



## RAPPORT TECHNIQUE : IMPLANTATION DES PIEZOMETRES

28 OCTOBRE 2020



FREDERIC GRESSELIN – CHARGE DE MISSION – DREAL

VINCENT PANETIER – CHARGE DE MISSION – DREAL

ALEXANDRE GAUVAIN – DOCTORANT EN HYDROGEOLOGIE – OSUR

JEAN-RAYNALD DE DREUZY – DIRECTEUR DE RECHERCHE – OSUR

LUC AQUILINA – PROFESSEUR – OSUR

OBSERVATOIRE DES SCIENCES DE L'UNIVERS DE RENNES

BAT.15, CAMPUS BEAULIEU

UNIVERSITE DE RENNES 1

35042 RENNES CEDEX

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Matériel et Méthodes .....</b>	<b>4</b>
2.1	Sélection des sites d'étude .....	4
2.2	Sites d'étude .....	5
2.2.1	Pointe d'Agon .....	6
2.2.2	Saint-Germain-Sur-Ay À Barneville-Carteret .....	6
2.2.3	Baie du Cotentin .....	7
2.2.4	Caen-La-Mer .....	8
2.3	Piézomètres Existants.....	9
2.3.1	Gouville-Sur-Mer .....	9
2.3.2	Blainville-sur-mer .....	10
2.3.3	Granville .....	11
2.3.4	Lessay .....	12
2.3.5	Caen-La-Mer .....	13
2.4	Méthodologie .....	15
2.4.1	Paramétrisation des modèles.....	15
2.4.2	Perméabilité et porosité.....	16
2.4.3	Indicateurs.....	18
2.5	Implantation des piézomètres .....	19
<b>3</b>	<b>Résultats modélisation .....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>Localisation des piézomètres.....</b>	<b>23</b>
4.1	Pointe d'Agon .....	24
4.2	Hauteville-sur-mer & Annville.....	25
4.3	Saint-Germain-Sur-Ay.....	25
4.4	Barneville-Carteret.....	26
4.5	La Baie du Cotentin .....	27
4.6	Caen-la-Mer .....	28
<b>5</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>29</b>

## 1 INTRODUCTION

Les risques naturels principaux associés aux nappes phréatiques le long du littoral de la Normandie sont la salinisation et l'augmentation de la saturation en eau du sous-sol. L'intrusion d'eau saline depuis l'océan entraîne une dégradation de la qualité des eaux souterraines continentales, tandis que l'élévation du niveau des nappes augmente l'humidité rémanente des sols et provoque des inondations en cas de débordement. Une part importante du littoral normand est particulièrement sensible à ces risques, combinant une situation géomorphologique défavorable (zones littorales basses à faible relief) à une occupation humaine importante (centres urbains, agriculture). De plus, certaines zones plus à l'intérieur des terres (Marais du Cotentin) sont potentiellement sensibles à des baisses sensibles du niveau des nappes phréatiques.

Les écoulements souterrains dans les parties basses du littoral normand sont principalement contraints par les précipitations et le niveau moyen de la mer. Par conséquent, l'élévation du niveau marin et la modification du régime pluviométrique dues aux changements climatiques vont renforcer à moyen et long terme les risques d'aléas hydrogéologiques sur ces territoires. La connaissance du fonctionnement hydrologique des systèmes littoraux est donc nécessaire pour prévoir les impacts du changement climatique.

Ces impacts touchent des territoires variés avec des activités socio-économiques de nature différentes (milieux urbains, tourisme, activités maraichères, zones humides...). La sensibilité des habitants à ces milieux, leur valeur patrimoniale, sont des déterminants importants dans la construction des stratégies que les territoires vont devoir adopter pour limiter les impacts. Ils ne sont pas connus.

Afin d'établir la connaissance de ces impacts, des données de terrain sur ces aquifères côtiers sont nécessaires pour établir le fonctionnement hydrologique de ces systèmes et ainsi calibrer les modèles hydrologiques afin de prédire l'orientation des stratégies territoriales à prendre. Ce rapport met en évidence le choix des sites d'étude, de l'implantation et l'équipement des piézomètres.

Ce rapport présente tout d'abord les choix des sites d'étude et leurs données piézométriques existantes. Ensuite, la méthodologie de modélisation utilisée pour proposer finalement une organisation de l'implantation des piézomètres par site d'étude.

## 2 MATERIEL ET METHODES

Cette partie permet d'une part de justifier le choix des sites d'étude et la façon dont ils ont été sélectionnés et d'autre part, de présenter la méthodologie utilisée pour identifier les zones où l'implantation des piézomètres sera la plus adaptée.

### 2.1 SELECTION DES SITES D'ETUDE

Les sites d'étude ont été sélectionnés en recoupant plusieurs types d'informations. La première est la présence d'enjeux sur le territoire (Figure 1). Ces territoires ont une importante activité agricole de type maraîchère et permettent le pâturage. Une augmentation de la saturation en eau des sols engendre l'incapacité d'utiliser ces territoires et impacte directement l'activité agricole. De plus, ces inondations peuvent impacter les infrastructures urbaines et avoir une répercussion non-négligeable sur les activités socio-économiques. La seconde information est la topographie et la géologie. En effet, on retrouve le long du littoral des variations en termes de profil topographique. De nombreux sites comportent la même organisation du profil. Une partie dunaire protégeant du risque de submersion marine et une partie arrière littorale caractérisée par des altitudes basses proches du niveau moyen de la mer.

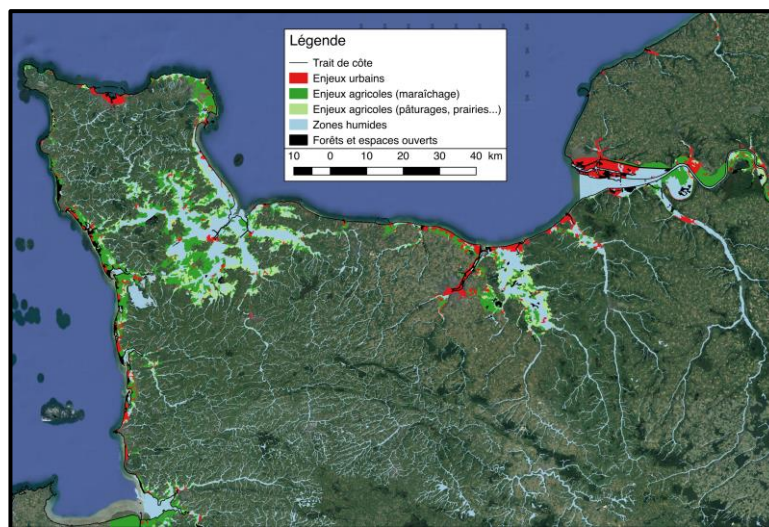


Figure 1 - Représentation des enjeux agricoles et urbains présents sur les zones susceptibles d'être impactées par les risques d'inondations par remontée de nappe phréatique.

La troisième information est la morphologie du trait de côte. La présence de havre (notamment sur la côte ouest de la manche) contraint les aquifères côtiers aux abords de ces embouchures par une double influence de la marée particulièrement en période de hautes eaux. On retrouve ce type de morphologie de trait de côte sur les communes d'Agon et Saint-Germain-Sur-Ay.

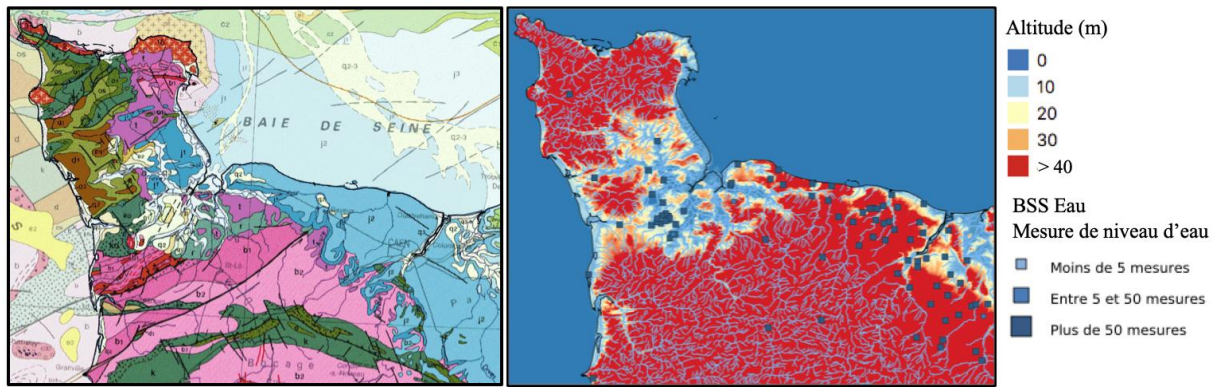


Figure 2 - Cartographie des structures géologiques (carte de gauche), de la topographie et des installations mesurant le niveau piézométrique (carte de droite).

Les forages issus de la Banque du Sous-Sol [1] (Figure 2) montrent une forte disparité entre la côte ouest et la côte est de la Normandie en termes de quantité de forage. Très peu de forages sont d'ailleurs dans les zones de faible altitude qui nous intéressent pour réaliser cette étude.

## 2.2 SITES D'ETUDE

Cinq sites d'étude (Figure 3) ont été retenus satisfaisant l'ensemble des critères établis dans la partie 2.1. Trois sites sur la côte ouest de la Manche reposent sur un milieu cristallin et ont une organisation géomorphologique relativement identique. La principale différence qui caractérise ces trois sites est la morphologie du trait de côte. Les deux derniers sites sont caractérisés par un milieu calcaire et une géomorphologie différente des 3 autres sites d'étude.

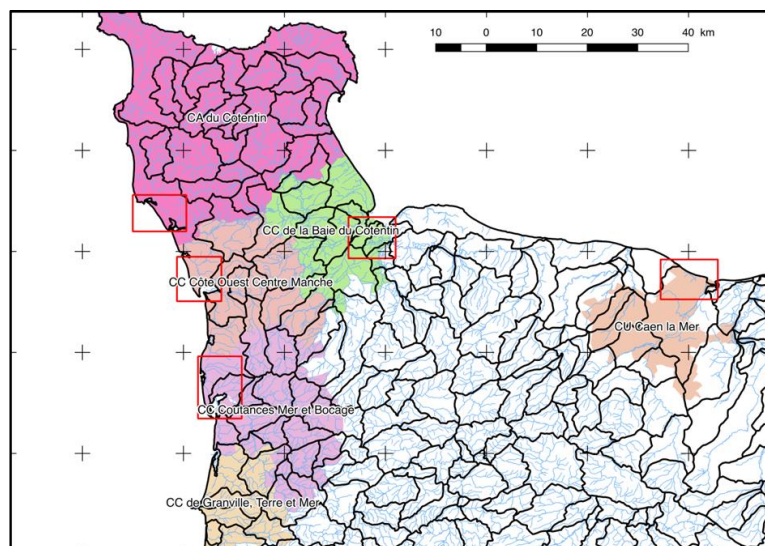


Figure 3 - Localisation des 5 sites d'études retenus (rectangle rouge) ainsi que les communautés de communes associées au projet.

### 2.2.1 POINTE D'AGON

Le site de la pointe d'Agon est le site de la côte ouest où le nombre d'information est le plus important grâce à la chronique du piézomètre de Gouville-Sur-Mer [2]. Quatre piézomètres vont être installés sur ce site d'étude pour compléter cette chronique. Comme sur l'ensemble des sites de la côte ouest de la Manche, le lien entre géologie et topographie est très net (Figure 4). La partie sableuse correspond à des altitudes relativement faibles alors que l'altitude augmente lorsqu'on se déplace vers la partie substratum. Cette partie sédimentaire est sous la double influence maritime avec la mer qui s'engouffre dans le Havre de Regnéville lors des périodes de hautes eaux. Il sera intéressant d'observer l'impact de cette double influence sur les niveaux piézométriques de cette zone.

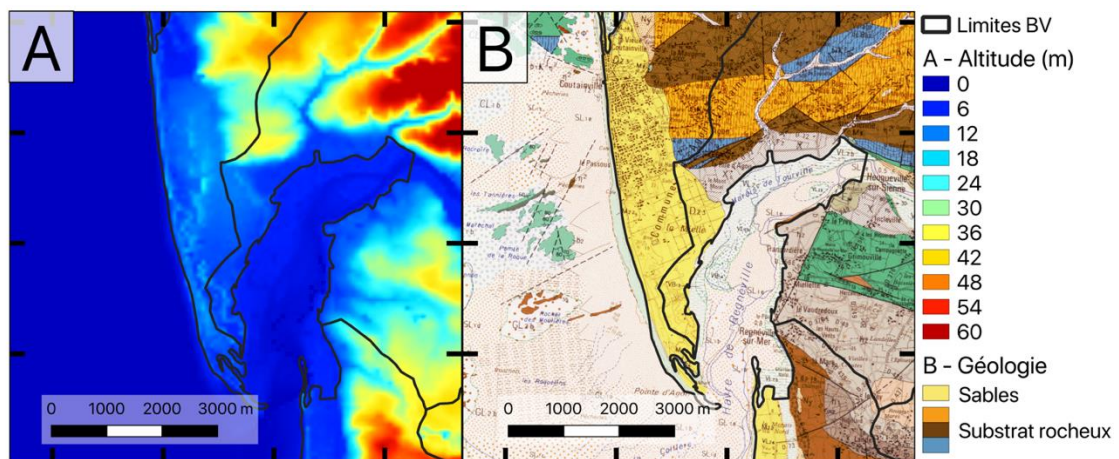


Figure 4 - Représentation de la topographie (A) et de la géologie [7] (B) du site de la pointe d'Agon.

