

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/330839457>

# Le système hydrogéologique karstique crayeux des sources d'Yport (Seine-Maritime). Évolution des connaissances et exploitation de la ressource

<https://www.geosoc.fr/publication/geo...>

Article · February 2019

CITATIONS

3

READS

687

3 authors, including:



**Thierry Gaillard**

CPGF HORIZON

19 PUBLICATIONS 18 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



NEEDS project [View project](#)



KarstO'gen [View project](#)

# Le système hydrogéologique karstique crayeux des sources d'Yport (Seine-Maritime). Évolution des connaissances et exploitation de la ressource

Jean-Claude Roux<sup>1</sup>, Thierry Gaillard<sup>2</sup> et Emmanuel Hauchard<sup>3</sup>.

La petite ville d'Yport, au Nord du Pays de Caux en Normandie, est située sur le littoral de la Manche, entre Etretat et Fécamp, au débouché d'une longue vallée sèche qui entaille le plateau crayeux (Fig. 1). À 800 m à l'Est, au pied de la falaise, se trouve un groupe de sources, les « Fontaines d'Yport », émergeant sur l'estran entre les fractures de la Craie. En raison de leurs débits estimés entre 1 et 2,5 m<sup>3</sup>/s, la ville du Havre, dans les années soixante, s'est intéressée à ces sources pour déterminer leur origine, localiser le conduit karstique, en effectuer le captage et étudier les limites et la vulnérabilité du bassin d'alimentation. De nos jours, le tiers de la ressource alimentant l'agglomération havraise en eau potable provient du captage d'Yport et les études sur la vulnérabilité et la protection du bassin se poursuivent.

## La ressource en eau de la craie en Haute Normandie

### Spécificité du réservoir crayeux haut normand

Les ressources en eau potable de Haute Normandie proviennent essentiellement du réservoir crayeux du Crétacé supérieur. Ce réservoir, outre une porosité matricielle et fissurale, est affecté par le développement de vides karstiques qui sont alimentés par des pertes d'eaux superficielles diffuses ou ponctuelles : les bétoires (Rodet, 1992). Dans ce contexte hydrogéologique particulier, plu-

sieurs agglomérations sont alimentées par des sources dont l'origine karstique a été démontrée par traçages. Le long du littoral de la Manche, la craie forme des falaises abruptes et la nappe de la craie se vidange alors dans la mer, par le biais de petites résurgences que l'on peut découvrir, perchées dans la falaise ou dans les cordons de galets (Rodet, 1992).

Mais, de par leur débit exceptionnel, les « Fontaines d'Yport » constituent les sources les plus importantes du littoral crayeux du Nord, de Picardie et de Normandie (Gaillard *et al.*, 2012). Elles se répartissent en trois groupes sur le platier à 800 m à l'est de la ville. (Fig. 2). Des prises de vues aériennes nocturnes, par thermographie (IGN, 1971) ont permis de localiser la totalité des sources d'eau douce sur le platier et de vérifier l'absence d'émergences plus au large.

Les « Fontaines d'Yport », avec un débit total de 1 à 2,5 m<sup>3</sup>/s sont les secondes du littoral français de la Manche, après celles de Port en Bessin (Calvados), mais qui sont des résurgences des pertes partielles de l'Aure dans les calcaires bajociens.

### Données lithostratigraphiques

La craie présente des faciès relativement monotones en foration et difficiles à différencier, la présence de silex étant souvent le seul indice du passage d'un étage à un autre. Le littoral normand entre Etretat et Fécamp offre néanmoins un remarquable observatoire de la lithostratigraphie de la craie du pays de Caux. Au Royaume Uni, la stratigraphie de la craie a fait l'objet d'une synthèse fondée sur la stratigraphie événementielle (Mortimore *et al.*, 2001). L'intérêt de cette approche pour les hydrogéologues réside dans l'identification plus aisée des formations crayeuses sur le terrain, ne nécessitant pas la détermination des foraminifères. Ainsi, de part et d'autre de la vallée d'Yport, plusieurs niveaux repères sont identifiables. À l'ouest d'Yport, une craie dure (équivalent du Top



Figure 1. Situation géographique de la ville d'Yport. Source : carte Michelin.

1. Ancien hydrogéologue au BRGM et ancien directeur de la SGR Normandie-Picardie. Président d'honneur du Comité français d'Hydrogéologie. 100 rue de la Somme, 45160 Olivet. Courriel : j-clroux@wanadoo.fr  
 2. Hydrogéologue CPGF-Horizon. 49 av. Franklin Roosevelt, 772120 Avon. Courriel : Avon-tgaillard@cpgf-horizon.fr  
 3. Communauté de l'agglomération havraise (CODAH), et département de géologie. Université de Rouen. Courriel : Emmanuel-Hauchard@agglo-havraise.fr

Rock ?) et un niveau dédolomitisé constituent la craie rousse de la pointe de Chicard (Fig. 3). Une série de hard ground coalescents, ci dénommé hard ground de la pointe du Chicard (Cf. Hard-ground Banc à Caves de Juignet et Breton, 1997) surmonte la craie sableuse et est lui-même surmonté par un hard ground bien marqué et isolé marquant le passage au Coniacien. Deux doubles lits de silex (Hoyez, 2008) sont identifiables sur le tiers inférieur de la masse crayeuse. Au milieu de la falaise, deux autres niveaux repères se distinguent : le niveau à silex bathichnus<sup>4</sup> et un joint de craie marneuse se délitant en plaquettes, très bien marqué entre Yport et Fécamp. La craie de la Pointe de Chicard constitue un horizon karstogène majeur de la craie normande (Gaillard et Hauchard, 2018), qui explique l'importance du drainage souterrain au droit d'Yport.

