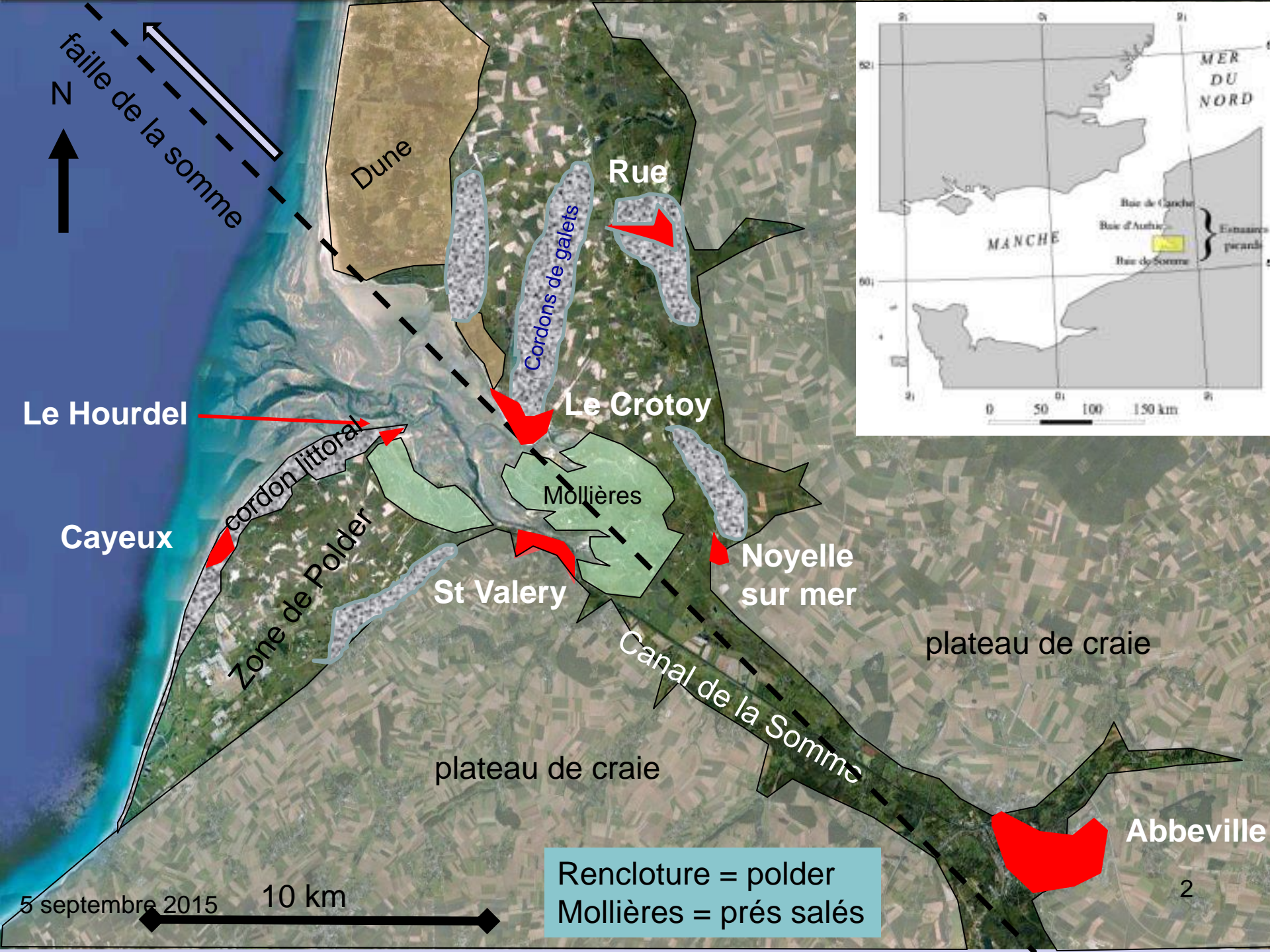


Evolution de la Baie de Somme et des terrains avoisinants, Conséquence pour le PPRN

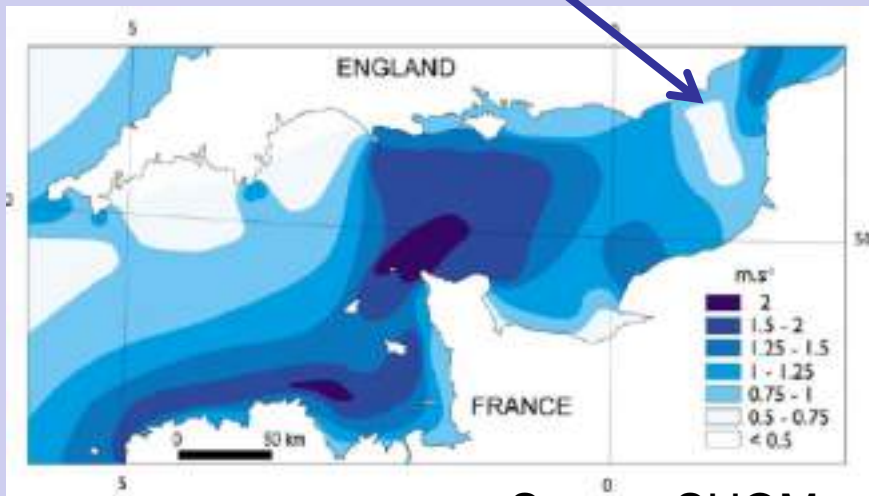
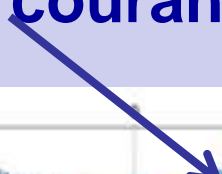
Bruno Goffé

Directeur de recherche Emérite du CNRS,
Université Aix-Marseille

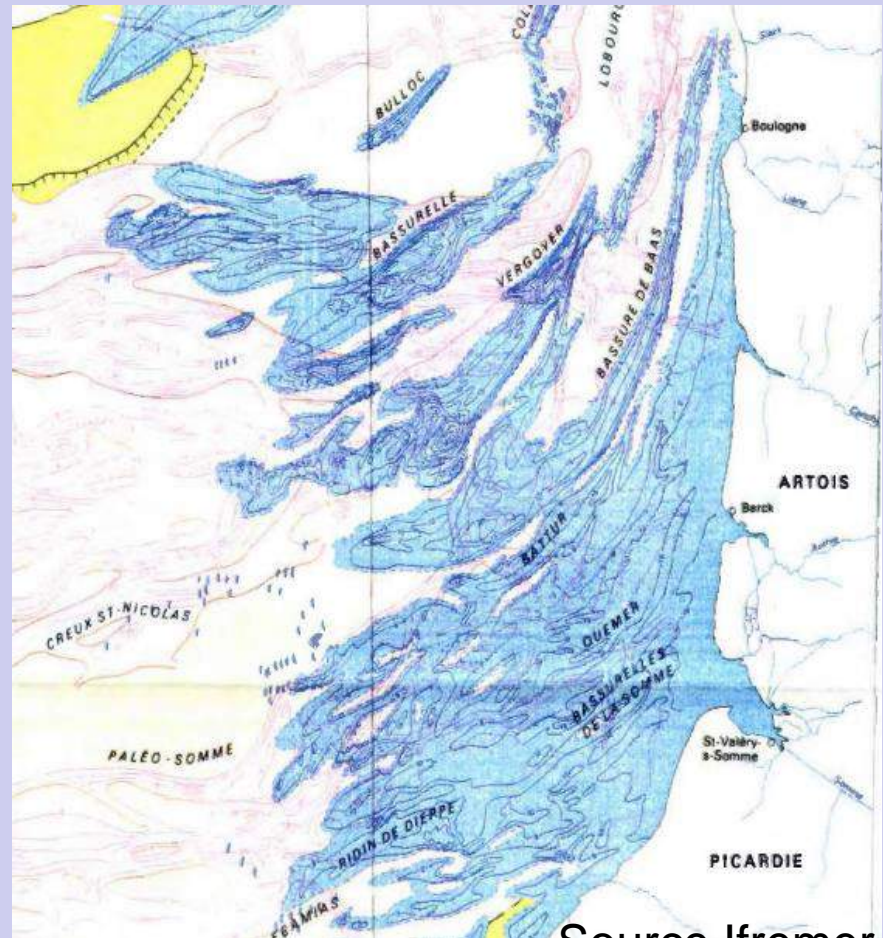


Au large de la baie

une quantité considérable de sédiments accumulée depuis la dernière glaciation : essentiellement du sable déposé dans les zones de plus faible courant



Source SHOM

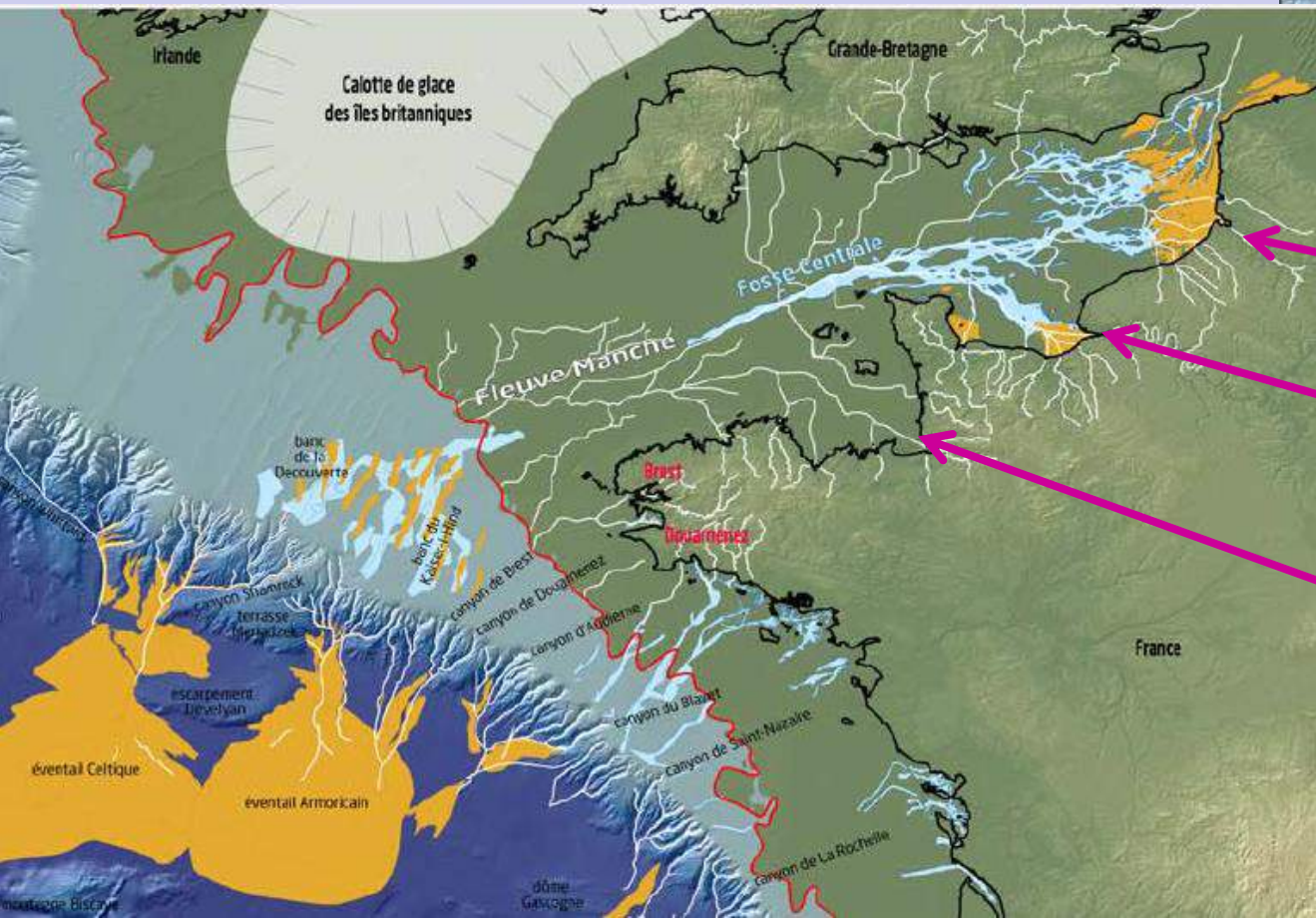
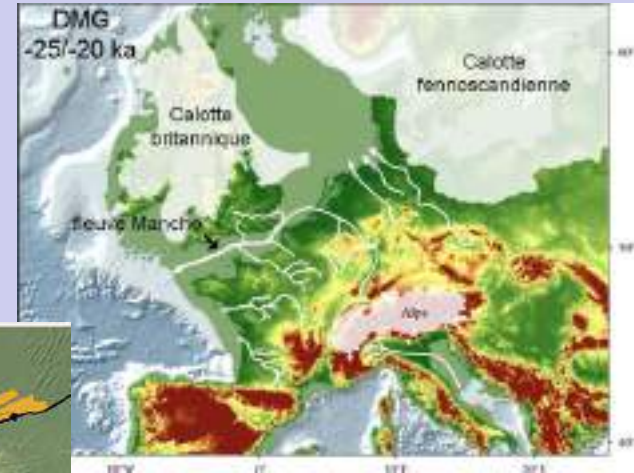


Source Ifremer

Il y a 20000 ans, durant la glaciation la manche était un fleuve,

un niveau de la mer 120m plus bas qu'actuellement.

Le détroit du Pas de Calais était entièrement découvert et parcouru par de grands fleuves déplaçant une grande quantité de sable (en orange sur la carte)



La Somme

La Seine

Le Mont Saint Michel et son fleuve le Couesnon

Source Ifremer

Une remontée de la mer de 120 m en 8000 ans

Courbes de la remontée de la mer au niveau mondial depuis 24000 ans avec estimation des vitesses de remontée

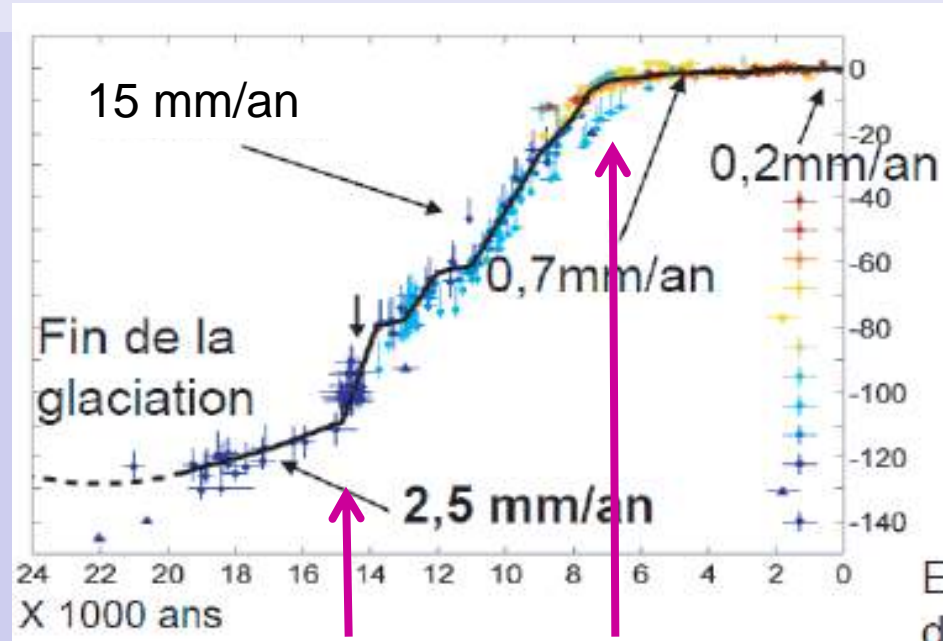
et

en dessous la courbe de la variation de la température sur la même période

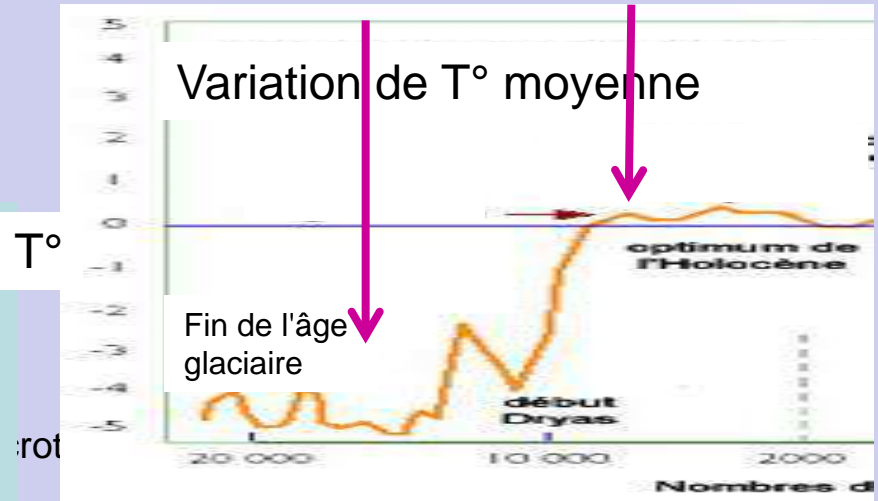
Une remontée due à la fonte des glaces après la période glaciaire et le retour à des températures tempérées il y a environ 7000 ans

Essentiellement réalisée de -15000 à -7000 ans à la vitesse moyenne de 15mm/an soit 1,50 m par siècle.

Depuis et jusqu'à il y a environ une centaine d'année le taux de montée du niveau des mers a ralenti à 0,7, puis à 0,2 mm/an et finalement s'est quasiment arrêté à la fin du 19eme ou même décro (cas de la Manche)

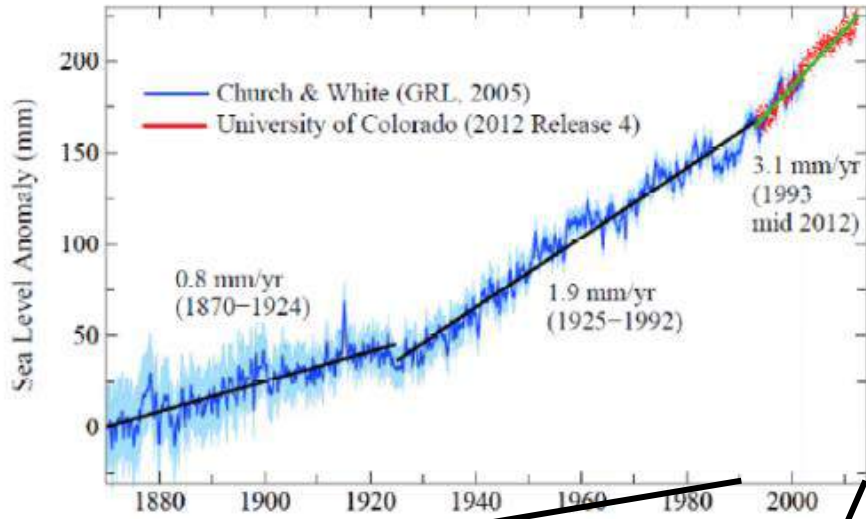


-15000 ans -7000 ans

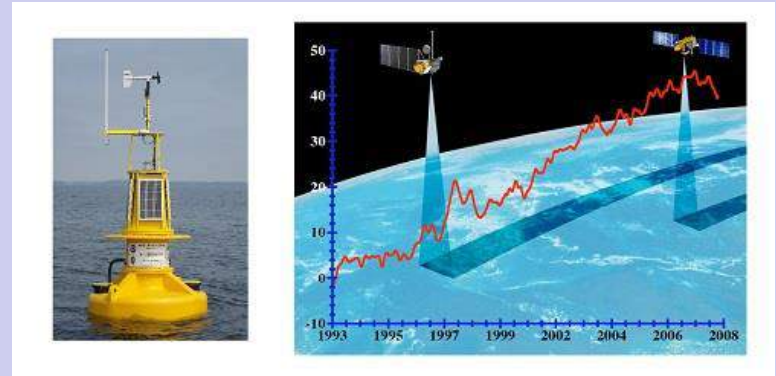


Depuis la fin du 19^{eme} siècle le niveau des mers remonte de nouveau

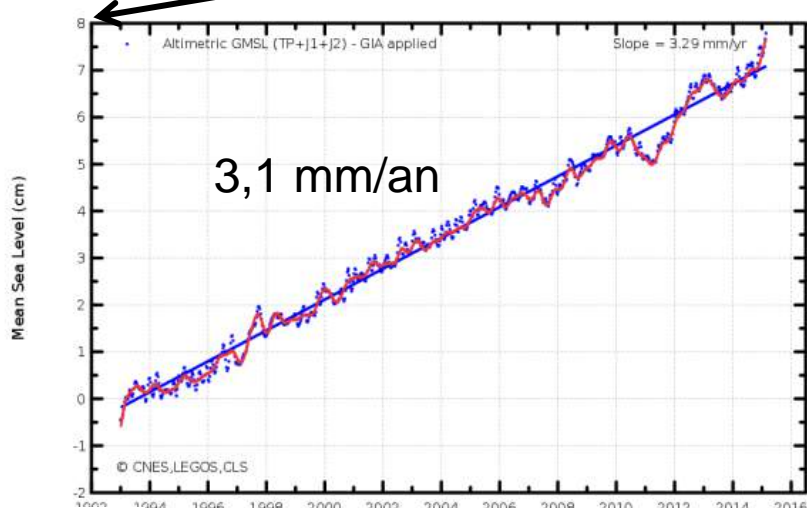
Variation mondiale moyenne du niveau des mers



Le niveau des mers se mesure avec les marégraphes, des bouées et des satellites



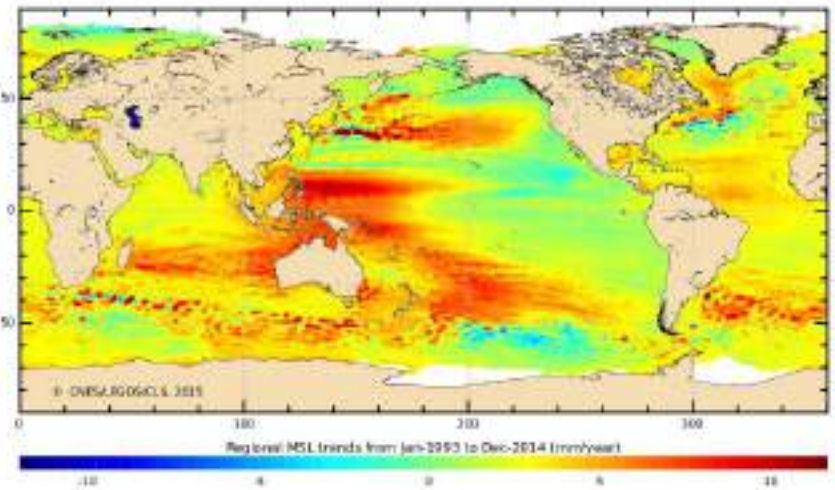
Une image globale des variations du niveau des océans mesurée par satellite



