

Évolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours

Coordinatrice
Valérie Foussard



Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours

Coordinatrice : Valérie Foussard ⁽¹⁾

Auteurs : Valérie Foussard ⁽¹⁾, Antoine Cuvilliez ⁽²⁾, Philippe Fajon ⁽³⁾, Cédric Fisson ⁽¹⁾, Patrick Lesueur ⁽⁴⁾, Olivier Macur⁽⁵⁾

Contributeurs :

Nicolas Bacq ⁽¹⁾
Jean-Jacques Barreau ⁽⁶⁾
Frédéric Delaive ⁽⁷⁾
Geneviève Freger ⁽⁸⁾
Pascal Galichon ⁽⁸⁾
Yann Labiste ⁽⁶⁾
Benoit Laignel ⁽⁹⁾
Jean Legagneur ⁽¹⁰⁾
Geneviève Quemeneur ⁽¹⁰⁾

- (1) GIP Seine-Aval
- (2) Université du Havre, LOMC FRE 3102 CNRS
- (3) UMR 7041 ArScAn (CNRS, Paris I, Paris X, MCC) équipe Archéologies environnementales, DRAC Haute-Normandie
- (4) Université de Caen, UMR CNRS 6143 M2C
- (5) Grand Port Maritime de Rouen
- (6) Conseil général de Seine-Maritime
- (7) Université de Rennes 2
- (8) Grand Port Maritime du Havre
- (9) Université de Rouen, UMR CNRS 6143 M2C
- (10) Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Haute-Normandie

Sommaire

INTRODUCTION	3	CHAPITRE 4. DES IMPLICATIONS POUR LES US- AGES DE L'ESTUAIRE	30
CHAPITRE 1. LA SEINE : UN FLEUVE HISTORIQUE- MENT IMPRÉVISIBLE	4	L'évolution des conditions de navigation et développement des activités portuaires	30
La morphologie du lit jusqu'au 19ème siècle	4	L'amélioration des conditions de navigation dans l'estuaire	30
Les principaux usages et les contraintes liées au milieu naturel	5	Le développement des activités du port du Havre	31
Les conditions de navigation	5	Le développement des activités du port de Rouen	31
Les aides essentielles pour naviguer	6	Des travaux de maintien des profondeurs induits par les usages	34
L'activité spécifique de pêche	7	La gestion et la valorisation des sédiments de dragage	36
L'activité portuaire	8	La réutilisation des sédiments dragués	36
CHAPITRE 2. D'UN ESTUAIRE « SAUVAGE » VERS UN ESTUAIRE AMÉNAGÉ	10	Le stockage « à terre »	36
Les projets d'aménagements proposés au 18ème et 19ème siècle (Thélu, 2005)	10	Le clapage en mer	37
Les projets de dérivation de la Seine par des canaux	10	L'activité de pêche en Seine : un usage menacé par les aménagements	38
Les projets de barrage	10	Les débordements de la Seine contrôlés ?	39
Les projets d'aménagement du lit mineur de la Seine	11	CONCLUSION	41
Les aménagements du lit de la Seine	12	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	42
Les premiers grands travaux : 1848 à 1867	12	GLOSSAIRE	44
La deuxième phase des travaux : 1867 à 1895	13		
La troisième phase des travaux : 1895 à 1922	14		
La quatrième phase des travaux : 1923 à 1960	15		
Section entre Poses et Rouen	15		
Section entre Rouen et Le Havre	16		
La cinquième phase des travaux : 1961 à 2008	17		
CHAPITRE 3. UNE ÉVOLUTION HYDROLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE GUIDÉE PAR L'HOMME	20		
La linéarisation du tracé de la Seine et évolution des îles	20		
La chenalisation des sections du lit de la Seine	21		
De Poses à Rouen	21		
De Rouen à Tancarville	22		
De Tancarville au Havre	23		
L'évolution hydrologique et la dynamique sédimentaire	25		
La modification des processus hydrodynamiques	25		
Un estuaire qui se comble	26		

Introduction

« [...] La Seine n'a été, jusque vers 1840, l'objet d'aucune amélioration (sauf celle de la construction de la dérivation éclusée de Pont-de-l'Arche), et si, en grosses eaux, la batellerie pouvait facilement trouver un tirant d'eau* de 2 mètres et même supérieur, en basses eaux le mouillage s'abaissait au-dessous de 0,65 m et même à 0,50 m en certains points. Aussi était-on obligé, en été, de charger très peu les bateaux et de les faire accompagner par des allèges ou « flettes » destinées à recevoir, en route, à la traversée des passages difficiles, une partie des marchandises, ou même à les transporter en dépôt à terre pour être reprises à un autre voyage, si la baisse des eaux venait à s'accroître. [...] » (ingénieur anonyme, 12 septembre 1891). Telles étaient décrites les conditions de navigation, usage prépondérant en Seine, au début du 19^{ème} siècle. En 2008, les profondeurs disponibles pour les navires naviguant entre Rouen et Le Havre sont supérieures à 10 m pour la majorité des marées (97 %). Depuis sa formation, l'estuaire de la Seine a été façonné au gré de facteurs naturels. En dépit de ces derniers, les hommes ont su tirer partie des avantages de la Seine qui est devenue un axe de communication de grande importance aussi bien entre l'amont et l'aval du fleuve que d'une rive à l'autre.

L'estuaire de la Seine (figure 1) accueille aujourd'hui d'importantes activités industrielles, portuaires, urbaines

et agricoles qui ont fait de lui, un espace fortement anthropisé. Pour maintenir ou développer les activités, des aménagements (endiguements, approfondissements, ...) ont été effectués au cours du temps. Cette dernière phase d'anthropisation débutée dès le milieu du 19^{ème} siècle, se poursuit encore à l'heure actuelle. Les diverses interventions humaines ont indéniablement perturbé ou du moins accéléré certains processus naturels modifiant, en permanence, la morphologie de l'estuaire.

Ainsi, depuis deux siècles, les révolutions technologiques aidant, l'estuaire de la Seine s'est peu à peu transformé en un anthroposystème dont l'évolution est guidée d'une part, par l'homme et d'autre part, par la nature. Distinguer les changements structurels liés aux facteurs anthropiques ou ceux liés aux facteurs naturels couplés aux variations climatiques n'est pas chose aisée. Toutefois, il existe un lien que ce fascicule tâchera de retranscrire, entre la morphologie de la Seine, les usages du fleuve et les aménagements qui en découlent. Après une présentation du contexte avant les premiers travaux (morphologie, conditions naturelles influentes et principaux usages de l'estuaire), les divers projets d'aménagements de la Seine proposés ou effectivement exécutés seront détaillés puis mis en relation avec l'évolution morphologique et l'évolution des usages du fleuve depuis ces deux derniers siècles.

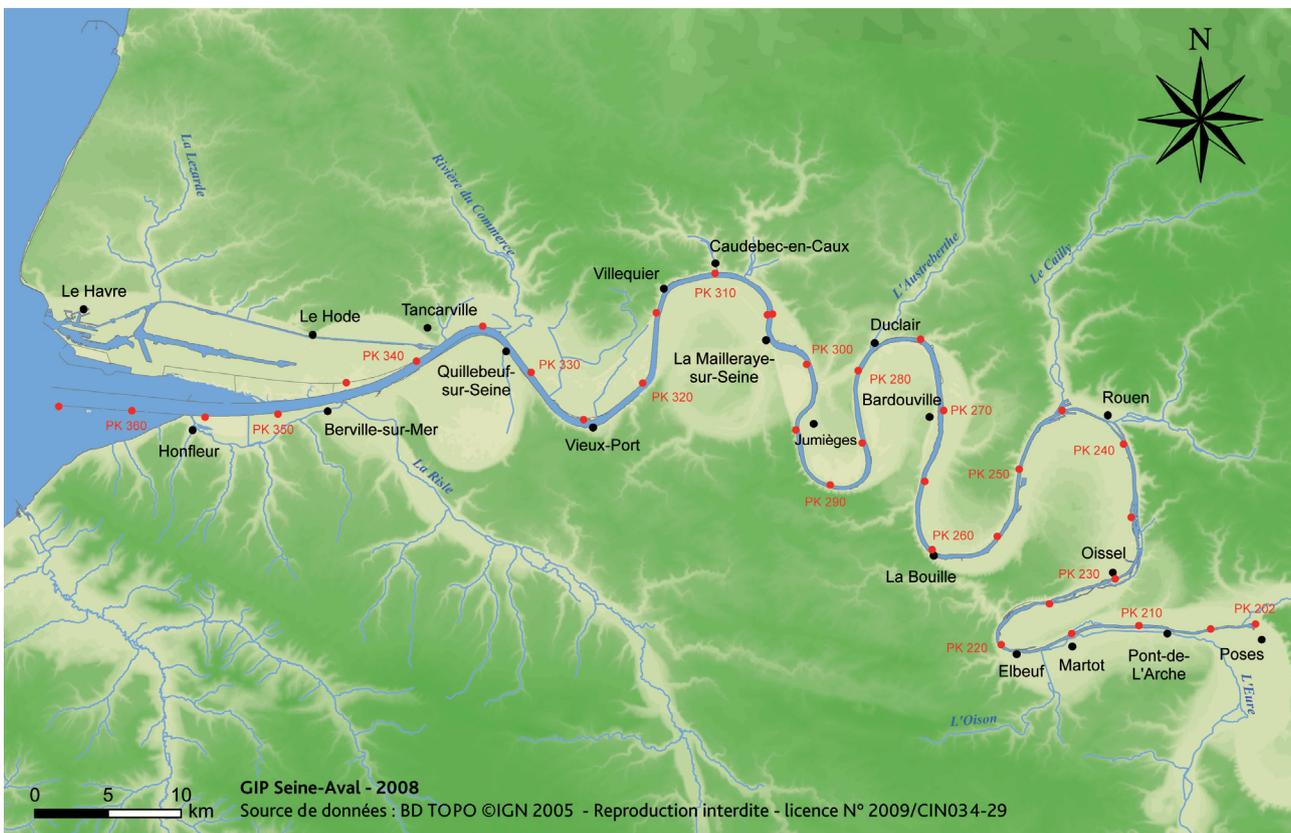


Figure 1 : L'estuaire de la Seine

Chapitre 1. La Seine : un fleuve historiquement imprévisible

La morphologie du lit jusqu'au 19ème siècle

Au 18ème siècle, dans sa partie estuarienne, la Seine était un fleuve large et peu profond, son lit était divisé en de multiples bras plus ou moins stables et son embouchure était constituée de bancs de sable mobiles (figure 2) (Lesueur *et al.*, 1999).

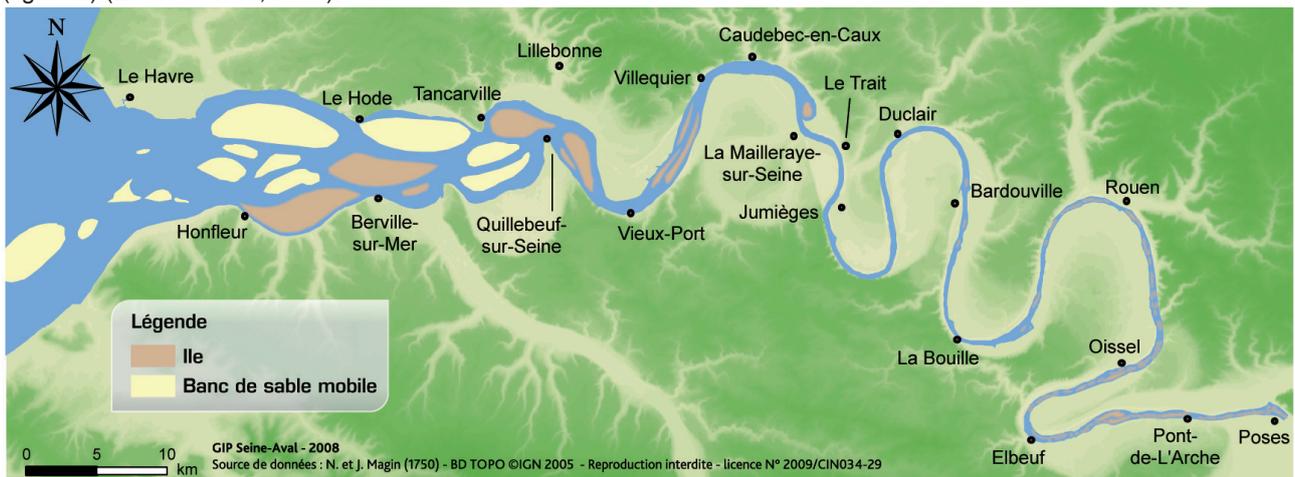


Figure 2 : Estuaire de la Seine en 1750 tiré de la carte de Magin *et al.*

De Poses à Rouen, le lit mineur de la Seine était naturellement fixe et parsemé de nombreuses îles (Thélu, 2005). Des pertuis* subsistaient tel que celui de Poses, long de trois kilomètres. Une dizaine de kilomètres plus en aval, à hauteur de la commune de Martot (pk* 216), un second passage étroit où affleuraient des roches calcaires, ne laissait s'écouler que 0,65 m voire 0,50 m d'eau lors de basses eaux (Labrouche, 2000 ; Martot, 2008). La faible hauteur des berges ne permettait pas une protection naturelle contre les inondations* qui étaient fréquentes lors des fortes marées et/ou des fortes crues*. De Poses jusqu'à l'embouchure, le lit majeur était composé de nombreuses zones humides et marais aux abords de la Seine.

De Rouen à Caudebec-en-Caux, le lit mineur de la Seine était naturellement fixe et régulier, formé d'une succession de hauts fonds (de 1 m à 2,30 m sous le niveau des plus basses mers) et de fosses (pouvant atteindre 12 m de profondeur à marée haute) (figure 3). Les hauts fonds tourbeux, sableux ou formés de galets les plus importants étaient : le seuil de Biessard (pk 250-252), le seuil de Grand-Couronne (pk 252-254), le seuil des Moulineaux (pk 255-259), les hauts fonds de Bardouville (pk 267-272), le haut fond* d'Yville (pk 285-288) et le banc des Meules (pk 305-307,5). Par ailleurs, ce secteur présentait quelques particularités morphologiques. La passe de Caumont-Mauny (pk 261.5 à 263) était très profonde et étroite (jusqu'à 13 mètres sous le niveau des basses mers avec un rétrécissement de la largeur de la Seine jusqu'à 140 m contre 300 mètres à un kilomètre en aval). Une dizaine d'îles était répartie principalement entre Rouen

et Duclair. Localisé ponctuellement sur l'une ou l'autre rive, une douzaine d'anses d'érosion profondes appelées « trous de Seine* » se présentait sous forme de plate-formes latérales situées à plusieurs mètres au dessus du zéro CMH*, au niveau des courbures du fleuve. Le flot* s'engouffrait sans difficulté dans ces anses d'érosion, attaquant les berges et rejetant les sédiments érodés dans le chenal. L'un des plus importants était le trou du Malac-

quis, situé en rive droite sur la commune du Trait (figure 3). Cette anse était ouverte sur la Seine sur plus d'un kilomètre et s'enfonçait dans les prairies alluvionnaires jusqu'à 430 m en 1893 (Lavoine *et al.*, 1885 ; GPMR-SEC. 2008).

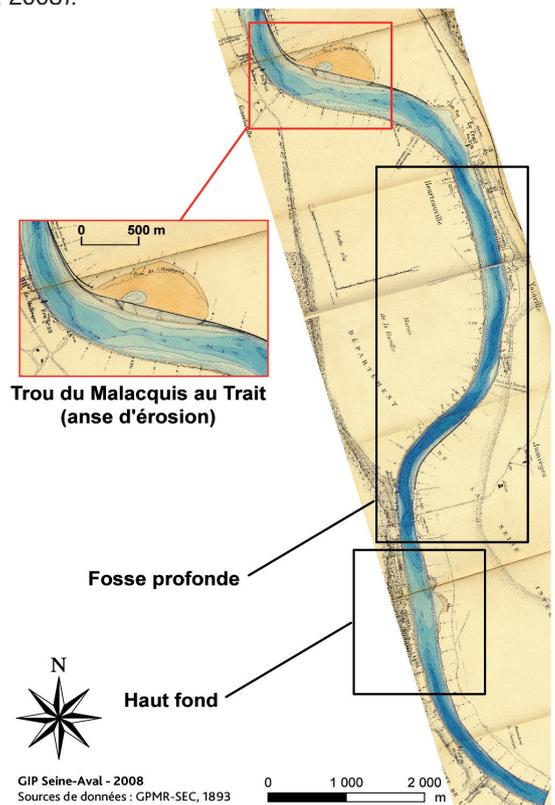


Figure 3 : Morphologie de la Seine aux alentours du Trait en 1893 (GPMR-SEC, 2008 ; GIP Seine-Aval)

De Caudebec-en-Caux jusqu'au Havre, la morphologie de la Seine changeait brutalement, les fonds constitués de dépôts sableux et vaseux devenaient instables. Le lit mineur de la Seine s'évasait et occupait progressivement la majeure partie de la plaine alluviale. Ainsi, au début du 19^{ème} siècle, l'embouchure de l'estuaire atteignait Caudebec-en-Caux voir même La Mailleraye-sur-Seine. A partir de cette dernière commune, le lit de la Seine s'élargissait pour passer de 1 km de large à 10 km au droit d'Honfleur, formant ainsi un lit en forme d'entonnoir (Reymondier, 1990). Ce large espace de mobilité permettait au fleuve très dynamique, de divaguer continuellement au gré des courants. Ponctuellement, des bancs stables subsistaient entre La Mailleraye-sur-Seine et Quillebeuf-sur-Seine : le banc tourbeux des Meules (pk 305-307,5) qui se situait à 2,30 m sous le niveau des plus basses mers, la passe de Villequier (pk 312-314) ou encore le banc sableux des Flacques (pk 321-322,5) à Aizier qui se situaient respectivement à 0,40 m et à 1.05 m sous le niveau des plus basses mers (Lavoine *et al.*, 1885). En aval de Quillebeuf-sur-Seine, la Seine se divisait en de multiples bras peu profonds contournant les nombreux bancs mobiles (bancs sableux de Saint Sauveur, de Tancarville, ...) ou les quelques bancs fixes hérités de la géologie (dont le banc du Ratier, d'Amfard et le banc de l'Éclat au Nord-Ouest du port du Havre (Lennier, 1885). Cet étalement du fleuve à l'embouchure impliquait des hauteurs d'eau moindres dans le chenal qui n'excédaient pas 4,30 m lors des grandes marées contre 1.75 m lors des plus faibles mortes-eaux (Reymondier, 1990).

Les principaux usages et les contraintes liées au milieu naturel

Au début du 19^{ème} siècle, une importante activité commerciale et touristique s'était développée dans la partie amont de la Seine. Une multitude de produits et de voyageurs étaient transportés par voie fluviale à travers la France et au-delà via des canaux qui reliait la Seine à la Loire (France) et à l'Escaut (traversant le nord de la France, la Belgique et les Pays-Bas). De nombreux ports ou points d'accostage jalonnaient la Seine permettant des liaisons régulières entre Paris et les grandes villes situées en amont. En revanche, en aval de Paris, ce type de transports était beaucoup plus réduit du fait notamment des difficultés de navigation (Le Sueur, 1989).

Les conditions de navigation

Dès le 16^{ème} siècle, les navires internationaux devaient s'arrêter systématiquement au port du Havre du fait de leur important tirant d'eau* et de la difficulté pour remonter la Seine. Les armateurs étaient obligés de transborder leurs marchandises sur de plus petits navires à faible tirant d'eau*. Cette méthode devenait très coûteuse, d'autant plus qu'une fois arrivé à Rouen, un second transbordement devait être fait sur des navires encore plus petits pour acheminer les marchandises jusqu'à Paris (le tirant d'eau* entre Rouen et Poses était de 1.50 à 2,50 m selon le débit de la Seine et les marées) (Thélu, 2005).

Au début du 19^{ème} siècle, les navires remontant la Seine du Havre jusqu'à Rouen étaient en général des bateaux à voile de 2 ou 3 mètres de tirant d'eau* ou à vapeur (le premier en 1816) n'excédant pas 2,25 m de tirant d'eau*, transportant en moyenne 100 à 120 tonnes de marchan-

dises (contre 200 à 300 tonnes en pleine charge) (Thélu, 2005). Ces bateaux ne naviguaient guère plus de six mois dans l'année à pleine charge sur la Seine (Le Sueur, 1989). Le temps de transit à la montée entre Le Havre et Rouen était de 8 jours et lorsque les conditions étaient peu favorables, cette durée de transit pouvait atteindre 30 jours avec des échouages à chaque marée. En revanche, à la descente depuis Rouen, ces navires avaient besoin de 2 à 3 jours, voir de 8 à 10 jours maximum en conditions défavorables, pour atteindre Le Havre (Thélu, 2005). Dès 1820, des bateaux à vapeur (à fond plat et à roue à aubes) ont commencé à assurer le transport de voyageurs (à partir de 1836, un service régulier a été créé pour assurer un voyage quotidien Paris – Rouen – Le Havre). A cette période, le tourisme vert se développait de plus en plus permettant à de nombreux voyageurs de découvrir la Seine par voie fluviale (Labrousche, 2000).

En aval de Caudebec-en-Caux, les bancs sableux très mobiles, se déplaçaient régulièrement sous l'action des courants (flot*, jusant*, crue*, houle) (Thélu, 2005). Ces mouvements faisaient varier très fréquemment la position du chenal de navigation tout comme les hauteurs d'eau. Parfois sur certains bancs mobiles, la hauteur d'eau ne dépassait pas un mètre en basse mer de vive-eau*. Les hauts fonds permettaient seulement aux navires de 3,30 m de tirant d'eau* de passer en haute mer de vive-eau*. Un navire pouvait facilement s'échouer là où il pouvait passer la veille. Chaque transport par navire devenait alors un périple dont la réussite dépendait plus de la marée et de la position des bancs sableux très mobiles, que des qualités de pilotage des équipages. Entre 1842 et mars 1847, 184 navires se sont échoués au niveau du haut fond* de Villequier (pk 312-314) (Lavoine *et al.*, 1885).

Par ailleurs, cette mobilité ne permettait pas de baliser le chenal de navigation de manière fiable. Selon un rapport de la Chambre de Commerce de Rouen (1891), jusqu'au début du 19^{ème} siècle, le balisage du chenal était rudimentaire, excepté au niveau des hauts fonds stables. Il était délimité à l'aide de simples perches surmontées d'un balai positionnées au voisinage du chenal de navigation. Les connaissances des pilotes de Seine* devenaient alors des atouts essentiels pour repérer le chenal de navigation (Dumans, 1957). C'est en 1818 que le premier phare a été installé à Quillebeuf-sur-Seine puis, à partir de 1838, une série de feux a été mise en place entre Rouen et Caudebec-en-Caux, ainsi qu'une série de phares entre Caudebec-en-Caux et Berville-sur-Mer (Reymondier, 1990).

Les vents avaient également une grande influence sur la réussite de remontée des navires jusqu'à Rouen. Lorsqu'ils étaient faibles, ils ne permettaient pas aux bateaux à voile (les plus répandus à cette époque) d'atteindre Quillebeuf-sur-Seine en une seule marée. En fonction de la manière dont ils s'échouaient, lors de l'arrivée du flot*, ils risquaient fortement de chavirer. Lorsque les vents étaient violents, les navires risquaient d'être emportés. Le mascaret, essentiellement dangereux en aval de Duclair, a également été la cause de nombreux dommages aux bateaux et de nombreux naufrages (Thélu, 2005). Lorsque des navires s'échouaient sur un banc, il n'était pas rare que les équipages les abandonnent avant l'arrivée du mascaret pour les rejoindre un ou deux kilomètres plus en amont, s'ils avaient résisté (Dumans, 1957). Un « magasin de sauvetage » a été créé en 1778 à Quillebeuf-sur-Seine pour

réparer les dégâts causés par ce phénomène aux différents navires (Thélu, 2005). Le secteur compris entre Quillebeuf-sur-Seine et Villequier était un véritable « cimetière de navires » où, de 1830 à 1852, 105 navires ont été définitivement perdus (Dumans, 1957).

En amont de Duclair, les obstacles à la navigation étaient d'une autre nature. Le chenal était en général stable mais composé d'une alternance de hauts fonds et de fosses, parfois associés à des réductions naturelles ou artificielles de la largeur du chenal. Ceci engendrait une accélération locale des courants. Par ailleurs, la présence d'îles, de bras secondaires et des trous de Seine* était également à l'origine de perturbations locales du régime hydraulique (Reymondier, 1990 ; Thélu, 2005). A hauteur de la commune de Martot (pk 216), le pertuis* était infranchissable à marée basse (0,65 m voire 0,50 m d'eau lors de basses eaux) et particulièrement périlleux lors des fortes eaux, tout comme au niveau du pertuis de Poses. Lorsque les hauteurs d'eau étaient insuffisantes entre Rouen et Paris notamment, de la marchandise ou des voyageurs pouvaient être débarqués afin d'alléger les embarcations et ainsi permettre le passage des hauts fonds (Labrousche, 2000 ; Martot, 2008).

Outre ces obstacles naturels, des ponts constituaient des entraves à la navigation comme le pont de bateaux à Rouen qui permettait le passage d'une rive à l'autre, de 1626 à 1831 (Thélu, 2005). Il se situait à hauteur de l'ancien pont Mathilde qui était devenu impraticable en 1603. En attendant son remplacement, un pont formé de 19 bateaux a été installé pour assurer un franchissement de la Seine (un passage par bac, plus en amont, ne s'était pas avéré efficace). Il avait l'avantage d'être démontable occasionnellement, pour laisser passer quelques navires ou pour éviter qu'il soit endommagé lors de crue* ou de dégel si ces phénomènes pouvaient être anticipés (Tanguy, 2009). Le pont de Pont-de-l'Arche, non loin de Poses, constituait, au 19ème siècle, le point noir le plus redouté de l'estuaire amont. Parmi les 23 arches que possédait ce pont, la majorité d'entre elles étaient occupées par des moulins et l'arche marinière par laquelle les bateaux circulaient, était étroite. Ces structures engendraient une élévation du niveau de l'eau en amont, d'importants remous à leur hauteur et une chute d'eau d'une cinquantaine de centimètres en aval. Ce pont était très difficile à franchir sans une aide extérieure. Une écluse* à sas a été construite le long de la rive droite puis ouverte en 1813 pour faciliter son franchissement (Le Sueur, 1989).

Les aides essentielles pour naviguer

Pour parer aux difficultés de navigation en aval de Rouen, certains navires (suivant leur gabarit) faisaient escale à Quillebeuf-sur-Seine (jusqu'au 19ème siècle) et à Villequier pour embarquer des pilotes* pouvant les guider entre Le Havre et Rouen. Existants depuis le 14ème siècle, les pilotes étaient des habitants de Quillebeuf-sur-Seine reconnus comme étant « les meilleurs gens de mer à conduire vaisseaux montants et avalants en rivière de Seine ». Les pilotes connaissaient très bien la Seine et étaient en permanence avertis des déviations du chenal détectées lors de sondages réguliers des fonds. Ainsi, les pilotes guidaient les capitaines afin de parer aux moindres obstacles connus : les hauts fonds, les bancs mobiles non découvrant, les dérives éventuelles des navires

Le mascaret, également appelé « la barre » ou « le flot » en vallée de Seine, est une vague se propageant vers l'amont suite à une montée subite des eaux lors du flot*. L'estuaire de la Seine possédait des caractéristiques appropriées pour la formation du mascaret : fleuve peu profond en forme d'entonnoir avec un lit en pente douce (1 m de dénivellation sur 10 km) à fond relativement plat et enfin soumis à des marées de grande amplitude (7 à 9 m à l'embouchure) (Sequana-Normandie, 1999).

Lors des marées d'un coefficient supérieur à 100 (grandes marées d'équinoxe, par exemple), un important volume d'eau pénétrait dans l'estuaire de la Seine en un laps de temps réduit. Après avoir traversé une embouchure large et peu profonde, l'onde de marée atteignait les bancs présents au niveau de l'actuel marais Vernier. Les faibles profondeurs dans les chenaux et le rétrécissement soudain du lit dans la boucle de Quillebeuf-sur-Seine, rendaient plus ardue la propagation de la marée. La rencontre de la marée montante avec le courant descendant du fleuve s'ajoutant, une vague prenait naissance et remontait le fleuve à grande vitesse (en général suivie de petites ondes secondaires nommées les éteules). Au fur et à mesure de sa remontée, du fait de cet important volume d'eau se déplaçant dans un lit qui se rétrécit, la vague prenait de plus en plus de puissance avec une vitesse grandissante (Chanson, 2005 ; Lennier, 1885). En moyenne, la vitesse de la vague était de 25 km/h mais elle pouvait être bien supérieure telle que ce fut le cas en 1809 où elle a atteint plus de 39 km/h (Lennier, 1885). La hauteur de cette vague (de 0,60 à 2 m en Seine) était en général inférieure à l'amplitude maximale de marée mais sa rapidité d'élévation faisait d'elle un phénomène exceptionnel. Ainsi, après son passage, un exhaussement du niveau d'eau se produisait. Le niveau de l'eau augmentait jusqu'à 2,50 m en l'espace de quelques minutes, à Caudebec-en-Caux, point culminant de la puissance du mascaret (Université du Havre, 2002 ; Lennier, 1885). Au fur et mesure de sa remontée, l'énergie du mascaret se dissipait par frottement et sa vitesse diminuait jusqu'à disparition totale de la vague vers Duclair.

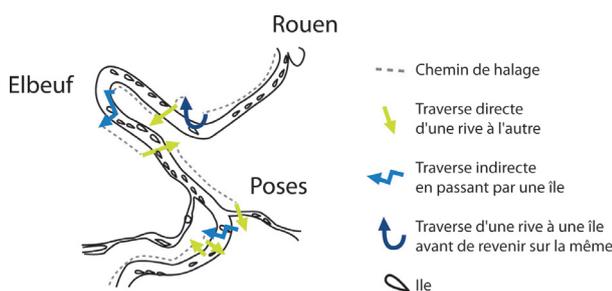
La géométrie du fond influait énormément sur la propagation du mascaret qui pouvait être renforcé, diminué voir stoppé. Par exemple, lorsque l'onde de marée rencontrait des fonds soudainement plus profonds, celle-ci continuait sa progression sans créer de déformation à la surface de l'eau donnant l'impression que la vague disparaissait pour réapparaître plus loin au niveau d'un haut fond* ou d'un banc. Du fait de la position changeante des bancs de sable, le mascaret en Seine pouvait apparaître à divers endroits entre Honfleur et Tancarville ce qui le rendait imprévisible. Ce dernier pouvait se former d'un côté ou l'autre du fleuve mais également sur toute sa largeur. Le phénomène du mascaret pouvait être renforcé et amplifié si le vent était orienté dans la direction de déplacement de la vague (Lavoine *et al.*, 1885).

Un témoignage de M. Lemasson, alors ingénieur en chef de la Seine-Inférieure en 1809, rendait compte de la puissance, de la rapidité et de la force destructive du mascaret à cet époque : « On ne peut se faire aucune idée du flot* des marées, à moins de l'avoir vu au moment où la barre arrive. Il est ordinaire de la voir rouler d'une grande hauteur sur toute la largeur du fleuve. C'est avec une vitesse à faire plus de dix lieues à l'heure, avec un bruit et un fracas extraordinaire, qu'elle s'annonce. "On peut juger d'après son énergie quels ravages elle fait, quand elle s'engouffre dans des criques pareilles à celles dont il s'agit ici » [allusion au trou Piquesard situé au pk 267 et 268] (Lavoine *et al.*, 1885).

liées aux courants (ce qui est encore le cas aujourd'hui). Ils représentaient une aide précieuse lors des trajets et des manœuvres (Dumans, 1957).