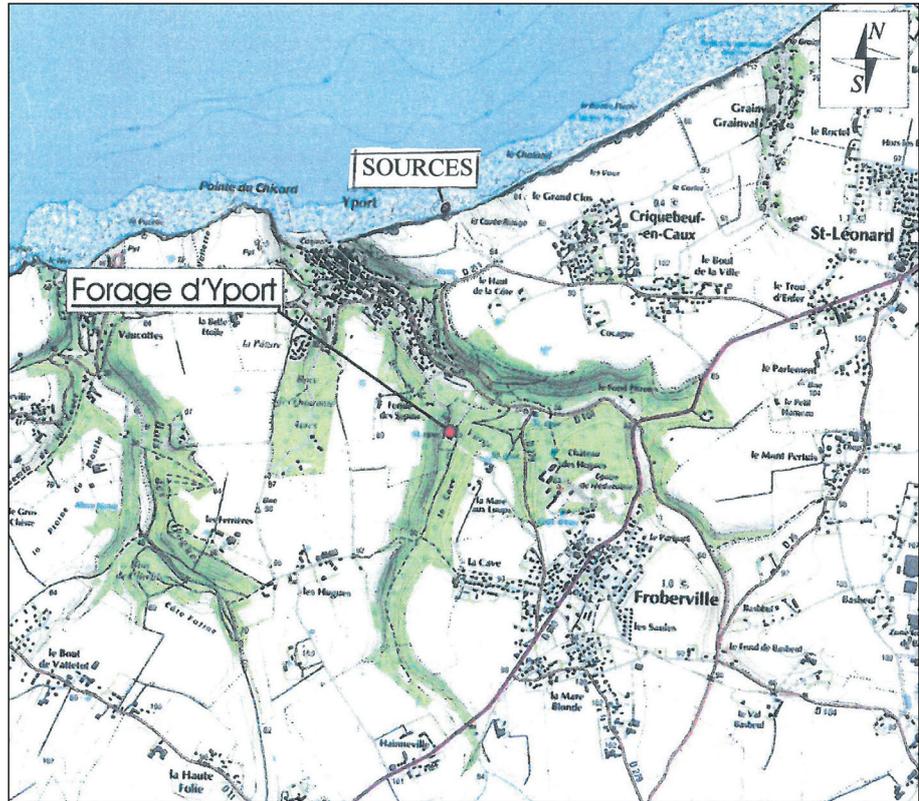


Figure 2. Vallées sèches d'Yport. Source : travail original pour cet article.

Données structurales

À la limite entre les blocs cadomien et rhéno-hercynien, le Pays de Caux est plus particulièrement affecté

par trois familles de fractures : une famille de direction N150-160 et N120-130 (origine armoricaine), une famille de direction N30-N50 (origine varisque), et une famille de direction N90-N100 (Hauchard et Laignel, 2008). L'étude

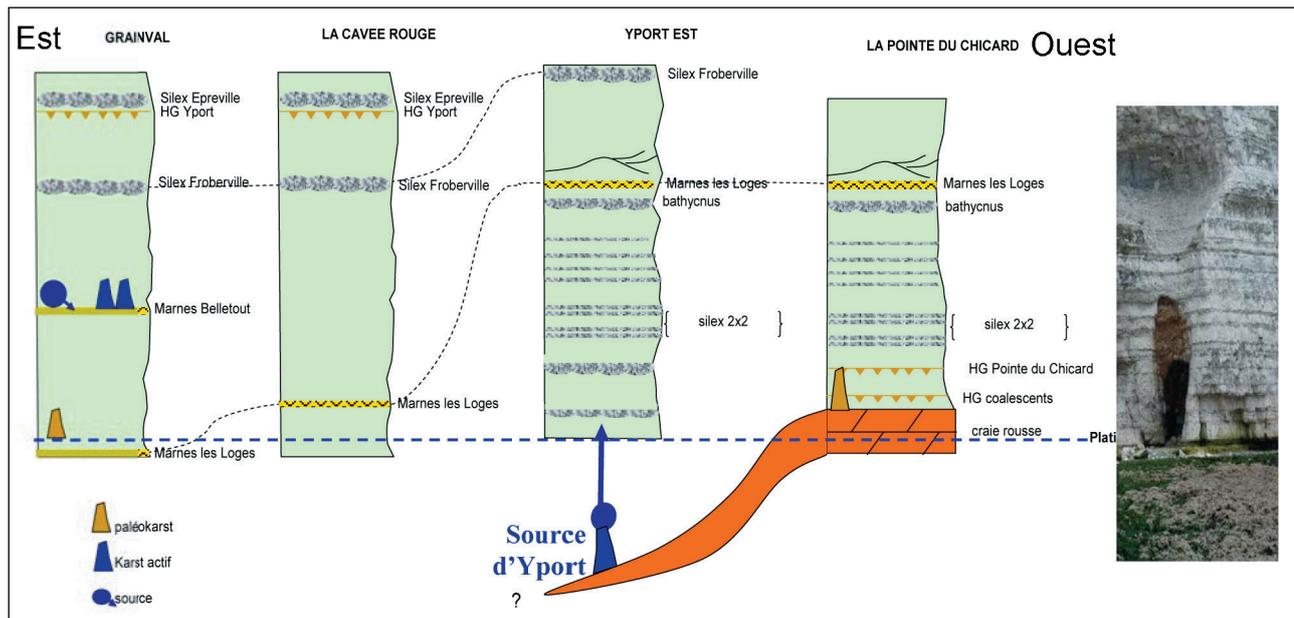


Figure 3. Karst et stratigraphie de la craie de la baie de Criquebeuf. Source : T. Gaillard 2012.

4. Bathichnus paramourdae : formes cylindriques, siliceuses, disposées verticalement dont l'origine semble faire débat : terriers verticaux, échappement de fluide ?

de la fréquence d'apparition des groupes de direction, relevés sur 274 alignements identifiés, confirment le rôle des directions tectoniques majeures (Fig 4) :

- 16,42 % orientés N32° à N44°, conforme à la direction N40 relevée sur le platier ;
- 10,95 % orientés N48° à N60° ;
- 14,96 % orientés N89° à N100°, conforme à la direction N90 relevée sur le platier ;
- 11,3 % orientés N154° à N173°, conforme à la direction N140 relevée sur le platier.

Deux failles importantes : faille de Lillebonne-Fécamp (la plus connue) et faille du Moulin-Yport (Gaillard et Posiadol, 2013) plus à l'ouest, de directions moyennes SSE - NNO, traversent le Pays de Caux de la vallée de la Seine à la Manche. Ces accidents déterminent une zone synclinale N120/130 et créent des conditions favorables pour la concentration des écoulements vers Yport, au sein de l'horizon karstogène de la craie rousse de la Pointe de Chicard.

### Fonctionnement de l'hydrosystème

La formation des karsts du Pays de Caux doit ainsi son origine, à la fois, à des facteurs structuraux (relèvement du bloc du Pays de Caux) et à des facteurs stratigraphiques. Dans ce contexte, les émergences d'Yport se démarquent des autres sources du littoral, à la fois par leur position topographique et leurs débits.

