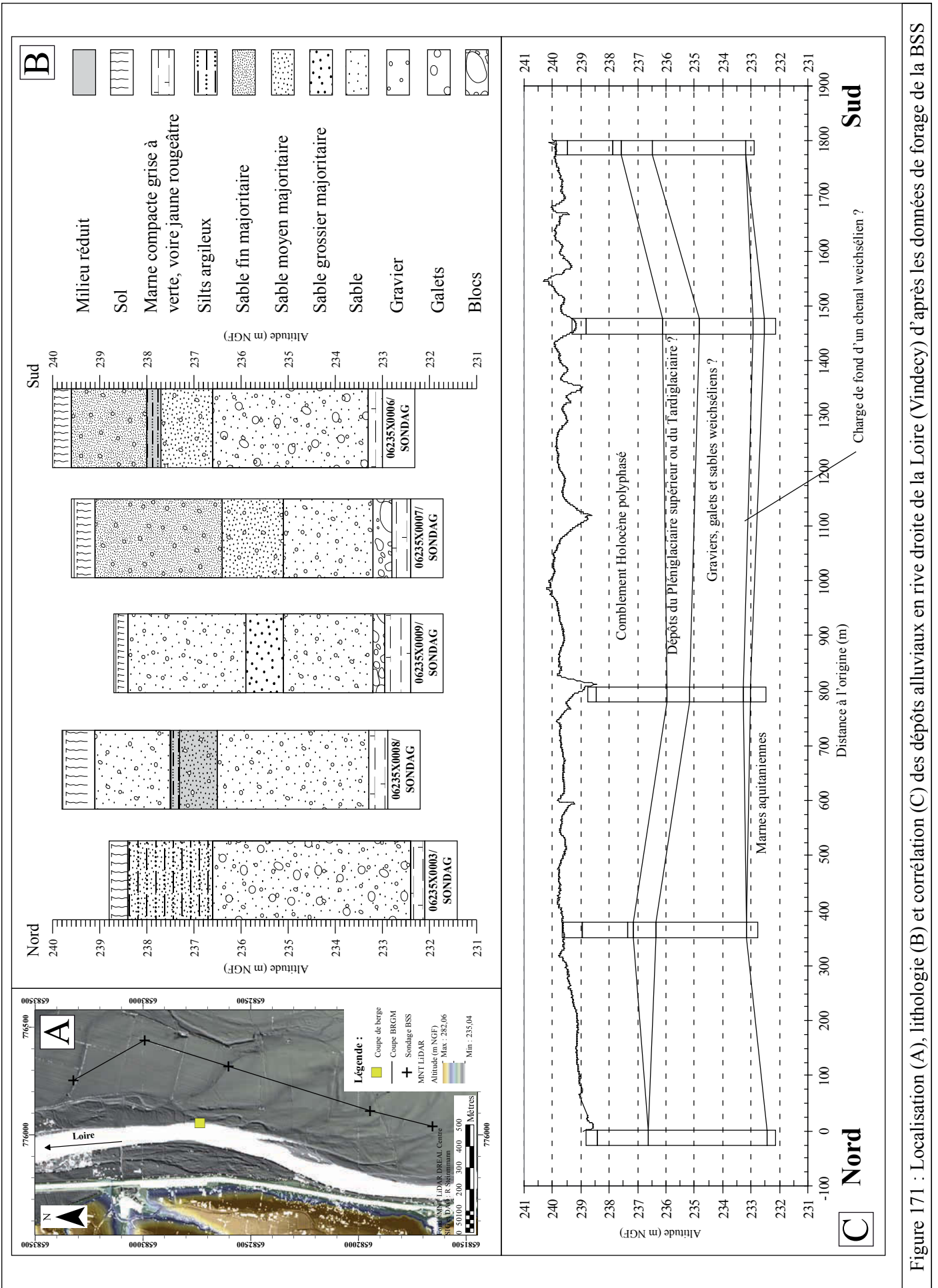


Figure 171 : Localisation (A), lithologie (B) et corrélation (C) des dépôts alluviaux en rive droite de la Loire (Vindécy) d'après les données de forage de la BSS

