



HAL
open science

Évolution du niveau marin relatif à l'Holocène le long des côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche : réactualisation des données par la méthode des "sea-level index points"

Pierre Stéphan, Jérôme Goslin

► To cite this version:

Pierre Stéphan, Jérôme Goslin. Évolution du niveau marin relatif à l'Holocène le long des côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche : réactualisation des données par la méthode des "sea-level index points". Quaternaire, 2014, 25 (4), pp.295-312. 10.4000/quaternaire.7269 . hal-01148328

HAL Id: hal-01148328

<https://hal.science/hal-01148328v1>

Submitted on 18 Jul 2017

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

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

ÉVOLUTION DU NIVEAU MARIN RELATIF À L'Holocène LE LONG DES CÔTES FRANÇAISES DE L'ATLANTIQUE ET DE LA MANCHE : RÉACTUALISATION DES DONNÉES PAR LA MÉTHODE DES « SEA-LEVEL INDEX POINTS »



Pierre STÉPHAN¹ & Jérôme GOSLIN¹

RÉSUMÉ

Cette étude vise à produire une base de données sur les anciennes positions du niveau marin relatif le long de la façade Manche-Atlantique française. En s'appuyant sur la méthode des « *sea-level index points* » (SLIPs), les données recueillies dans une cinquantaine de publications portant essentiellement sur l'étude des séquences sédimentaires côtières ont été inventoriées et analysées afin d'en extraire une information utile à la reconstitution des anciens niveaux marins relatifs. Les données issues de l'archéologie côtière et des travaux de géologie sous-marine n'ont pas été considérées dans le cadre de ce travail, mais sont destinées à venir enrichir cette base de données à l'avenir. Sur un total de 451 enregistrements, 264 SLIPs ont été produits et couvrent les 11 000 dernières années. La base de données a été subdivisée en neuf secteurs côtiers. Quelle que soit la région côtière considérée, la remontée post-glaciaire du niveau de la mer présente les caractères suivants : (i) des vitesses d'élévation décroissantes avec un ralentissement notable vers 7-6 000 ans cal. BP ; (ii) une hausse inférieure ou égale à 1 mm.a⁻¹ au cours des 7-6 000 dernières années ; (iii) l'absence d'une phase de haut niveau marin supérieur à l'actuel ; (iv) l'absence d'oscillations significatives faisant alterner phases transgressives et régressives au cours de l'Holocène. Malgré la richesse apparente de l'information disponible, le nombre de données de terrain permettant une reconstitution fiable de la transgression marine holocène reste faible et ne permet pas de quantifier les ajustements glacio-hydro-isostatiques. Néanmoins, cette base de données devrait s'avérer une ressource précieuse pour les chercheurs travaillant dans des environnements côtiers méso- à macrotidaux de France métropolitaine et d'Europe atlantique.

Mots-clés : niveau marin relatif, Holocène, Manche, Atlantique, France, SLIP

ABSTRACT

HOLOCENE RELATIVE SEA-LEVEL RISE ALONG THE ATLANTIC AND ENGLISH CHANNEL COASTS OF FRANCE: REASSESSMENT OF EXISTING DATA USING "SEA-LEVEL INDEX POINTS" METHOD

This study aims to produce a relative sea-level database for the English Channel and Atlantic coasts of France. Data collected from 54 research papers were reassessed by using SLIP methodology in order to propose a reliable reconstruction of Holocene relative sea-level rise. From 451 radiocarbon-dated sediment records, 264 index points were produced covering the last 11,000 years. The database is subdivided into nine regions along the coast. The post-glacial relative sea-level rise shows: (i) a decreasing of the rates of change over the time especially from 7-6,000 cal. yr BP; (ii) the linear rates of relative sea-level rise did not exceed 1 mm/yr from 7-6,000 cal. yr BP to present; (iii) the relative sea-level has never risen above present (0 m); (iv) no significant sea-level oscillations during the Holocene. Despite the high number of sea-level records available, the number of reliable data is still low and limits the quantification of isostatic trends. Nevertheless, the database should prove to be a valuable resource to researchers working on coasts of mesotidal to macrotidal environments of France and Atlantic Europe.

Keywords: relative sea-level, Holocene, English Channel, Atlantic, France, SLIP

1 - INTRODUCTION

La remontée post-glaciaire du niveau marin a contribué à façonner les rivages actuels de la Manche et de l'Atlantique. A la hausse du niveau global des océans, liée à l'ajout d'eau dans l'océan global suite à la fonte des calottes glaciaires (l'« eustasie »), se sont surimposés des effets glacio-hydro-isostatiques, réajustement de la lithosphère suite à l'ajout et/ou au retrait de masses (d'eau et de glace, respectivement) à sa surface, et loca-

lement, une mobilité crustale d'origine tectonique. En Europe du nord-ouest, les réajustements isostatiques ont été l'un des principaux agents d'évolution du niveau marin relatif au cours de l'Holocène. Caractérisés par une importante variabilité spatiale et temporelle, ces derniers ont produit des évolutions du niveau marin relatif très variables d'une région à l'autre. La lenteur de ces dynamiques font que la plupart d'entre-elles sont encore actives aujourd'hui et jouent un rôle important dans l'évolution actuelle des littoraux à l'échelle du globe. En

¹ Université de Bretagne Occidentale, Institut Universitaire Européen de la Mer, laboratoire LETG-Brest-Géomer (UMR 6554), Technopole Brest-Iroise, rue Dumont d'Urville, FR-29280 PLOUZANÉ. *Courriels* : pierre.stephan@univ-brest.fr, jerome.goslin@univ-brest.fr

dépôt des progrès réalisés dans le domaine de la modélisation géophysique, les reconstitutions de l'évolution du niveau marin relatif demeurent actuellement les seuls indicateurs fiables permettant d'évaluer l'ampleur et la chronologie des dynamiques isostatiques et tectoniques au cours des derniers millénaires. D'autre part, la reconstitution de l'évolution du niveau marin relatif permet également une meilleure compréhension des dynamiques morphosédimentaires à l'échelle de l'Holocène et une meilleure appréhension des évolutions paysagères et environnementales en domaine côtier.

Les publications de Ters (1973, 1986) restent à ce jour les seules à proposer une synthèse sur les variations relatives du niveau marin au cours de l'Holocène à l'échelle de la façade Manche-Atlantique française. Elles s'appuient sur un ensemble de plus de 150 enregistrements, publiés antérieurement par différents auteurs, comportant un âge et un positionnement de la mer associé. Ces données ont été utilisées récemment pour valider les résultats de modèles de réajustement isostatiques sur les côtes occidentales de France (Lambeck, 1997 ; Leorri *et al.*, 2012). Depuis la dernière synthèse de Ters (1986), de nombreuses études ont été menées localement sur l'architecture et la mise en place des prismes sédimentaires côtiers holocènes (par ex. : Billeaud, 2007 ; Gandouin *et al.*, 2009...) et sur la spécificité du contenu micropaléontologique, organique et minéral, des sédiments littoraux (Huault, 1985 ; Morzadec-Kerfourn, 1995 ; 2005). Elles mettent à notre disposition de nombreuses données sédimentologiques, couplées à des datations au radiocarbone et à l'analyse d'indicateurs biologiques tels que les grains de pollen, les foraminifères benthiques, les diatomées ou les dinoflagellés, données qui peuvent aussi maintenant s'appuyer sur des études multidisciplinaires faites dans l'environnement côtier actuel tel celles sur l'estuaire de la Vie en Vendée (Debenay *et al.*, 2003). Si nombre de ces études, centrées sur des problématiques paléo-environnementales, n'ont pas eu pour objectif principal la reconstitution de l'évolution du niveau marin relatif, les données qu'elles contiennent peuvent toutefois être remobilisées et utilisées dans ce but.

Cette présente étude s'appuie essentiellement sur l'inventaire des données de stratigraphie côtière disponibles dans les publications concernant la façade Manche Atlantique française, depuis la plaine des Flandres, au nord, jusqu'à l'estuaire de la Gironde, au sud. Ces données ont été réactualisées et réinterprétées selon une méthodologie commune dans une optique de reconstitution de l'évolution passée du niveau marin relatif. S'y ajoute également quelques données inédites, obtenues dans le marais de la Bédume (Morbihan) et sur la plage de Sainte-Anne du Portzic (Brest, Finistère), que nous présenterons de façon plus détaillée afin d'illustrer la méthode utilisée pour définir la position des anciens niveaux marins. Ce travail nous permet de proposer des reconstitutions régionales du niveau marin relatif remises à jour et dont la fiabilité est quantifiée. Par ailleurs, nous espérons qu'à l'avenir ces données serviront de base de réflexion dans plusieurs domaines : archéologie côtière, études paléo-environnementales, études des réajustements isostatiques, mobilité crustale tectonique.

2 - PRINCIPES MÉTHODOLOGIQUES DE RECONSTITUTION DU NIVEAU MARIN RELATIF

2.1 - LES SLIPS : DÉFINITIONS

Au cours des trente dernières années, sous l'égide des programmes IGCP (International Global Correlation Program) de l'UNESCO, de nombreux projets de recherche internationaux ont abouti à la mise au point d'une méthodologie rigoureuse permettant de déterminer les variations relatives du niveau de la mer (projets IGCP 61, 200, 274, 588 ; Edwards, 2005 ; Shennan, 2007). Cette méthodologie s'appuie sur les *Sea-Level Index Points* ou points-index du niveau marin (désignés par le diminutif SLIP ci-après) (Tooley, 1978 ; Preuss, 1979 ; van de Plassche, 1986 ; Brooks & Edwards, 2006), concept formalisé à la fin des années 1980 (Shennan, 1986 ; van de Plassche, 1986). Plus qu'un simple terme, la notion de SLIP a été développée afin d'établir un standard méthodologique de reconstitution des niveaux marins passés à partir d'enregistrements sédimentaires déposés en milieu de basse-énergie (marais maritimes, vasières). Un SLIP caractérise, pour une localisation géographique précise, une position relative du niveau marin à une période donnée (t) par rapport à sa position actuelle. Peut être considéré comme SLIP un échantillon prélevé dans une séquence stratigraphique pour lequel peuvent être déterminés (i) la localisation (emplacement géographique et altitude), (ii) l'âge et (iii) la relation altitudinale quantitative qui le liait au niveau tidal de référence au moment de son dépôt, appelée « *Indicative Meaning* » par les auteurs anglo-saxons (fig. 1). Il est important d'insister sur le fait que les SLIPs désignent la position du niveau marin relatif à un temps (t), et ne préfigurent donc pas de la tendance entre deux points successifs (Shennan, 1982). La qualité et la fiabilité des reconstructions du niveau marin relatif sont donc intimement liés à la densité et à la distribution de ces points-index (Edwards, 2007 ; Brooks & Edwards, 2006).

La détermination de la position verticale d'un SLIP à partir d'un témoin prélevé au sein d'une séquence sédimentaire répond à l'équation suivante :

$$\text{SLIP}(t) = H - D - I(t) + E \quad (1)$$

où H désigne l'altitude du carottage, D la profondeur du point considéré par rapport à H, I la position relative de la zone originale de dépôt par rapport au niveau marin de référence (*Indicative Meaning*), (t) l'âge du sédiment considéré, déterminé par le processus de datation et E représente la somme des erreurs faisant s'écarter le niveau marin reconstitué du niveau marin véritable tel qu'il était à l'instant (t). Le paramètre E peut être calculé selon l'expression (Shennan & Horton, 2002) :

$$E = (e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2)^{1/2} \quad (2)$$

où e_1 à e_n désignent les différentes erreurs associées à chaque SLIP qui sont impliquées dans le processus de

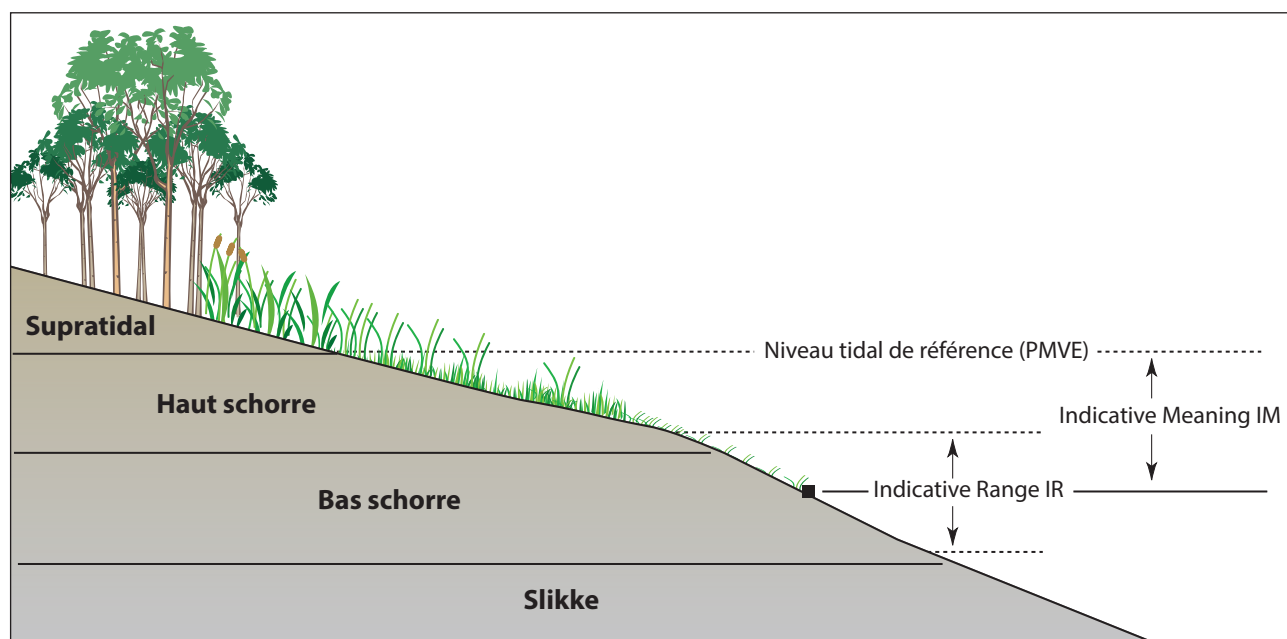


Fig. 1 : Représentation schématique des concepts d'« Indicative Meaning » et d'« Indicative Range » (adapté de Engelhart & Horton, 2012). PMVE est le niveau des plus hautes mers de vive-eau (coefficient de marée de 120). Le haut-schorre correspond à la partie supérieure des marais, le bas-schorre à la partie inférieure, et la slikke aux vasières intertidales attenantes.
 Fig. 1: Schematic representation of Indicative Meaning and Indicative Range concepts (adapted from Engelhart & Horton, 2012). PMVE refers to High Water Spring Tide. High schorre stands for high-marsh, middle schorre for low-marsh and slikke for mudflat.

reconstitution. En effet, plusieurs paramètres agissent d'une part (i) sur l'enregistrement et la restitution du niveau marin par les séquences sédimentaires et, d'autre part, (ii) sur la représentativité des indicateurs fossiles vis-à-vis du niveau marin par rapport

à l'observation qui peut en être faite actuellement. A cela s'ajoutent les marges d'erreurs induites par (i) le prélèvement et le positionnement des séquences sédimentaires et (ii) le calage des référentiels environnementaux actuels (fig. 2).