Pour franchir certains obstacles localisés dans l'estuaire, le halage* était impératif (pratique attestée en Seine depuis le 15^{ème} siècle). Assurant majoritairement le transport de marchandises, il était occasionnellement utilisé lors de transports de voyageurs à l'aide de petites embarcations dès le 17^{ème} jusqu'au début du 19^{ème} (Labrousche, 2000). Au 19^{ème} siècle, les chemins permettant le halage* étaient en très mauvais état surtout entre Rouen et La Mailleraye-sur-Seine où ils n'étaient pas suffisamment entretenus et étaient immergés régulièrement lors des pleines mers ou des crues*. Non protégés contre l'érosion, en certains points, ils étaient instables voire totalement détruits ce qui les rendaient impraticables sur toute leur longueur (Reymondier, 1990). Entre Poses et Rouen, les chemins de halage* étaient également en mauvais état et fréquemment inondés par les eaux du fleuve obligeant les « chevaux de rivière » utilisés pour cette tâche, à tirer les bateaux avec plus d'un mètre d'eau. La perte de chevaux par blessure ou noyade était récurrente. Au niveau du relais de Poses, en cas de problème, les chevaux devaient être sauvés en priorité au détriment des bateaux et de leurs cargaisons. Compte tenu des risques encourus et du coût des équipements (chevaux, matériels de halage*), ce service était très coûteux pour les capitaines des bateaux mais indispensables pour le franchissement des obstacles (Labrousche, 2000).

Autre difficulté lors de basses eaux, les haleurs suivis de leurs chevaux devaient effectuer de fréquents changements de rive (figure 4). Ces traversées directes ou par le biais d'une île, permettaient de guider les bateaux afin qu'ils empruntent le chenal le plus profond longeant l'une ou l'autre des rives, et également pour éviter les obstacles tels que les moulins situés dans les arches du pont de Pont-de-l'Arche ou les diverses pêcheries fixes entravant certains bras secondaires et parfois même le chenal de navigation (Le Sueur, 1989). A Pont-de-l'Arche, la

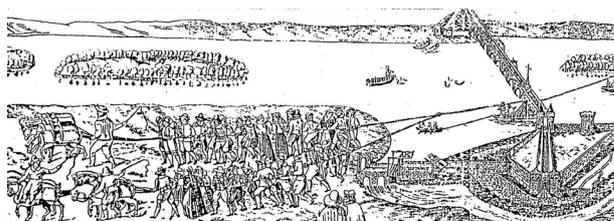


Source des données : Le sueur (1989)

Figure 4 : Exemple de changements de rive effectués lors d'un voyage en période de basses-eaux en 1829

difficulté était telle que la traversée de ce passage nécessitait 40 à 60 chevaux en renfort ainsi que 200 à 300 hommes selon le régime des eaux et la charge du bateau (figure 5). Dans les secteurs les moins contraignants entre Paris et Rouen, la traction d'un bateau (commercial ou d'agrément) nécessitait 6 à 8 chevaux (Thélu, 2005). A Poses, le franchissement du pertuis* qui s'étendait sur trois kilomètres était impossible lors de crues* ou de sévères étiages*. Lorsque sa traversée était engagée,

il fallait 16 à 56 chevaux mobilisés pour les plus grands bateaux en charge, huit traversées de la Seine sur les trois kilomètres et plus de cinq heures de manœuvre. Au milieu du 19^{ème} siècle, pas moins de 450 hommes travaillaient au halage* des bateaux sur les trois kilomètres du passage de Poses. Au niveau de ce village, diverses activités induites par le halage* s'étaient développées sur les bords de Seine : relais d'écurie, auberges, tavernes, maréchaux-ferrants, bourrelliers, cordiers, charpentiers de marine, approvisionnement des animaux en nourriture,... (Labrousche, 2000).



Source des données : Le sueur (1989)

Figure 5 : Le halage d'un bateau sous le Pont de l'Arche (vitrail de l'église Saint Vigor 16^{ème} siècle)

Jusqu'au 19^{ème} siècle, à Poses, aux péages royaux ou communaux (impôts, taxes pour les manœuvres, pour le passage des ponts, péages à toutes marchandises débarquées, ...) s'ajoutaient des « faux frais » qui étaient de véritables concessions : droit de bourgel (gratification payée au chef de pertuis pour son fils), droit de taraugage (aide payante effectuée en dehors du pertuis*), droit de palage (droit d'amarrage sur des pieux, propriétés des riverains), droit de parage (manœuvres effectuées pour empêcher les cordes de se bloquer lors du halage*), droit de bachot (indemnité pour conduire les aides à bords du bateau à haler). Les frais étaient cinq fois plus élevés à la remonte qu'à la descente et ceux liés au renouvellement ou réparation des cordes représentaient 10% des sommes dues par les capitaines (Labrousche, 2000).

L'activité spécifique de pêche

Jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle, les caractéristiques physiques de l'estuaire offraient une grande diversité d'habitats pour les poissons (zones d'alimentation, de refuge, de frai, ...). De nombreuses espèces estuariennes, marines ou d'eau douce, se développaient et circulaient librement. Parmi ces espèces figuraient des grands migrateurs tels que le saumon, la truite de mer, l'aloise franche, l'aloise feinte, la lamproie fluviale, la lamproie marine, l'esturgeon, l'éperlan et l'anguille (Costil *et al.*, 2002).

Fin 18^{ème} siècle, d'importants groupes de marsouins étaient observés au niveau de Petiville et Norville. Leur présence était signe d'une ressource piscicole riche et abondante. Au niveau du Marais Vernier et jusqu'à l'embouchure du Bolbec à Lillebonne, la morphologie de la Seine offrait une vaste étendue d'eau avec des zones hydrauliquement plus calmes, nourricières, attirant les poissons. Plus en amont à Caudebec-en-Caux ou à Duclair, les pêcheurs profitaient des zones humides latérales où les poissons se reposaient avant de poursuivre leur remontée jusqu'aux sources, sans entrave. Au niveau de l'embouchure, quelques ports étaient depuis longtemps, des ports de pêche à l'image du port du Havre

spécialisé dans la pêche à la morue ou le port de Honfleur qui commercialisait les morues et les harengs issus de leurs pêches côtières (Lavoine *et al.*, 1885)

Grâce à ces ressources piscicoles, l'activité de pêche était un usage important de l'estuaire. Diverses techniques de pêche professionnelle étaient employées : épervier, filet, épuisette, lignes de fond ou nasses en osier. En amont de Rouen, de nombreuses pêcheries fixes (ou gords) entravaient le fleuve. Elles étaient installées en général dans les bras secondaires de la Seine (accessibles à pied) et parfois même dans le chenal principal, obligeant les bateaux à quitter la zone de courant la plus profonde au risque de s'échouer (ARH, 2009 ; Le Sueur, 1989). Ces pêcheries étaient constituées d'une nasse disposée au centre du chenal, reliée à chacune des rives par une série de pieux de part et d'autre de la nasse formant ainsi un V, sur lesquels étaient fixés des filets.

L'activité portuaire

Au 19^{ème} siècle, plusieurs ports fluviaux ou maritimes jalonnaient la Seine. Ces derniers constituaient des points d'accostage ou de chargements de divers produits : suif, métaux, cuir, vin ou produits coloniaux (Le Sueur, 1989). Premier port rencontré en descente de l'estuaire de la Seine, le port de Poses était un point relais pour le halage* et constituait un lieu de péage et d'arrêt pour les transports de marchandises ou de voyageurs entre Rouen et Paris. Plusieurs ports ou points d'amarrage se succédaient ensuite, situés à : Pont-de-l'Arche, Elbeuf, Rouen (port de Commerce), Duclair, Caudebec-en-Caux, Pont-Audemer et Quillebeuf-sur-Seine. Ces modestes points d'amarrage localisés en aval de Rouen, permettaient de faire des haltes si les conditions de navigation étaient difficiles ou si des réparations de navires étaient nécessaires. Parfois, une flotte de pêche était également présente comme à Caudebec-en-Caux.

Existant depuis plusieurs siècles, le port de Rouen était déjà un port fluvial et maritime de grande importance. Avant les grands aménagements à la fin du 19^{ème} siècle, il était installé en rive droite sur un kilomètre. La rive gauche marécageuse, était utilisée pour l'ancrage des bateaux avant ou après déchargement puis pour la construction navale à partir du 13^{ème} siècle. De part sa position géographique, le port de Rouen constituait la plaque tournante du commerce français et international de produits agricoles, du vin, du bois, du sel, de draperies grâce notamment à une importante industrie textile sur Rouen,... Cette position s'est renforcée à partir du 18^{ème} siècle où Rouen a été relié par un réseau routier fiable, au Havre et à Paris. Jusqu'au 19^{ème} siècle, il constituait un lieu de transbordement de marchandises incontournable entre Le Havre et Paris mais également à l'échelle mondiale (GPMR, 2009).

A Lillebonne, un port subsistait jusqu'à ce qu'il soit abandonné au Moyen-âge suite à son atterrissement*. Longeant la rive droite, perpendiculairement au cours de la rivière de Bolbec, le port de Lillebonne représentait un port militaire. Sur la rive gauche, le port d'Harfleur lui a succédé et est devenu un port militaire accolé à l'exutoire de la Lézarde, pour être lui-même abandonné pour les mêmes raisons, au cours du 16^{ème} siècle au profit du port du Havre. Ce dernier avait alors une vocation militaire puis commerciale. Sur la rive gauche, le port d'Honfleur était spécialisé dans la pêche, le commerce

international et la construction navale jusqu'au début du 19^{ème} siècle. Malgré son envasement progressif, il resta un port de commerce plus local et un lieu de transbordement de marchandises. Ces ports étaient entourés de quelques points d'amarrage à Leurre, à Gravelle (actuels quartiers du Havre) et au Hode. Ils ont été rapidement abandonnés du fait d'un ensablement conséquent et continu (Furon, 1998, Labrousse, 2000 ; Lennier, 1885 ; Le Sueur, 1989).

Port de pêche puis militaire dès 1517, le port du Havre s'est peu à peu converti en port de commerce (1815). Cette transformation vers une activité principalement commerciale, était alors dépendante de l'activité du port de Rouen qui devenait de plus en plus tributaire d'un avant-port à l'embouchure de l'estuaire. L'augmentation progressive du gabarit des bateaux entrant en Seine impliquait un transbordement sur de plus petits navires pour atteindre Rouen ou même Paris. Le port d'Harfleur étant en déclin du fait de son ensablement, le port du Havre devenait alors stratégique pour le commerce international d'autant plus qu'au début du 19^{ème} siècle, il perdait sa fonction militaire. A partir de 1815, plusieurs bassins portuaires ont été construits. C'est à cette époque que le port du Havre s'est spécialisé dans le grand commerce (GPMH, 2009).

La Seine, avant la modernité

« Descendre la Seine jusqu'à son embouchure, ç'a été pendant bien des années l'un des vifs plaisirs ou l'un des beaux rêves des Parisiens. » C'est ainsi que Louis Baron présentait l'envie de naviguer vers la mer dans son parcours du fleuve « La Seine » (Baron, s.d.). La Seine qu'il raconte à l'aube du 20^{ème} siècle pour ses contemporains est déjà fortement marquée par l'anthropisation. Il évoque peu le cadre naturel, c'est l'homme qui aménage, qui marque son territoire, qui imprime son passage qui l'intéresse.

Le fait est que l'homme a toujours utilisé la Seine, à des degrés divers et avec une appréhension variable. Les moyens techniques dont il dispose au fil du temps lui permettent de l'utiliser comme un support de circulation, d'en contrer les effets néfastes ou de mieux en utiliser les avantages.

La circulation sur le fleuve semble avoir toujours été à la fois transversale et longitudinale. Comme aujourd'hui, c'est un axe mais aussi un espace à franchir, espace unissant les terres qu'il limite. Le régime du fleuve, tout comme sa géographie et sa morphologie, a été sensible aux variations climatiques diverses tant par une variation de son débit que par la charge de matières en suspension*, sans oublier l'interaction avec la marée et la salinité qui l'accompagne.

Les données de l'archéologie préhistorique restent encore trop lacunaires pour préciser les possibilités de navigation des populations néolithiques sur un fleuve encore anastomosé et aux bancs de sables instables, situation héritée de la fin de la période glaciaire. Entre l'actuelle Caudebec-en-Caux et la mer, cette situation durera d'ailleurs presque jusqu'aux temps modernes. Selon les principales grandes séquences après la dernière phase glaciaire, la navigabilité du fleuve était différente. Après les phases de réchauffement du tardiglaciaire (entre - 20.000 et -12.000) et la péjoration néolithique (vers - 4.000), la dégradation froide et humide de la fin de l'âge du Bronze et du début de l'âge du Fer (- 800) a pu rendre la navigation plus délicate. Même si les moyens

techniques existent, il est difficile de parler d'une véritable navigation pré- ou protohistorique. Des pirogues monoxyles, comme celle découverte à Rouen - « Place de la Pucelle » (Langlois J.Y., 1994) pourraient correspondre à l'embarcation type utilisée. Il faut également considérer que le débit du fleuve et son profil rendaient les traversées par des gués plus aisées qu'aujourd'hui. C'est le cas dans le secteur actuel du Trait, tout comme devant Norville où il faut visualiser un fleuve de plusieurs kilomètres de larges, à plusieurs chenaux et à faible hauteur d'eau, rendant la traversée parfois possible pour un homme à pied.

La Seine reste longtemps hors des grandes routes commerciales. En effet, les routes du cuivre et de l'étain utilisent plutôt le passage par le cabotage sur la côte atlantique, la Bretagne ou par une route remontant le Rhône, la Saône puis les routes vers le nord de la Gaule (Cunliffe, 1993). Durant le Petit Optimum Romain au début de notre ère, les différents lits du fleuve se mettent en place de façon plus nette et la navigation est sans doute facilitée. L'existence d'une corporation des nautes* sur la Seine est attestée au 1er siècle de notre ère par le célèbre Pilier des Nautes découvert sous Notre-Dame de Paris en 1710. Ces organisations trouvaient sans doute des équivalents sur la basse Seine. Les principaux témoins de l'usage du fleuve sont les ports, et il semble que leur apparition corresponde à cette période. Si la présence de zones aménagées d'accès au fleuve (atterrissements, pontons, quais ...) est certaine dès la période gauloise, les plus anciennes traces matérielles sont celles du début de notre ère. Le premier quai réellement attesté de Rotomagus (Rouen) est construit vers les années 4 et 5 de notre ère à partir d'un aménagement antérieur sans doute datant de l'année 15 avant J.-C. (Bernard, s.d.). La ville antique de Juliobona (Lillebonne), chef-lieu de la civitas des Caletes se développe durant le haut Empire romain avec l'aide d'un portus dont quelques vestiges ont pu être identifiés (Langlois H., 2008). La relation au fleuve y exigeait la réalisation et l'entretien d'un canal, avec au minimum un aménagement de la rivière du Commerce, qui finit pourtant par être abandonné au moyen âge (Mouchard, 2008). Un portus est probable à Uggate (Elbeuf / Caudebec-les-Elbeuf). Un quai a été signalé lors de fouilles du 19ème siècle mais son attribution reste incertaine. Un autre port est vraisemblable à Pîtres (peut-être l'antique Petromentalum) sur l'Andelle à proximité immédiate de sa confluence avec la Seine, dans une situation assez identique à l'aménagement de bief fouillé sur l'Eure à Incarville (Paez-Rezende, 1997). Aucun autre port n'est actuellement connu dans l'estuaire pour la période antique mais des installations

sont probables à Aizier¹ et à Caudebec-en-Caux².

Avec le Moyen Âge et le Petit Optimum Médiéval (800 à 1300), le fleuve prend un rôle nourricier important par l'installation de pêcheries, souvent en relation avec les grandes abbayes. Le travail réalisé par Nicolas Leroux sur ce sujet apporte de nombreuses pistes de réflexion à ces questions de relation fleuve / homme durant le Moyen Âge (Leroux Nicolas). Il convient de signaler que les pêcheries sont parfois mentionnées comme une entrave à la libre circulation sur le fleuve. Elles sont nombreuses, 56 installations sont mentionnées entre le VIIIe et le 15ème siècle, et le comte de Tancarville en possède 12 à lui seul.

Quelques textes anciens évoquent les variations du lit de la Seine et surtout les droits d'usage qui en découlent. La Coutume de Normandie, dont plusieurs versions existent durant le Moyen Âge et l'époque moderne, est dotée d'articles particuliers sur ce propos. Un office est même créé à Rouen, nommé « vicomté de l'Eau » dont le fonctionnement, dès le 13ème siècle a été décrit par Charles de Beaurepaire (Beaurepaire, 1856). Le contrôle de la navigation reste fort par la gilde des marchands de Rouen qui organise les services de voiture d'eau durant tout le second Moyen Âge.

Les ports du nord de l'estuaire aval (Harfleur, Leurre, Graville) antérieurs à la fondation du Havre de Grâce, ont eu à affronter en permanence le risque d'ensablement, jusqu'au 19ème siècle. De nombreuses études en témoignent (Le Cain, 1993). Toute l'histoire du port du Havre y est également liée (Hoyau-Berry *et al.*, 2007). Mentionnons que de nombreux petits « ports » ponctuaient le fleuve à proximité des abbayes (Saint-Martin-de-Boscherville, Grestain) ou sur les sites de confluences comme Risleclif près de l'embouchure de la Risle, mais ce sont le plus souvent de simples abris ou mouillages comme Quillebeuf.

Avec le Petit Age Glaciaire (entre 1400 et 1850), la navigation sur la Seine semble devenir plus délicate et c'est peut-être suite à cet état de fait que les administrations modernes vont chercher à aménager le cours du fleuve, à tenter de le contrôler. Avec la période Moderne s'achève le « Temps des Interactions » entre l'Homme et le Fleuve où les aménagements n'ont pas d'impact durable sur les milieux, pour entrer dans le « Temps des Forçages ». Mais comparée à d'autres systèmes fluviaux (Burnouf *et al.*, 2009), la partie aval de la Seine ne deviendra que lentement un anthroposystème et les forçages au bénéfice des hommes deviennent la règle avec le 19ème siècle.

P. FAJON

1 - Une structure de quai a été signalée au bas d'Aizier et attribuée à la période gallo-romaine mais une intervention menée par J. Mouchard a contredit cette hypothèse en proposant une datation médiévale. La même opération a cependant montré la présence de vestiges antiques plus en retrait de la rive (Mouchard, 2008).

2 - La ville actuelle de Caudebec semble correspondre à la station antique de Loium sur la voie qui reliait Rotomagus à Juliobona. Un point de transfert de charge entre transport routier et fluvial y est probable, également utile pour servir de point de diffusion des produits émanant du Pays de Caux.

Chapitre 2. D'un estuaire « sauvage » vers un estuaire aménagé

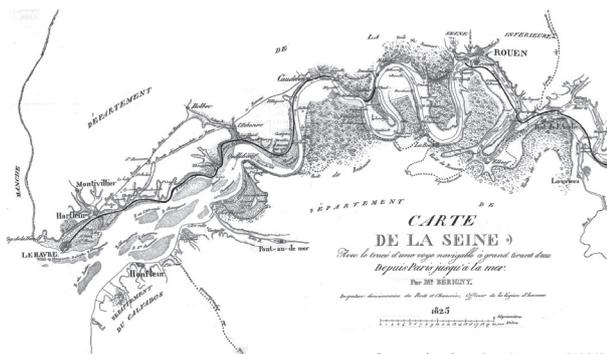
Les projets d'aménagements proposés au 18ème et 19ème siècle (Thélu, 2005)

Les projets de dérivation de la Seine par des canaux

Dès 1719, dans l'optique de réduire la distance de parcours entre Paris et la mer, la création d'un nouveau lit de la Seine, plus direct, avait été imaginé. Au niveau de l'estuaire, son tracé allait des Damps en amont de Pont-de-l'Arche jusqu'à Caudebec-en-Caux, coupant trois boucles du fleuve. En 1783, l'Académie de Rouen lança un concours dont le sujet était l'amélioration des conditions de navigation de la Seine en aval de Rouen. L'un des projets soumis concernait la mise en place d'un canal, le plus rectiligne possible, entre Villequier et Radicatel coupant ainsi une boucle de la Seine. Il comprenait un canal, accessible à des navires de 5,50 m de tirant d'eau*, alimenté par déviation d'un cinquième du débit de la Seine. Sa largeur se réduisait progressivement de 200 m à Villequier jusqu'à 65 m à Radicatel. En aval de ce canal, des digues délimitaient un chenal d'une largeur suffisante et constante qui emprunterait le lit de la Seine pour ainsi rejoindre l'embouchure. Ce projet avait attiré l'attention des décisionnaires mais il impliquait de creuser le canal dans la falaise, entre Villequier et Saint-Georges-de-Gravenchon, qui s'élevait à 130 m de haut.

En 1824, l'objectif des études engagées étaient de transformer Paris en grand port maritime pouvant accueillir des navires semblables à ceux entrant dans le port du Havre (impliquant un tirant d'eau* admissible de 5 à 6 m de Paris à la mer). De 1824 à 1829, de nombreux projets ont été présentés en ce sens. Le projet de Bérigny (1825) comprenait la mise en place de canaux équipés d'écluses*, disposés alternativement sur l'une ou l'autre des rives, pour contourner les secteurs turbulents ou pour couper des boucles de la Seine. Ils étaient couplés à des barrages permettant de maîtriser le niveau d'eau en amont. Des projets semblables ont été proposés par la Compagnie du Canal Maritime (1825 – 1829) et par Boyard de la Vingtrie (1829).

De Rouen à l'embouchure, Bérigny (1825-1826) proposa le tracé d'un chenal empruntant parfois le lit mineur de la Seine et pour les zones les plus instables, un canal latéral, qui longeait principalement la rive droite sur 60 km.



Source des données : Le sueur (1989)

Figure 6 : Projet de canal de Bérigny de (1825)

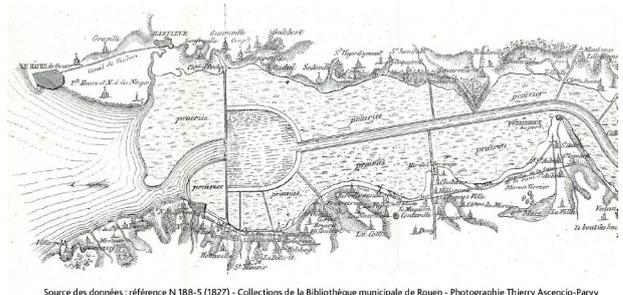
Ce dernier coupait la boucle d'Elbeuf et celle de Jumièges (figure 6). La coupure entre Duclair et Yainville permettait de réduire ce trajet de 18 à 3,4 km. Au niveau de l'embouchure, le canal serait délimité par une digue longitudinale. Il a été repris par Fresnel (1826-1827) en le modifiant au niveau du Trait par un canal continu qui longeait la falaise de l'aval de Duclair jusqu'au Havre. En complément, Fresnel ajouta quelques approfondissements du lit du fleuve aux endroits le nécessitant en amont de Duclair.

La possibilité de mettre en place un canal latéral sur de grande distance a été abandonnée pour des raisons techniques. A partir 1830, le projet « Paris, port de mer » étant progressivement abandonné, les propositions sont devenues moins ambitieuses, elles ne visaient plus à atteindre de grandes profondeurs jusqu'à Paris. Les ingénieurs ont alors distingué l'amont et l'aval de Rouen.

De Paris à Rouen, le projet de Coïc et Duleau (1830), revu ensuite par Monier (1832) comprenait la mise en place de canaux de dérivation ponctuels uniquement au niveau des zones les plus critiques, l'unification d'îles pour obtenir des chemins de halage* continus et le rehaussement de ceux le nécessitant.

Les projets de barrage

Lescaillies (1823-1825) proposa de mettre en place un barrage rectiligne en amont d'Honfleur (à l'emplacement de l'actuel pont de Normandie) (figure 7). Ce barrage aurait été composé d'une partie centrale où pouvaient couler les eaux de la Seine tout en empêchant la pénétration de la mer dans l'estuaire. Cette partie centrale était encadrée par deux grandes écluses* à sas pour le passage des navires, reliées à chaque berge par des digues transversales de 20 m de large. Ces digues devaient permettre par la suite, une liaison routière. Ce projet prévoyait également un grand bassin juste en amont avec un contrôle de la hauteur d'eau par le barrage. Le lit de la Seine aurait été endigué en amont de ce bassin et d'une profondeur constante et uniforme permettant un accès à des navires de 7,50 m de tirant d'eau*. Cet aménagement aurait également permis de restituer une superficie importante de terrains pour l'agriculture.



Source des données : référence N 188-5 (1827) - Collections de la Bibliothèque municipale de Rouen - Photographie Thierry Ascencio-Parvy

Figure 7 : Barrage dans l'embouchure proposé par Lescaillies (1823-1825) (Bibliothèque municipale de Rouen, 1827)

Un autre projet similaire de barrage-déversoir entre Honfleur et Harfleur a été proposé par Pattu (1825). Long de 9 km, submersible lors des crues*, il était composé d'écluses* pour les navires et de passes de 500 m aux extrémités du barrage permettant des échanges entre les eaux douces et marines. L'aménagement aurait été complété en aval, par des brises lames pour protéger le barrage des vagues et d'épis* le long de la rive gauche et le long du barrage jusqu'à la rive droite, pour orienter les courants de manière à fixer un chenal de navigation.

Au total, trois projets de barrage dans l'embouchure de la Seine ont été proposés puis abandonnés du fait de plusieurs craintes : le coût important de ce type d'aménagement sur des zones très instables, le risque d'inondation* de la ville et du port du Havre en empêchant la marée de s'engouffrer dans l'estuaire et enfin, le problème de l'ensablement de l'embouchure et de la baie avec l'accumulation d'alluvions* en aval et en amont du barrage due à la suppression de l'effet de chasse* produit par les eaux du fleuve lors du jusant*.

Hormis ces propositions, Poirée (1836) présenta un projet d'aménagement de la Seine entre Paris et Rouen, à l'aide d'une série de barrages à aiguilles au niveau desquels une écluse* à sas serait accolée. Ce type d'aménagement était en cours de test sur la Loire en 1834 et sur l'Yonne en 1836.

Les projets d'aménagement du lit mineur de la Seine

Dans la seconde moitié du 18^{ème} siècle, Magin, ingénieur du Roi, a proposé de créer un chenal de navigation en utilisant la dynamique du fleuve, à l'aide d'un système d'épis* transversaux. A partir de 1752, il avait testé, sur la Loire et la Gironde, des épis flottants, visant à orienter les courants de telle sorte qu'un chenal se dessine. Sur la Seine, des essais ont été lancés sur un banc sableux situé près de Quillebeuf-sur-Seine en 1757 à l'aide d'un épi de 2 m de long et 40 cm de large. Sous l'action des courants, une importante fosse s'était formée en l'espace de quelques marées. Un second épi* du même type avait été placé dans le chenal principal où les courants étaient plus importants. En 24 heures, au niveau de cet épi, le chenal s'était approfondi de 1.50 m. Avec cette méthode, Magin espérait pouvoir créer et entretenir un chenal de navigation pouvant accueillir des bateaux de 5 m de tirant d'eau* à la montée. En dépit des résultats (les seuls issus de tests réels), les décideurs restaient sceptiques sur les résultats possibles à plus grande échelle. Dix ans plus tard, ce projet était toujours considéré comme le plus intéressant et n'a été définitivement abandonné qu'en 1773. Au 19^{ème} siècle, l'endiguement du fleuve a été envisagé afin d'obtenir un chenal beaucoup plus étroit. Pour cela, plusieurs variantes de projets ont été proposées. Frimot (1827) a proposé d'endiguer le fleuve de telle sorte que la largeur du chenal soit de 150 m en aval de Rouen, puis de 200 m de Caudebec-en-Caux à Quillebeuf-sur-Seine. A partir de Quillebeuf-sur-Seine, il avait prévu deux chenaux délimités par des caissons, l'un se dirigeant vers Le Havre et l'autre vers Honfleur. En complément, deux digues faisant office de brise-lame, de direction sud-est, seraient disposées plus au large pour éviter l'ensablement de l'embouchure et pour créer un grand bassin ouvert sur la mer entre Honfleur et Le Havre.

De Rouen à la mer, étant donné que la zone la plus instable se situait en aval de Caudebec-en-Caux, Frissard

(1832) proposa d'obtenir un chenal de 1000 m de large, approfondi de 3 m sous le niveau des plus basses eaux, à l'aide d'une série d'épis perpendiculaires aux rives, entre Villequier et Berville-sur-Mer, associés à une digue transversale ancrée sur la pointe de La Roque jusqu'en face

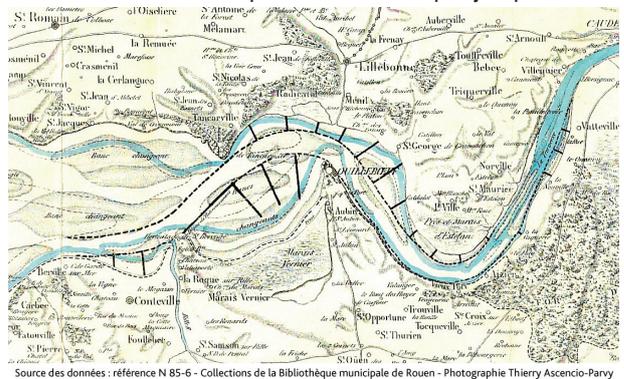


Figure 8 : Projet Frissard (1832), aménagement de la Seine entre Caudebec et Berville (Bibliothèque municipale de Rouen)

de Tancarville (figure 8). Frissard prévoyait de couper la boucle de Yainville à Duclair comme Bérigny (1825). Bleschamp (1840), sollicité par le gouvernement, remis un projet d'endiguement de la Seine entre Saint-Wandrille (en amont de Caudebec-en-Caux) et Tancarville avec également une digue entre La Roque et Tancarville pour fermer partiellement le marais Vernier (une passe de 500 m était prévue) et comprenant la coupure de la boucle de Jumièges.

Le Mire (1845) proposa un projet comprenant l'endiguement des deux rives, de La Mailleraye-sur-Seine jusqu'à Honfleur au sud et Le Havre au Nord. Ces digues longitudinales devaient être submersibles, dimensionnées à hauteur des pleines mers de morte-eau*. Il comptait sur l'accumulation des alluvions* pour combler les zones arrière ce qui permettait de gagner des terres sur le fleuve. Le chenal ainsi délimité ferait 300 m de large à La Mailleraye-sur-Seine, s'élargissant peu à peu pour atteindre 600 ou 700 m de large au niveau d'Honfleur. Une crainte subsistait quant aux risques de réduire fortement l'espace de pénétration de la marée à l'embouchure mais Le Mire s'était basé sur des travaux similaires menés avec succès sur la Clyde en Ecosse pour justifier son projet.