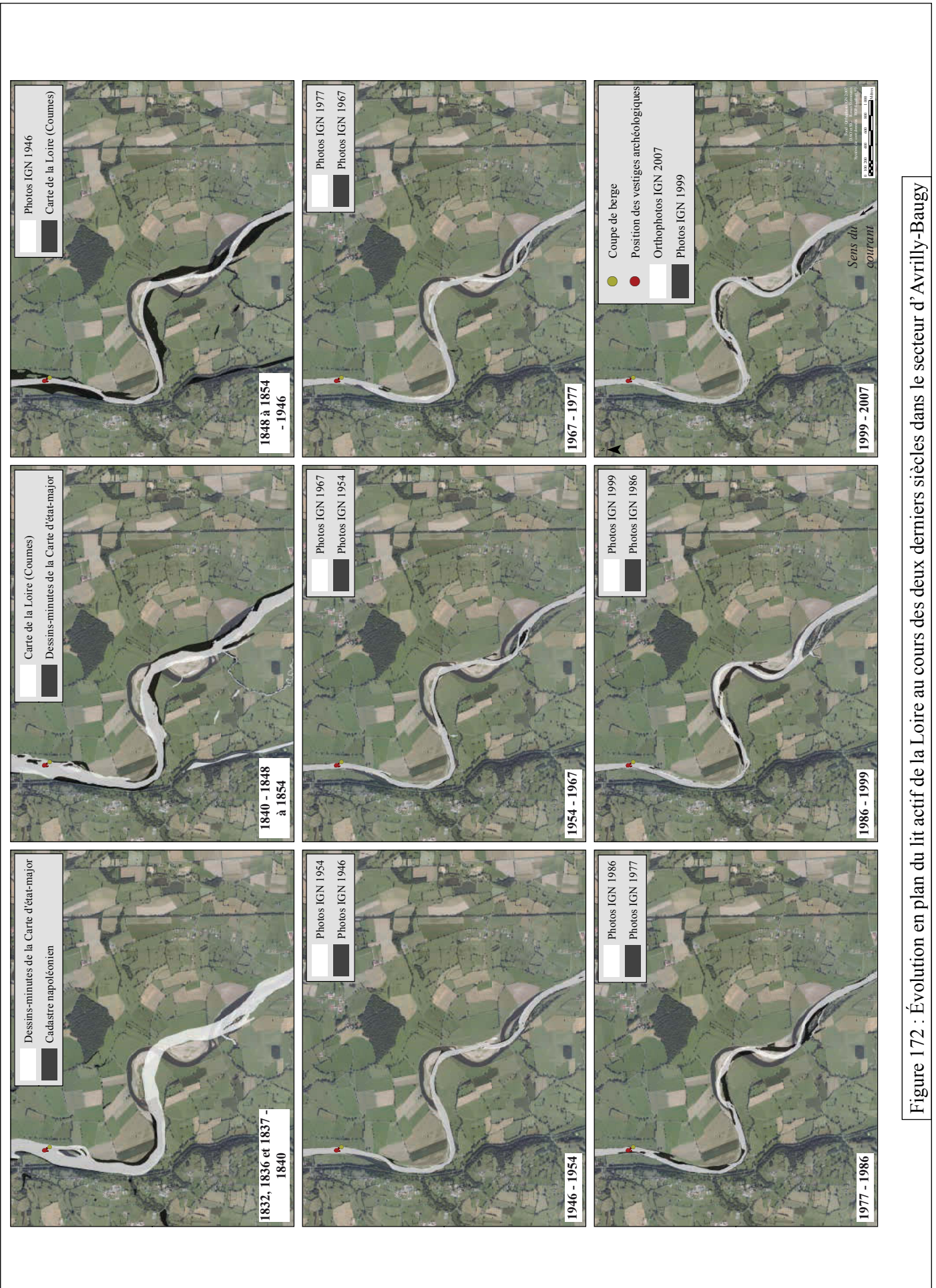


Figure 172 : Évolution en plan du lit actif de la Loire au cours des deux derniers siècles dans le secteur d'Avrilly-Baugy

