

GÉOMORPHOLOGIE ET DÉPÔTS QUATERNAIRES DE LA RIVE NORD DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE : CONSÉQUENCES GÉOTECHNIQUES POUR LES GRANDS TRAVAUX PORTUAIRES ET URBAINS



par C. LECHEVALIER* et J. GUYADER**

RÉSUMÉ

Sur la rive nord de l'estuaire, les argiles oxfordiennes et kimmeridgiennes et les formations sablo-argileuses aptiennes, en pendage N-E, sont entaillées par des niveaux de creusement étagés, que recouvrent des nappes grossières.

Ces paléotopographies, d'âges divers mais où les formes et les nappes würmiennes se distinguent par leur ampleur, sont envoyées au Sud sous les séries silto-sableuses du Flandrien, où s'intercalent tourbes et cordons de galets. Au nord, elles se relient à une falaise morte dont la longue élaboration sous des systèmes morpho-climatiques variés est attestée par les formations qui en empâtent la base.

Il en résulte une grande diversité de situations géotechniques, tant pour la profondeur et la nature des niveaux d'ancrage que pour les conditions de circulation de l'eau au sein des formations quaternaires.

Les conséquences sur quelques grandes réalisations ou projets portuaires et urbains en sont ensuite analysées.

ABSTRACT

MORPHOLOGY AND QUATERNARY DEPOSITS ON THE NORTH BANK OF THE SEINE ESTUARY; GEOTECHNICAL IMPLICATIONS FOR PORTUARY AND URBAN REALISATIONS.

On the north bank of the Seine estuary, the oxfordian-kimmeridgian clays, as well as the aptian sandy-clay formations, with a NE dip, have been exposed by several phases of down-cutting and choked by coarse deposits.

These paleotopographies, of various age (but where Würmian features are distinguishable by their sheer importance) are buried to the South by the Flandrian series of silty-clay, interbedded by peats and pebble off-shore spits. To the North, they join a fossil cliff where long period of formation, under various morphoclimatic systems, is shown by the deposits which mask its basis.

The consequence is a large variety of geotechnical situations, both for the depth and nature of the levels usable for foundations and for the conditions of water circulation within the quaternary deposits. The implication for some important portuary and urban realisations and projects are analyzed.

Sous un paysage d'atterrissements naturels ou anthropiques d'une grande uniformité, la rive nord de l'estuaire de la Seine masque des conditions géotechniques inégales qui, fâcheusement pour l'ingénieur, sont d'autant plus variées que l'on se rapproche, vers l'Ouest, de l'agglomération havraise.

Cette situation résultant directement des phases morphogénétiques quaternaires, il est donc nécessaire de recourir à une approche géomorphologique pour l'étude des faits observés, afin de pouvoir les replacer dans un cadre spatial permettant à la fois leur explication et leur généralisation.

* Centre de Géographie Physique. Université de Paris X, 200, avenue de la République, 92001 Nanterre Cédex 01.

** Section de Géologie du Port Autonome du Havre, Chaussée Roger-Meunier, 76600 Le Havre.

1. DONNÉES MORPHO-STRATIGRAPHIQUES

Le substratum a été profondément entaillé par des érosions quaternaires successives, qui ont engendré des ensembles de formes aujourd'hui enfouies sous des matériaux variés.

1. Le substratum.

Il est constitué d'une série de Jurassique supérieur (pendage nord-est : 1%), recouverte par des formations infra-crétacées discordantes, que surmontent les craies cénomaniennes, au pendage identique mais un peu plus faible.

- L'Oxfordien supérieur n'est représenté ici que par sa partie terminale : argiles noirâtres de Villerville (15 mètres) et argiles brunâtres à lits gréseux, ferrugineux et oolithiques (« marnes de Criqueboeuf » 25 mètres).

- Le Kimmeridgien se compose d'un ensemble marno-calcaire (argiles à nombreux bancs calcaires 20 mètres) et des épaisses « argiles d'Octeville » (25 mètres).

- L'Infra-crétacé correspond à des affleurements plus hétérogènes fossilisant une paléo-topographie :

- à la base, sur 25 mètres, sables ferrugineux rattachés biostratigraphiquement à l'Aptien supérieur;

- 3 à 4 mètres de poudingues ferrugineux de l'Albien inférieur et moyen;

- au sommet, argiles noires du Gault (3-4 mètres) surmontées de gaize (4-5 mètres) : Albien supérieur.