### 2.2.2 SAINT-GERMAIN-SUR-AY À BARNEVILLE-CARTERET

La bande littorale située entre Saint-Germain-Sur-Ay et Barneville-Carteret présente des enjeux agricoles et urbains forts liés à ce risque d'inondation par remontée de nappe. De même que pour le site précédent, on retrouve ce lien entre la géologie et la topographie avec les substrats rocheux dans les zones comprenant une altitude haute et le prisme sédimentaire sableux dans les zones basses (Figure 5). Sur le site de Saint-Germain-Sur-Ay, la double influence maritime est présente avec d'une part, l'action directe de la mer et d'autre part, le Havre de Lessay. Ce site aura un rôle complémentaire avec le site de la pointe d'Agon.

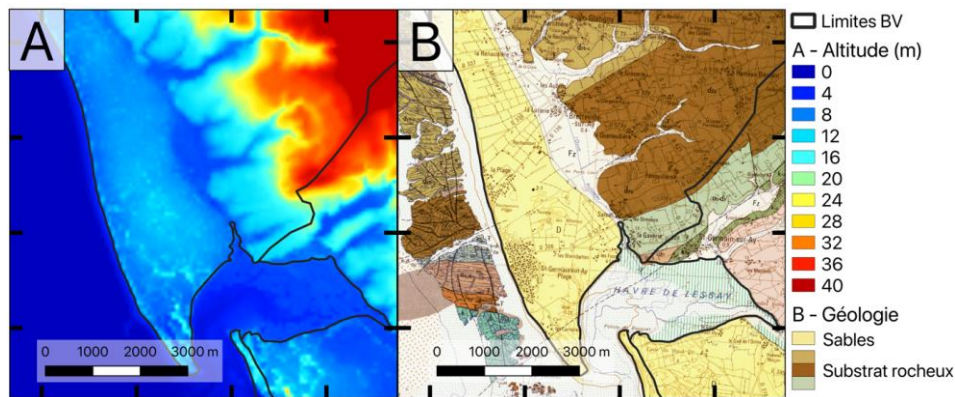


Figure 5 - Représentation de la topographie (A) et de la géologie (B) du site de Saint-Germain-sur-Ay.

Ces deux sites sont drainés par des cours d'eau parallèles au trait de côte drainent les flux des aquifères vers la mer via le Havre de Lessay et le Havre de Surville pour le site de Saint-Germain-Sur-Ay et via le Havre de Portbail et le Havre de Carteret pour le site de Barneville-Carteret (Figure 6). Ces cours d'eau se situent à l'interface entre les deux types de géologie (sédimentaire et cristallin) juste après la rupture de pente. Aucune information n'est disponible sur ces sites concernant la dynamique des aquifères. Quatre transects (deux par site) de trois piézomètres ont été choisis pour combler ce manque d'information.

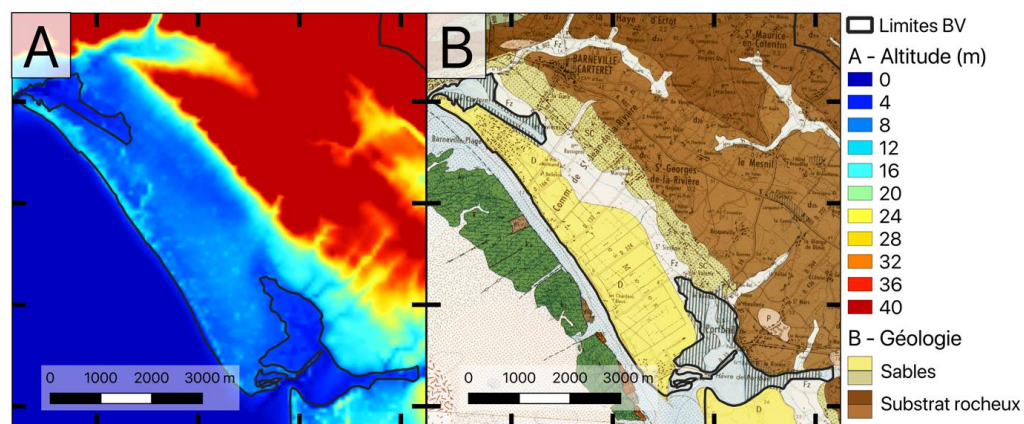


Figure 6 - Représentation de la topographie (A) et de la géologie (B) du site de Barneville-Carteret.

### 2.2.3 BAIE DU COTENTIN

Le site de la Baie du Cotentin s'étend sur une surface très importante du territoire de la Manche et est à l'interface entre le massif armoricain et le bassin parisien (Figure 7). Ce site est caractérisé par un faible relief topographique laissant la marée s'engouffrer dans le réseau hydrographique en période de hautes eaux. Des portes à flots permettent de limiter la pénétration de cette marée bloquant la mer en période de hautes eaux et permettant la vidange du réseau hydrographique et des aquifères en période de basses eaux.

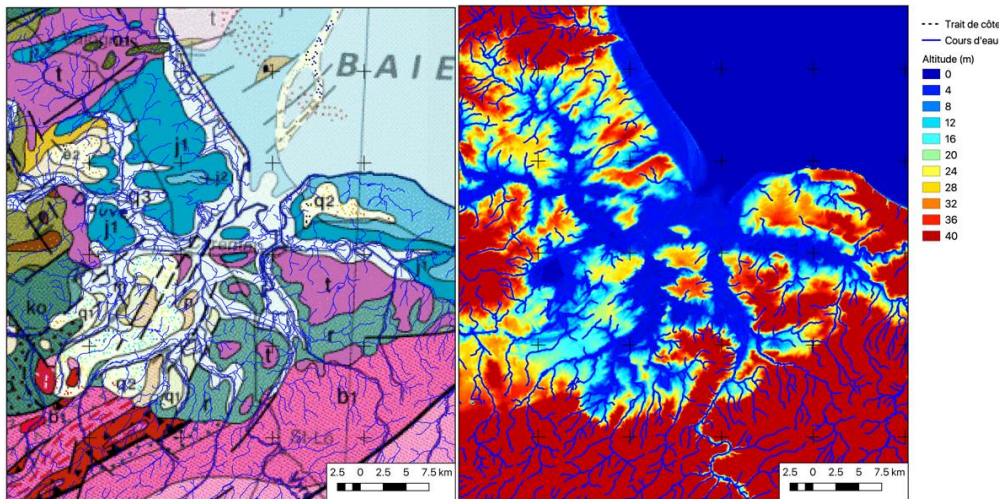


Figure 7 - Représentation de la topographie (droite) et la géologie (gauche) du site de la Baie du Cotentin.

La superficie de la baie étant importante, nous avons choisi de nous orienter vers une zone située au nord entre Carentan-les-Marias et Saint-Martin-de-Varreville permettant de se placer avant les portes à flots pour se rapprocher d'un système fonctionnant de façon naturelle afin de mieux pouvoir caractériser les paramètres hydrauliques du souterrain. L'installation de huit piézomètres permettra de réaliser cette caractérisation.

#### 2.2.4 CAEN-LA-MER

Le site de Caen-la-mer est situé à la limite du bassin parisien et repose sur un milieu calcaire (Figure 8). Sa structure géomorphologique est cependant proche des trois sites à l'ouest de la Manche. On retrouve, bien que moins étendu, un cordon dunaire le long du littoral reposant sur un substrat calcaire. Ce substrat s'étend ensuite sur des hauts topographiques de façon identique aux substrats cristallins des sites à l'ouest.

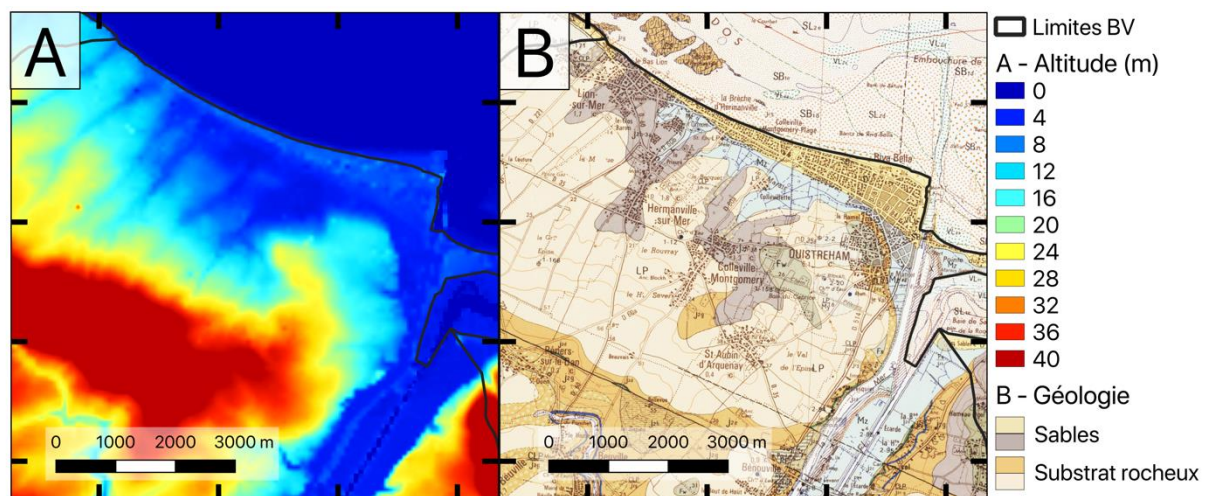


Figure 8 - Représentation de la topographie (A) et de la géologie (B) du site de Ouistreham.



## 2.3 PIEZOMETRES EXISTANTS

Cette partie présente de façon systématique l'ensemble des données piézométriques disponibles à proximité des zones d'études. Ces données sont issues du Portail national des eaux souterraines ADES [3].

### 2.3.1 GOUVILLE-SUR-MER

Le piézomètre BSS000KUVA<sup>1</sup> (anciennement 01423X0044/F4) est situé dans le cordon dunaire de la commune de Gouville-Sur-Mer à une altitude de 10m (Figure 9).



Figure 9 - Localisation du piézomètre BSS000KUVA (Croix noire)

La profondeur du piézomètre est de 11m. Il traverse d'abord le cordon dunaire puis les schistes et grès du Briovérien du Massif Armoricaïn. Le relevé piézométrique (Figure 10) débute le 01/01/2009 et est toujours en cours d'acquisition. La cote piézométrique (mNGF) du niveau moyen sur ce relevé est de 4,2 m avec une amplitude maximale de 1,91 m.

Le piézomètre étant localisé à environ 250 mètres du trait de côte, on peut observer à travers cette chronique le signal de la marée. Ce signal pourra être utilisé pour caractériser les paramètres hydrogéologiques du cordon dunaire.

---

<sup>1</sup> Fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01423X0044/F4>

Fiche InfoTerre : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=01423X0044/F4>

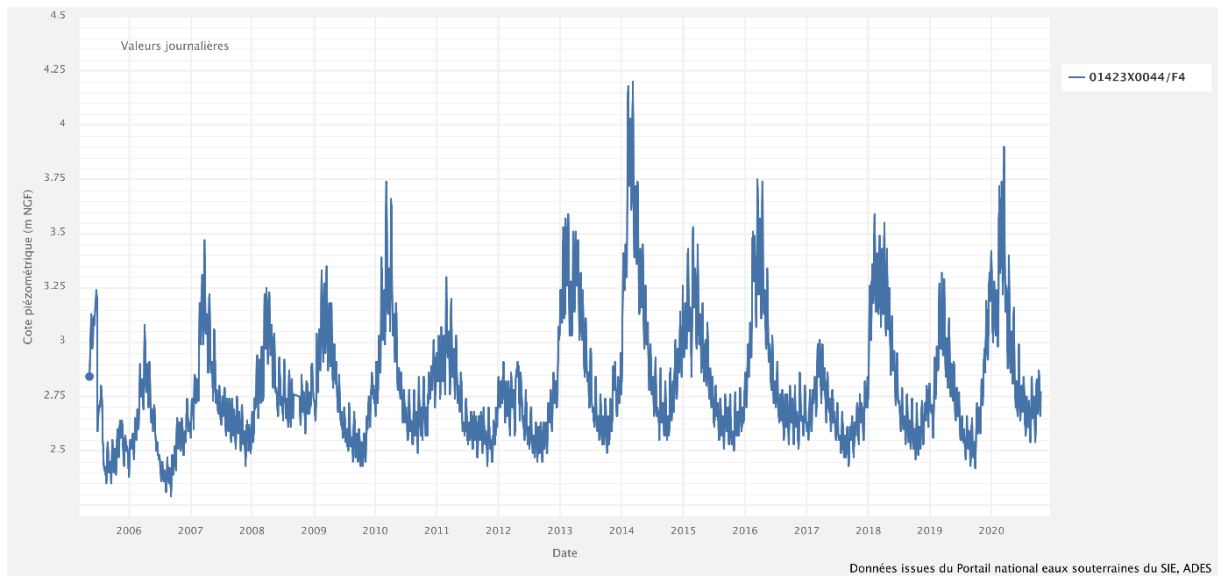


Figure 10 – Chronique piézométrique du piézomètre BSS00KUVA.