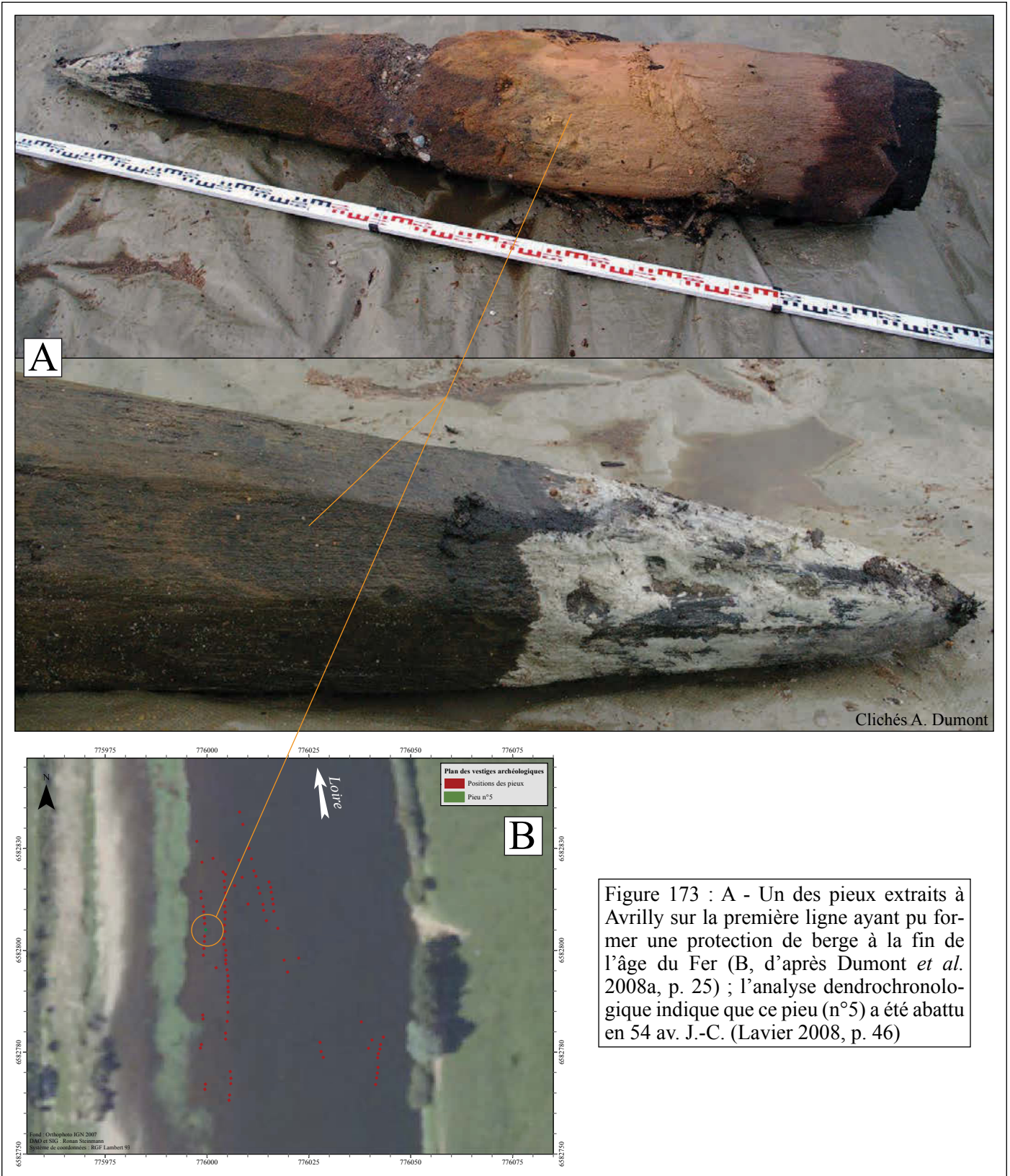


Figure 173 : A - Un des pieux extraits à Avrilly sur la première ligne ayant pu former une protection de berge à la fin de l'âge du Fer (B, d'après Dumont *et al.* 2008a, p. 25) ; l'analyse dendrochronologique indique que ce pieu (n°5) a été abattu en 54 av. J.-C. (Lavrier 2008, p. 46)