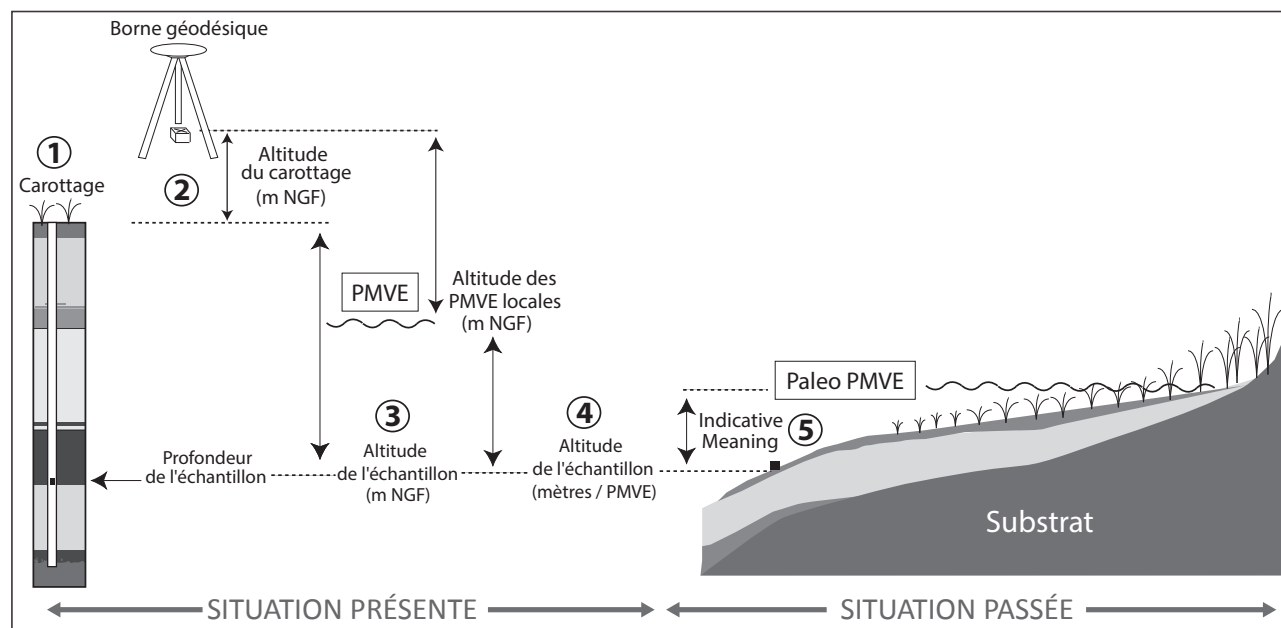


Fig. 2 : Etapes méthodologiques de reconstitution du niveau marin passé à partir d'un carottage dans une séquence sédimentaire holocène littorale.

1/ carottage, 2/ obtention de l'altitude du site de carottage par levé topographique, 3/ obtention de l'altitude de l'échantillon prélevé par rapport à l'ellipsoïde de référence, 4/ transformation de l'altitude 3 en altitude relative par rapport au référentiel tidal choisi pour l'étude, 5/ application de l'« Indicative Meaning » à l'altitude obtenue en 4.

Fig. 2: Methodological steps of the relative sea-level reconstruction from a core made through an holocene coastal sedimentary sequence. 1/ coring, 2/ determination of core site elevation by topographic leveling, 3/ determination of studied sample elevation with respect to the reference ellipsoid 4/ transformation of the elevation obtained in step 3 into an elevation relative to the tidal reference chosen for the study, 5/ application of the Indicative Meaning to the elevation obtained in step 4.

2.2 - L'« INDICATIVE MEANING »

L'« *Indicative Meaning* » (IM) est un paramètre indispensable à la reconstitution des anciens niveaux marins. L'IM vise à définir, pour un échantillon donné, la position du sédiment au sein de la zone intertidale lors de son dépôt. Il formalise ainsi la relation verticale entre un type de dépôt et un niveau de marée. Cette relation altitudinale est traditionnellement déterminée en raisonnant par actualisme, c'est à dire en s'appuyant sur les relations actuelles entre les principaux environnements de dépôt et la marée.

Les « *Indicative Meanings* » sont accompagnés d'une marge d'erreur, nommée « *Indicative Range* » (IR), représentant la fourchette altitudinale dans laquelle le sédiment étudié peut s'être déposé (Woodroffe & Horton, 2005). Cette dernière est étroitement dépendante de la méthode utilisée pour déterminer l'environnement de dépôt du sédiment étudié et fixe en partie la précision verticale de la reconstitution. Par exemple, l'étude des spectres polliniques couplée à la description des faciès sédimentaires permet de définir grossièrement l'étage littoral d'un échantillon donné. Une plus grande précision est obtenue par le biais de méthodes statistiques telles que les fonctions de transfert basées sur les foraminifères. Ce type d'approche permet d'attribuer une altitude à un assemblage de foraminifères fossiles rencontré dans un sédiment, avec une précision de quelques décimètres (Rossi *et al.*, 2011 ; Barlow *et al.*, 2013 ; Stéphan *et al.*, 2014).

Pour certains niveaux stratigraphiques, il arrive que l'IM ne puisse être déterminé, (i) du fait d'un environnement de dépôt totalement hors d'influence marine (formations purement continentales par exemple), ou (ii) parce que les informations fournies par les indicateurs sont trop floues ou ambiguës pour permettre d'établir une relation quantitative avec le niveau marin. Ceux-ci forment dès lors ce que l'on appelle des « points-limitants » (« *limiting points* » ou « *limiting dates* » dans la littérature anglo-saxonne), contraignant par le haut ou par le bas la position du niveau marin.

Les dépôts formés au-dessus du niveau maximum atteint par la marée sont dits « *High-Limiting* » (HL, ou limite supérieure du niveau marin). C'est le cas de certains dépôts tourbeux dont le pollen ou la présence de souches d'arbres témoignent d'un milieu hors d'influence des eaux marines.

Ces dépôts ne donnent aucune indication précise sur la position du niveau de la mer, sinon qu'elle devait se trouver en-dessous de l'altitude de ce point. De la même façon, certains dépôts sont qualifiés de « *Low-Limiting* » (LL, ou limite inférieure du niveau marin) car ils traduisent une sédimentation en domaine infralittoral. Ils permettent alors de fixer une limite inférieure au niveau marin.

2.3 - POINTS DE BASE ET POINTS INTERCALÉS : IMPORTANCE DANS LA FIABILITÉ DES POINTS-INDEX OBTENUS

Outre l'IM, la qualité d'un point-index est étroitement liée à la position de l'échantillon au sein de la colonne

stratigraphique. Se distinguent donc des « points de base » et des « points intercalés ».

Les points de base correspondent le plus souvent à des points ayant été prélevés directement au contact avec le substratum sous-jacent, à la base des dépôts tourbeux marquant le début de la séquence holocène. Ces formations tourbeuses, appelées « tourbes de base », s'expliquent par la remontée progressive des nappes aquifères côtières sous l'impulsion de la remontée du niveau marin relatif, provoquant un blocage du drainage et l'installation de ceintures tourbeuses d'eau douce à saumâtre sur les paléo-surfaces sablo-caillouteuses pléistocènes (Baeteman *et al.*, 1999 ; Gandouin, 2003 ; Vink *et al.*, 2007). Le suivi de l'étagement vertical successif de ces formations peut ainsi être utilisé comme marqueur indirect de la remontée du niveau marin, avec pour principal avantage de réduire l'influence de la compaction dans les reconstitutions du niveau marin relatif. En effet, les tourbes de base se développant par définition sur un substrat incompressible, les SLIPs obtenus sur les dépôts situés à la base de ces formations (à l'interface avec le niveau incompressible sous-jacent) peuvent être considérées comme caractérisant des échantillons n'ayant subi aucun déplacement vertical postérieur à leur mise en place (fig. 3). De ce point de vue, elles représentent donc des indicateurs a priori fiables pour la reconstitution des niveaux marins passés. A ces dépôts tourbeux de base peuvent s'ajouter les dépôts sableux d'épaisseur pluri-décimétriques à métriques (chenaux et dunes pléistocènes, dépôts sableux holocènes) considérés comme incompressibles et reposant sur le substrat. Ainsi, un échantillon prélevé au sommet d'un tel dépôt sableux peut a priori être considéré comme basal.

Les « points intercalés » sont issus d'échantillons sédimentaires prélevés au sein des séquences holocènes, le plus souvent formées d'une alternance de dépôts intertidaux sablo-silteux et de dépôts tourbeux (fig. 3). Ces niveaux intercalés sont le plus souvent affectés par des phénomènes de compaction post-dépôt (tassement des dépôts sédimentaires sous leurs propre poids et sous celui des sédiments les ayant recouverts) ayant artificiellement abaissé leur altitude initiale. Ainsi, les SLIPs obtenus à partir des « points intercalés » conduisent à sous-estimer la position du niveau marin relatif en proportion du tassement dont ils ont fait l'objet. A ce jour, il reste particulièrement difficile de corriger les effets de la compaction, en particulier sur des séquences peu épaisses. Il n'existe aucun modèle précis capable de tenir compte de la complexité de ce phénomène. Par conséquent, ces points intercalés doivent être considérés uniquement à titre indicatif et seuls les points de base préfigurent réellement d'une position passée du niveau marin.

3 - RÉACTUALISATION ET UNIFORMISATION DES DONNÉES

L'inventaire des données présentées ici s'appuie sur un ensemble de publications portant uniquement sur les enregistrements sédimentaires côtiers d'âge holocène

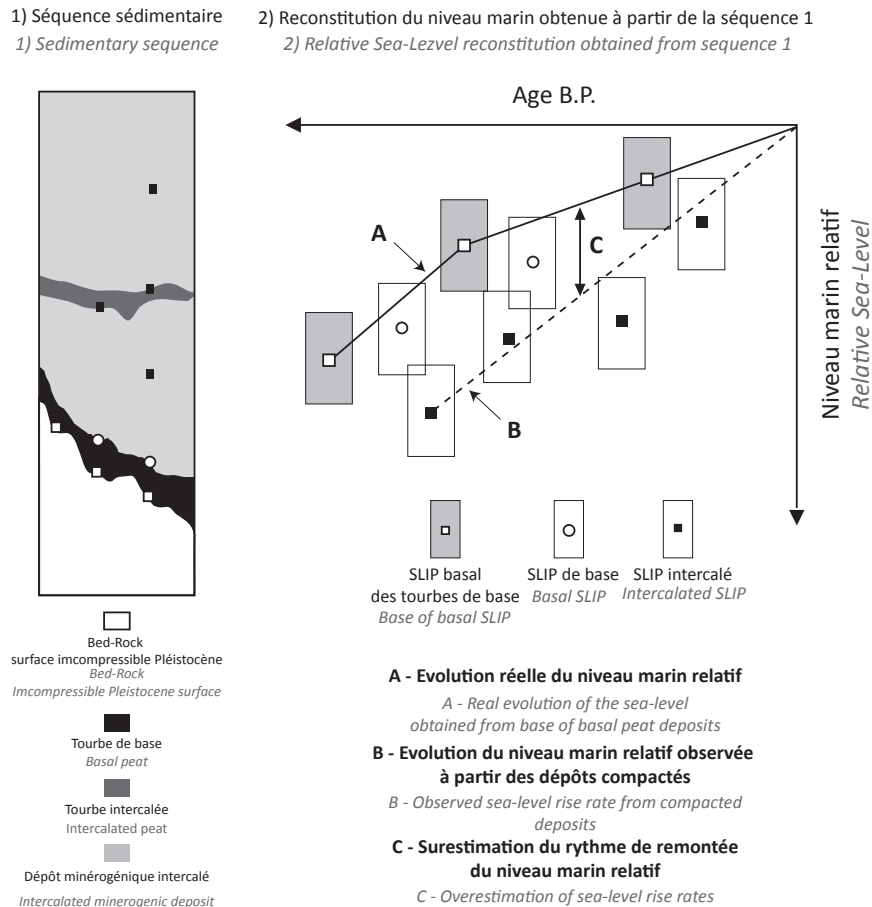


Fig. 3 : Illustration des effets de la compaction sur l'altitude des SLIPs obtenus à partir d'une séquence sédimentaire et des possibles erreurs induites par ce phénomène dans les reconstitutions du niveau marin relatif.

Fig. 3: Illustration of compaction effects on altitudinal lowering of the SLIPs obtained from a sedimentary sequence and of the potential errors induced by this phenomenon on relative sea-level reconstructions.

conservés le long des côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche (fig. 4 et 5). Les témoins archéologiques n'ont pas été considérés en raison de la faible précision de l'information que l'on puisse en attendre en première analyse, notamment en ce qui concerne l'établissement des IM. Des investigations plus poussées seront donc nécessaires pour utiliser à l'avenir ces vestiges comme indicateurs d'anciens niveaux marins. De la même façon, les données issues des études de géologie sous-marine ont été écartées dans le cadre de ce premier travail, en dépit de la richesse des informations disponibles dans la littérature. Une analyse détaillée de cette littérature sera, là aussi, nécessaire pour enrichir le présent travail.

Les séquences sédimentaires côtières ont été sélectionnées à partir (i) de la nature, l'architecture et la chronologie de mise en place des enregistrements sédimentaires, (ii) de la position stratigraphique des niveaux datés au sein des séquences (niveaux de base ou niveaux intercalés) et (iii) en fonction des informations lithostratigraphiques, macro- et micro-faunistiques et/ou floristiques disponibles. Nous avons retenu uniquement les échantillons pour lesquels une position géographique, une altitude, un âge et un IM pouvaient être déterminés. Trois catégories de SLIPs ont été distinguées : (i) les SLIPs « de base », (ii) les SLIPs « intercalés » et (iii) les points limitants.

3.1 - LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE

Dans les publications les plus anciennes, les coordonnées géographiques précises des points de carottage ou des prélèvements sont rarement renseignées. Le nom du site (nom du marais, nom de la commune) et la carte de localisation sont souvent les seuls éléments qui permettent de localiser des échantillons. A partir de ces informations, les coordonnées géographiques en longitude et latitude ont été retrouvées approximativement. Nous avons également assigné à chaque donnée un secteur géographique plus large correspondant à une région côtière où l'histoire du niveau marin relatif peut être considérée comme identique. En effet, les enregistrements du niveau marin relatif étant influencés par les mouvements verticaux du sol et du substratum, les données récoltées ne peuvent être comparées les unes aux autres que si elles proviennent d'une aire géographique relativement restreinte. Dans une première approche, la façade Manche-Atlantique française a été divisée en neuf secteurs géographiques (de A à I), selon un découpage régional qui pourra, à l'avenir, être redéfini (fig. 4 et 5).