### 2.3.2 BLAINVILLE-SUR-MER

Les piézomètres présents sur la commune de Blainville-sur-mer ont été implantés dans le cadre des projets H2020 AquaNES [4] (2016-2019) et JPI Water [5] actuellement en cours. Le site est équipé de 5 piézomètres localisés dans le cordon dunaire proche du Havre de Blainville (Figure 11).

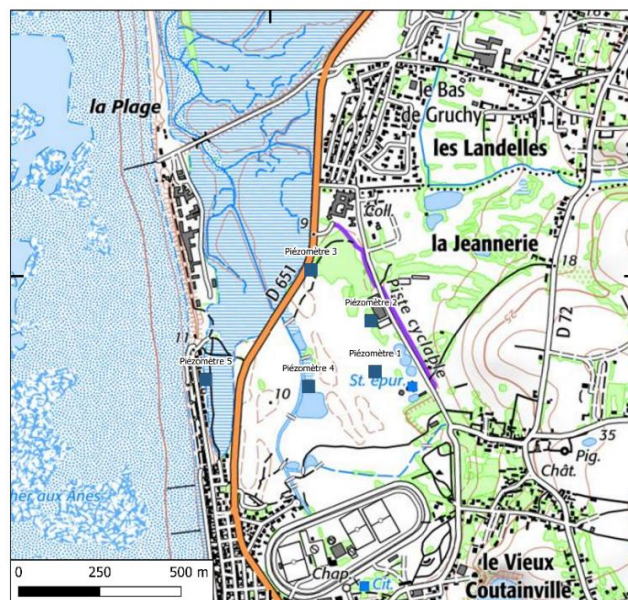


Figure 11- Localisation des piézomètres (Carrés bleus)

Les piézomètres permettent d'obtenir des données de conductivité, de température et de niveau piézométrique. Les données sont acquises par le système SMD [6] sur le site depuis avril 2017 (Figure 12).

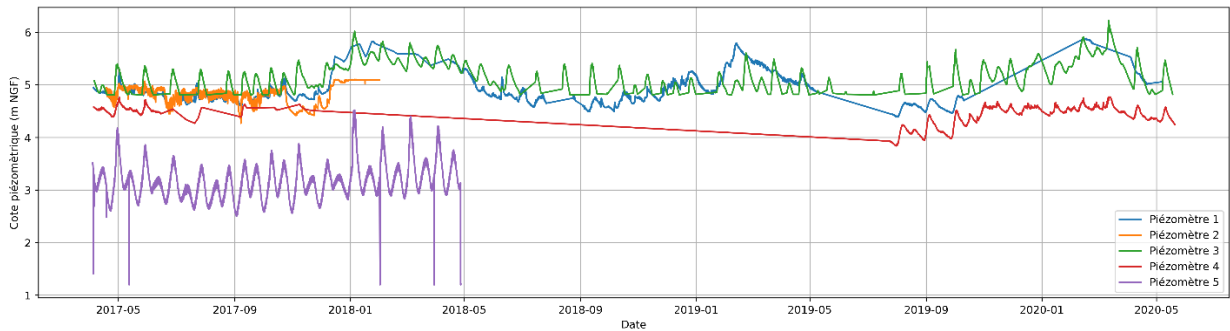


Figure 12 - Chroniques piézométriques des piézomètres du site de Blainville-sur-mer.

### 2.3.3 GRANVILLE

Le piézomètre BSS000MNBS<sup>2</sup> (anciennement 01727X0123/S3) est situé dans la commune de Granville à une altitude de 34m (Figure 13). Le piézomètre est localisé à environ 250 mètres du trait de côte.



Figure 13 - Localisation du piézomètre BSS000MNBS (Croix noire)

La profondeur du piézomètre est de 100m. Il traverse les schistes et grès du Briovérien du Massif Armoricain alternant zones imperméables et zones fracturées. Le relevé piézométrique (Figure 14) débute le 09/12/2014 et est toujours en cours d'acquisition. La cote piézométrique (mNGF) du niveau moyen sur ce relevé est de 26,76m avec une amplitude maximale de 1,99m.

<sup>2</sup> Fiche ADES : <http://www.ades.eaufrance.fr/FichePtEau.aspx?code=01727X0123/S3>

Fiche InfoTerre : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=01727X0123/S3>

Le piézomètre est intéressant dans la caractérisation des paramètres hydrologiques du substrat rocheux sur lequel repose le cordon dunaire le long du littoral.

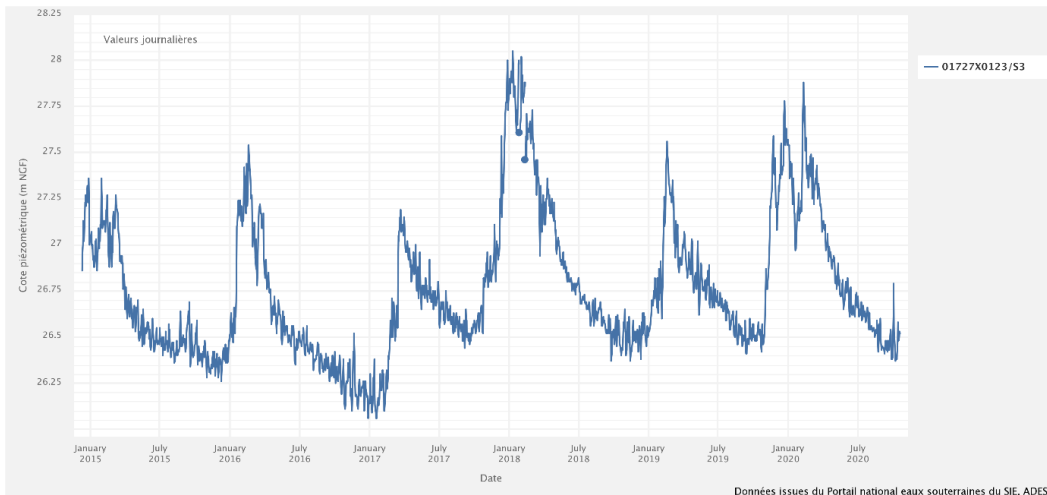


Figure 14 – Chronique piézométrique du piézomètre BSS000MNBS.

### 2.3.4 LESSAY

Le piézomètre BSS000HURB<sup>3</sup> (anciennement 01168X0065/P) est situé dans la commune de Lessay à une altitude de 10m (Figure 15).

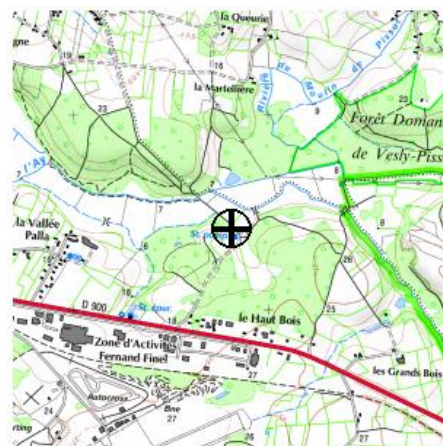


Figure 15 - Localisation du piézomètre BSS000HURB (Croix noire)

Le piézomètre est localisé proche du cours d'eau l' Ay. La profondeur du piézomètre est de 47,82m traversant les sables du Plio-Pleistocène de la partie profonde du bassin de Lessay. Le relevé piézométrique (Figure 16) débute le 01/01/2009 et est toujours en cours d'acquisition.

<sup>3</sup> Fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01168X0065/P>

Fiche InfoTerre : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=01168X0065/P>

La cote piézométrique (mNGF) du niveau moyen sur ce relevé est de 7,55 m avec une amplitude maximale de 2,01 m.

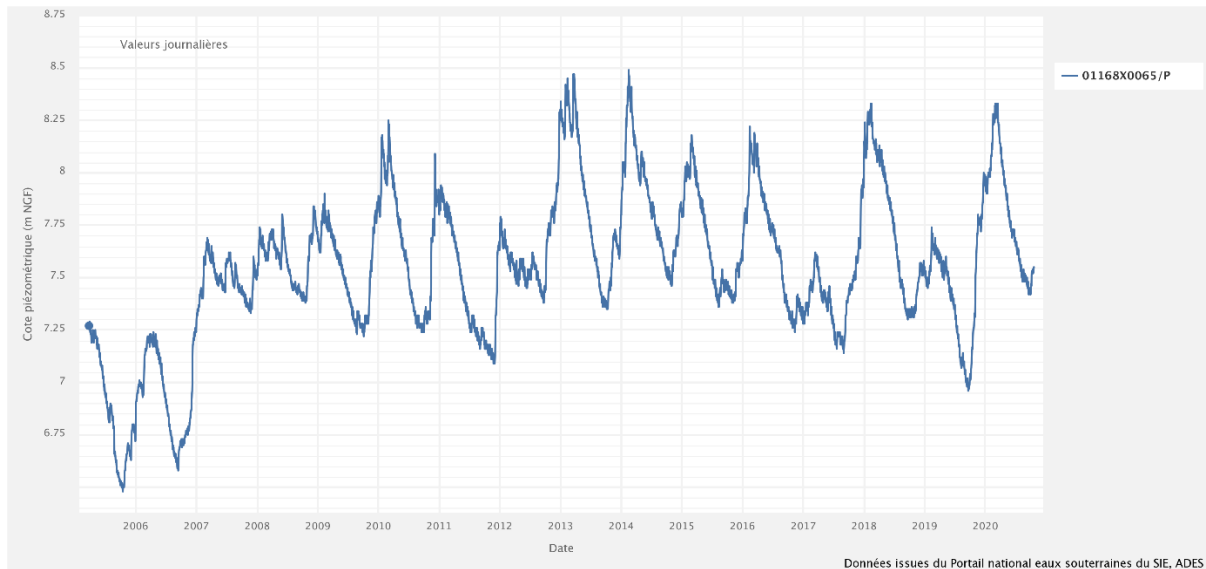


Figure 16 - Chronique piézométrique du piézomètre BSS000HURB.

### 2.3.5 CAEN-LA-MER

Le tableau ci-dessous présente les 5 piézomètres intéressants pour la caractérisation hydrogéologique du site de Caen-la-mer :

Code	Ancien code	Commune	Altitude (m)	Profondeur (m)
BSS000JAJS <sup>4</sup>	01201X0128/S1	Lion-Sur-Mer	13m	13,3m
BS000JAHW <sup>5</sup>	01201X0108/S1	Mathieu	37m	14,55m
BSS000JAE <sup>6</sup>	01201X0020/S1	Boissière	29m	25.9m
BSS000JAQS <sup>7</sup>	01202X0040/S1	Amfreville	46m	20,8m
BSS000JCFJ <sup>8</sup>	01206X0013/P	Hérouvillette	39m	17,57m

<sup>4</sup> Fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01201X0128/S1>

<sup>5</sup> Fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01201X0108/S1>

<sup>6</sup> Fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01201X0020/S1>

<sup>7</sup> Fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01202X0040/S1>

<sup>8</sup> Fiche ADES : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01206X0013/P>

Les chroniques piézométriques (Figure 17) débutent pour 4 d'entre elles le 29/01/1974. Seuls les piézomètres BSS000JCFJ et BS000JAHW sont toujours en cours d'acquisition du niveau piézométrique. Les informations passées sur les 3 autres piézomètres donnent cependant une indication sur le niveau moyen de la nappe et permettront d'apporter des données supplémentaires dans la calibration de ce site d'étude.