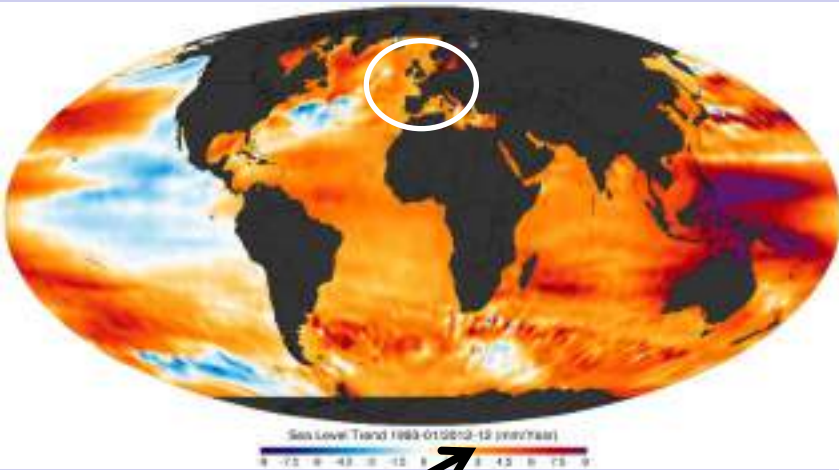
e cr

1992

2015



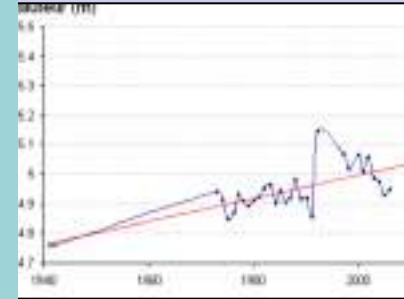
La Manche et l'Atlantique Nord-Est : Des taux moyens mais significatifs



Marégraphe : Boulogne sur Mer de
1940 à 2005 = 30cm = **4,6 mm/an**

A Dieppe : 20cm en 38 ans = **4,8 mm/an**

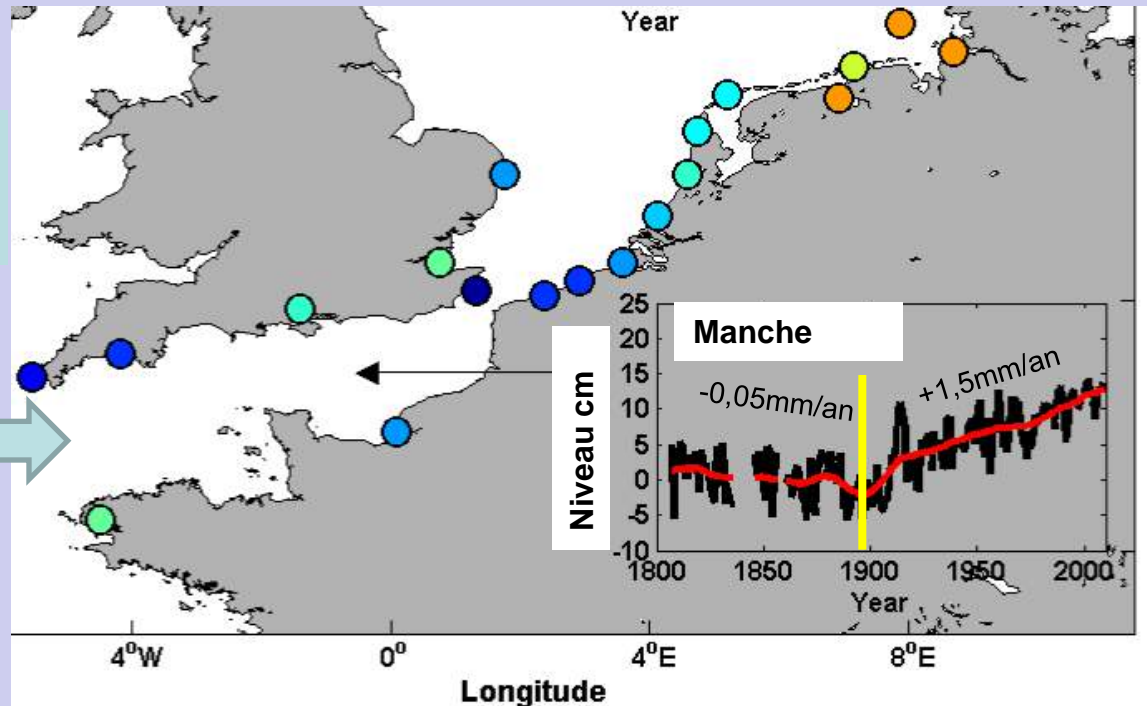
Et 38 cm en 40 ans = **9,6 mm/an**
pour les marées hautes



En orange 3-5 mm/an

*Vue mondiale, centrée sur l'Atlantique,
de la variation mondiale du niveau des
mers. (Mesure par satellite)*

*Courbe de la variation moyenne du
niveau de la mer dans la Manche
depuis 1800
(Mesurée par les marégraphes)
Montrant l'inversion de la variation
du niveau de la mer dans la Manche
à la fin du 19ème siècle*



Quelles conséquences pour la baie de somme des variations du niveaux des mers depuis 400 ans



Trop d'eau ?



Trop de sable ?



Trop d'herbe ?



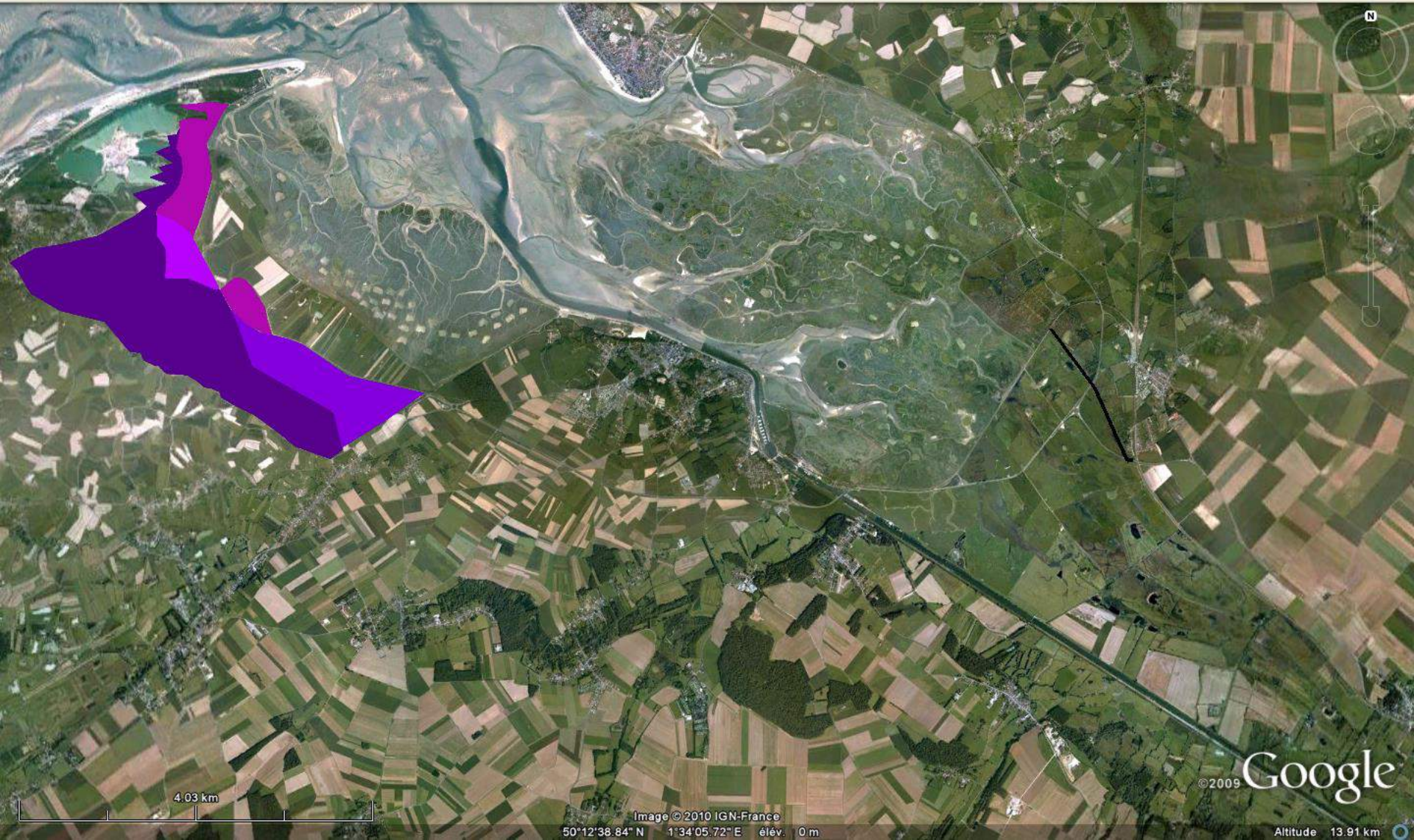
Trop de digues ?