Bouineau (1845) qui avait étudié les travaux effectués en Grande Bretagne et en France, proposa un projet semblable à celui de Le Mire aux seules différences que la digue nord était stoppée au droit de Honfleur avec une largeur du chenal de 800 à 1000 m, la digue sud était prolongée au-delà de Honfleur, en laissant une passe pour le

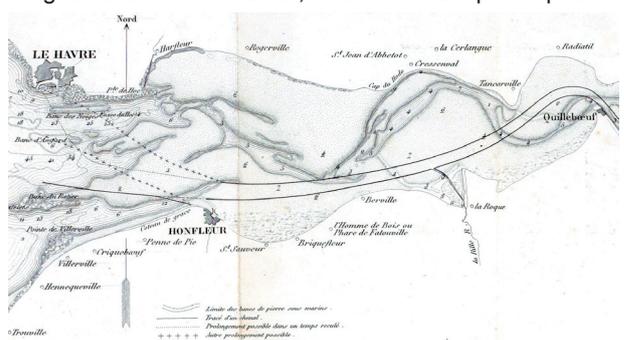


Figure 9 : Projet Bouineau (1845), endiguement à l'embouchure (Bibliothèque municipale de Rouen)

port, jusqu'en face du port du Havre. Cette configuration devait permettre aux bateaux de 5 à 6 m de tirant d'eau* de remonter à Rouen sans pour autant pénaliser les ports du Havre et d'Honfleur (figure 9).

Les aménagements du lit de la Seine

A la fin du 18ème/début 19ème siècle, la population française et notamment celle de Paris était en plein essor engendrant des besoins de plus en plus croissants auxquels il fallait répondre (Le Sueur, 1989). Par ailleurs, en 1828, le port de Rouen constatait une baisse d'activité sérieuse depuis 1824. Seuls 2400 navires par an sur les 3000 à 3600 attendus, s'arrêtaient effectivement à Rouen (Reymondier, 1990). Suite aux progrès techniques, les bateaux devenaient de plus en plus imposants demandant de plus grande profondeur pour naviguer. Toutes les contraintes naturelles rendaient moins attractive la remontée de la Seine jusqu'à Rouen, d'autant plus que le transport ferroviaire était en pleine expansion, reliant Paris à Rouen en 1843 puis Le Havre en 1847 (Sequana, 1999).

Les concurrences (du port du Havre et du transport ferroviaire) associées aux contraintes naturelles pénalisaient fortement le port de Rouen qui perdait peu à peu son avantage géographique. Sa place de plaque tournante du commerce intérieur et international s'estompait au fur et à mesure de l'évolution des moyens nautiques, l'obligeant à améliorer ses accès maritimes (Reymondier, 1990 ; Thélu, 2005). Ceci a motivé la Chambre de Commerce de Rouen à reprendre ses démarches au début de 1844 et ainsi choisir le projet d'endiguement de Bleschamp (1840).

Les premiers grands travaux : 1848 à 1867

La loi du 31 mai 1846 autorisait des travaux publics en aval de Rouen. Elle prévoyait des fonds pour la réfection de chemins de halage* principalement entre La Mailleraye-sur-Seine et Rouen, mais également pour l'amélioration de la navigation entre Villequier et Quillebeuf-sur-Seine. Les travaux envisagés pour ce dernier objectif ont été définis d'après le projet de Beschamp (1840) en reportant à plus tard l'exécution de la coupure de la boucle de Jumièges. Cette loi a été suivie par quatre décrets pour l'amélioration de la navigation (décret de 1852 de La

Mailleraye-sur-Seine à Villequier, de 1853 pour la digue sud de Quillebeuf à La Roque, de 1861 pour la digue nord de Tancarville à La Roque et de 1863 de La Roque à Berville-sur-Mer) (Lavoine *et al.*, 1885 ; Thélu, 2005).

La conception des premiers endiguements avait pour unique but de border le lit mineur de la Seine très mobile entre Villequier et Quillebeuf-sur-Seine (Reymondier, 1990). Au fur et à mesure que les premiers endiguements progressaient, le chenal se stabilisait et s'incisait du fait de la concentration des écoulements dans un chenal uniforme. Ses résultats conformes aux attentes ont incité les décideurs à poursuivre et étendre les endiguements en amont et en aval de ce secteur.

De 1848 à 1866, la majeure partie des travaux d'endiguement de la Seine a été entreprise entre La Mailleraye-sur-Seine et la confluence avec la Risle (figure 10).

En amont de La Mailleraye-sur-Seine, la largeur du lit de la Seine était satisfaisante pour la navigation. Des chemins de halage* étant préexistants, son endiguement a consisté en un réhaussement des berges de manière importante et un renforcement des chemins de halage*. Le premier choix était d'utiliser une « technique douce » qui consistait en un engazonnement des talus de berge réhaussés. Ce mode de défense était efficace, économique et déjà testé sur d'autres fleuves. Toutefois, l'énergie de la Seine associée à un important marnage* n'aurait pas permis l'implantation ni le développement d'une végétation. C'est pour cela que le choix des matériaux pour la construction des digues s'est porté sur des revêtements en pierres sèches ou blocs récupérés in situ (Lavoine *et al.*, 1885).

Le cloisonnement latéral de la Seine a eu pour conséquence de modifier le pouvoir érosif des courants et un important approfondissement du chenal de navigation. A partir de 1848, les premiers ouvrages étaient achevés entre Villequier et Aizier et il a été estimé que 5 à 6 millions de m³ de sédiments (des sables principalement) ont été déplacés par les courants entre 1847 et 1850 (Thélu, 2005). Du point de vue de la navigation, ces aménagements permettaient aux grands navires de circuler plus régulièrement sur le fleuve et non plus uniquement lors des grandes marées. Toutefois, les conditions de navigation à l'embouchure restaient difficiles entraînant de nouveaux travaux durant les années 1850 (suite aux décrets de 1852 et 1853) pour améliorer la section entre La



Figure 10 : Aménagements de la Seine effectués de 1848 à 1866

Mailleraye et Villequier puis entre Quillebeuf-sur-Seine et Tancarville.

Malgré ces travaux d'endiguement, certains hauts fonds persistaient et constituaient des « points noirs » qui limitaient l'évolution et la sécurisation de la navigation. Ainsi, le banc tourbeux des Meules (entre les pk 305 et 307,5) qui constituait un obstacle important et qui était difficilement altérable par érosion, a été réduit mécaniquement en 1859 puis en 1861. Ce dragage a permis de compléter l'approfondissement du chenal produit par les premières digues construites entre Caudebec-en-Caux et Tancarville (Reymondier, 1990).

Pour sécuriser la navigation en aval de Tancarville et stabiliser le chenal qui déviait brusquement vers le Nord, les digues Nord et Sud ont été prolongées jusqu'à la confluence avec la Risle (1861-1866).

Au terme de cette première grande phase de travaux (1848-1866), 145 km de digues et quais ont été progressivement construits. En amont de Tancarville, les digues étaient dimensionnées à hauteur des hautes mers moyennes. En aval, le choix s'est porté sur des digues basses submersibles afin de ne pas trop modifier le régime général des marées (Lavoinne *et al.*, 1885).

La deuxième phase des travaux : 1867 à 1895

Compte tenu de la stabilisation et de l'approfondissement du chenal obtenus lors de la première phase de travaux, la prolongation des digues Nord et Sud à l'embouchure de la Seine était la solution privilégiée pour poursuivre l'amélioration de la navigation. Cependant, le projet s'est heurté à l'opposition des ports voisins, du Havre et de Honfleur craignant que ces digues engendrent un comblement progressif de leurs accès. Le projet d'aménagement de l'embouchure a donc été adapté puis définitivement approuvé en 1895 (troisième phase) par une Commission créée en 1885 (Reymondier, 1990).

En parallèle, des travaux d'entretien et de consolidation des premières digues fragilisées étaient effectués entre 1866 et 1878. Les interventions prioritaires concernaient les ouvrages les plus anciens situés en aval de Caudebec-en-Caux. Les premières digues construites entre Villequier et Tancarville en 1848 étaient « expérimentales » et constituées de matériaux de mauvaise qualité pour ce type d'usage (calcaire tendre, peu dense et gélif). Ces premières digues étaient peu adaptées pour résister aux

contraintes environnementales (la houle, les gelées, le flot* et plus ponctuellement le mascaret). Ainsi, dès la réapparition du mascaret en 1858 (absent depuis 1854), les digues alors fragilisées et désorganisées, s'affaissaient, des brèches se formaient risquant d'inonder les terres que les digues devaient protéger, et parfois même, ces digues étaient partiellement détruites. Pour l'entretien et la consolidation des digues instables, les sédiments grossiers extraits lors des dragages effectués en parallèle ont été utilisés (Reymondier, 1990 ; Lavoinne *et al.*, 1885). D'autres travaux ont été réalisés afin de « combler les lacunes » des premiers ouvrages *via* la réalisation d'endiguements ponctuels (figure 11).

Une grande campagne de dragage a été menée entre 1888 et 1895 pour accompagner ces travaux. Elle visait à réduire les plus hauts fonds tourbeux, sableux ou formés de galets siliceux présents entre Rouen et Tancarville (seuils de Bardouville, de Grand-Couronne, des Moulinaux, le banc des Meules et le banc des Flacques) (Reymondier, 1990).

En marge des grands programmes d'endiguement de la Seine et afin de contourner la zone instable que représentait toujours l'embouchure, un projet de construction d'un canal maritime longeant la Seine au niveau de l'embouchure a été proposé (le canal de Tancarville). Il a été mis en place pour permettre la liaison entre la partie aménagée de la Seine et le port du Havre afin d'acheminer plus facilement voyageurs et marchandises. Commencé en 1880, ce canal de 25 km de long est achevé en 1886 et mis en service en 1887. Parallèlement, le port du Havre a mis en place une digue associée à une série d'épis* le long de la côte pour réduire l'accumulation de sédiments au niveau de l'entrée du port et a étendu ses bassins portuaires (Joignant, sd). Le port de Rouen s'est également développé grâce à la mise en place d'un bassin portuaire de 1887 à 1894.

Au terme de cette seconde phase (1867-1895), 29 km de nouvelles digues ont été mis en place, essentiellement entre 1880 et 1895, dont une grande partie (24 km) est répartie en amont de La Mailleraye-sur-Seine.

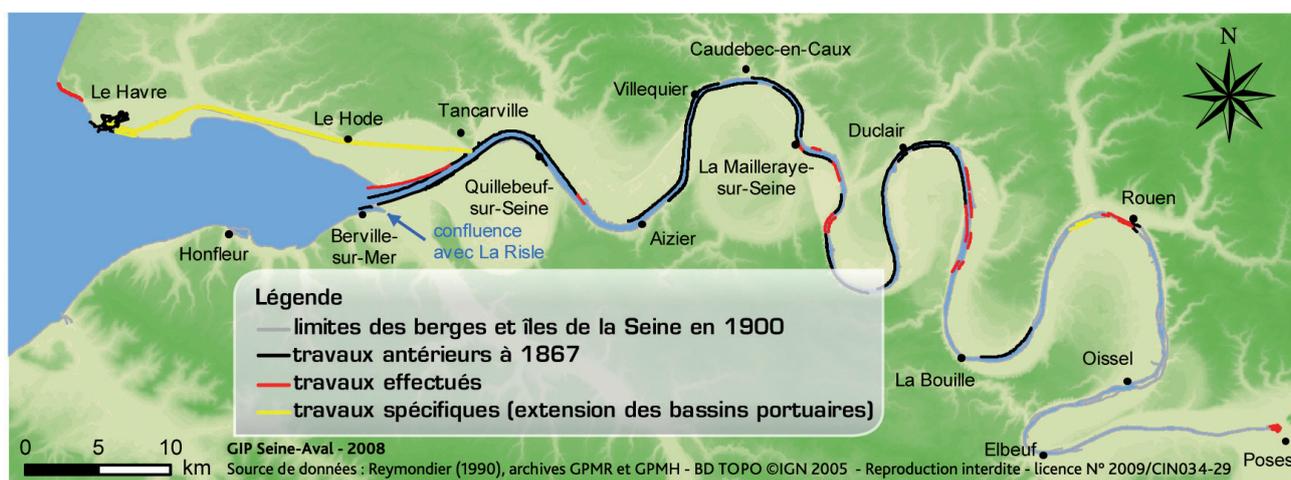


Figure 11 : Aménagements de la Seine effectués de 1867 à 1895

Les barrages de l'estuaire de la Seine

L'aménagement de la Seine entre Paris et Rouen a été autorisé par une loi de 1837 puis relancé par celle du 31 mai 1846. Le projet choisi reprenait des éléments de la proposition de Poirée (1836), prévoyant la construction de douze barrages à aiguilles, chacun associé à une écluse*, localisés au niveau des passages difficiles entre Paris et Rouen. Cette série de barrages devait permettre d'obtenir 2 m de tirant d'eau*. Dans un premier temps, seuls sept barrages à aiguilles parmi les douze ont été envisagés pour obtenir 1.60 m de tirant d'eau*. Parmi ces barrages, figuraient celui de Martot (pk 216) débuté en 1862 et terminé en 1864 et celui de Poses (pk 202), commencé en 1850 mais non finalisé (figure A) (Thélu, 2005). Au cours des travaux, l'ingénieur en chef Krantz, chargé de la construction de ces barrages, recherchait dès 1869 à améliorer le projet autorisé en 1846 afin d'obtenir 3,20 m de tirant d'eau*. Sa proposition a été adoptée par une nouvelle loi du 16 avril 1878 et comptait neuf barrages (et non sept) auxquels sont accolés deux écluses* (et non plus une seule). Krantz avait également modifié quelques emplacements ou type de certains barrages.

Le barrage de Poses a été l'un des barrages modifiés. Installé à l'emplacement prévu, le système à aiguille a été remplacé par des cadres relevables suspendus à des ponts métalliques avec deux écluses* accolées. Sa construction selon ces modifications, a débuté en 1878 et s'est terminée en 1886 (Thélu, 2005). Dans le cadre de ces travaux, l'exutoire de l'Andelle qui se situait non loin de ce barrage en rive droite, a été déplacé d'environ 100 m en aval de sa position initiale. Conservé depuis, le barrage de Poses a été équipé en 1991, d'une petite centrale hydroélectrique. A cette occasion et en lien avec des préoccupations écologiques, une passe à poisson a

été installée pour permettre aux poissons migrateurs de franchir le barrage (Pitres, 2008 ; AREHN, 2008).

Le barrage de Martot a été construit en deux parties séparées par une île (figure A). En amont de ce barrage, les nombreuses îles et les rives étaient souvent submergées du fait de l'élévation du niveau d'eau qu'il engendrait. Au fil du temps, il se détériorait de plus en plus ; sa destruction fut envisagée dès 1907 puis décidée en 1928, provoquant le mécontentement des divers usagers du fleuve. La partie du barrage de Martot située rive droite a été supprimée en 1938, puis le reste l'a été en 1943. Cette suppression a engendré une forte baisse des niveaux d'eau du fleuve et de la nappe phréatique, très problématique pour la navigation mais également pour les riverains qui n'avaient plus d'eau potable et pour les agriculteurs qui avaient adapté la culture de leurs terres aux immersions fréquentes (Martot, 2008).



Figure A : Carte postale de l'ancien barrage à aiguille de Martot vue de la rive gauche

La troisième phase des travaux : 1895 à 1922

Suite à dix années de réflexion, le projet d'aménagement de l'embouchure approuvé en 1895, a été lancé dès 1896. Il comprenait la construction de la digue de Petiville en rive droite pour stabiliser le passage à Vieux-Port (terminée en 1897) ainsi qu'à l'embouchure, de la digue Nord insubmersible en plusieurs phases s'échelonnant de 1897 à 1920 accompagnée d'une série d'épis* sur la face sud de cette digue, achevée en 1898 et en 1912

(puis en 1925 - 4ème phase) (figure 12). Rive gauche, une digue convexe a été construite en plusieurs phases (1898, 1906 puis 1914) ainsi qu'une digue haute au niveau du Marais Vernier en aval de Quillebeuf-sur-Seine (1903) (Reymondier, 1990 ; GPMR-SEC, 2008).

Parallèlement, entre 1899 et 1903, la majorité des hauts fonds situés entre Rouen et Tancarville (seuils de Bardouville, de Grand-Couronne, des Moulineaux, d'Yville, de Biessard ainsi que le banc des Meules et le banc des



Figure 12 : Aménagements de la Seine effectués de 1895 à 1922

Flacques) ont été réduits mécaniquement. Le volume total de sédiments dragués à l'issue de cette campagne a été estimé à 2 millions de m³ (Reymondier, 1990).

Malgré l'interruption des travaux par la première guerre mondiale, toutes les digues prévues par le projet de 1895 ont été réalisées excepté la prolongation de la digue Sud convexe qui devait atteindre Honfleur. Compte tenu des effets non souhaités qu'elle engendrait et de l'émergence d'une opposition des ports voisins, celle-ci n'a pas été terminée. En effet, au niveau du tronçon exécuté de la digue convexe, le chenal de navigation s'appuyait sur la digue Sud puis déviait brusquement vers la digue Nord sans pour autant augmenter le tirant d'eau* admissible des bateaux. La mobilité du chenal et des seuils, associée à des hauteurs d'eau insuffisantes engendraient d'importantes difficultés pour la navigation se traduisant par de nombreux échouages.

Pendant tous ces travaux, une nouvelle loi fut adoptée en 1913 permettant de poursuivre les travaux de « régularisation des rives et d'approfondissement de la Seine » entre Rouen et Quillebeuf-sur-Seine. Ces travaux ont consisté en une réduction de la largeur de la Seine à certains endroits, au raccordement des digues préexistantes et à l'endiguement des « trous » de la Seine ; le tout associé

à divers dragages (Reymondier, 1990).

Au niveau du port du Havre, une digue d'enceinte commençait à être construite complétée par le développement de bassins portuaires en arrière de celle-ci. Au niveau du port de Rouen, les bords de Seine ont été aménagés afin d'étendre le bassin maritime du port pour y implanter diverses activités industrielles et urbaines.

Au terme de cette phase de travaux (1895-1922), 40 km de digues et de quais étaient construits, essentiellement entre 1900 et 1913.

La quatrième phase des travaux : 1923 à 1960

Section entre Poses et Rouen

En lien avec la suppression du barrage de Martot (1938 et 1943), des aménagements ont été effectués pour remédier aux problèmes de niveau d'eau rencontrés entre Poses et Elbeuf (cf encadré "les barrages de l'estuaire de la Seine"). Des îles ont été supprimées, d'autres ont été rescindées entre Martot et Poses, transformant ainsi un système diversifié en un couloir rectiligne et homogène d'une centaine de mètres de large, positionné en rive droite de l'ancien lit. Des dragages du chenal entre Elbeuf et Poses

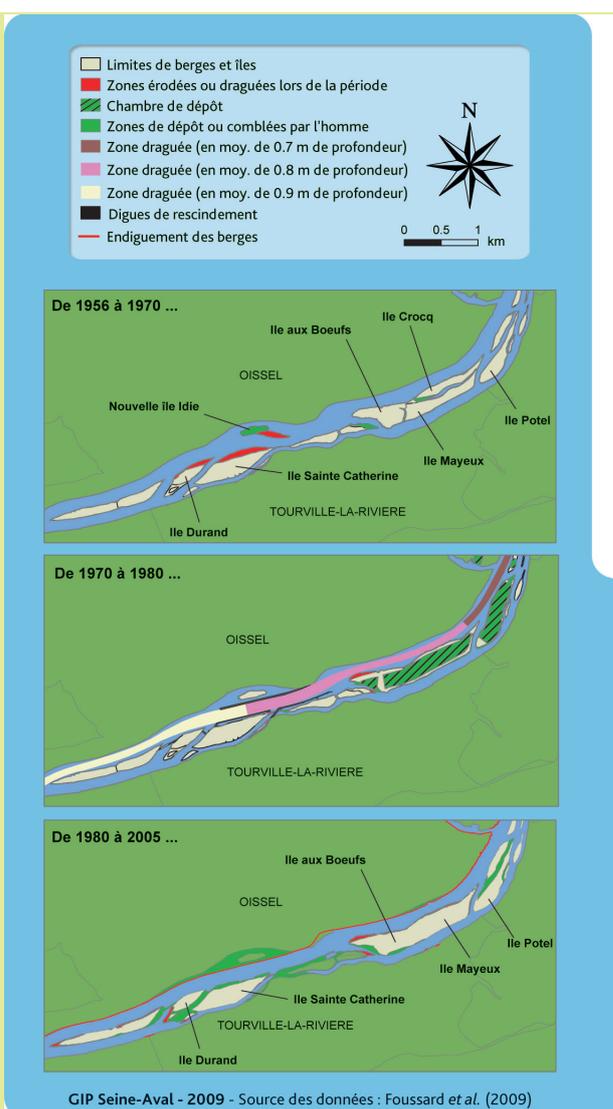
Aménagements effectués au niveau d'Oissel

A hauteur d'Oissel (figure B), une fois le tracé du chenal de navigation fixé, les premiers grands travaux ont été menés. Des arasements d'îles ont été effectués entre 1956 et 1970. L'île Sainte Catherine ainsi que l'île Durand ont été partiellement rescindées selon le tracé prédéfini. Parallèlement, l'île Idie (ensuite renommée Nouvelle île Idie) a été totalement arasée pour être ensuite reconstituée le long de la rive gauche de manière à ce qu'elle n'entrave plus le chenal de navigation.

Afin de conforter le tracé, des digues ont été ensuite installées le long de l'île Sainte Catherine et en vis à vis, le long de la Nouvelle île Idie, au cours des années 1970. D'autres digues ont relié certaines îles entre elles ou à la berge, déconnectant partiellement les bras secondaires. Des dragages d'approfondissement du chenal de navigation ont été effectués et les sédiments extraits ont permis de combler les bras dissociant certaines îles. Ces comblements sont à l'origine des actuelles île aux Bœufs et île Potel.

Après 1980, les zones situées entre les digues et les berges ont été comblées conduisant à l'uniformisation des sections du chenal. Globalement, ces terrains gagnés sur le fleuve ne sont pas, à l'heure actuelle, urbanisés, à l'image de la zone arborée mise en place dans le prolongement du parc municipal d'Oissel, au niveau de la nouvelle île Idie.

Figure B : Travaux effectués au niveau d'Oissel (données GPMR)



ont par ailleurs été faits des années 1930 à 1950. Le bras de la Seine déconnecté par les rescindements d'îles, a été emprunté par l'un de ses affluents, l'Eure. Au début du 20ème siècle, l'embouchure de ce cours d'eau était très mobile, celle-ci débouchait au niveau de la commune des Damps (pk 206) en amont de Pont de l'Arche. L'Eure a ensuite emprunté le chenal longeant la rive gauche de la Seine déconnecté par les travaux pour se jeter en aval de l'ancien barrage de Martot (pk 218) (Martot, 2008).

A partir de 1929, d'importants projets d'aménagement de la Seine ont commencé à émerger entre Elbeuf et Rouen suite à la décision ministérielle du 14 juin 1929 dont un projet étudié en 1930 de rescindement du lit de la Seine. Dans ce cadre, le dragage de 1.4 millions de m³ de sédiments a été autorisé. Certains des arasements partiels d'îles prévus dans le projet, ont été réalisés en 1931. Les sédiments extraits ont été utilisés pour l'extension de la gare de Sotteville-lès-Rouen. Les projets d'aménagement ont été relancés par un décret de 1943 autorisant les grands travaux de calibrage de la Seine sur ce secteur. Ce programme « d'amélioration de la Seine » visait à réduire les perturbations hydrauliques observées dans le chenal principal, engendrées par la présence d'un certain nombre de bras morts ou secondaires. Le second objectif de ce programme était de garantir un tirant d'eau* de 3 m en toutes circonstances (contre 1.50 à 2,50 m avant les aménagements) (archives GPMR ; Le Sueur, 1989). Pour cela, le projet comprenait l'uniformisation de la section du lit, l'arasement partiel ou total de certaines îles, le dragage du chenal de navigation ainsi que le comblement de certaines annexes hydrauliques. En 1944, la première tranche des travaux de ce projet a été réalisée entre Elbeuf et Oissel (pK 219-221) où environ 83 200 m³ de matériaux ont été dragués. Ces travaux visaient à atteindre des profondeurs de 3,2 m en dessous du niveau des plus basses eaux, sur 80 m de large. Les sédiments extraits ont été utilisés pour endiguer la rive gauche de la nouvelle embouchure de l'Eure (pk 217) et pour remblayer une zone en arrière de la digue construite au voisinage du port d'Orival (pk 221.5). La deuxième et la troisième tranche des travaux ont été autorisées en 1944. Celles-ci prévoyaient respectivement, le dragage d'environ 30 000 m³ de sédiments entre les pk 221 et 222, pour atteindre des profondeurs d'eau de 3 m en dessous du niveau des plus basses eaux sur 80 m de large et le dragage d'environ 123 000 m³ entre les pk 222,4 et 224

pour creuser un chenal jusqu'à la cote - 3 m par rapport au 0 CMH, sur 90 à 110 m de large. Les matériaux issus de ces derniers dragages ont en partie servi à la mise en place d'une digue en rive droite entre les pk 223 et 223,9 (Cléon). Le reste des travaux indiqués (suppression d'îles, comblement de bras et dragages du chenal de navigation) ont été réalisés ultérieurement à partir de 1956 jusque dans les années 1980 (archives GPMR ; GPMR-SEC, 2008).

Section entre Rouen et Le Havre

La poursuite de l'aménagement de l'embouchure a été très contestée. Les divers projets ou variantes proposés par les Commissions techniques (de 1911 à 1922) ont finalement abouti à une proposition en 1923. Toutefois, de nombreuses contestations ont poussé à la modification du projet en 1927, grâce à une concertation avec les ingénieurs des différents ports. Cette variante a également engendré de vives protestations. De ce fait, la proposition a été une nouvelle fois réétudiée en 1928 et après diverses réunions de concertation, tous les syndicats impliqués (du Littoral Bas-Normand et autres), les ports, ... ont finalement adhéré au projet du tracé définitif des digues à l'embouchure. Ce projet fut définitivement approuvé et déclaré d'utilité publique par la loi du 11 janvier 1932.

Pendant toute cette période de procédure et de concertation, très peu de travaux ont été effectués. Paradoxalement, quelques travaux dans l'embouchure, tirés des projets étudiés entre 1921 et 1923 (non approuvés) ont été exécutés comme une série de quatre épis* en enrochement situés sur la face sud de la digue Nord de l'embouchure, achevés en 1925 (figure 13). Ces épis avaient pour but d'orienter les écoulements et ainsi centrer le chenal de navigation qui s'appuyait sur la digue Nord. Le projet prévoyait la mise en place d'une digue continue reliant chacun des épis, ces travaux n'ont pas été effectués.

La loi de 1932 prévoyait la stabilisation du chenal au niveau de l'embouchure, selon un tracé relativement rectiligne. Pour cela, le projet débutait par une modification complète du tracé de la digue Sud convexe en une digue concave. Ainsi en 1933, la digue Sud convexe fut partiellement détruite (figure 14). La conservation d'une partie de cette digue et l'implantation d'une contre-digue en aval a permis de draguer la grande quantité d'alluvions* qui



Figure 13 : Aménagements de la Seine effectués de 1923 à 1960

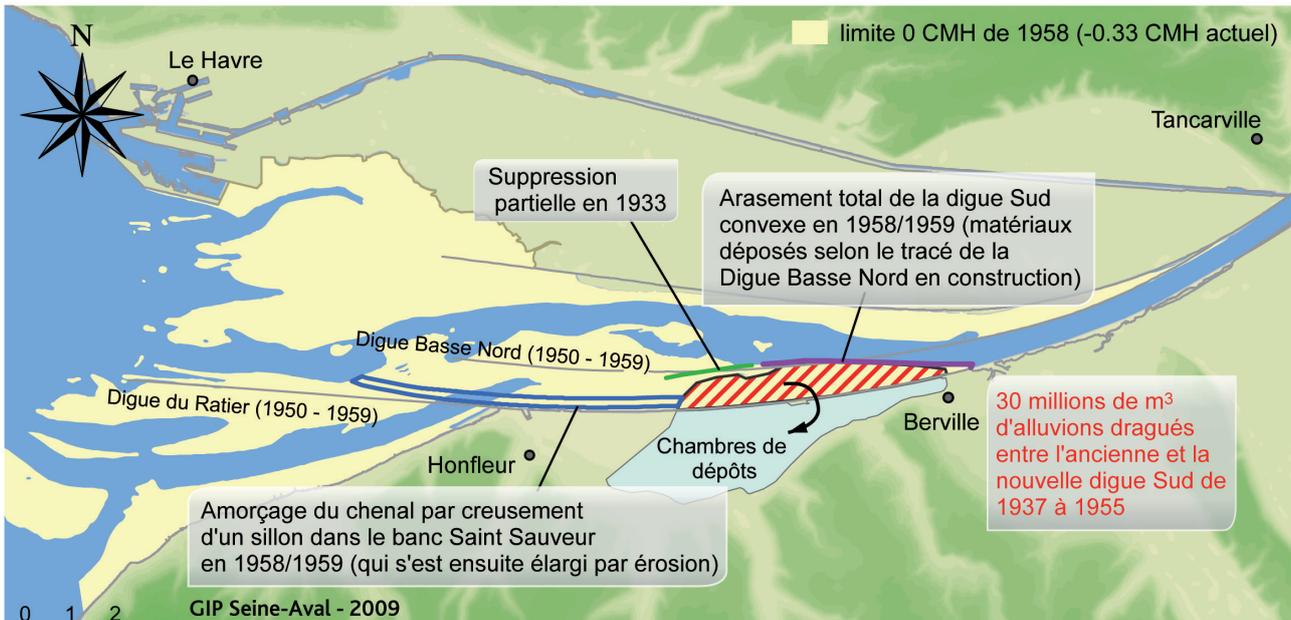


Figure 14 : Travaux effectués pour l'ouverture du « nouveau chenal » en 1961

s'était accumulée en arrière de la digue convexe. Ces importants dragages évalués à 30 millions de m³, ont été effectués de 1937 à 1955 (interrompus entre 1940 et 1944). Ces travaux ont été poursuivis en 1958 et 1959 par le creusement d'un sillon amorçant le futur chenal de navigation le long de la digue du Ratier (qui s'est ensuite élargi par la force des courants).

En parallèle, la nouvelle digue Sud a été mise en place. La construction du premier tronçon, compris entre Berville-sur-Mer et Honfleur, commença en 1937. Interrompus par la guerre, les travaux reprirent en 1948 pour se terminer en 1950. Une fois ces aménagements terminés, dès 1950, la digue basse Nord fut prolongée et la digue du Ratier a été construite en aval de la nouvelle digue Sud. Ces travaux se sont terminés en 1959. La dernière partie des travaux consistait à supprimer entièrement l'ancienne digue Sud (1958 et 1959). C'est ainsi que le nouveau chenal à l'embouchure fut ouvert puis balisé (figure 13). La mise en place de ce chenal a demandé la

construction de 33 km de digues.

Au cours de cette phase de travaux, d'importants endiguements ont également été réalisés en amont de La Mailleraye-sur-Seine, et de nouveaux bassins portuaires ont été mis en place aux ports du Havre et de Rouen. Entre 1913 et 1950, le chenal a été fortement approfondi entre Rouen et Tancarville. Le volume de sédiments extraits ou érodés est estimé à environ 21 millions de m³ dont 8 millions par dragage (Reymondier, 1990). Au terme de cette phase (1923-1961), 90 km de digues et de quais étaient construits, avec une intensification des travaux entre 1944 et 1961.