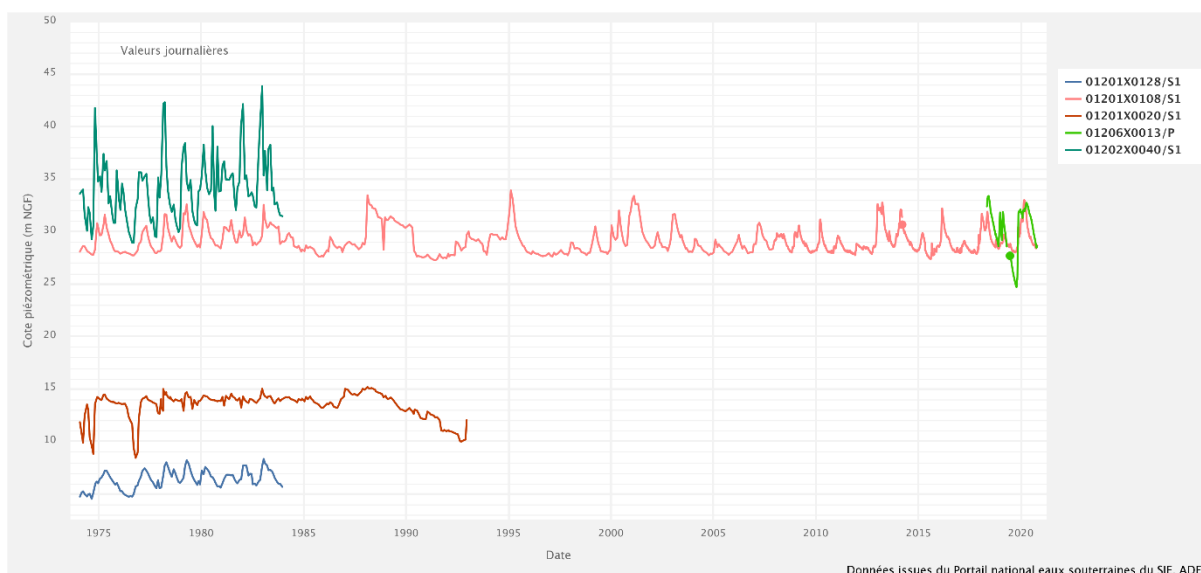


Figure 17- Chroniques piézométriques du site de Caen-la-mer

Les périodes de mesure, les niveaux moyens ainsi que les amplitudes maximales obtenues sur ces relevés sont indiqués dans le tableaux suivant:

Code	Ancien code	Période de mesure	Niveau moyen (m)	Amplitude (m)
BSS000JAJS	01201X0128/S1	29/01/1974 au 16/12/1983	6,36m	3,8m
BS000JAHW	01201X0108/S1	29/01/1974 au 19/10/2020	29,05m	8,83m
BSS000JAE	01201X0020/S1	29/01/1974 au 16/12/1992	13,43m	6,75m
BSS000JAQS	01202X0040/S1	29/01/1974 au 19/12/1983	34,08m	14,91m
BSS000JCFJ	01206X0013/P	04/05/2018 au 13/10/2020	30,18m	8,68m

## 2.4 METHODOLOGIE

Pour réaliser une première approche de la dynamique du niveau piézométrique sur ces sites d'étude, des modèles hydrologiques ont été développés. Ces modèles ont été construits de façon identique pour l'ensemble des sites d'étude.

### 2.4.1 PARAMETRISATION DES MODELES

Le modèle est construit grâce au logiciel Modflow [8] développé par l'USGS (Institut d'études géologiques des États-Unis). La discrétisation spatiale du modèle (Figure 18) est définie par un maillage régulier de 75m et une topographie extraite d'un modèle numérique de terrain (IGN). La structure du modèle est caractérisée par un milieu homogène comprenant une couche perméable de 20 mètres d'épaisseur reposant sur une couche imperméable. Les paramètres hydrauliques (perméabilité et porosité) de la couche perméable seront définis dans la partie suivante. La discrétisation temporelle du modèle est définie en régime transitoire sur une durée de 42 ans correspondant à la durée d'une chronique de recharge issue du modèle SURFEX<sup>9</sup> (MétéoFrance).

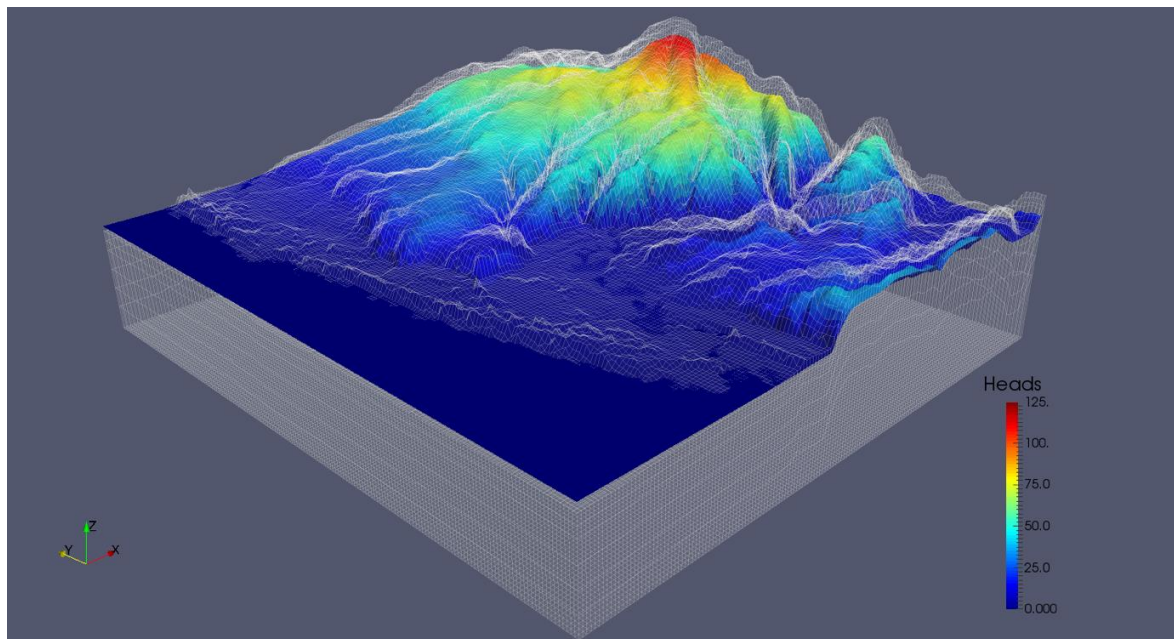


Figure 18 - Représentation 3D du modèle hydrogéologique avec la discrétisation spatiale (grille blanche) et le niveau piézométrique simulé (Heads).

---

<sup>9</sup> SURFEX (Surface Externalisée, en français) est une plateforme de modélisation de surface développée par Météo-France en coopération avec la communauté scientifique : <https://www.umr-cnrm.fr/surfex/>

Les conditions initiales du modèle sont déterminées par un niveau d'eau en régime permanent calculé à partir de la moyenne de la chronique de recharge. Les conditions aux limites du modèle sont une limite imperméable au fond et sur les bords du modèle et un niveau d'eau imposé par le niveau moyen de la mer sur les mailles littorales. Dans ce modèle, nous faisons l'hypothèse que les rivières n'alimentent pas l'aquifère. De plus, si le niveau d'eau passe au-dessus de la topographie, le volume d'eau supérieur au niveau topographique est instantanément évacué par le réseau hydrographique.

#### 2.4.2 PERMEABILITE ET POROSITE

L'indentification des deux paramètres hydrauliques de la couche perméable est essentielle pour que le modèle se rapproche au maximum de la dynamique réelle de la nappe phréatique. Afin de fixer ces deux paramètres, nous avons utilisé la chronique piézométrique la plus représentative de la zone qui nous intéresse et la plus complète dont nous disposons sur le site d'Agon-Coutainville. C'est-à-dire la chronique issue du piézomètre de Gouville-Sur-Mer. L'idée est d'utiliser cette chronique pour caler les paramètres de conductivité hydraulique  $K$  et de porosité  $\theta$ . La réalisation de plusieurs simulations a permis d'explorer une gamme de valeur de conductivité hydraulique et de porosité (Figure 19).

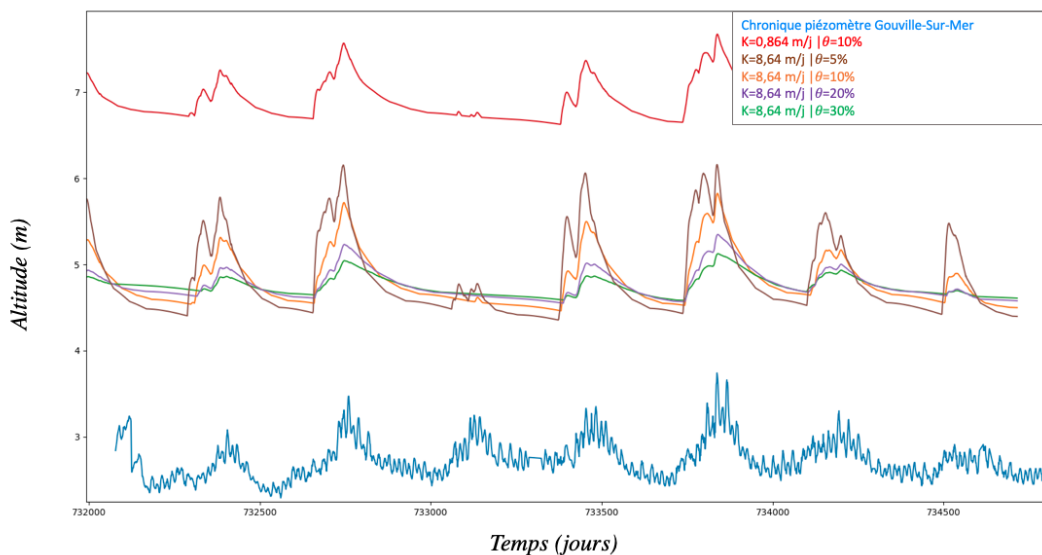


Figure 19 – Comparaison entre les chroniques de niveau modélisées selon différentes valeurs de perméabilité  $K$  et de porosité  $\theta$  et la chronique du piézomètre de Gouville-Sur-Mer.

Ces simulations montrent d'une part que la valeur de perméabilité influence le niveau moyen de la nappe et d'autre part que la porosité impacte l'amplitude du battement de la nappe. Une



diminution de la perméabilité augmente le niveau moyen de la nappe puisque les écoulements sont plus faibles et que le milieu évacue moins la recharge.

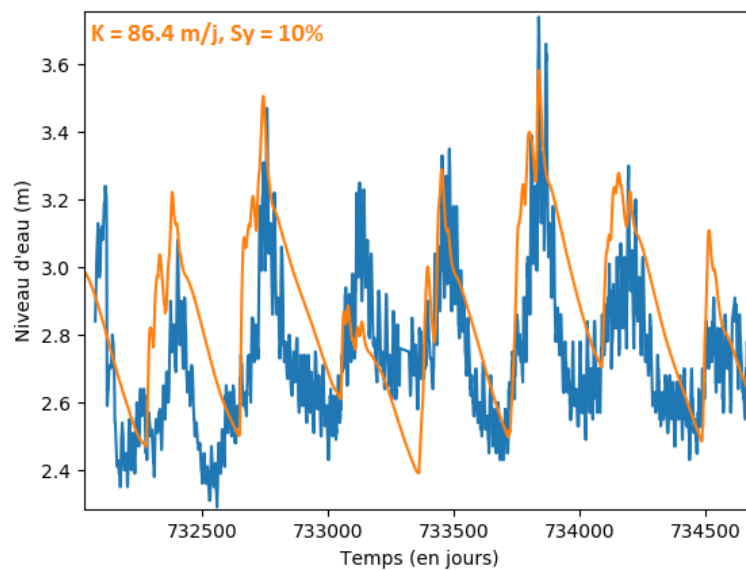


Figure 20 – Représentation de la chronique piézométrique issue du modèle hydrologique où les valeurs de conductivité hydraulique  $K$  et de porosité  $\theta$  permettent de se rapprocher aux données de terrain du piézomètre de Gouville-Sur-Mer.

De la même façon, une augmentation de la porosité diminue l'amplitude du battement de la nappe. Le volume disponible dans le milieu souterrain étant plus important, il faudra davantage de recharge pour atteindre un même niveau piézométrique. Cela permet de limiter l'augmentation du niveau de la nappe lié à l'apport de la recharge. Cette exploration de paramètre a permis d'établir un modèle de référence. Nous avons fixé une valeur de perméabilité  $K$  à  $10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  ( $86,4 \text{ m.j}^{-1}$ ) et une porosité de 10% (Figure 20). Les résultats issus de ce modèle doivent être interprétés en gardant en mémoire que le modèle a été calibré avec seulement une information et que l'hétérogénéité du milieu n'est pas prise en compte ici.

### 2.4.3 INDICATEURS

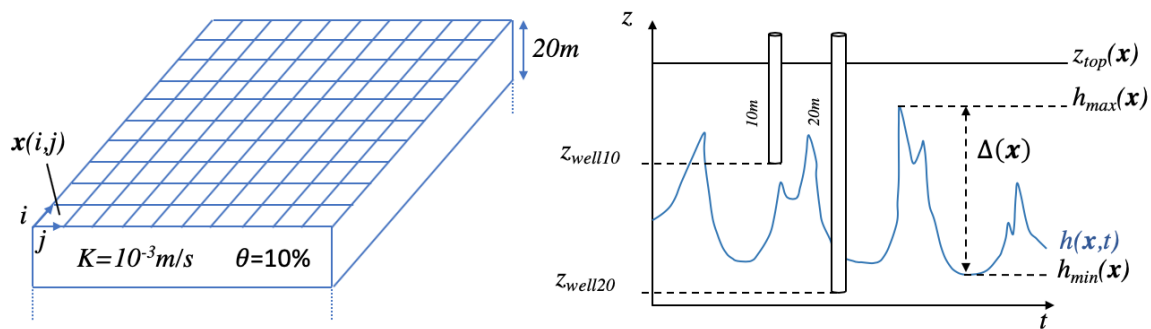


Figure 21 – Schéma conceptuel de la structure du modèle hydrologique (figure de gauche) et la représentation des indicateurs liés à la dynamique de la nappe phréatique.