- Le Cénomaniens apparaît de façon très complète : craie glauconieuse à la base, puis craie jaune à silex et craie grise « de Rouen ».

2. Les érosions quaternaires.

Elles correspondent principalement aux phases de creusement fluvial de périodes froides; elles ont amené la formation d'un système de terrasses étagées, entaillé dans le Jurassique et l'Infra-Crétacé, et prenant appui sur l'actuel rebord d'estuaire développé dans les craies cénomaniennes.

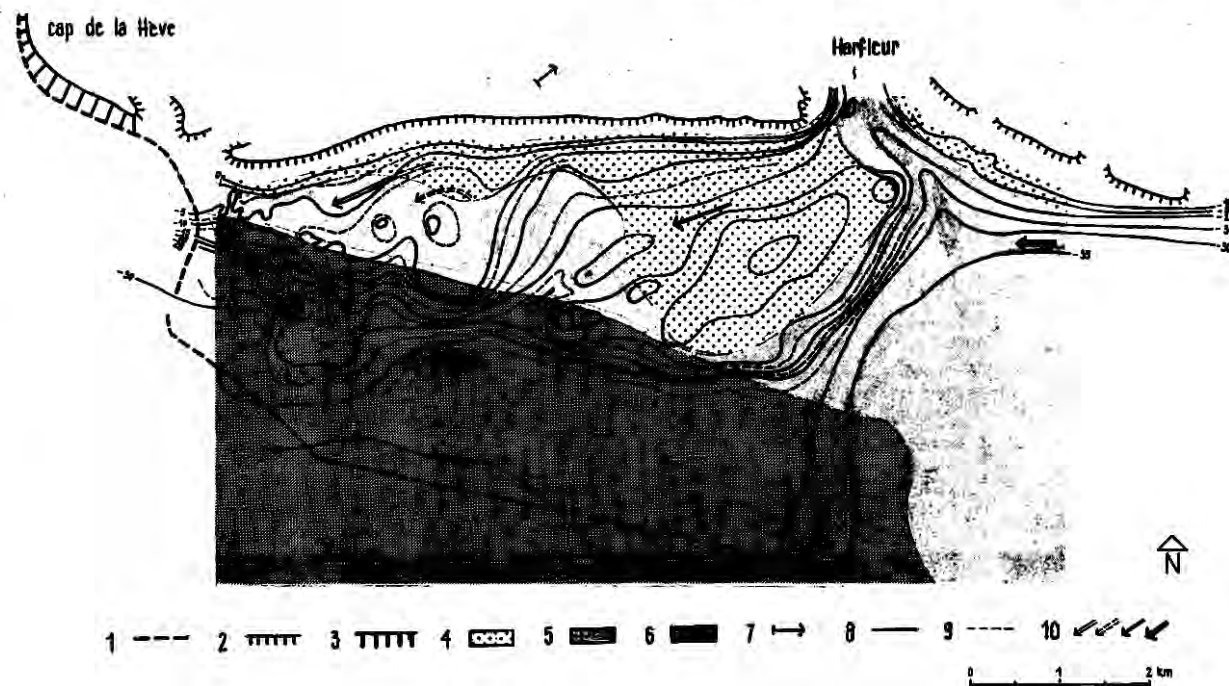


Fig. 1. - Morphologie du toit du substratum

Topographie et formes actuelles : 1 - Littoral actuel et endiguements portuaires. 2 - Rebord d'estuaire. 3 - Falaise vive.
Nature du substratum : 4 - Albo-aptien. 5 - Kimmeridgien. 6 - Oxfordien. 7 - Pendage.
Morphologie du substratum : 8 - Isobathes du toit du substratum, en cotes N.G.F. (équidistance : 5 mètres). 9 - Courbes intercalaires. 10 - principaux chenaux successifs.