En effet, du point de vue structural, le karst d'Yport draine le synclinal N120/130 au sein d'une unité de drainage qui s'appuie sur le niveau de craie sableuse. L'induration de la craie (Top rock) semble aussi jouer un rôle dans la mise en place du karst en limitant la karstification en profondeur. La craie rousse d'Yport supporte vraisemblablement, au moins localement, le karst d'Yport. Enfin, au-dessus du karst principal, des niveaux marneux jouent un rôle majeur, malgré leur faible épaisseur, en soutenant un épikarst dont les émergences perchées s'étalent le long de la falaise de Grainval, plus à l'est. Le karst d'Yport fonctionne donc comme un karst ouvert sur la mer, comprenant des niveaux d'eaux perchés au-dessus du drain principal, et dont les limites dépendent de la structure faillée du grand synclinal N120-130.

## Le captage des sources d'Yport

### Historique de la recherche du karst

Au début des années 1960, les besoins en eau potable de l'agglomération havraise étaient entièrement couverts à partir de ressources souterraines (les sources de Saint-Laurent-de-Brévedent, les sources de Rouelles, et

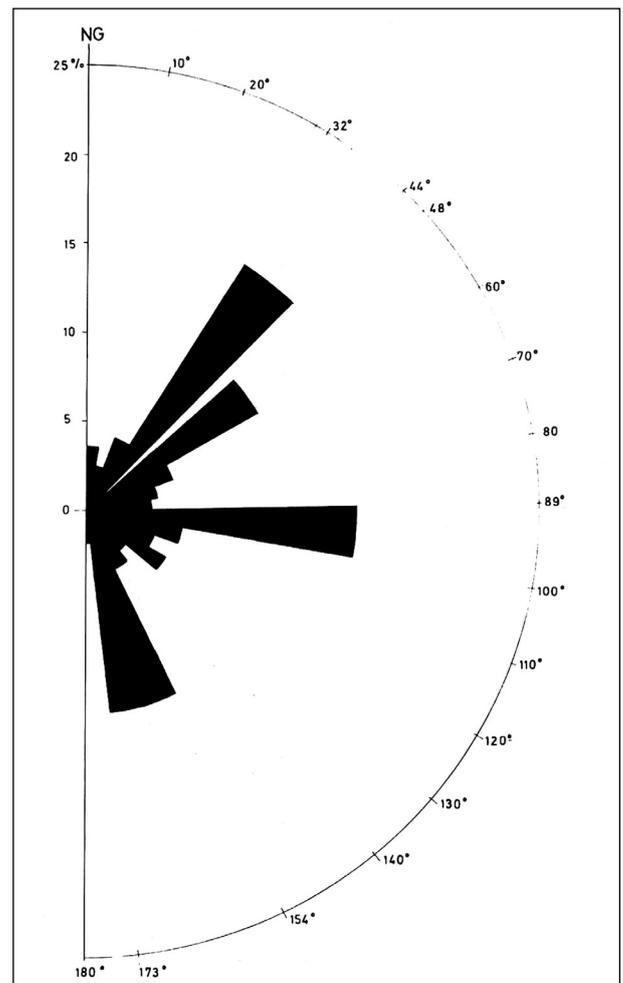


Figure 4. Relevé des directions des linéaments. Source : Hauchard et Laignel, 2008.

les sources et forages de Radicatel). Ces différents captages permettaient de satisfaire les besoins en eau de l'époque ; cependant, les services techniques de la ville du Havre, avant même la mise en service des forages de Radicatel, se préoccupaient, dans un souci de sécurité, de rechercher des ressources complémentaires et s'intéressaient aux sources d'Yport distantes d'une trentaine de kilomètres à l'Est.

La ville fit alors construire des murets et des déversoirs autour des deux principaux groupes d'émergences d'Yport, afin d'en mesurer les débits (Fig.5). L'idée première était de capter le conduit karstique à l'intérieur de la falaise, afin d'une part, de le protéger des assauts de la mer et des éboulements, et d'autre part de pouvoir pomper à marée haute si nécessaire.

En 1964-1965, un puits est creusé dans la falaise, sous le contrôle du BRGM, à partir de la galerie d'amenée de la conduite d'eau du captage d'Yport. L'idée était de recouper les conduits karstiques. Une fissure bourrée d'ar-

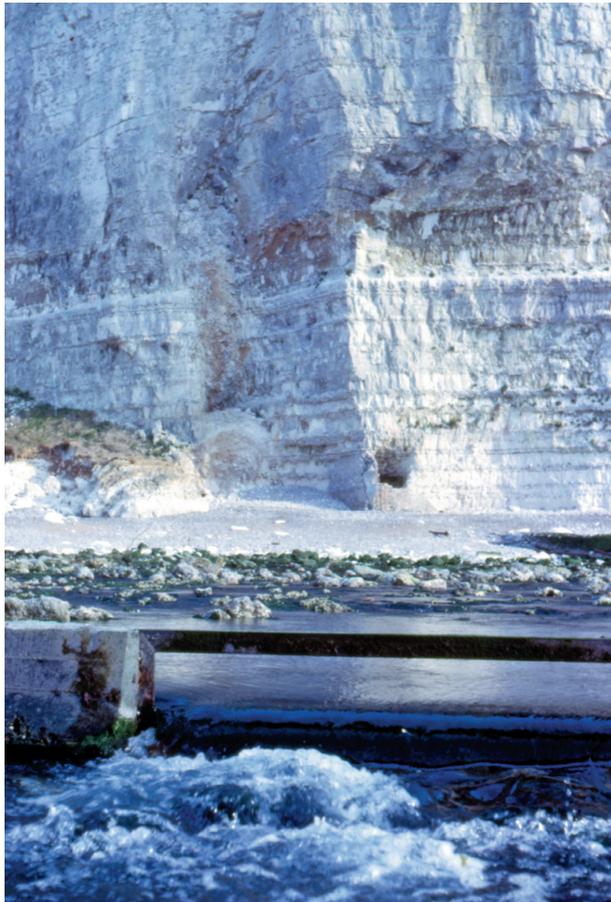


Figure 5. Déversoir de jaugeage des sources en 1967. Source : J.-C. Roux.

gile est mise en évidence dans un plan de diaclase, mais le conduit actif n'est pas rencontré. Des sondages légers exécutés sous la falaise et sur la plage ne donnent que des débits minimes.

Une reconnaissance par plongée effectuée dans le captage d'Yport par le BRGM en août 1967 confirme l'existence d'un conduit s'enfonçant sous la falaise avec une pente de 30°, mais pénétrable sur seulement 10 à 12 mètres, car obstrué au-delà.