Un voyage dans le temps depuis 1625

1625-1710

Progression des Renclotures et des Mollières





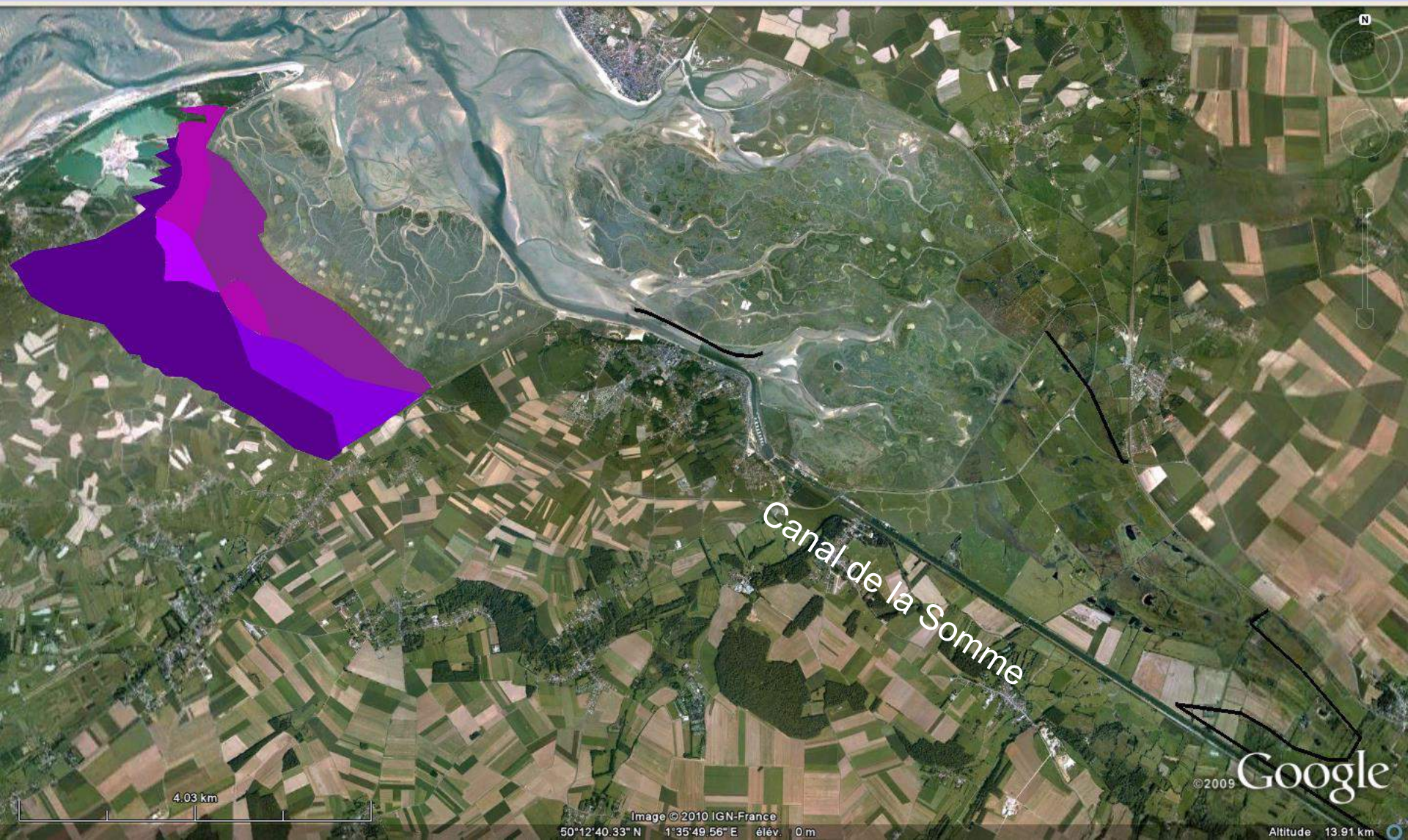
4.03 km

Image © 2010 IGN-France
50°12'38.84" N 1°34'05.72" E élév. 0 m

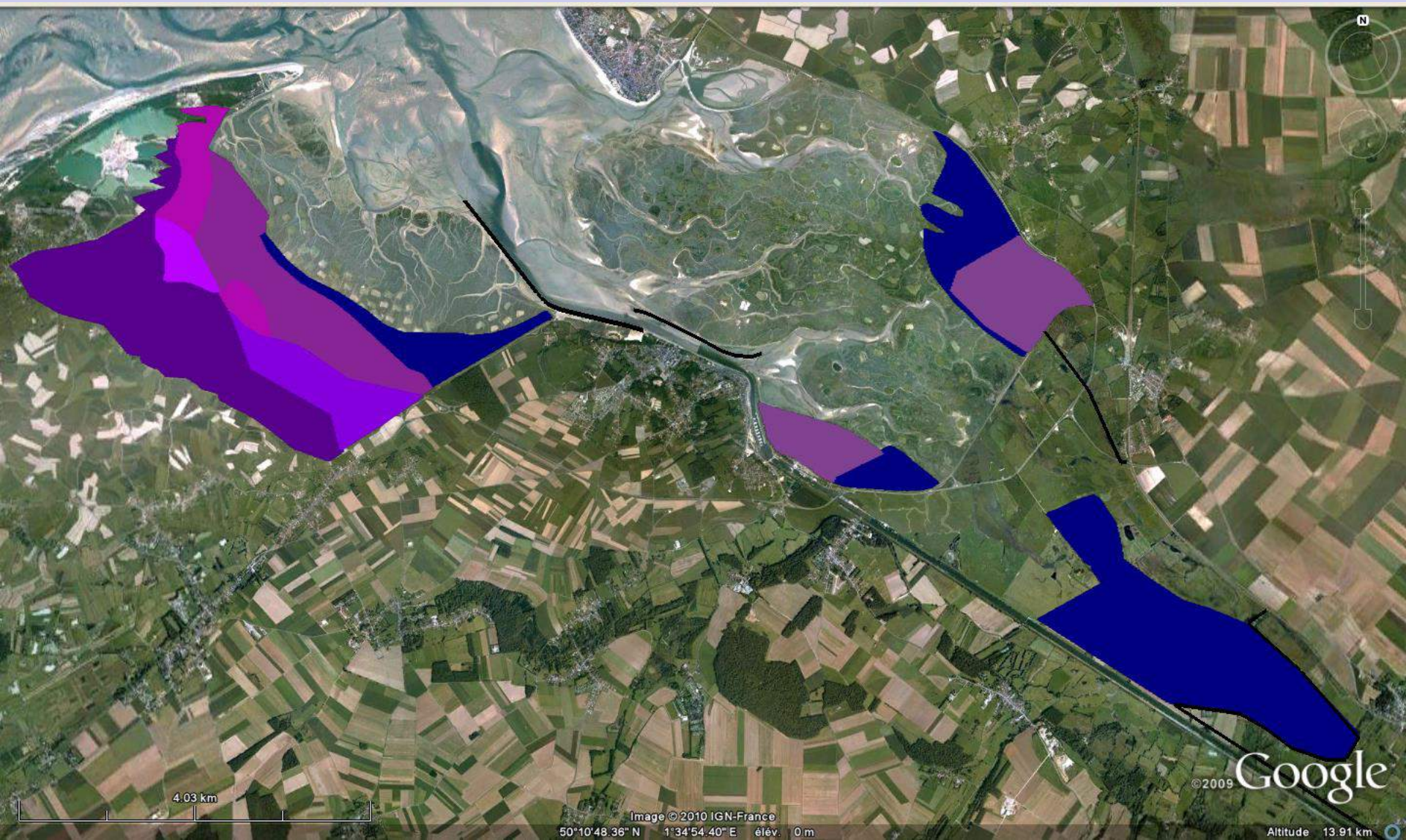
© 2009 Google

Altitude 13.91 km

1835



1878



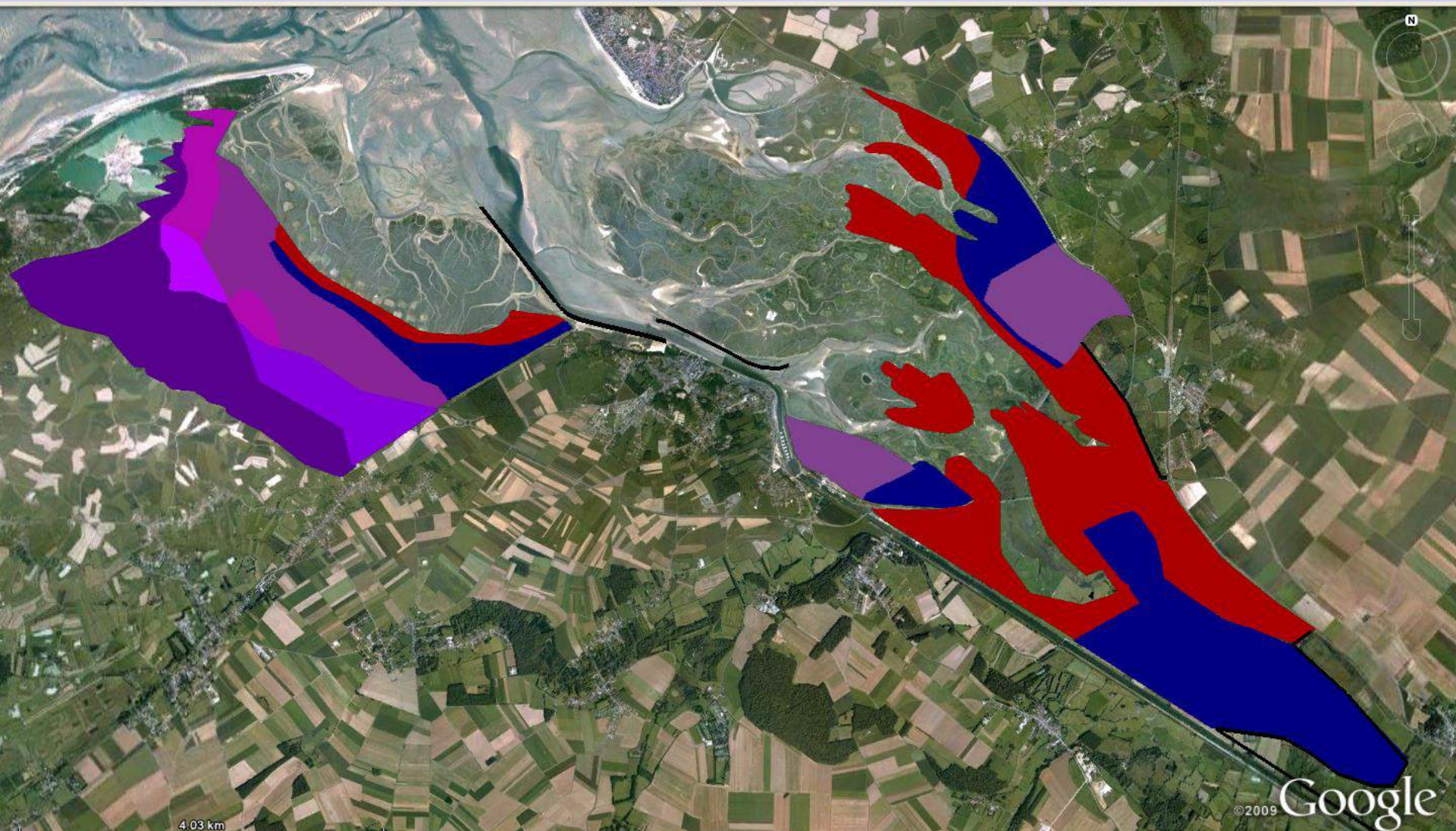
4.03 km

Image © 2010 IGN-France
50°10'48.36" N 1°34'54.40" E élév. 0 m

© 2009 Google

Altitude 13.91 km

1900



4.03 km

©2009 Google

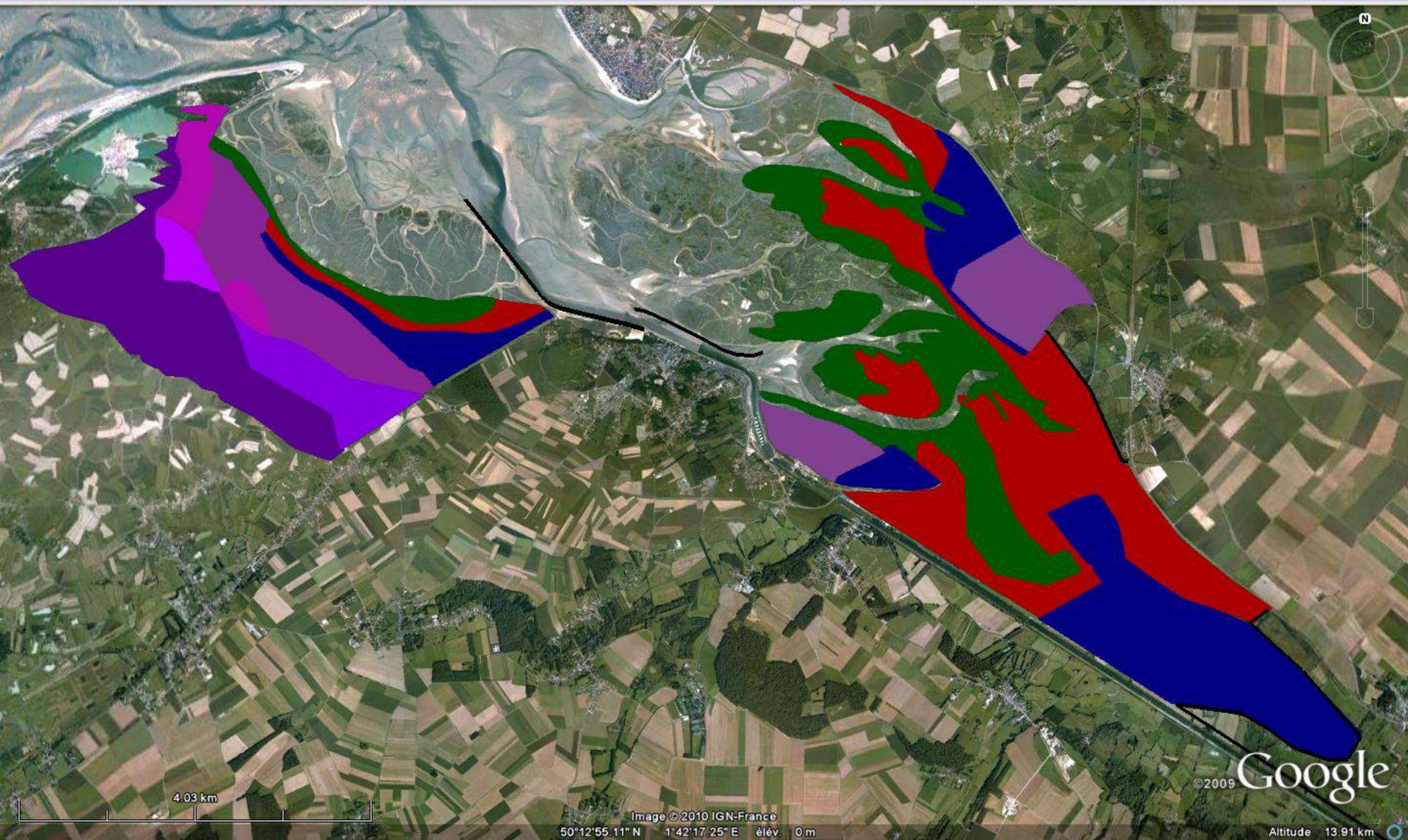
Image © 2010 IGN-France

Date des images satellite : 5 mars 2007

50°10'50.78" N 1°38'11.20" E élév. 0 m

Altitude 13.91 km

1920



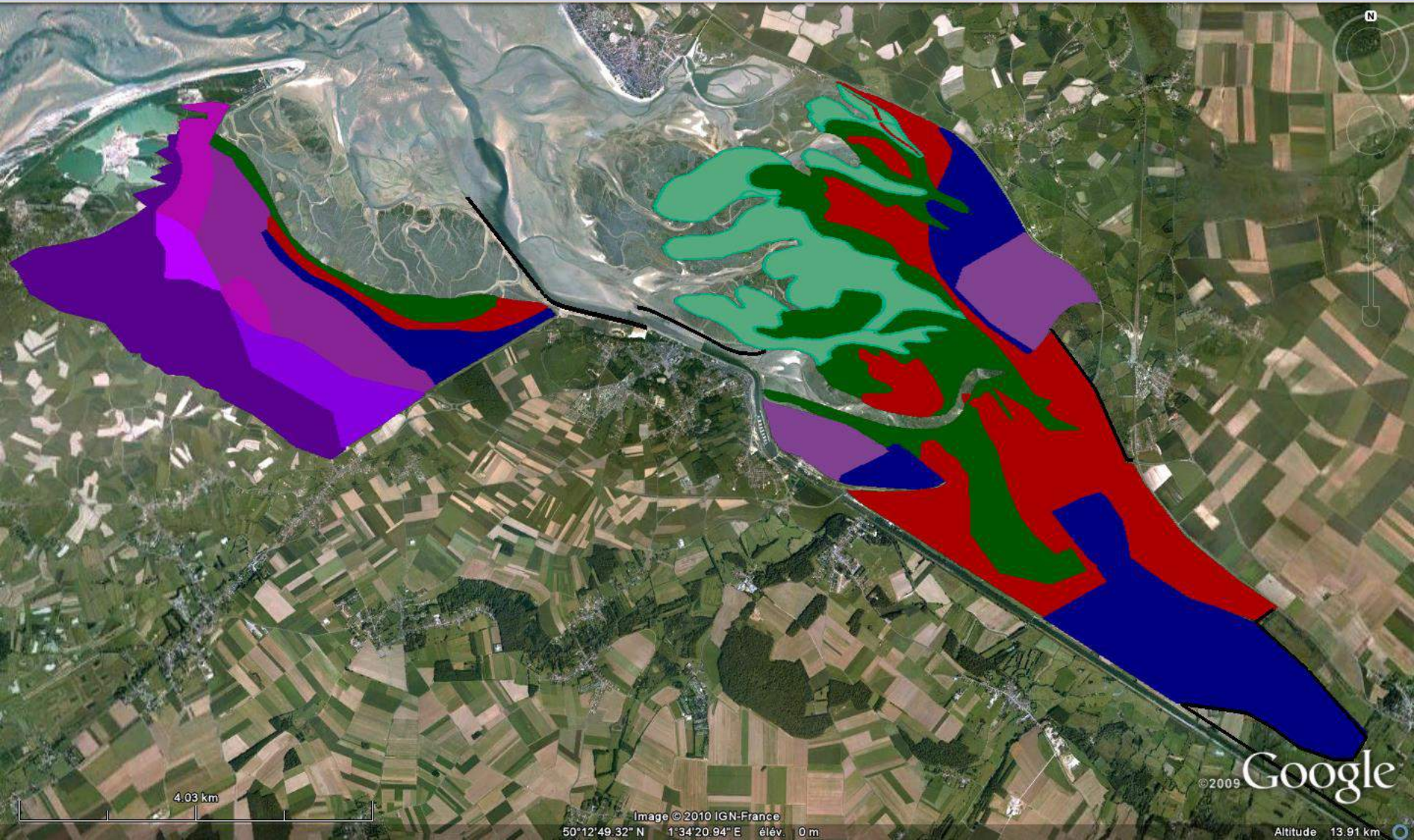
4.03 km

Image © 2010 IGN-France
50°12'55.11" N 1°42'17.25" E élév. 0 m

© 2009 Google

Altitude 13.91 km

1946



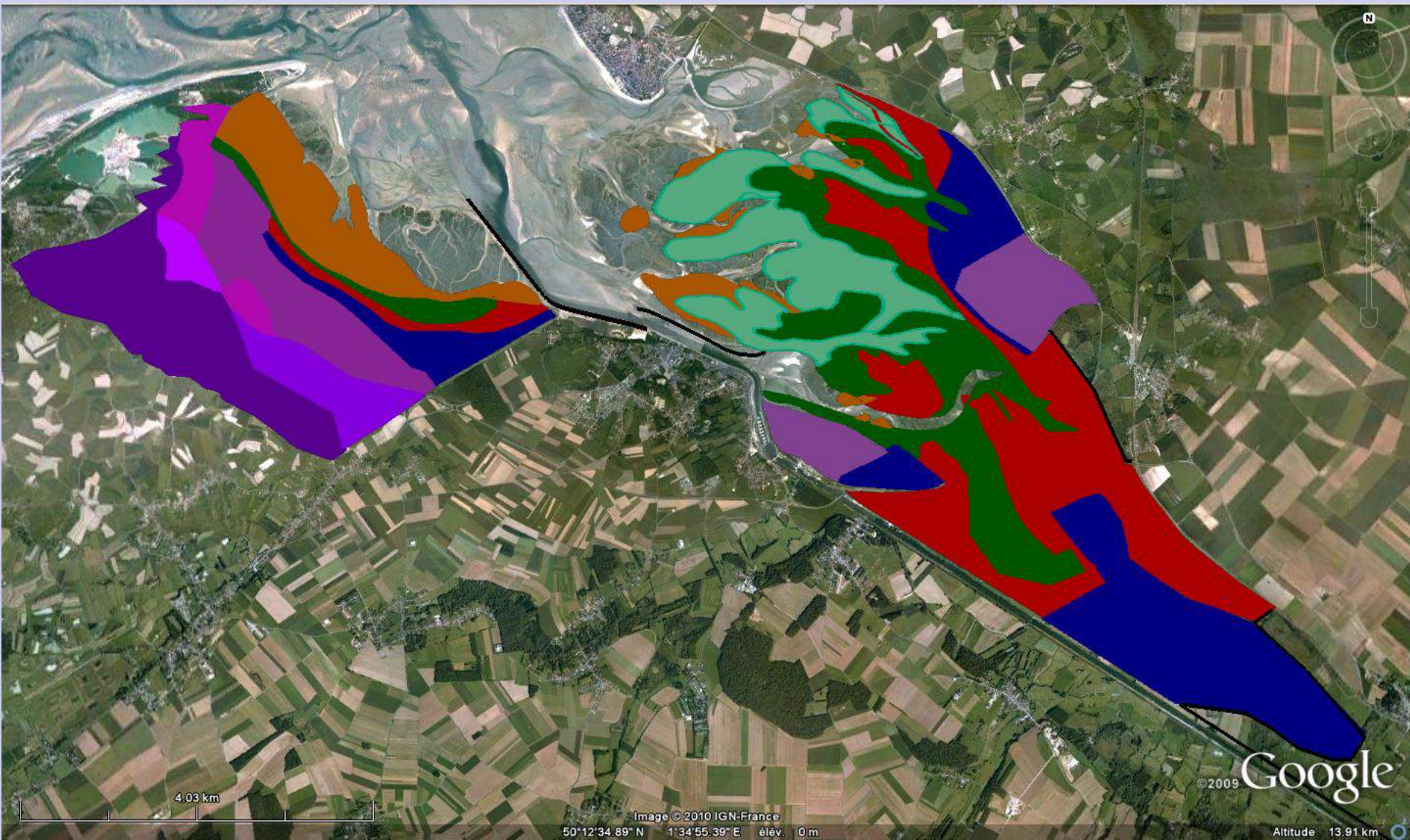
4.03 km

Image © 2010 IGN-France
50°12'49.32" N 1°34'20.94" E élév. 0 m

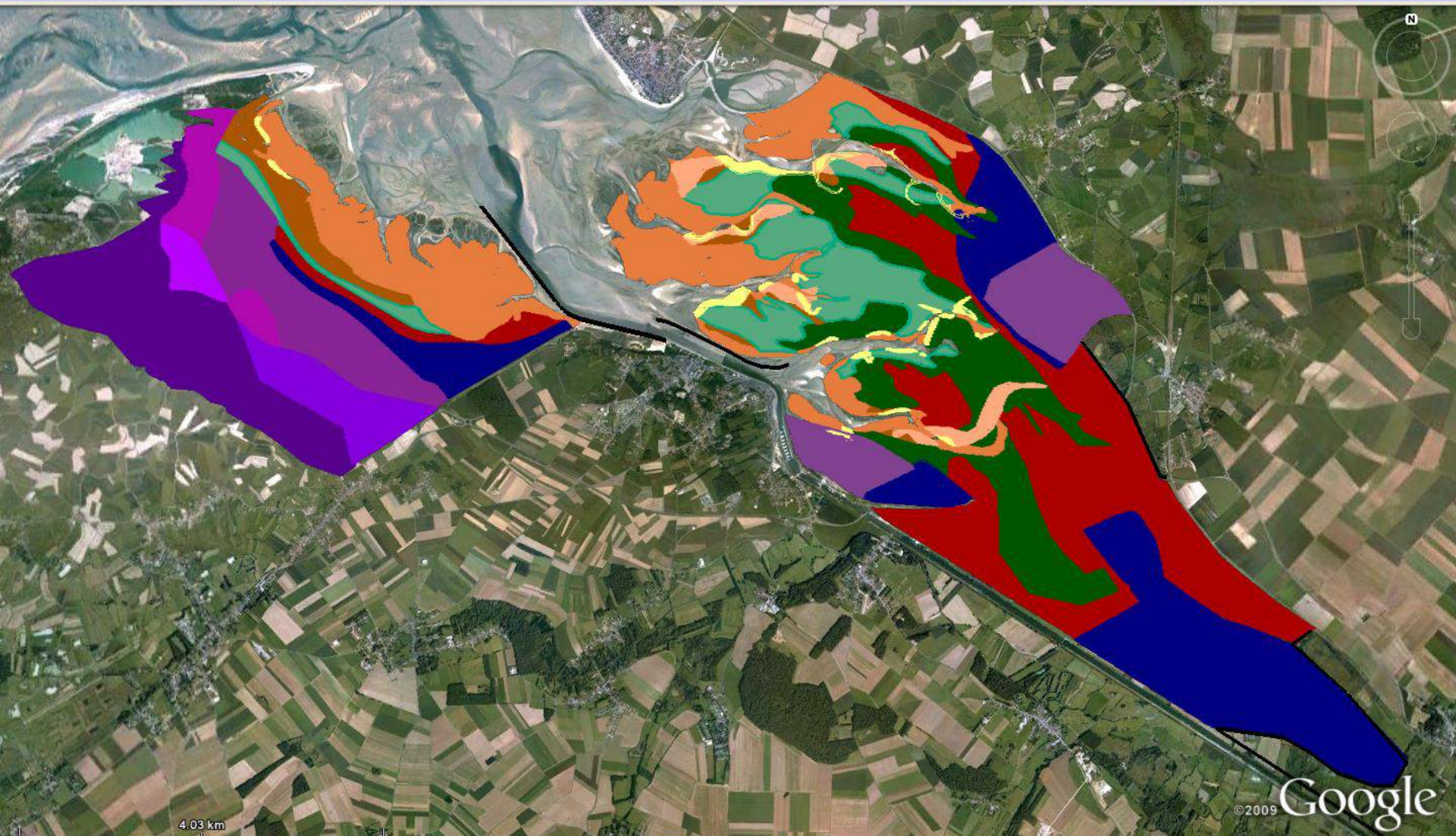
© 2009 Google

Altitude 13.91 km

1955



1997



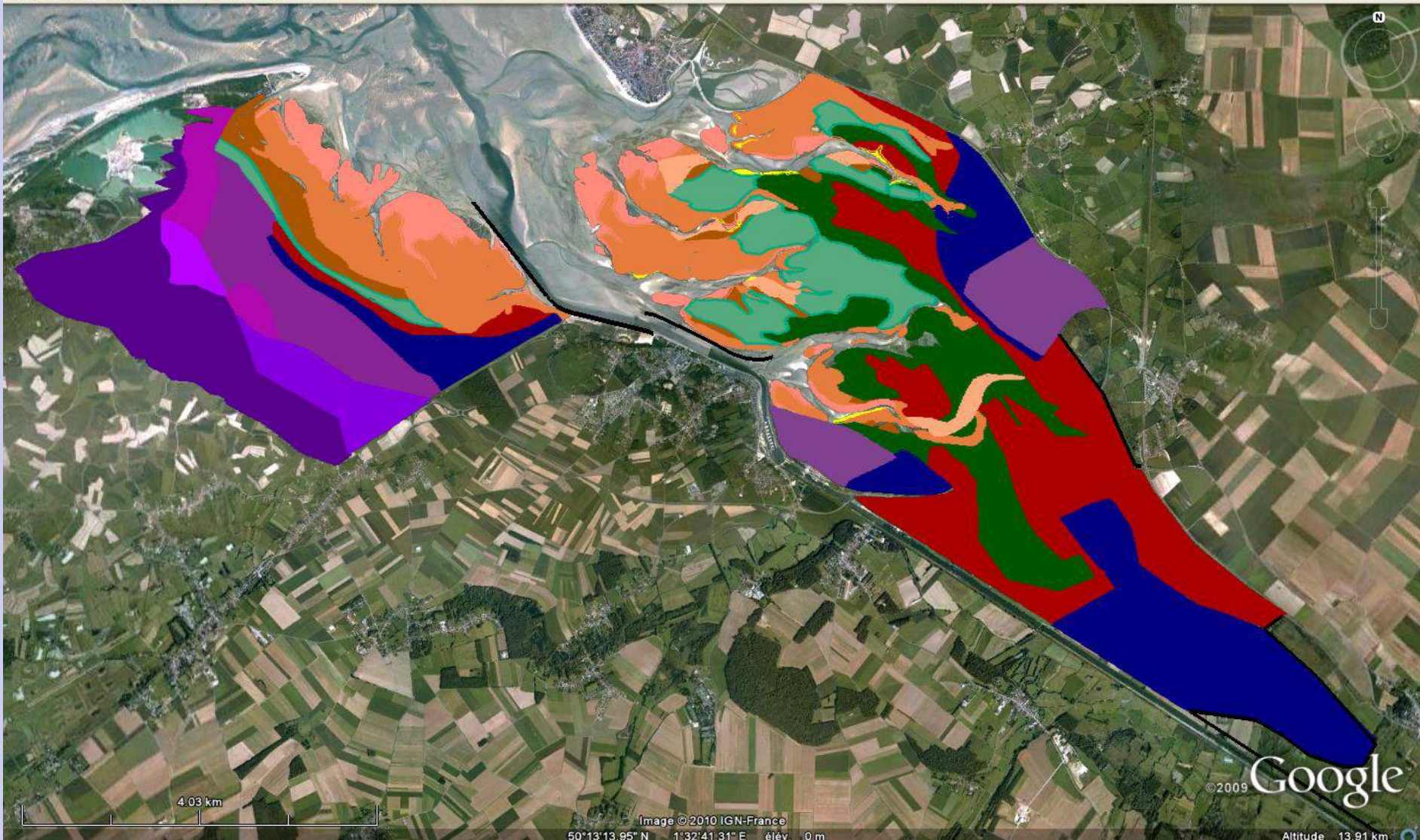
4.03 km

Image © 2010 IGN-France
50°11'39.25" N 1°43'02.27" E élév. 0 m

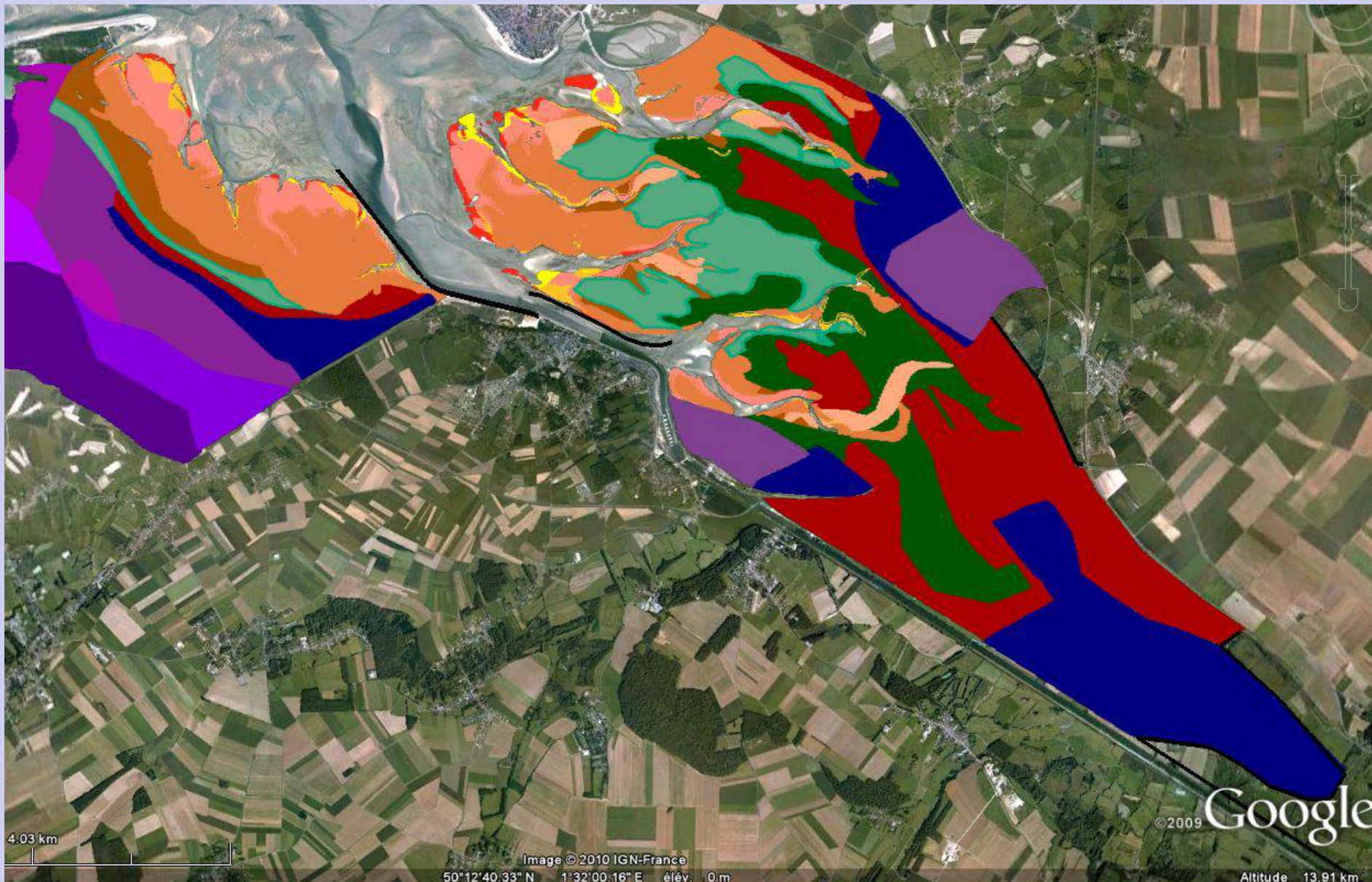
© 2009 Google

Altitude 13.91 km

2002



2010



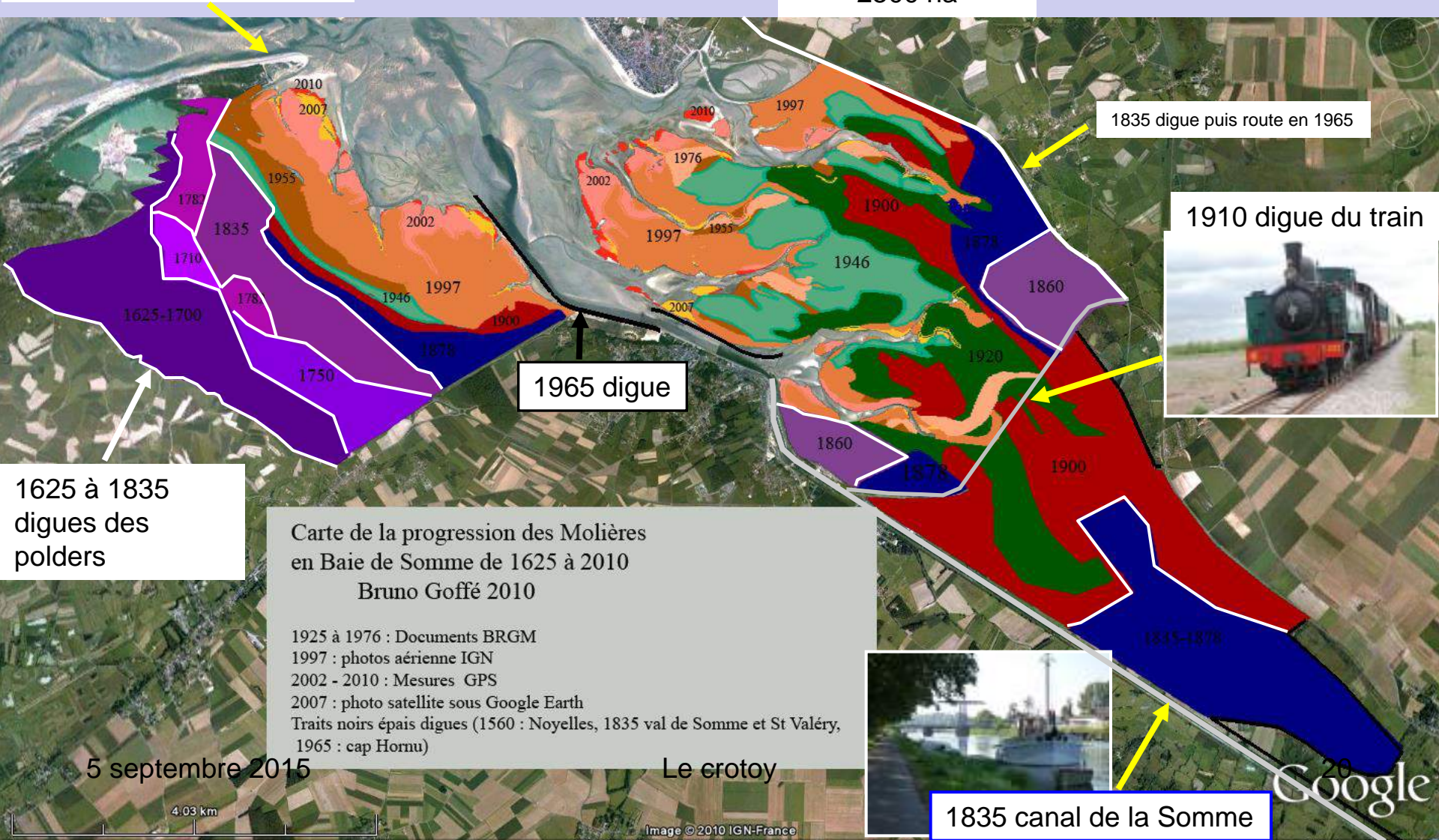
Cordon littoral
de galets



Carte de la progression des Polders (renclotures) et mollières depuis 1625

Hourdel et Hornu 1500 ha

fond de baie
2500 ha



1835 digue puis route en 1965

1910 digue du train



1965 digue

1625 à 1835
dignes des
polders

Carte de la progression des Molières
en Baie de Somme de 1625 à 2010
Bruno Goffé 2010