Fig. 1. - Morphology of the substratum top

Topography and actual forms : 1 - actual coast line and harbour embankments; 2 - estuary border; 3 - live cliff.
Nature of the substratum : 4 - Albo-Aptian; 5 - Kimmeridgian; 6 - Oxfordian; 7 - dip.
Substratum morphology : 8 - isobaths of the substratum top. in N.G.F. spot level (vertical interval : 5 meters); 9 - middle spot levels; 10 - successive main channels.

Les étapes d'approfondissement de la vallée sont jalonnées par des niveaux dont l'altitude, l'extension et la morphologie sont fonctions d'âges s'échelonnant du Quaternaire moyen au Würm récent; les formes les plus anciennes ont été en outre partiellement retouchées par abrasion marine.

Coupes et cartographie des isobathes du substratum permettent de distinguer plusieurs étapes :

1°) Si on excepte quelques hauts lambeaux, trop rares pour être caractérisés, un premier creusement est décelable vers les cotes - 4/ - 5 NGF; il ne paraît toutefois avoir laissé de traces qu'au pied du talus crayeux, dans l'Ouest de la ville.

2°) Vers - 9 NGF, un second creusement, subsistant pour l'essentiel dans la moitié ouest de la ville, se caractérise par la grande régularité de sa topographie.

3°) En contrebas d'un petit talus apparaissent plusieurs niveaux d'érosion, compris entre - 15 et - 22 NGF, mais dont l'extension et les rapports respectifs demeurent difficiles à déterminer.

4°) Enfin, après un vigoureux talus de 10 à 12 mètres, plus nettement marqué à l'Est qu'à l'Ouest, se développe un niveau de creusement inférieur à - 30 NGF, qui intéresse la majeure partie du centre de l'estuaire; mal nivelé, il présente des formes de détail au milieu desquelles s'incise un chenal plus déprimé.

A mesure que s'approfondissait la vallée, le déplacement du chenal principal de la Seine à la hauteur du Havre a entraîné des creusements de plus en plus accentués dans la moitié orientale de la ville et, au Sud, dans toute la zone portuaire.

Le talus constituant le rebord nord de l'estuaire résulte d'une évolution morphologique complexe, tantôt versant de vallée périglaciaire, tantôt falaise vive; aujourd'hui, c'est une falaise morte masquant, mais en les conservant, les traces enchevêtrées des érosions quaternaires.

3. Les formations quaternaires et leur stratigraphie.

Les formes résultant de ces différents épisodes d'érosion sont recouvertes par des matériaux quaternaires de nature et d'origine variées.

Du centre de l'estuaire vers son rebord, quatre types de situations peuvent être rencontrés :

1°) Dans les zones de creusement récent (substratum inférieur à - 30 NGF) apparaissent successivement :

- des graviers de fond, matériaux de la nappe périglaciaire würmienne, souvent remaniée, sur une épaisseur de quelques mètres à 15-20 mètres;
- des dépôts continentaux, d'âge boréal-atlantique (argiles, sables fins, tufs, tourbes) à distribu-

tion irrégulière et dont l'épaisseur maximum n'excède pas une dizaine de mètres;

- des dépôts saumâtres et marins flandriens : silts et dépôts organiques, sables, graviers et galets.

2°) Aux abords du talus séparant ce niveau inférieur à - 30 NGF des niveaux supérieurs, on trouve dans un agencement très irrégulier des formations remaniées de ces derniers (graviers périglaciaires) et des matériaux empruntés au talus (argiles et marno-calcaires jurassiques). Vers le sommet, les dépôts flandriens sont souvent coupés de cordons de galets venus s'appuyer sur ce rebord de terrasse.

3°) Les niveaux d'érosion supérieurs à - 20 NGF ne portent que de minces nappes de graviers périglaciaires (de quelques décimètres à 4-5 mètres). Elles ont été démantelées et remaniées, notamment lors des remontées marines ultérieures, et sont directement recouvertes par des dépôts saumâtres flandriens, à puissantes intercalations tourbeuses.

4°) Au pied du rebord d'estuaire, l'empatement de la base de la falaise morte est dû à l'accumulation de matériaux d'origine très variée, dans une stratigraphie complexe, liée aux conditions de mise en place :

- formations issues du versant (grands panneaux ou blocs de craie, éboulis crayeux et presles, argiles à silex remaniées);
- formations fluviatiles (cailloutis périglaciaires des lambeaux de nappes anciennes);
- formations marines ou saumâtres (sables et silts, galets littoraux);
- formations éoliennes (sables soufflés, loess et limons éoliens).