## CHAPITRE V - FENÊTRE D'ÉTUDE DE LA LOIRE AMONT

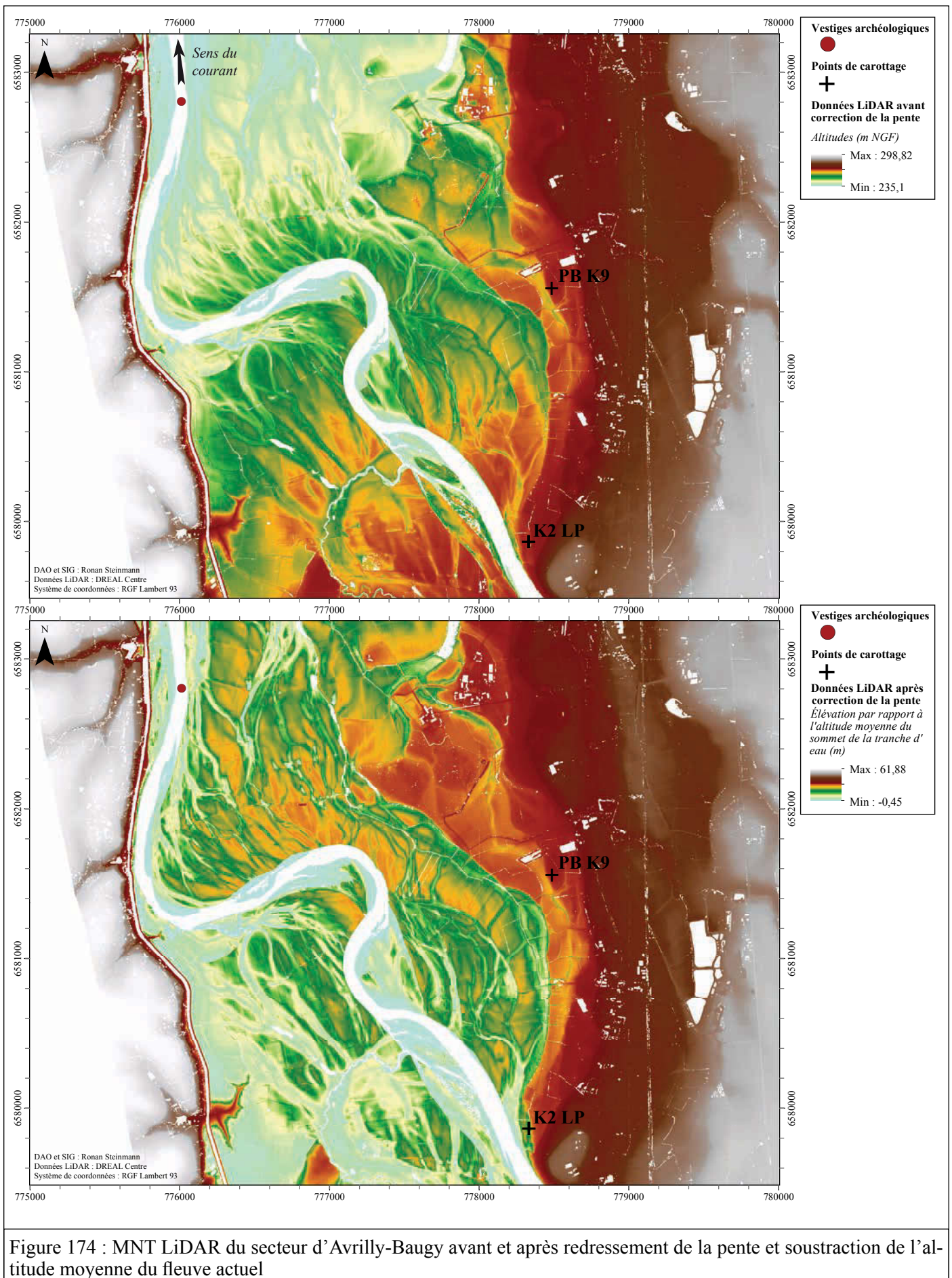


Figure 174 : MNT LiDAR du secteur d'Avrilly-Baugy avant et après redressement de la pente et soustraction de l'altitude moyenne du fleuve actuel