1925 à 1976 : Documents BRGM
1997 : photos aérienne IGN
2002 - 2010 : Mesures GPS
2007 : photo satellite sous Google Earth
Traits noirs épais digues (1560 : Noyelles, 1835 val de Somme et St Valéry,
1965 : cap Hornu)

5 septembre 2015

Le crottoy

1835 canal de la Somme



Google

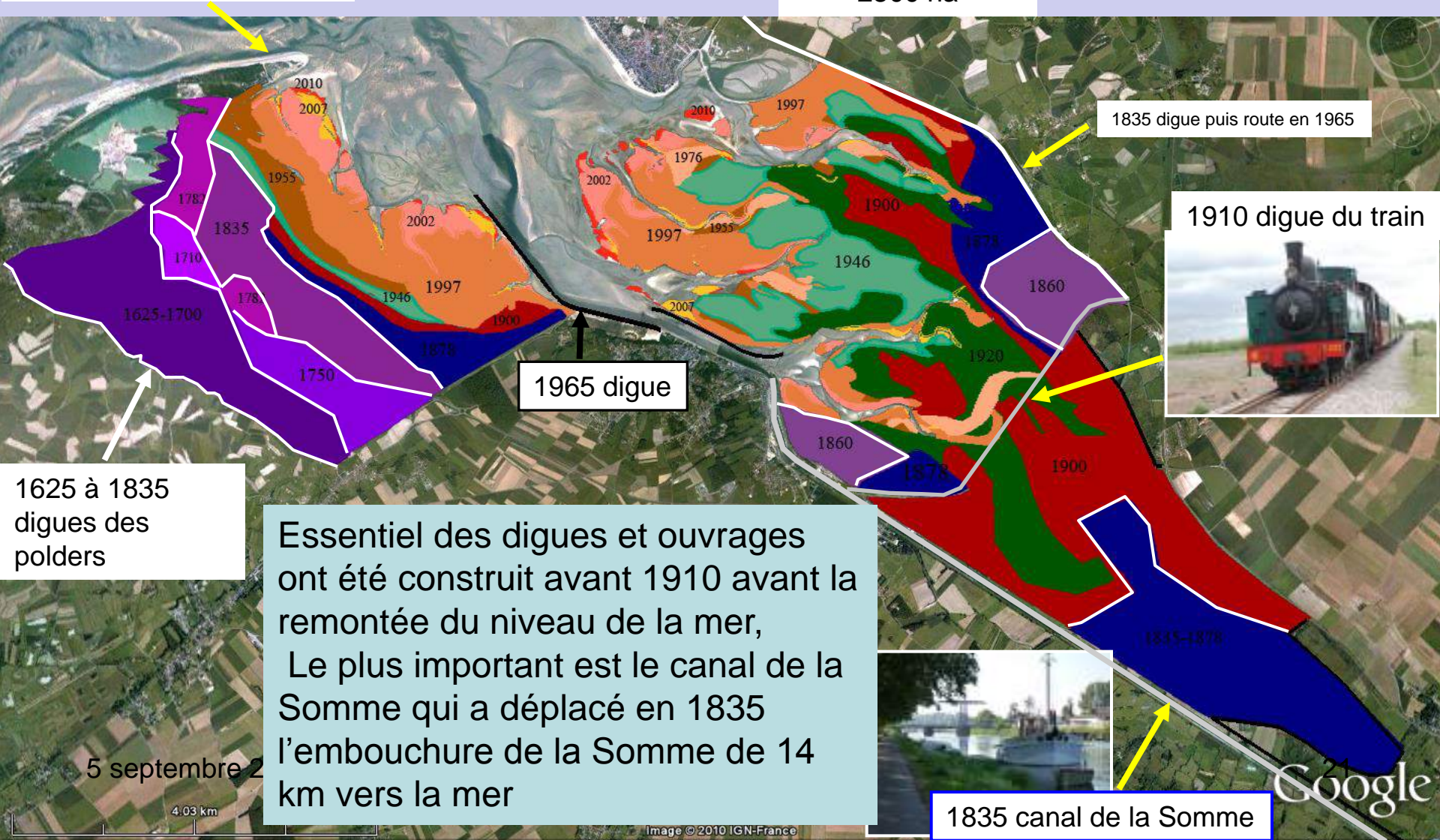
Cordon littoral
de galets



Carte de la progression des Polders (renclotures) et mollières depuis 1625

Hourdel et Hornu 1500 ha

fond de baie
2500 ha



1835 digue puis route en 1965

1910 digue du train



1965 digue

1625 à 1835
dignes des
polders

Essentiel des digues et ouvrages ont été construit avant 1910 avant la remontée du niveau de la mer, Le plus important est le canal de la Somme qui a déplacé en 1835 l'embouchure de la Somme de 14 km vers la mer

1835 canal de la Somme

5 septembre 2

4.03 km

Image © 2010 IGN-France

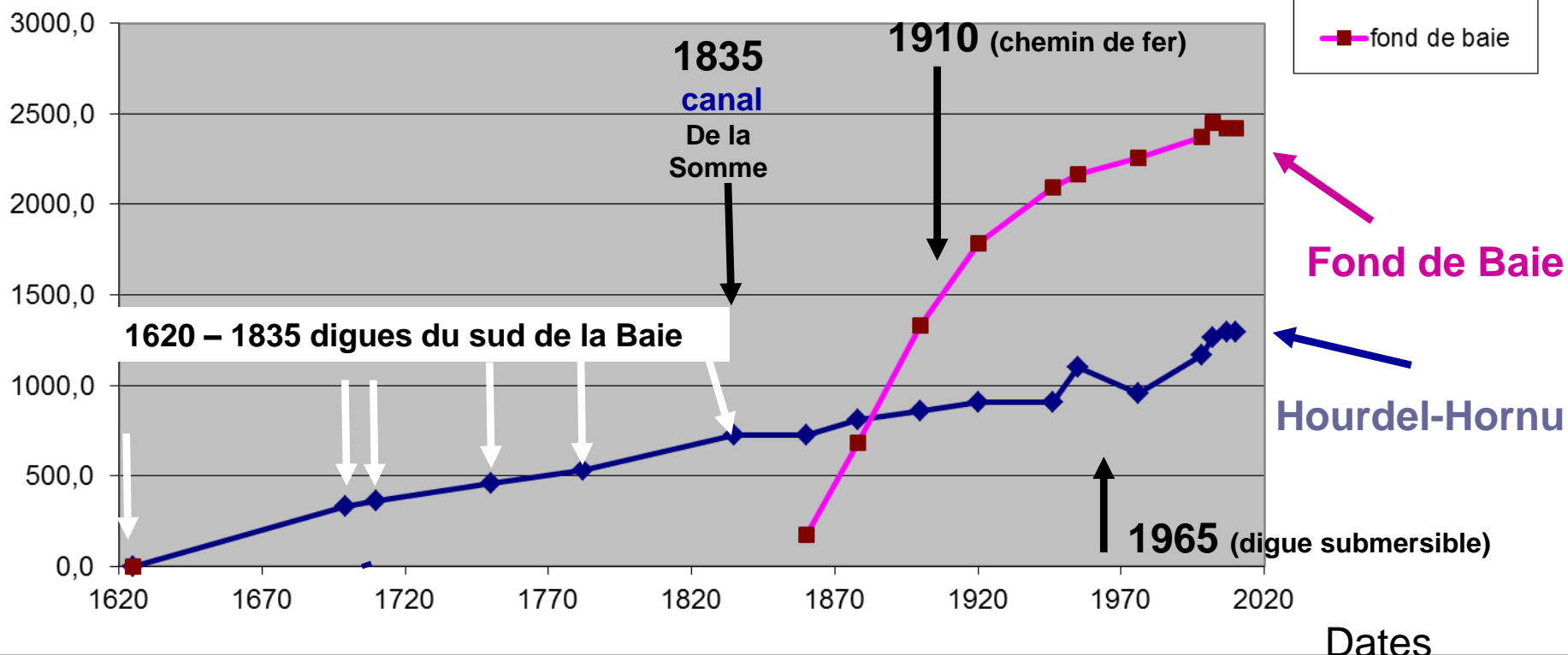
Google

Représentation graphique du taux de progression des renclotures et des mollières au cours des derniers 400 ans

Les digues des renclotures ne modifient pas le taux de progression des mollières : elles n'anticipent pas le phénomène mais l'utilisent. Seule la digue submersible de 1965 semble déstabiliser cette progression).

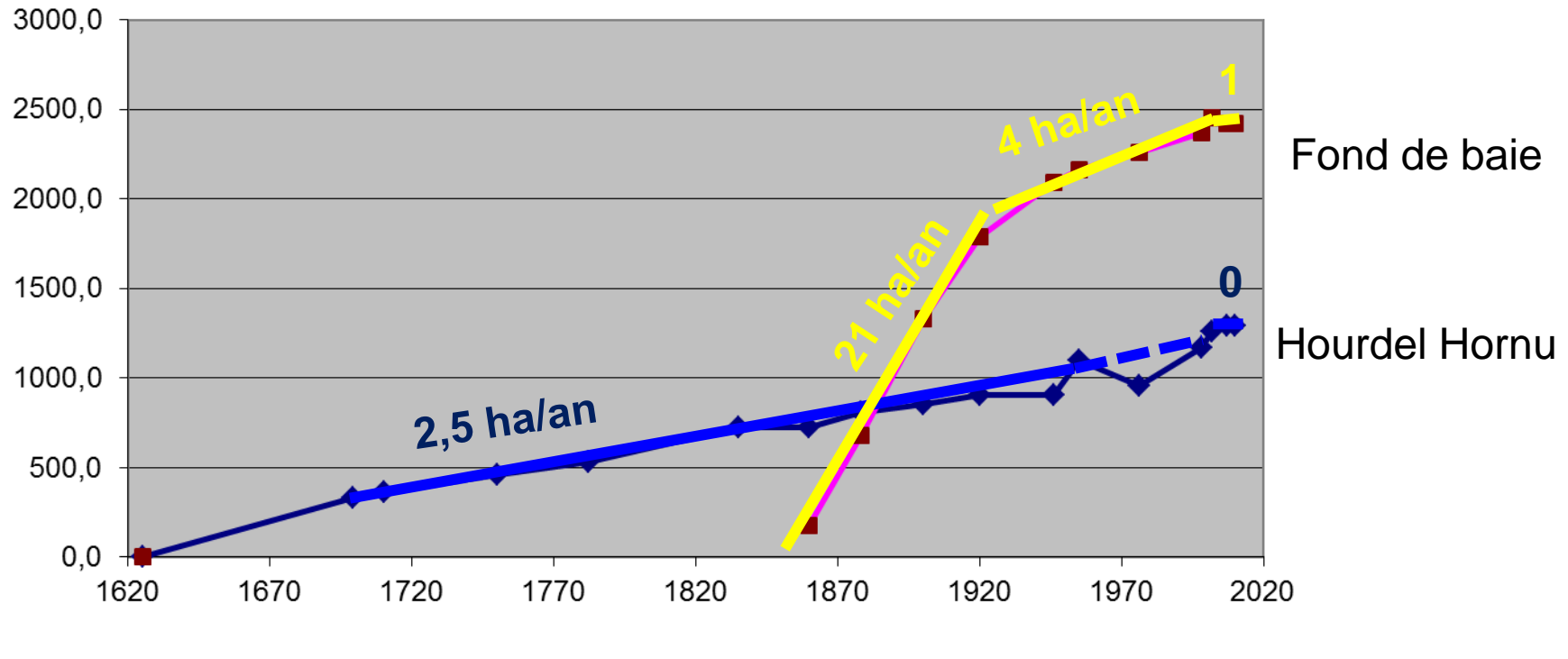
Surfaces ha

molliere 1625 - 2010



Les deux secteurs de la baie évoluent différemment

molieres 1625 - 2010



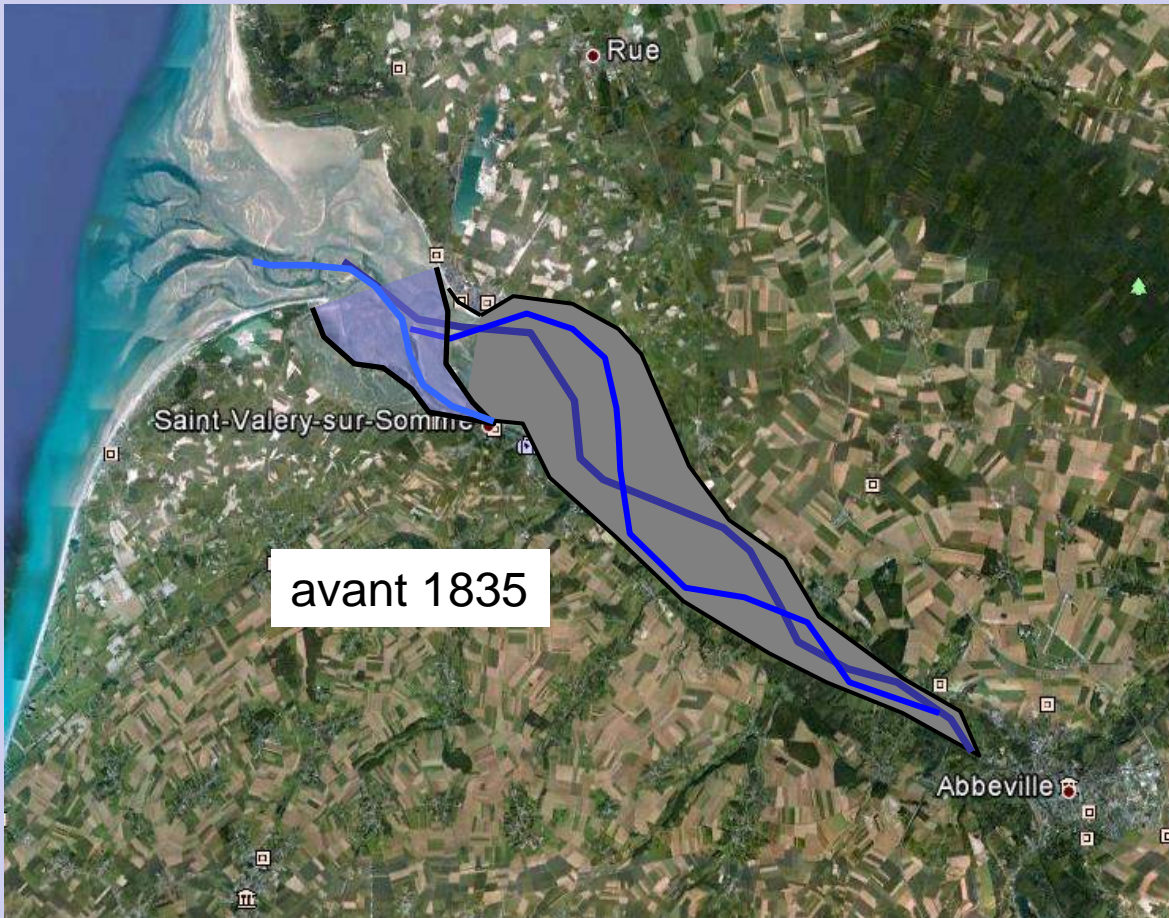
La progression actuelle des mollières dans le fond de baie et au Hourdel-Hornu est modérée à nulle

= Deux phénomènes différents

1) Le fond de baie

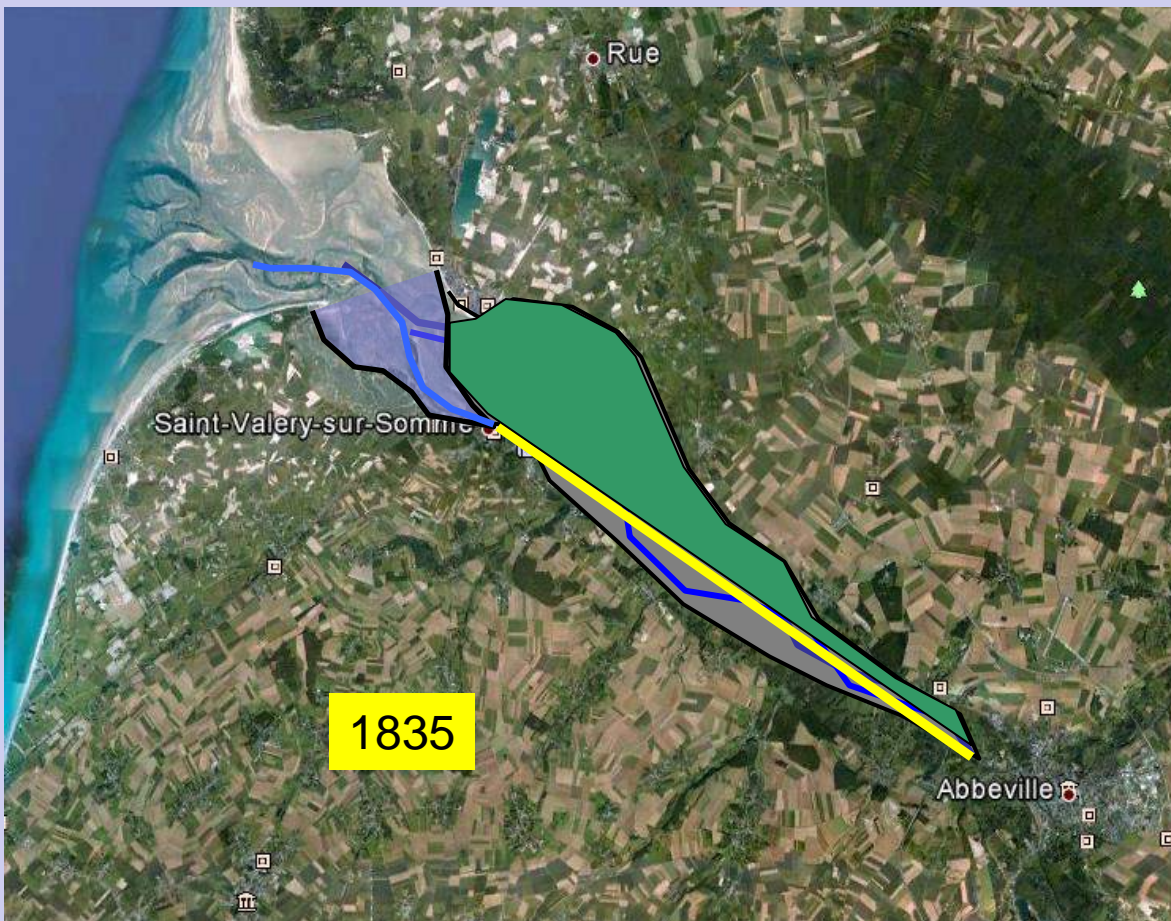


Le fond de baie, une première cause : La canalisation de la Somme en 1835



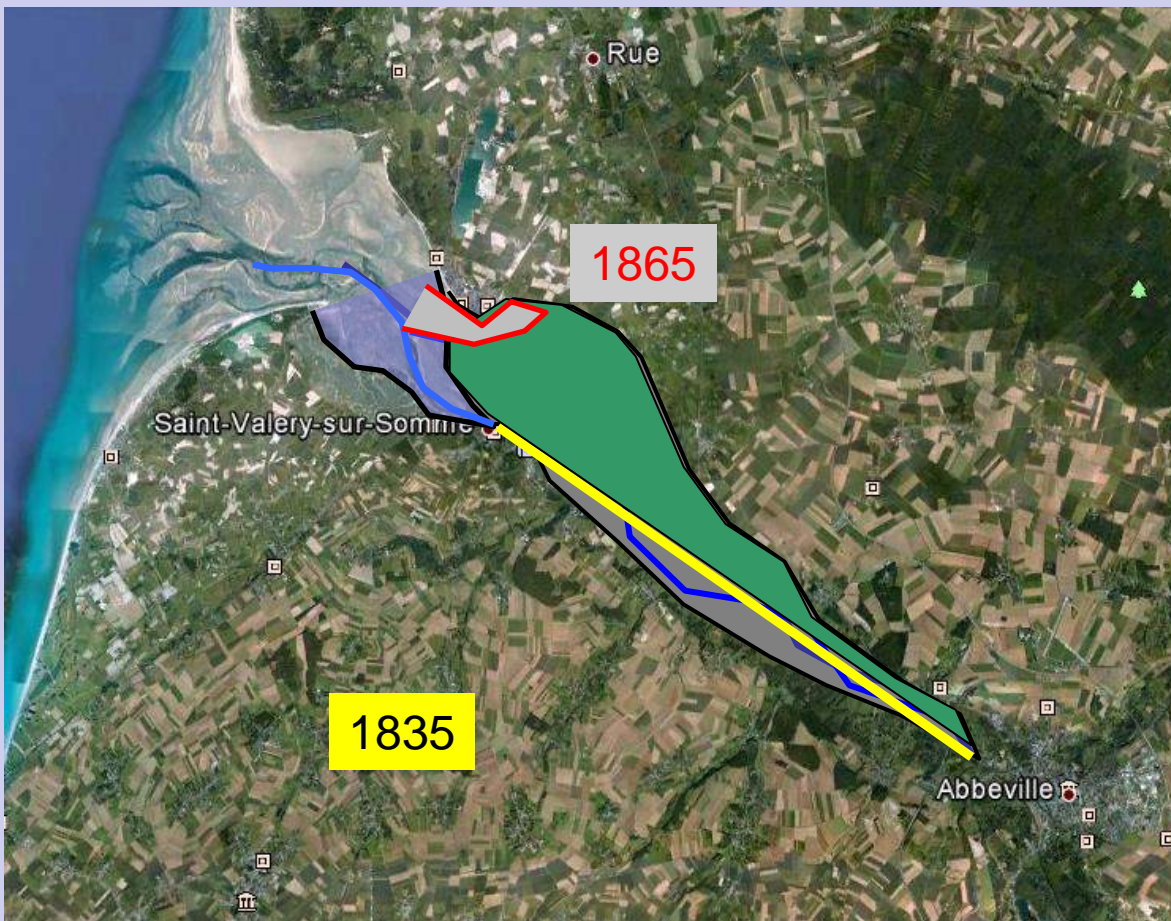
Avant 1835, l'embouchure de la Somme alors située à Abbeville permettait aux divagations du fleuve de balayer l'ensemble de la baie