La cinquième phase des travaux : 1961 à 2008

En dehors de la poursuite des travaux de la phase précédente en amont de Rouen, les travaux en aval de Rouen se sont concentrés au niveau de l'embouchure. Dès 1962, une réflexion a été lancée pour continuer son

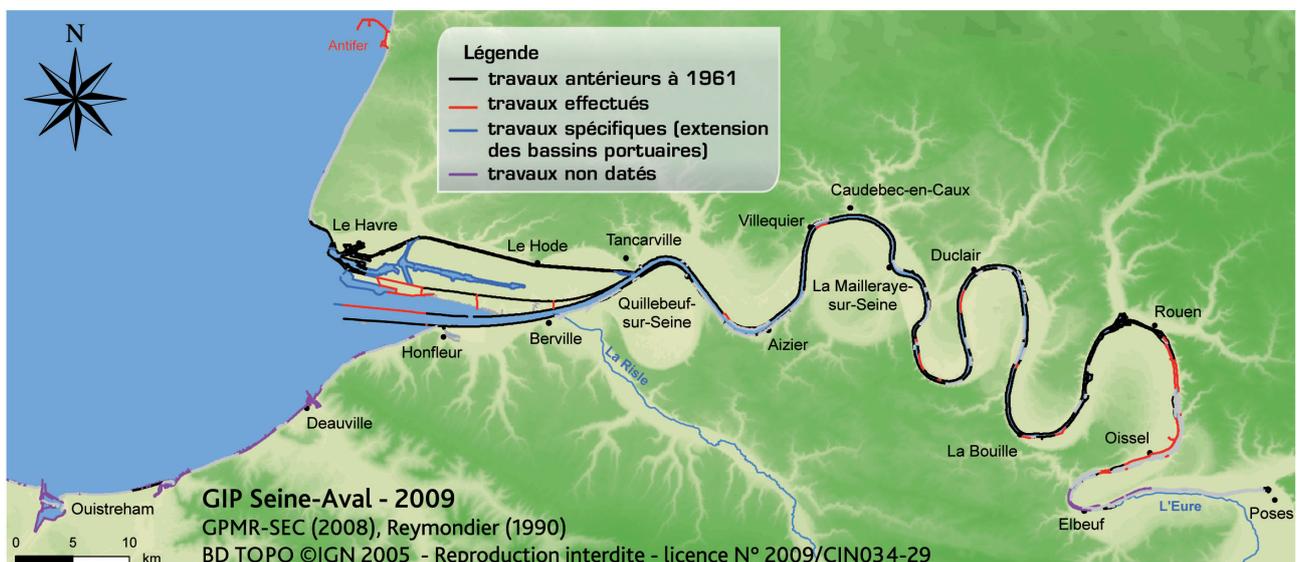


Figure 15 : Aménagements de la Seine effectués de 1961 à 2008

aménagement, autorisé par une décision ministérielle de 1970. Ces travaux devenaient prioritaires d'autant plus que des brèches profondes (équivalentes à la profondeur du chenal de navigation) s'amorçaient au niveau de la digue basse Nord, sous l'action du flot* au droit de Honfleur et trois kilomètres plus en amont. En complément de cette réfection, la digue basse Nord a été prolongée de 1971 à 1975 où les travaux ont été stoppés sous la pression des marins pêcheurs qui craignaient des difficultés pour accéder aux fosses Nord et Sud, de part et d'autre du chenal de navigation. La décision ministérielle de 1977 a relancé les travaux avec la prolongation de la digue basse Nord en 1979 puis en 1986, et pour satisfaire les pêcheurs, deux brèches ont été faites en 1979 : l'une de 100 mètres dans la digue du Ratier (à un kilomètre du littoral) et l'autre de 1000 mètres dans la digue basse Nord nommée la brèche des pêcheurs en aval immédiat du pont de Normandie) (Reymondier, 1990).

Lors de la construction du pont de Normandie (1989-1995), une digue a été construite en 1989 juste en aval de ses fondations pour les protéger. Pendant cette cinquième phase de travaux, des digues ont également été réalisées dans l'estuaire amont et plus ponctuellement dans l'estuaire moyen (figure 15).

Parallèlement, des travaux ont été entrepris afin de développer le port du Havre et son enceinte comprenant la digue d'Antifer ancrée au Nord sur le littoral en 1976, la construction du grand canal du Havre dans les années 1960, de la digue en crochet au Sud de ce canal, construite entre 1969 et 1979 et l'extension du port, dit « Port 2000 » (Reymondier, 1990).

Dans le cadre de Port 2000 (2003-2007), d'importants

travaux ont été réalisés afin de développer et favoriser un accès au port pour les navires ayant un tirant d'eau* de 14,50 m (avec une possibilité d'atteindre 17 m en certains lieux), en toute condition de marée et en toute sécurité. Pour cela, 46 millions de m³ de sédiments ont été dragués (figure 16), dont plus de la moitié ont servi à la construction des digues et des terre-pleins des nouveaux terminaux. En guise de mesures d'accompagnement pour les dommages que ces aménagements pourraient causer au milieu naturel, le port du Havre a effectué des travaux de réhabilitation des vasières : création de l'épi* de la fosse Nord (soubassements en 2003 et enrochements en 2004), rehaussement de la digue basse Nord à l'aval du pont de Normandie au dernier trimestre 2004, modification de la brèche aval en juillet - août 2005, création d'un reposoir à oiseaux sur dune (2002), creusement d'un méandre d'environ 15 hectares pour améliorer la circulation de l'eau associé à une modification de la brèche amont et prolongement de la digue basse nord de 750m. Un îlot artificiel de cinq hectares à marée basse, servant de reposoir pour les oiseaux (l'île aux oiseaux) a également été créé d'octobre 2004 à avril 2005 (figure 16) (PAH, 2005(a)). En parallèle, le port de Rouen a réparé la digue basse Nord à l'amont du pont de Normandie à l'été 2003.

Durant cette cinquième phase, deux programmes d'approfondissement du chenal entre Rouen et Le Havre ont été menés : le programme « 10m » entre 1983 et 1992 et le programme « 10,30m » entre 1998 et 2000 (dragage de 786 000 m³ de sédiments sur ces trois années) (PAR, 2007(b)). Pour suivre la modernisation des navires, le port de Rouen prévoit un nouveau projet d'amélioration

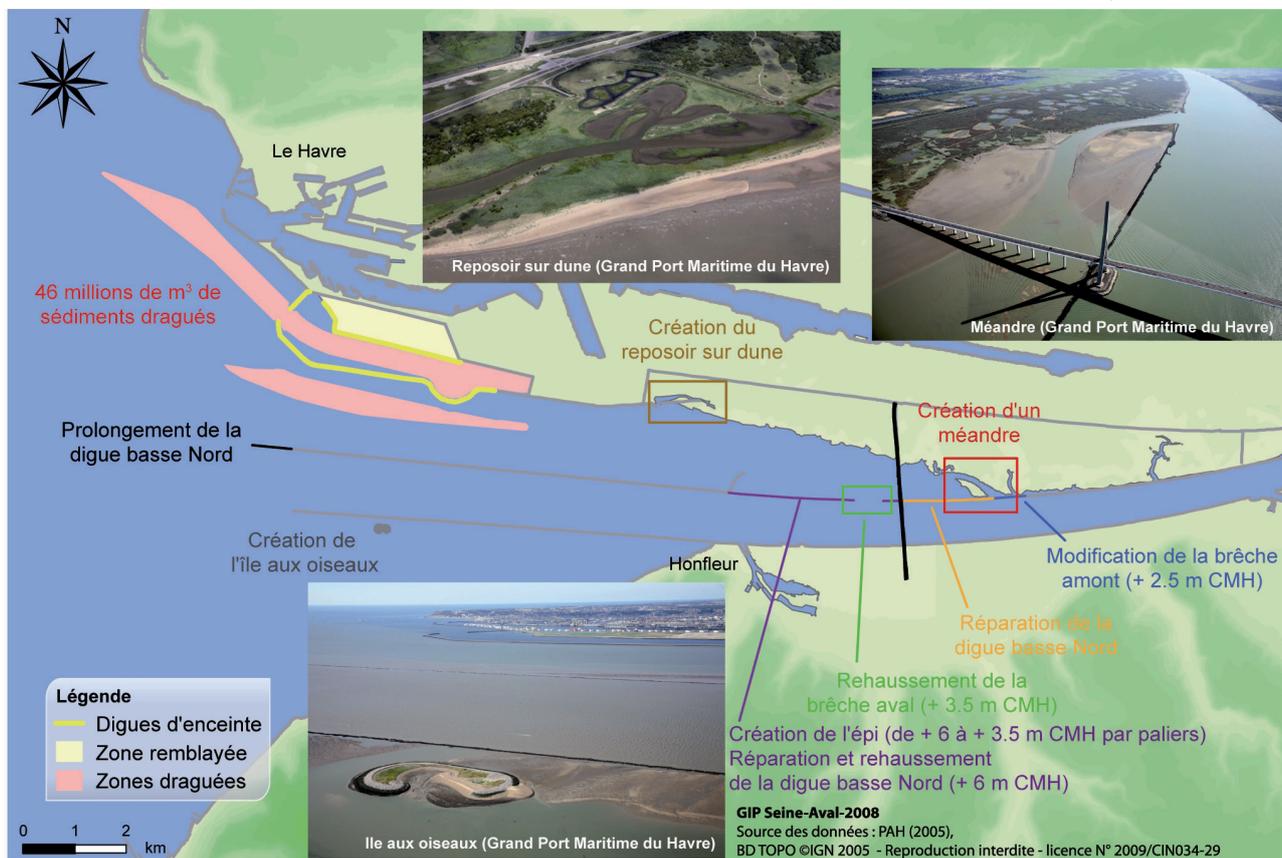


Figure 16 : Travaux effectués aux abords du port du Havre et mesures d'accompagnement dans le cadre de Port 2000

de ses accès maritimes. Il se traduirait par un approfondissement du chenal de navigation afin d'augmenter le tirant admissible entre Rouen et l'embouchure et nécessiterait l'arasement des points hauts du chenal de 40 cm en moyenne sur tout ce secteur (au plus 1 m) portant sur 17 % de la surface du lit mineur entre Rouen et Tancarville. Des dragages sont également prévus en aval de Tancarville portant sur 10 % de la surface endiguée, con-

centrés à l'extrémité des digues et au niveau du pont de Normandie. La quantité totale de sédiments susceptible d'être draguée est de 6 millions de m³ avec un volume de 3 millions pour chaque secteur : entre Rouen et Tancarville (sur 2 ans) et à l'embouchure, concentrés à l'aval de l'extrémité des digues (l'engainement) (sur 18 mois). (PAR, 2007(c)).

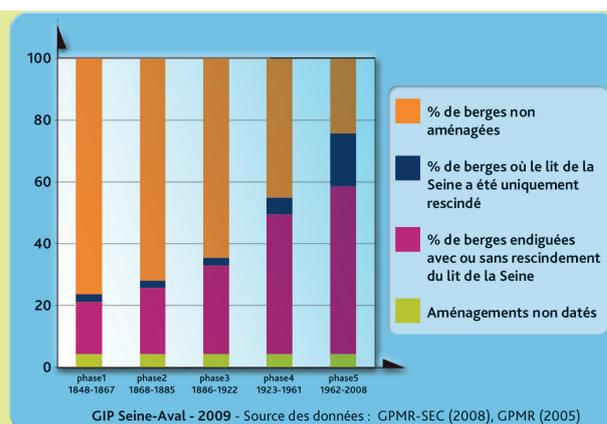
L'anthropisation de l'estuaire de la Seine au travers d'indicateurs

Deux indicateurs complémentaires permettent de rendre compte de l'évolution de l'anthropisation de la Seine : la longueur cumulée de digues construites (mesurée de Poses jusqu'à l'embouchure) et le pourcentage de berges aménagées (mesuré pour le lit mineur de Poses à Tancarville). Ces deux indicateurs ont été renseignés depuis le 19^{ème} siècle jusqu'en 2008 pour l'estuaire de la Seine.

Pour les longueurs cumulées de digues, deux cas de figure ont été distingués : les endiguements du lit mineur et les aménagements spécifiques (bassins portuaires et canaux). Les cumuls ont été faits pour chaque phase indépendamment des autres (pour le lit mineur) ou par type d'aménagement spécifique (pour ceux faits hors lit mineur). Certains travaux ont été exécutés sur plusieurs années, dans ce cas, les longueurs ont été calculés annuellement selon la durée de ces travaux (Figure C).

La progression des endiguements réalisés peut également être retranscrit sous forme de pourcentage. Pour l'estuaire de la Seine, la longueur totale de berges aménagées (selon le type d'aménagement) a été comparée à la longueur totale de berge. Ceci a été effectué en fonction des phases de travaux.

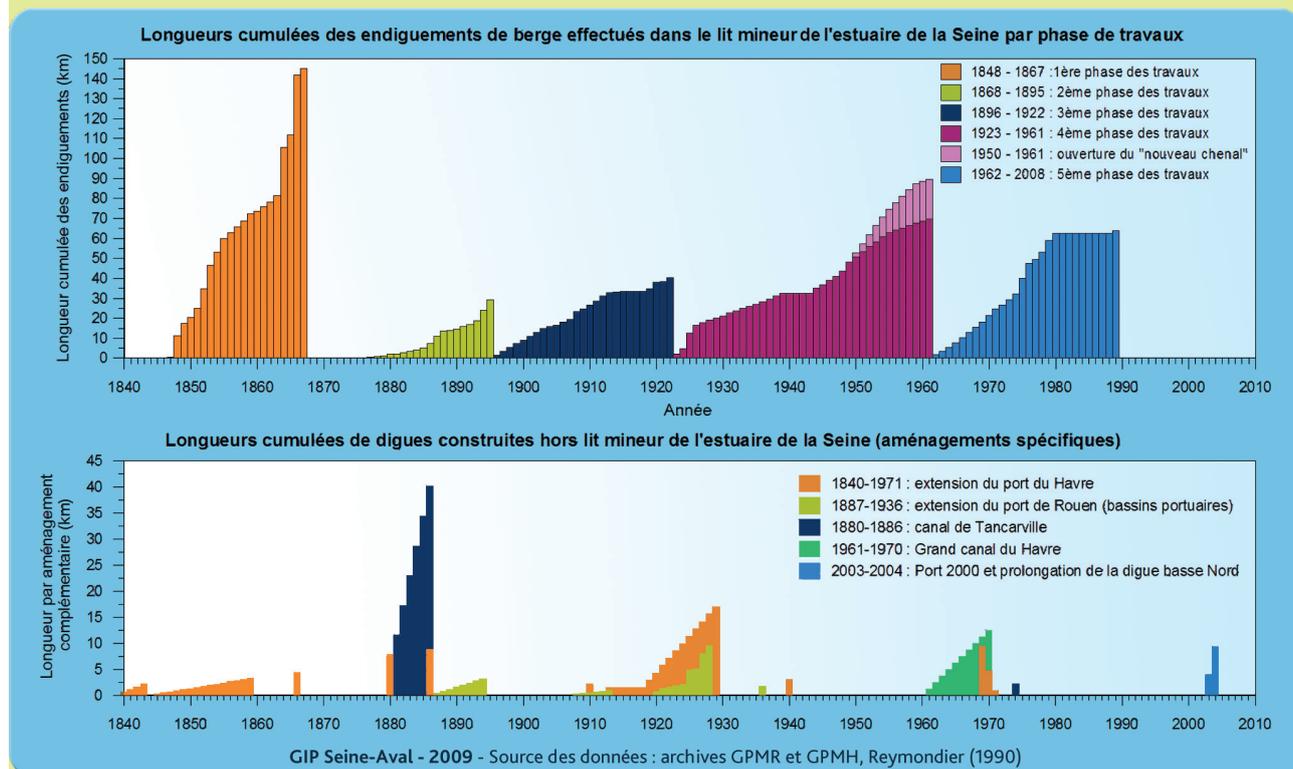
Les nombreux aménagements réalisés dans l'estuaire de la Seine ont progressivement entraîné une forte artificiali-



GIP Seine-Aval - 2009 - Source des données : GPMR-SEC (2008), GPMR (2005)

Figure D : Pourcentage de berges aménagées ou non, cumulé à chaque phase de travaux entre Poses et Tancarville (hors aménagements spécifiques)

sation des berges entre Poses et Tancarville de l'ordre de 76 % en 2008 (soit environ 271 km sur 362 km de berge dont 17 % sont rescindées sans endiguement). Certaines phases de travaux se démarquent des autres par un taux d'endiguement et/ou de rescindement* des berges élevé (nette accélération lors des deux dernières phases) (figure D).



GIP Seine-Aval - 2009 - Source des données : archives GPMR et GPMH, Reymondier (1990)

Figure C : Longueurs cumulées des endiguements de l'estuaire de la Seine pour chaque grande phase de travaux et pour les travaux spécifiques (hors lit mineur). Il ne prend pas en compte toutes les digues car certains tronçons n'ont pu être datés

Chapitre 3. Une évolution hydrologique et morphologique guidée par l'homme

La linéarisation du tracé de la Seine et évolution des îles

L'estuaire de la Seine a été aménagé de différentes manières selon les secteurs. En 1750, le secteur compris entre Poses (pk 202) et Oissel (pk 225), comptait 52 îles représentant approximativement 260,7 ha (superficie totale) (figure 17-1). En 2005, il ne restait que trois îles représentant 4,7 ha.

(en étant érodées par les courants modifiés suite aux endiguements pour les îles non pérennes), soit suite à une intervention mécanique (arasement total par dragage ou rattachement d'îles à la berge conjugué à un comblement des bras secondaires déconnectés). Les nombreuses îles disparues entre 1750 et 1893 se situaient en aval de Duclair où le lit de la Seine a été endigué et rescindé de 1848 à 1866. Les dernières îles présentes étaient concentrées principalement entre La Bouille et Rouen puis

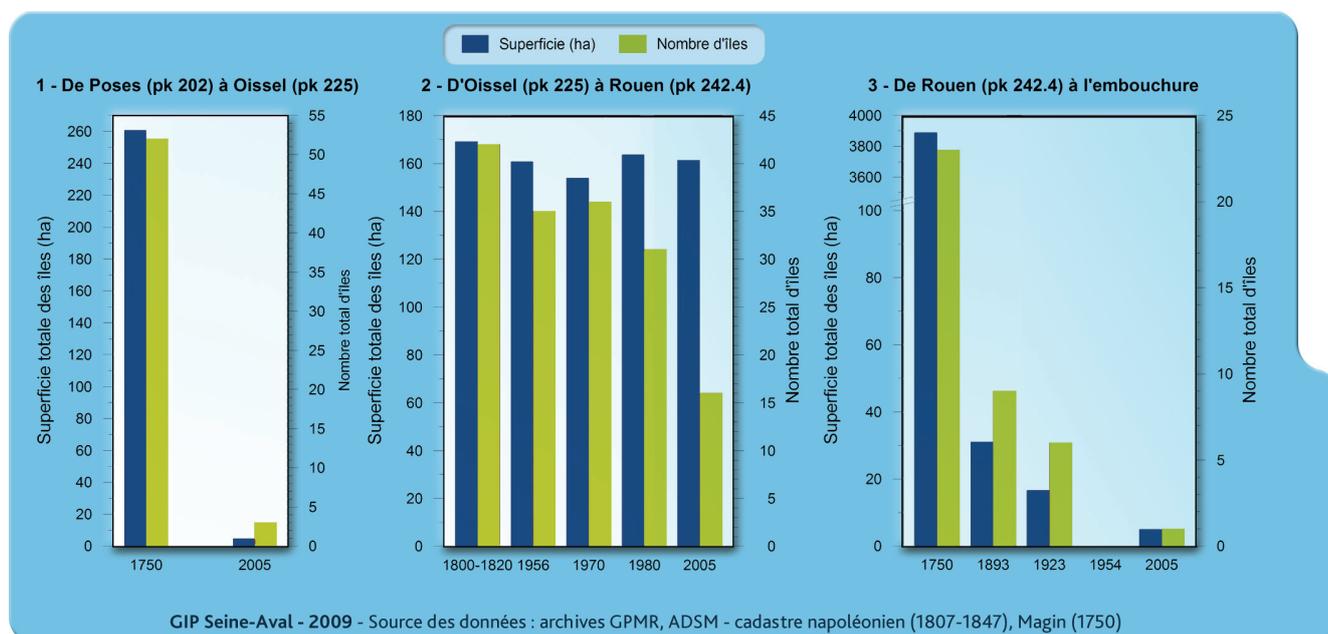


Figure 17 : Superficies totales et nombre d'îles entre Poses et l'embouchure selon les secteurs distingués

Cette forte réduction est liée aux travaux « d'amélioration de la Seine » qui ont consisté, principalement, en la suppression totale des îles (par dragage ou rattachement à la berge) (figure 18).

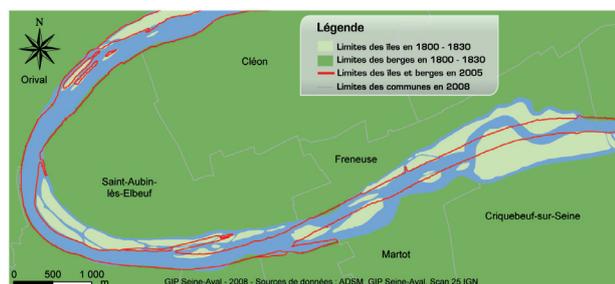


Figure 18 : Limites des îles et berges de la Seine en 1800/1830 et 2005 dans la boucle d'Elbeuf

La même évolution est observée entre Rouen et l'embouchure, secteur sur lequel le nombre et la superficie des îles ont fortement diminué depuis 1750 jusqu'à une absence totale d'île au début de la quatrième phase des travaux (1923-1961) (figure 17-3). Toutes ces îles ont disparu au fil du temps soit de manière « naturelle »

elles ont été à leur tour supprimées pour développer le bassin maritime du port de Rouen. En 2003, en lien avec l'extension du port du Havre, diverses mesures environnementales ont été prises comprenant la mise en place d'une île artificielle au pk 363, au Sud de la digue du Ratier nommée l'île aux oiseaux (actuellement la seule existante entre Rouen et la mer). La partie émergée s'étend de 5 ha (à marée basse) à 1.5 ha (à marée haute) (PAH, 2005(a)).

Les travaux effectués entre Oissel (pk 225) et Rouen (pk 242,4) au cours du 20ème siècle, sont de nature différente. De 1750 à 2005, la superficie totale des îles est restée relativement constante contrairement au nombre d'îles (figure 17-2). A l'image des exemples précédents, les aménagements comprenaient l'arasement partiel ou total de certaines îles mais d'autres ont été fusionnées par comblement de bras morts ou secondaires d'où le nombre d'îles réduit de moitié ces dernières décennies. Les suppressions et fusions d'îles visaient à transformer le lit de la Seine en un chenal unique dépourvu d'annexe hydraulique comme en témoigne l'indice de tressage (cf encadré "Indice de tressage"). De Poses à Oissel, cet indice est passé de 2,11 en 1750 à 1.19 en 2005 (figure 19-1). Malgré l'imprécision des tracés de 1750, ce différentiel montre l'évolution d'un système diversifié vers un système à chenal unique en lien avec les aménage-

ments. Entre Oissel et Rouen, cet indice est encore naturellement élevé du fait de nombreuses îles présentes (figure 19-2). Les rescindements et les comblements de bras ont toutefois réduit les valeurs prises par l'indice de tressage, en grande partie après 1980, période à laquelle les comblements se sont intensifiés. Enfin, entre Rouen et Tancarville, l'indice de tressage a peu évolué depuis 1893 (figure 19-3). A cette date, plus de 150 km de digues (sur 96 km de cours d'eau) avaient d'ores et déjà été mises en place visant à stabiliser le chenal. La Seine qui était alors large et divisée en multiples chenaux, est devenue un chenal unique, canalisé et uniforme.

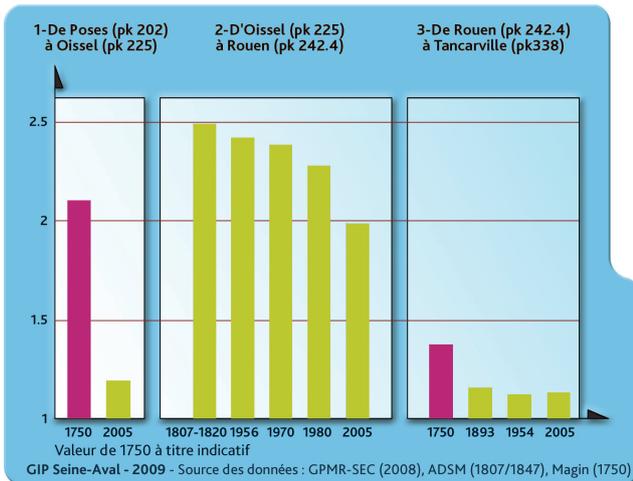


Figure 19 : Indice de tressage de Poses à Tancarville selon les secteurs distingués

Indice de tressage

L'indice de tressage est un indicateur morphologique caractérisant la géométrie du système et illustrant le phénomène de « linéarisation » de la Seine. Il permet également de caractériser la dynamique du système (influençant la présence de zone de dépôt de sédiments fins et d'une diversité sédimentaire). Il se mesure par le rapport entre la moitié de la longueur totale de berges dans l'estuaire, comprenant le cours principal de la Seine et les îles, et la longueur développée de l'estuaire dans son axe (figure E). Lorsque cet indice est égal à 1, le fleuve est caractérisé par un chenal unique, linéaire. A l'inverse, lorsqu'il est supérieur à 1, des îles et des annexes hydrauliques subsistent et le tracé des berges est irrégulier. La diversité morphologique sera d'autant plus présente à mesure que l'indice de tressage augmente (Lafite *et al.*, 2003).

Figure E : Evolution du lit de la Seine de Poses à Oissel

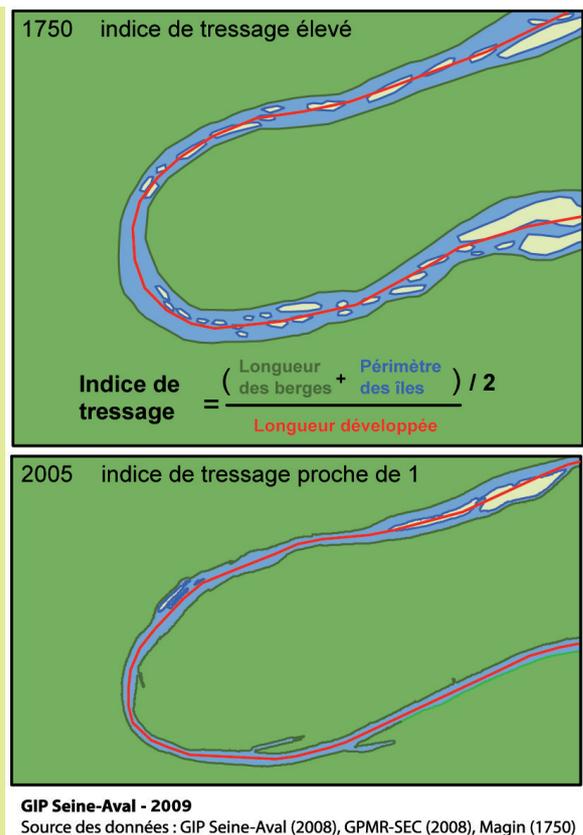
La chenalisation des sections du lit de la Seine

De manière générale, la chenalisation de la Seine a eu pour conséquence de modifier le pouvoir érosif des courants, qui, associé aux travaux de dragage, ont engendré un important approfondissement du chenal et une uniformisation des sections.

De Poses à Rouen

L'évolution du profil longitudinal de la Seine (tracé de la cote bathymétrique du thalweg*) n'est pas homogène au fil des années (figure 20). Les cotes ont sensiblement diminué entre 1956 et 1971 particulièrement en aval de Saint-Etienne-du-Rouvray où l'approfondissement du lit était de l'ordre de 3,50 m. En amont de Rouen, la Seine a été canalisée de manière à obtenir des sections uniformes d'une centaine de mètres de large à partir des années 1940 (Martot, 2008).

Par la suite, les profils longitudinaux montrent une certaine stabilité et ont évolué de manière plus modérée contrairement aux profils transversaux. A Oissel, le secteur de l'île Durand reflète les évolutions morphologiques observées entre Poses et Rouen, toutes principalement liées aux interventions humaines. L'île Durand a été partiellement arasée, une zone latérale longeant la rive gauche ainsi qu'un bras secondaire ont été comblés et des dragages le long du chenal de navigation ont permis d'obtenir une section uniforme (figure 21) (GPMR-SEC, 2008).



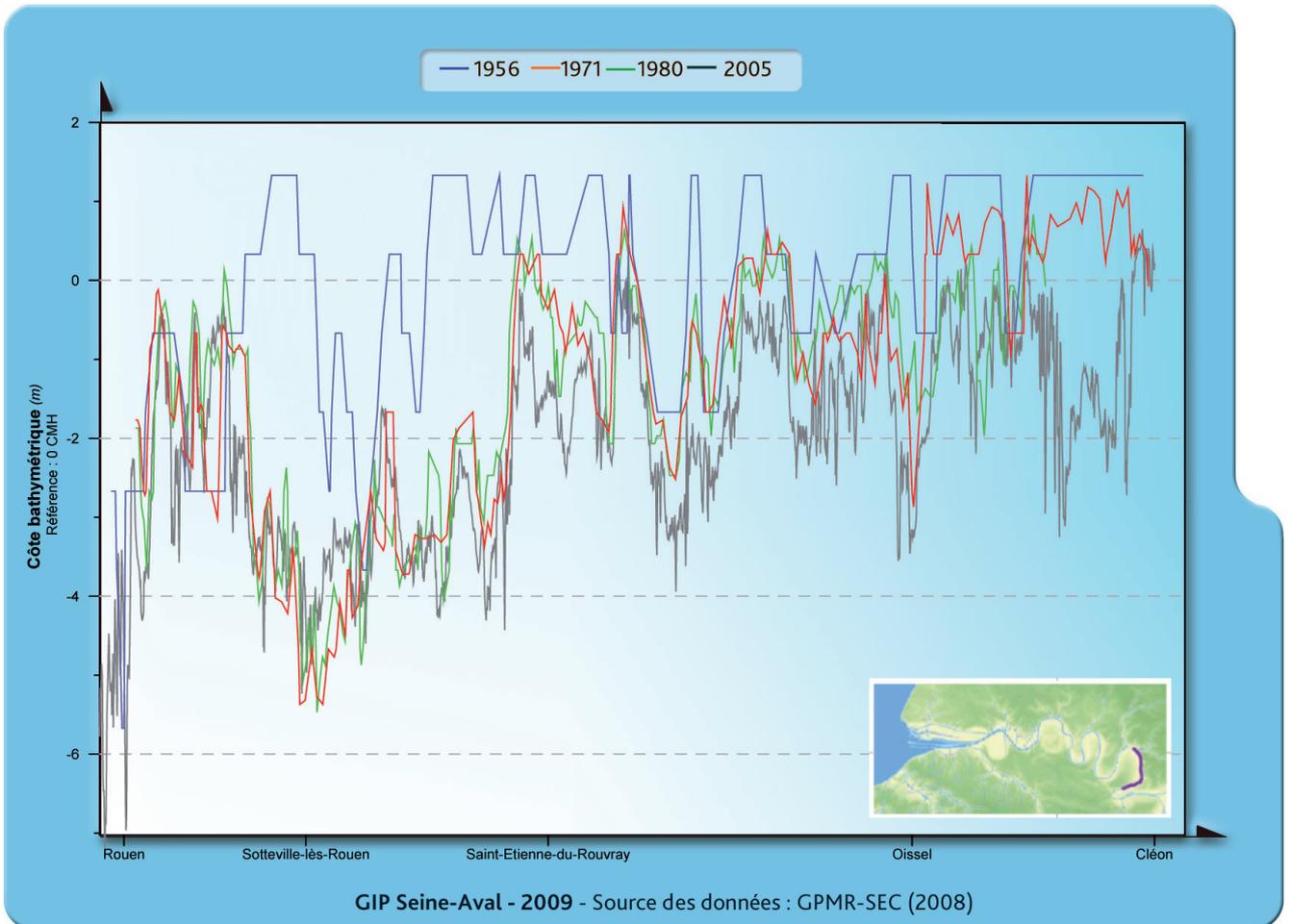


Figure 20 : Profils longitudinaux d'Oissel à Rouen, suivant le thalweg de la Seine aux différentes époques, de 1956 à 2005.