Pour l'implantation des piézomètres, deux indicateurs extraits du modèle sont important pour définir les zones où l'on peut observer le niveau d'eau de façon continue. Le premier indicateur est basé sur les niveaux maximal  $h_{max}$  et minimal  $h_{min}$  que la nappe a atteint durant la simulation.

$$h_{min}(\mathbf{x}) = \min(h(\mathbf{x}, t)) \quad (1)$$

$$h_{max}(\mathbf{x}) = \max(h(\mathbf{x}, t)). \quad (2)$$

La profondeur des piézomètres prévue étant de 10 et 20 mètres, il est important que la nappe ne descende pas en dessous de la profondeur du forage auquel cas nous perdrons la mesure du niveau d'eau durant cette période. De la même façon, il est nécessaire que le niveau maximal  $h_{max}$  ne soit pas trop proche de la surface. Cette zone située entre le niveau maximum et la surface du sol nous permettra d'observer l'impact de l'augmentation du niveau de la mer sur le niveau des eaux souterraines.

Le second indicateur est l'amplitude du battement de la nappe phréatique  $\Delta$ . Cet indicateur permet d'observer le signal de la recharge. Plus le battement est important et plus nous pourrons en ressortir des informations et interpréter ce signal.

$$\Delta(\mathbf{x}) = h_{max}(\mathbf{x}) - h_{min}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

À partir de ces indicateurs, nous retenons les mailles  $\mathbf{x}$  dans lesquelles les variations de charge ont une amplitude assez importante et qui remplissent les conditions suivantes :

- La profondeur maximale  $z_{top} - h_{min}$  doit être supérieure à la profondeur atteinte par le piézomètre  $z_{well}$ .
- L'épaisseur entre le niveau maximal  $h_{max}$  et la surface du sol  $z_{top}$  doit être supérieure à l'augmentation du niveau marin moyen (Sea Level Rise) prévu par le GIEC.

$$\exists x, \max(\Delta(x)) \left| \begin{array}{l} z_{top} - h_{min} > z_{well} \\ z_{top} - h_{max} > SLR \end{array} \right. \quad (4)$$

Six catégories ont été définies de la façon suivante :

Catégorie 1 : la profondeur maximale  $z_{top} - h_{min}$  comprise entre 2 et 8 mètres avec une amplitude supérieure à 2 mètres : possibilité d'implanter un forage de 10 mètres.

Catégorie 2 : la profondeur maximale  $z_{top} - h_{min}$  comprise entre 8 et 18 mètres avec une amplitude supérieure à 2 mètres : possibilité d'implanter un forage de 20 mètres.

Catégorie 3 : la profondeur maximale  $z_{top} - h_{min}$  comprise entre 2 et 8 mètres avec une amplitude insuffisante (inférieure à 2 mètres).

Catégorie 4 : la profondeur maximale  $z_{top} - h_{min}$  comprise entre 8 et 18 mètres avec une amplitude insuffisante (inférieure à 2 mètres).

Catégorie 5 : le niveau maximale  $h_{max}$  est trop proche de la surface du sol : déconseillé d'implanter un piézomètre.

Catégorie 6 : la profondeur maximale  $z_{top} - h_{min}$  est trop profonde : déconseillé d'implanter un forage de 20 mètres.

## 2.5 IMPLANTATION DES PIEZOMETRES

La représentation de la coupe géologique (Figure 22, BRGM) met en évidence globalement l'organisation des couches géologiques de ces aquifères côtiers. Le log géologique des forages F<sub>1-5</sub> situé à Gouville-sur-Mer met en évidence plusieurs couches sableuses constituant l'aquifère d'environ une quinzaine de mètres de profondeur. Une seconde coupe située un peu plus au sud confirme cette organisation géomorphologique de ces aquifères côtiers. À la vue de l'épaisseur de la zone sableuse nous avons dimensionné, la profondeur des piézomètres prévues dans cette zone a été fixée à 10 mètres. Pour la zone cristalline (substratum), la profondeur a été augmentée pour être certain de pouvoir capter le toit de la nappe phréatique. Ces forages plus profonds permettront aussi de capter des lignes de flux plus profondes permettant de quantifier l'apport du continent vers les aquifères côtiers.

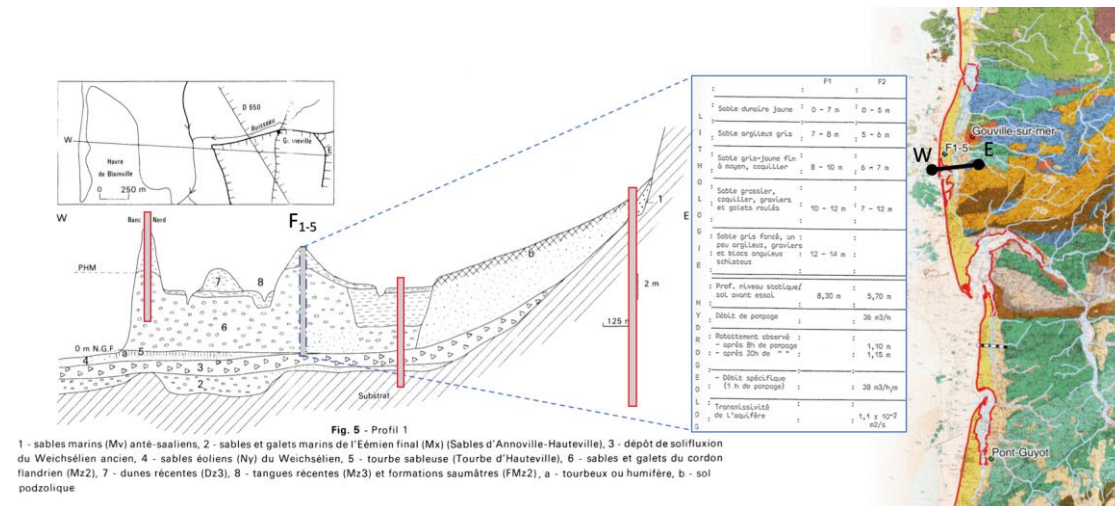


Figure 22 - Coupe géologique Ouest/Est du cordon dunaire sur le site de Gouville-Sur-Mer

L'implantation prévue se répartie par transect de trois piézomètres. Un premier piézomètre situé à l'abord du trait de côte, dans le cordon dunaire, permettra d'observer l'impact des variations maritimes et les possibles intrusions d'eau saline soit par remonté de l'interface eau salée/eau douce liée à l'augmentation du niveau de la mer soit générée par des pompages dans l'aquifère permettant à cette interface de migrer vers le continent. Le second piézomètre sera placé dans la zone arrière littorale proche des zones vulnérables aux risques d'inondation. L'implantation du troisième piézomètre est définie à l'interface entre la partie sableuse et la partie substratum permettant d'observer l'apport hydrogéologique du continent. Ces installations permettent d'observer à la fois l'impact des forçages maritimes et continentales mais aussi la résultante de ces forçages dans les zones à risques. L'objectif est de multiplier les transects pour couvrir l'ensemble des sites d'étude.

### 3 RESULTATS DE LA MODELISATION

Avant de présenter l'ensemble des résultats, il est nécessaire de rappeler que ces résultats issus de modèles reposant sur des hypothèses sont des modèles homogènes avec une conductivité hydraulique calé sur une information très locale d'un site en particulier. Il est possible que vers le continent, la perméabilité diminue et le niveau piézométrique augmente. D'autant plus que l'épaisseur de la couche perméable peut aussi évoluer avec la topographie et impacter la transmissivité du milieu. On peut raisonnablement supposer que la surface représentée en rouge correspondant à la catégorie 6 est en réalité plus faible que celle représentée par le modèle hydrogéologique.

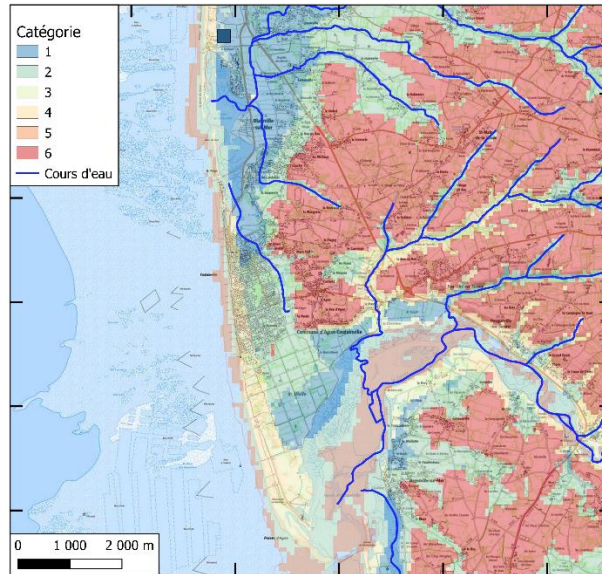


Figure 23 - Représentation des différentes catégories issus du modèle hydrologique sur le site de la pointe d'Agon

Les résultats de modélisation sur le site de la pointe d'Agon montrent que les zones où l'implantation des piézomètres est possible représentent relativement une faible bande de plus ou moins 1km le long de la côte (Figure 23). Les zones de catégorie 6 (zones rouges) correspondent aux zones situées sur les parties cristallines (substratum). Les résultats issus de la modélisation pour les sites de Saint-Germain-Sur-Ay et Barneville-Carteret montrent que, pour ces deux sites d'étude, la bande située le long du littoral où il y a une possibilité d'implanter des piézomètres (zones bleues) est plus large et laisse plus de choix dans la future localisation des piézomètres (Figure 24).

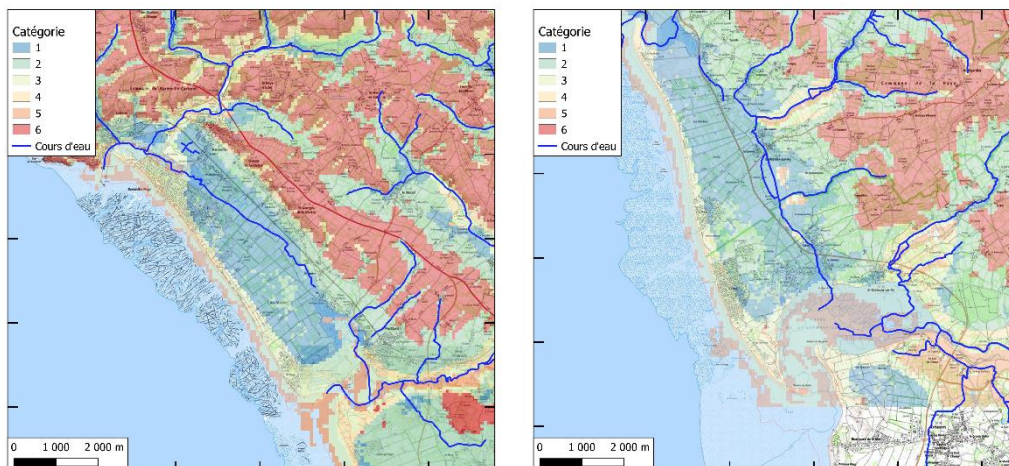


Figure 24 - Représentation des différentes catégories issus du modèle hydrologique pour le site de Barneville-Carteret (à gauche) et le site de Saint-Germain-sur-Ay (à droite).

Les 5 sites d'étude ne reposent pas sur le même type de substrat. Le modèle correspond davantage à un milieu cristallin plutôt qu'à un milieu calcaire. Afin de vérifier que ce type de modèle corresponde aussi au site de Caen-la-Mer et de la Baie du Cotentin, une comparaison des indicateurs modélisés et observés sur les piézomètres a été réalisée sur le site de Caen-la-mer.