Le fond de baie, une première cause : La canalisation de la Somme en 1835



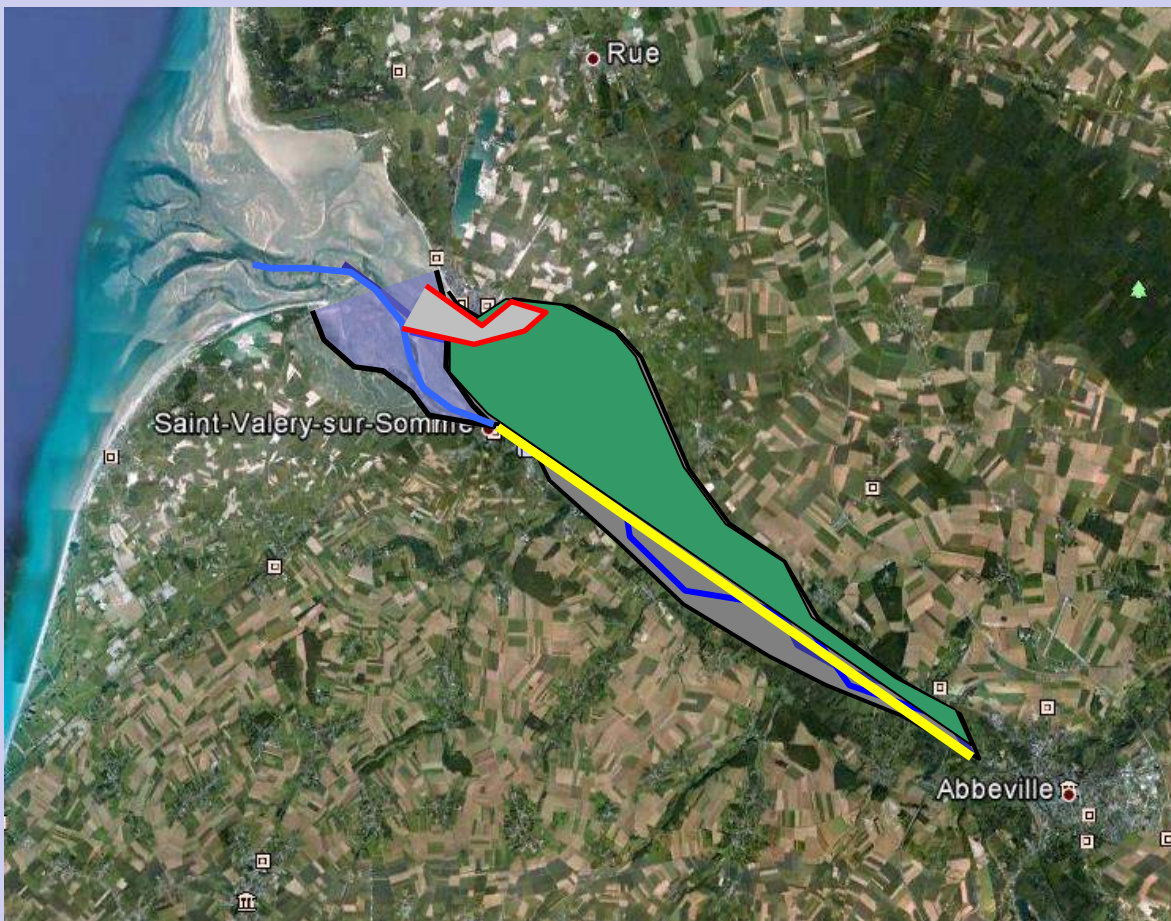
En 1835, le canal de la Somme est construit, l'embouchure de la Somme est alors située à Saint Valery. Les divagations de la somme sont réduites et déplacée au Nord ouest de la baie abandonnant ainsi un large espace calme dans lequel la sédimentation peut s'effectuée.

Le fond de baie, une première cause : La canalisation de la Somme en 1835

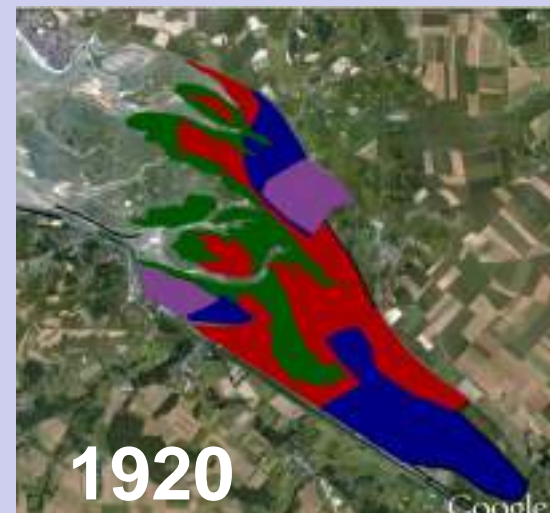


En 1865, le bassin de chasse est construit au Crotoy, renforçant les divagation de la Maye en face de la ville

Le fond de baie, une première cause : La canalisation de la Somme en 1835



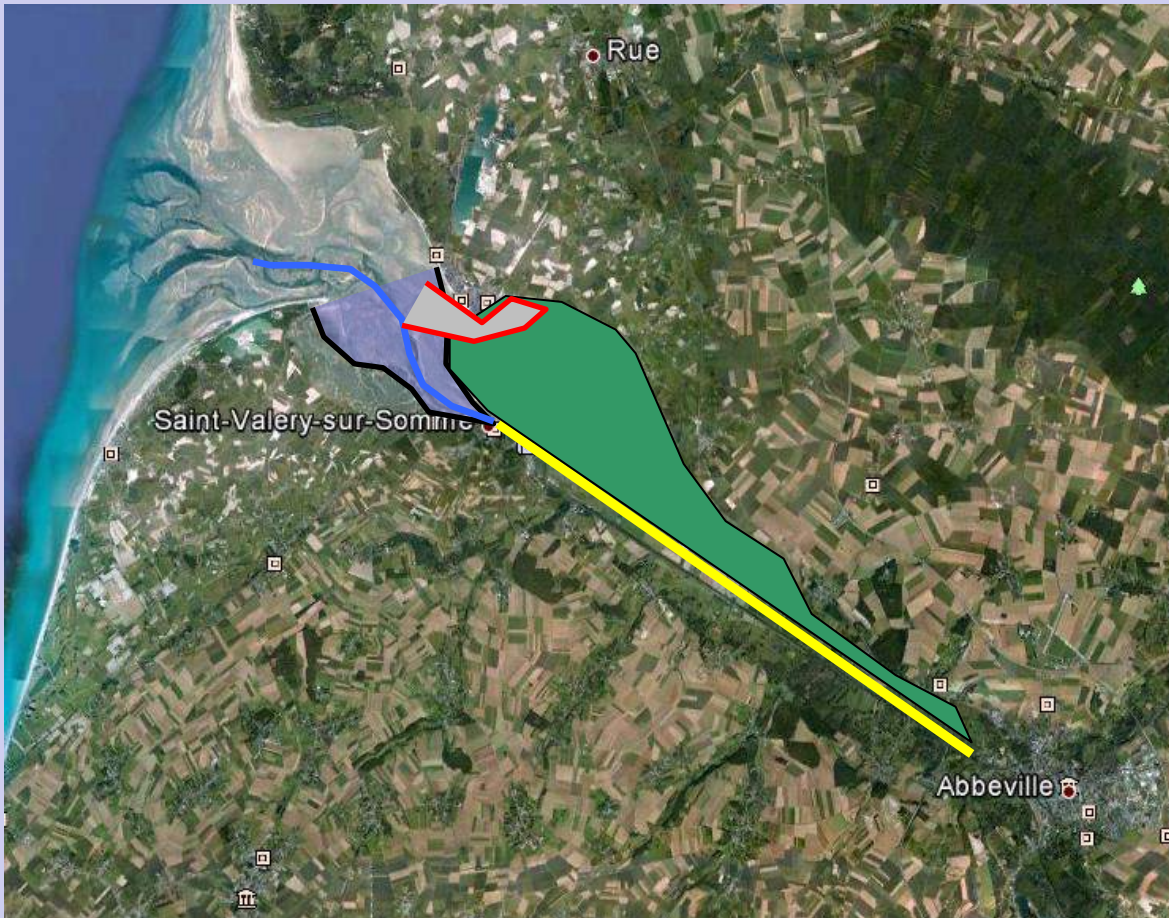
Entre 1835 et 1920 la progression des mollières et forte et continue. Elle décroît à partir de cette date alors que l'espace de sédimentation est encore large et disponible



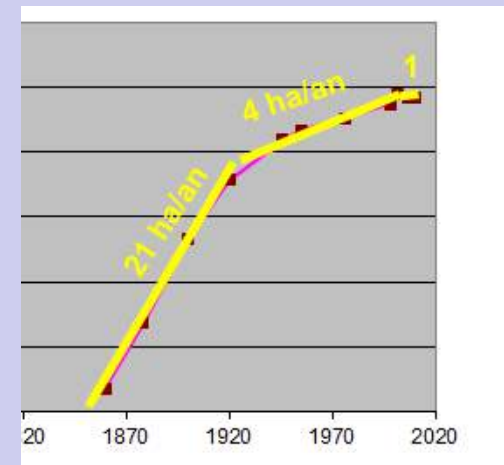
5 septembre 2015

Le crotoy

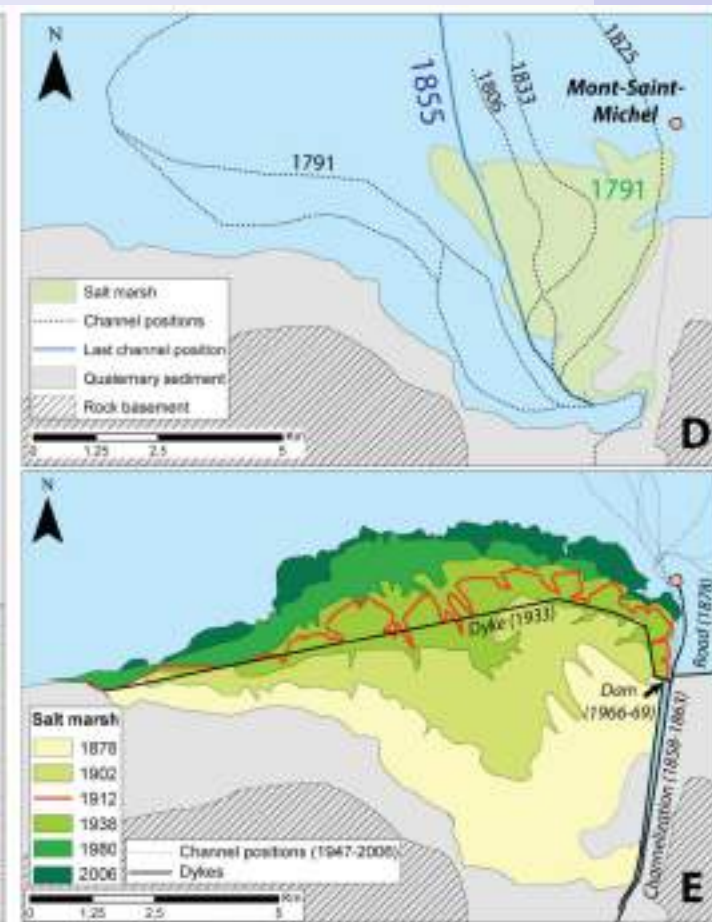
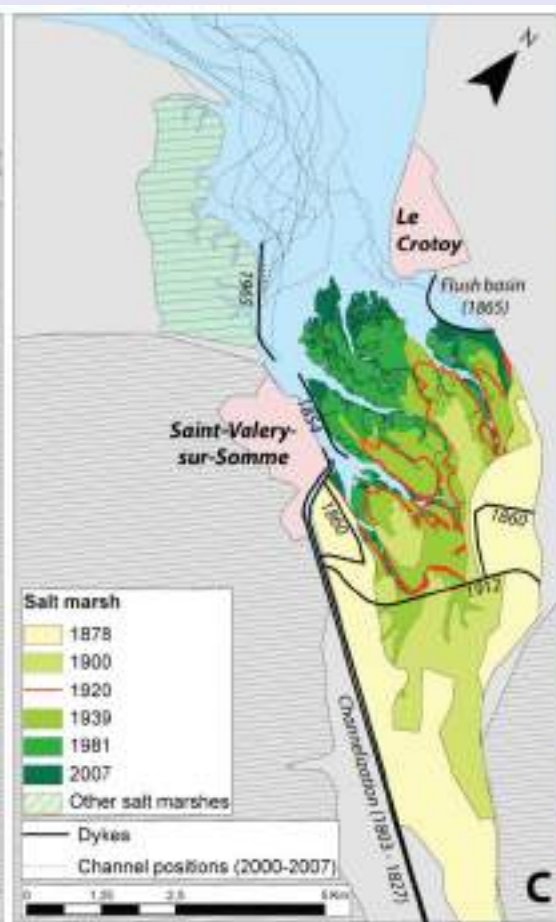
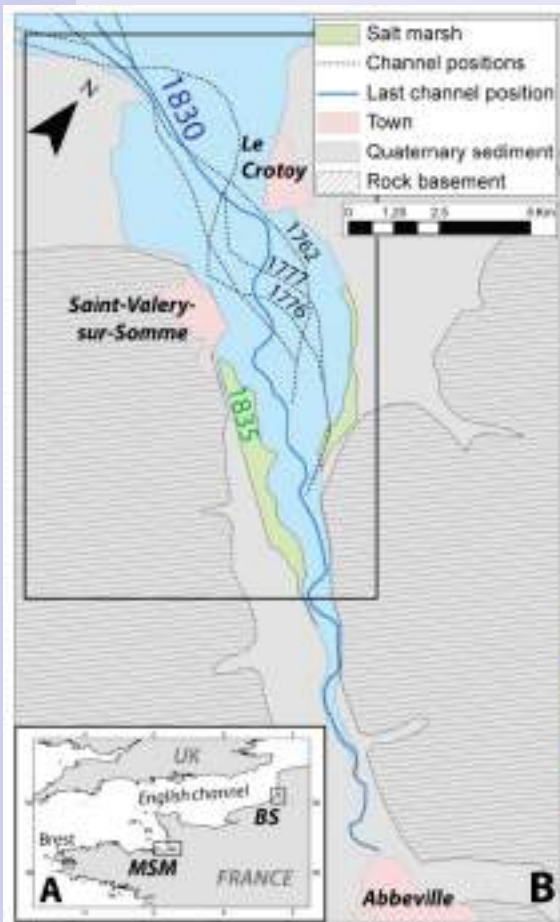
Le fond de baie, une première cause : La canalisation de la Somme en 1835



Suggérant l'existence d'un phénomène externe qui s'opposerait à une progression rapide des mollières



Une comparaison avec le Mont Saint Michel

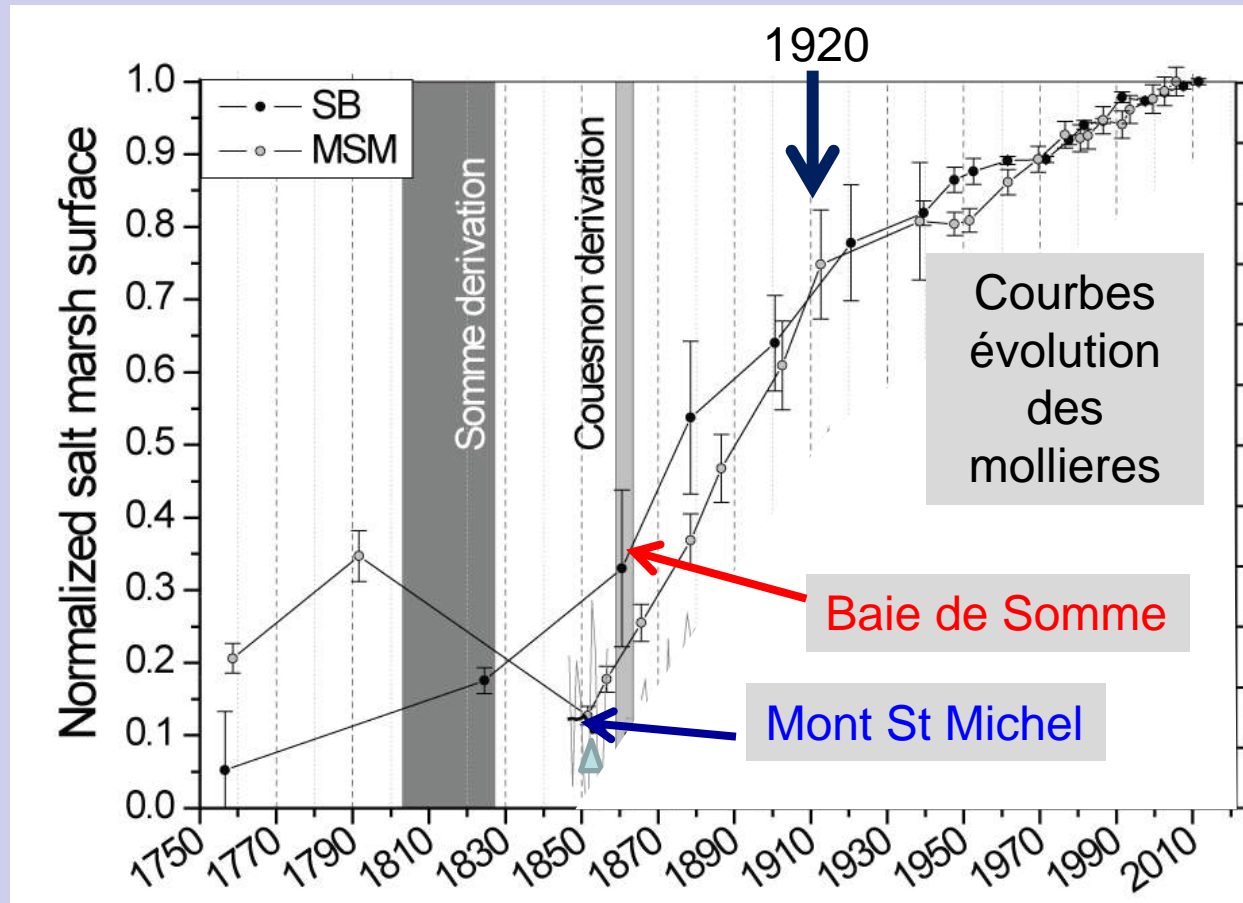


Baie de Somme un fleuve la Somme canalisé en 1835

Le Mont Saint Michel un fleuve le Couesnon canalisé en 1863

Une géométrie et une histoire différente mais pourtant une évolution comparable

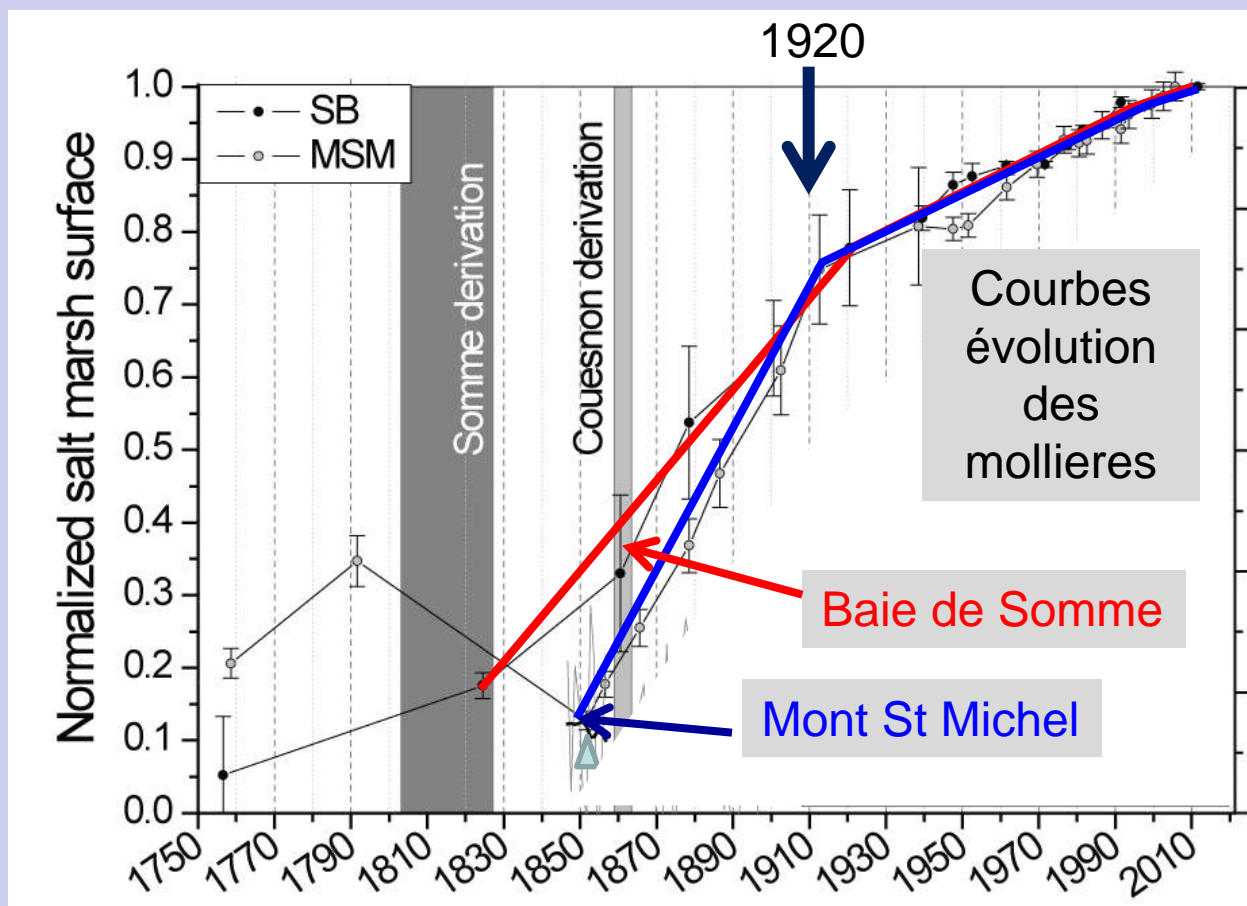
Une extension rapide des mollières jusque dans les années 20 puis modérée jusqu'à actuellement



Courbes de progression comparées des prés salés en baie de somme et baie du Mont saint Michel (échelle normalisée). Source : *Human impact on the secular expansion of mega-tidal salt marshes in the NW coast of France* by Jérôme Leroux, Bruno Goffe, Dimitri Lague and Philippe Davy, *geomorphology*, 2015, sous presse