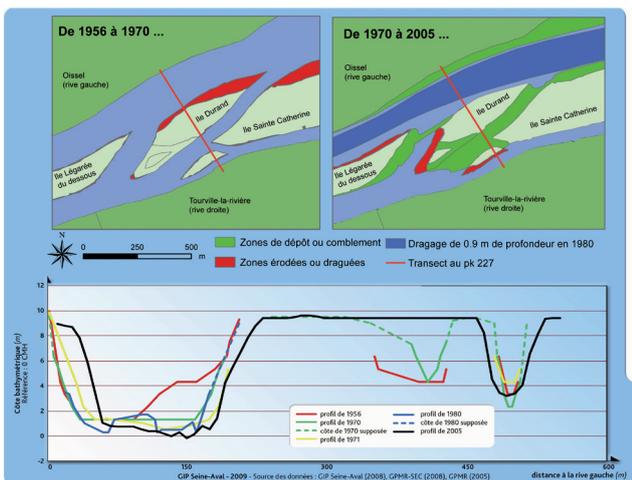


Figure 21 : Travaux effectués et profils transversaux de la Seine au niveau d'Oissel, Pk 227.

De Rouen à Tancarville

En 1824, l'embouchure de la Seine qui s'étendait de La Mailleraye-sur-Seine jusqu'au Havre était composée de bancs de sable impliquant un thalweg* peu profond dont la cote bathymétrique variait entre -1.50 m CMH et +4 m CMH (figure 22). Suite aux premiers travaux, la Seine s'est approfondie, les cotes du thalweg* se sont abaissées de plusieurs mètres allant de 0 m CMH à -9 m CMH

en 1893. Cette variabilité témoigne de la morphologie particulière de la Seine composée d'une alternance de hauts fonds et de fosses plus ou marquées. Les matériaux recouvrant les fonds étaient essentiellement des sables qui se remobilisent facilement sous l'action des courants. L'accroissement du pouvoir érosif des courants par la canalisation de la Seine a engendré un approfondissement conséquent de ce chenal. A partir des années 1870, la seule force des courants ne suffisait plus pour approfondir la Seine. Les fonds sont alors restés relativement stables. De ce fait, les caractéristiques morphologiques de la Seine ont été en partie conservées jusque dans les années 1950. En effet, le profil longitudinal du thalweg* de 1954 présente également une série de hauts fonds et de fosses, en revanche, les cotes extrêmes oscillent entre -3 m et -9 m par rapport au zéro CMH*.

Au fur et à mesure, la morphologie du lit devient peu à peu homogène : les écarts s'amenuisent jusqu'à observer une cote du thalweg* maintenue globalement aux alentours de -7 m par rapport au zéro CMH* en 2005.

Parmi les hauts fonds présents en Seine se trouvait le banc tourbeux des Meules (pk305-307,5). Ce dernier formait une plate-forme longeant la rive droite donnant une forme asymétrique à la section du lit de la Seine (figure 23). Entre 1893 et 2005, une réduction de ce haut fond* est progressivement observée via une diminution d'environ 8 m des cotes bathymétriques pour la majorité du banc donnant une morphologie en forme de « U » à

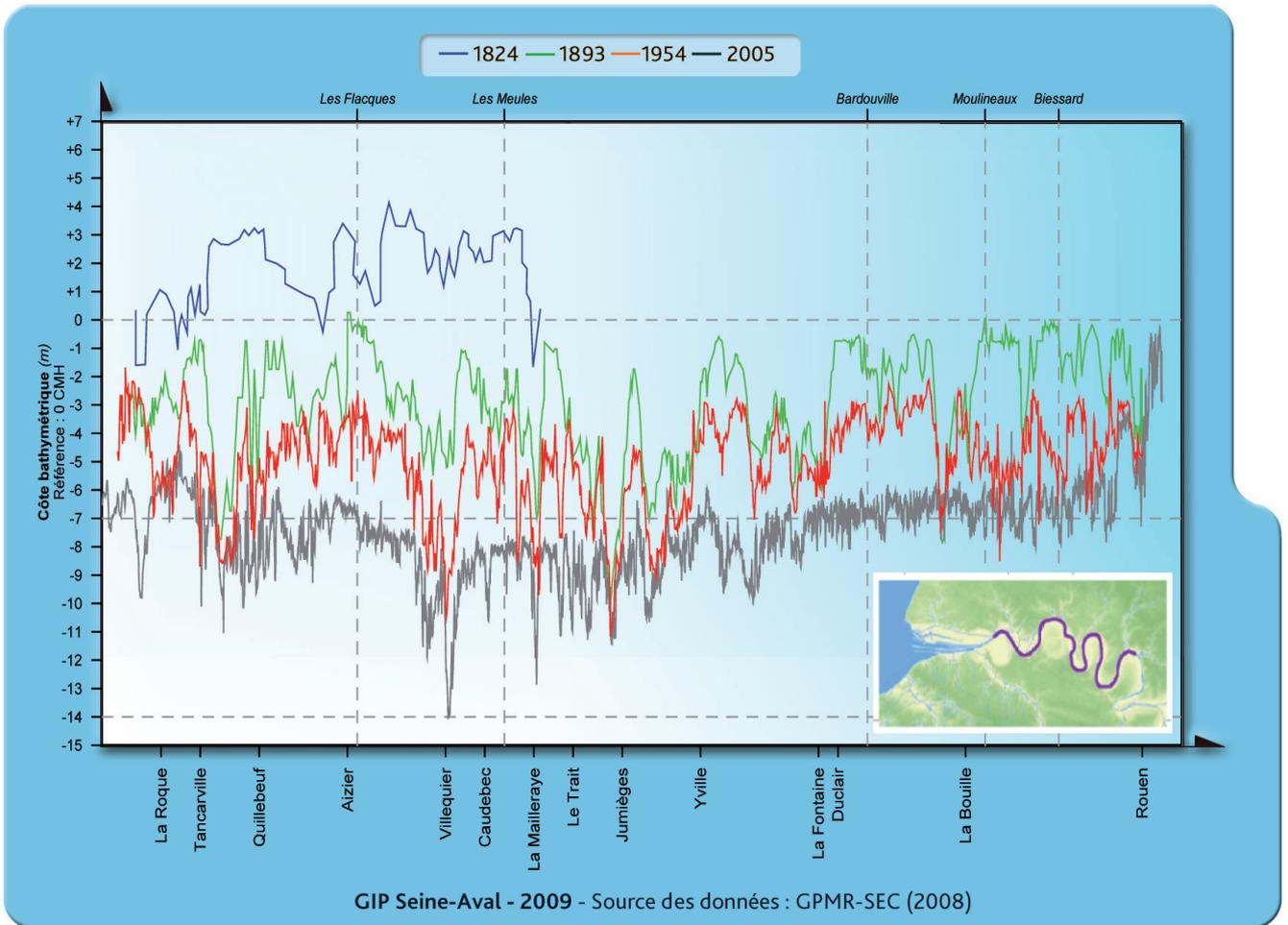


Figure 22 : Profils longitudinaux de Rouen à Tancarville, suivant le thalweg de la Seine aux différentes époques, de 1824 à 2005.

ce niveau. L'homogénéisation du lit de la Seine est liée à deux facteurs, l'un naturel et le second anthropique. Le banc des Meules est l'un des hauts fonds dragués régulièrement depuis 1855, jusqu'à ce qu'il soit entièrement supprimé.

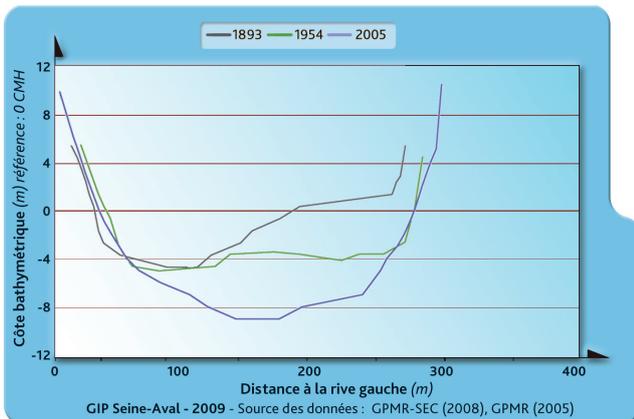


Figure 23 : Profils transversaux de la Seine au niveau du banc des Meules, Pk 306.

De Tancarville au Havre

Au 19^{ème} siècle, la Seine se divisait en plusieurs chenaux très mobiles au niveau de son embouchure dont les plus

profonds étaient utilisés pour la navigation. En 1834, ce chenal avait des caractéristiques variables : en amont de Honfleur, il se situait entre -1 et 0 m CMH puis en aval de cette ville, les cotes bathymétriques chutaient brusquement jusqu'à -13 m CMH pour remonter à -6 m CMH (figure 24). Cette forte variation apparaît en 1894 en de moindre proportion (passage de -1 m à -6 m CMH en aval de Honfleur).

Une comparaison des profils longitudinaux sur ce secteur montre un gain de profondeur très important (de l'ordre de 6 m entre 1834 et 2005). Dans un premier temps, deux phénomènes se produisent simultanément : l'érosion des fonds à hauteur des digues construites et le dépôt de sédiments depuis l'extrémité de ces digues en direction du large. Une nette accélération de l'approfondissement s'observe après 1965 (entre 2 et 4 m) et concerne l'embouchure dans son intégralité grâce notamment à l'endiguement de l'embouchure. En 2005, la pente du lit de la Seine selon le thalweg* ne présente plus de « cassure » à hauteur du domaine marin mais reste relativement constante (maintien de la cote du fond à un maximum de -6 m CMH).

En 1750, l'embouchure qui s'étendait sur plusieurs kilomètres de large, a été réduite sur plus de la moitié de sa largeur, ce qui a profondément modifié sa morphologie (figure 25). Après travaux, celle-ci se caractérise par des zones latérales atterries en arrière des digues Nord et Sud (où se trouvent les canaux du Havre et de

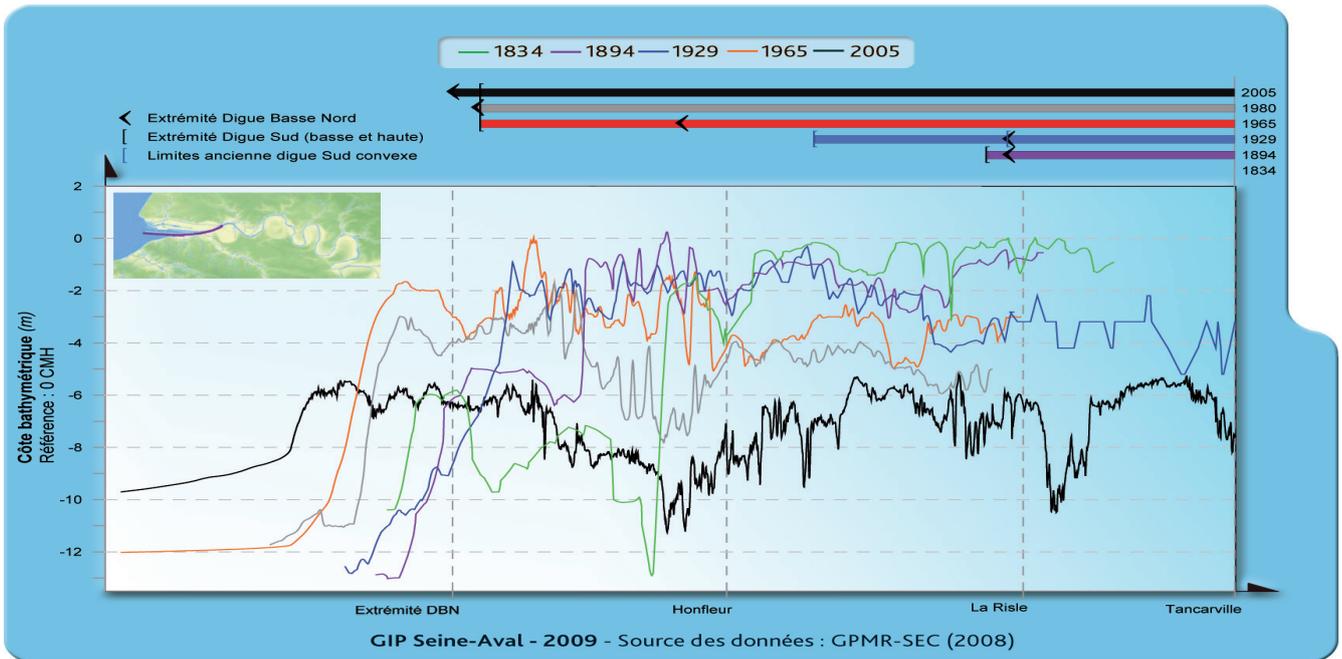


Figure 24 : Profils longitudinaux de Tancarville au Havre, suivant le thalweg de la Seine aux différentes époques, de 1834 à 2005.

Tancarville et les bassins du port du Havre), par la présence d'une fosse plus ou moins profonde et de vasières entre les deux digues Nord et enfin par un profond chenal de navigation délimité par les digues Sud et basse Nord le long de la rive gauche.

A l'extrémité ouest de l'embouchure, la zone située entre la digue basse Nord et le port du Havre s'est progressivement exhaussée en lien avec les comblements latéraux observés en amont au niveau du schorre* (figure 25 et 26) décalant les zones de dépôts des sédiments vers le domaine marin, mais également en lien avec l'extension des bassins portuaires havrais. Le port du Havre étant ouvert sur le milieu marin, le développement de ses bassins s'est effectué par gain de terres sur la mer en construisant des digues hautes et des terre-pleins (figure

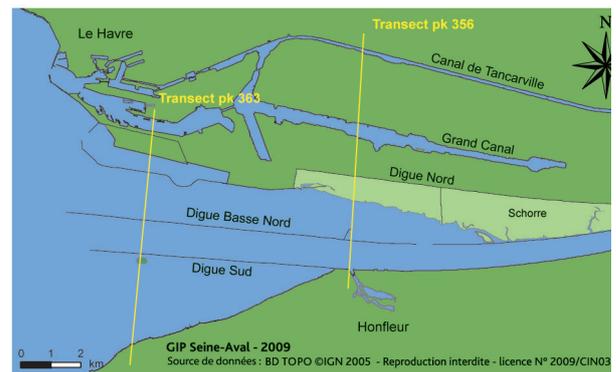


Figure 26 : Embouchure de la Seine en 2008

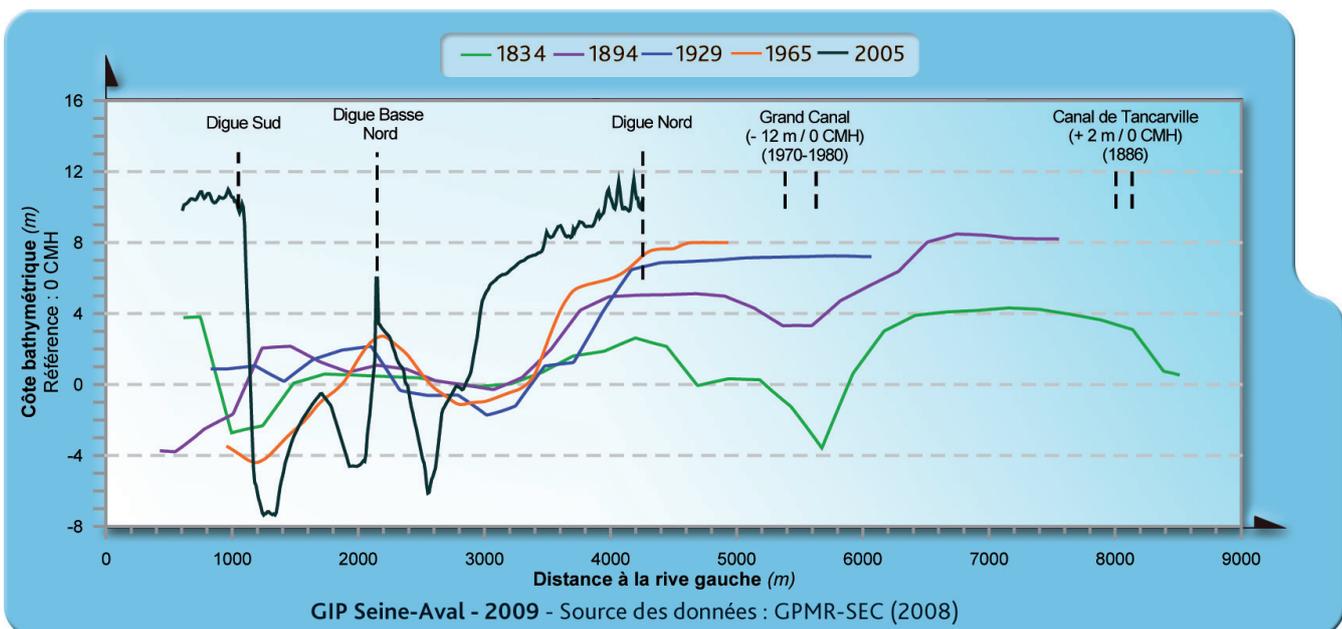


Figure 25 : Profils transversaux de la Seine au droit de Honfleur, Pk 356.

27). Dans la partie centrale de l'embouchure, le chenal de navigation autrefois mobile, a été fixé entre deux digues basses Nord et Sud modifiant la dynamique hydrosédimentaire environnante. Cette modification est en partie à l'origine des zones atterries et des fosses observées de part et d'autre des digues.



Figure 28 : Déferlement du mascaret sur la rive droite à Caudebec en Caux



Figure 29 : Apparition discrète de la vague en Seine non loin de Duclair

L'évolution hydrologique et la dynamique sédimentaire

La modification des processus hydrodynamiques

Les perturbations de la morphologie de l'estuaire sont en partie à l'origine d'une modification de plusieurs processus naturels interdépendants. En premier lieu, l'onde de marée a été modifiée se traduisant par une pénétration et un retrait de la marée facilités dès 1849 ainsi qu'une accélération et une amplification du jusant* en particulier dans les secteurs endigués (Delsinne, 2005 ; Lavoine *et al.*, 1885) (fascicule 1.2 : Courants, vagues et marées). Un événement particulier témoigne de ces changements : la disparition du mascaret. Lors de la première phase des travaux, les effets du mascaret (encadré "Le phénomène du mascaret") ont été énormément atténués en amont de Tancarville grâce aux endiguements qui facilitaient la progression du flot*, laissant penser que la vague déferlante avait disparu en 1854. Toutefois, elle est réapparue avec autant de violence qu'autrefois dès 1858 (Lennier, 1885). Des récits ou articles de presse relatent son passage en 1864, 1880, 1903, 1938, 1949, 1958 et 1963, dernière apparition du mascaret dans sa phase la plus spectaculaire (figure 28) (Sequana, 1999). La mise en place du « nouveau chenal » a eu pour conséquence de rendre la morphologie de la Seine peu favorable à l'apparition de la vague (chenal uniforme, profond et linéaire). Lors de grandes marées, la montée subite du flot* laissait penser que le mascaret se produisait toujours mais plus sous sa forme déferlante (en 1967 entre Sahurs et La Bouille et 1971 à Caudebec-en-Caux), puis sa disparition fut totale suite à l'aménagement de l'embouchure en 1979 (figure 29).

Parallèlement, Le Floch (1961) a montré qu'entre 1850 et les années 1950, le marnage* a considérablement augmenté à l'échelle de l'estuaire du fait de l'endiguement (Guézennec, 1999). Cette augmentation se constate notamment à Rouen en condition de vive-eau* (tableau 1). Cette brève interprétation ne prend pas en considération la part des facteurs naturels dans ces évolutions, influence qui n'a pas pu être quantifiée.

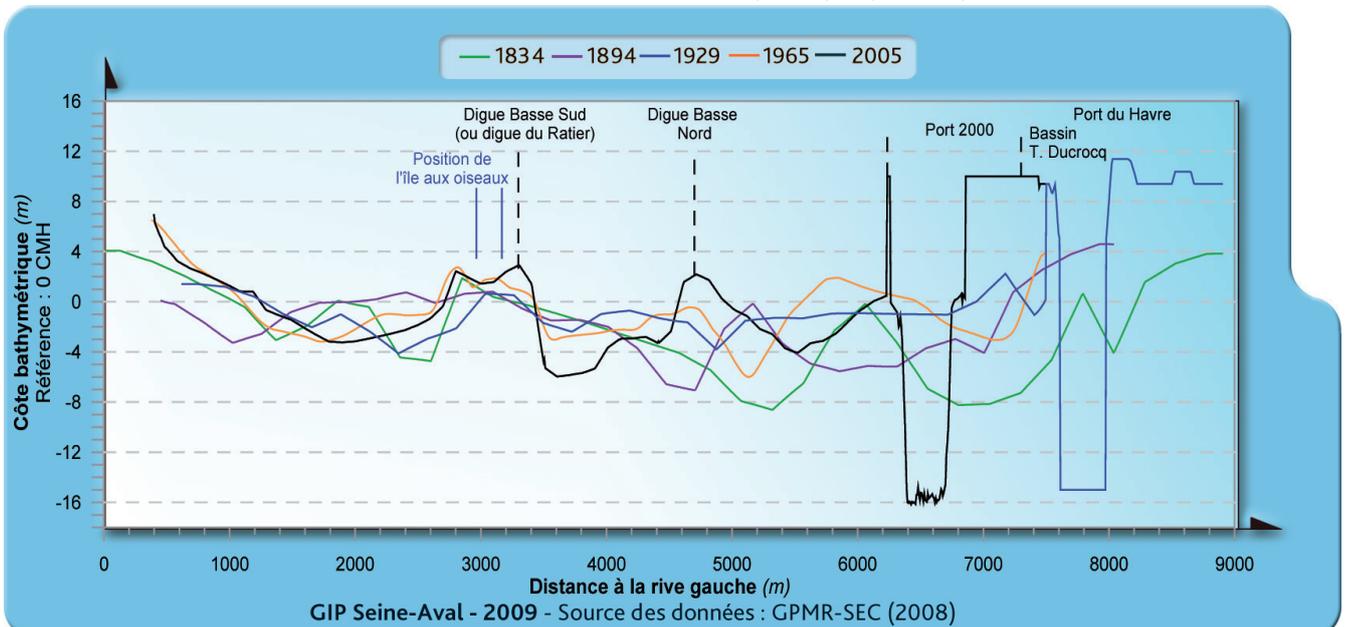
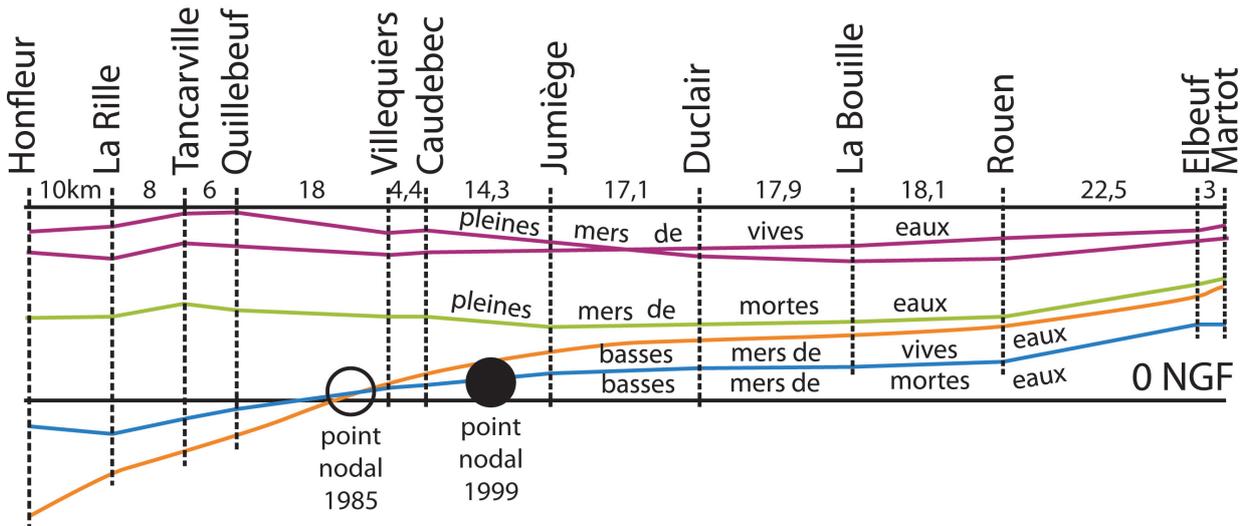


Figure 27 : Profils transversaux de la Seine à hauteur du Havre, Pk 363



Source des données : Lavoinne et al. (1885), Guézennec (1999)

Figure 30 : Modification de la position du point caractéristique de l'estuaire de la Seine en 1885 et 2000

Date	Type de courbe	Conditions et coefficient de marée	Débit à Poses (m ³ .s ⁻¹)	Marnage à Rouen (m)
1856	Locale (18 août)	Vive-eau	-	1,2
1876	Locale (26 sept.)	Vive-eau	107	2,1
1970	Locale (17 oct.)	Vive-eau	95	2,7
1996	Statistique (1986-1996)	Vive-eau	101	3,3
2006	Statistique (1990-2006)	Vive-eau	95	3,3

Tableau 1 : Exemple de marnage à Rouen à différentes époques dans des conditions de débit et de marée semblables

La modification de l'onde de marée a également entraîné une remontée du point caractéristique. Ce dernier correspond à un lieu géographique où quelque soit le coefficient de marée, le niveau des basses mers est constant. En aval de ce point, le niveau des basses mers sera d'autant plus bas que la marée est forte et en amont, l'inverse se produit (figure 30) (Guézennec, 1999). Ce constat suppose un stockage temporaire d'un volume d'eau en amont du point caractéristique entre une basse mer de vive-eau* et une basse mer de morte-eau*.

Par ailleurs, la modification des processus hydrologiques a entraîné entre 1955 et 1965 une migration de plus de 50 km vers l'aval du bouchon vaseux* (fascicule 1.4 : Matériaux fins) et de la limite d'intrusion saline* (fascicule 1.2 : Courants, vagues et marée).

Un estuaire qui se comble

Les processus hydrodynamiques et sédimentaires régissant un estuaire font qu'il se comble naturellement. La vitesse de ce comblement est fonction de la masse sédimentaire sableuse disponible dans le milieu marin et ce phénomène arrive à terme, pour un estuaire non aménagé, après une durée de l'ordre du millénaire. Pour l'estuaire de la Seine, il s'est produit en moins de 250 ans, largement accéléré par les différents aménagements du fleuve.

La surface en eau de l'estuaire de la Seine a fortement diminué passant de 340 km² en 1750 (surface de référence) à 136 km² en 2005 indiquant une réduction de 60 % de la superficie de l'estuaire. L'évolution du comblement de l'estuaire peut être retranscrite au travers de l'indice de maturité (cf encadré "Indice de maturité") qui dans le cas

présent, est passé de 1 en 1750 à 0.40 en 2005.

En fonction des secteurs, l'indice de maturité a évolué de manière lente ou soudaine. De Poses à Oissel, la superficie du lit a été réduite de 11.5 km² à 4.50 km² entre 1750 et 2005 soit 60 % de perte de surface en eau. L'indice de maturité est alors de 0.40 en 2005 dont la baisse s'explique en grande partie par d'importants comblements du lit de la Seine effectués à partir des années 1940. Entre Oissel et Rouen, l'accélération du comblement est également induite par les interventions anthropiques. La superficie en eau de ce secteur a diminué de 8,70 km² en 1750 à 6.43 km² en 2005. Ceci représente 27 % de réduction (indice de maturité de 0,73 en 2005) dont 10 % du comblement s'est produit en 220 ans et les 17 % restant en l'espace d'une trentaine d'années au cours desquelles de nombreux bras ont été comblés (figure 31-1).

De Rouen à Tancarville, la superficie en eau était de 82.20 km² en 1750 et de 33,30 km² en 2005 soit 60 % de perte de surface. L'indice de maturité est ainsi passé de 1 à 0.40 entre ces deux dates (figure 31-2). Toutefois, dès 1893, cet indice était de 0,42. Le secteur situé en aval de La Mailleraye-sur-Seine s'évasait progressivement jusqu'à la mer laissant un grand espace de divagation au fleuve qui a été rapidement réduit par endiguement en-

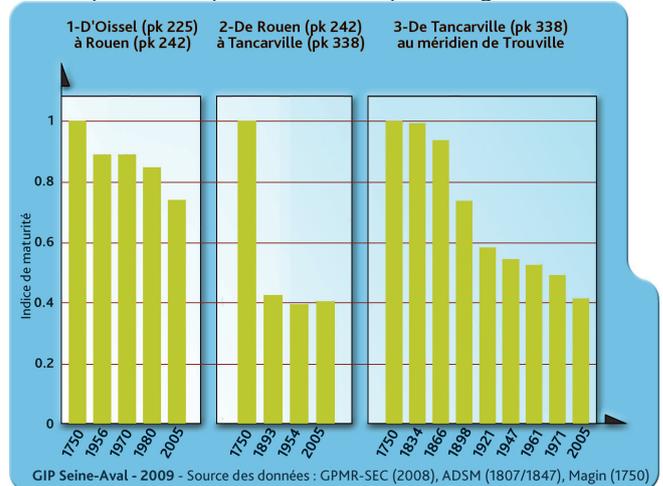


Figure 31 : indice de maturité calculé sur trois secteurs de l'estuaire de la Seine.

tre 1848 et 1867. En arrière des digues construites entre Villequier et Tancarville (1848-1855), environ 22.50 km² du lit mineur ont été comblés par des alluvions* déposés par la Seine (dépôts limoneux) (Lavoine *et al.*, 1885). En aval de Tancarville, le comblement a été de même

Indice de maturité

L'indice de maturité permet de mesurer les modifications temporelles de l'estuaire à une échelle pluri-décennale à pluri-centennale et de projeter à long terme la morphologie de ce système. Il se mesure en comparant la surface en eau à pleine mer d'un estuaire à celle d'un état de référence qui, pour la Seine, daterait d'avant les grands aménagements réalisés à partir de 1848 (figure H) (Lafite *et al.*, 2003).

L'évolution naturelle d'un estuaire se traduit par un comblement progressif de l'espace de propagation maximale des eaux. Lorsque l'indice de maturité est égal à 1, l'estuaire a conservé sa surface optimale et donc aucune modification de cet espace n'est observé. En revanche lorsque cet indice tend vers 0, l'estuaire est en phase de comblement. En fonction des caractéristiques hydrodynamiques et sédimentaires de l'estuaire, ce processus peut prendre des dizaines à des centaines d'années pour effectuer son évolution naturelle, durée qui peut être modifiée par des facteurs anthropiques. Une analyse temporelle de cet indice permet d'observer la vitesse d'évolution du système mais également si elle est ou n'est pas influencée par des facteurs extérieurs au système (exemple endiguement).