3.2 - POSITIONNEMENT ALTITUDINAL

Les sources d'erreur dans le positionnement altitudinal des SLIPs sont nombreuses et ont été largement discutées

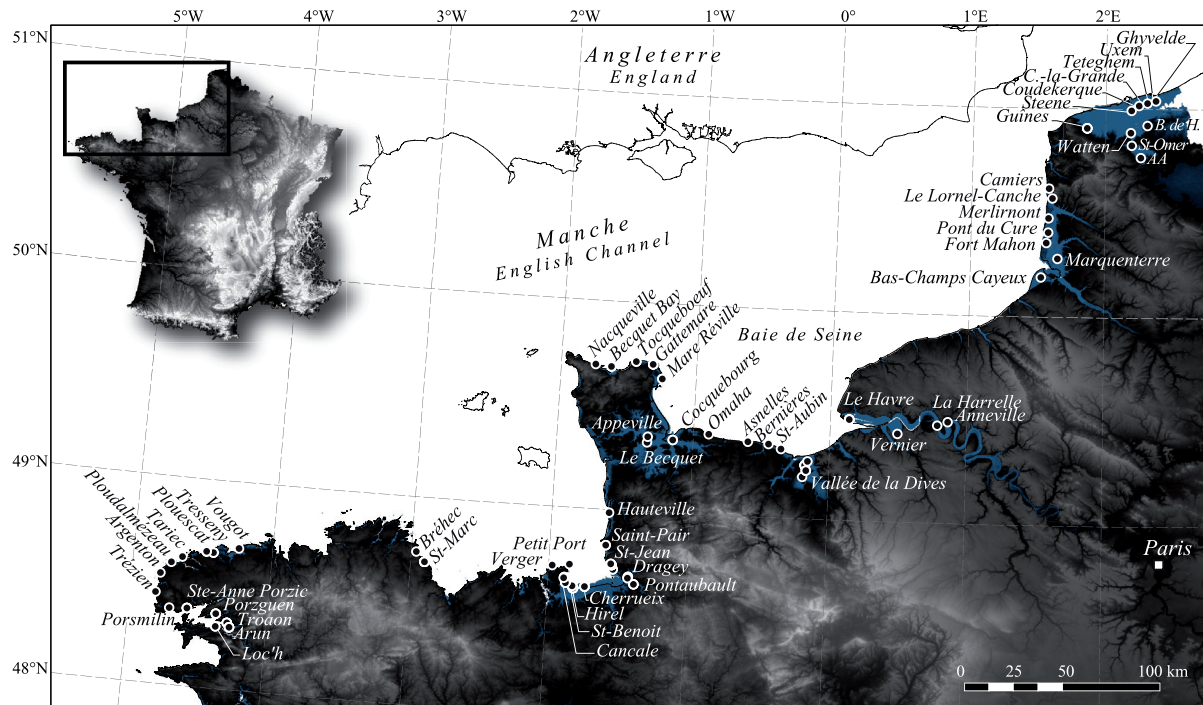


Fig. 4 : Partie nord de la façade Manche-Atlantique française où sont localisés les sites inclus dans la base de données.

Fig. 4: North part of the Atlantic and English Channel coasts of France with location of the relative sea-level data included in the database.

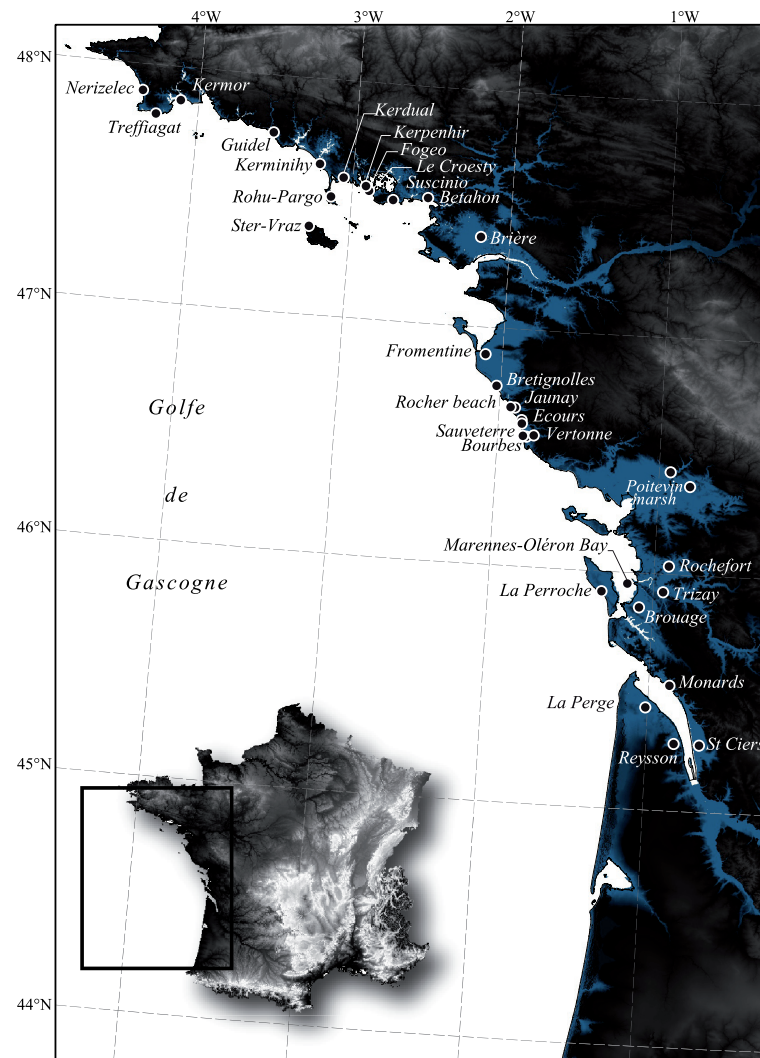


Fig. 5 : Partie sud de la façade Atlantique française où sont localisés les sites inclus dans la base de données.

Fig. 5: South part of the Atlantic coast of France with location of the relative sea-level data included in the database.

dans la littérature (Shennan, 1982 ; Gehrels, 1999 ; Törnqvist *et al.*, 2004 ; Massey *et al.*, 2008 ; Barlow *et al.*, 2013, Goslin *et al.*, 2013). L'incertitude tient tout d'abord dans le type de matériel de mesure topographique utilisé pour relever l'altitude des carottages effectués. Dans les études récentes, les altitudes sont déterminées à partir de levés topographiques précis, réalisés le plus souvent à l'aide d'un GPS différentiel. Celles-ci sont livrées en référence au Nivellement Général Français (m NGF ou IGN69) et contiennent une marge d'erreur d'environ ± 2 cm pour ce qui est de la précision de la mesure (Suanez *et al.*, 2008). Une incertitude supplémentaire de ± 10 cm est généralement considérée pour le raccordement du levé au référentiel NGF lorsque le levé a été effectué à partir de bornes géodésiques dites « secondaires », c'est-à-dire obtenues par cheminement à partir des bornes géodésiques de l'IGN. Dans le cas des études les plus anciennes, le positionnement altitudinal demeure le plus souvent flou, tant au niveau de la méthodologie du levé que du référentiel utilisé. Une marge d'erreur de ± 50 cm a alors été considérée lorsqu'il apparaissait que l'altitude du dépôt ne pouvait être considérée comme complètement fiable, comme proposé par Goslin *et al.* (2013).

Le positionnement altitudinal d'un dépôt est également soumis à un certain nombre d'incertitudes liées aux méthodes de prélèvement utilisées (carottage manuel, carottage à percussion, tarière à vis motorisée,...) ainsi qu'à l'échantillonnage. D'une manière générale, les sondages manuels peuvent induire une sous-estimation de l'altitude des dépôts du fait de la potentielle flexure des tiges lors de la descente. Conformément à Törnqvist *et al.* (2004), une erreur de ± 2 cm par mètre linéaire de carottage a été considérée pour les points obtenus par le biais de cette méthode (soit environ 5 % des données recueillies dans cette étude). De la même façon, les sondages à vis sont réputés pour introduire un potentiel effet « tire-bouchon », lié à l'étirement des niveaux stratigraphiques le long de la vis. Pour cette méthode, une erreur de ± 20 cm a été considérée (Goslin *et al.*, 2013). Enfin, la technique la plus fréquemment utilisée par les auteurs est le vibro-carottage. Les problèmes d'étirement ou de tassement de la colonne sédimentaire sont rarement mentionnés dans les publications.

3.3 - ÂGE ET CALIBRATION DES DATATIONS

Afin de pouvoir être comparées, les datations recueillies dans une base de données doivent être recalibrées selon un unique et même standard. Dans cet inventaire, l'ensemble des âges radiocarbone ont été calibrés à l'aide du logiciel CALIB 7.0 (Stuiver *et al.*, 2013), avec un intervalle de confiance de 95 % (2σ). La courbe de calibration IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013) a été utilisée pour la calibration des dates obtenues à partir de matériel organique (tourbes ou fragments végétaux, par exemple). La courbe « *mixed Marine and NH Atmosphere* » a été employée pour calibrer les âges obtenus sur *Hydrobites*, tandis que les datations obtenues à partir des carbonates marins (coquilles de bivalves et ostracodes) ont été corri-

gées de l'effet réservoir global (405 ans) pris en compte dans la courbe de calibration « *Marine 13* » (Reimer *et al.*, 2013), auquel a été ajouté l'effet réservoir local ΔR , estimé à -7 ± 50 ans en moyenne sur l'ensemble de la façade Manche Atlantique française (Tisnérat-Laborde *et al.*, 2010). Outre l'incertitude d'âge inhérente aux processus de datation et de calibration, s'ajoutent les erreurs liées à la pollution ou la contamination éventuelle du carbone sur lequel porte la mesure. Le manque de précision dans l'échantillonnage ou la présence de carbone allochtone dans le dépôt considéré peut conduire à des attributions chronologiques erronées. Cela est notamment le cas des sédiments datés à partir de la matière organique totale (« *bulk* ») pour lesquels des phénomènes d'imprégnation ou de redéposition ne peuvent être écartés (Delibrias & Giot, 1970) et qui doivent être considérés comme porteurs d'une incertitude supplémentaire (Törnqvist *et al.*, 1992). Trois dates obtenues par Joly & Visset (2009) le long du littoral vendéen (codes A-11242, A-13436, A-12960) ont été écartées pour ces raisons. Enfin, dans le cas des datations réalisées sur des coquilles marines, seules les âges obtenus sur des individus en position de vie ont été retenus dans cette étude.

3.4 - DÉTERMINATION DES *INDICATIVE MEANINGS*

À l'exception des travaux les plus récents centrés sur la reconstitution des niveaux marins passés (Goslin *et al.*, 2013 ; Stéphan *et al.*, 2014), les données recueillies dans le cadre de cet inventaire proviennent majoritairement d'études paléo-environnementales et n'ont jamais fait l'objet d'une véritable détermination des IM. Ce travail a donc été réalisé, sur la base des informations disponibles dans la littérature (faciès sédimentaires, assemblages polliniques, espèces de foraminifères, d'ostracodes, de diatomées, de dinoflagellés), afin d'attribuer à chaque échantillon un environnement de dépôt ou des conditions de salinité particulières. Le croisement de ces informations a permis de distinguer trois grands environnements de dépôt : (i) un environnement continental d'eau douce, (ii) un environnement de schorre, et (iii) un environnement de slikke ou de *sandflat*. Pour ces trois environnements, nous avons considéré les *indicative meanings* suivants (fig. 6) :

- le niveau des PHMA (Plus Hautes Mers Astronomiques) fixe la limite basse du milieu continental d'eau douce. Ce niveau constitue une frontière écologique simple délimitant les milieux intertidaux des milieux hors de l'influence saline. Les sédiments déposés en domaine d'eau douce se distinguent aisément par une prédominance des poacées et les cypéracées, la présence de plantes aquatiques d'eau douce (par ex. *Typha*) et une faible proportion d'espèces halophiles dans les spectres polliniques. Les foraminifères sont généralement absents, tandis que les espèces d'ostracodes et de dinoflagellés sont d'affinité dulçaquicole. Les coquilles de planorbes sont parfois présentes. Comme nous l'avons évoqué précédemment, seuls les points de base issus de ces précédentes formations ont été conservés dans cet inventaire et ont été considérés comme des points limitants.

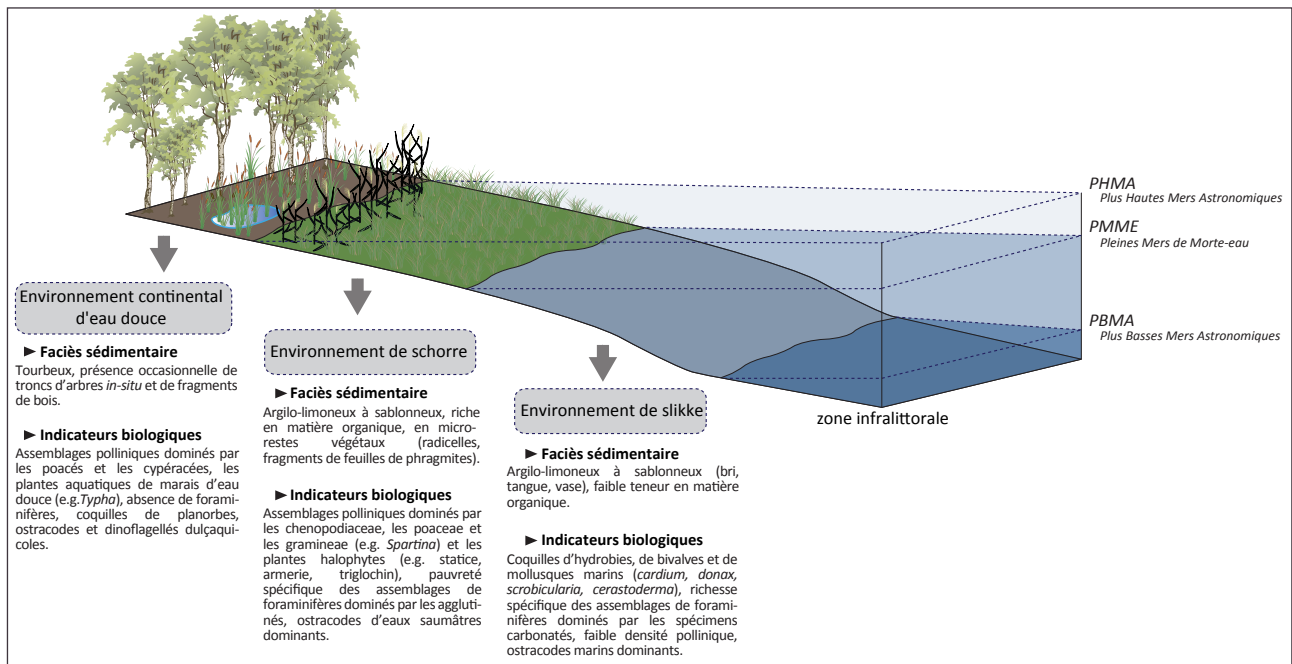


Fig. 6 : Etagement des environnements de dépôt sédimentaire dans les zones intertidale et supratidale des secteurs à faible hydrodynamisme. Trois principaux environnements de dépôt (dulçaquicole, schorre, slikke) se distinguent d'après leur faciès sédimentaire et un ensemble d'indicateurs biologiques. Ces informations sont utilisées pour définir les « Indicative Meanings » des dépôts holocènes.