Une géométrie et une histoire différente mais pourtant une évolution comparable

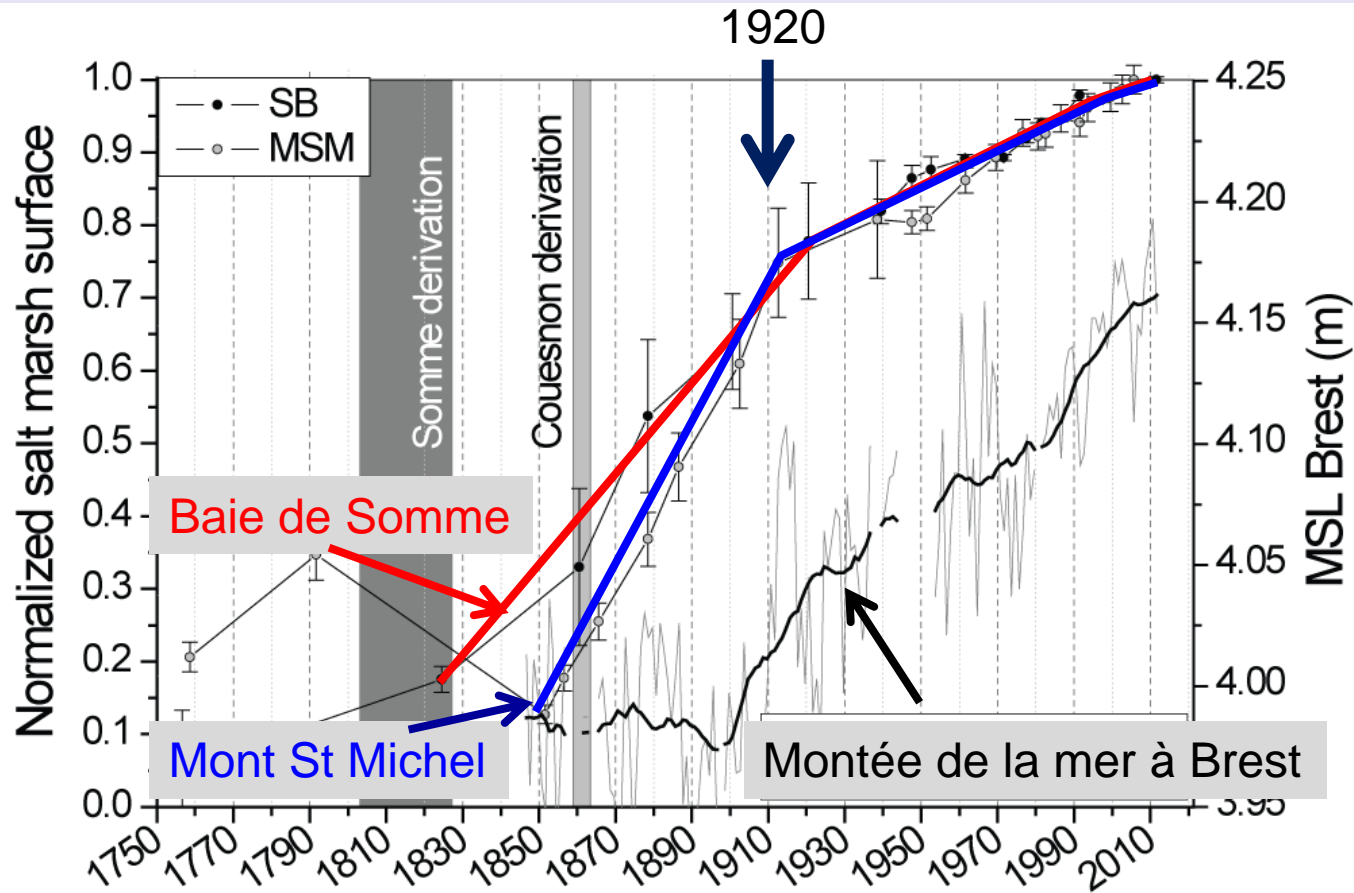
Une extension rapide des mollières jusque dans les années 20 puis modérée jusqu'à actuellement



La coïncidence des courbes d'évolution des prés salés en Baie de Somme et au Mt St Michel depuis 1920 et l'actuel, suggère l'existence d'un phénomène externe commun aux deux baies

Un effet qui serait commun aux deux baies

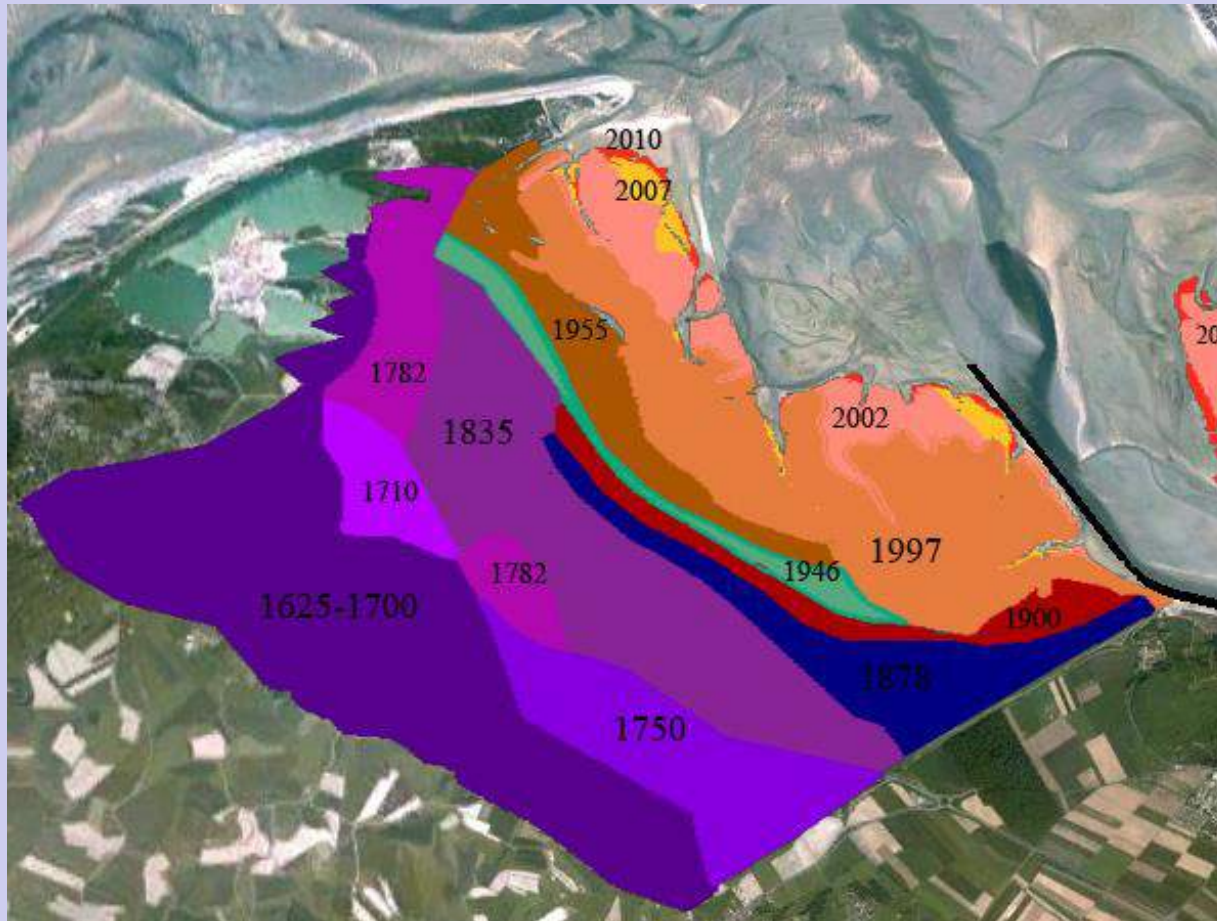
Un effet commun externe aux deux baies



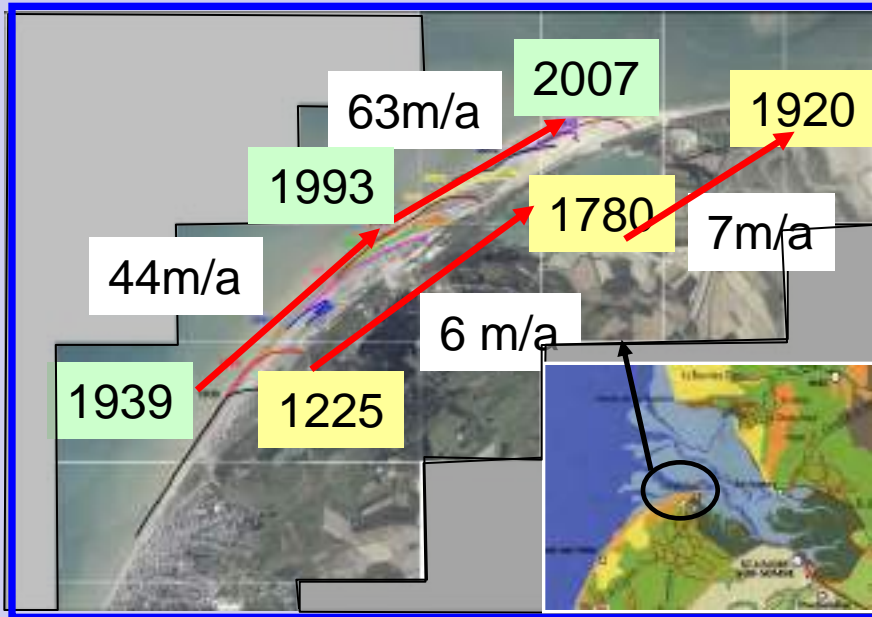
Courbes de progression comparées des prés salés en baie de somme et baie du Mont saint Michel comparées à la courbe de l'élévation de la mer mesurée à Brest. (même référence que précédemment)

La mer étant le seul point commun entre les deux baies, seule l'élévation du niveau de mer dans la Manche à partir de 1910 peut être le facteur qui ralentit l'expansion des prés salés dans les deux baies.

2) Le secteur Hourdel-Hornu



Secteur du Hourdel-Hornu

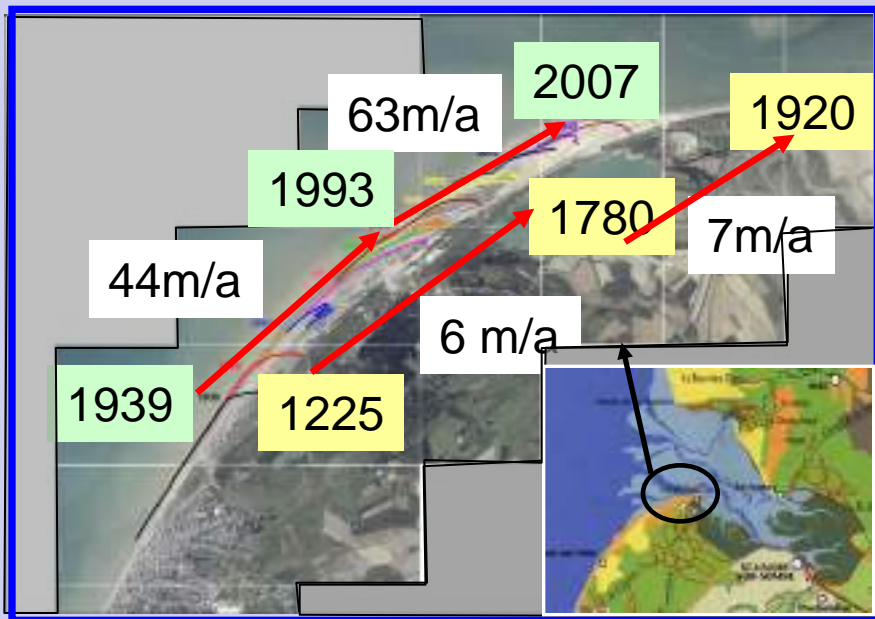


Cliché aérien de la pointe du Hourdel , pris depuis le nord, montrant la progression du cordon ancien vers le Nord

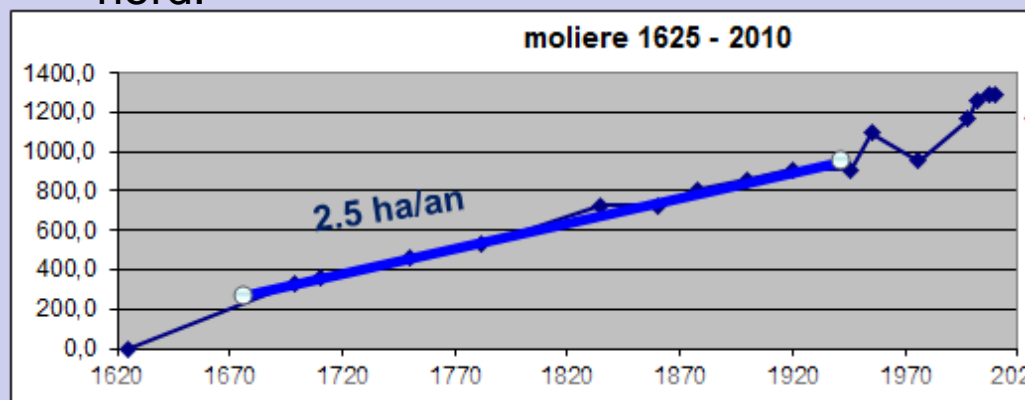
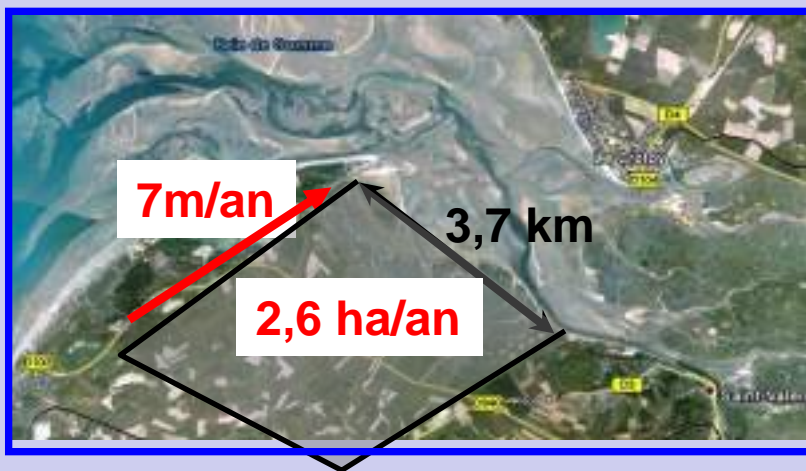
Au Hourdel, le cordon littoral est constitué de deux parties :

- un cordon ancien progressant vers le nord depuis 1225 avec une vitesse modérée de 6 à 7m/an
- Un cordon moderne progressant très rapidement et en accélération depuis 1939 et doublant le précédent par l'Ouest

Secteur du Hourdel-Hornu



Les mollières et les renclotures de ce secteur sont circonscrites dans un espace rectangulaire de 3,7km de coté limité par le cordon littoral et la falaise de craie. Avec une progression du cordon littoral de 7m/an, cet espace s'est agrandi de 2,6 ha/an (3700x7m). Cette valeur est très proche du taux de progression observé de 2,5 ha/an suggérant ainsi un contrôle de la progression des renclotures et mollières par l'avancée du cordon littoral ancien vers le nord.



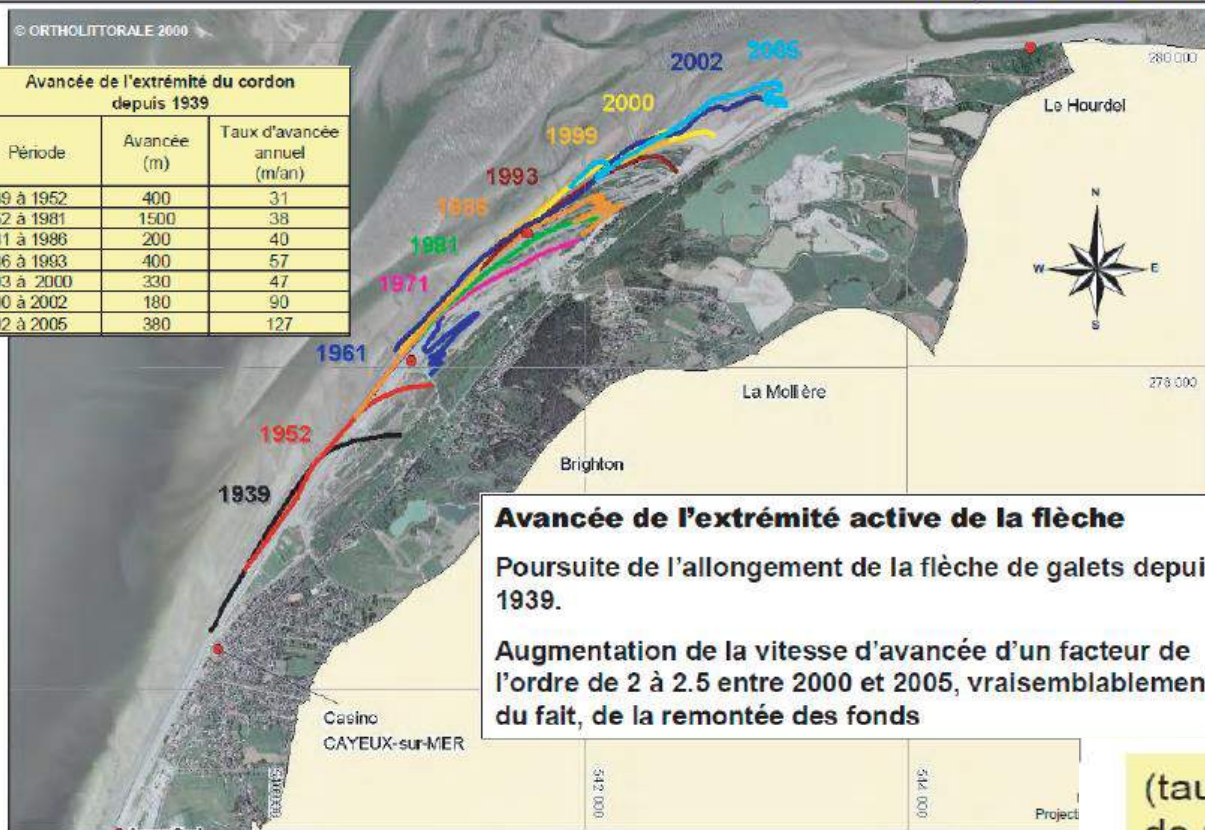
l'avancée du Cordon Littoral récent vers le nord aussi dépendante de l'élévation de la mer

Evolution du pied de cordon au Nord
de Cayeux – 1939-2005

© ORTHOLITTORALE 2000

Avancée de l'extrémité du cordon
depuis 1939

Période	Avancée (m)	Taux d'avancée annuel (m/an)
1939 à 1952	400	31
1952 à 1981	1500	38
1981 à 1986	200	40
1986 à 1993	400	57
1993 à 2000	330	47
2000 à 2002	180	90
2002 à 2005	380	127



Avancée de l'extrémité active de la flèche

Poursuite de l'allongement de la flèche de galets depuis 1939.

Augmentation de la vitesse d'avancée d'un facteur de l'ordre de 2 à 2.5 entre 2000 et 2005, vraisemblablement du fait, de la remontée des fonds

Carte de l'avancée du
cordon littoral moderne
depuis 1939

On notera
l'augmentation
spectaculaire de la
vitesse de progression
du cordon dans un
rapport quasi constant
avec l'élévation de la
mer depuis 400ans (voir
tableau ci-dessous)

$(\text{taux élévation des mers}_{\text{mm}/\text{an}}) / (\text{taux de progression du cordon}_{\text{m}/\text{an}})$

derniers 400 ans

0,03

derniers 130 ans

0,04

derniers 20 ans

0,04

3) Le fond de baie : les altitudes



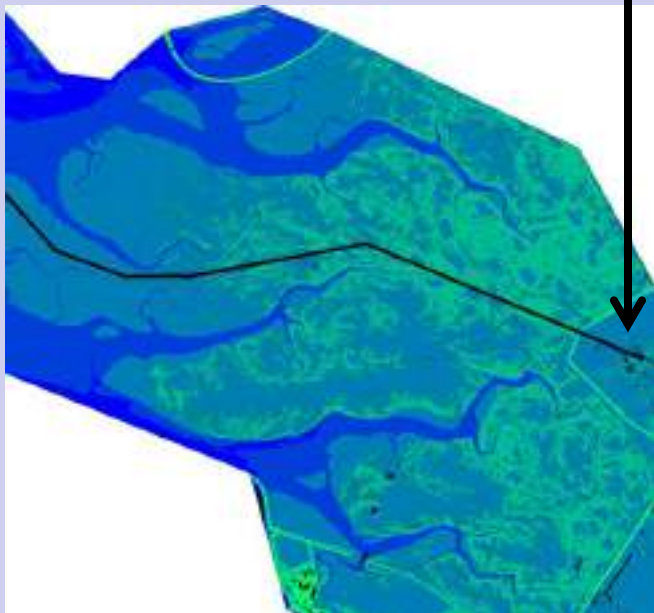
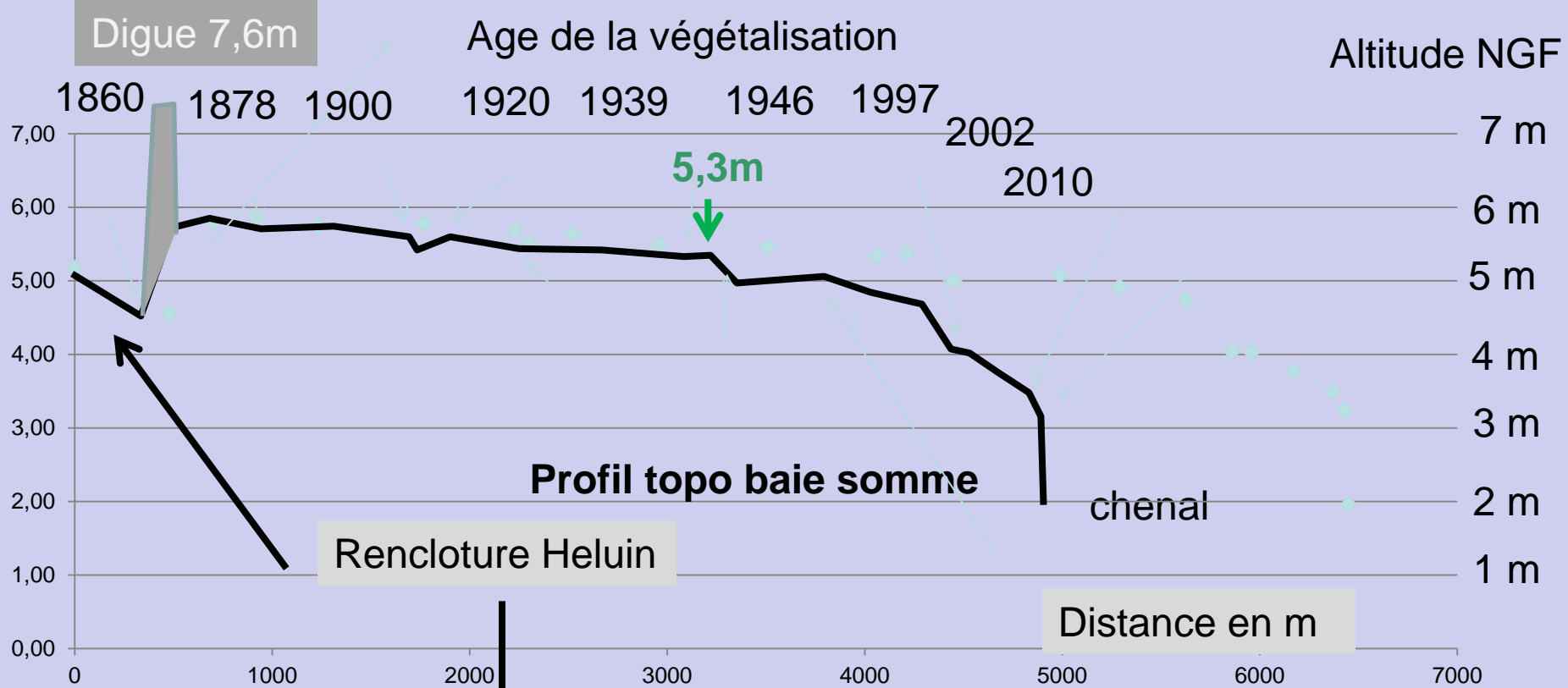
< 2 m