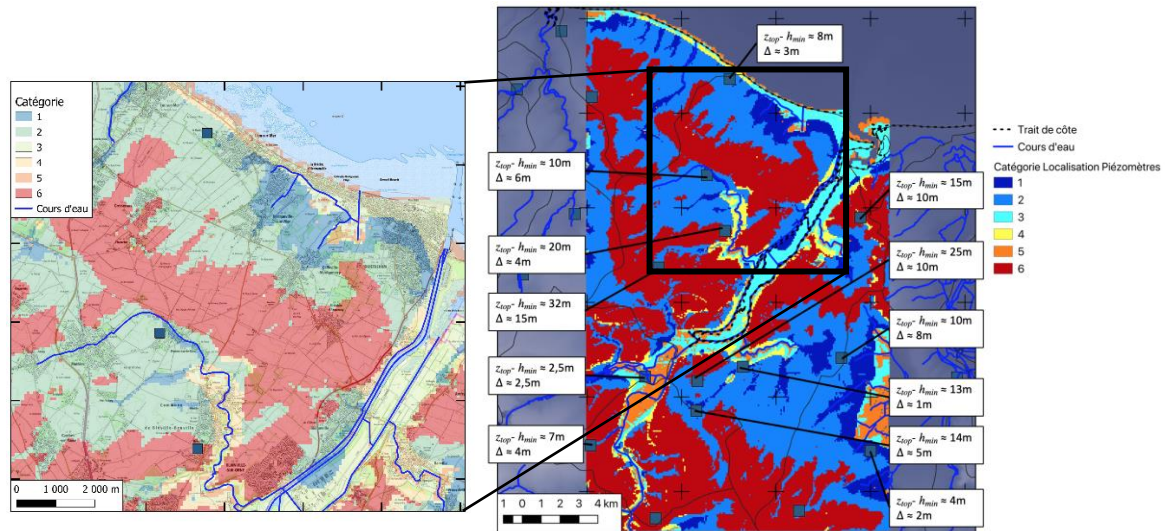


Figure 25 – Comparaison des indicateurs de profondeur maximale et de l'amplitude entre les valeurs modélisées et observées sur le site de Caen-la-Mer

La profondeur maximale  $z_{top} - h_{min}$  et l'amplitude  $\Delta$  montrent qu'il y a une bonne concordance entre les observations modélisées et observées (Figure 25). Ces résultats montrent que l'on peut utiliser ce modèle pour investiguer les sites reposant sur un milieu calcaire. Par conséquent, on observe, d'après la modélisation, la possibilité de mettre en place sur le site de Caen la mer, des piézomètres sur la partie nord du modèle avec la présence d'une bande d'environ 2km. La rive ouest de l'Orne semble aussi être une zone de suivi potentiel notamment pour la problématique d'intrusion d'eau saline dans les aquifères superficiels.

Les résultats issus de la modélisation pour le site de la Baie du Cotentin montrent plus d'hétérogénéité dans l'organisation spatiale des catégories (Figure 26). Cette différence est principalement due à un relief moins marqué que sur les autres sites d'étude. On remarque cependant la possibilité d'implanter des piézomètres sur la zone de Brévand / Les Veys et sur les zones au nord de l'Orne.

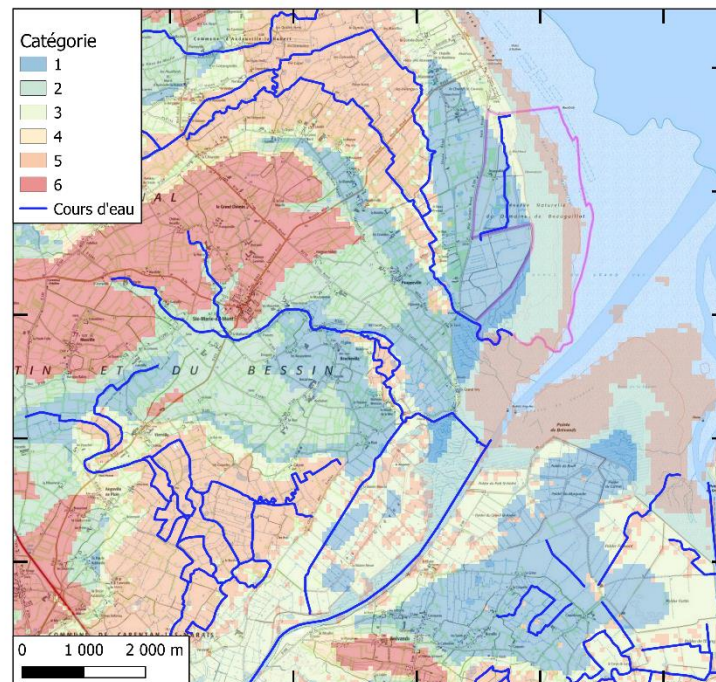


Figure 26 – Représentation des différentes catégories issus du modèle hydrologique sur le site de la Baie du Cotentin

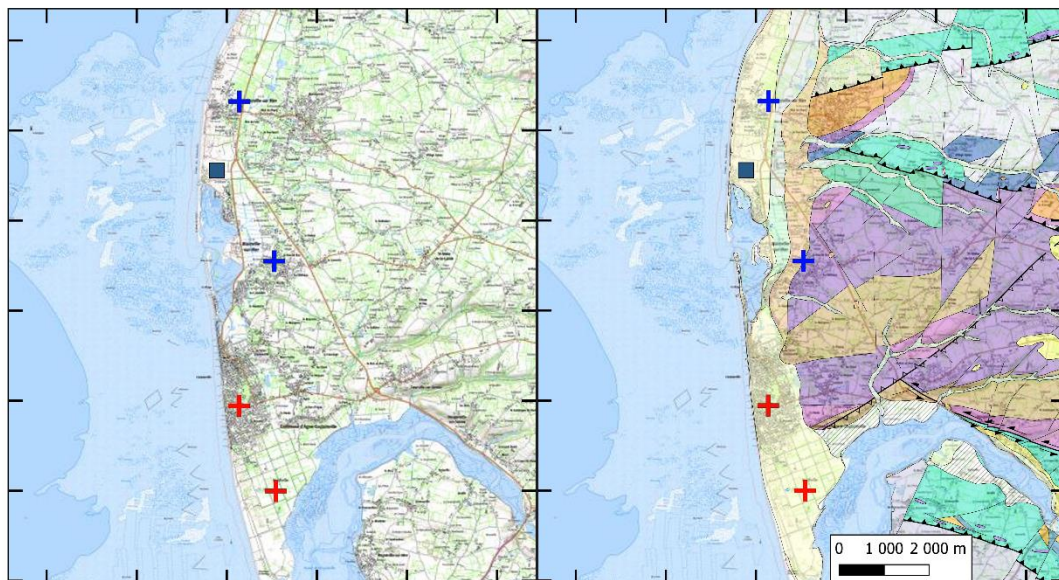
#### 4 LOCALISATION DES PIEZOMETRES

Comme défini dans la partie 2.3, le schéma d'implantation standard proposée sur les sites d'étude repose sur des transects de trois piézomètres permettant d'obtenir des informations dans les trois zones caractérisant les sites (cordon dunaire, marais arrière littoral et la paléofalaise). Des forages de dix mètres seront placés dans les parties sableuses et de vingt mètres dans les parties substratum.

La localisation des piézomètres proposée dans ce rapport est un consensus entre les résultats de la modélisation et la possibilité d'implanter ces équipements sur des parcelles publiques. Les parcelles ont été sélectionnés avec l'aide précieuse des communautés de communes et des mairies. Des visites de sites ont permis de valider ces parcelles. L'implantation des piézomètres est en cours de réalisation et les emplacements proposés dans ce rapport devraient être définitifs pour la plupart d'entre eux. Les cartographies suivantes représentent les piézomètres déjà présents sur les sites (carrés bleus), la localisation proposée des forages de dix mètres (croix rouges) et de vingt mètres (croix bleus). Ces localisations sont affichées avec le fond de carte de l'IGN et la carte géologique au 1/50000ème du BRGM.

#### 4.1 POINTE D'AGON

La proposition de localisation des piézomètres sur le site de la pointe d'Agon est structurée d'une façon différente puisque d'une part un piézomètre est déjà présent dans le cordon dunaire avec un relevé du niveau d'eau sur plusieurs années et d'autre part la superficie du cordon dunaire est plus faible que les deux autres sites de la côte ouest de la Manche (Figure 27). Nous avons choisi de placer un forage de vingt mètres à l'interface entre le cordon dunaire et la partie substratum en complément du forage déjà présent. Ce forage permettra d'estimer les écoulements souterrains via le continent. Ensuite, nous proposons la mise en place d'un transect nord/sud avec un second forage de vingt mètres et deux forages de dix mètres permettant d'observer l'impact de l'effet de pointe et de la double influence maritime par la mer et le havre.



**Piezomètres (profondeur en m)**



10



20

**Géologie**

- X, Dépôts anthropiques, remblais, digues (Quaternaire) - 1
- D, Dunes récentes (Quaternaire) - 2
- Fz, Alluvions récentes (Holocène) - 4
- Fx, Alluvions saaliennes - 6
- MzR, Tangues et sables récents (Quaternaire-Flandrien) - 13
- Mz, Dépôts marins sablo-argileux ou argilo-sableux (Quaternaire-Flandrien) - 14
- F-Mz, Dépôts fluviomarins (Quaternaire-Flandrien) - 19
- Mv, Sables et galets marins (Quaternaire-Pléistocène inférieur-anté-Saalien) - 22
- OEy, Loess non carbonatés ou décalcifiés (Quaternaire-Weichsélien) - 29
- Dy, Sables éoliens (Quaternaire-Weichsélien) - 31
- h1-2M, Calcaires de Montmartin-sur-Mer (Tournaisien-Viséen) - 63
- k-oH (3), Argilites, grès et quartzites rouges de Hyenville (Cambro-Ordovicien) - 86
- k-oH (2), Argilites et grès verts de Hyenville (Cambro-Ordovicien) - 87

- k2GL, Grès de Lessay (Cambrien supposé) - 98
- b2, Formation de Granville et de la Laize: siltites, argilites, grès, grauwackes et conglomérats - 120
- b2Cg, Microconglomérats et conglomérats (Briovérien supérieur) - 120
- b1, Formation de Saint-Lô: siltites, argilites, grès et phanites (Briovérien inférieur) - 127
- b1z, Briovérien indifférencié, métamorphisé dans le domaine des Schistes tachetés - 134
- b1M6, Métavolcanites de Montsurvent (Briovérien) - 137
- b1âM, Paléovolcanites basiques de Montsurvent (Briovérien) - 140
- b16M, Paléovolcanites acides et intermédiaires de Montsurvent (Briovérien) - 141
- b1MâC, Métamorphites du massif de Coutances (Briovérien) - 144
- â5, Tonalite de Coutances (Néoprotérozoïque) - 154
- â6C, Microgranites calco-alcalins (Cadomien) - 156
- â4c, Granodiorites cadomiennes à biotite et cordiérite - 158
- â4, Granodiorites cadomiennes à biotite seule - 159
- I, Lamprophyres, microdiorites, diabases (Dévono-Carbonifère ?) - 162
- SLB, Partie marine: sables fins à grossiers, sablons - 175
- VLB, Partie marine: sédiments vaseux - 178
- Hydro, Réseau hydrographique, points d'eau, bassins, étangs - 181

Figure 27 - Localisation provisoire des piézomètres du site de la pointe d'Agon (points bleus et rouges).



## 4.2 HAUTEVILLE-SUR-MER & ANNOVILLE

L'implantation des piézomètres de Hauteville-Sur-Mer et Annoville vient en complément du site de la pointe d'Agon à travers le Programme d'Action de Prévention des Inondations (PAPI) de la Communauté de communes Coutances, Mer et Bocage. Nous avons proposé d'instrumenter ce site avec deux transects de deux piézomètres (10 et 20 mètres de profondeur). Ce site d'étude va permettre d'apporter des informations supplémentaires sur les parties sédimentaires et cristallines et ainsi enrichir la base de données (Figure 28).

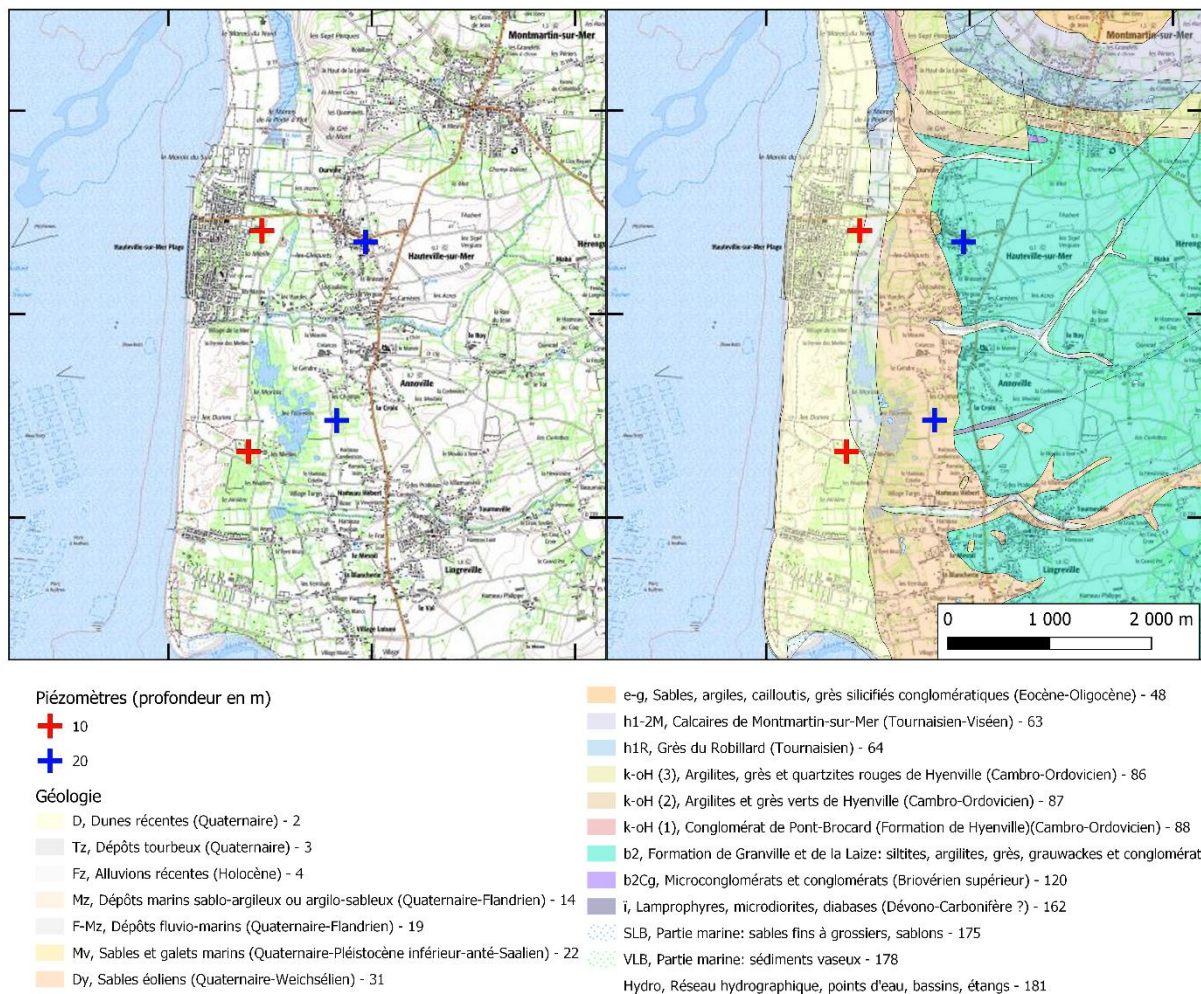


Figure 28 - Localisation des piézomètres du site de Hauteville-sur-mer et Annoville (points bleus et rouges).