Fig. 6: Altitudinal zonation of depositional environments within the intertidal and supratidal areas on the low energy coasts. Three main depositional environments are distinguished (freshwater, salt-marsh, mudflat) according to their sedimentary facies and their biological contents. These informations are used to define the indicative meanings of the Holocene coastal deposits.

– l'environnement de schorre (prés-salés, herbus) est fixé entre les PHMA et les PMME (Pleine Mers de Mortes Eaux). Il comprend toutes les formations végétales soumises à l'influence de la marée : phragmitaie, schorres à obione et à spartine. Il se caractérise par un faciès sédimentaire riche en matière organique et en micro-restes végétaux (radicelles, fragments de feuilles). Les assemblages polliniques sont dominés par les *Chenopodiaceae* et les *Poaceae*, par les graminées de type *Spartina* et par les plantes halophytes (par ex. : statice, armerie, triglochin). Les assemblages de foraminifères présentent une faible diversité spécifique et sont dominés par les spécimens agglutinés. Les ostracodes d'eaux saumâtres dominent. Les échantillons attribués au domaine du schorre présentent un IR fixé à PHMA-PMME/2.

– l'environnement de slikke (vasières, mudflats, sandflats) est fixé entre le niveau des PMME et le niveau des PBMA (Plus Basses Mers Astronomiques). Il comprend donc toute la partie basse et médiane de l'étage intertidal. Le faciès sédimentaire est argilo-limoneux à sablonneux et présente une faible teneur en matière organique. Il s'agit de la bri, la tangué, la vase. Le sédiment contient souvent des coquilles d'hydrobies, de bivalves et de mollusques marins (*Cardium*, *Donax*, *Scrobicularia plana*, *Cerastoderma edule*). Les assemblages de foraminifères présentent une grande diversité spécifique et sont dominés par les spécimens carbonatés. Les espèces marines d'ostracodes dominent. La densité pollinique est faible. Un *indicative range* égal à PMME-PBMA/2 leur a été attribué.

Enfin, les dates obtenues dans des environnements propices à la remobilisation de matériel ont été écartées. C'est le cas de certains échantillons correspondant à des

fonds de chenaux de marée reconnus par Gandouin *et al.* (2007) dans la vallée de Saint-Omer, et ceux identifiés par Lespez *et al.* (2010) dans la vallée de la Dives. De la même façon, les niveaux stratigraphiques témoignant d'évènements très morphogènes n'ont pas été retenus du fait de la difficulté à leur attribuer un quelconque niveau tidal. Par exemple, les tempestites datées par Billeaud (2007) en baie du Mont-Saint-Michel ont été écartées de cette étude.

4 - QUELQUES EXEMPLES DÉTAILLÉS DE PRODUCTION DE SLIP

4.1 - LE MARAIS DE LA BÉDUME, MORBIHAN

Le sondage réalisé à la tarière manuelle dans le marais de La Bédume, une vingtaine de mètres en retrait du cordon dunaire, présente une séquence de dépôts marins sur une épaisseur de 7,5 m (fig. 7). Ce sondage n'a pas atteint le substratum. A la base, un niveau de vase tourbeuse a été traversé sur une épaisseur de 40 cm. Ce dépôt est surmonté par un épais niveau de limons argileux bleus, typiques des vases estuariennes rencontrées à l'embouchure de la Vilaine. Le sommet de la séquence montre un limon organique surmonté par une fine pellicule de sable fin, probablement éolien. L'altitude du sondage a été relevée au DGPS, en mode RTK avec une précision de $\pm 0,02$ m. Le relevé a été raccordé au système NGF à partir d'une borne géodésique située à proximité dont l'altitude est fournie avec une précision de $\pm 0,10$ m par l'IGN. Le sommet de ce sondage est situé à $3,02 \pm 0,12$ m NGF. Des restes organiques de plantes

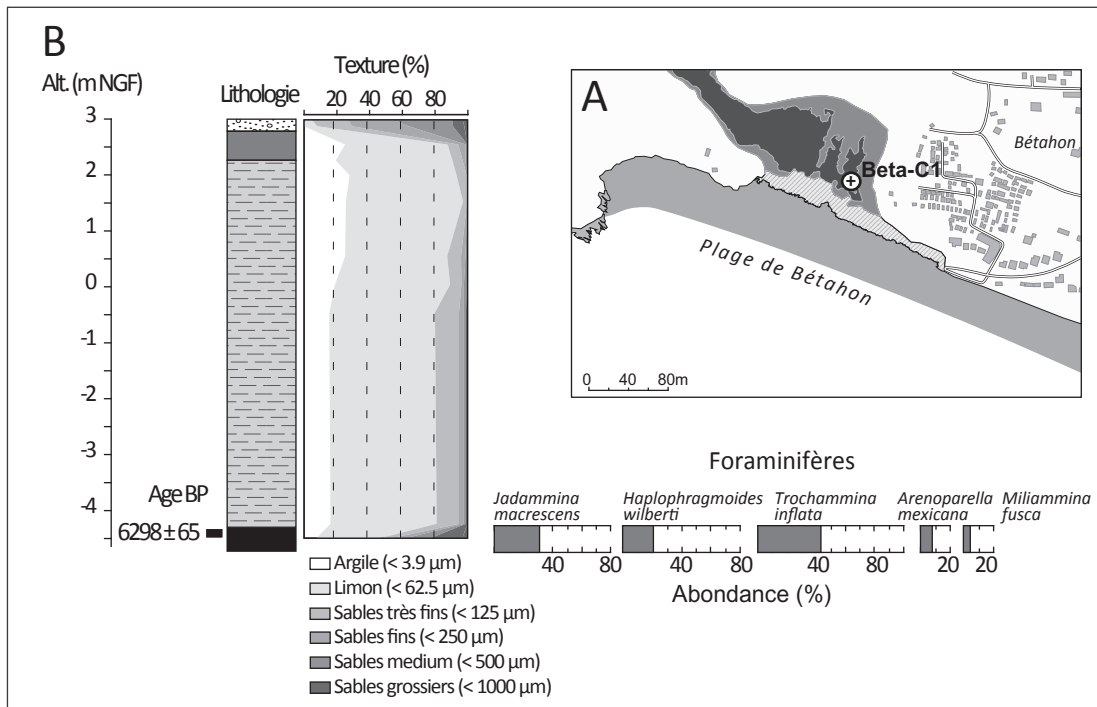


Fig. 7 : Sondage manuel réalisé dans le marais maritime de la Bédume, Morbihan.

A/ Localisation du sondage. B/ Lithostratigraphie, datation au radiocarbone (âge BP $\pm 1\sigma$) et résultats du comptage de foraminifères contenus dans le niveau tourbeux basal.

Fig. 7: Hand-augerings realized within the salt-marsh of la Bédume, Morbihan. A/ Location. B/ Lithostratigraphy, radiocarbon dating (BP age $\pm 1\sigma$) and results of foraminiferal counting of the basal peat deposit.

halophytes ont été sélectionnés pour datation AMS à une profondeur comprise entre 7,40 et 7,50 m, induisant une erreur d'échantillonnage de $\pm 0,05$ m et une incertitude liée à la flexure des tiges de la tarière de $\pm 0,14$ m. L'âge radiocarbone obtenu pour cet échantillon est de 6298 ± 65 BP (Erl-10676), soit un âge calibré à 2σ de 7415-7 017 ans cal. BP. Ce niveau de vase tourbeuse, rencontré à la base du sondage, présente des assemblages de foraminifères caractéristiques des schorres de la zone tempérée (Murray, 2006 ; Rossi *et al.*, 2011 ; Kemp *et al.*, 2012) et sont dominés par *Trochammina inflata*, *Jadammina macrescens* et *Haplophragmoides wilberti*. Ce contenu microfaunique indique que l'échantillon s'est déposé dans un environnement de haut-schorre, à un niveau compris entre les PMME et les PHMA de l'époque. Dans ce secteur, l'altitude des PMME est de 1,47 m NGF (niveau fixé au port de Tréhiguier, le plus proche du site d'étude) et l'altitude des PHMA est fixée à 3,43 m NGF (SHOM, 2013). Le point médian entre ces deux niveaux de marée est situé à 2,45 m NGF et correspond à l'IM de l'échantillon considéré. La hauteur qui sépare ces deux niveaux tidaux est de 1,96 m, permettant de définir un IR de $\pm 0,98$ m. Le sédiment étudié n'ayant pas été prélevé au contact du substratum, le SLIP produit est considéré comme un point intercalé. Ainsi, le calcul du niveau marin relatif pour ce SLIP est le suivant :

$$\text{SLIP}_{\text{Erl-10676}} = 3,02 \text{ m}_{\text{alt. NGF}} - 7,45 \text{ m}_{\text{profondeur}} - 2,45 \text{ m}_{\text{indicative meaning}} = -6,88 \text{ m} \quad (3)$$

L'erreur de positionnement est définie comme suit :

$$\pm E_{\text{Erl-10676}} = (0,98 \text{ m}^2_{\text{indicative range}} + 0,12 \text{ m}^2_{\text{altitude}} + 0,05 \text{ m}^2_{\text{échantillonnage}} + 0,14 \text{ m}^2_{\text{tarière}})^{1/2} = 1,29 \text{ m} \quad (4)$$

4.2 - LA PLAGE DE SAINTE-ANNE DU PORTZIC, FINISTÈRE

A l'occasion de travaux de canalisation sur la plage de Sainte-Anne du Portzic (Finistère), une tranchée de 20 m de long a été ouverte à la pelle mécanique, révélant une séquence de dépôts tourbeux et de niveaux de sables et galets marins sur une épaisseur d'environ 2 m (fig. 8). L'étude de cette séquence a été complétée par trois sondages à la tarière manuelle, réalisés sur l'estran environnant. L'altitude des données a été obtenue à l'aide d'un DGPS en mode RTK et les mesures ont été raccordées à une borne géodésique IGN, induisant une erreur de $\pm 0,12$ m. Les niveaux tourbeux ont fait l'objet de six datations radiocarbone et d'une description détaillée de leur contenu en macro-restes organiques et en foraminifères, dans l'objectif de distinguer les tourbes dulçaquicoles des tourbes saumâtres. La présence de restes de phragmites et de foraminifères agglutinés a été recherchée dans les échantillons. Deux d'entre eux, prélevés dans le sondage S1 (altitude de 0,4 m NGF) à des profondeurs respectives de 0,70-0,75 m (Erl-11757) et 1,80-1,85 m (Erl-11758), ont été attribués à une phragmitaie et correspondent à des dépôts saumâtres mis en place entre les PHMA et les PMME. Si l'on se réfère au niveau

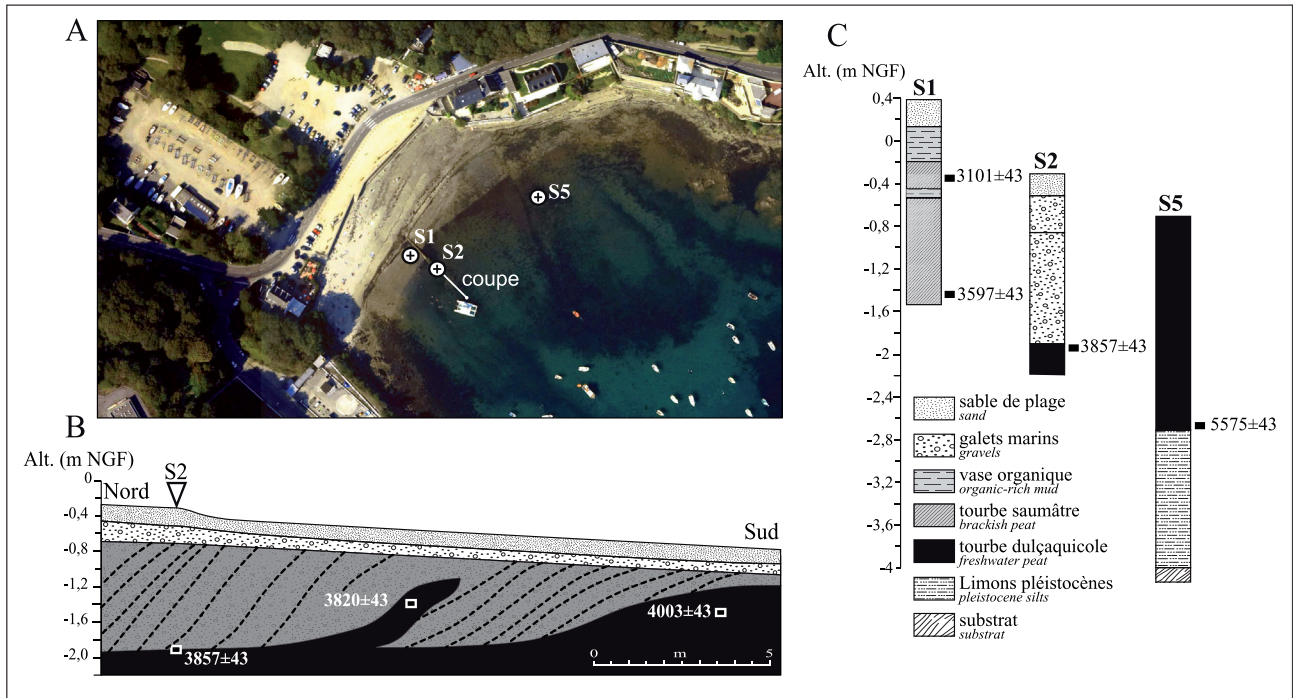


Fig. 8 : Stratigraphie des dépôts côtiers étudiés sur la plage de Sainte-Anne du Portzic (Brest).

A/ Localisation de la coupe stratigraphique et des sondages manuels. B/ Stratigraphie des dépôts observés en coupe sur la plage lors des travaux de canalisation. C/ Lithostratigraphie et datations radiocarbone obtenues à partir des sondages manuels.