3,30 - 5,30 m

2,0 - 3,30 m

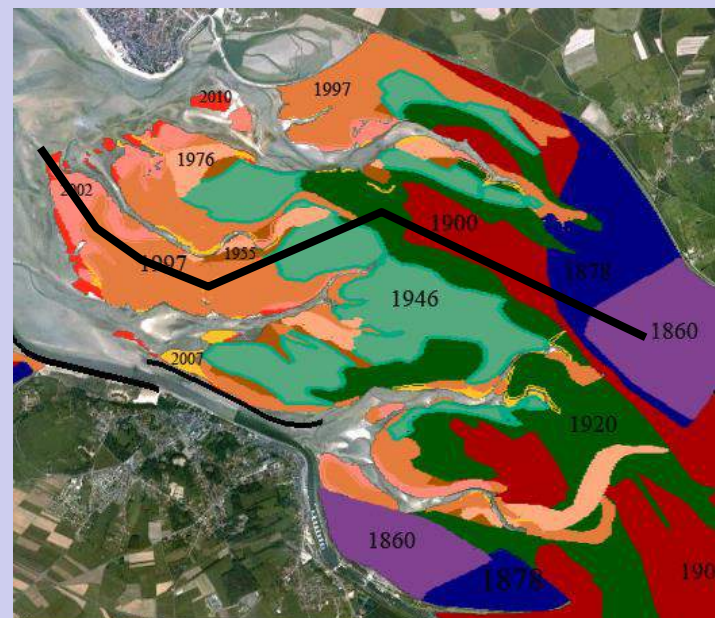
5,30 -
5,8 m

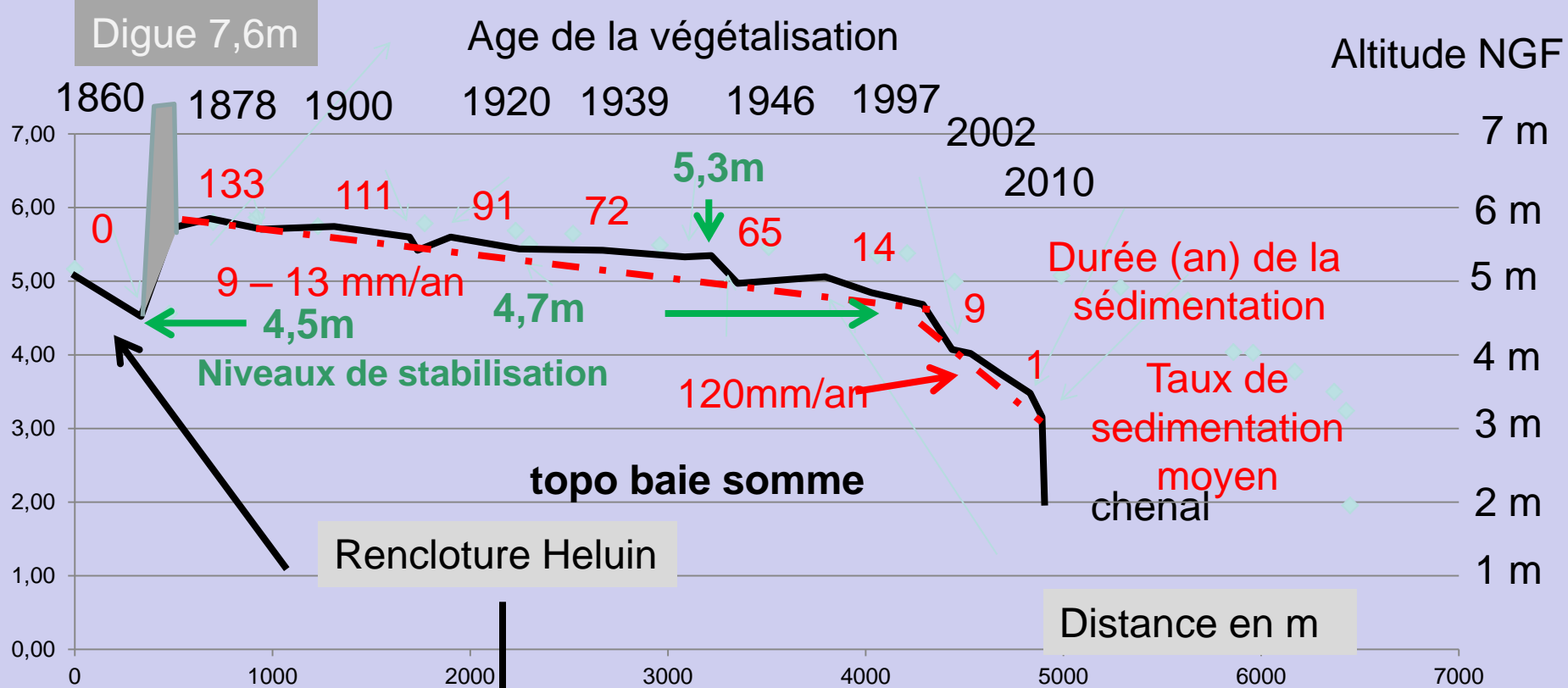
Image Lidar, CNRS-INSU, Clarec 2012



L'image Lidar permet de tracer le profil topographique de la baie, selon le tracé ci-contre (ligne noire) partant de la renclosure Heluin (à l'Est) jusqu'au chenal de la baie actuel (à l'ouest).

La couleur verte de l'image lidar figure les terrains d'altitude supérieure à 5,3m

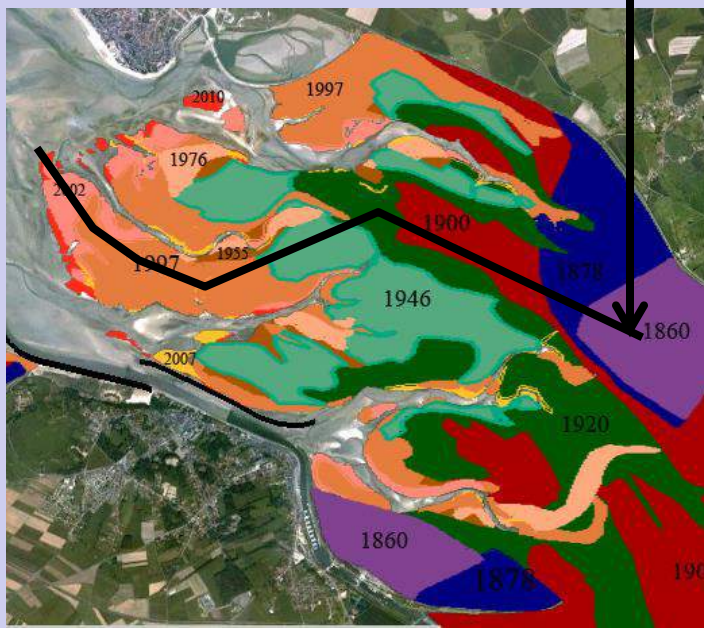


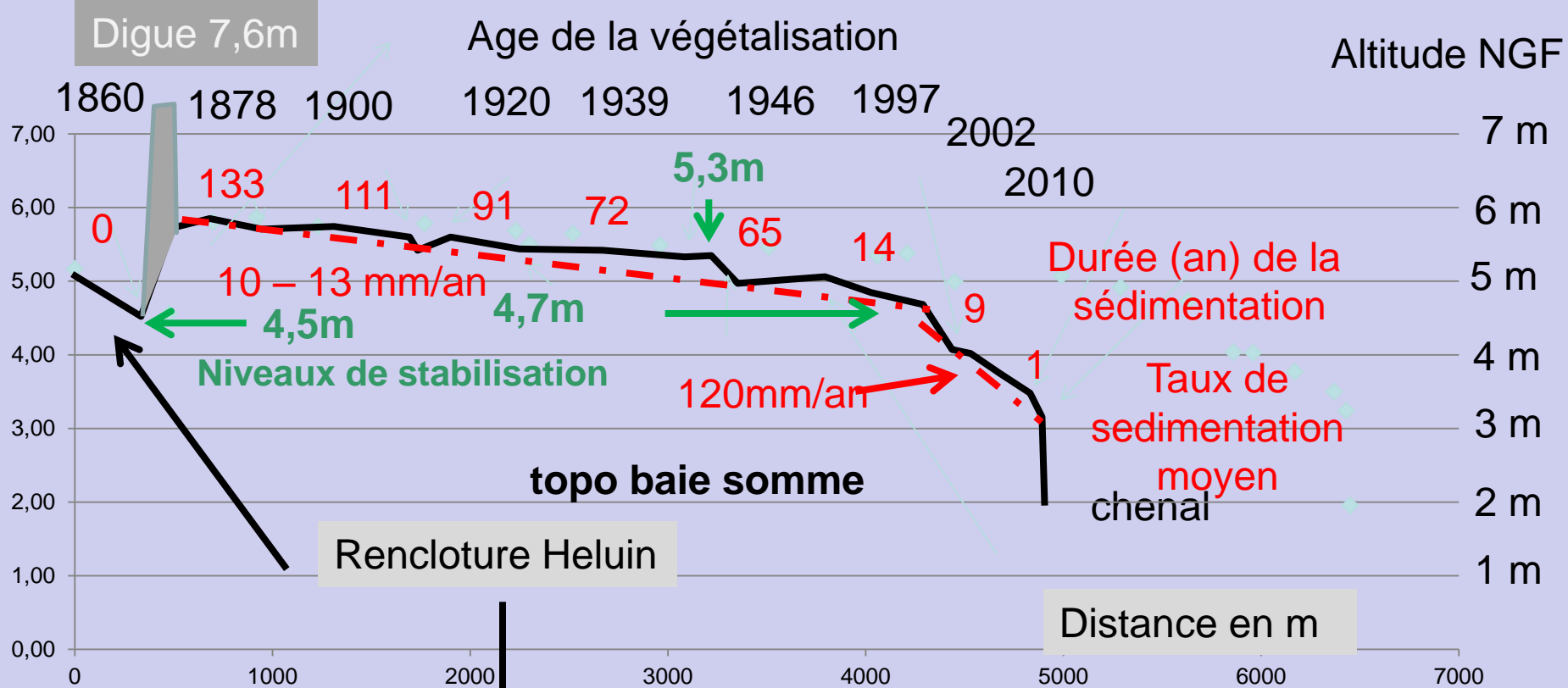


La connaissance de l'altitude et l'âge de la première végétalisation permet de calculer la durée de sédimentation et ses taux

On constate un changement du taux de sédimentation entre les terrains végétalisés il y a de moins de 10-15 ans qui s'accroissent de 120mm/an en moyenne et les plus anciens qui s'accroissent en moyenne de 10mm/an (13 pour les plus jeunes et de 9 pour les plus vieux).

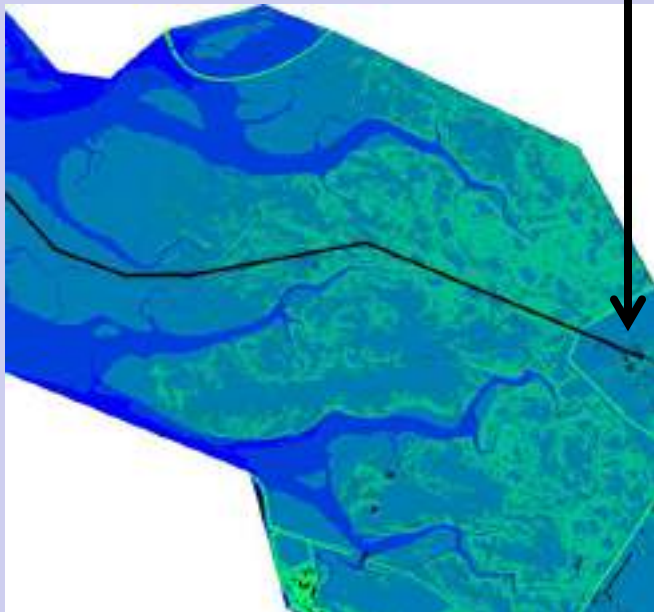
Le changement de taux de sédimentation représente une stabilisation du régime d'évolution des Mollières. Cette hauteur de stabilisation est submergée par environ 50% des marées (coefficient supérieur à 80), il se situe actuellement à une altitude de 4,7m. Certainement plus bas autrefois, il devait être le lieu de construction des digues. Pour la renclosure Heluin fermée en 1860, il se situerai autour de 4,5m . Altitude qui est souvent celles des renclosures du même âge en baie de Somme et d'Authie





On remarquera que le taux de surélévation moyen (10mm/an) de la partie stabilisée des molières est proche du taux actuel de montée des marées hautes à Dieppe 9,5mm/an.

Ce qui signifie qu'en cas de continuation de l'élévation du niveau des mers, le plateau des mollières s'élèverait aussi en proportion égale.



Définition du niveau de référence du PPRN

- Marée dite centennale (marée astronomique + surcôte météorologique) ayant un retour une fois sur cent ans (*de 1915 à 2015 = cas de la marée du 24-25 novembre 1984 mesurée à Dieppe cote 6,3 m NGF*)
- + Effet de marée local (amplification locale)
- + Effet de vague (déferlement = wave set up)
- + Une incertitude positive de 25cm
- + Elévation climatique du niveau de la mer depuis la marée centennale (6mm/an)

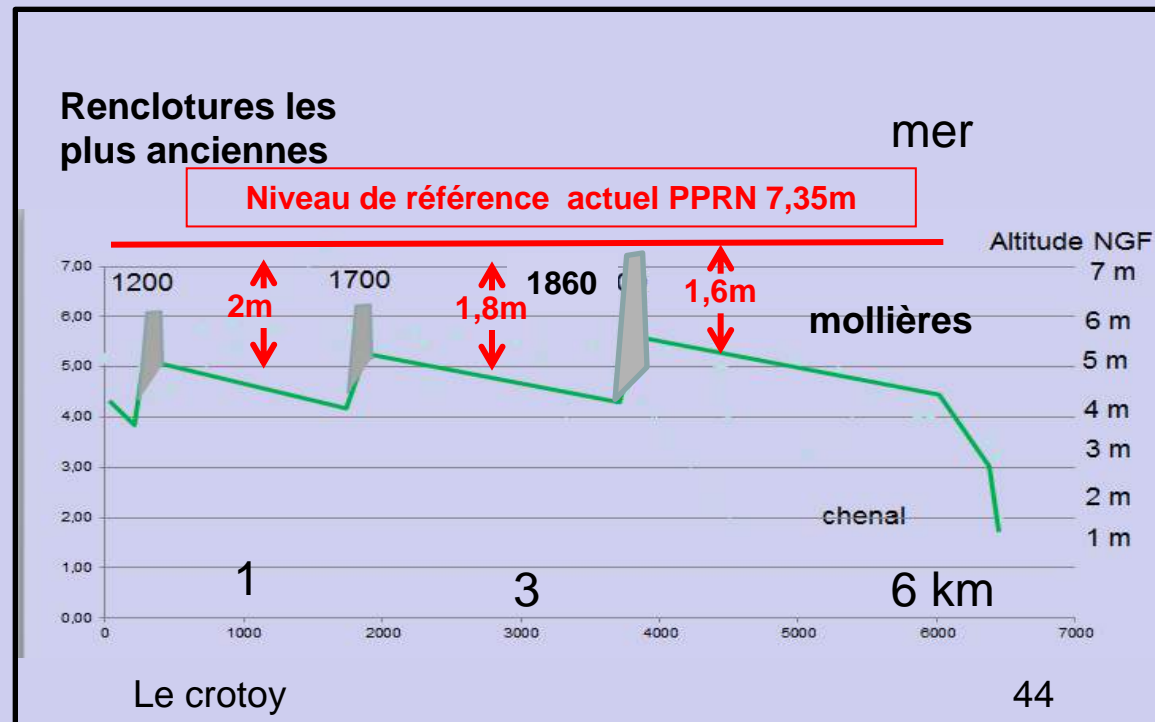
Scénario	Secteur	Niveau à Dieppe de période de retour 100 ans (z_0 en m NGF)	Différence entre Dieppe et le secteur considéré (en cm)	Wave Set up (z_s en cm)	Incertitudes (en cm)	Prise en compte du changement climatique	Niveau de référence (en m NGF)
Actuel	Quend/Fort-Mahon	6,3	30 cm	10 cm	25 cm	20 cm	7,15
Horizon 2100						60 cm	7,55
Actuel	Baie de Somme (La May/Pointe à Guille)	6,3	35 cm	10 cm	25 cm	20 cm	7,20
Horizon 2100						60 cm	7,60
Actuel	Baie de Somme (Entrée du port du Crotoy)	6,3	50 cm	10 cm	25 cm	20 cm	7,35
Horizon 2100						60 cm	7,75
Actuel	Baie de Somme (Côte ouest du Crotoy)	6,3	60 cm	10 cm	25 cm	20 cm	7,45
Horizon 2100						60 cm	7,85
Actuel	Baie de Somme (Abords de Morlay)	6,3	70 cm	10 cm	25 cm	20 cm	7,55
Horizon 2100						60 cm	7,95

En conséquence un PPRN qui prend en compte un aléas de submersion

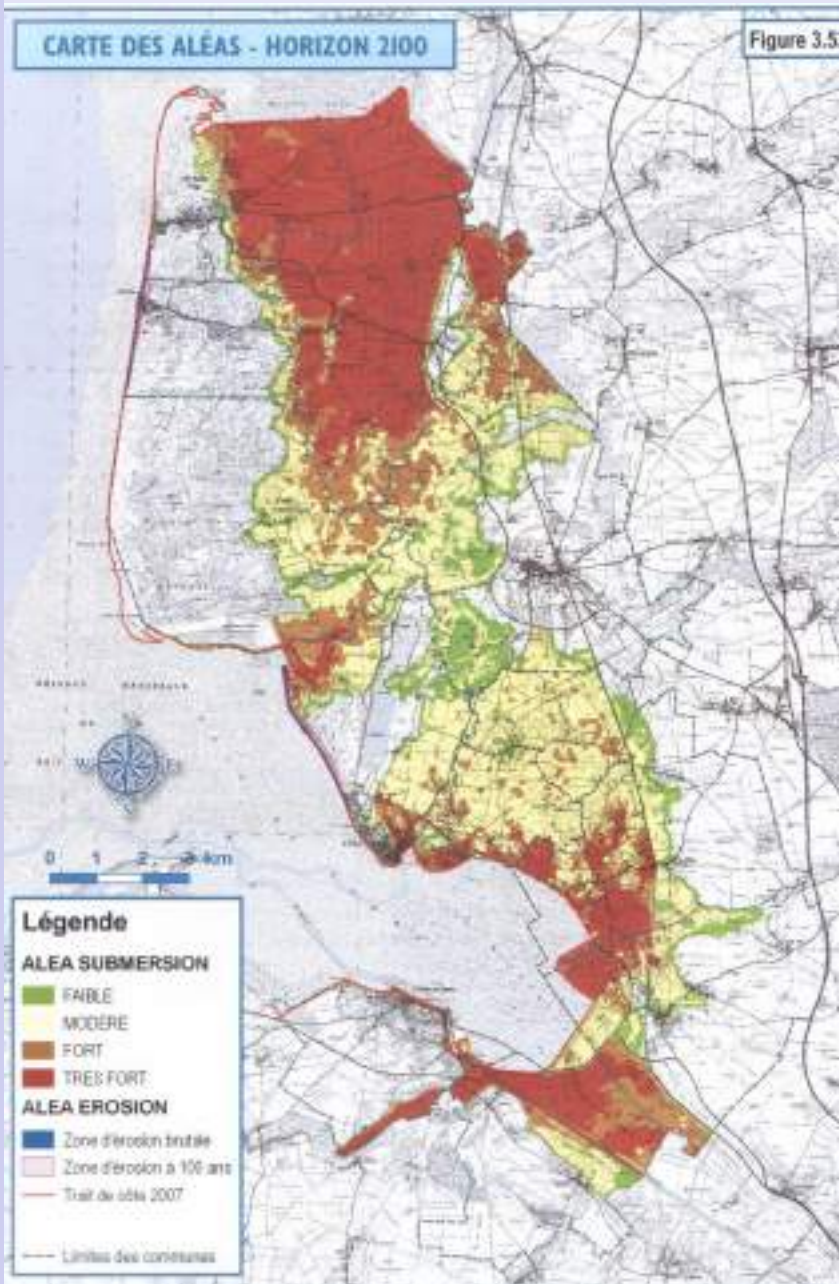


Ce risque est d'autant plus fort que les terrains ont été soustraits à la mer à une époque lointaine à laquelle le niveau de la mer était plus bas qu'actuellement

C'est particulièrement le cas dans le sud de la baie de l'Authie où les plus anciennes reenclosures datent du 13ème siècle



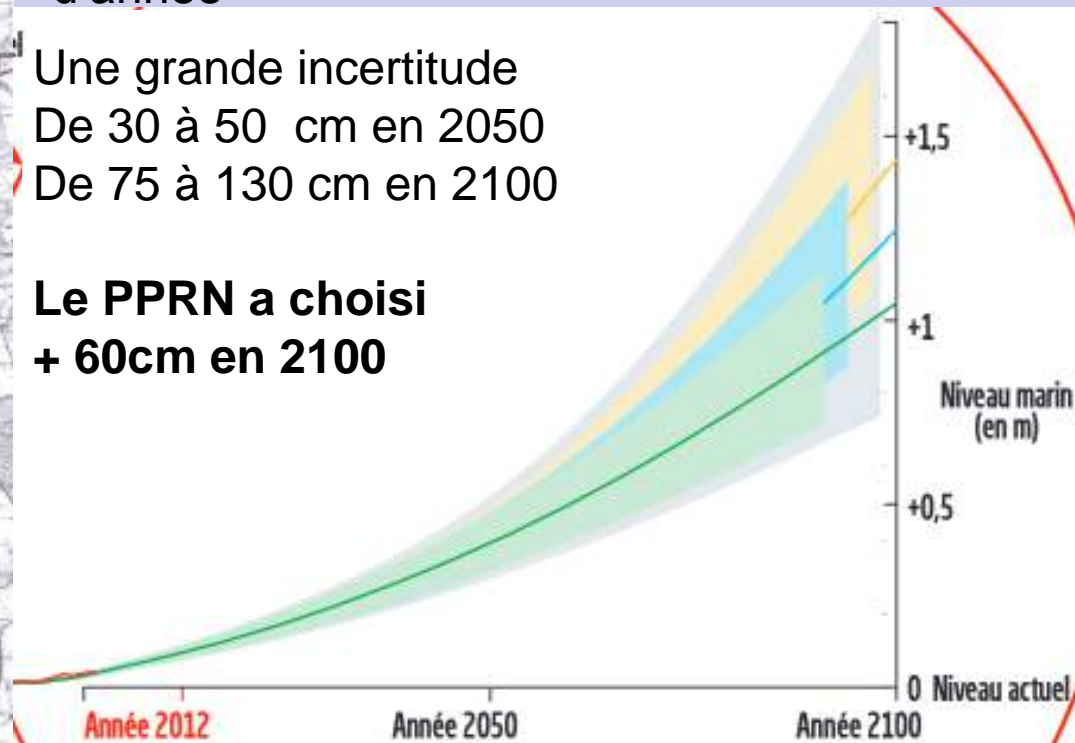
En conséquence le PPRN prend en compte l'aléas de submersion