On remarque alors que la superficie du bassin topographique est de 18 km<sup>2</sup> et que le débit total des sources mesuré aux déversoirs est compris entre 600 et 1 500 l/s. La comparaison du débit de ces sources avec les débits spécifiques moyens des rivières du Pays de Caux conduit à envisager une dimension de bassin souterrain beaucoup plus étendu.

Une première carte piézométrique démontre alors que la superficie du bassin hydrogéologique est de l'ordre de 90 km<sup>2</sup> (Roux *et al.*, 1968 ; Roux *et al.*, 1977).

À partir de 1969, de nouvelles recherches sont confiées par la ville du Havre à BURGÉAP dans le bassin

d'Étretat, plus proche du Havre. Ce bassin connaît lui aussi un écoulement majeur : la rivière d'Étretat, visible à marée basse (Archambault *et al.*, 1978). Six forages sont réalisés dans l'axe de la vallée sèche principale, mais les résultats sont médiocres avec des débits de 1 à 30 m<sup>3</sup>/h par ouvrage, et une moyenne de 7 m<sup>3</sup>/h.

En 1970, les recherches s'orientèrent donc de nouveau vers le bassin d'Yport. Un premier forage exécuté au sud du bourg, dans une vallée sèche secondaire, donne un très bon résultat avec un débit de 190 m<sup>3</sup>/h pour un rabattement de 0,30 mètre. Une campagne de géophysique réalisée dans la vallée sèche principale et certaines vallées adjacentes, aboutit à l'implantation de trois nouveaux forages. Elle permet de localiser des anomalies conductrices pouvant correspondre à des zones de fissuration de la craie. Les débits obtenus étaient compris entre 85 et 275 m<sup>3</sup>/h (Archambault, 1978).

Le forage S, au lieu-dit « le Bois de la Vierge » donne d'excellents résultats avec un débit de 275 m<sup>3</sup>/h pour 0,05 m de rabattement. L'année suivante, un nouveau pompage d'essai sur cet ouvrage mettait en évidence un débit potentiel de 850 m<sup>3</sup>/h (limite d'évacuation des eaux d'exhaure) pour 0,33 mètre de dénivellation stabilisée, et un pompage de courte durée à 1100 m<sup>3</sup>/h, ne provoquait qu'un rabattement de 0,90 mètre. L'eau était de bonne qualité physico-chimique et ne montrait aucune trace de contamination par l'eau de mer. Le secteur d'Yport apparaissait donc comme extrêmement favorable, et susceptible de produire une part importante des besoins futurs de la ville du Havre estimés à 50 000 m<sup>3</sup>/j.

Cependant, pour tenter une nouvelle fois de se rapprocher du Havre, une seconde campagne de forages de reconnaissance fut lancée dans les vallées d'Étretat, après une campagne complémentaire de géophysique. Mais aucun des 6 forages exécutés n'ayant donné de résultat positif, les travaux reprirent définitivement dans la vallée d'Yport. De janvier à mai 1974, des pompages par paliers de débits croissants d'une durée totale de 79 jours, effectués sur un puits d'essai, permettent de prélever jusqu'à 2 200 m<sup>3</sup>/h (52 800 m<sup>3</sup>/j) pour une dénivellation de l'ordre de 2 mètres, le débit de pompage n'étant limité que par la capacité d'évacuation des eaux d'exhaure.

### Caractéristique du puits du « Bois de la Vierge »

Le puits d'exploitation du Bois de la Vierge (Fig.6) a rencontré un vide karstique de près de 6 mètres de hauteur. Le plan de tubage a dû être adapté aux risques géotechniques d'effondrement. Le forage, avec parois en béton, a été mis en place au centre de cette cavité. Il descend à une dizaine de mètres sous la base du conduit karstique.