II. CONSÉQUENCES GÉOTECHNIQUES

1. Détermination de la profondeur et de la nature des niveaux possibles de fondation.

La variation parfois brutale de la profondeur du substratum, ses changements de nature et la variété des matériaux de recouvrement, de médiocre valeur géotechnique posent, pour chaque opération, le problème du choix d'un niveau de fondation (J. Guyader, 1977).

1°) Le substratum jurassique offre les bonnes caractéristiques d'argiles marneuses, gonflantes, raides, compactes, où la pression limite (P_l) mesurée au pressiomètre Menard est de 25-30 bars, avec des modules pressiométriques (E) de 120 bars, pour la couche franche (P_l n'étant que d'environ 15 bars au toit altéré des argiles et atteignant par contre 30 à 40 bars, avec la profondeur).

2°) Le substratum infra-crétacé est de valeur très inégale : médiocre au toit des formations sablo-argileuses ($PI = 13$ bars en moyenne, $E = 64$ bars), il peut selon les cas, soit offrir de meilleures caractéristiques avec la profondeur ($PI = 25-35$ bars, $E = 100$ bars), soit au contraire garder sur de grandes épaisseurs la même médiocrité ; par contre il est susceptible d'indurations limitées, qui peuvent le rendre localement intéressant.

3°) Les graviers de fond sont généralement bien charpentés, ($PI = 25$ bars en moyenne, $E = 100$ bars) mais avec des différences tenant à l'importance de la matrice sableuse et aux possibles remaniements.

Les graviers situés sur les niveaux plus élevés sont souvent beaucoup plus compactés ($PI = 40$ bars, $E = 200-250$ bars), mais seulement lorsqu'ils sont en couche épaisse ; l'irrégularité de ce caractère empêche donc de pouvoir toujours compter sur ce niveau de fondation.

4°) Les matériaux fins, continentaux, saumâtres ou marins sont en général médiocres. Les formations silto-tourbeuses, fortement compressibles, ont de faibles caractéristiques mécaniques ($PI = 1,5$ à 8 bars, $E = 10$ à 40 bars). Seuls les sables marins offrent des valeurs intéressantes (PI souvent supérieure à 25 bars, $E = 150$ bars) mais avec des passées plus faibles ($PI = 15$ bars, $E = 80$ bars) et une base assez hétérogène.

Ils sont d'une grande sensibilité aux remaniements (d'où les problèmes de compressibilité des couches sous-jacentes et de pompages éventuels à proximité).

2. Localisation des venues d'eau.

Trois nappes constantes doivent être prises en considération.

1°) La nappe de la craie. Elle repose sur la gaize et alimente de nombreux petits exutoires le long du rebord d'estuaire, entre $+ 30$ NGF à l'Ouest et $+ 20$ NGF dans l'Est de la ville. Ces eaux circulent alors aux travers des matériaux hétérogènes de la basse falaise morte, selon un régime lié à celui de la nappe et dans des conditions que l'urbanisation n'a pas été sans modifier. Ces écoulements rejoignent la plaine alluviale où, vers 0 NGF, se mélangent eau douce et eau saumâtre.

2°) La nappe des sables graveleux et coquilliers. Elle repose sur les silts de la série continentale et subit l'influence de la marée : elle est vraisemblablement en communication (là où les silts n'existent pas) avec la nappe des alluvions grossières.

3°) La nappe des graviers de fond. Elle se retrouve de manière à peu près constante, avec un

niveau piézométrique pouvant atteindre environ $+ 2$ NGF. L'onde de marée s'y répercute, avec un amortissement fonction de la distance par rapport à l'estuaire.

Outre la nappe des graviers de fond et celle des sables coquilliers (dont le marnage s'est accentué depuis les travaux de dragage), plusieurs nappes locales existent dans les formations estuariennes sus-jacentes, il semble toutefois s'agir de nappes fermées, où aucun marnage sensible n'a pu être enregistré.