Fig. 8: Stratigraphy of coastal deposits studied on the beach of Sainte-Anne du Portzic (Brest). A/ Location of the sedimentary sequence and hand-augerings. B/ Stratigraphy of the deposits observed in beach profiles during channel operations. C/ Lithostratigraphy and radiocarbon datings obtained from hand-augerings.

de marée définis au port de Brest (SHOM, 2013), le point médian entre ces deux niveaux de marée se situe à l'altitude de 3,08 m NGF et l'IR est estimé à $\pm 1,22$ m. Deux SLIPs peuvent ainsi être produits de la façon suivante :

$$\text{SLIP}_{\text{Erl-11757}} = 0,4 \text{ m}_{\text{alt. NGF}} - 0,725 \text{ m}_{\text{profondeur}} - 3,08 \text{ m}_{\text{indicative meaning}} = -3,405 \text{ m}$$

$$\pm E_{\text{Erl-11757}} = (1,22 \text{ m}_{\text{indicative range}}^2 + 0,12 \text{ m}_{\text{alt. NGF}}^2 + 0,025 \text{ m}_{\text{échantillonnage}}^2 + 0,02 \text{ m}_{\text{tariéage}}^2)^{1/2} = 1,385 \text{ m}$$

et

$$\text{SLIP}_{\text{Erl-11758}} = 0,4 \text{ m}_{\text{alt. NGF}} - 1,825 \text{ m}_{\text{profondeur}} - 3,08 \text{ m}_{\text{indicative meaning}} = -4,505 \text{ m}$$

$$\pm E_{\text{Erl-11757}} = (1,22 \text{ m}_{\text{indicative range}}^2 + 0,12 \text{ m}_{\text{alt. NGF}}^2 + 0,025 \text{ m}_{\text{échantillonnage}}^2 + 0,04 \text{ m}_{\text{tariéage}}^2)^{1/2} = 1,405 \text{ m}$$

Les autres échantillons tourbeux étudiés à Sainte-Anne du Portzic n'ont révélé aucun indice d'influence marine. Ils correspondent à des tourbes dulçaquicoles qui se sont développées au-dessus des PHMA, dont le niveau actuel est situé à 4,3 m NGF. Toutefois, l'un d'entre eux (Erl-11761, sondage S5) a été prélevé au contact de limons pléistocènes, à une profondeur de 1,90-2 m. et permet de produire un point limitant :

$$\text{Point Limitant}_{\text{Erl-11761}} = -0,7 \text{ m}_{\text{alt. NGF}} - 1,95 \text{ m}_{\text{profondeur}} - 4,30 \text{ m}_{\text{indicative meaning}} = -6,95 \text{ m}$$

$$\pm E_{\text{Erl-11761}} = (0,12 \text{ m}_{\text{alt. NGF}}^2 + 0,05 \text{ m}_{\text{échantillonnage}}^2 + 0,04 \text{ m}_{\text{tariéage}}^2)^{1/2} = 0,21 \text{ m}$$

5 - RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1 - UNE BASE DE DONNÉES SUR LES NIVEAUX MARINS RELATIFS HOLOCÈNES

Les données présentées dans cet inventaire sont extraites de 54 publications et thèses de doctorat dont la plupart sont postérieures aux années 1980. L'examen de cette littérature a permis de recueillir 451 points pour lesquels nous disposons d'une information concernant la localisation, l'âge radiocarbone et la position stratigraphique. L'IM a été déterminé principalement à partir des données palynologiques couplées à une description détaillée des faciès sédimentaires. Seules deux publications récentes (Stéphan & Laforge, 2013 ; Stéphan *et al.*, 2014) utilisent les foraminifères benthiques dans le cadre d'une fonction de transfert afin de définir statistiquement la position des dépôts sédimentaires par rapport au niveau de la mer. Parmi les 451 points recueillis, 187 ont été rejetés. Ces données sont issues de dépôts de tourbe attribués à un milieu dulçaquicole et stratigraphiquement intercalés parmi des dépôts marins au sein des séquences

sédimentaires. Les raisons de ce rejet tiennent essentiellement au doute concernant la position initiale de ces niveaux qui ont pu souffrir d'une forte compaction après leur dépôt.

Un ensemble de 264 points permet donc de positionner avec un degré de fiabilité variable les niveaux marins relatifs le long des côtes Manche-Atlantique françaises. La plupart d'entre eux correspondent à des points intercalés (207) qu'il faut également considérer à titre indicatif en raison des incertitudes induites par le tassement des dépôts. Au nombre de 36, les points limitants permettent également de contraindre par le haut la position relative du niveau marin. Seuls 21 points de base sont recensés dans cette étude et peuvent être considérés comme exempts de phénomènes de compaction ou de consolidation des dépôts et témoignent d'une position relative du niveau de la mer à une période donnée. En première analyse, cet inventaire souligne donc le nombre important d'informations disponibles. Toutefois, une très faible part de ces données peut être considérée comme véritablement fiable et précise. Aussi, l'étude des ajustements glacio-hydro-isostatiques sur la base de ces « points de base » recueillis le long de la façade occidentale française nous paraît prématurée en l'état actuelle des connaissances.

La figure 9 illustre la distribution temporelle des données recueillies. Avant 11 000 ans cal. BP, les enregistrements sédimentaires du niveau marin sont inexistantes, les séquences côtières n'étant pas encore constituées à l'emplacement de l'actuelle ligne de rivage. Le nombre de données augmente progressivement entre 11 000 et 9 000 ans cal. BP. Il s'agit majoritairement de points limitants obtenus à partir de dépôts de tourbe dulçaquicole situés au contact avec le substrat. A proximité des rivages actuels, la remontée post-glaciaire du niveau marin commence à se faire sentir localement par le relèvement progressif du toit des nappes phréatiques et l'installation de tourbières rétro-littorales dans l'axe des vallées fluviales en cours d'envoie. Le nombre de données disponibles culmine entre 7 000 et 6 000 ans cal. BP. La plupart des séquences sédimentaires littorales se forment durant cette période à l'emplacement du trait de côte actuel. Le grand nombre de points disponibles tient également à la volonté des auteurs de caler chronologiquement la base de leurs séquences. Après cette période, le nombre d'enregistrements baisse peu à peu et les données se limitent à des points intercalés. A quelques exceptions près, il n'existe plus de points de base après 4 000 ans cal. BP. Les périodes les plus récentes sont assez mal représentées, peut-être en raison des faibles changements lithostratigraphiques, de la nature des dépôts fini-holocènes et de la difficulté de les dater et de les étudier, du manque d'intérêt accordé à cette période dans les problématiques paléo-environnementales de type géologique.

La distribution spatiale des données est présentée dans la figure 10. D'une manière générale, aucune région de la façade Manche-Atlantique française n'est exempte d'enregistrements du niveau marin relatif pour la période

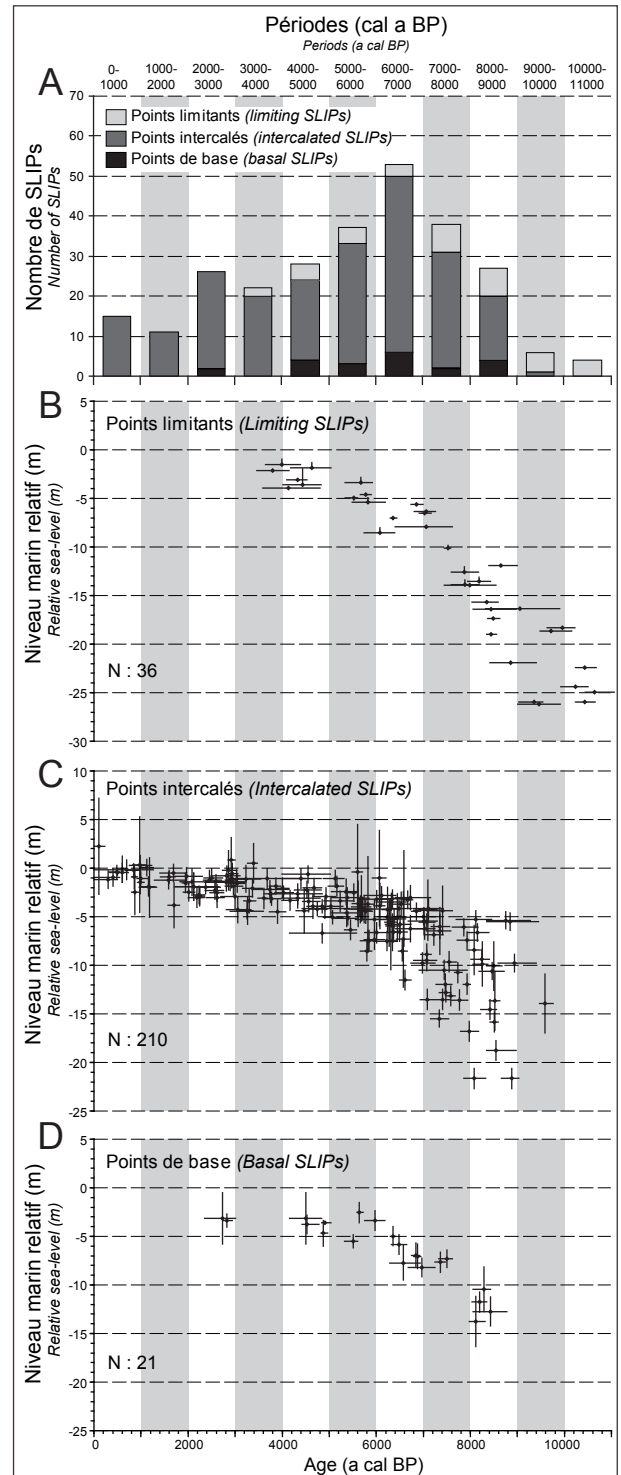


Fig. 9 : Distribution temporelle des différentes catégories de SLIP produites le long de la façade Manche-Atlantique française.

Répartition numérique des types de points par intervalles de 1000 ans (A) et distribution temporelle des points limitants (B), des points intercalés (C) et des points de base (D).

Fig. 9: Temporal distribution of SLIP types product along the Atlantic and English Channel coasts of France. Numerical distribution of point types within 1000-years-long time intervals (A) and temporal distributions of limiting points (B), intercalated points (C) and basal points (D).

Holocène. Certains secteurs sont toutefois mieux représentés. Les études menées dans la plaine maritime du Nord (Van der Woude & Roeleveld, 1985 ; Gandouin *et al.*, 2007, 2009 ; Mrani-Alaoui & Anthony, 2011) livrent plus de trente points pour la période 10 000-4 000 ans cal. BP.

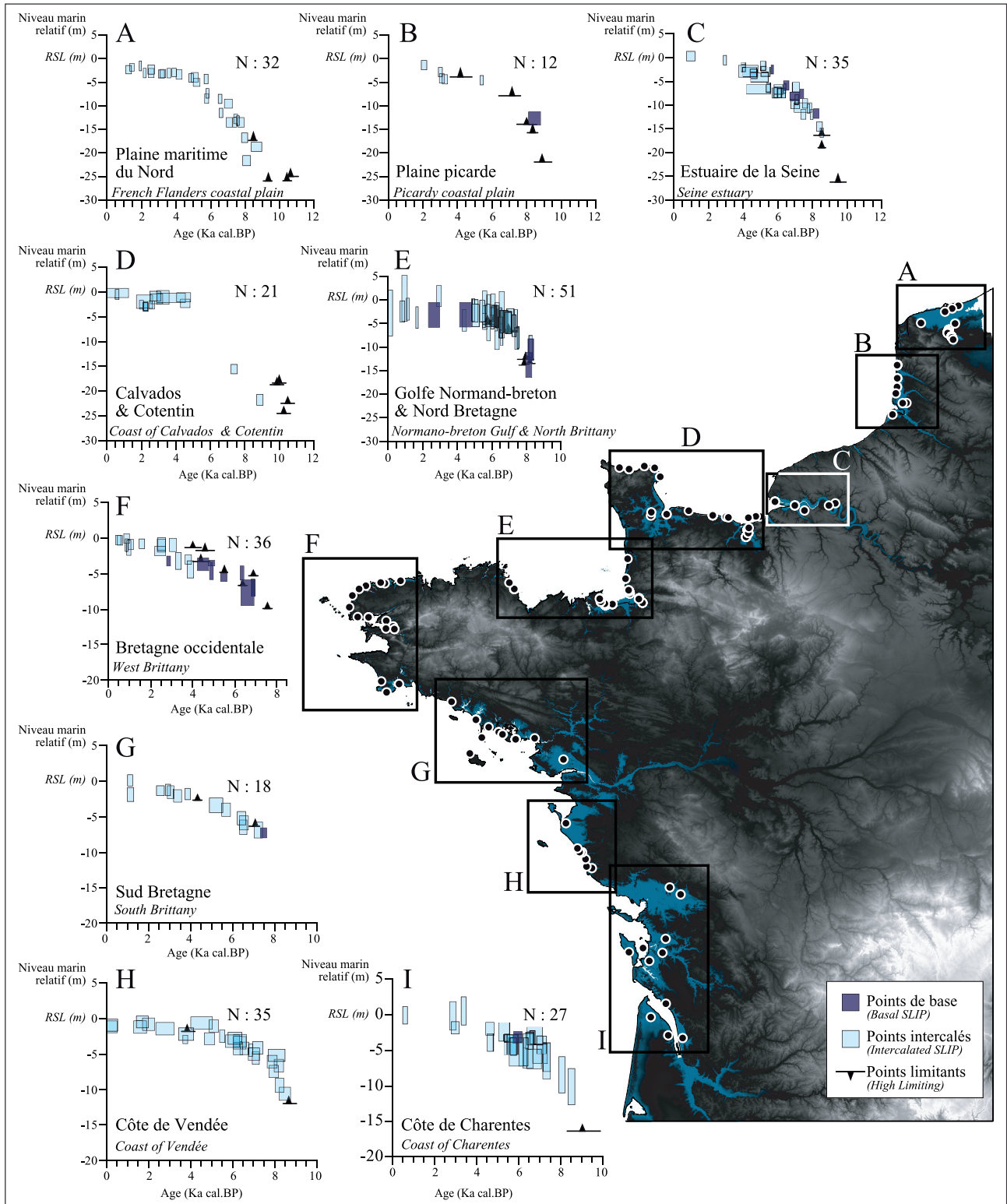


Fig. 10 : Elévation holocène du niveau marin relatif pour les neuf segments de côte le long de la façade Manche-Atlantique française. N : nombre de points constituant le graphique.

Fig. 10: Holocene relative sea-level rise from the nine sea-level data groups located along the Atlantic and English Channel coasts of France. N: number of sea-level points in the graph.

Dans l'estuaire de la Seine, la série de données produites par Ters (1973), Huault & Lefebvre (1974), Huault (1980, 1985, 1986) et Frouin *et al.* (2007, 2009) compte trente-cinq SLIPs qui permettent de suivre de façon quasi-continue l'évolution du niveau marin relatif avec une grande précision au cours des 10 000 dernières années. Dans l'ouest de la Bretagne, les travaux récents menés

par Stéphan (2011), Goslin *et al.* (2013), Goslin (2014) et Stéphan *et al.* (2014) ont apporté des informations nouvelles et ont réactualisé les données de Morzadec-Kerfourn (1974) pour cette région. Ils permettent de proposer trente-six SLIPs dont neuf points de base. Notons également la richesse des données recueillies sur les côtes de Vendée où trente-cinq SLIPs sont proposés

en s'appuyant principalement sur les travaux de Joly (2004) et de Joly & Visset (2009). Toutefois, certains segments du littoral sont encore mal représentés, soit en l'absence de séquences sédimentaires pouvant fournir de l'information utile (la côte à falaises du Pays de Caux, la côte sableuse aquitaine), soit en raison d'un manque d'effort de recherche dans ce domaine (côte occidentale du Cotentin, côte nord de Bretagne).

5.2-REMARQUES GÉNÉRALES SUR L'ÉVOLUTION DU NIVEAU MARIN RELATIF

Les données issues de cet inventaire permettent de tracer les grandes lignes de l'évolution du niveau marin relatif le long des façades maritimes françaises de la Manche et de l'Atlantique au cours des 11 000 dernières années. Quelles que soient les régions considérées, l'évolution se caractérise par une remontée progressive du niveau de la mer, sans baisse significative, à un rythme qui tend à décroître depuis 11 000 ans cal. BP jusqu'à aujourd'hui. Cette tendance est grossièrement conforme à la hausse globale du niveau des océans au cours de cette période (Stanford *et al.*, 2011). L'eustasie apparaît donc comme le facteur prépondérant dans l'évolution relative du niveau marin à l'Holocène sur les littoraux français de Manche et d'Atlantique, tandis que les phénomènes glacio-hydro-isostatiques et tectoniques influencent secondairement, et à des degrés variables selon les secteurs côtiers, les rythmes de remontée du niveau marin relatif.