## 4.3 SAINT-GERMAIN-SUR-AY

La stratégie pour les deux sites suivants est identique. Nous proposons de mettre en place deux transects perpendiculaires au trait de côte permettant de couvrir spatialement l'ensemble du site d'étude. Concernant le site de Saint-Germain-Sur-Ay, nous souhaitons implanter un transect proche du Havre de Lessay permettant d'observer l'impact de la marée dans les

aquifères qui bordent le havre (Figure 29). Le second transect a été placé entre l'Astérie et le Duy permettant d'obtenir une variation du niveau piézométrique dans le forage de vingt mètres assez suffisants dans cette situation de proximité au cours d'eau où les variations de la nappe sont plus faibles. Il est donc nécessaire de s'écarter de ces cours d'eau pour avoir un signal exploitable pour la calibration des paramètres hydrauliques de ces structures géologiques.

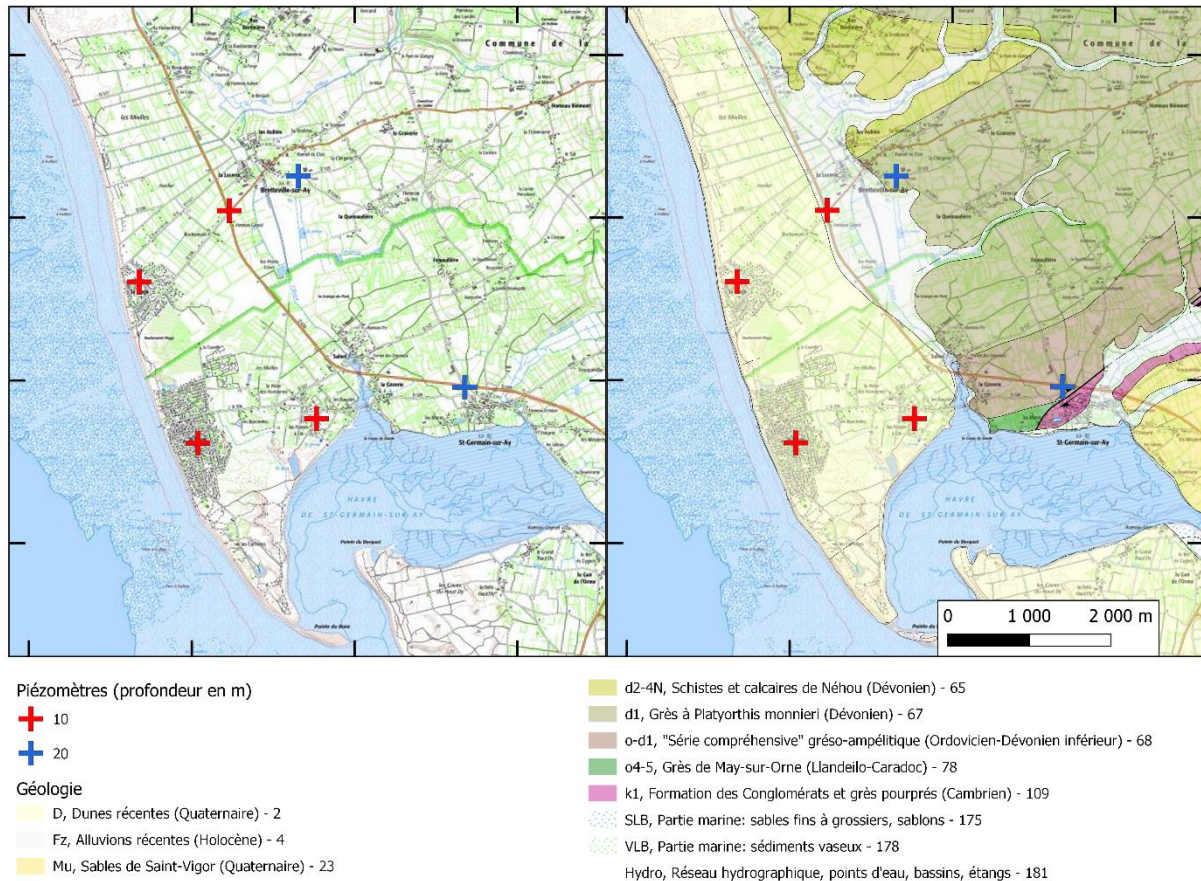


Figure 29 - Localisation des piézomètres du site de la pointe de Saint-Germain-Sur-Ay (points bleus et rouges).

#### 4.4 BARNEVILLE-CARTERET

Sur le site de Barneville-Carteret, les deux forages de vingt mètres sont situés à l'interface entre le cordon dunaire et le substratum puisque sur ce site, la rupture de pente est la plus forte (Figure 30). C'est-à-dire que l'altitude augmente rapidement en se déplaçant vers le continent. La possibilité d'observer une zone non-saturée devient plus forte. Afin d'éviter que la nappe phréatique se déconnecte des forages, nous avons choisi de les positionner en bas de la rupture de pente. Cela permettra aussi de capter les lignes de flux venant du continent plus en profondeur.

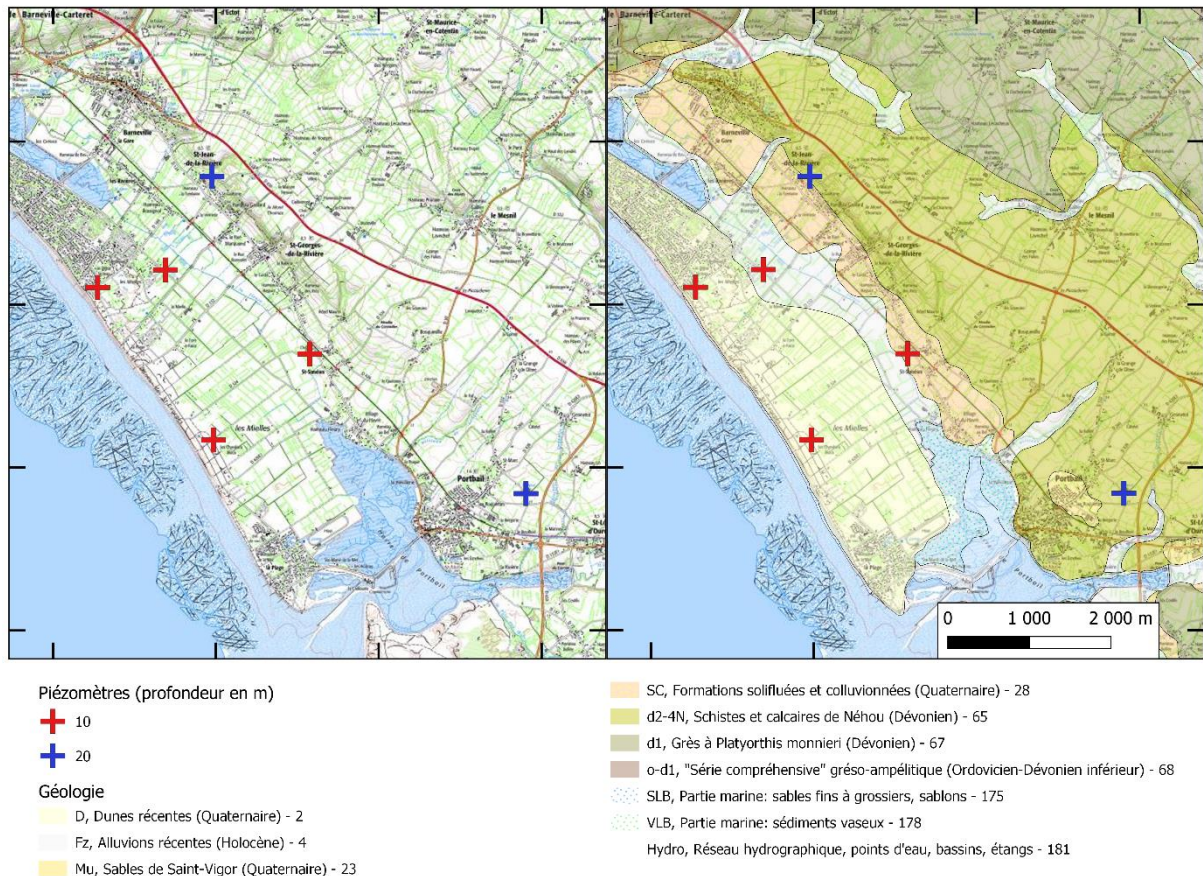


Figure 30 - Localisation provisoire des piézomètres du site de Barneville-Carteret (points bleus et rouges).

#### 4.5 LA BAIE DU COTENTIN

Ce site comportant une organisation topographique et géologique bien différente des autres sites d'étude a une stratégie d'implantation propre. Nous souhaitons sur ce site implanter 4 transects de deux piézomètres (Figure 31). Un transect situé au nord entre Sainte-Marie-du-Mont et Saint-Martin-de-Varreville permettra d'observer directement la dynamique de l'aquifère côtier de la même façon que les 3 sites précédents. Un transect situé sur Brévands – Les Veys sera important pour obtenir l'information de la triple influence par la mer au nord, la Taute à l'ouest et la Vire à l'est. Les deux derniers transects situés sur la rive nord de la Taute permettront de mettre en évidence l'impact des portes à flots en plaçant un transect en amont et un en aval de ces portes.

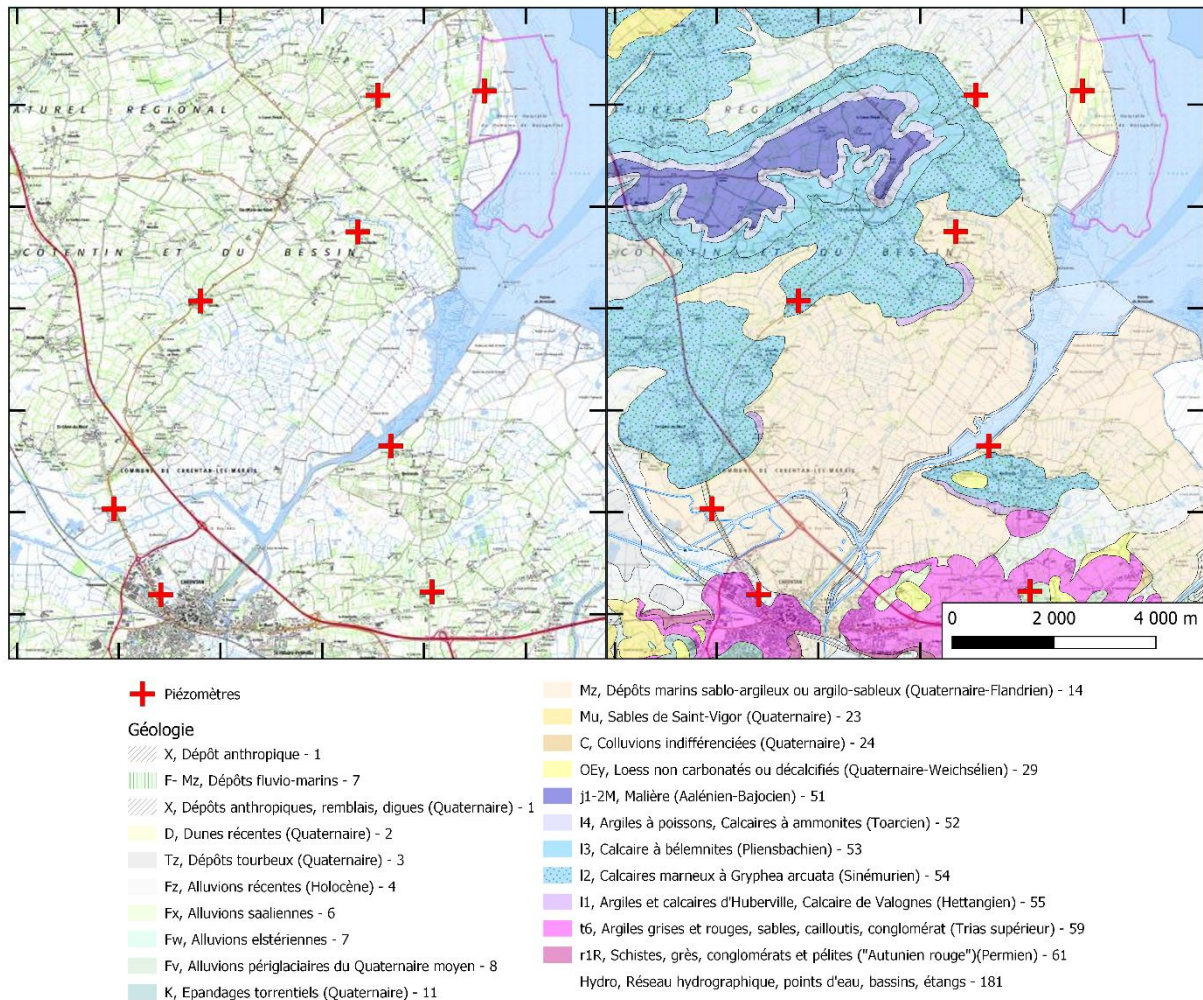


Figure 31 - Localisation provisoire des piézomètres du site de la Baie du Cotentin (points rouges).