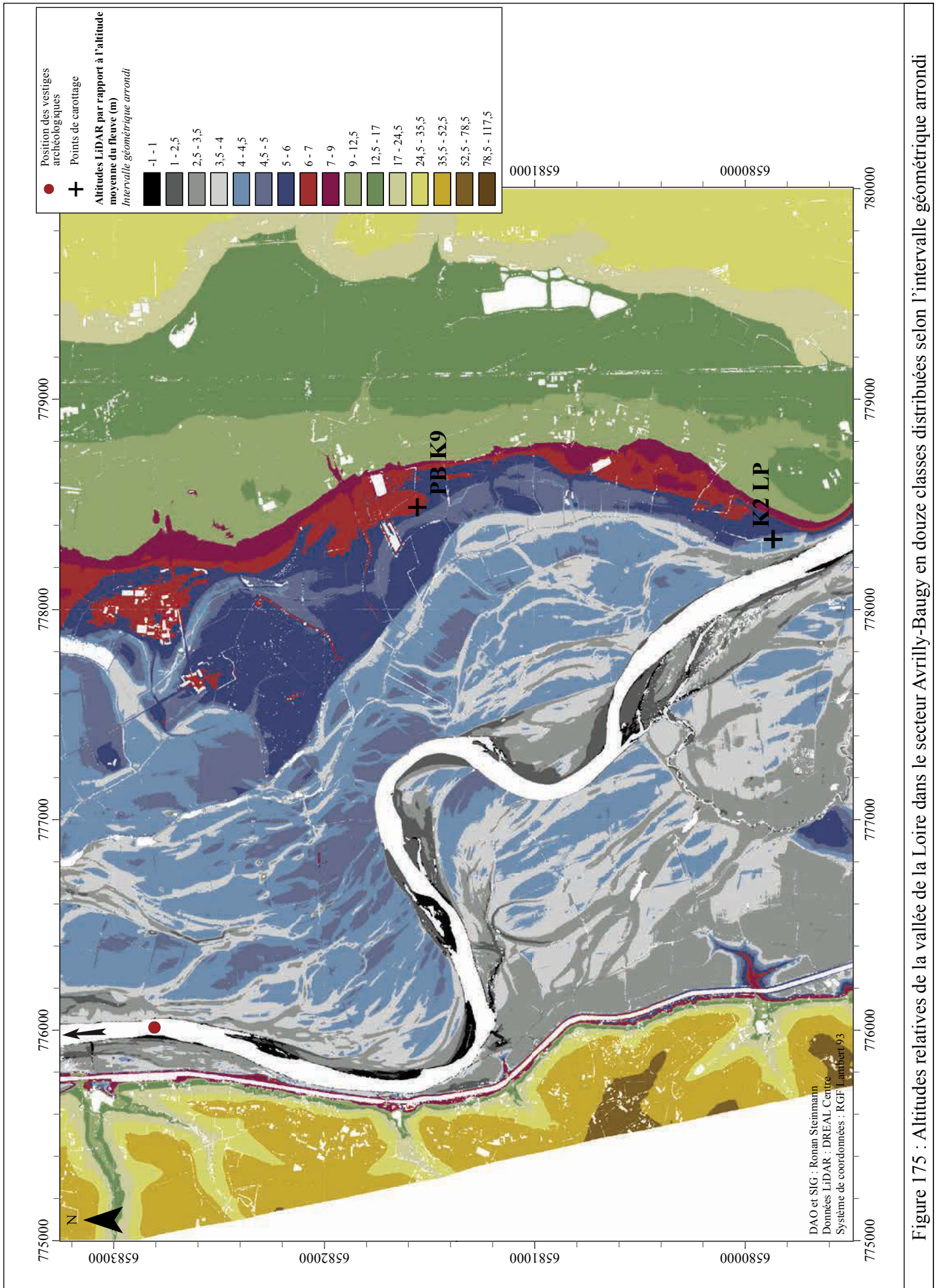


Figure 175 : Altitudes relatives de la vallée de la Loire dans le secteur Avrilly-Baugy en douze classes distribuées selon l'intervalle géométrique arrondi