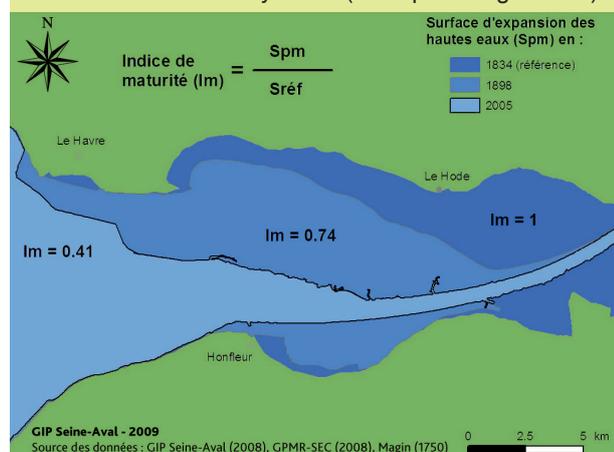


Figure H : évolution de la surface en eau de l'embouchure de la Seine

ampleur : de 236.40 km² en 1750 à 97.70 km² en 2005 soit 59 % de perte de surface, échelonnée sur une centaine d'années (figure 31-3). L'indice de maturité est ainsi passé de 1 en 1750 à 0.51 en 2005. A partir de 1875, la vitesse du comblement s'est accentuée se traduisant par une réduction des zones intertidales* (situées entre 0 et 8.30 m CMH) au profil de zones totalement terrestres. Par la suite, des phases de remplissage rapide se démarquent : 1894-1913 (période de construction de la digue Sud convexe et du prolongement de la digue haute Nord) et 1960-1980 (prolongement de la digue basse Nord au droit du port du Havre et construction de la digue en crochet et du terre-plein) (Delsinne, 2005). Le comblement récent de l'embouchure se manifeste par la progression du schorre*. A l'extrémité Ouest de l'embouchure, le comblement se traduit également par un exhaussement

des zones profondes notamment dans le domaine marin (cf paragraphe La chenalisation des sections du lit de la Seine).

Au delà du comblement de l'estuaire de la Seine, les processus hydrodynamiques et sédimentaires sont également à l'origine d'une modification constante de la couverture sédimentaire superficielle (fascicule 1.3 : Sables, chenaux, vasières).

Impacts hydrosédimentaires des aménagements récents de l'embouchure de l'estuaire de la Seine

Les enjeux

Au cours des années 1990, la réponse du Port du Havre aux enjeux économiques du développement du trafic mondial des conteneurs a conduit à envisager plusieurs possibilités d'extension de ses capacités d'accueil pour les grands navires. Ce fut Port 2000, objet en France du premier Débat Public autour d'un grand projet. La solution retenue à l'issue de ce débat en 1998 reposait sur une construction en grande partie sur la surface de l'estuaire. Un comité d'experts fut alors mis en place. En septembre 1999, il formulait son diagnostic sur les impacts attendus de l'extension portuaire sur l'estuaire de la Seine, milieu très fragile et déjà fortement perturbé du point de vue de ses fonctionnalités. Les experts demandaient, en outre, que les mesures compensatoires portent sur les effets négatifs de l'extension portuaire sur le chenal Nord de l'estuaire (dite fosse Nord) et qu'elles visent à améliorer les fonctionnalités de la principale vasière intertidale de l'estuaire (dite vasière Nord).

Depuis les digues submersibles des années 1950 à 1980, l'estuaire aval de la Seine forme un domaine compartimenté avec un sous-ensemble formé par le couple fosse Nord-vasière Nord. Avant la construction de Port 2000, la surface utile aux fonctionnalités biologiques de la vasière Nord (altitudes comprises entre +5 m et +7,5 m au-dessus des plus basses mers) était progressivement réduite par un double phénomène : (1) extension des herbues au Nord et (2) migration du chenal Nord vers le nord, associé au développement latéral d'un important banc sableux (dit Banc de la Passe) situé à l'aval du Pont de Normandie (fascicule 1.3 : Sables, chenaux, vasières).

Les aménagements

Dans le cadre des mesures compensatoires, des propositions émergeaient de la concertation pour répondre aux impacts hydrosédimentaires du projet et tenter d'améliorer les fonctionnalités du couple fosse Nord-vasière Nord, en visant en particulier l'extension des surfaces de vasières. Ces propositions furent testées et validées par des modélisations numériques et physiques de la SOGREAH. Ces mesures compensatoires réalisées dans la fosse Nord sont résumées par la figure I.

Situé dans la Réserve Naturelle de l'estuaire de la Seine, l'ensemble de ces aménagements à but environnemental visait à (1) retrouver des surfaces nues de vasières adossées à la digue basse nord, en compensation de

leur disparition sur la vasière Nord et (2) retrouver un caractère actif de méandrement du chenal Nord, tout en (3) préservant la sécurité de navigation dans le chenal du port de Rouen.

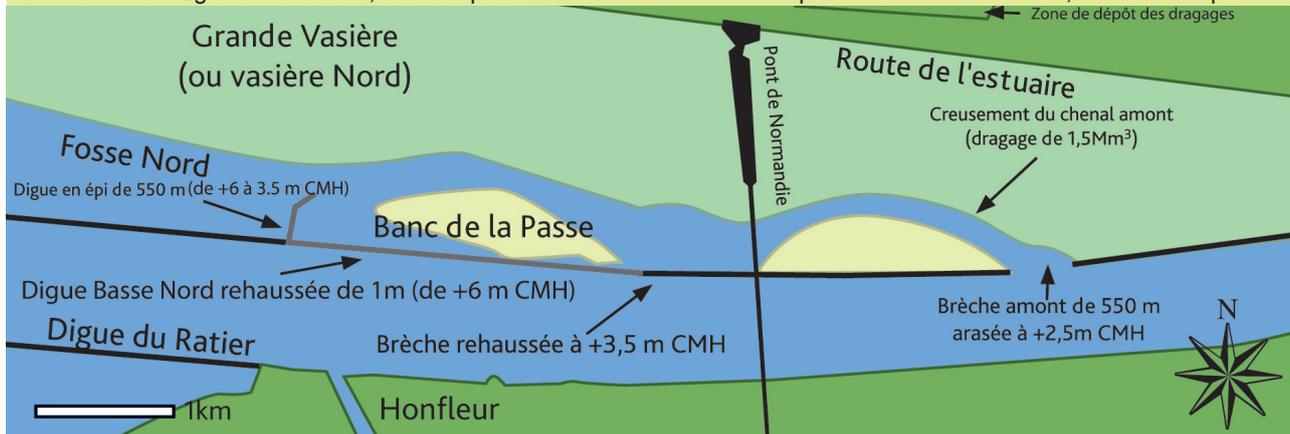
Comme pour la digue de protection de Port 2000, le phasage de ces aménagements a été étudié sur modèles, sur la base des connaissances morphologiques, sédimentologiques et hydrodynamiques du milieu concerné. L'observation des conséquences de ces aménagements était prévue et la modification de certains d'entre eux envisagée en fonction des observations faites *in situ*. En effet, le calage des altitudes des endiguements et la dimension des brèches réalisées étaient très importants dans la mesure où ils contrôlent la circulation hydraulique et la dynamique sédimentaire entre la fosse Nord, la mer et le chenal de navigation. Toutefois, dans les interventions de génie civil au service de l'environnement, parfois nommées « Génie Ecologique », la nature oblige toujours à rester humble...



Figure J : Photographie aérienne de la zone est de la fosse Nord de l'embouchure de la Seine

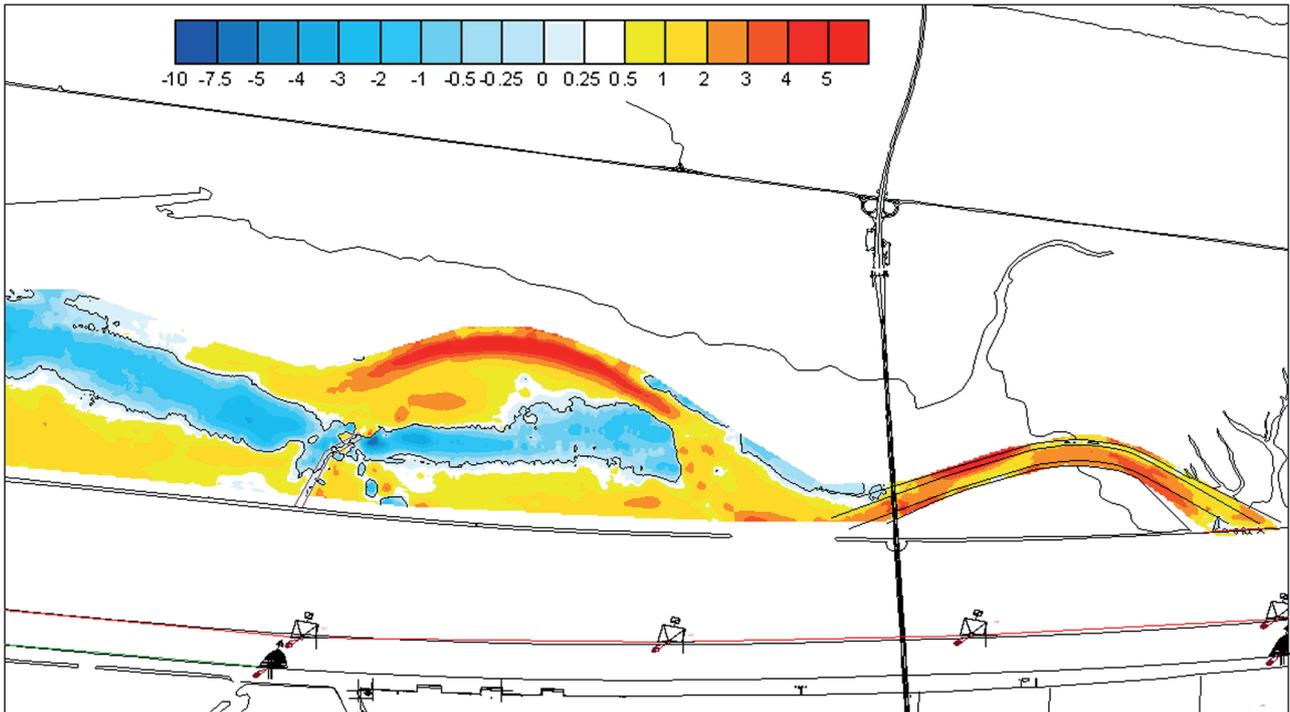
Leurs conséquences : une situation actuelle très active (2008-2009)

L'objectif de créer des surfaces de vasières adossées à la digue submersible nord passait d'abord par accepter la sédimentation sableuse induisant le rehaussement du Banc de la Passe jusqu'à une cote permettant le dépôt stable de sédiments fins ou vases. Au début de 2009, ce banc est toujours, dans son ensemble, le support d'un transport très actif de sables, matérialisé par des



GIP Seine-Aval-2009 - Source de données : Cuvilliez d'après SOGREAH

Figure I : Mesures d'accompagnement des travaux de Port 2000 réalisés dans l'estuaire de la Seine de 2004 à 2005



Source de données : GPMR

Figure K : Différentiel bathymétrique et topographique (Nov 2005/Fév 2009) du chenal Nord au voisinage de l'épi et du Banc de la Passe

structures sédimentaires de haute énergie appelées mégarides (figure J).

Le contexte général actuel de l'ensemble de la fosse Nord en cours de restauration est d'ailleurs celui d'un ensablement marqué. Il trouve probablement son origine à l'ouest, lié au ré-équilibre hydrosédimentaire de la zone située immédiatement au sud de la digue de protection de Port 2000. Sous le flot* dominant, le transport vers l'amont de matériaux était inéluctable. Celui-ci avait été prévu et anticipé par d'importants pré-dragages d'accompagnement (3,5 106 m³), mais il a été probablement sous-estimé. De ce fait, le résultat actuel est la formation de nouveaux bancs à mégarides au niveau de la basse slikke* de la vasière Nord ainsi qu'au niveau des piliers du viaduc du pont de Normandie. Ce colmatage, évidemment indésirable, a aussi conduit au remplissage important du méandre artificiel amont plutôt qu'à son méandrement tel qu'attendu (figure K).

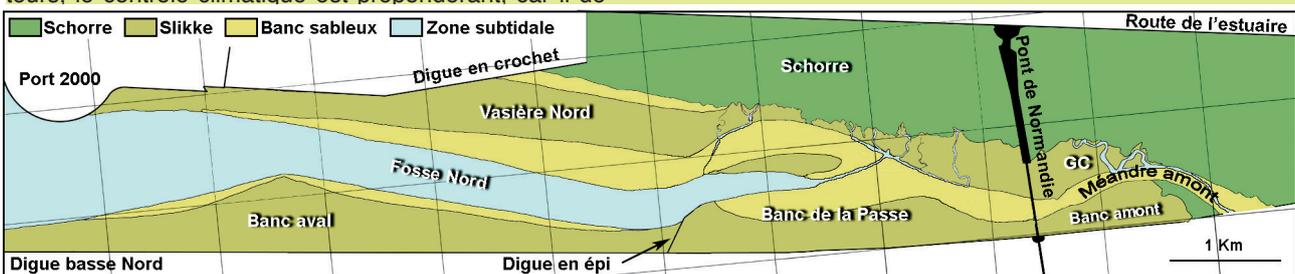
Leur devenir : Perspectives à l'horizon 2015

Il est toujours périlleux d'envisager ce que deviendra une surface estuarienne, tant les facteurs qui contrôlent sa dynamique sont nombreux et complexes. Parmi ces facteurs, le contrôle climatique est prépondérant, car il dé-

termine le débit du fleuve qui peut modifier la morphologie des dépôts sédimentaires et influencer la nature de la sédimentation en déplaçant le bouchon vaseux*. Or, depuis plus de six ans, la Seine n'a pas connu de grandes crues* et, hormis quelques gonflements hivernaux du débit, les conditions d'étiage* dominent.

Si l'on considère l'absence de crues importantes d'ici à l'horizon 2015 et aucune modification des aménagements, le suivi de l'évolution hydrosédimentaire permet d'envisager un modèle conceptuel définissant la morphologie des différentes unités qui composent la surface située au nord de la digue basse nord (figure L). Cette figure présente les impacts d'un apport sableux important sous le contrôle d'un flot* dominant dans un environnement fortement anthropisé. De longs bancs sableux à mégarides limitent une vasière Nord relique et un banc aval vaso-sableux apparu dès 2004. La fosse Nord ainsi chenalisée présente une section hydraulique réduite avec un exhaussement de son fond ainsi qu'une encoche de flot* peu profonde en amont de la digue en épi*. Quant au méandre amont, désormais isolé de la fosse Nord, il est quasiment colmaté...

P. Lesueur et A. Cuvilliez



Source des données : A. Cuvilliez

Figure L : Modèle conceptuel d'évolution de la vasière Nord et de la fosse Nord à l'horizon 2015

Chapitre 4. Des implications pour les usages de l'estuaire

L'évolution des conditions de navigation et développement des activités portuaires

L'amélioration des conditions de navigation dans l'estuaire

Au sein de l'estuaire, deux zones de navigation se distinguent, chacune pouvant accueillir des bateaux de gabarits différents. Entre Poses et Rouen, la navigation est de type fluviale, limitée à des bateaux de petit à moyen gabarit (au maximum 1,5 m de tirant d'eau* avant 1848). Avant l'aménagement de ce secteur, les difficultés de navigation étaient localisées à hauteur des pertuis* de Poses et de Martot. En revanche, en aval de Rouen, la navigation est dite maritime et permet l'accueil des navires de grand gabarit (de 2 à 3 m de tirant d'eau* entre Rouen et Le Havre au 19^{ème} siècle). Avant les travaux, une multitude d'obstacles faisait face aux navires remontant la Seine (élargissement ou rétrécissement du lit, hauts fonds fixes ou divaguant, ...). La zone la plus pénalisante entre Rouen et la mer restait tout de même l'embouchure et ses bancs sableux mobiles.

De 1848 à 1860, les travaux ont été concentrés entre La Mailleraye-sur-Seine et Tancarville. La création d'un chenal plus étroit et uniforme a augmenté le pouvoir érosif de la Seine engendrant un approfondissement du lit quasiment immédiat. Celui-ci a permis d'accroître la profondeur d'eau disponible. Le tirant d'eau* variait entre 3 et 5 m à la montée selon les conditions de marée (grande marée - coefficient 115 ou marée basse - coefficient 47) (figure 32). Malgré les travaux effectués sur cette période, les conditions de navigation restaient mauvaises au niveau de l'embouchure où le chenal de navigation n'était pas stabilisé (6 tracés différents observés à la pointe de Quillebeuf-sur-Seine durant l'année 1849) (Reymondier, 1990).

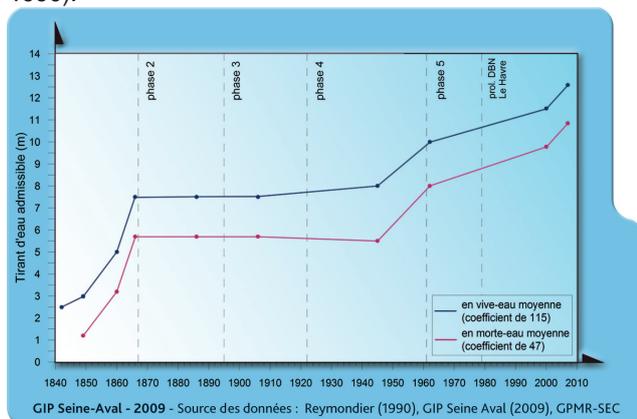


Figure 32 : Evolution du tirant d'eau à la montée entre 1840 et 2003.

En 1861, les digues ont été prolongées jusqu'à la confluence avec la Risle mais leur influence sur la morphologie n'était pas suffisante pour sécuriser la navigation à l'embouchure. Le chenal de navigation dans cette zone restait très mobile avec des inflexions parfois très dan-

geuses et imprévisibles comme de 1885 à 1889 (Cardin, 1907). Cette situation perdura jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle (figure 33).

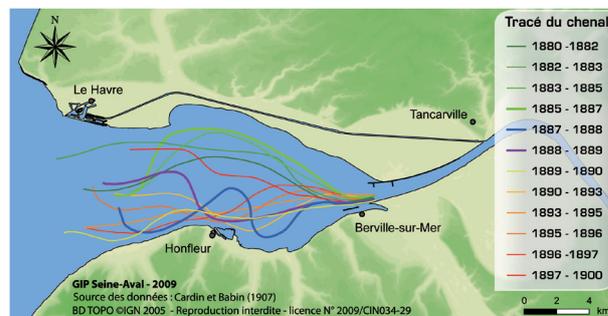


Figure 33 : Variation du tracé du chenal de navigation de 1880 à 1900.

A cette forte mobilité latérale, s'ajoutait la variation des profondeurs du chenal qui oscillaient d'un mètre au fil des marées, tous deux à l'origine des nombreux échouages constatés en 1880. Les fonds y étant les moins profonds, la partie sud de ce secteur représentait la zone la plus difficile à franchir.

Les contraintes météorologiques ne facilitaient en aucun cas la progression des navires dans l'embouchure. Il arrivait qu'ils soient surpris par la brume au point que les phares et les bouées délimitant le chenal ne soient d'aucune aide. Une fois engagé, les navires devaient poursuivre leur route au risque de dévier du chenal de navigation et de s'échouer. Le problème de la signalisation du chenal se posait également lors des tempêtes qui arrachaient les balises et les bouées pendant qu'elles déplaçaient également le chenal de navigation. Le balisage du nouveau chenal prenant plusieurs jours, les navires s'engageant pour remonter la Seine, le faisait à leurs risques et périls (Lavoine *et al.*, 1885). Par ailleurs, les bouées n'étaient efficaces que de jour, la nuit les capitaines ne pouvaient compter que sur les connaissances des pilotes* embarqués à bord. A partir de 1892, des bouées lumineuses étaient installées permettant de mieux sécuriser les trajets de jour comme de nuit (Reymondier, 1990).

C'est à partir de la troisième phase de travaux (1895-1922) que les aménagements visaient la stabilisation du chenal à l'embouchure, zone la plus instable de l'estuaire à cette époque, avec la construction de la digue Nord et d'une digue Sud convexe à partir de 1897. Dès 1900, au niveau des digues terminées, le chenal se fixait en s'appuyant sur la digue convexe mais cela n'a fait que déplacer la zone d'instabilité du chenal en aval, au mécontentement des ports du Havre et de Honfleur. A l'extrémité des digues, le chenal qui longeait la digue Sud déviait brusquement en direction du port du Havre de 1900 à 1904 puis vers celui d'Honfleur de 1904 à 1907 (figure 34).

Parallèlement, les grandes campagnes de dragage (1888-1895 et 1899-1903) focalisées sur certains points noirs situés entre Rouen et Tancarville, avaient permis d'augmenter la profondeur et par conséquent, le tirant d'eau* garanti lors de la majorité des marées (5,50 m à la montée, figure 32).

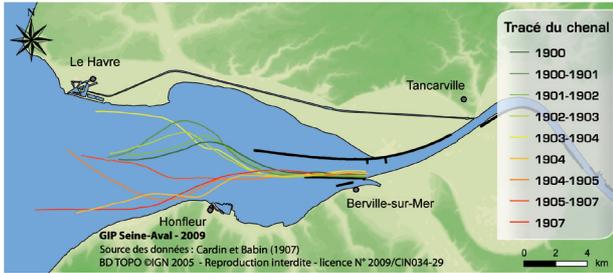


Figure 34 : Variation du tracé du chenal de navigation de 1900 à 1907.

Au cours des années 1910, les digues mises en place dans l'embouchure ne procuraient toujours pas la stabilité et la sécurité voulues par les ports. C'est alors que fut décidée la modification du tracé des digues après une longue période de réflexion (loi de 1932). Pendant la première moitié du 20^{ème} siècle, le tirant d'eau* admissible n'avait pas évolué (5,50m à la montée), les quelques travaux effectués dans l'estuaire avaient permis de maintenir des profondeurs suffisantes entre Rouen et Tancarville. En 1957, le tirant d'eau* à la montée de jour pouvait atteindre 8,20 m lors de marée exceptionnelle. En revanche, à la montée de nuit ou à la descente (conditionnée par le jusant*), le tirant d'eau* ne pouvait pas dépasser 6,20 m pour donner une plus grande marge de sécurité aux navires (Dumans, 1957). A partir de 1961, l'ouverture du « nouveau chenal » à l'embouchure a permis un gain de 2,50 m de tirant d'eau* à la montée en marée de morte-eau* entre 1942 à 1962 (passant à 8 m) et de 2 m en marée de vive-eau* exceptionnelle sur la même période (passant à 10 m) (figure 32) (Reymondier, 1990).

Entre Poses et Elbeuf, les aménagements (rescindements d'îles, dragages) effectués au cours des années 1930/1940, ont permis d'obtenir 3 m de tirant d'eau* garanti quelques soient les conditions de marée et de débit (contre 1,5 m à 2,50 m avant les travaux). Ces travaux ont été prolongés jusqu'à Rouen dans les années 1950 à 1980. Le chenal principal a été calibré de manière à ce que les largeurs soient uniformes (de l'ordre de 80 – 110 m) et qu'il y ait 3 m de hauteur d'eau garanti pour la majorité des conditions de marée et débit (cette hauteur atteindra 4 m suite à de nouveaux travaux) (archives GPMR).

En 1979, à l'embouchure, la digue basse Nord a été prolongée jusqu'à hauteur du Havre. Ceci a permis un gain d'environ 1,50 mètres sur le tirant d'eau* en toutes circonstances. Par la suite, le Port de Rouen a continué les travaux d'approfondissement (programmes triennaux de 1983-1992 et 1998-2000). En 2007, le tirant d'eau* a atteint 10,85 m et 12,60 m pour un coefficient de marée respectif de 47 et 115 (figure 32) (PAR, 2007(c)).

Le développement des activités du port du Havre

Le port du Havre est un port maritime en eau profonde qui naturellement dispose d'accès nautiques avantageux. Par le passé, il n'a pas spécialement été pénalisé par les profondeurs contrairement au port de Rouen. L'évolution des moyens nautiques a guidé l'expansion du port du Havre qui s'est progressivement développé aussi bien en terme d'infrastructures que de trafics. Après la reconstruction du port détruit pendant la seconde guerre mondiale, le trafic maritime était de 10 millions de tonnes en 1950. Pendant les « trente glorieuses », le trafic havrais a

atteint exceptionnellement 83 millions de tonnes en 1973, encourageant la mise en œuvre d'un grand programme de développement du port (qui incluait un canal maritime). Suite aux aménagements effectués par le port de Rouen, au Nord de l'embouchure, les digues ont entraîné un comblement des zones situées en arrière ce qui a permis un gain considérable de surfaces exploitables. Ce gain a profité au port du Havre qui a ainsi pu développer ses bassins portuaires et également aménager le Grand canal du Havre dans les années 1970, autour duquel plusieurs industries se sont implantées. Plus récemment, des travaux d'agrandissement du port (Port 2000) ont également permis d'augmenter sa capacité d'accueil des grands porte-conteneurs et ainsi développer le trafic havrais (qui se chiffre à environ 79 millions de tonnes en 2007) (GPMH, 2009).

Un nouveau programme d'agrandissement des infrastructures portuaires du Havre est en cours de réflexion comprenant le prolongement du Grand canal du Havre jusqu'au canal de Tancarville. Ce projet vise à améliorer les dessertes fluviales en proposant une alternative au canal de Tancarville, plus directe et demandant moins de manœuvres (ponts, écluses*) mais aussi à développer les activités industrialo-portuaires en conséquence. Son tracé définitif n'est pas encore fixé mais l'espace de réalisation est restreint par les activités déjà existantes et par la Réserve Naturelle de l'Estuaire de la Seine. La présence de ces milieux naturels possédant un intérêt écologique certain, impliqueront la mise en place de mesures environnementales qui seront déterminées suite à des études environnementales accompagnant le projet (PAH, 2008).

Le développement des activités du port de Rouen

Le port de Rouen situé plus à l'intérieur des terres, est plus dépendant de la morphologie du lit de la Seine pour son activité que le port du Havre.

Périodes de guerre mises à part, la tendance d'évolution du nombre de navires transitant dans ce port est globalement stable. En revanche, la courbe représentant les quantités de marchandises est croissante et présente des ruptures de pente coïncidant avec des dates charnières de l'aménagement de l'estuaire (figure 35). Ainsi, l'un des facteurs expliquant l'accroissement du trafic du port

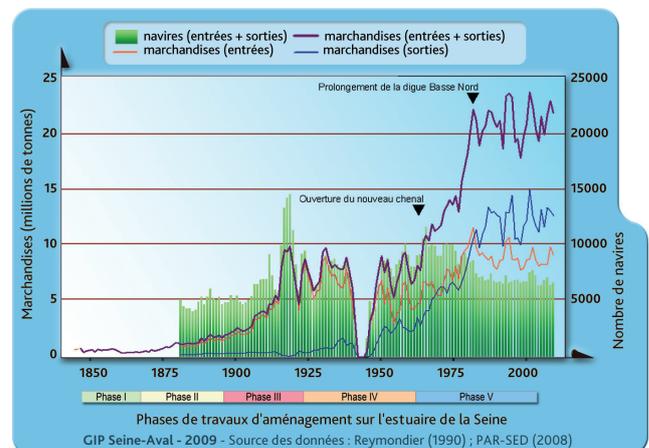


Figure 35 : Evolution du trafic fluvial et maritime du port de Rouen de 1840 à 2007

Evolution des navires

Des navires au gabarit sans cesse grandissants ...

Au 19^{ème} siècle, de nombreux bateaux de gabarits variés naviguaient sur la Seine et contribuaient à l'activité économique. Hormis les petites barques (bachot ou coche d'eau) typiques de la Seine, l'un des bateaux le plus rencontré était le galoubie, de petite taille (8 à 10 m de long, 1,50 m de large) demandant au maximum un tirant d'eau* de 0,35 m. Ces dimensions ne permettaient pas de transporter des charges conséquentes mais les galoubies avaient l'avantage de naviguer quelques soient les conditions de débit et de marée (Le Sueur, 1989). Les gribanes, petits voiliers traditionnels de l'estuaire de la Seine, à fond plat et à faible tirant d'eau* (0,90 m au maximum) étaient utilisés dès le Moyen-âge pour le transport de marchandises. Ces bateaux à voile faisaient 20 à 22 m de long pour 6 à 8 m de large et ne transportaient pas plus de 90 tonnes. Au milieu du 19^{ème} siècle, ils étaient d'ailleurs utilisées pour amener les pierres destinées à l'endiguement de la Seine.

L'apparition et le développement des bateaux à vapeur vint révolutionner la navigation. A fond plat et équipés de roues à aubes, ils ont été utilisés pour assurer le transport de voyageurs entre Paris et Le Havre dès 1820 et de manière quotidienne, en 1836. De grande taille (en général plus de 50 m de long), ils pouvaient accueillir 200 à 600 voyageurs pour les plus imposants. Ce type de bateaux était également utilisé pour le transport de marchandises. Dès lors, pour ces navires toujours présents au 20^{ème} siècle, il n'était plus nécessaire d'attendre de grande marée et des vents d'ouest favorables pour remonter la Seine contrairement aux voiliers.

Parmi les autres bateaux de commerce naviguant sur la Seine en domaine fluvial à cette époque, deux catégories se distinguaient : les bateaux nécessitant au moins 2 mètres de tirant d'eau* (grands bateaux normands et chaland du Havre) portant des charges relativement lourdes à cette époque supérieures à 400 ou 500 tonnes et les bateaux d'1,50 mètre de tirant d'eau* portant des charges moindres de 200 jusqu'à 400 tonnes (bateaux normands ordinaires, chalands ordinaires ou péniches ordinaires). Les bateaux normands (ou besognes) ont arpenté la Seine depuis le 18^{ème} siècle jusqu'au milieu du 20^{ème}. Ces bateaux en bois étaient de faible tirant d'eau* et de taille variable : de 20 m à 60 m de longueur sur 8 à 8,50 mètres de large et de 1,50 m à 2 m de tirant d'eau* selon la charge à transporter. Ces embarcations étaient parfois accompagnées de bateaux de plus petite taille nommés les allèges servant à vider partiellement les bateaux pour ainsi réduire leur charge et éviter un échouage sur un haut fond* (Labrouche, 2000 ; Le Sueur, 1989). Les besognes ont été remplacées dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle par des bateaux Picard motorisés (de 40 mètres de long, 7,70 m de large pouvant transporter 560 tonnes de marchandises). Ce type de bateau a disparu au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle pour laisser place à l'automoteur (péniche, chaland de Seine) encore utilisé actuellement.

Ainsi, au fil des années, les navires sont devenus de plus en plus imposants. Les nombreux aménagements effectués dans l'estuaire de la Seine ont permis d'accroître la capacité d'accueil du fleuve. Suite à Port 2000, le port

du Havre peut accueillir des navires de 14,50 m de tirant d'eau*. En 2007, entre Le Havre et Rouen, les navires de plus de 10 m de tirant d'eau* peuvent naviguer dans la majorité des conditions de marées. En amont de Rouen en direction de Paris, des bateaux type péniche n'excédant pas 4 m de tirant d'eau* circulent.

En aval de Rouen, divers navires commerciaux de gabarit adapté aux ports d'accueil peuvent être présents en fonction de la marchandise qu'ils transportent (porte-conteneurs, vraquiers, cargos, pétroliers, rouliers, ...) sans compter ceux voués au transport de passagers (vedettes, navires de croisières, ..) (figure M).



Y. Lavarelo

Figure M : Pétrolier au niveau du port du Havre.

En amont de Rouen, les facteurs limitant la dimension des bateaux sont les caractéristiques des infrastructures et de la Seine (accueil portuaire, profondeur du chenal en eau, hauteur des ponts) et les dimensions des écluses* à franchir. Ces contraintes ont permis de réglementer des gabarits de bateaux capable de naviguer sur la Seine qui se distinguent en trois catégories : les bateaux du type Freycinet (longueur 38,50 m, largeur 5,05 m et entre 2,20 et 2,50 m de tirant d'eau*), les grands automoteurs (longueur maximale 90 m, largeur maximale 11,30 m et tirant d'eau* compris entre 2,50 m et 3 m) et les convois poussés (dont leur taille dépend du nombre de barges poussées et de la puissance nécessaire pour les pousser tout en affrontant les courants).