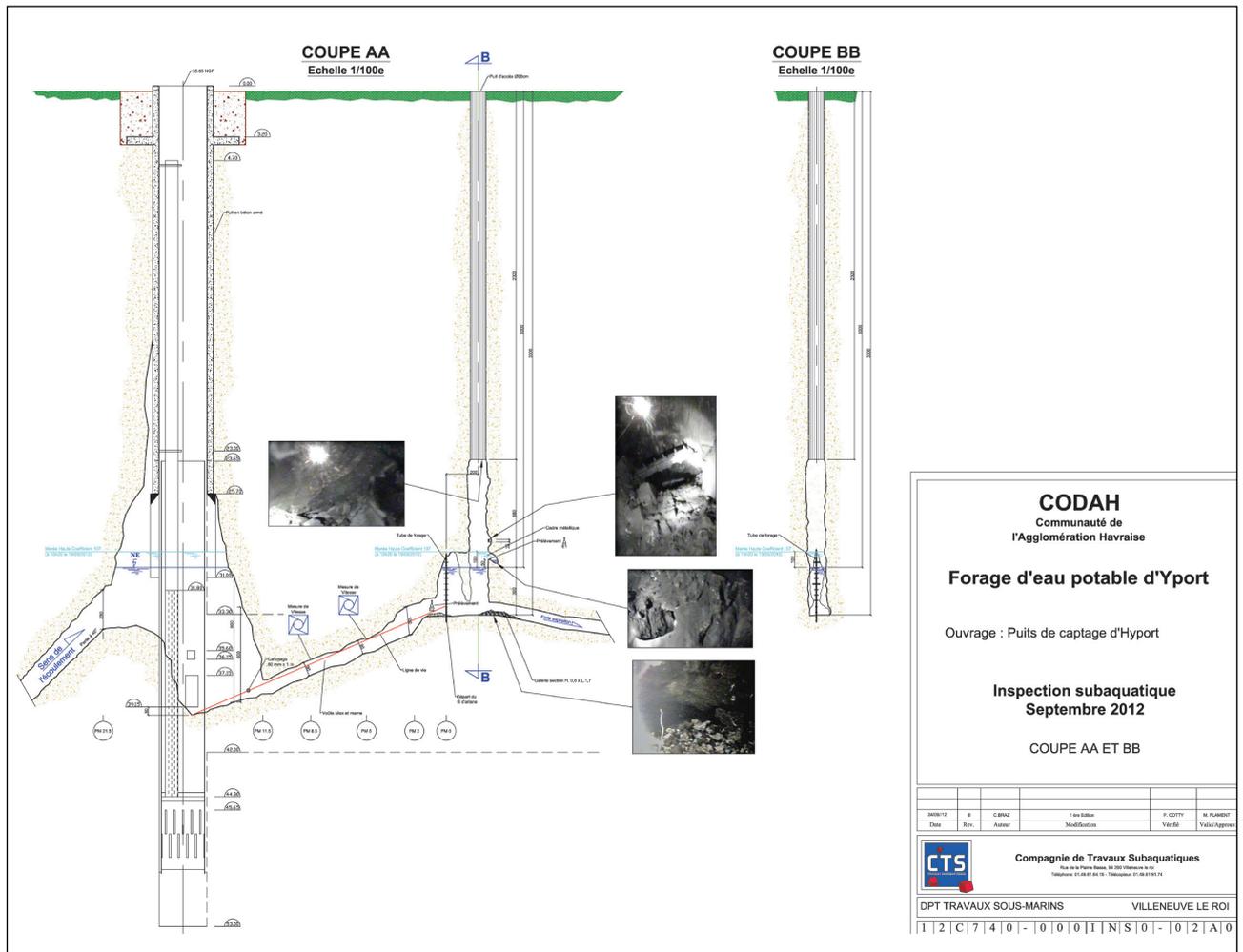


Figure 6. Coupe technique du puits du « Bois de la Vierge ». Source : CODAH/Direction Cycle de l'eau.

La base du forage a été remplie de béton sur 4 mètres de hauteur puis de 6 mètres de gravas permettant d'arriver à la base du conduit karstique, le tout étant recouvert d'un laitier de ciment. Au niveau du conduit karstique, quatre ajutages dans la paroi bétonnée de 0,5 m x 0,5 m et quatre ajutages de 0,8 m x 2 m ont été réalisés afin de permettre le passage de l'eau dans le cuvelage.

À l'intérieur de ce cuvelage, trois tubes acier inox ont été mis en place et se terminent par une partie crépinée au niveau du conduit. A partir du premier puits de captage, le karst a été exploré par les plongeurs spéléo de Paris. Il est composé de deux chambres et d'un boyau sur 130 mètres. La base du conduit karstique étant à la cote -6 NGF, le karst se trouve en position de drainage de tout le massif crayeux.

Trois pompes d'une capacité de 650 m<sup>3</sup>/h à 85 m de HMT<sup>5</sup> ont été installées. Ces pompes fonctionnent avec des variateurs de fréquence qui permettent de faire varier leur débit. Elles sont toutefois principalement utilisées

à débit fixe. Il existe également un dispositif anti coups bélien en cas de refoulement lors des séquences marche/arrêt. En temps normal, deux pompes fonctionnent en permanence et une est utilisée en secours.

Le forage et l'usine de traitement des eaux d'Yport ont été réalisés en 1993-1994. Toutefois la mise en œuvre opérationnelle ne s'est faite qu'en 1998 après la réalisation du réservoir de stockage des eaux intermédiaires entre l'usine de production et la ville du Havre.

### Périmètres de protection du captage

Il est apparu dès les premières études (cf. § 2.1) que le bassin topographique des sources d'Yport ne pouvait pas expliquer l'importance des débits des émergences, étant donné sa superficie. Les cartes piézométriques de la Pointe de Caux mettent en évidence le fait que le bassin hydrogéologique des sources d'Yport capture la vallée de l'Étretat et couvre une superficie de 90 km<sup>2</sup> (Roux et Laubiès, 1986). En février 1973, un traçage effectué dans le forage

5. Hauteur Manométrique Totale.

par le BRGM confirme sa relation avec les « Fontaines d'Yport » distantes de 1 500 mètres, avec une vitesse d'écoulement de 260 à 290 m/h.

Entre 1974 et 1977, des traçages qualitatifs à la fluorescéine à partir de pertes ou bétoires de l'arrière-pays (Gerville, Goderville, Bretteville-du-Grand Caux) confirment l'extension du bassin d'alimentation souterrain des Sources d'Yport et la capture du bassin d'Étretat, avec des vitesses moyennes d'écoulement de 120 à 200 m/h sur des distances atteignant jusqu'à 10 kilomètres.

Sur la base de ces études et d'une première carte de vulnérabilité, deux périmètres de protection, rapproché et éloigné, et leurs servitudes ont été définis par les hydrogéologues agréés, en 1982, puis institués en 1985, pour un prélèvement de 50 000 m<sup>3</sup>/j (Fig. 7).

Ils sont destinés à couvrir l'ensemble du bassin d'alimentation du captage, connu à cette date.

### Actualisation des connaissances

Le classement Grenelle du forage d'Yport a motivé la réactualisation des connaissances hydrogéologiques acquises dans les années 1970-1980.

De nouvelles cartes piézométriques, plus détaillées, ont été établies. Une carte produite par le BRGM en 2011, basée sur la moyenne des niveaux de Basses eaux 2006/Hautes eaux 1992, a été jugée la plus représentative. Elle délimite un bassin d'alimentation de 188 km<sup>2</sup>.

Toutes les cartes réalisées depuis 1970, mettent bien en évidence un couloir de drainage, orienté sensiblement Sud-Nord, ou Sud-Sud-Est / Nord-Nord-Ouest, aboutissant aux sources d'Yport.

Sur les bases des limites de ce bassin, des nouveaux traçages ont été réalisés (Houquetot, Milleville, Ecrainville, Bretteville, Saussezemare, Fouguesemare, Epreville). Tous sont positifs et indiquent que les vitesses de transfert vers le captage d'Yport sont comprises entre 150 et 400 m/h. Ces relations sont unidirectionnelles.

Deux autres traçages à Nointot (346 m/h) et Bolbec (442 m/h), mettent encore en évidence une extension du bassin d'alimentation vers le Sud-Est, au-delà de la crête piézométrique (Fig. 8).

On remarque également que l'ensemble du réseau de drainage est bien structuré et mature puisqu'en dépit de la dispersion des points d'engouffrement sur l'ensemble du bassin d'alimentation, la circulation souterraine converge vers le drain principal intercepté par le forage. Cette caractéristique rend ce dernier particulièrement vulnérable aux pollutions ponctuelles.