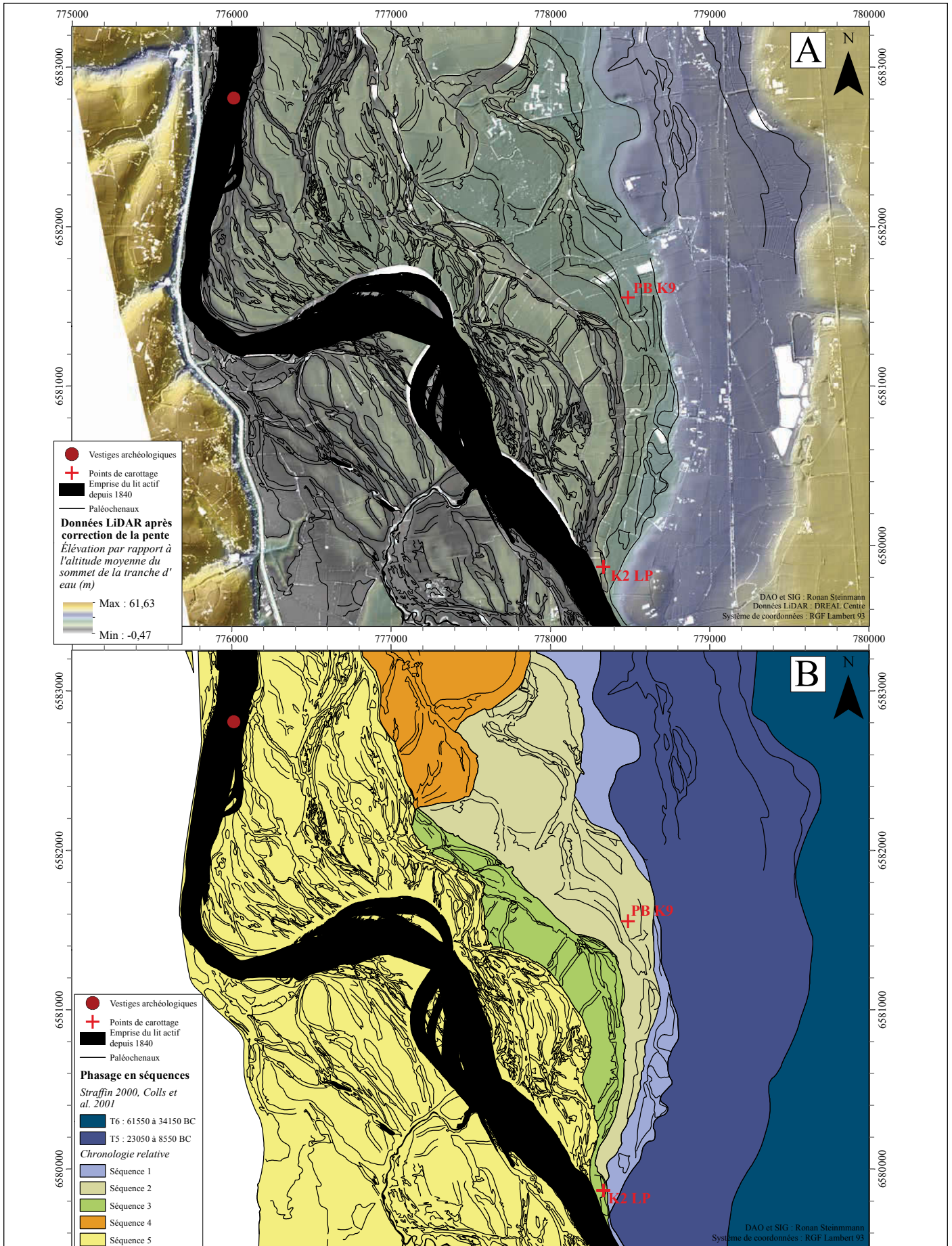
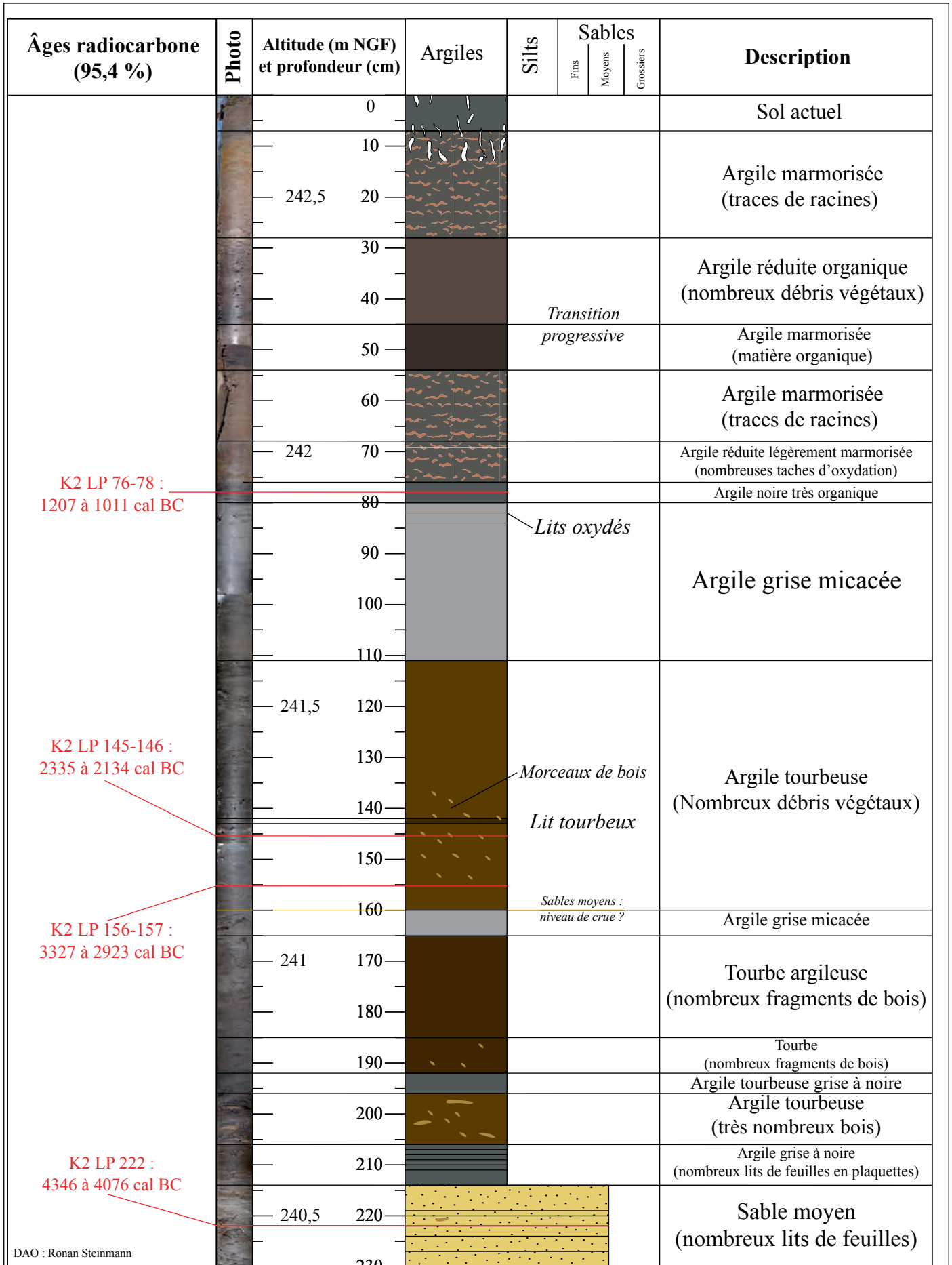