III. EXEMPLE DE QUELQUES GRANDS TRAVAUX RÉCENTS

1. Tracé du nouveau chenal d'accès au port du Havre.

L'ancien tracé dessinait une courbe destinée à éviter le banc de l'Éclat, supposé correspondre à un petit dôme kimmeridgien. Ce tracé s'avérant gênant pour l'accès des gros navires, une reconnaissance a été entreprise qui a montré que ce banc n'était constitué que de matériaux grossiers quaternaires. Un levé détaillé a pu alors faire apparaître l'existence d'un paléoméandre comblé : il a été ainsi possible de tirer parti de cette paléotopographie pour adopter un tracé rectiligne, aux meilleures conditions économiques.

2. Réalisation du quai de l'Europe (extensions de la zone industrialo-portuaire)

Cet exemple illustre bien la brutalité possible du changement de conditions géotechniques. Son tracé NE-SW est pratiquement perpendiculaire au principal rebord de terrasse : sur une distance de quelques dizaines de mètres, le toit du substratum s'abaisse d'une douzaine de mètres. Cette situation ayant été établie grâce à une reconnaissance préalable détaillée (une trentaine de forages), il a été possible d'opter pour une double technique de mise en œuvre : au Nord, quai sur caissons reposant sur les graviers de fond sus-jacents aux sables ferrugineux albiens ; au Sud, au franchissement du talus et au-delà, quai sur pieux ancrés dans le substratum kimmeridgien.

3. Réalisation d'un parking souterrain, place Thiers.

La nature et la localisation du projet (en pied de falaise morte) auraient exigé une reconnaissance préalable détaillée. Celle-ci s'est limitée à un forage

et à un essai au pénétromètre statique : ils ont fait apparaître la présence du substratum kimmeridgien à 0 NGF et l'existence de venues d'eau issues de la craie (vers + 1 NGF, en juillet) d'où la nécessité d'un cuvelage étanche.

Lors de l'exécution de la paroi moulée dont les panneaux devaient s'ancrer dans le Kimmeridgien, on a dû constater un brutal enfoncement du substratum à - 4 NGF vers le Sud, en quelques mètres de distance, du fait de la présence d'un rebord de terrasse : plus de la moitié des ferraillements des panneaux se sont donc avérés trop courts au moment de la mise en œuvre, ce qui a causé au chantier une gêne considérable, à laquelle se sont ajoutées des venues d'eau abondantes à une cote supérieure de plusieurs mètres à ce qu'observé en été.

4. Problèmes posés par les grands travaux dans la partie NW de la basse ville.

Dans cette zone, une convergence de difficultés géotechniques se manifeste pour toutes les opérations impliquant de grands terrassements ou des fondations non superficielles : bâtiments importants, passage de grandes voiries en viaduc ou en tunnel.

- Le rebord d'estuaire est ici constitué jusqu'au tiers de sa hauteur par les sables infra-crétacés ; la basse falaise morte est donc riche en grands panneaux de craie effondrés, tandis que la seule bonne couche d'ancrage (le Kimmeridgien) se trouve très bas (vers + 5 NGF).

- La consolidation de ces matériaux éboulés, recouverts d'argiles à silex remaniées et de limons éoliens, est moins bonne qu'ailleurs : les infiltrations et venues d'eau s'arrêtent au toit du Kimmeridgien, qui joue le rôle d'une possible surface de glissement, d'autant que la proximité du littoral, actif jusqu'à une date récente, amenait le développement de processus intenses à faible distance.

- Au-delà du vallon de Sainte-Adresse, se retrouve une situation identique affectant cette fois

une portion vive du littoral, où l'équilibre fragile des matériaux de la basse falaise ne tient qu'à l'assainissement et à la protection du littoral liés à l'urbanisation.

Le progrès des connaissances géomorphologiques relatives à la rive nord de l'estuaire de la Seine revêt donc un double intérêt :

- il permet d'abord de mieux cerner les étapes de mise en place du cadre spatial de l'estuaire, au cours du Quaternaire. Une cartographie détaillée du toit du substratum pour toute la moitié nord de l'estuaire, en préparation, devrait conduire à mieux définir l'une des données les plus importantes à cet égard.