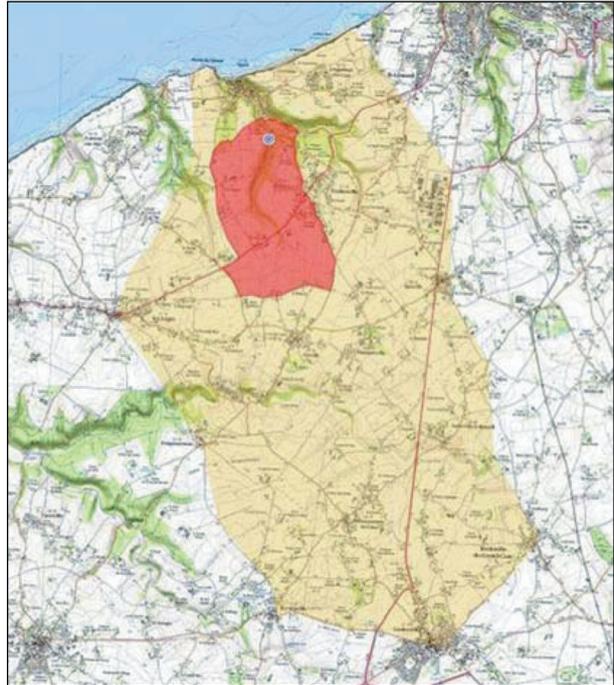


Figure 7. Périmètres de protection actuels du captage d'Yport. Source : CODAH/Direction Cycle de l'eau/Scan 25 IGN.

En mai 2012, une pollution de N-Nitromorpholine (NMOR), d'origine industrielle, contamine la rivière de Bolbec, affluent de rive gauche de la vallée du Commerce. Elle est détectée en faibles traces sur le captage d'Yport (Hauchard *et al.*, 2014). Un traçage dans le cours d'eau met en évidence sa relation avec le captage d'Yport, avec une vitesse de transit de plus de 400 m/h.

Enfin, fin 2012, un traçage a été effectué depuis une perte, à Mirville près de Bolbec, située exactement sur le tracé de la faille Lillebonne-Fécamp. La vitesse observée était de 446 m/h avec un taux de restitution de 50 %, alors que depuis les pertes de la rivière de Bolbec, ce pourcentage n'était que de 1,6 % (Fig. 9).

Il en résulte que le bassin d'alimentation des sources d'Yport et du forage de la CODAH doit également prendre en compte le haut bassin de la rivière du Commerce.

Les deux grandes failles du Pays de Caux jouent donc un rôle majeur dans le système hydrogéologique des « Fontaines d'Yport ». Le synclinal situé entre les deux, large de 5 km et long de 40 km, se comporte comme un axe de drainage.

La superposition du bassin continu déterminé par la piézométrie (188 km<sup>2</sup>) et du bassin discontinu, déterminé par les traçages (140 km<sup>2</sup>) révèle que la superficie globale du bassin d'alimentation des sources d'Yport serait de 230 km<sup>2</sup> (Fig. 10).

## Vulnérabilité de l'aquifère : prévention des pollutions du karst

Les études hydrogéologiques ont démontré la grande extension et l'extrême vulnérabilité du bassin karstique (Roux et Holé, 1978, Gaillard et Posiadol, 2013). La plupart des thalwegs secs est constellée de points d'engouffrement (bêtoires) qui vont faciliter l'introduction dans le réseau karstique des écoulements de surface avec leur cortège de polluants. C'est la raison pour laquelle dans le cadre de l'étude de bassin d'alimentation de captage menée par la CODAH, le recensement des points d'engouffrement a été réalisé afin de compléter la connaissance des sources de pollutions ponctuelles potentielles ou existantes. En effet de nombreux rejets de stations d'épurations, de lagunages ou encore de réseaux de gestion des eaux pluviales finissent dans ces bêtoires. Par ailleurs plusieurs axes de circulation importants sillonnent le bassin d'alimentation et les déversements accidentels constituent une menace bien réelle.

Au moins 200 gouffres ou bêtoires ont été recensés à la surface du bassin.

La CODAH a d'ores et déjà entrepris la réalisation de travaux pour protéger son forage en traitant par exemple des points d'engouffrements. Des massifs filtrants peuvent ainsi être mis en place au niveau de centaines de bêtoires afin de favoriser la décantation et la filtration des eaux de ruissellement. Ponctuellement des ouvrages hydrauliques plus importants comme des ouvrages