A aucun moment, au cours de l'Holocène, le niveau marin relatif semble avoir dépassé son niveau actuel. Quelques SLIPs produits en Baie du Mont-Saint-Michel (marais de Dol, van de Plassche, 1991) ou sur la côte charentaise (marais de La Perroche, Clavé *et al.*, 2001) montrent une position supérieure à l'actuelle entre 3 500 et 2 500 ans cal. BP, mais l'incertitude verticale qui entache la position de ces points incite à la prudence. En outre, cette période est largement reconnue comme une phase d'activité morphogène sur l'ensemble des côtes d'Europe de l'ouest se traduisant par des hiatus sédimentaires associés à des surfaces d'érosion, par des dépôts de tempêtes interstratifiés dans les séquences holocènes (Long & Hughes, 1995 ; Pontee *et al.*, 1998 ; Tastet & Pontee, 1998 ; Clavé *et al.*, 2001 ; Billeaud *et al.*, 2009 ; Sorrel *et al.*, 2009 ; Lespez *et al.*, 2010 ; Tessier *et al.*, 2012 ; Van-Vliet Lanoë *et al.*, 2014a,b). Des erreurs d'interprétation peuvent être associées à ces changements morphosédimentaires importants à la côte (Stéphan, 2012).

Enfin, aucune oscillation du niveau marin relatif n'est mise en évidence au cours des derniers millénaires, du moins si l'on tient compte des erreurs éventuelles dans l'attribution chronologique et dans le positionnement vertical des points. Les phases régressives et transgressives identifiées par Ters (1973, 1986) et auxquelles plusieurs publications récentes font encore références (par ex. : Gandouin *et al.*, 2007 ; Joly & Visset, 2009), doivent être fortement remises en cause. Notons qu'un constat identique est dressé sur les côtes françaises de

Méditerranée (par ex. Laborel *et al.*, 1994 ; Morhange *et al.*, 2001). Dans les régions tectoniquement stables, l'absence d'oscillations importantes du niveau global des mers au cours des 10 000 dernières années fait désormais l'objet d'un assez large consensus. En s'appuyant sur plusieurs modèles de déglaciation établis avec précision pour la période Holocène, Lambeck (1997) a montré que les oscillations d'ampleur métrique étaient difficilement envisageables le long des façades Manche-Atlantique françaises. Même la vidange brutale du lac Agasiz-Ojibway vers 8 200 BP, considéré comme un événement majeur de la phase de déglaciation holocène, n'aurait produit qu'une élévation globale du niveau des mers d'environ 40 cm (Kendall *et al.*, 2008).

5.3 - LA HAUSSE DU NIVEAU MARIN RELATIF PAR SECTEURS CÔTIERS

5.3.1 - La plaine maritime du nord de la France

Dans la plaine maritime du nord de la France, l'histoire du niveau marin relatif est renseignée à partir de nombreuses données qui couvrent les 11 000 dernières années (Van der Woude & Roeleveld, 1985 ; Sommé *et al.*, 1992 ; Gandouin *et al.*, 2007, 2009 ; Mrani-Alaoui & Anthony, 2011). Entre 10 600 et 9 340 ans cal. BP, trois points limitants témoignent d'un niveau marin relatif inférieur à -25,9 m. Vers 8 500 ans cal. BP, le niveau marin relatif se situe à -18,7 m et remonte à un rythme d'environ 4,4 mm.a⁻¹ jusqu'à 5 700 ans cal. BP. Ces vitesses de remontée passent à environ 0,9 mm.a⁻¹ en moyenne de 5 700 ans cal. BP à aujourd'hui. Toutefois, en l'absence de SLIPs de base, ces rythmes de remontée doivent être considérés uniquement comme des ordres de grandeur.

5.3.2 - La plaine maritime Picarde

En dépit du nombre important d'études menées dans la plaine maritime Picarde (Etienne & Robert, 1965 *in* Delibrias *et al.*, 1969 ; Munaut & Gilot, 1977 ; Lefèvre *et al.*, 1980 ; Beun & Broquet, 1980 ; Ters *et al.*, 1980 ; Ters, 1986), le nombre de SLIP produits est faible. La donnée la plus ancienne est un point limitant qui indique un niveau marin relatif inférieur à -21,9 m vers 9 397-8 417 ans cal. BP. Le seul SLIP de base disponible pour ce secteur témoigne d'un niveau marin à -12,7 ± 1,47 m vers 8 773-8 054 ans cal. BP. Là encore, la grande dispersion temporelle des données rend difficile l'estimation des tendances. Entre 8 900 et 7 000 ans cal. BP, la hausse du niveau marin relatif est évaluée à 7,5 mm.a⁻¹. Ces vitesses de remontée diminuent fortement pour la fin de l'Holocène où une élévation d'environ 1 mm.a⁻¹ en moyenne est observée entre 5 400 ans cal. BP et aujourd'hui, sur la base des quelques SLIP intercalés disponibles.

5.3.3 - L'estuaire de la Seine

L'estuaire de la Seine est l'une des régions de notre zone d'étude où l'histoire holocène du niveau marin relatif est la mieux documentée, grâce aux données produites par Ters (1973), Huault & Lefebvre (1974), Huault (1980, 1985, 1986), Delsinne (2005) et Frouin *et al.* (2007, 2009). Un point limitant indique un niveau marin relatif situé au-dessous de $-26,2 \pm 0,1$ m à 9912-9011 ans cal. BP. Vers 8200 ans cal. BP, le plus ancien SLIP de base de cette série de données livre une position du niveau marin relatif à $-11,75 \pm 1,03$ m. Entre 8200 et 5600 ans cal. BP, le niveau de la mer s'élève à un rythme de $3,4 \text{ mm.a}^{-1}$ pour atteindre $-2,55 \pm 1,03$ m à 5719-5589 ans cal. BP. Pour les derniers millénaires de l'Holocène, les données sont peu nombreuses et la hausse du niveau de la mer serait d'environ $0,5 \text{ mm.a}^{-1}$, entre 4000 ans cal. BP et aujourd'hui.

5.3.4 - La côte du Calvados et du Cotentin

Étudiés par Elhai (1963), Dangeard & Hommeril (1964), Larsonneur (1971), Giresse & Lautridou (1973), Ters (1973), Garnaud (2003), Garnaud *et al.* (2003), Coutard & Clet-Pellerin (2006) et Lespez *et al.* (2010), les littoraux du Calvados et du Cotentin présentent une série de données qui couvre de façon discontinue la période Holocène. Avant 9000 ans cal. BP, le niveau de la mer se situe au minimum -25 m sous son niveau actuel, comme l'indique une série de points limitants. Entre 9000 et 7400 ans cal. BP, le niveau marin passe respectivement de $-21,65 \pm 1$ m à $-15,48 \pm 0,9$ m. Aucune donnée ne couvre la période entre 7000 et 5000 ans cal. BP. Vers 4530 ans cal. BP, un SLIP fixe le niveau de la mer à $-2,23 \pm 0,9$ m sous l'actuel. La hausse du niveau de la mer depuis cette date est estimée à $0,6 \text{ mm.a}^{-1}$ en moyenne.

5.3.5 - Le Golfe normand-breton et le nord de la Bretagne

Les prismes sédimentaires côtiers du Golfe normand-breton ont fait l'objet de nombreuses études (Giresse, 1969 ; Giresse & Lautridou, 1973 ; Ters, 1973 ; van de Plassche, 1991 ; Regnaud *et al.*, 1996 ; Billard *et al.*, 2004, *in* Billeaud, 2007 ; Billeaud, 2007) grâce auxquelles l'évolution holocène du niveau marin relatif a pu être retracée avec une bonne résolution temporelle pour les 8000 dernières années. Toutefois, le positionnement des anciens niveaux marins est soumis à une grande incertitude, du fait des marnages importants qui caractérisent ce secteur côtier et de l'importance du tassement provoqué par un drainage intensif, dans le fond du golfe (Delibrias & Morzadec-Kerfourn, 1975 ; Morzadec-Kerfourn, 2002). Aussi, faut-il se borner à décrire l'histoire de la remontée du niveau marin relatif dans ses grandes lignes. Aux alentours de 8000 ans cal. BP, un ensemble de points limitants et deux SLIP de base établissent une position du niveau de la mer entre -10 m et -15 m par rapport à l'actuel. De 7000 à 4000 ans cal. BP, une grande quantité de SLIP intercalés

déterminent un niveau marin relatif compris entre -6 m et -2 m sous l'actuel. Enfin, les quelques données disponibles pour les 4000 dernières années positionnent le niveau marin relatif légèrement au-dessous de l'actuel, mais ne livrent guère plus de précision tant les marges d'erreur sont importantes.

5.3.6 - La côte occidentale de Bretagne

Les données recueillies dans l'ouest de la péninsule bretonne (Morzadec-Kerfourn, 1969, 1974 ; Regnaud, 1999 ; Stéphane, 2011 ; Goslin *et al.*, 2013 ; Stéphane & Laforge, 2013 ; Goslin, 2014 ; Stéphane *et al.*, 2014) couvrent les 7500 dernières années. La plus ancienne date place le niveau relatif de la mer en-dessous de $-10,1 \pm 0,22$ m par rapport à l'actuel à 7587-7444 ans cal. BP. Entre 7500 et 6900 ans cal. BP, le relèvement du niveau de la mer semble rapide (de l'ordre de $4,6 \text{ mm.a}^{-1}$) puisqu'un point de base indique que le niveau relatif de la mer atteint $-7,06 \pm 1,27$ m à 6951-6791 ans cal. BP. À partir de 6900 ans cal. BP, les vitesses de remontée du niveau marin relatif s'infléchissent fortement. La hausse s'effectue ensuite à un rythme décroissant jusqu'à aujourd'hui.

5.3.7 - La côte sud de Bretagne

Le littoral méridional de Bretagne a été étudié par Planchais & Corillion (1968), Ters (1973), Visset (1982), Visset *et al.* (1994, 1995, 1996), Gaudin (2004), Visset & Bernard (2006). La série de donnée débute par un SLIP de base qui place le niveau marin relatif à $-7,31 \pm 0,92$ m à 7617-7325 ans cal. BP. La hausse du niveau de la mer semble linéaire au cours des 7000 dernières années, à un rythme d'environ $0,8 \text{ mm.a}^{-1}$. Les derniers millénaires de l'Holocène souffrent d'un manque de données et sont couverts par seulement deux points intercalés.

5.3.8 - La côte de Vendée

Le long du littoral vendéen, l'histoire du niveau marin relatif est connue grâce aux travaux de Verger & Florschütz (1960), Visset (1987), Joly (2004), Allard *et al.* (2008), Joly & Visset (2009). Les données couvrent de façon quasi-continue les 10 000 dernières années. Toutefois, aucun SLIP de base ne permet de positionner le niveau de la mer avec une grande fiabilité au cours de l'Holocène. Un point limitant détermine un niveau de la mer inférieur à $-11,9 \pm 0,14$ m à 8997-8393 ans cal. BP. De 8500 à 6000 ans cal. BP, le rythme de remontée est de l'ordre de $2,6 \text{ mm.a}^{-1}$. Le niveau de la mer se situe à $-3,2 \pm 0,9$ m par rapport à l'actuel vers 6000 ans cal. BP. À partir de cette date, les vitesses d'élévation du niveau de la mer diminuent fortement, avoisinant $0,8 \text{ mm.a}^{-1}$ jusqu'à aujourd'hui.

5.3.9 - La côte charentaise

Les données produites sur la côte charentaise (Gabet, 1973 ; Ters, 1973 ; Visset *et al.*, 1989, 1990 ; Bourgueil,

1995, 2005 ; Diot & Tastet, 1996 ; Tastet *et al.*, 2000a,b ; Clavé *et al.*, 2001 ; Wang *et al.*, 2006) s'échelonnent de 10 000 ans cal. BP jusqu'à aujourd'hui. La date la plus ancienne correspond à un point limitant qui établit, aux alentours de 9 000 ans cal. BP, le niveau de la mer sous $-16,32 \pm 0,17$ m. Un ensemble de points intercalés se répartit de 8 500 à 6 000 ans cal. BP, indiquant une élévation du niveau marin relatif d'environ $2,3 \text{ mm.a}^{-1}$ sur la période. Un SLIP de base fixe un niveau marin à $-3,35 \pm 1$ m à 6 182-5 753 ans cal. BP. De 6 000 ans cal. BP à aujourd'hui, la hausse du niveau de la mer est estimée à $0,6 \text{ mm.a}^{-1}$ en moyenne.

6 - CONCLUSION

Cette étude fait la synthèse des données disponibles sur l'évolution holocène du niveau marin relatif le long de la façade Manche-Atlantique française et propose à la communauté scientifique une base de données qui a pour vocation d'être enrichie. La démarche adoptée n'est pas nouvelle puisqu'une telle synthèse avait déjà été proposée par Ters (1973, 1986). Toutefois, notre approche s'appuie sur une méthode désormais bien établie et reconnue au niveau international, permettant la production de points index du niveau marin.

Sur la base des données recueillies dans une cinquantaine de publications portant essentiellement sur l'étude de séquences sédimentaires littorales, 264 points index ont été produits, témoignant à première vue de la richesse de l'information disponible pour les littoraux français de la Manche et de l'Atlantique. Toutefois, la majorité de ces données est issue de dépôts sédimentaires ayant pu subir un certain tassement au cours du temps. Notre inventaire fait état de seulement 21 points de base qui peuvent, de ce fait, être considérés comme exempts de tout phénomène de compaction ou de consolidation. En outre, ces points sont mal répartis dans le temps et dans l'espace. Les premiers et les derniers millénaires de la période Holocène sont mal représentés. La plaine maritime du Nord, les côtes du Calvados et du Cotentin, le littoral vendéen ne disposent d'aucun point de base. Par conséquent, les reconstitutions fiables de la remontée post-glaciaire, ainsi que l'estimation des phénomènes glacio-hydroisostatiques et tectoniques, ne sont pas envisageables en l'état actuel des connaissances de terrain. A l'avenir, des efforts devront donc être entrepris afin d'acquérir cette information. Cela souligne également la nécessité de tenir compte, à l'avenir, des nombreuses données d'origine archéologique pouvant faire état d'anciennes positions du niveau marin relatif.