- Dans la pratique, il débouche sur une meilleure compréhension des situations géotechniques susceptibles d'être rencontrées et permet de dégager les principes de leur répartition géographique, offrant de ce fait un intérêt prospectif certain.

A partir de là, il serait possible de moduler, en les adaptant au contexte prévisible, des reconnaissances qui gardent encore trop souvent un caractère formel.

BIBLIOGRAPHIE

- Guyader J.**, 1968. - Le Jurassique supérieur de la baie de Seine. Étude stratigraphique et micropaléontologique. Thèse d'Université. Paris. 268 p + 1 Atlas.
- Guyader J.**, 1977. - Conditions de fondation dans la zone industrielle et portuaire du Havre. *Bull. Soc. Géol. Normandie.*, LXIV, Fasc. 4, 4^e trimestre. Journées Lennier n° 1, p. 173-179.
- Lechevallier C.**, 1975. - Plateau, Vallées et Littoral du Caux occidental. Étude morphologique. Thèse 3^e cycle, Paris X. 265 p. 97 pl. 1 Atlas photo.

Géomorphologie et dépôts quaternaires de la rive Nord de l'estuaire de la Seine. Conséquences géotechniques pour les grands travaux portuaires et urbains

Claude Lechevalier;J. Guyader

Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire, Année 1981, Volume 18, Numéro 1
p. 41 - 45

[Voir l'article en ligne](#)

Sur la rive nord de l'estuaire, les argiles oxfordiennes et kimmeridgiennes et les formations sablo-argileuses aptiennes, en pendage N-E, sont entaillées par des niveaux de creusement étages, que recouvrent des nappes grossières. Ces paléotopographies, d'âges divers mais où les formes et les nappes würmiennes se distinguent par leur ampleur, sont ennoyées au Sud sous les séries silto-sableuses du Flandrien, où s'intercalent tourbes et cordons de galets. Au nord, elles se relient à une falaise morte dont la longue élaboration sous des systèmes morpho-climatiques variés est attestée par les formations qui en empatent la base. Il en résulte une grande diversité de situations géotechniques, tant pour la profondeur et la nature des niveaux d'ancrage que pour les conditions de circulation de l'eau au sein des formations quaternaires.

Les conséquences sur quelques grandes réalisations ou projets portuaires et urbains en sont ensuite analysées.

Avertissement

L'éditeur du site « PERSEE » – le Ministère de la jeunesse, de l'éducation nationale et de la recherche, Direction de l'enseignement supérieur, Sous-direction des bibliothèques et de la documentation – détient la propriété intellectuelle et les droits d'exploitation. A ce titre il est titulaire des droits d'auteur et du droit sui generis du producteur de bases de données sur ce site conformément à la loi n°98-536 du 1er juillet 1998 relative aux bases de données.

Les oeuvres reproduites sur le site « PERSEE » sont protégées par les dispositions générales du Code de la propriété intellectuelle.

Droits et devoirs des utilisateurs

Pour un usage strictement privé, la simple reproduction du contenu de ce site est libre.

Pour un usage scientifique ou pédagogique, à des fins de recherches, d'enseignement ou de communication excluant toute exploitation commerciale, la reproduction et la communication au public du contenu de ce site sont autorisées, sous réserve que celles-ci servent d'illustration, ne soient pas substantielles et ne soient pas expressément limitées (plans ou photographies). La mention Le Ministère de la jeunesse, de l'éducation nationale et de la recherche, Direction de l'enseignement supérieur, Sous-direction des bibliothèques et de la documentation sur chaque reproduction tirée du site est obligatoire ainsi que le nom de la revue et- lorsqu'ils sont indiqués - le nom de l'auteur et la référence du document reproduit.

Toute autre reproduction ou communication au public, intégrale ou substantielle du contenu de ce site, par quelque procédé que ce soit, de l'éditeur original de l'oeuvre, de l'auteur et de ses ayants droit.

La reproduction et l'exploitation des photographies et des plans, y compris à des fins commerciales, doivent être autorisés par l'éditeur du site, Le Ministère de la jeunesse, de l'éducation nationale et de la recherche, Direction de l'enseignement supérieur, Sous-direction des bibliothèques et de la documentation (voir <http://www.sup.adc.education.fr/bib/>). La source et les crédits devront toujours être mentionnés.