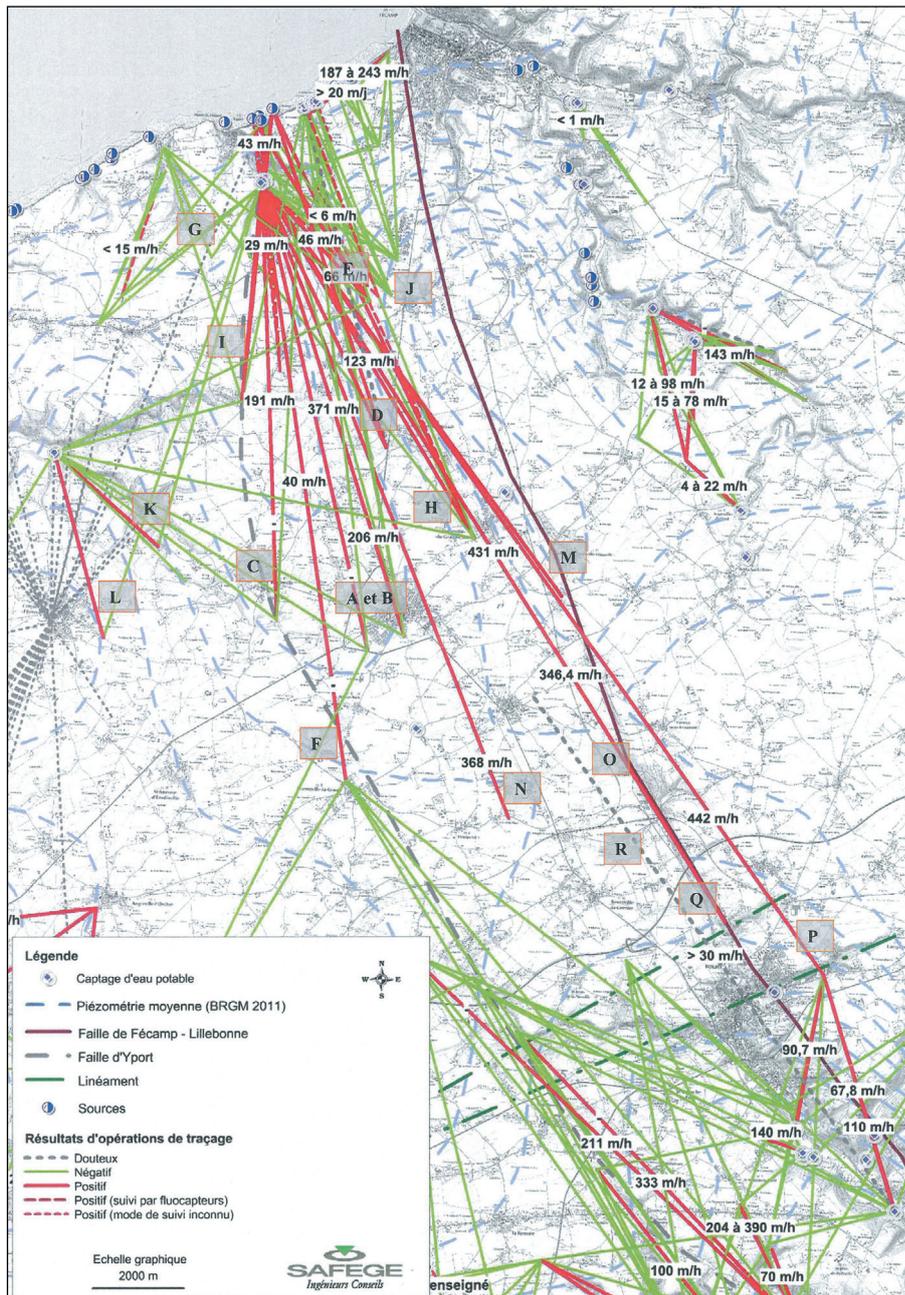


Figure 8. Résultat des opérations de traçages. Source : SAFEGE, 2018.



Figure 9. Restitution en mer (Yport) du traçage effectué au gouffre de Mirville. Source : IDDEA, 2012.

de rétention avec débourbeurs-déshuileurs peuvent également être réalisés.

Par ailleurs, dans le cadre de la démarche « Grenelle », plusieurs difficultés ont été soulevées :

- la première a trait à la définition de la vulnérabilité et à la méthodologie pour l'appréhender en contexte de milieu à triple porosité ; une approche dissociant la matrice (fondée sur la piézométrie) et les circulations rapides (fondée sur le recensement des bétoires et les traçages) a abouti à l'élaboration de deux cartes de vulnérabilité différentes (Gaillard et Posiadol, 2013) ;
- la vulnérabilité matricielle peut expliquer l'évolution lente des teneurs en nitrates et la persistance de la déséthyl atrazine ;
- la vulnérabilité karstique, à l'origine de l'introduction dans le karst de produits phytosanitaires liés au ruissellement (AMPA<sup>5</sup>, atrazine non détectée depuis 2004) ;
- la seconde est liée à la possibilité d'une contribution d'un ou deux niveaux perchés au-dessus des marnes du Coniacien, partiellement recoupés par le retrait du trait de côte qui serait alors à l'origine des sources perchées de Grainval. Dans ce cas, le bassin matriciel s'étendrait latéralement tant vers l'Est que vers l'Ouest.

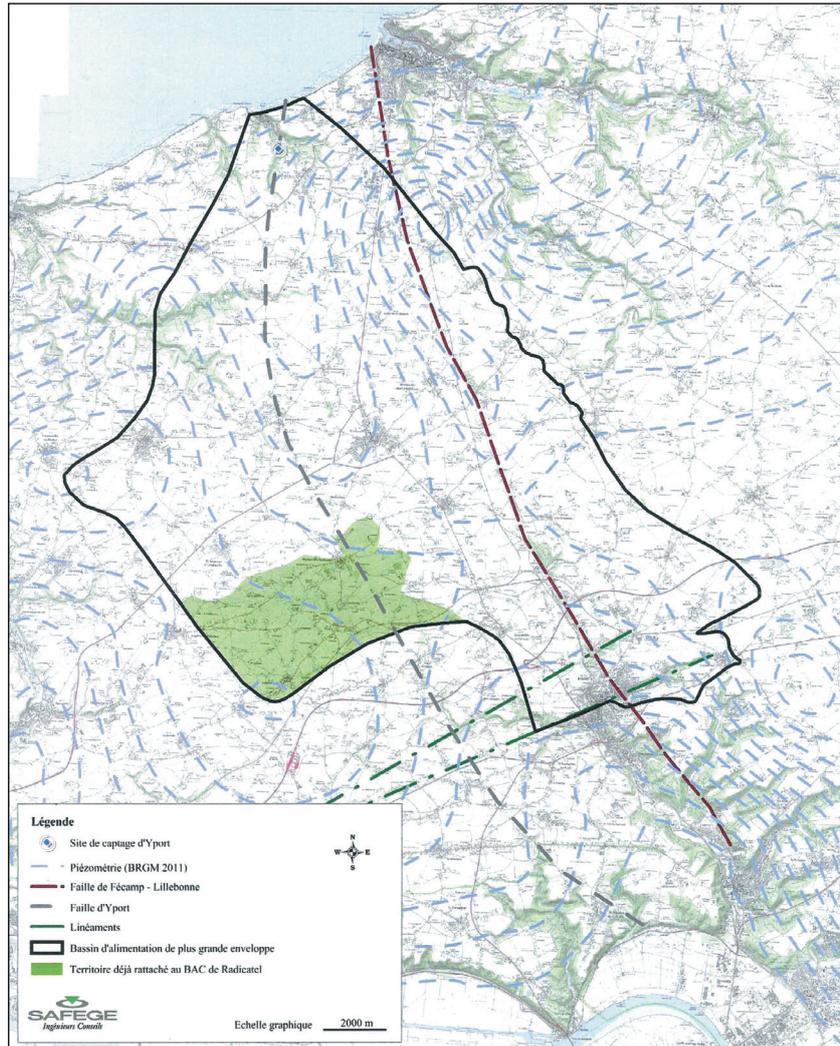


Figure 10. Bassin d'alimentation global des sources d'Yport. Source : SAFEGE, 2013.

dessous de 4,5 m NGF alors que la base du conduit karstique est à -6 m NGF. Le karst reste donc en pression par rapport à la Manche.

## Exploitation de la ressource en eau

### Relation karst-niveau de base

Le niveau de l'eau dans le forage est très bien corrélié avec celui du niveau de la Manche. La montée ou la descente du niveau d'eau dans le forage sont très légèrement décalées avec un léger retard par rapport au niveau de la mer. Le niveau de marnage dans le conduit est proportionnel au niveau de marnage de la mer. Ainsi à une variation du niveau de la mer de 3,5 m correspond une variation du niveau d'eau dans le forage de 2 mètres, tandis qu'à une variation du niveau de la mer de 7 m correspond une variation du niveau d'eau dans le forage de 3,5 m. Le niveau d'eau dans le forage ne descend jamais en

### Qualité des eaux

La conductivité varie entre 413 et 595  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Elle est tributaire des apports d'eau de surface dans le réseau karstique. Lors des épisodes pluvieux importants les eaux de surface moins chargées en minéraux font alors chuter cette conductivité tandis qu'on observe corrélativement une hausse de la turbidité.