En dépit de ces limites, une analyse sommaire des données produites dans cette étude permet de dresser les grandes tendances d'évolution du niveau marin relatif au cours des 11 000 dernières années le long des rivages français de la Manche et de l'Atlantique. Cette évolution se caractérise par une montée progressive du niveau de la mer à un rythme décroissant jusqu'à aujourd'hui. Une inflexion notable dans les rythmes de remontée est

observée entre 7 000 et 6 000 ans cal. BP. A partir de cette période, les vitesses moyennes d'élévation sont inférieures à 1 mm.a^{-1} , quelle que soit la région côtière considérée. En outre, aucune baisse significative du niveau de la mer n'est enregistrée durant l'Holocène et, à aucun moment, le niveau marin relatif n'a dépassé son niveau actuel. Enfin, le caractère oscillatoire de la transgression marine holocène peut être définitivement écarté dès lors que sont prises en compte les incertitudes chronologiques et les erreurs de positionnement vertical des anciens niveaux de la mer.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement les deux relecteurs, Messieurs Paolo A. Pirazzoli et Christophe Morhange, pour leurs remarques et corrections, ainsi que M. Bernard Dumas pour avoir accepté de coordonner le travail de relecture. La présente étude a été initiée à la suite du séminaire « *Variations du niveau marin au Quaternaire : indicateurs sédimentaires, biologiques et archéologiques* » organisé par l'AFEQ en novembre 2012. Aussi, nos remerciements vont en direction de toutes les personnes, associations et institutions qui ont soutenu l'organisation de cette rencontre (Nicole Limondin-Louzet, la Société Géologique de France, la Fédération Française des Géosciences, l'Association des Sédimentologues Français) ainsi qu'à tous ceux qui y ont participé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLARD J., CHAUMILLON E., POIRIER C., SAURIAU P.-G. & WEBER O., 2008 - Evidence of former Holocene sea level in the Marennes-Oléron Bay (French Atlantic coast). *Comptes Rendus Geoscience*, **340** (5), 306-314.
- BAETEMAN C., 1999 - The holocene depositional history of the Ijzer palaeo-valley (Western Belgian coastal plain) with reference to the factors controlling the formation of the intercalated peat beds. *Geologica Belgica*, **2/3** (4), 39-72.
- BARLOW N.L.M., SHENNAN I., LONG A.J., GEHRELS W.R., SAHER M.H., WOODROFFE S.A. & HILLIER C., 2013 - Salt marshes as late Holocene tide gauges. *Global and Planetary Change*, **106**, 90-110.
- BEUN N. & BROQUET P., 1980 - Tectonique quaternaire (Holocène ?) dans la plaine littorale picarde des Bas-Champs de Cayeux et de leurs abords orientaux. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **17** (1/2), 47-52.
- BILLEAUD I., 2007 - *Dynamique de construction d'un prisme sédimentaire littoral en régime mégatidal (la Baie du Mont-Saint-Michel)*. Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse Normandie, Caen, 239 p.
- BILLEAUD I., TESSIER B. & LESUEUR P., 2009 - Impacts of Late Holocene rapid climate changes as recorded in a macrotidal coastal setting (Mont-Saint-Michel Bay, France). *Geology*, **37** (11), 1031-1034.
- BOURGUEIL B., 1995 - Datations au radiocarbone de niveaux tourbeux holocènes du marais de Rochefort (Charente-Maritime) : Variation du niveau marin au cours du 9^e millénaire (BP). *Géologie de la France*, **1995-1**, 77-80.
- BOURGUEIL B., 2005 - Evolution de la transgression flandrienne et du littoral charentais depuis 8500 BP. *Géologie de la France*, **2005-1**, 75-84.
- BROOKS A.J. & EDWARDS R.J., 2006 - The development of a sea-level database for Ireland. *Irish Journal of Earth Sciences*, **24** (1), 13-27.

- CLAVÉ B., MASSÉ L., CARBONEL P. & TASTET J.-P., 2001 - Holocene coastal changes and infilling of the La Perroche marsh (French Atlantic coast). *Oceanologica Acta*, **24** (4), 377-389.
- COUTARD S. & CLET-PELLERIN M., 2006 - Evolution de la sédimentation et de la végétation pendant l'Holocène dans les marais arrière-littoraux du Val de Saire (Cotentin, Normandie). In P. Allée & L. Lespez (eds.), L'érosion entre société, climat et paléoenvironnement : table ronde en l'honneur du Professeur René Neboit-Guilhot, Clermont-Ferrand, 25-26-27 mars 2004. Presses universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 271-278.
- DANGEARD L. & HOMMERIL P., 1964 - Le grès calcaire normandien de Bernières sur Mer (Calvados) et les dépôts associés. Datation au carbone 14. *Compte Rendu Sommaire des Séances de la Société Géologique de France*, **3**, 126-127.
- DEBENAY J.-P., CARBONEL P., MORZADEC-KERFOURN M.-T., CAZAUDON A., DENÉFLE M. & LEZINE A.-M., 2003 - Multi-bioindicator study of a small estuary in Vendée (France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **58** (4), 843-860.
- DELIBRIAS G. & GIOT P.-R., 1970 - Inadéquation, hétérogénéité et contamination des échantillons soumis pour les datations radio-carbone. *Bulletin de la Société Préhistorique de Française*, **67** (5), 135-137.
- DELIBRIAS G., GUILLIER M.-T. & LABEYRIE J., 1966 - Gif Natural Radiocarbon Measurements II. *Radiocarbon*, **8** (1), 74-95.
- DELIBRIAS G., GUILLIER M.-T. & LABEYRIE J., 1969 - Gif Natural Radiocarbon Measurements III. *Radiocarbon*, **11** (2), 327-344.
- DELIBRIAS G. & MORZADEC-KERFOURN M.-T., 1975 - Evolution du marais de Dol-de-Bretagne (Ille-et-Villaine, France) au Flandrien. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **2**, 59-70.
- DELSINNE N., 2005 - Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire d'embouchure de la Seine. *Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique*. Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse Normandie, Caen, 185 p.
- DIOT M.-F. & TASTET J.-P., 1996 - Paléo-environnements holocènes et limites chrono-climatiques enregistrés dans un marais estuarien de la Gironde (France). *Quaternaire*, **6** (2), 63-75.
- EDWARDS R.J., 2005 - Sea levels: abrupt events and mechanisms of change. *Progress in Physical Geography*, **29** (4), 599-608.
- ELHAI H., 1963 - *La Normandie occidentale entre la Seine et le golfe normand-breton* : étude morphologique. Thèse de Doctorat, Université de Paris, Paris. Imprimerie Bière, Bordeaux, 624 p.
- ENGELHART S.E. & HORTON B.P., 2012 - Holocene sea level database for the Atlantic coast of the United States. *Quaternary Science Reviews*, **54**, 12-25.
- FROUIN M., SEBAG D., DURAND A., LAIGNEL B., SALIEGE J.-F., MAHLER B.J. & FAUCHARD C., 2007 - Influence of paleo-topography, base level and sedimentation rate on estuarine system response to the Holocene sea-level rise: The example of the Marais Vernier, Seine estuary, France. *Sedimentary Geology*, **200** (1-2), 15-29.
- FROUIN M., DURANDA A., SEBAG D., HUAULT M.-F., OGIER S., VERRECCHIA E.P. & LAIGNEL B., 2009 - Holocene evolution of a wetland in the Lower Seine Valley, Marais Vernier, France. *The Holocene*, **19** (5), 717-727.
- FROUIN M., SEBAG D., DURAND A. & LAIGNEL B., 2010 - Palaeoenvironmental evolution of the Seine estuary during the Holocene. *Quaternaire*, **21** (1), 71-83.
- GABET C., 1973 - Le banc de tourbe sur l'éstran de la baie de Perroche (Île d'Oléron). *Recueil de la Société d'Archéologie et d'Histoire de la Charente Maritime*, **25**, 297-307.
- GANDOUIN E., 2003 - *Enregistrement paléoclimatique interdisciplinaire de la transgression holocène : signature paléo-environnementale des Chironomidae (Diptères) du Bassin de Saint-Omer (France)*. Thèse de Doctorat, Université Lille 1 Sciences et Technologies, Lille, 256 p.
- GANDOUIN E., VAN VLIET-LANOË B., FRANQUET E., ANDRIEU-PONEL V., KEEN D.H., PONEL P., MEURISSE M., BRULHET J. & BROCANDEL M., 2007 - Analyse en haute résolution de l'enregistrement de la transgression holocène dans un secteur subsident du littoral français : le bassin-marais de Saint-Omer (Pas-de-Calais, France). *Géologie de la France*, **2007-1**, 11-32.
- GANDOUIN E., PONEL P., ANDRIEU-PONEL V., GUITER F., DE BEAULIEU J.L., DJAMALI M., FRANQUET E., VAN VLIET-LANOË B., ALVITRE M., MEURISSE M., BROCANDEL M. & BRULHET J., 2009 - 10,000 years of vegetation history of the Aa palaeoestuary, St-Omer Basin, northern France. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **156** (3-4), 307-318.
- GARNAUD S., 2003. *La sédimentation fine sur une plate-forme interne actuelle macrotidale: la Baie de Seine sud-orientale (France)*. Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse Normandie, Caen, 378 p.
- GARNAUD S., LESUEUR P., CLET M., LESOURD S., GARLAN T., LAFITE R. & BRUN-COTTAN J.-C., 2003 - Holocene to modern fine-grained sedimentation on a macrotidal shoreface-to-inner-shelf setting (eastern Bay of the Seine, France). *Marine Geology*, **202** (1-2), 33-54.
- GAUDIN L., 2004 - *Transformations spatio-temporelles de la végétation du nord-ouest de la France depuis la fin de la dernière glaciation. Reconstitutions paléo-paysagères*. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Rennes, 762 p.
- GEHRELS W.R., 1999 - Middle and late Holocene sea-level changes in eastern Maine reconstructed from foraminiferal saltmarsh stratigraphy and AMS ¹⁴C dates on basal peats. *Quaternary Research*, **52** (3), 350-359.
- GIRESSÉ P., 1969 - *Essai de sédimentologie comparée des milieux fluvio-marins du Gabon, de la Catalogne et du Sud-Cotentin*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, Caen, 730 p.
- GIRESSÉ P. & LAUTRIDOU J.-P., 1973 - Les formations quaternaires du littoral du Golfe normand-breton entre Coutainville et Avranches. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **10** (2), 89-102.
- GOSLIN J., VAN VLIET-LANOË B., STÉPHAN P., DELACOURT C., FERNANE A., GANDOUIN E., HÉNAFF A., PENAUD A. & SUANEZ S., 2013 - Holocene relative sea-level changes in western Brittany (France) between 8000 and 4000 cal. yr BP: reconstitution from basal-peat deposits. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, **2013-4**, 425-444.
- GOSLIN J., 2014 - *Reconstitution de l'évolution du niveau marin relatif holocène dans le Finistère (Bretagne, France) : dynamiques régionales, réponses locales*. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 355 p.
- HUAULT M.-F., 1980 - Nouvelles recherches palynologiques sur le Marais Vernier. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **17** (1-2), 53-56.
- HUAULT M.-F., 1985 - Apports des diatomées à la reconstitution des paléoenvironnements : l'exemple du Marais Vernier lors de la transgression flandrienne. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **22** (4), 209-217.
- HUAULT M.-F., 1986 - Etude palynologique d'un sondage dans le marais de la Harelle, Heurteauville (Seine-Maritime). *Revue Archéologique de l'Ouest*, **3**, 23-27.
- HUAULT M.-F. & LEFEBVRE D., 1974 - Le Postglaciaire de la Basse-Seine. Sédiments et chronostratigraphie. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **11** (3-4), 253-256.
- JOLY C., 2004 - Histoire végétale d'une tourbière littorale : le marais des Bourbes (Olonne-sur-Mer, Vendée). *Annales de Paléontologie*, **90**, 187-207.
- JOLY C. & VISET L., 2009 - Evolution of vegetation landscapes since the Late Mesolithic on the French West Atlantic coast. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **154** (1-4), 124-179.
- KEMP A.C., HORTON B.P., VANN D.R., ENGELHART S.E., GRAND PRE C.A., VANE C.H., NIKITINA D. & ANISFELD S.C., 2012 - Quantitative vertical zonation of salt-marsh foraminifera for reconstructing former sea level; an example from New Jersey, USA. *Quaternary Science Reviews*, **54**, 26-39.
- KENDALL R.A., MITROVICA J.X., MILNE G.A., TÖRNQVIST T.E. & LI Y., 2008 - The sea-level fingerprint of the 8.2 ka climate event. *Geology*, **36** (5), 423-426.
- LABOREL J., MORHANGE C., LAFONT R., LE CAMPION J., LABOREL-DEGUEN F. & SARTORETTO S., 1994 - Biological evidence of sea-level rise during the last 4500 years on the rocky coasts of continental southwestern France and Corsica. *Marine Geology*, **120** (3-4), 203-223.
- LAMBECK K., 1997 - Sea-level change along the French Atlantic and Channel coast since the time of the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **129** (1), 1-22.
- LARSONNEUR C., 1971 - *Manche centrale et baie de Seine : géologie du substratum et des dépôts meubles*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, Caen, 394 p.
- LEFÈVRE P., ROUVILLOIS A., GAFFET M.A. & BIGNOT G., 1980 - Alternances de sédimentation marine et continentale durant l'Holocène en Plaine maritime picarde. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **17** (1-2), 25-33.
- LEORRI E., CEARRETA A. & MILES G., 2012 - Field observations and modelling of Holocene sea-level changes in the southern Bay of Biscay: implication for understanding current rates of relative sea-level change and vertical land motion along the Atlantic coast of SW Europe. *Quaternary Science Reviews*, **42**, 59-73.