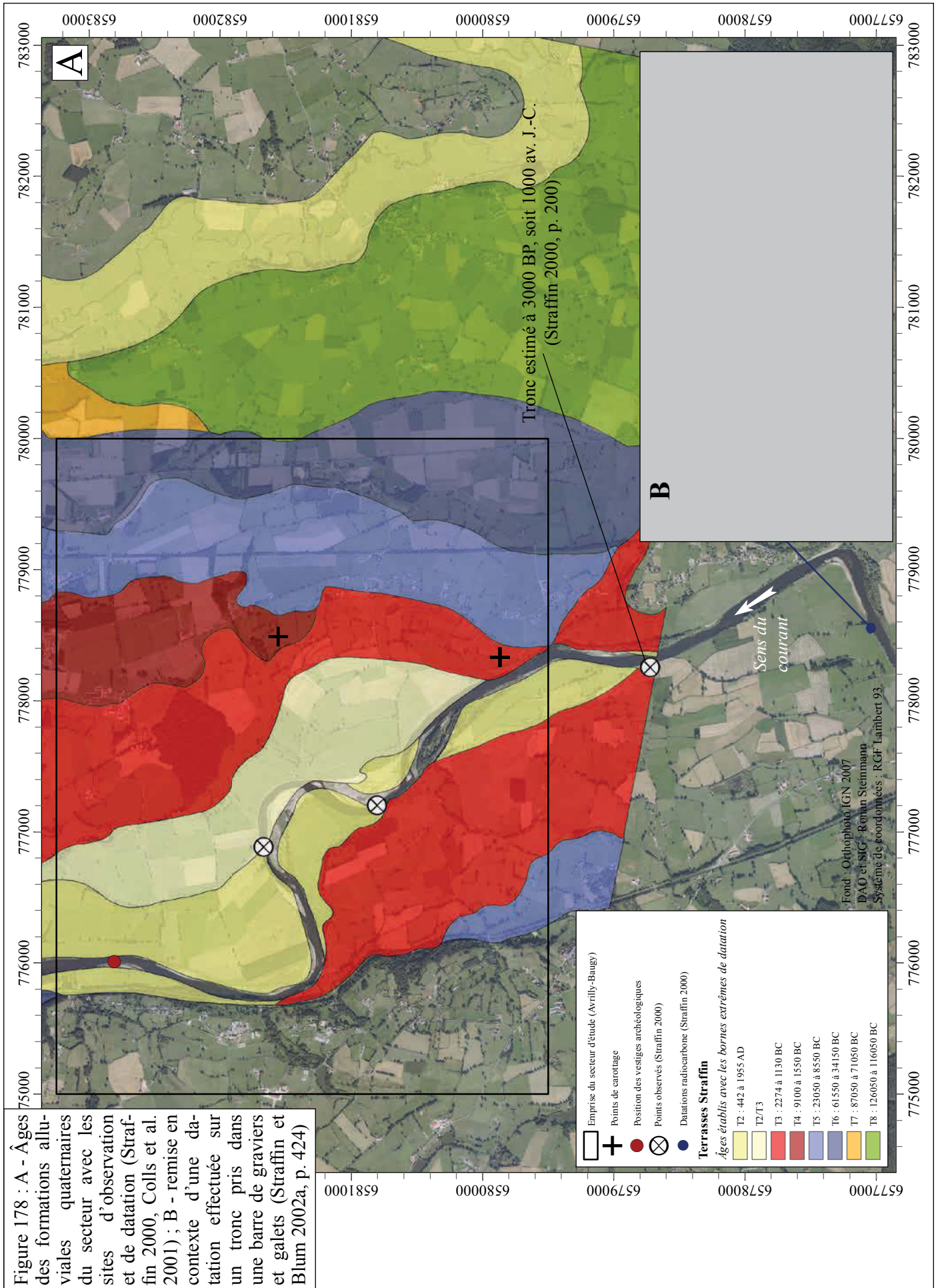