L'intensité de cet aléas augmentera avec temps à cause de de l'élévation du niveau de la mer en conséquence du changement climatique au cours des prochaines centaines d'année

Une grande incertitude
De 30 à 50 cm en 2050
De 75 à 130 cm en 2100

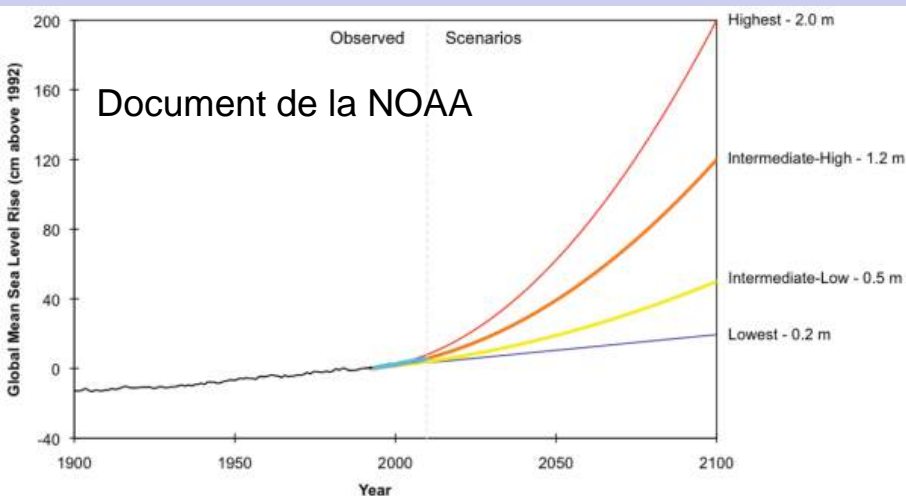
**Le PPRN a choisi
+ 60cm en 2100**



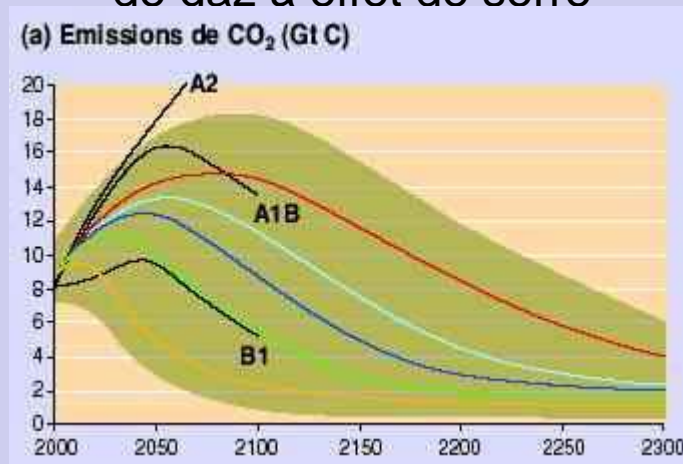
Document Ifremer

La prévision du niveau des mers est très difficile

C'est une préoccupation mondiale

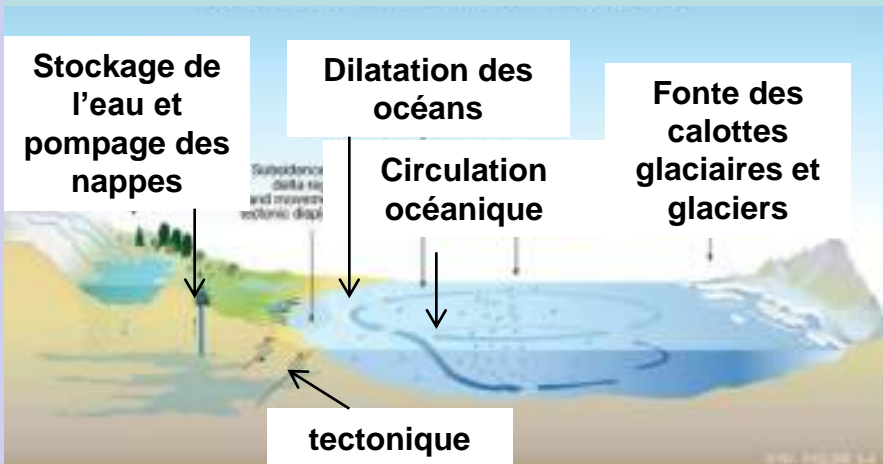


Et surtout de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre



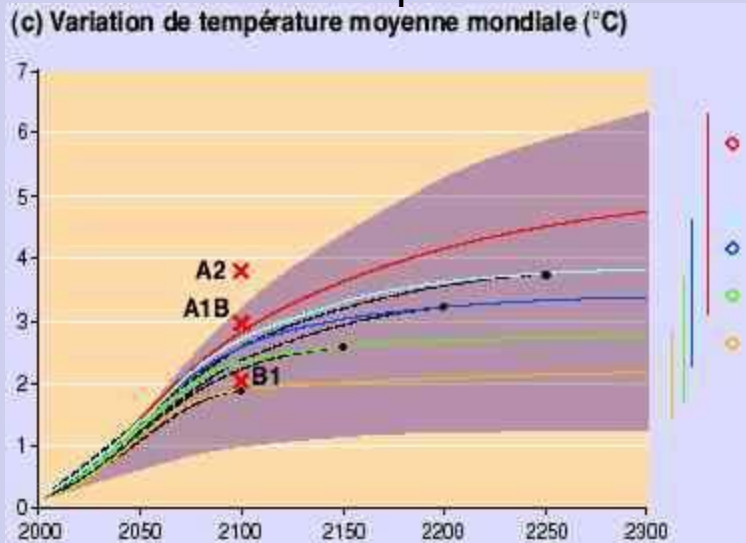
Elle dépend de beaucoup de facteurs

Quelles sont les causes du changement du niveau des mers



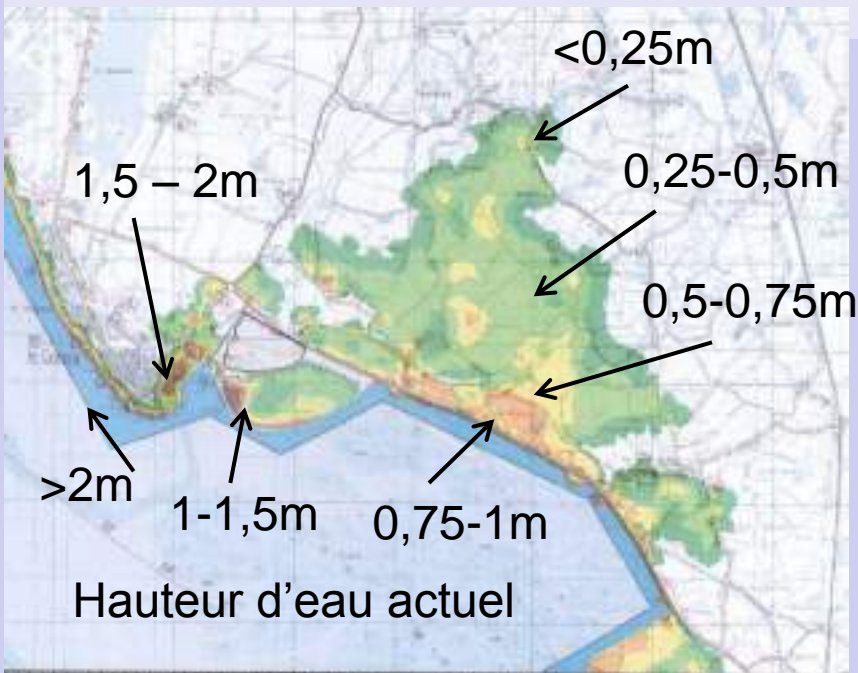
5 septembre 2015

Et de la température



Et enfin de la recherche car tout n'est pas compris

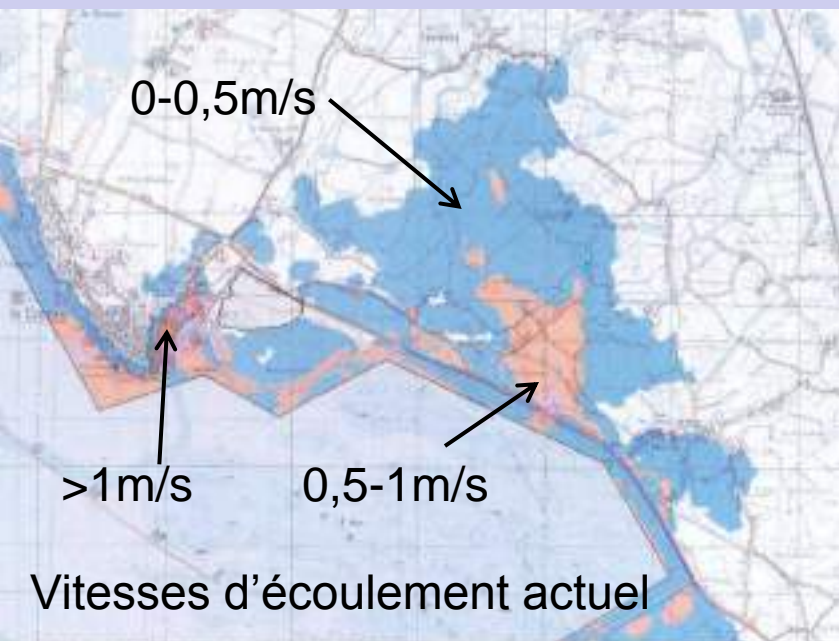
La carte des Aléas répond à des séries de choix



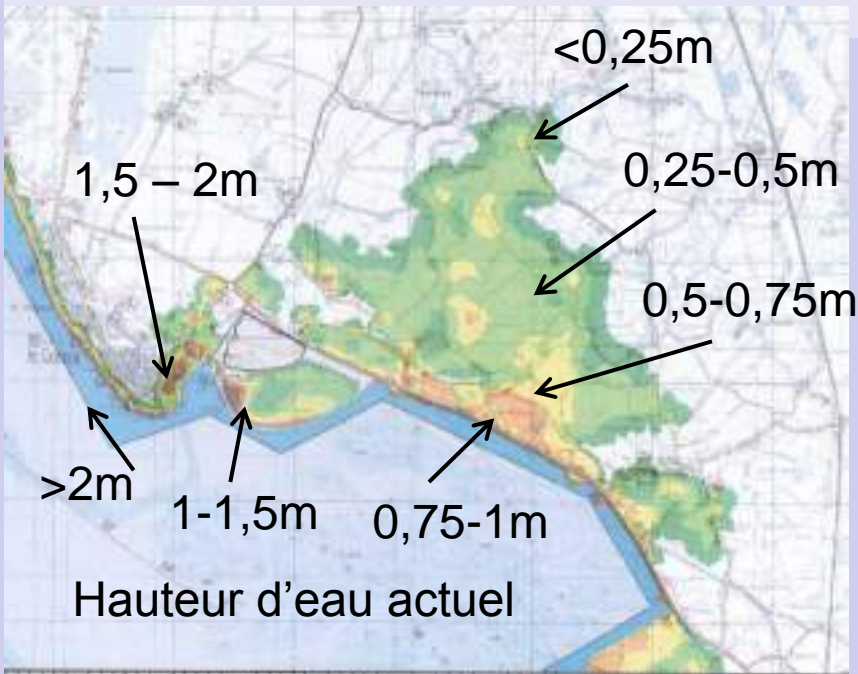
- Un niveau de référence et son évolution (*marée, surcote, effet locaux, chgt climatique, incertitude*) qui s'il est dépassé permet de calculer les hauteurs d'eau
- Les vitesses d'écoulement
- Le comportement des ouvrages
- les conditions aux limites

Effet des vitesses

- Un courant de 1m/s déstabilise un adulte dans 75cm d'eau
- Un enfant dans 50cm
- Une construction légère dans 1m
- Une voiture légère est emportée des 35cm d'eau (quelque soit le courant)
- Une lourde à 50cm



La carte des Aléas répond à des séries de choix



- Un niveau de référence et son évolution (*marée, surcote, effet locaux, chgt climatique, incertitude*) qui s'il est dépassé permet de calculer les hauteurs d'eau
- Les vitesses d'écoulement
- Le comportement des ouvrages
- les conditions aux limites

Conditions aux limites

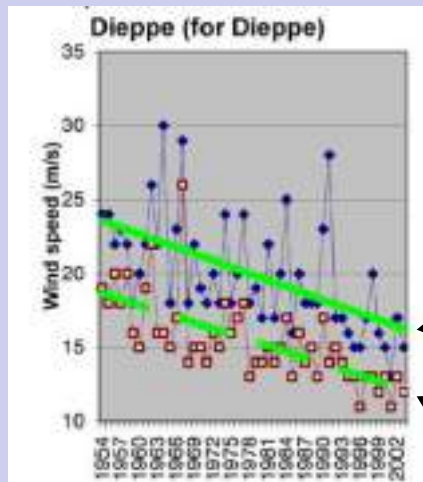
- Il a été choisi de ne pas considérer les effets de variations hauteurs d'eau du côté marin des digues et des limitations aux écoulements que cela pourrait induire (cas du fond de baie au Crotoy)
- Il a été choisi que certaines digues de faible solidité n'avait plus de rôle dès que la surverse dépassait 20cm (exemple ci-contre)



Les aléas de submersion actuels et futurs sont réels

Cependant la carte minimise l'aléas du coté marin :

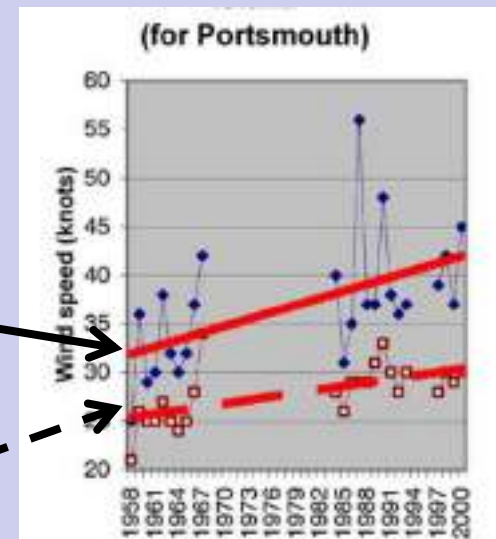
- Niveau de référence s'appuie sur un retour centennal couvrant une période où le climat sera différent de celui des prochains cent ans
- Le coefficient de marée correspondant n'était pas exceptionnel (102) ni rare (*il est moyenne est dépassé 4 ou 5 fois par mois*)
- La force des tempêtes sur Dieppe diminue depuis 60 ans et augmente du coté Anglais de la Manche sans que l'on sache pourquoi (voir figure ci-dessous)
- La valeur de la variation du niveau de la mer à 100 ans est dans la fourchette basse (60cm alors qu'il pourrait atteindre le double)



Vitesse des vents depuis 1954
À Dieppe et à Portsmouth

Maximales pour
toutes les tempêtes

Maximales pour 99%
des tempêtes

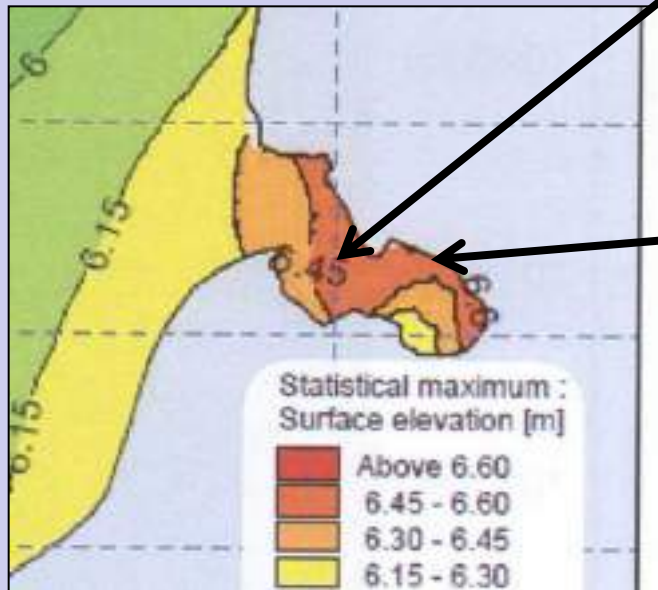


Les aléas de submersion actuels et futurs sont réels

Cependant la carte

Anticipe moyennement l'aléas dans le fond de baie :

- Pas de prise en compte des particularités marines au droit des digues (hauteur des fonds réels, volume d'eau effectivement disponible pour la submersion et les évolutions à 100 ans)



Modélisation du niveau de marée pour un évènement schématique vent sud-ouest du PPRN
5 septembre 2015

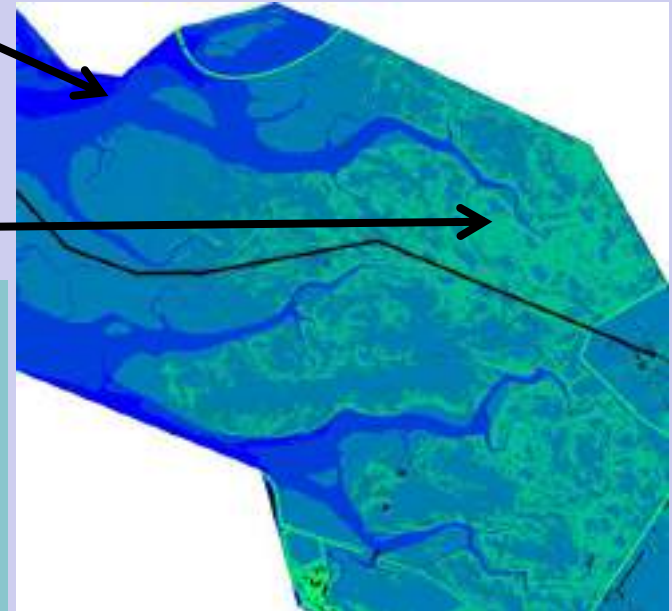
$\geq 4\text{m}$

Hauteurs d'eau réelles

$< 2\text{m}$

Dans 100 ans :

- Recul du front des mollières,
- Augmentation de leur altitude avec niveau de la mer
- Limitation des volumes d'eau et protection contre les vagues en fond de baie



altitude des fonds actuels

En vert : hauteurs supérieures à 5,3m

Les aléas de submersion actuels et futurs sont réels

Les exemples de submersions connus montrent que l'aléas était en général mal anticipé



**Le changement climatique est aussi un changement fondamental dans notre relation avec la mer
On ne peut pas faire l'autruche. Il faut absolument considérer ces nouvelles conditions et s'y adapter**

*Tempête Xynthia à La faute sur mer
février 2010*

*Wimereux, Janvier 2014
La digue refaite il y a 25 ans avait été rehaussée de 50cm vis-à-vis de la précédente; Elle est maintenant régulièrement submergée et en partie détruite.*



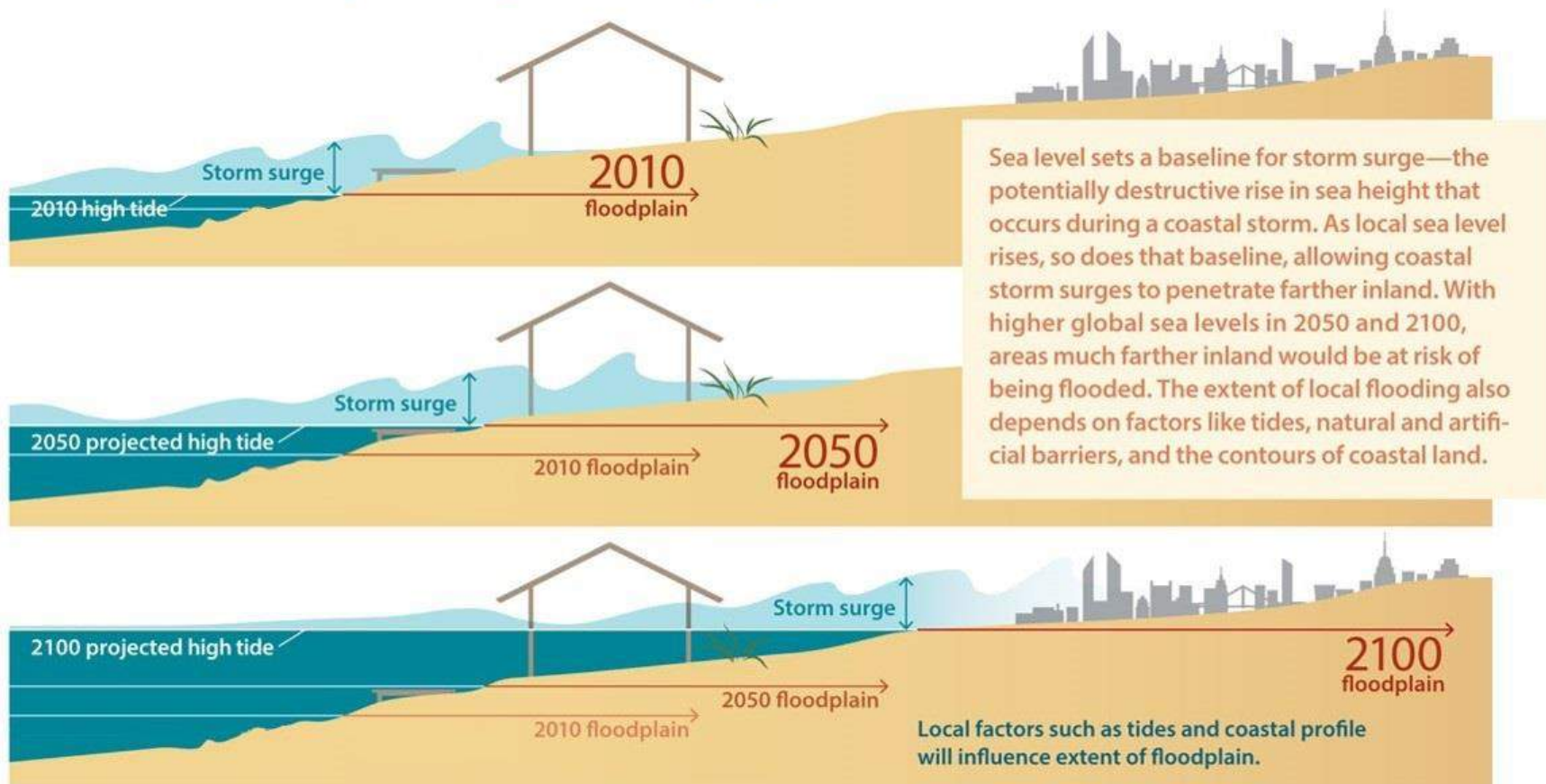
5 septembre 2015

Les aléas de submersion actuels et futurs sont réels

- L'impact est mondial
- Les règles de protection sont quasiment les mêmes dans tous les pays concernés

Un exemple venant des USA

Storm Surge and High Tides Magnify the Risks of Local Sea Level Rise



En Conclusion, un seul mot : s'adapter

Un exemple en Californie, à Bolinas dans un fond de baie



Merci pour votre attention