- LESPEZ L., CLET-PELLERIN M., DAVIDSON R., HERMIER G., CARPENTIER V. & CADOR J.-M., 2010 - Middle to Late Holocene landscape changes and geoarchaeological implications in the marshes of the Dives estuary (NW France). *Quaternary International*, **216** (1-2), 23-40.
- LONG A.J. & HUGHES P.D.M., 1995 - Mid- and late-Holocene evolution of the Dungeness foreland, UK. *Marine Geology*, **124** (1-4), 253-271.
- MASSEY A.C., GEHRELS W.R., CHARMAN D.J., MILNE G.A., PELTIER W.R., LAMBECK K. & SELBY K.A., 2008 - Relative sea-level change and postglacial isostatic adjustment along the coast of south Devon, United Kingdom. *Journal of Quaternary Science*, **23** (5), 415-433.
- MORHANGE C., LABOREL J. & HESNARD A., 2001 - Changes of relative sea level during the past 5000 years in the ancient harbor of Marseilles, Southern France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **166** (3-4), 319-329.
- MORZADEC-KERFOURN M.-T., 1969 - Variations de la ligne de rivage au cours du post-glaciaire le long de la côte nord du Finistère. Analyses polliniques de tourbes et de dépôts organiques littoraux. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **6** (4), 285-318.
- MORZADEC-KERFOURN M.-T., 1974 - Variations de la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire. Analyses polliniques de dépôts organiques littoraux. *Mémoires de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, **17**, 1-208.
- MORZADEC-KERFOURN M.-T., 1995 - Coastline changes in the Armorican Massif (France) during the Holocene. *Journal of Coastal Research. Special Issue, 17: Holocene cycles, Climate, Sea Levels and Sedimentation*. C.W. Finkl, Jr ed.; Jubilee Volume in Celebration of the 80th Birthday of Rhodes W. Fairbridge, 197-203.
- MORZADEC-KERFOURN M.-T., 2002 - Histoire holocène de la baie du Mont-Saint-Michel. In: Bonnot-Courtois, C.; Caline, B; L'Homer, A. & Le Vot, M. (eds) - *La baie du Mont-Saint-Michel et l'estuaire de la Rance. Environnements sédimentaires, aménagements et évolution récente*. *Bulletin Centres de Recherches Elf Exploration-Production, Mémoire*, **26**, 153-163.
- MORZADEC-KERFOURN M.-T., 2005 - Interaction between sea-level changes and the development of littoral herbaceous vegetation and autotrophic dinoflagellates. *Late quaternary coastal and marine deposits of northwest Europe: a tribute to Hansjörg Streif*. C. Baeteman & R. Gehrels eds. *Quaternary International*, **133-134**, 1137-140.
- MRANI-ALAOUI M. & ANTHONY E.J., 2011 - New data and a morphodynamic perspective on mid- to late-Holocene palaeoenvironmental changes in the French Flanders coastal plain, southern North Sea. *The Holocene*, **21** (3), 445-453.
- MUNAUT A.-V. & GILOT E., 1977 - Recherches palynologiques et datations 14 C dans les régions côtières du Nord de la France. I. Phases transgressives et stabilisations dunaires flandriennes dans l'estuaire de la Canche (Pas-de-Calais). *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **14** (3), 17-25.
- MURRAY J., 2006 - *Ecology and applications of benthic foraminifera*. Cambridge University Press, Cambridge, 426 p.
- PLANCHAIS N. & CORILLON R., 1968 - Recherche sur l'évolution récente de la flore et de la végétation de Belle-Ile-en Mer (56), d'après l'analyse pollinique de la tourbière submergée de Ster-Vraz. *Bulletin de la Société Botanique de France*, **115**, 441-458.
- PONTEE N.I., TASTET J.-P. & MASSÉ L., 1998 - Morpho-sedimentary evidence of Holocene coastal changes near the mouth of the Gironde and on the Medoc Peninsula, SW France. *Oceanologica Acta*, **21** (2), 243-261.
- PREUSS H., 1979 - Progress in computer evaluation of sea-level data within the IGCP Project no. 61. In K. Suguio (ed.), *Proceedings of the 1978 International Symposium of Coastal Evolution in the Quaternary September 11-18, 1978*. Brazilian National Working Group for the IGCP Project 61, São Paulo, 104-134.
- REGNAULD H., JENNINGS S.C., DELANEY C. & LEMASSON L., 1996 - Holocene sea-level variations and geomorphological response: an example from northern Brittany (France). *Quaternary Science Reviews*, **15** (8-9), 781-787.
- REGNAULD H., 1999 - L'élévation et les variations du niveau marin à l'Holocène terminal dans l'Ouest français : une approche par les dépôts de tempêtes. *Quaternaire*, **10** (2-3), 181-188.
- REIMER P.J., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BLACKWELL P.J., RAMSEY C.B., BUCK C.E., CHENG H., EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GROOTES P.M., GUILDERSON T.P., HAFIDASON H., HAJDAS I., HATTÉ C., HEATON T.J., HOFFMANN D.L., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KAISER K.F., KROMER B., MANNING S.W., NIU M., REIMER R.W., RICHARDS D.A., SCOTT E.M., SOUTHON J.R., STAFF R.A. TURNER C.S.M. & VAN DER PLICHT J., 2013 - Intcal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **55** (4), 1869-1887.
- ROSSI V., HORTON B.P., CORBETT D.R., LEORRI E., PEREZ-BELMONTE L. & DOUGLAS B.C., 2011 - The application of foraminifera to reconstruct the rate of 20th century sea level rise, Morbihan Golfe, Brittany, France. *Quaternary Research*, **75** (1), 24-35.
- SHENNAN I., 1982 - Interpretation of Flandrian sea-level data from the Fenland, England. *Proceedings of the Geologists' Association*, **93** (1), 53-63.
- SHENNAN I., 1986 - Flandrian sea-level changes in the Fenland I. The geographical setting and evidence of relative sea-level changes. *Journal of Quaternary Science*, **1** (2), 119-153.
- SHENNAN I., 2007 - Overview - Sea-level studies. In A.E. Scott (ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier, Amsterdam, 2967-2974.
- SHENNAN I. & HORTON B.P., 2002 - Holocene land- and sea-level changes in Great Britain. *Journal of Quaternary Science*, **17** (5-6), 511-526.
- SHOM., 2013 - *Marine Altimetric References, Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. Edition SHOM, Brest, 113 p.
- SOMMÉ J., MUNAUT A.-V., EMONTSPHOHL A.F., LIMONDIN-LOZOUET N., LEFÈVRE D., CUNAT N., MOUTHON J. & GILOT E., 1992 - Weichsélien ancien et Holocène marin à Watten (plaine maritime, Nord, France). *Quaternaire*, **3** (2), 87-89.
- SORREL P., TESSIER B., DEMORY F., DELSINNE N. & MOUAZÉ D., 2009 - Evidence for millennial-scale climatic events in the sedimentary infilling of a macrotidal estuarine system, the Seine estuary (NW France). *Quaternary Science Reviews*, **28** (5-6), 499-516.
- STANFORD J.D., HEMINGWAY R., ROHLING E.J., CHALLENGER P.G., MEDINA-ELIZALDE M. & LESTER A.J., 2011 - Sea-level probability for the last deglaciation: A statistical analysis of far-field records. *Global and Planetary Change*, **79** (3-4), 193-203.
- STÉPHAN P., 2011 - Colmatage sédimentaire des marais maritimes et variations relatives du niveau marin au cours des 6000 dernières années en rade de Brest (Finistère). *Noroi*, **220**, 9-37.
- STÉPHAN P., 2012 - Une régression marine au Bronze final en Bretagne ? ou le reflet de changements morphosédimentaires importants à la côte. In M. Melin & C. Mougne (dir.), *L'homme, ses ressources et son environnement dans le Nord-Ouest de la France à l'âge du Bronze : actualité de la recherche* : actes du Séminaire archéologique de l'Ouest, 22 mars 2012, Université de Rennes 1. Mémoires de Géosciences Rennes, H.S. 8. Editions de Géosciences Rennes, 131-139.
- STÉPHAN P. & LAFORGE M., 2013 - Mise au point sur l'évolution géomorphologique et le devenir des flèches de galets du Loc'h de Landévennec (Bretagne, France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, **2013-2**, 191-208.
- STÉPHAN P., GOSLIN J., PAILLER Y., MANCEAU R., SUANEZ S., VAN VLIET-LANOË B., HÉNAFF A. & DELACOURT C., 2014 - Holocene salt-marsh sedimentary infillings and relative sea-level changes in West Brittany (France) using foraminifera-based transfer functions. *Boreas*, DOI: 10.1111/bor.12092.
- STUIVER M., REIMER P.J. & REIMER R., 2013 - Radiocarbon calibration program revision 7.0. Copyright 1986-2013.
- SUANEZ S., DEHOUCQ A. & STÉPHAN P., 2008 - Incertitude de la mesure de terrain en géomorphologie littorale. Approche statistique et quantification des marges d'erreur. In P. Allard, D. Fox & B. Picon (eds.), *Incertitude et environnement, la fin des certitudes scientifiques*. Ecologie Humaine. Edisud, Aix-en-Provence, 127-139.
- TASTET J.-P. & PONTEE N.I., 1998 - Morpho-chronology of coastal dunes in Médoc. A new interpretation of Holocene dunes in Southwestern France. *Geomorphology*, **25** (1-2), 93-109.
- TASTET J.-P., ROUSSOT-LARROQUE J. & CLAVÉ B., 2000a - Palaeo-environmental Study Area P15: West Bank of the Gironde Estuary, west coast, France. In R.G. McInnes, D.J. Tomalin & J. Jakeways, (dir.), *LIFE Environment Project: LIFE-97 ENV/UK/000510 1997-2000 Coastal change, climate and instability: Final Technical Report*. Isle of Wight Center for the Coastal Environment, Newport, 57 p.
- TASTET J.-P., ROUSSOT-LARROQUE J. & CLAVÉ B., 2000b - Palaeo-environmental Study Area P16 East Bank of the Gironde Estuary, west coast, France. In R.G. McInnes, D.J. Tomalin, & J. Jakeways, (dir.), *LIFE Environment Project: LIFE-97 ENV/UK/000510 1997-2000 Coastal change, climate and instability: Final Technical Report*. Isle of Wight Center for the Coastal Environment, Newport, 57 p.

- TERS M., 1973** - Les variations du niveau marin depuis 10 000 ans, le long du littoral atlantique français. In *Le Quaternaire : géodynamique, stratigraphie et environnement : travaux français récents. 9^e congrès international de l'INQUA, Christchurch, Décembre 1973*. Comité National Français de l'INQUA, Paris, 114-135.
- TERS M., 1986** - Variations in Holocene sea level on the french Atlantic coast and their climatic significance. In M.R. Rampino, J.E. Sanders, W.S. Newman & L.K. Königsson (eds.), *Climate: history, periodicity and predictability*. Van Nostrand Reinhold, New York, 204-237.
- TERS M., DELIBRIAS G., DENÈFLE M., ROUVILLOIS A. & FLEUR A., 1980** - Sur l'évolution géodynamique du Marquenterre (Basse-Somme) à l'Holocène et durant le Weichselien ancien. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **17** (1-2), 11-23.
- TESSIER B., BILLEAUD I., SORREL P., DELSINNE N. & LESUEUR P., 2012** - Infilling stratigraphy of macrotidal tide-dominated estuaries. Controlling mechanisms: Sea-level fluctuations, bedrock morphology, sediment supply and climate changes (The examples of the Seine estuary and the Mont-Saint-Michel Bay, English Channel, NW France). *Sedimentary Geology*, **279**, 62-73.
- TISNÉRAT-LABORDE N., PATERNE M., MÉTIVIER B., ARNOLD M., YIOU P., BLAMART D. & RAYNAUD S., 2010** - Variability of the northeast Atlantic sea surface D14C and marine reservoir age and the North Atlantic Oscillation (NAO). *Quaternary Science Reviews*, **29** (19-20), 2633-2646.
- TOOLEY M.J., 1978** - Sea-level Changes during the last 9000 Years in North-West England. *The Geographical Journal*, **140** (1), 18-42.
- TÖRNQVIST T.E., DE JONG A.F.M., OOSTERBAAN A. & VAN DER BORG K., 1992** - Accurate dating of organic deposits by AMS 14C measurement of macrofossils. *Radiocarbon*, **34** (3), 566-577.
- TÖRNQVIST T.E., GONZALES J.L., NEWSOM L.A., VAN DER BORG K., DE JONG A.F.M. & KURNIK C.W., 2004** - Deciphering Holocene sea-level history on the U.S. Gulf Coast: A high-resolution record from the Mississippi Delta. *Geological Society of America Bulletin*, **116** (7-8), 1026-1039.
- VAN DE PLASSCHE O., 1986** - *Sea-level research: a manual for the collection and evaluation of data*. Geobooks, Norwich, 617 p.
- VAN DE PLASSCHE O., 1991** - Coastal submergence of the Netherlands, NW Brittany (France), Delmarva Peninsula (VA, USA) and Connecticut (USA) during the last 5500 to 7 500 sidereal years. In R. Sabadini (ed.), *Glacial isostasy, sea level and mantle rheology*. Kluwer, Dordrecht, 285-300.
- VAN DER WOUDE J.D. & ROELEVELD W., 1985** - Paleoecological evolution of an interior coastal zone: the case of the Northern France coastal plain. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **22** (1), 31-39.
- VAN VLIET-LANOË B., GOSLIN J., HALLÉGOUËT B., HÉNAFF A., DELACOURT C., FERNANE A., FRANZETTI M., LE CORNEC E., LE ROY P. & PENAUD A. 2014a** - Middle- to late-Holocene storminess in Brittany (NW France): Part I – morphological impact and stratigraphical record. *The Holocene*, **24** (4), 413-433.
- VAN VLIET-LANOË B., PENAUD A., HÉNAFF A., DELACOURT C., FERNANE A., GOSLIN J., HALLÉGOUËT B. & LE CORNEC E. 2014b** - Middle- to late-Holocene storminess in Brittany (NW France): Part II – The chronology of events and climate forcing. *The Holocene*, **24** (4), 434-453.
- VERGER F. & FLORSCHÜTZ F., 1960** - Sur l'existence à Fromentine (Vendée) d'une couche de tourbe du début de l'Atlantique. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, **251**, 891-893.
- VINK A., STEFFEN H., REINHARDT L. & KAUFMANN G., 2007** - Holocene relative sea-level change, isostatic subsidence and the radial viscosity structure of the mantle of northwest Europe (Belgium, the Netherlands, Germany, southern North Sea). *Quaternary Science Reviews*, **26** (25-28), 3249-3275.
- VISSET L., 1982** - Nouvelles recherches palynologiques (Boréal-Actuel) dans les marais de Brière : Ile d'Errand en Saint-Malo-de-Guersac (Loire-Atlantique, France). *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **19** (1), 29-38.
- VISSET L., 1987** - Etude pollenanalytique de quelques sites du Marais poitevin. *Quaternaire*, **2**, 81-91.
- VISSET L., BORNE V., MAISONNEUVE E. & NIKODIC J., 1989** - Environnement du site néolithique des Chatelliers-en-Auzay (Vendée). *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, **86** (7), 203-205.
- VISSET L., VOELTZEL D., MAISONNEUVE E., NIKODIC J., MARGEREL J.-P. & BORNE V., 1990** - Paléocécologie holocène des marais du Rocher en Maillezais dans le marais poitevin (littoral atlantique, France). *Quaternaire*, **1** (2), 111-121.
- VISSET L., GIRARCLOS O. & LAMBERT G.-N., 1994** - La forêt de chênes sur tourbe à l'île d'Errand dans le marais de Brière (Massif armoricain, France). Palynologie et premiers résultats dendrochronologiques. *Quaternaire*, **5** (2), 69-77.
- VISSET L., SELLIER D. & L'HELGOUAC'H J., 1995** - Le paléoenvironnement de la région de Carnac. Sondages dans le marais de Kerdual, la Trinité-sur-Mer (Morbihan). *Revue Archéologique de l'Ouest*, **12**, 57-71.
- VISSET L., L'HELGOUAC'H J. & BERNARD J., 1996** - La tourbière submergée de la pointe de Kerpenhir à Locmariaquer (Morbihan). Etude environnementale et mise en évidence de déforestations et de pratiques agricoles néolithiques. *Revue Archéologique de l'Ouest*, **13**, 79-87.
- VISSET L. & BERNARD J., 2006** - Evolution du littoral et du paysage, de la presqu'île de Rhuys à la rivière d'Étel (Massif armoricain - France), du Néolithique au Moyen Âge. *Revue d'Archéométrie*, **30**, 143-156.
- WANG J., MASSÉ L. & TASTET J.-P., 2006** - Sedimentary facies and paleoenvironmental interpretation of a Holocene marsh in the Gironde Estuary in France. *Acta Oceanologica Sinica*, **25** (6), 52-62.
- WOODROFFE S.A. & HORTON B.P., 2005** - Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific. *Journal of Asian Earth Sciences*, **25** (1), 29-43.