Figure 176 : Chronologie relative et phasage des surfaces (B) réalisés à partir de la vectorisation des paléochenaux et des données LiDAR (A), ainsi que des données de datation des terrasses quaternaires (secteur Avrilly-Baugy)



DAO : Ronan Steinmann

Figure 177 : Le remplissage d'un paléochenal de la séquence 3 au lieu-dit « La Pierre » (Baugy)





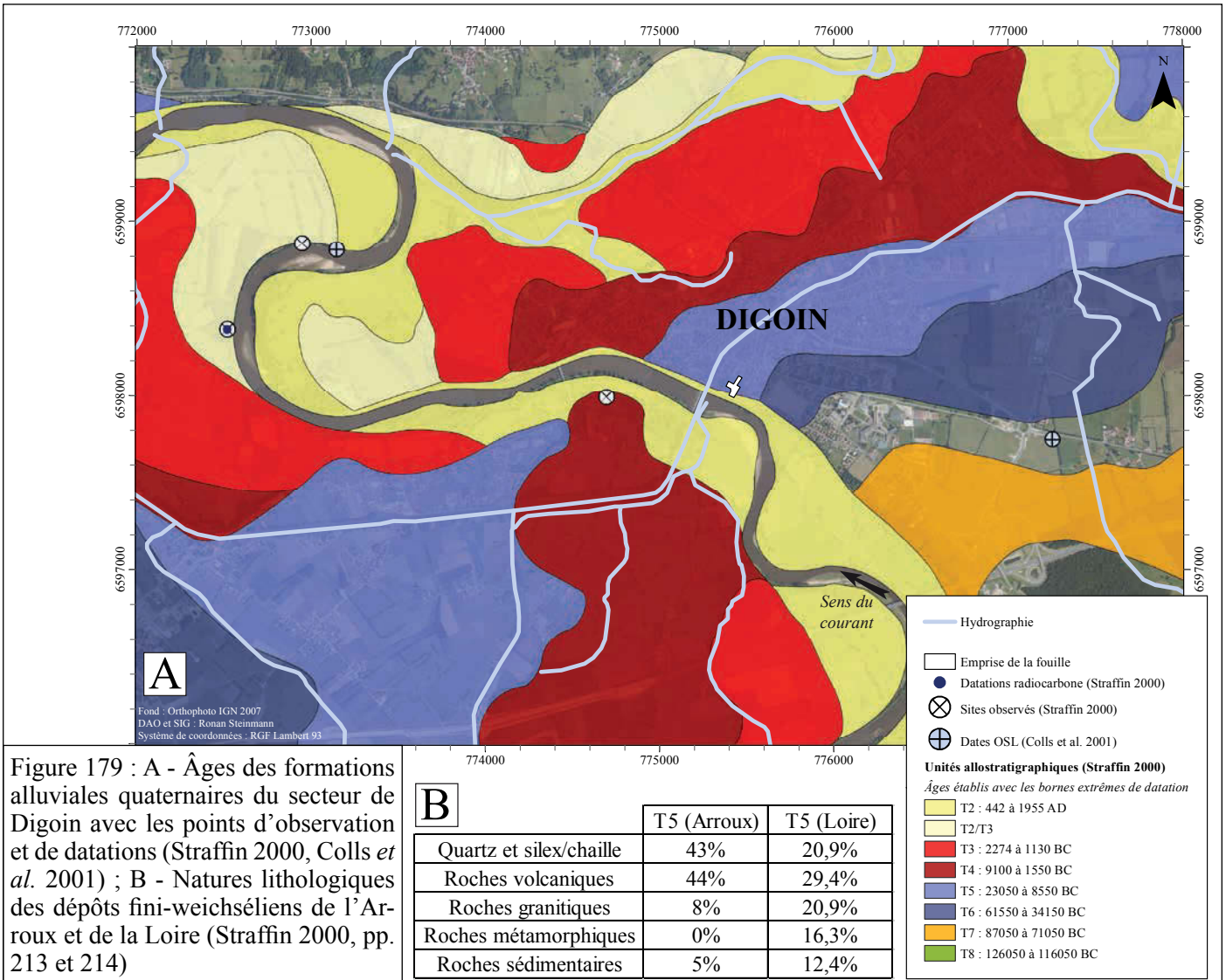


Figure 179 : A - Âges des formations alluviales quaternaires du secteur de Digoin avec les points d'observation et de datations (Straffin 2000, Colls *et al.* 2001) ; B - Natures lithologiques des dépôts fini-weichséliens de l'Arroux et de la Loire (Straffin 2000, pp. 213 et 214)