... et des pratiques qui évoluent.

Au fur et à mesure du temps, la navigation motorisée a été privilégiée au détriment du halage*, devenu trop coûteux et de moins en moins nécessaire dans les passages difficiles grâce aux écluses* (abandonné en Seine en 1860 mais poursuivie dans les canaux jusqu'en 1950). De nouvelles méthodes de traction ont été mises en place dont le touage en 1855. Un bateau à deux gouvernails et sans hélice nommé un toueur était relié à une chaîne métallique reposant sur le fond du lit de la Seine fixée à ses deux extrémités. Grâce à un système mécanique, le toueur pouvait alors remorquer un convoi d'une quinzaine de péniches (figure N). Une section s'étendant de Conflans-Saint-Honorine jusqu'au Trait (soit 226 km) avait été aménagée en 1856 afin de permettre le touage

sur la Seine.

Grâce à de nouveaux progrès techniques, les toueurs mécaniques, complètement dépendants de la chaîne, ont été remplacés en 1884 par des toueurs à adhérence



Figure N : Un toueur et son convoi sur la Seine au début du 20^e siècle

de Rouen n'est pas totalement lié à une hausse de la fréquentation du fleuve par les navires mais plutôt par l'accroissement de leurs gabarits. Ceci est étroitement lié à la morphologie de la Seine et à l'évolution des profondeurs du chenal due aux différents aménagements effectués sur le chenal de navigation.

Malgré une augmentation du tirant d'eau* admissible au cours des deux premières phases de travaux (1848-1895), les conditions de navigation restèrent mauvaises au niveau de l'embouchure. L'instabilité du chenal de navigation dans cette zone fit prendre de gros risques aux navires et de ce fait, le trafic du port de Rouen stagna (tonnage oscillant entre 480 000 et 780 000 tonnes de 1847 à 1860).

Au terme de la troisième phase, en 1921, le chenal de navigation commença à être stabilisé, le trafic progressa et atteignit, au total, 4,8 millions de tonnes de marchandises (le pic d'activité observé entre 1914 et 1920 comprenait le trafic des bases militaires alliées établies à Rouen). A cette même période, le port de Rouen commença à se développer et à étendre ses installations vers l'aval en relation avec l'accroissement progressif du trafic et la nécessité de se relier aux réseaux ferroviaires nationaux.

Au niveau de l'embouchure, à partir des années 1920, les aménagements effectués ne permirent pas d'avoir un chenal suffisamment stable et profond. Cette situation se prolongea dans les années 1950 où de nouveaux travaux furent réalisés. Pendant cette longue phase de travaux, le trafic fluctua entre 5 et 10 millions de tonnes de marchandises. Lors de la seconde guerre mondiale, le port a été fortement détruit et était sous autorité allemande (il n'était pas indiqué si les très faibles valeurs de trafic de ces années étaient dues à une activité quasiment nulle ou à un comptage non exhaustif).

A partir de 1961, le « nouveau chenal » à l'embouchure fut ouvert à tout type de navires, le tirant d'eau* admissible avait considérablement augmenté. C'est à cette période que le trafic progressa le plus fortement pour atteindre 18,6 millions de tonnes au total en 1978 avec 9006 navires. Parallèlement, en 1962, la Politique Agricole Commune a été engagée, encourageant la production agricole et soutenant l'exportation. Le port de Rouen a alors été en plein essor et se situa au premier rang des ports européens exportateurs de céréales, place qu'il conserva

magnétique. Ces derniers se désolidarisèrent facilement de la chaîne et disposaient d'une hélice leur permettant d'être autonomes à la descente. Cette pratique a été abandonnée avant 1914 et a été progressivement remplacée par le remorquage (le premier remorqueur est apparu en 1867).

Les remorqueurs, totalement autonomes, tractaient des convois de péniches assurant le transport de marchandises sur toutes les voies d'eau navigables. Leur utilisation s'est accrue à partir des années 1880 suite à la mise en place des barrages et des écluses* en amont de Rouen et à la suppression des péages au niveau des zones nécessitant une aide pour les franchir (Labrousse, 2000). La traction des bateaux a été abandonnée en France en 1970 pour ne laisser naviguer que les automoteurs et les barges poussées.

pendant plus de 40 ans (malgré les évolutions des marchés) (GPMR, 2009). Cette augmentation a également été expliquée par le développement de la fonction industrielle des ports entre 1970 et 1980 (GPMR-DCC, 2008). A partir de 1979, à l'embouchure, la digue basse Nord a été prolongée jusqu'à hauteur du Havre, des approfondissements du chenal ont été faits, permettant d'accroître à nouveau le tirant d'eau* admissible. Ce gain a permis d'augmenter les quantités de marchandises transportées (21,4 millions de tonnes en moyenne entre 1979 et 2007) ; parallèlement, le nombre de navires recensés a diminué passant de 9006 navires en 1979 à 7140 en moyenne de 1979 à 2007. Ces valeurs ont témoigné du bénéfice de l'approfondissement du chenal (de moins en moins de navires naviguaient avec des quantités croissantes de marchandises transportées). La chute du trafic entre 1994 et 1996 est expliquée par des chocs céréaliers subis (baisse des exportations cérésières), suite à la réforme de la Politique Agricole Commune en 1992 (GPMR-DCC, 2008). En parallèle, de grands travaux d'« amélioration de la Seine » ont été entrepris en amont de Rouen. Le chenal principal a été calibré de manière à ce qu'il y ait 3 m de hauteur d'eau assurée la plus part du temps puis 4 m, facilitant le transit des péniches depuis ou vers Paris (archives GPMR).

Globalement, depuis 1980, le trafic stagne (le record étant d'environ 24 millions de tonnes en 1992). C'est également à cette période qu'une inversion de tendance entre importation et exportation a été observée. Jusqu'en 1979, le Port de Rouen a été à 80 - 90 % importateur de marchandises. Après 1979, le port de Rouen a été importateur à hauteur à 40 - 50 % des marchandises transitant dans le port. Ceci a été notamment expliqué par une chute de l'importation des hydrocarbures suite à deux chocs pétroliers en 1970-1973 et en 1978-1979 (la forte croissance en Occident au début des années 1970 a engendré une grande demande en produits pétroliers au près des pays producteurs, difficile à satisfaire).

Cette évolution du trafic concerne le port de Rouen dans sa globalité, y compris les terminaux portuaires spécifiques longeant la Seine (Figure 36 ; GPMR-SED, 2008). Les variations observées sont donc également à mettre en relation avec le type de marchandises transportées évoluant selon les besoins et le marché international.

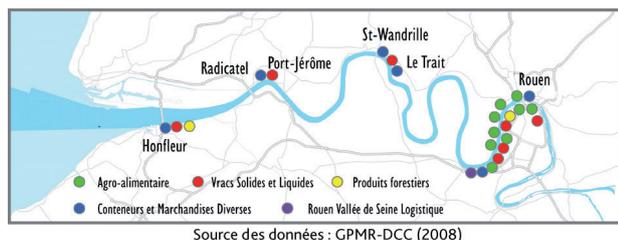


Figure 36 : Répartition des terminaux portuaires du port de Rouen en 2008

Des travaux de maintien des profondeurs induits par les usages

Afin de maintenir leurs activités et conserver des profondeurs suffisantes pour accueillir les navires, les ports estuariens réalisent des dragages d'entretien réguliers de leurs bassins et de certaines parties du chenal de navigation. La quantité de matériaux extraite est fonction de l'hydrodynamisme de la Seine, de l'importance des apports sédimentaires et des profondeurs nécessaires pour la navigation.

A partir de 1900, au niveau de l'embouchure, des dragages d'entretien du chenal de navigation ont été menés afin d'éviter la formation de seuils et d'empêcher que ce chenal ne divague. Entre 1901 et 1904, le volume dragué annuellement dans ce secteur dépassait les 2 millions de m³. Un projet de dragage plus intensif était envisagé dans l'espoir d'amorcer un chenal unique dans l'axe des digues mais les bénéfices obtenus n'étant pas suffisants en lien avec les quelques moyens mis en œuvre, les dragages ont été suspendus quelques années pour être repris en 1911. A partir de 1911, entre 300 000 et 500 000 m³ de sédiments étaient dragués annuellement. Les dragages ont ensuite été interrompus en 1923, repris en 1932 puis une seconde interruption est intervenue durant la seconde guerre mondiale (Reymondier, 1990). Sur cette période, aucun dragage d'entretien ne semble avoir été entrepris en amont de Tancarville, seuls les travaux fréquents d'amélioration des accès nautiques ciblaient les bancs difficilement altérables par érosion.

Au cours des années 1980, les volumes de sédiments dragués annuellement sont estimés entre 3 et 4 millions de m³ au niveau de l'embouchure ; de 400 000 à 600 000 m³ entre Rouen et La Bouille ; de 100 000 à 200 000 m³ en amont de Rouen (Reymondier, 1990). A partir de 1991, les quantités draguées pour chaque secteur ont globale-

Intervenant	GPMH	E.M.R.H.	GPMR				Entreprise privée
Secteur	Bassins et accès du port du Havre et canaux	Bassins et accès du Port de Honfleur	Chenal à l'aval de Tancarville	Chenal entre Tancarville et La Bouille	Zone portuaire entre La Bouille et Rouen	Chenal de navigation entre Poses et Rouen (estimation)	
1991	1 008 015	-	-	-	-	-	
1992	1 137 917	-	4 127 000	-	-	-	
1993	1 186 482	-	3 507 000	-	-	-	
1994	1 203 443	-	3 021 000	-	-	-	
1995	1 287 366	-	3 439 000	-	414 000	-	
1996	2 028 894	15 000	4 071 000	186 000	424 000	5000 à 10000 / an (voir 15000 en cas d'importante crue)	
1997	1 264 893	111 000	4 008 000	202 000	486 000		
1998	1 268 164	62 000	3 867 000	54 000	466 000		
1999	1 230 915	60 000	3 658 000	127 000	296 000		
2000	1 597 455	60 000	3 957 000	16 000	221 000		
2001	1 482 480	40 000	4 033 000	72 000	316 000	15000	
2002	1 184 027	102 000	4 307 000	143 000	339 000	5000 à 10000 / an (voir 15000 en cas d'importante crue)	
2003	1 191 500	100 000	Env. 4 000 000	60 000 tonnes/an (matière sèche)	250 000 tonnes/an (matière sèche)	-	
2004	1 393 436	-	Env. 4 000 000				
2005	1 343 644	-	4 578 782				
2006	1 467 486	-	4 851 682				
2007	2 193 650	-	5 900 000				
2008	2 200 000	-	4 400 000	-	-	-	

La gestion du port de Honfleur est assurée par l'Etablissement Maritime Rouen-Honfleur (E.M.R.H.) qui regroupe, à part égale, le port de Rouen et la Chambre du Commerce et de l'Industrie du Pays d'Auge.

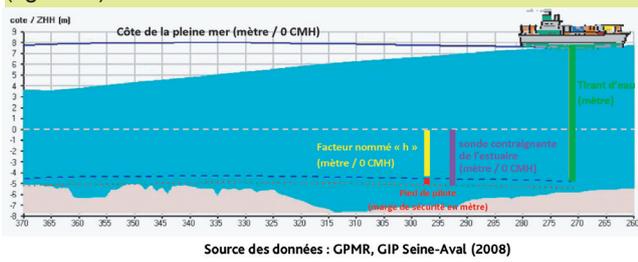
Tableau 2 : Volumes dragués par ports dans le cadre de dragages d'entretien (en m³) (Leroi, 2004 ; PAR, 2006(c) ; PAR, 2007(a) et GPMR-SEC, GPMH-SDH)

Gestion et entretien du chenal

Méthode de détermination du tirant d'eau admissible entre Rouen et l'embouchure

Le tirant d'eau admissible permet de déterminer quels navires peuvent remonter ou descendre la Seine entre le port de Rouen et l'embouchure.

Le tirant d'eau à la montée s'obtient en ajoutant à la cote de pleine mer au Havre un indicateur nommé « h ». Il est défini comme la sonde contraignante de l'estuaire (la cote du seuil le plus pénalisant donc le plus haut) en mètre CMH, retranché du pied de pilote (marge de sécurité fixe) (figure O).



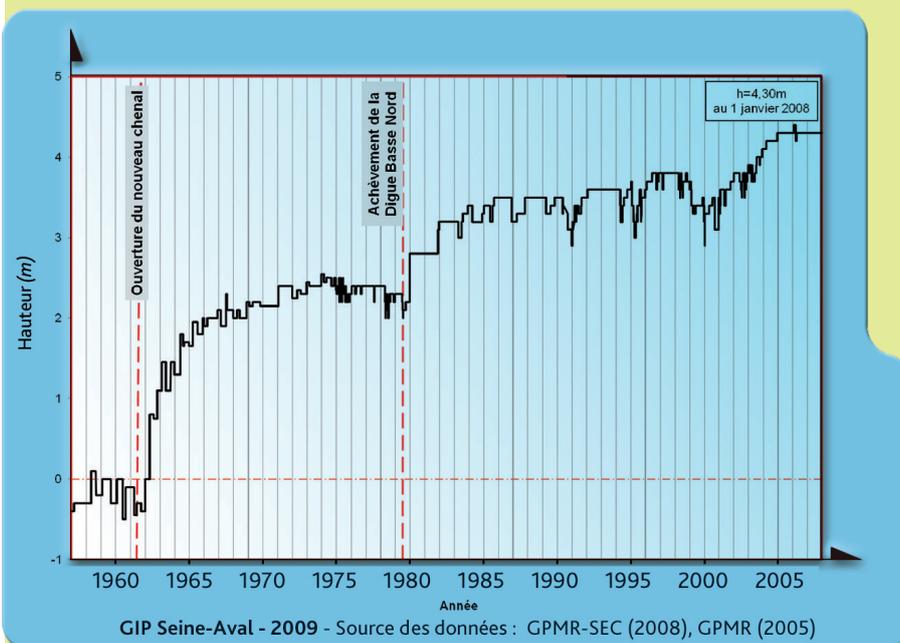
Source des données : GPMR, GIP Seine-Aval (2008)

Figure O : Paramètres permettant de calculer le tirant d'eau d'un bateau à la montée en considérant les seuils les plus pénalisants de l'estuaire moyen et aval de la Seine.

Le tirant d'eau à la descente est plus complexe à calculer. Il faut calculer pk^* par pk un tirant d'eau possible, synthèse entre : la cote du plan d'eau, la cote des fonds pour un pk donné dite «cote pilotage» et le pied de pilote. Le tirant d'eau à la descente retenu est le tirant d'eau le plus faible du parcours.

Ces paramètres tel que le « h » (figure P) ou les cotes pilotages témoignent des variations des profondeurs au niveau des points les plus hauts du chenal de navigation (de l'approfondissement ou au contraire du comblement de ce chenal).

Compte tenu des variations journalières des niveaux



GIP Seine-Aval - 2009 - Source des données : GPMR-SEC (2008), GPMR (2005)

Figure P : Variation du « h » de 1957 à 2007 (équivalent à la cote de pilotage retranché du pied de pilote), entre Rouen et la mer (en mètre en dessous du zéro CMH)

d'eau (liées à l'oscillation de la marée et au débit de la Seine), les tirants d'eau autorisés en Seine font l'objet, au jour le jour, d'un ajustement particulier, par accord entre le Pilotage de la Seine et la Capitainerie du port de Rouen. Ces prévisions et ces suivis quotidiens s'appuient notamment sur un réseau de 16 marégraphes, automatiques et télétransmis, répartis entre Le Havre et Rouen. Par ailleurs, le port de Rouen dispose d'un important équipement venant en aide à la navigation : radio, radars, AIS (Automatic Identification System), balisage et feux de berges, réseau de télémessure, logiciels de simulation de transit des navires, qui sont les outils indispensables pour la gestion quotidienne du chenal.

Suivi bathymétrique et gestion des profondeurs

Afin d'optimiser la gestion du chenal de navigation, le Port a cherché à acquérir une bonne connaissance hydrographique. Ces données permettent d'améliorer la connaissance des phénomènes hydro-sédimentaires de l'estuaire ceci afin de limiter les dragages.

Les suivis de la bathymétrie* font appel à des matériels de sondage sophistiqués, de type sondeurs multifaisceaux couplés à des GPS centimétriques permettant des restitutions très fines (généralement des grilles métriques) Ces équipements donnent lieu à l'édition de plus de 400 plans par an du chenal de Rouen à l'embouchure. Le pied de pilote étant relativement faible, il est impératif de veiller à ce que le chenal dispose d'une profondeur suffisante pour la navigation et cela, essentiellement au niveau des zones où la sédimentation est très active. En effet, certains secteurs sont généralement sondés une fois par semaine.

Lorsque des dragages sont requis, ils sont opérés à l'aide de deux dragues aspiratrices en marche : la Daniel Laval, d'une capacité en puits de 5000 m³, affectée à l'embouchure (figure Q) et la Ronceray présentant une capacité en puits plus modeste (1500 m³) affectée aux secteurs plus amont jusqu'à Rouen. Toutes deux sont équipées de systèmes d'aide informatisés qui permettent de positionner au mètre près l'engin sur les secteurs à traiter, et de contrôler en temps réel le travail de l'outil jusqu'à atteindre la profondeur souhaitée.

O. Macur



Figure Q : Drague aspiratrice Daniel Laval.

ment diminué excepté pour l'embouchure où elles sont restées stables (tableau 2) (Leroi, 2004).

L'envasement important des bassins du port de Honfleur est directement lié à la présence du bouchon vaseux* et sa charge en matières fines. Les zones draguées par le port de Rouen sont réparties en trois secteurs géographiques : de Rouen à la Bouille (les zones d'évitage, les bassins et les souilles de quai où les sédiments extraits sont composés à 90 % de limons et à 10 % de sables), entre la Bouille et Tancarville (principalement dans la partie concave de certaines courbes du fleuve où les sédiments dragués sont composés à 90 % de sables et 10 % de limons) et en aval de Tancarville (aux extrémités des digues submersibles et à hauteur du pont de Normandie) (GPMR-SEC, 2009).

La gestion et la valorisation des sédiments de dragage

La réutilisation des sédiments dragués

Les méthodes utilisées dans les premières campagnes de dragage (au 19^{ème} siècle) n'étaient pas adaptées pour draguer les particules fines telles que les vases. Lors de ces travaux (1898/1906, 1913/1950), les sédiments prélevés étaient constitués, selon la localisation, de tourbe, d'alluvions* récentes (galets) ou de sables.

Les premières digues construites entre Villequier et Tancarville en 1848 constituées de matériaux de mauvaise qualité pour ce type d'usage (calcaire tendre, peu dense et gélif) étaient « expérimentales », peu adaptées pour résister aux contraintes environnementales (la houle, les gelées, le flot* et plus exceptionnellement le mascaret) (Reymondier, 1990, Lavoine *et al.*, 1885). Ainsi, de 1866 à 1878, la priorité était l'entretien des digues affaissées en aval de Caudebec-en-Caux. Pour cela, les sédiments grossiers extraits lors des dragages effectués en parallèle, ont été utilisés pour consolider ponctuellement ou presque entièrement, les digues fragilisées. Suite à ces nombreuses réfections des digues, les matériaux utilisés pour la construction des nouvelles digues étaient principalement des sédiments de dragage, sélectionnés en fonction de leurs qualités géotechniques. Par ailleurs, en complément de l'utilisation de matériaux mieux adaptés pour le corps des digues, certaines d'entre elles étaient renforcées par une couverture en béton dans les secteurs où les contraintes hydrauliques étaient très importantes. De manière générale, ce changement de technique de construction a permis de rendre les digues beaucoup plus résistantes à ces contraintes (Reymondier, 1990).

En amont de Rouen, suite au programme d'amélioration de la Seine exécuté dans les années 1970, les matériaux issus du dragage du chenal de navigation ou des îles, ont été réutilisés dans ce secteur pour l'endiguement de l'embouchure aval de l'Eure (pk 218) et surtout pour le comblement de bras morts ou secondaires. Les travaux ont également permis l'extension de zones industrielles dans le secteur de Sotteville (pk 238 à 239) et la construction des quais à Oissel (pk 228).

Les sédiments grenus issus des travaux d'approfondissement en aval de Rouen étaient destinés à différents usages tels que le remblaiement des zones arrière pour l'extension des ports, la mise en place de quais, de zones industrialisées (la plate-forme de Port-Jérôme, les accès du pont de Normandie en 1995 ou

ceux du pont Flaubert à Rouen).

En 2008, dans le cadre du projet d'amélioration des accès nautiques du port de Rouen et dans un souci économique et environnemental, une réflexion est lancée sur une potentielle réutilisation des sédiments extraits par les professionnels du BTP (Lerond, 2006).

Le stockage « à terre »

A partir de 1861, les matériaux issus des dragages étaient vendus et/ou mis en dépôt à proximité des sites de prélèvements à 200 m si le bateau devait circuler à contre courant et à 500 m dans le cas contraire. Ces distances étaient calculées en rapport avec le coût que représentait le transport. Ils étaient ensuite réutilisés en fonction de leur qualité géotechnique et des besoins (dignes, remblais, ...) (Reymondier, 1990).

Au cours du 20^{ème} siècle, les matériaux prélevés étaient majoritairement des particules fines difficilement exploitables en l'état. Tous les sédiments étaient alors stockés à terre de différentes manières : les chambres de dépôts, le remplissage d'anciennes ballastières (en expérimentation depuis 2000) ou la mise à terre sur des sites définis (pour des chantiers).

Actuellement, la mise à terre est faite à titre exceptionnel, pour un chantier et uniquement pour des sables et/ou des graviers de bonne qualité géotechnique. Les sites choisis doivent être situés et équipés de manière à permettre l'évacuation des sédiments soit en arrière du site soit par voie terrestre. Ceci permet d'une part de valoriser les sédiments de dragage et d'autre part, d'éviter de puiser dans les ressources des carrières déjà fortement mises à contribution. (Lerond, 2006 ; PAR, 2006(b)).

Les chambres de dépôt permanentes, en aval de Rouen, ont été développées par le port de Rouen au fur et à mesure des besoins de stockage des sédiments. Les sites (figure 37), au nombre de 17 localisés le long de la Seine, ont été définis de manière à réduire au maximum les distances de transport des sédiments dragués par rapport aux zones de prélèvements. De dimensions très variables (de 2 à 50 ha), ces enceintes fermées par des digues permettent de déposer entre 80 000 m³ et 1,6 millions de m³ de sédiments répartis selon le type (dans différents casiers) et l'importance des chantiers (Lerond, 2006).

Les sites en sommeil sont des chambres disponibles mais actuellement non utilisées, les sites restitués ont été exploitées puis restituées pour une autre utilisation (réaménagement paysager, agriculture contrôlée, ...).

Pour les sédiments dragués par le port du Havre, aucune chambre de dépôt permanente n'existe. Du fait de la proximité d'un site d'immersion en mer d'Octeville, tous les sédiments dragués y sont clapés sauf cas particuliers (dragages liés à Port 2000 ; cas de sédiments ne respectant pas les normes de rejet en milieu marin). Dans ces cas, des sites temporaires de dépôt ont été créés tels que celui situé à proximité de l'écluse* de Tancarville ou celui situé à l'Est du pont de Normandie mais ceux-ci sont rarement mis à contribution.

Actuellement, les sédiments prélevés par le port de Rouen dans le cadre des dragages d'entretien sont de nature et de qualité diverses (sable, vase, tuf*, grave, contaminés ou non par des métaux lourds, des PCB, des HAP, ...) et sont principalement stockés dans des chambres de dépôt. D'un point de vue environnemental, les sites de

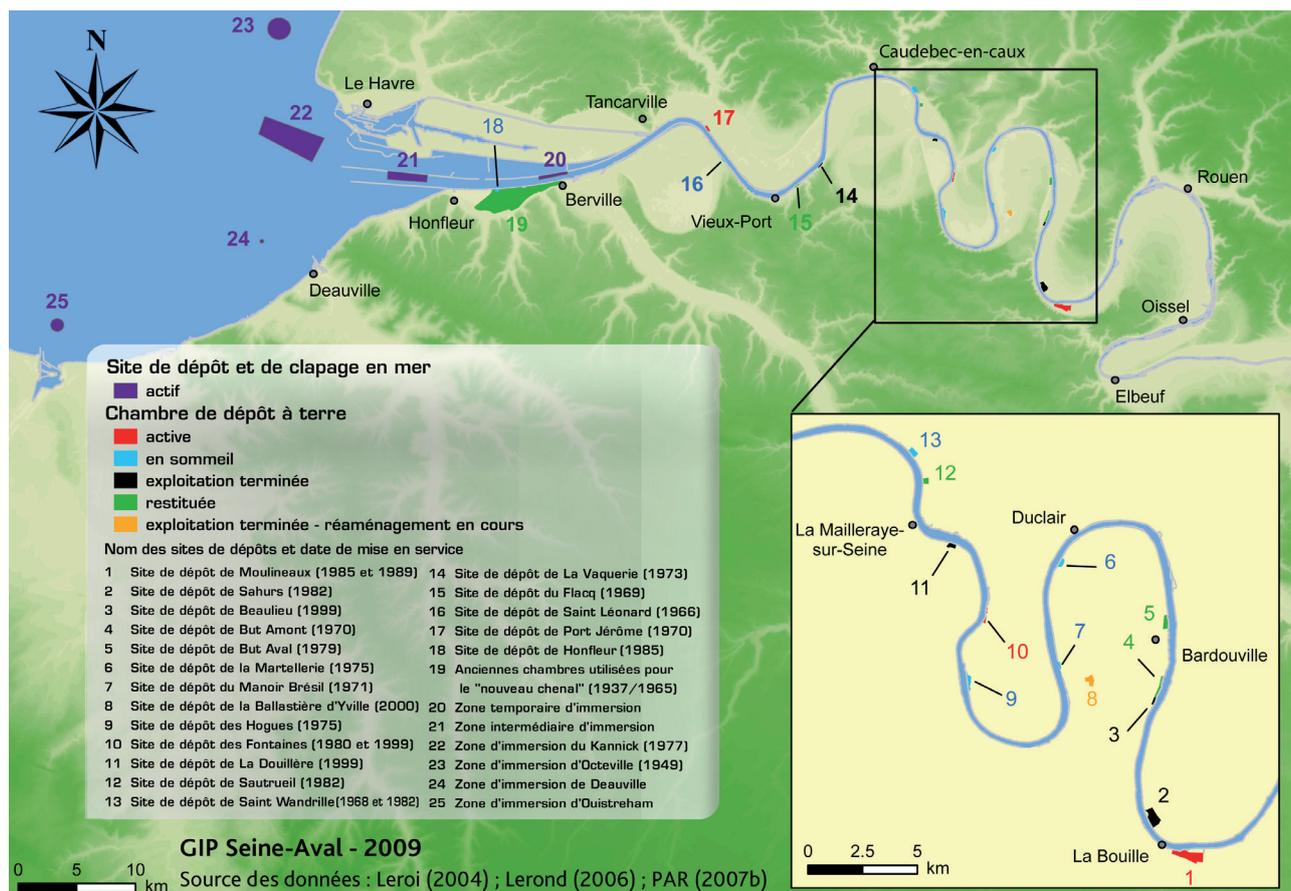


Figure 37 : Sites de dépôt et de clapage des sédiments dragués dans l'estuaire

dépôt à terre, localisés sur les bords de Seine, sont remis en cause, entre autre pour les impacts liés à leur implantation (intégration paysagère, perte de zones humides et donc d'habitats, ...). De plus, si le stockage à terre permet d'isoler autant que possible les polluants piégés dans les matériaux (Lerond, 2006), ces sites ne sont pas totalement déconnectés des milieux environnants, il subsiste un risque de contamination locale du milieu naturel.

En lien avec des préoccupations environnementales, une réflexion sur la gestion des sédiments de dragage a été lancée et a abouti à d'autres possibilités de stockage. Les gestionnaires ont constaté que d'un côté, le port extrait des sédiments de la Seine pour les déposer à terre, d'un autre côté, des extractions de granulats sont faites non loin de la Seine à l'origine des nombreuses ballastières. Ainsi, comme alternative au stockage traditionnel en chambre de dépôt, une nouvelle méthode de gestion est actuellement en test, le remblaiement d'anciennes carrières (PAR, 2006(b)).

En collaboration avec le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normandes et CBN (Carrières et Ballastières de Normandie), une ballastière à Yville-sur-Seine d'un volume proche d'un million de m³ (n°8 sur la figure 37) sert de site pilote. Des matériaux fins, non valorisables dans le BTP y ont été déposés depuis 2000. Un mélange composé de particules fines et de 90 % d'eau est déversé à l'aide d'une conduite dans la ballastière. Les sédiments se déposent par décantation et l'excédent d'eau est refoulé vers la Seine par une seconde conduite (Lerond, 2006). A terme, trois zones humides seront aménagées dans la ballastière : une prairie sur tourbe, une roselière et un plan d'eau permanent. L'objectif est de restituer un

milieu propice au développement ornithologique et par la même occasion, de réintégrer cette ancienne carrière dans le paysage de la boucle d'Amneville (Lerond, 2006 ; PAR, 2006(b)). Des suivis chimiques des eaux, piézométriques, topographiques, faunistiques et floristiques sont effectués afin de s'assurer de la réussite de la réhabilitation et éventuellement renouveler l'opération (PAR, 2006(b)).

Le clapage en mer

Le clapage en mer est une méthode de gestion des sédiments de dragage utilisée au niveau de l'estuaire moyen et aval de la Seine. Elle consiste en un déversement des matériaux prélevés sur des zones spécifiques d'immersion.

Cette pratique a été menée dès le 19^{ème} siècle pour les dragages d'entretien du port du Havre qui étaient effectués en continu et dont les sédiments étaient rejetés un peu plus au large, au Sud Ouest du port du Havre. Lorsque les bateaux déversaient les matériaux, une partie était transportée par un courant en direction du Nord Est vers la côte havraise, le long du littoral (Lavoine *et al.*, 1885).

Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, les zones d'immersion des sédiments de dragage sont le site d'Octeville pour le port du Havre, ceux du Kannick, de la zone intermédiaire et de la zone temporaire pour le port de Rouen ainsi que deux autres sites utilisés en baie de Seine par les ports d'Ouistreham et de Deauville (figure 37).

Situé à 8 km au Nord du Havre au large des côtes, le site

d'Octeville a été mis en service en 1949 afin d'y claper les sables et les vases extraits dans le cadre de l'entretien du port du Havre (des bassins portuaires et des accès) et occasionnellement, lors de travaux spécifiques. Avant 2006, le volume de sédiments clapés annuellement sur ce site, en lien avec les travaux d'entretien, était de l'ordre de 1,5 millions de m³. Depuis la mise en service de Port 2000, ce volume estimé a doublé, passant à 3 millions de m³ et devrait rester stable dans les années à venir (GPMH-SDH, 2008).