#### 4.6 CAEN-LA-MER

Trois transects ont été définis, le premier situé dans l'axe Ouistreham / Blainville-sur-Orne, le second dans l'axe de la commune de Colleville-Montgomery et le troisième dans l'axe Lion-sur-Mer / Cresserons (Figure 32). Ces trois transects permettront de caractériser l'apport du milieu calcaire vers l'aquifère côtier de la même façon que les trois sites d'étude de la côte ouest vont caractériser les apports du milieu cristallin. Ensuite, nous proposons un transect de trois piézomètres parallèles à l'Orne qui permettra de venir en complément des instruments implantés par le Conservatoire du Littoral pour un projet de dépoldérisation sur la rive Est de l'Orne. Ce transect permettra d'observer d'une part l'impact de la marée sur la dynamique de l'aquifère lorsqu'elle pénètre dans l'Orne mais aussi comment la salinité se propage dans ces aquifères superficiels.

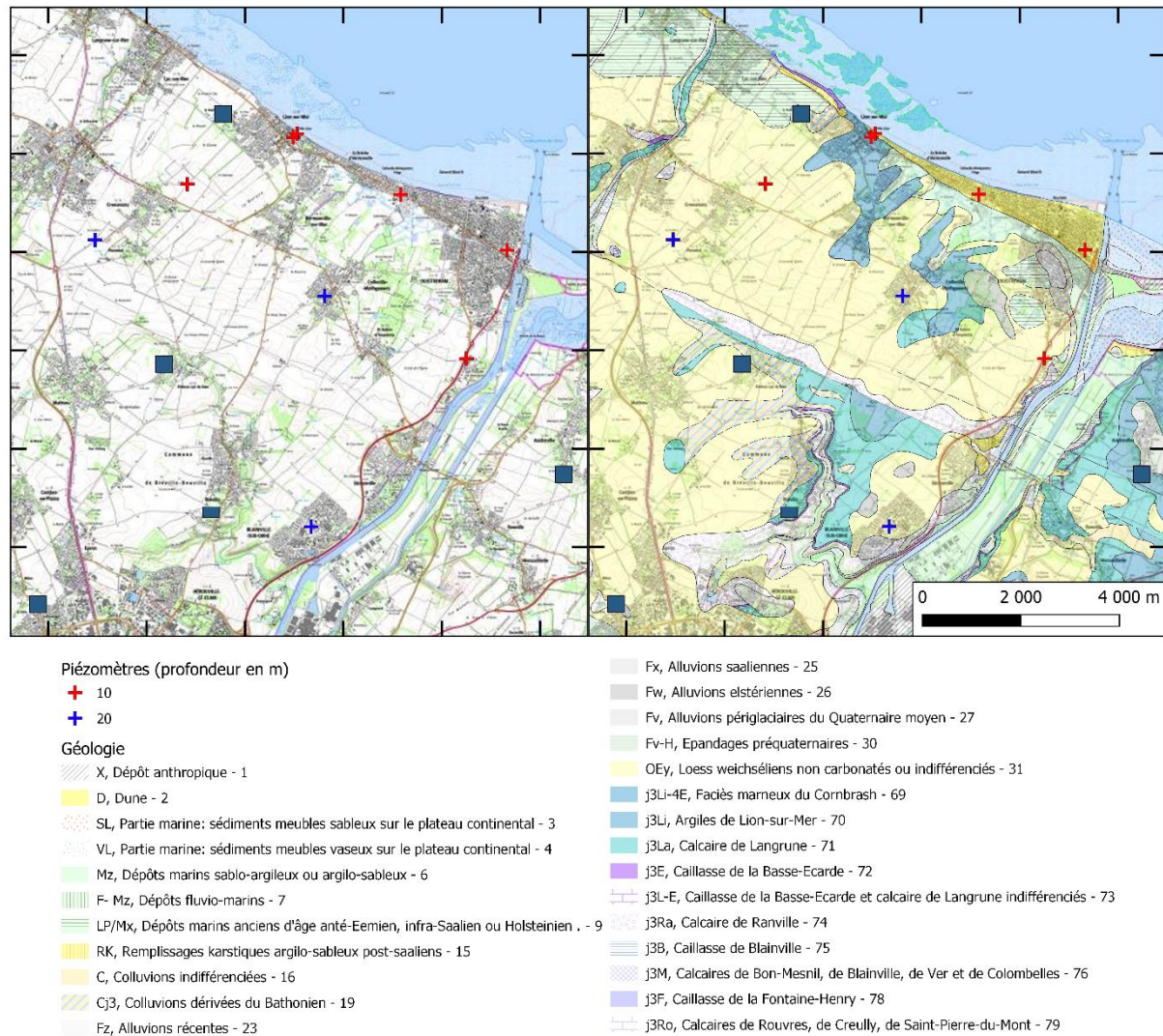


Figure 32 - Localisation provisoire des piézomètres du site de Caen-la-Mer (points noirs et rouges).

## 5 CONCLUSION

L'étude conjointe des enjeux territoriaux, de la géomorphologie, de la géologie et des données de forage et piézométriques existantes a permis de mettre en place une méthodologie à travers de la modélisation numérique dans le but de définir la localisation de l'implantation des piézomètres. Au total, 37 piézomètres seront installés sur le littoral normand permettant de couvrir les territoires vulnérables aux risques de salinisation et d'inondation par débordement de nappe. Ces piézomètres seront équipés de sonde de pression, de conductivité et de température. L'objectif de ces piézomètres est d'acquérir de la donnée à travers ces sondes et des différentes analyses (physico-chimiques) qui seront réalisées lors des campagnes de terrain.

À ce jour, l'état d'avancement pour chaque communauté de communes est le suivant :

- CC Coutances, Mer et Bocage : Cahier des charges en cours d'élaboration.

- CC Côte Ouest Centre Manche : Consultation des entreprises en cours (Cahier des charges validé).
- CA Le Cotentin : Consultation des entreprises en cours (Cahier des charges validé).
- CC Baie du Cotentin : Consultation des entreprises effectué (début des travaux prochainement).
- CA Caen-la-mer : Cahier des charges en cours d'élaboration.

L'ensemble des informations et interprétations obtenues à partir des analyses de terrain et des travaux de modélisation sur ces sites vont permettre de réaliser une transposition des modèles sur d'autres sites comportant des similitudes en termes de géologie, géomorphologie, morphologie du trait de côte. Les cinq sites de référence avec leurs similitudes mais aussi leurs différences notables vont permettre d'investiguer une gamme de site relativement représentative des sites sur lesquels la transposition des modèles numériques pourra être réalisée (Figure 33).

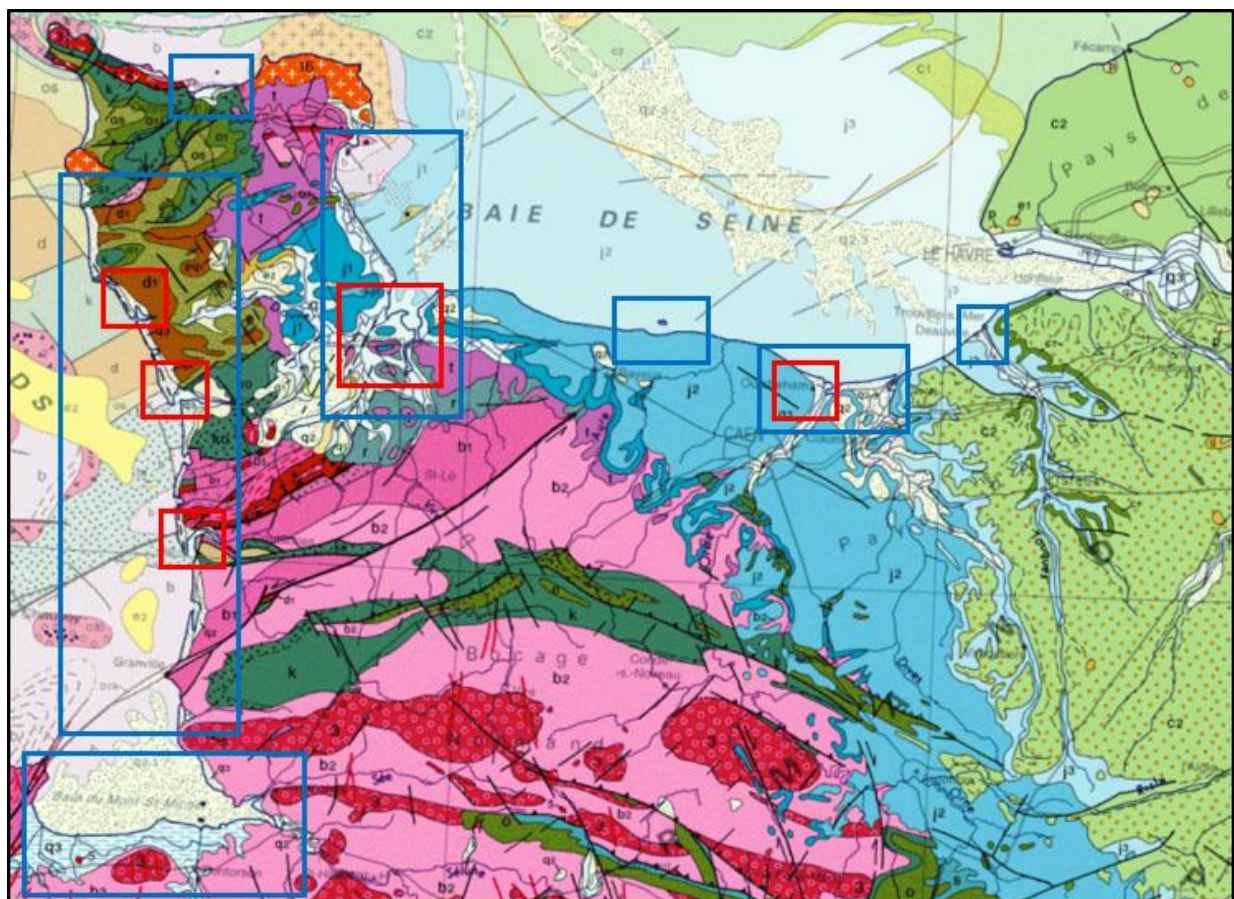


Figure 33 - Représentation des sites d'étude (rectangle rouge) et des sites de transposition (rectangle bleu)

## 6 REFERENCES

- [1] La Banque du sous-sol (BSS) : <https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>
- [2] Piézomètre de Gouville-sur-Mer : <https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?code=01423X0044/F4>
- [3] Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES) : <https://ades.eaufrance.fr/>
- [4] AquaNES : <http://aquanes.eu/Default.aspx?t=1593>
- [5] JPI Water Etiban : <http://www.waterjpi.eu/about-us>
- [6] Subsurface Monitoring Device :  
[http://aquanes.eu/UserFiles/files/13\\_Subsurface%20Monitoring%20Device%20Real%20time%20monitoring%20of%20the%20dynamic%20of%20salt%20waterfresh%20water%20interface%20.pdf](http://aquanes.eu/UserFiles/files/13_Subsurface%20Monitoring%20Device%20Real%20time%20monitoring%20of%20the%20dynamic%20of%20salt%20waterfresh%20water%20interface%20.pdf)
- [7] BRGM Notice : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0142N.pdf>
- [8] Niswonger, R.G., Panday, Sorab, and Ibaraki, Motomu, 2011, MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A37, 44 p.