Le port de Rouen dispose de trois sites spécifiques de stockage au niveau de l'embouchure. Principal site, le Kannick a été mis en service en 1977 et est utilisé pour le stockage des sédiments dragués au niveau de la zone de l'engainement lors de l'entretien du chenal. Ce sont environ 3,5 millions de m³ de sédiments qui y sont déposés chaque année. La « zone intermédiaire » située plus en amont, reçoit une plus faible quantité de sédiments (de l'ordre de 500 000 m³ en moyenne par an) et n'est utilisée qu'entre octobre et avril. Cette zone est utilisée pour une partie des sédiments extraits au niveau de la brèche et pour le secteur situé en amont de celle-ci. Enfin, un troisième site d'urgence, la « zone temporaire amont », est mis à contribution très ponctuellement lors d'intempéries. Le volume moyen estimé clapé sur ce site est inférieur à 100 000 m³ selon les conditions (PAR, 2007(a)).

Pour le port de Honfleur, le lieu de stockage des sédiments extraits n'est pas identique chaque année. Par exemple, de 1996 à 2000, les sédiments dragués étaient déposés dans une zone de dépôt située à l'extrémité Ouest du chenal d'accès ; puis, en 2001 et 2002, ils ont été immergés au niveau de la zone intermédiaire du port de Rouen. En baie de Seine, 500 000 m³ par an sont rejetés au niveau du site d'Ouistreham et 2500 m³ par an pour le site de Deauville (Leroi, 2004).

L'activité de pêche en Seine : un usage menacé par les aménagements

Dès les premiers travaux, les ressources piscicoles se sont amoindries : les zones productives pour la pêche se faisaient rares en 1885. Ces dernières situées, entre autre, au Marais Vernier, à Caudebec-en-Caux et à Duclair n'étaient plus facilement accessibles et répondaient de moins en moins aux besoins des poissons en termes de nourricerie, en repos ou en frayère. Les zones humides ont été déconnectées de la Seine, se sont atterries et ont servi au pâturage et à la culture. Les poissons ne se sont pas adaptés à cette nouvelle situation et ont progressivement déserté les parties du fleuve endiguées. Les zones de frayères se faisant rares, les poissons colonisaient de moins en moins l'estuaire amont.

L'estuaire de la Seine n'étant pas la seule partie de ce fleuve aménagée, les diminutions des ressources piscicoles sont à généraliser sur l'ensemble du réseau hydrographique. Les endiguements, les nombreux barrages installés tout le long du fleuve et sur ses affluents ainsi que les pollutions du milieu induites par les activités anthropiques (mises en cause dès 1875), sont autant de contraintes au maintien, au développement et à la migration des espèces. En outre, dans l'estuaire de la Seine, les affluents sont également très artificialisés ne facilitant pas la survie de ces espèces (figure 38) (Lavoine *et al.*, 1885 ; Costil *et al.*, 2002). Au cours du 20^{ème} siècle, les importants rescindements de berges réalisés entre Poses



Figure 38: Pêche de loisir à l'exutoire du Robec, affluent de la Seine

et Rouen ainsi que la suppression de nombreuses îles, le comblement de bras secondaires et de bras morts ont entraîné une réduction des potentialités écologiques (perte d'habitats potentiels, de diversification des écoulements favorisant l'oxygénation des eaux, de diversification des substrats, ...). Malgré cela, le secteur d'îles compris entre Oissel et Rouen a conservé des qualités écologiques non négligeables.

D'après des données sur l'évolution des pêches professionnelles de poissons migrateurs, un déclin de l'ensemble des migrateurs présents en Seine (saumon, truite de mer, alose franche, alose feinte, lamproie fluviale et maritime, estrugeon, éperlan et anguille) est observé depuis 1850, avec une accélération dans les années 1880 (suite à l'installation de barrages infranchissables). Toutefois, le nombre d'individus demeurait suffisant jusqu'en 1970, pour maintenir une activité de pêche en domaine fluvial. Certaines de ces espèces ont été plus ou moins impactées par les aménagements selon leur zone de répartition. A titre d'exemple, l'éperlan moins affecté par la présence des barrages, ne disposait plus de zone de frayère, en lien avec les dragages réalisés dans les chenaux de navigation. Cette espèce s'est maintenue dans l'estuaire jusque dans les années 1950 pour quasiment disparaître en 1965-1970. Au début des années 1990, certains des grands migrateurs cités ont été aperçus dans la passe à poisson du barrage de Poses, cependant leur présence reste ponctuelle et ces espèces emblématiques de l'estuaire ne possèdent plus d'habitats suffisants ou fonctionnels pour permettre leur expansion (Costil *et al.*, 2002). Le problème de franchissement du barrage de Poses a été partiellement résolu en 1991, date à laquelle une passe à poissons a été mise en place. La difficulté pour les poissons notamment les migrateurs réside dans l'estuaire moyen. Devenu, suite aux

travaux, un couloir rectiligne profond d'environ 100 km de long, il contraint les espèces piscicoles à un fort hydrodynamisme, avec peu ou pas de zone de refuge et de repos intermédiaires.

Malgré ces constats concernant les poissons migrateurs, les endiguements ont tout de même permis de développer de nouveaux habitats, plus particulièrement au niveau de l'embouchure. Les digues ont certes engendré le comblement de l'embouchure mais ont également permis la formation de zones intertidales* et de prés salés possédant des potentialités écologiques de grande importance. Les zones découvrantes à marée basse laissent apparaître trois types de milieux : des vasières (slikke*), des zones sableuses ainsi que des zones végétalisées recouvertes lors des marées de vive-eau* (schorre*). La slikke* et le schorre* constituent des ensembles emblématiques de l'estuaire de la Seine en raison de leur fort potentiel écologique. Leur rôle de stockage des matières en suspension* en transit dans l'estuaire permet la formation de vasières qui fournissent des habitats pour de nombreuses espèces. Ces vasières assurent le rôle de nourriceries pour des espèces de poissons à marée haute, et de séjour et d'alimentation pour certaines espèces d'oiseaux à marée basse.

L'activité de pêche au sein même de l'estuaire a évolué d'une pêche professionnelle très active avant les aménagements à une activité de loisir plus ponctuelle et à un développement des piscicultures (sur les affluents, les étangs, ...) (figure 38).

À l'aube du 21^{ème} siècle, des programmes de restauration ont émergé visant à recréer des milieux plus propices au développement des espèces aquatiques estuariennes ou migratrices tel que la restauration de frayères ou la reconnection d'annexes hydrauliques (filandres, bras morts).

Les débordements de la Seine contrôlés ?

Longue de 776 km, la Seine draine avec ses nombreux affluents, un bassin versant de 78650 km². L'estuaire est le dernier réceptacle de toutes les eaux drainées en amont. Les variations des niveaux d'eau dans l'estuaire sont fonction du débit de la Seine (régulé en partie par des barrages en amont), de la marée et de facteurs météorologiques tels que la pluviométrie, le vent, la pression atmosphérique.

Les grandes crues* historiques de la Seine se produisent généralement suite à des événements pluvieux intenses,

prolongés dans le temps, sur une grande partie du bassin versant de la Seine et/ou à la fonte des neiges accumulées après de fortes précipitations neigeuses. En fonction du temps de résidence* variable des eaux au cœur même des différents sous-bassins versants (de l'Yonne, de la Marne, de l'Aube, de l'Oise et de la Petite Seine de la source jusqu'à la confluence avec l'Yonne), la montée des eaux en Seine sera d'autant plus importante si celle des affluents est simultanée. À hauteur de l'estuaire, la crue peut être amplifiée par l'intrusion marine selon le coefficient de marée, par de basses pressions et par le vent selon sa puissance et sa direction au moment de la crue. La durée des crues en Seine varie de 3 à 15 jours (débit supérieur à 1500 m³.s⁻¹).

Des crues (et plus récemment des tempêtes) entraînant d'importantes inondations* à Rouen et ses alentours sont relatées dès le 6^{ème} siècle. Des crues majeures se sont produites en 1658, 1740, 1910 et 1920 où les hauteurs atteintes ont dépassées les dix mètres par rapport au zéro CMH* à Rouen (tableau 3). Dès la cote CMH de 9,20 m à Rouen, les eaux commencent à recouvrir les quais de Rouen, à inonder le centre-ville de Grand-Quevilly ainsi que des terrains riverains de la Seine du Val-de-la-Haye à Caudebec-en-Caux (GPMR, SPC).

La crue dite centennale de 1910 a été la plus grande et la plus dévastatrice du siècle dernier. Elle a été étudiée afin de comprendre les processus et d'adapter les services de prévision et de prévention des crues. Elle est ainsi citée comme la crue de référence (la seule crue surpassant celle de 1910 date de 1658 mais les étapes de progression sont peu connues). Le dernier trimestre de 1909 avait été très humide ; des pluies plus abondantes que la normale saisonnière commençaient d'ores et déjà à saturer les sols. À partir du 18 janvier 1910, une crue double s'est produite suite à deux événements pluvieux particuliers séparés de quelques jours, étendus sur la majorité du bassin versant de la Seine. La montée des eaux a duré douze jours, alimentée au fur et à mesure par les apports des différents affluents de ce fleuve (Diren IDF, 2009). Les prairies longeant la Seine de Sotteville-lès-Rouen, Saint-Etienne-du-Rouvray, ... ont été immergées, les îles présentes dans l'estuaire amont étaient toutes « effacées » par les eaux hormis une partie de l'ancienne île Lacroix. À Rouen, la nacelle du Pont transbordeur était immergée et le Pont Corneille risquait d'être emporté par les eaux de la Seine chargées de troncs d'arbres, de toitures et tout autre débris arrachés par la force des courants (Sueur, 1982). En aval de Rouen, les

Marégraphe	Côte maximale atteinte (côte CMH) lors des crues exceptionnelles de :						Côte maximale atteinte (côte CMH) lors des tempêtes de :	
	1658	1740	1910	1920	1955	2001	1990	1999
Elbeuf			11,96		11,48	11,17	9,91	9,81
Rouen	11,92	11,49	10,05	10,03	9,53	9,6	9,65	9,52
Duclair		10,3	9,02	9,13	8,94	9,07	9,25	9,22
Caudebec			8,71	9,05	8,85	8,45	9,34	9,31
Tancarville			8,32		8,61	8,45	9,14	9,54
Débit à Poses (m ³ .s ⁻¹)			2600	2280	2250	2280	640	630
Coefficient de marée			78	98	92	89	106	100

Tableau 3 : Cotes atteintes lors d'événements exceptionnels observés en Seine (GPMR ; Banal, 1956)

terres riveraines du fleuve dans la boucle de Duclair ont également été inondés.

Au 29 janvier 1910, la cote maximale de 10,05 m a été atteinte à Rouen (coefficient de marée de 78 et débit à Poses de $2\,600\text{ m}^3\text{s}^{-1}$), puis la décrue s'est amorcée. A Paris, les grandes quantités d'eau accumulées associées à des conditions météorologiques peu favorables (deux crues de moindre intensité en février 1910) ont demandé à la Seine, un mois et demi pour les évacuer et ainsi retrouver un niveau d'eau « habituel » (surcote maximale de 8 m au Pont d'Austerlitz (Diren IDF, 2009). Depuis cette date, aucun événement ayant engendré autant de dégâts n'a été recensé.

Après la crue de 1910, celle de 1955 a également marqué les esprits. Les dégâts occasionnés par cette crue ont été moins importants qu'en 1910 (à l'échelle de l'estuaire) du fait des divers aménagements du lit effectués auparavant. L'endiguement de la Seine, les surélévations des digues ou les contre digues en arrière (exemple des quais de Rouen), les approfondissements du lit et les rescindements ont permis d'améliorer les écoulements plus en aval où des zones humides telle que le marais Vernier ont servi de zone tampon écrétant partiellement la crue. La cote maximale a respectivement atteint 11,48 m et 9,53 m par rapport au zéro CMH* à Elbeuf et à Rouen (les digues étaient généralement dimensionnées à la cote 9,20 m par rapport au zéro CMH*).

Les impacts des crues ont été suffisants pour motiver des programmes de lutte contre les inondations*. En Seine-Maritime, divers programmes de remise en état des berges ont été lancés par le Département, le port de Rouen et les communes riveraines, au cours des années 1950 et 1960. Ces programmes avaient deux objectifs principaux qui sont la protection contre l'érosion des berges et la lutte contre les inondations* dont les enjeux concernent la protection de voies de communication, de zones agricoles, industrielles ou résidentielles. Dans ce cadre, des aménagements de remise en état des berges menés par le Département de Seine Maritime (réfection de perrés) ont été réalisés dès 1955 à Duclair et en amont, à Saint-Pierre-de-Manneville, puis entre Duclair et Villequier (échelonnés sur plusieurs années dès 1956) pour renforcer les berges le long de certaines voies de communications. Une multitude de mesures de protection contre l'érosion et/ou les inondations* a été mise en place suivant des programmes quinquennaux ou triennaux de défense des berges entre La Mailleraye-sur-Seine et Rouen (1958/1962, 1963/1967, 1968/1972 et 1974/1980), entre Rouen et Elbeuf (1987/1989, 1990/1992) et plus ponctuellement au niveau de la boucle d'Elbeuf (1962, 1971, 1985/1989, 1991/1994). Des surélévations de digues en aval de La-Mailleraye-sur-Seine (1963/1968) et en amont jusqu'à la limite aval du port de Rouen (1971/1972) ont été préconisées pour restreindre les inondations* (Conseil Général de Seine-Maritime).

A l'échelle du bassin versant de la Seine, suite aux diverses inondations*, la construction de zones de stockage des eaux est décidée. La présence de zones d'expansion des crues le long des cours d'eau peut réduire les risques d'inondations. Ceci permet d'écrêter les crues et de ralentir ponctuellement les écoulements, laissant ainsi le temps au cours d'eau d'évacuer progressivement le surplus d'eau. C'est l'un des objectifs alloué aux quatre lacs-réservoirs implantés en amont de l'estuaire de la Seine (et de Paris) : le lac de Pannecièrre sur l'Yonne (1949), le lac

d'Orient sur la Seine (1966), le lac du Der-Chantecoq sur la Marne (1974) et le lac-réservoir « Aube » (1990). Ces différents lacs sont soit des lacs artificiels obtenus par dérivation de la rivière à l'aide de canaux (Seine, Marne et Aube) soit une retenue au fil de l'eau, créée grâce à un barrage entravant le cours de la rivière (Yonne). Leur gestion est contrôlée et leur fonctionnement classique est défini ainsi : remplissage du lac de novembre à juin puis vidange progressive (en soutien d'étiage*) de juillet à octobre voir jusqu'à décembre si la saison a été sèche (IIBRBS, 2009).

Dans la partie aval de l'estuaire de la Seine, lors des tempêtes de 1990 et 1999, des hauteurs d'eau plus importantes que lors de la crue centennale de 1910 ont été observées à Duclair, Caudebec et Tancarville (Tableau 3). Associées à de forts coefficients de marée (100 et 106), ces tempêtes ont engendré des surcotes atteignant ou parfois surpassant la hauteur limite des digues et cela sur tout l'estuaire. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'entre 1910 et les années 1990, la Seine n'était pas aménagée de la même manière et que les travaux effectués au cours du 20ème siècle ont facilité la pénétration de la marée dans l'estuaire mais également son retrait. Malgré cela, ce type d'événement est à prendre en considération dans la prévision et la prévention des crues en Seine Maritime.

Conclusion

Jusqu'à la moitié du 19^{ème} siècle, l'estuaire de la Seine était un milieu dynamique évoluant selon des conditions naturelles particulières qui remodelaient perpétuellement sa morphologie et son hydrodynamisme. En raison de contraintes élevées pour la navigation (chenal divaguant, difficulté du halage*, ...) impliquant des pertes matérielles non négligeables, les hommes ont du composer avec ce système complexe et imprévisible qui en échange, leurs fournissait certaines ressources naturelles dont ils avaient besoin. Il possédait un important patrimoine biologique qui faisait de la pêche, un des usages prépondérants de l'estuaire (fascicule 1.7 : Patrimoine biologique et chaînes alimentaires).

Depuis la seconde moitié du 19^{ème} siècle, les révolutions technologiques aidant, des programmes d'aménagements de grande ampleur ont été menés de Poses à l'embouchure de la Seine afin de mieux contrôler ce milieu de transition. Toutes ces interventions anthropiques se sont déroulées dans un contexte économique visant à maintenir ou développer des activités industrielles, portuaires et urbaines pour ainsi répondre à des besoins sans cesse grandissants. Ces nombreux aménagements ont entraîné une modification de l'hydrodynamisme, de l'hydromorphologie de la Seine, une fragilisation des écosystèmes estuariens et par conséquent, une diminution des ressources

naturelles aussi bien végétales qu'animales (disparition de zones humides, d'habitats, réduction des ressources halieutiques, ...).

Ces changements ont permis de développer certains usages tels que la navigation (de commerce) au détriment de la pêche fluviale par exemple. Ce type d'usage nécessite des interventions humaines continues pour le maintenir (dragage du chenal de navigation, entretien ou reconstruction de digues fragilisées). Même si d'un point de vue écologique ces interventions sont mal perçues, elles sont toutefois nécessaires voir impératives pour conserver une activité économique du local à l'international. Elle vise également à protéger les biens et les personnes.

Grâce à une législation de plus en plus orientée vers la préservation de l'environnement, des mesures environnementales accompagnent dès à présent les aménagements susceptibles de porter atteinte aux milieux naturels. D'autres projets visent à restaurer certaines fonctionnalités écologiques de l'estuaire de la Seine. Les différentes mesures et actions environnementales menées sur l'estuaire font qu'il conserve un patrimoine naturel paysager d'intérêts faunistiques et floristiques malgré des activités anthropiques omniprésentes.

Références bibliographiques

- ADSM, 2008.** Tableaux d'assemblage du cadastre napoléonien (1807/1842) des communes riveraines de la Seine de Seine-Maritime.
- Archives du GPMR.** Dossiers administratifs de 1944 – 1974.
- ARH, 2009.** site de l'Association de Recherches Historiques « Fil d'Ariane ».
- Banal M., 1956.** Monographie de la Seine Maritime - Annexe : Evolution des fonds. Rapport d'ingénieur, 21p.
- Baron L., sd.** La Seine. Paris, Henri Laurens éditeurs.
- Beaurepaire Ch. de, 1856.** De la vicomté de l'eau de Rouen et de ses coutumes au XIIIe et XIVe siècles. Evreux, Herissey, 520 p.
- Bernard V., s.d..** Rouen MetroBus « Théâtre des Arts » et « Place Foch ». Rapport d'une étude dendrochronologique, Service Régional de l'Archéologie de Haute-Normandie, 15 p.
- Burnouf J., Carcaud N., Garcin M., 2009.** Nouvelle histoire de la Loire entre nature et société. Géosciences, revue du BRGM, n° 9, avril 2009, 8 p.
- Cardin & Babin, 1907 (a).** Carte de l'estuaire de la Seine indiquant les variations du chenal de 1880 à 1900.
- Cardin & Babin, 1907 (b).** Carte de l'estuaire de la Seine indiquant les variations du chenal de 1900 à 1907.
- Chanson H., 2005.** Mascaret, Aegir, Pororoca, Tidal Bore. Quid? Où? Quand? Comment? Pourquoi? La Houille Blanche n°3, revue internationale de l'eau, 12p.
- Costil C., Dauvin J. C., Duhamel S., Hocdé R., Mouny P., de Roton G., 2002.** 7. Patrimoine biologique et chaînes alimentaires. Fascicule Seine-Aval, 46p.
- Cunliffe B., 1993.** La Gaule et ses voisins. Paris, Editions Picard.
- Delsinne N., 2005.** Evolution pluri-millénaire à pluri-annuelle du prisme sédimentaire de l'embouchure de la Seine. Facteurs de contrôle naturels et d'origine anthropique. Thèse de doctorat, Université de Caen, 185p.
- Dumans M., 1957.** La contribution à l'étude de la navigation en Basse-Seine. Etudes normandes, n°85, 34p.
- Furon G., 1998.** Cartes géographiques et cartes marines du XVIe au XIXe siècle de Normandie et du Pays de Caux. Luneray, Edition Bertout, 190p.
- GPMR-DCC, 2008.** Port de Rouen, Vallée de Seine. Dossier pédagogique disponible sur le site internet du GPMR.
- GPMR-SEC, 2008.** Cartes bathymétriques de la Seine de 1834 à 1980 couvrant l'estuaire amont, moyen ou aval.
- GPMR-SED, 2008.** Statistiques 1970-2007.
- Guézennec L., 1999.** Hydrodynamique et transport en suspension du matériel particulaire fin dans la zone fluviale d'un estuaire macrotidal : l'exemple de l'estuaire de la Seine (France). Thèse de doctorat, Université de Rouen, 240p.
- Hoyau-Berry A., L'Hour M., 2007.** Le Havre – Port 2000 – Prospection archéologique préventive. Ministère de la Culture – Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et sous-marines, 152 p.
- Joignant P., nd.** Aménagement du littoral de Sainte Adresse et du Havre, réfection des épis. Etude faite pour le port du Havre, Centre Français du Littoral, 11p.
- Le Cain B., 1993.** Le Port d'Harfleur au Moyen Age : XIVe – XVe siècles, les aspects d'un port militaire médiéval. Mémoire de maîtrise, université de Paris I, 2 volumes.
- Labrousche H., 2000.** La navigation sur la Seine au XIXe siècle. Intervention d'une conférence, 10p.
- Lafite R., Deloffre J., Verney R., 2003.** Construction d'indice de qualité physique d'un estuaire. Rapport annuel, Programme Seine-Aval 2, 28p.
- Langlois J.-Y., 1994.** Rouen, Place de la Pucelle. Bilan Scientifique du Service Régional de l'Archéologie de Haute-Normandie, p. 101-103.
- Langlois H., 2008.** La basse vallée de la Seine dans l'Antiquité. Thèse de doctorat, Histoire et Civilisations de l'Antiquité, EHESS, Paris, 2 volumes, 972 p.
- Lavoine E. & Lechalas M.C., 1885.** La Seine maritime et son estuaire. Encyclopédie des travaux publics, 312p.
- Le Sueur B., 1989.** La navigation en Basse-Seine au début du XIXe siècle. Cahier du musée de la batellerie n°25, 38p.
- Lenner G., 1885.** L'estuaire de la Seine – Mémoires, notes et documents. Volume 1, 258p.
- Leroi V., 2004.** Les dragages en estuaire de Seine : complexité d'une gestion globale. Rapport bibliographique de DESS, Université de Rouen, 54p.
- Leron M., 2006.** Définition de la stratégie de gestion et de valorisation des matériaux de dragage de la Seine entre Rouen et Tancarville - Seconde Etape : élaboration d'un schéma décennal. Prestation effectuée pour le port de Rouen, 74p.
- Lesueur P., Lesourd S., 1999.** 3. Sables, chenaux, vasières – Dynamique des sédiments et évolution morphologique. Fascicule Seine-Aval, 39p.
- Leroux N., sd.** L'anthropisation de la vallée de la Seine. Thèse de doctorat, Université de Rouen.
- Magin N. & Magin J., 1750.** Carte du cours de la Seine depuis Le Havre au Pont de Larche. Partie des environs de Rouen.
- Mouchard J., 2006.** Les aménagements de berges d'Aizier (Eure). Rapport de fouille, Service Régional de l'Archéologie de Haute-Normandie, 2 volumes.
- Mouchard J., 2008.** De la voie navigable aux sites portuaires en basse vallée de Seine : maîtrise et gestion des accès (Antiquité – époque moderne). Des châteaux et des sources – Archéologie et histoire dans la Normandie médiévale, Université de Rouen et du Havre, p.103-127.
- Paez-Rezende L., 1997.** Incarville « Les Prés », site 27/351/004. Document final de synthèse, Service Régional de l'Archéologie, 4 volumes.
- Patey A., 2004.** Evolution de l'estuaire de la Seine entre le pont de Tancarville et Rouen. Rapport de DESS, Université de Rouen, 40p.
- PAH, 2005(a).** Flash info « Port 2000 ». Publication du Port Autonome du Havre n°5, 4p.
- PAH, 2005(b).** Port 2000 - Dignes de protection et d'accès maritimes. Carte de l'état d'avancement des travaux en date de fin janvier 2005.
- PAH, 2008.** Flash info « Prolongement du Grand Canal du Havre ». Publication du Port Autonome du Havre n°1, 4p.
- PAR, 2005.** Programme de gestion et de valorisation des sédiments de dragage du PAR. Comité Scientifique et Technique de l'estuaire.
- PAR, 2006(a).** Dossier de concertation du projet d'amélioration des accès maritimes du port de Rouen. Rapport de suivi, 46p.
- PAR, 2006(b).** Remblaiement expérimental d'un plan d'eau à Yville-sur-Seine. Mise à jour du suivi de l'opération, 51p.
- PAR, 2006(c).** Dragage d'entretien du chenal d'accès et immersion des produits de dragage – rapport de suivi. 33p.
- PAR, 2007(a).** Dragage d'entretien du chenal d'accès et immersion des produits de dragage – rapport de suivi. 42p.
- PAR, 2007(b).** Le bilan du Programme Triennal 1998-2000. 8p.
- PAR, 2007(c).** Synthèse du dossier de concertation - Projet d'amélioration des accès maritimes du port de Rouen. 8p.
- Sueur G., 1982.** Les crues de la Seine à travers les âges. Paris-Normandie, 1p.
- Reymondier P., 1990.** Les accès du port de Rouen (depuis l'origine jusqu'à l'époque actuelle). Synthèse pour le port de Rouen, version provisoire, 79p.
- Thélu R., 2005.** La liaison fluviale de Paris à la mer – Projets et réalisations du XVIIe au XXe siècle. Cahier du musée de la batellerie n°53, 87p.
- Sites internet consultés :**
AREHN - Agence Régionale de l'Environnement de Haute-Normandie, 2008 : <http://www.arehn.asso.fr/>
GPMH - Grand Port Maritime du Havre, 2009 : <http://www.havre-port.fr/>
GPMR - Grand Port Maritime de Rouen, 2009 : <http://www.rouen.port.fr/>
Université du Havre - Patrimoine naturel du Pays de Caux

et de l'estuaire de la Seine, 2002 : <http://www.univ-lehavre.fr/cybernat/pages/mascaret.htm>

Tanguy J., Rouen Histoire, 2009 : <http://www.rouen-histoire.com/Ponts/index.htm>

Sequan@ normandie, 1999 : <http://www.sequana-normandie.com/>

Site de la ville de Pîtres, 2008 : <http://ville2pitres.free.fr/>

Site de la ville de Martot, 2008 : <http://martot27.free.fr/>

Attention : les Ports Autonomes de Rouen et du Havre (PAR et PAH) sont devenus les Grands Ports Maritimes de Rouen et du Havre (GPMR et GPMH) courant 2009.

Glossaire

Alluvions : dépôt sédimentaire caillouteux à limoneux laissé par la rivière dans le fond des vallées.

Atterrissement : zone d'accumulation de sédiments apportés par le fleuve ou la mer.

Bathymétrie : équivalent sous-marin de la topographie, c'est-à-dire description du relief immergé grâce aux mesures de profondeurs.

Bouchon vaseux : zone de turbidité maximale particulière aux estuaires évoluant au gré des conditions hydrologiques (débits, cycles de marée).

Crue : période où le débit d'un cours d'eau est brusquement plus fort et les hauteurs d'eau plus élevées.

Ecluse : ouvrage hydraulique implanté dans un canal ou un cours d'eau pour le rendre navigable et permettre aux bateaux de franchir certains obstacles.

Effet de chasse : évacuation des matériaux sous l'effet des courants plus ou moins puissants à marée descendante.

Épi : ouvrage appuyé sur une berge et disposé perpendiculairement à celle-ci destiné à orienter les courants.

Etiage : période où le débit d'un cours d'eau est le plus faible.

Flot : courant de marée montante.

Halage : pratique de traction des bateaux à partir de la berge à l'aide de chevaux et/ou d'hommes au 19^{ème} siècle.

Haut fond : relief subaquatique recouvert d'une faible hauteur d'eau.

Inondation : débordement de la nappe phréatique ou d'un cours d'eau en crue submergeant les terrains situés en bordure.

Intrusion saline : phénomène dans lequel une masse d'eau salée pénètre à l'intérieur d'une masse d'eau douce.

Jusant : courant de marée descendante.

Marnage : différence entre le niveau de pleine mer et le niveau de basse mer en un point donné. Il est fonction du coefficient de marée, du débit de la Seine et de facteurs climatiques (décote ou surcote).

Matières en suspension : ensemble des particules solides de petite taille transportées au sein de la masse d'eau.

Morte-eau : marée d'amplitude la plus faible se produisant deux fois par mois (premier et dernier quartiers de lune).

Nautes : membres de la corporation des nautes, premiers bateleurs de la Seine. Leur maxime "flotons mais ne coulons pas" est à l'origine du bateau et de la devise "fluctuat nec mergitur" sur les armes de Paris. La circulation fluviale fut un enjeu important et la congrégation des Nautes était puissante

Pk : point kilométrique le long de la Seine (distance mesurée vers l'aval à partir du pont Marie à Paris).

Pertuis : passage d'un fleuve rétréci, à forte pente, de faible profondeur où le courant est très rapide.

Pilote de Seine : personne chargée de guider les navires entre Rouen et la mer.

Schorre : nom flamand désignant les prés salés ou marais maritimes ou herbus.

Slikke : mot flamand désignant, dans un estuaire ou une baie, une étendue de vase limitée vers le haut par le niveau de haute mer de morte-eau (limite du schorre).

Temps de résidence des eaux : temps de transfert des eaux dans un bassin versant de leur entrée à l'amont jusqu'à l'exutoire.

Thalweg : ligne reliant les points les plus bas d'un cours d'eau.

Tirant d'eau : hauteur de la partie immergée de la coque d'un navire (cf encadré "gestion et entretien du chenal").

Trou de Seine : anse d'érosion de grande ampleur formée par érosion d'une berge sous l'action des courants.

Tuf : roche calcaire très poreuse et friable à aspect concrétionné.

Vive-eau : marée d'amplitude maximum correspondant aux périodes de pleine et nouvelle lune.

Zéro CMH (Cote Marine au Havre) : plan de référence des cartes marines se situant à - 4,38 m par rapport au zéro NGF (1969).

Zone intertidale : zone marine qui découvre à marée basse comprise entre la plus haute mer et la plus basse mer de vive-eau (zone de balancement des marées).

Évolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours

Fascicules Seine-Aval

- 1.1 Seine-Aval : un estuaire et ses problèmes
- 1.2 Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau
- 1.3 Sables, chenaux et vasières : dynamique des sédiments et évolution morphologique
- 1.4 Matériaux fins : le cheminement des particules en suspension
- 1.5 L'oxygène : un témoin du fonctionnement microbologique
- 1.6 Contaminations bactérienne et virale
- 1.7 Patrimoine biologique et chaînes alimentaires
- 1.8 La contamination métallique
- 1.9 Fer et manganèse : réactivités et recyclages
- 1.10 Le cadmium: comportement d'un contaminant métallique en estuaire
- 1.11 La dynamique du mercure
- 1.12 Les contaminants organiques qui laissent des traces : sources, transport et devenir
- 1.13 Les contaminants organiques : quels risques pour le monde vivant?
- 1.14 Des organismes sous stress
- 1.15 Zones humides de la basse vallée de la Seine
- 1.16 Les modèles : outils de connaissance et de gestion
- 2.1 Le Programme Seine-Aval 3 : contexte, bilan et enjeux
- 2.2 La génotoxicité : quel risque pour les espèces aquatiques ?
- 2.3 Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours

Réalisation	: GIP Seine-Aval 12 Avenue Aristide Briand 76 000 Rouen www.seine-aval.fr
Conception - Edition	: AAZ Consultants
Infographie	: Quai 24
Impression sur papier recyclé	: IB4
ISBN	: 2-84834-052-5
Crédits photos (couverture)	: GIP Seine-Aval
Date d'édition	: Mars 2010