En ce qui concerne la qualité physico-chimique des eaux, la température est constante avec une moyenne de 12,6°, et le pH varie autour de 7,3. Les teneurs en ions Ca et Cl sont également très stables avec des moyennes respectives de 96,4 mg/l et 28 mg/l. Pour les chlorures, le maximum analysé à Yport est de 33,7 mg/l. Par compa-

5. Acide aminométhylphosphonique a deux origines : agricole, en tant que métabolite du glyphosate ou non agricole, en tant que métabolite des aminométhylène-phosphonates, utilisés dans les systèmes de réfrigération et de refroidissement des moteurs, de traitements des eaux de refroidissement, les détergents industriels et domestiques, les lessives.

raison, les taux maximum sur les deux autres ressources importantes de la CODAH (source de Saint-Laurent et de Radicatel) sont respectivement de 37,8 mg/l et de 27 mg/l ; or, ces deux bassins ne sont pas sur le littoral. Ce constat démontre l'absence de contamination saline quoique que les griffons du karst soient sous le niveau moyen de la Manche. L'exploitation du conduit karstique au débit de 1 100 m<sup>3</sup>/h et 11 000 m<sup>3</sup>/jour n'a jamais provoqué d'intrusion d'eau marine. La turbidité moyenne de l'eau est de 16 NTU<sup>6</sup> mais des pics de 350 NTU sont survenus suite à des épisodes pluvieux exceptionnels (cf. § 5.3).

Les teneurs en nitrates semblent avoir légèrement augmenté (proches de 26 mg/l en 1978), mais restent stables sur la dernière décennie, avec une moyenne de 35,2 mg/l et des pointes approchant 40 mg/l. En ce qui concerne les pesticides (principalement Atrazine et Déséthyl Atrazine), ceux-ci sont présents en bruit de fond avec de rares dépassements ponctuels des normes autorisées. En revanche, on note la présence systématique de l'Aluminium (4 100 µg/l) et du Fer total (58 500 µg/l). Ce phénomène est naturel et lié à la minéralisation des argiles. La présence de Trichloro-éthylène et de Tetrachloro-éthylène a été détectée par deux fois. Il s'agit certainement d'une pollution ponctuelle accidentelle d'une station d'épuration.

### Transports solides dans le karst

La turbidité observée aux exutoires karstiques a deux origines potentielles : soit elle provient du transport direct depuis l'introduction d'eaux de ruissellement déjà chargées en particules, soit elle correspond à la remobilisation de dépôts intra-karstiques sous l'effet des transferts de pression (Fournier *et al.*, 2007). Les sources de sédiments mobilisables à l'origine de la turbidité sont : soit d'origine allochtone par rapport au karst dans ce cas elles proviennent de sédiments érodés sur les plateaux et engouffrés au niveau des bétoires (pertes) avec les eaux de ruissellement, soit autochtones et dans ce cas elles sont issues de stocks déjà présents dans le karst (Lacroix *et al.*, 2000). Dans ce dernier cas les sédiments sont originaires soit de la surface et sont stockés pendant une certaine période dans le karst puis remobilisés sous certaines conditions hydrodynamiques, soit de résidus de l'altération de la craie.

L'exemple du mois de décembre 2011 illustre très bien ce mode de fonctionnement (Fig. 11). Avec une pluviométrie exceptionnelle (186,4 mm contre 78,9 mm pour une normale) deux événements hydrologiques (l'un de 50,3 mm du 4 au 6 décembre et l'autre de 72,2 mm du 12 au 16 décembre) ont provoqué l'apparition de deux pics

de turbidité au forage d'Yport, le premier de 117,34 NTU et le second de 307,8 NTU.

Après une phase de concentration des ruissellements en surface (sur les terres agricoles limoneuses des bassins versants, laissées à nue en période hivernale) l'engouffrement se produit au niveau de plusieurs dizaines de bétoires situées dans les fonds de thalwegs secs en amont du captage (jusqu'à 10-12 km en amont) et les eaux turbides sont ensuite très rapidement transférées au niveau du conduit karstique principal, comme en atteste la montée brutale des deux pics de turbidité.

Les eaux sont traitées sur le site de production et le mode de traitement de la turbidité et des pesticides est le suivant :

- pour une turbidité < 15 NTU : injection en continu de charbon actif en poudre, injection de chlorure ferrique et de polymères. L'ensemble passe ensuite sur des filtres bicouches sable/anthracite. Enfin l'eau est désinfectée au chlore.
- pour une turbidité > 15 NTU le traitement est globalement le même. Toutefois, avant de passer sur les filtres, l'eau va passer dans un décanteur circulaire avec injection de micro-sables facilitant la décantation. Dans ce dernier cas on récupère alors des boues qui sont ensuite envoyées sur des lagunes de séchage.

Les eaux arrivent *in fine* dans une bache où elles sont reprises par trois pompes vers le réservoir intermédiaire. Au total le forage alimente 82 000 personnes.

### Bilan et perspectives

Depuis le début des années 1960, le système hydrogéologique des « Fontaines d'Yport » a fait l'objet d'un nombre d'études considérable réalisées par de nombreux bureaux d'étude publics et privés ainsi que par la ville du Havre. Ces sources littorales présentent la caractéristique

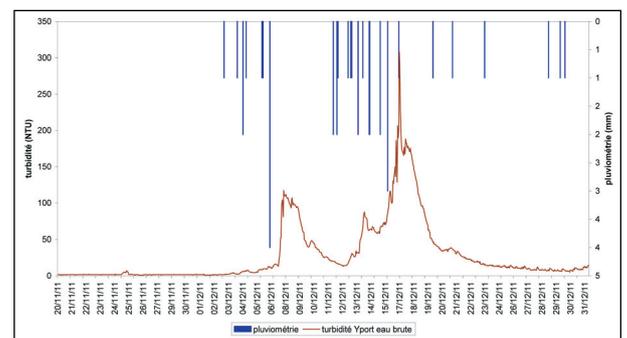


Figure 11. Relation pluie/débit (pas de temps 1 h, novembre -décembre 2011). Source : CODAH/Direction Cycle de l'eau.

#### 6. Nephelometric Turbidity Unit ou Unité standard de mesure de la turbidité.

- NTU < 5 : eau claire.
- 5 < NTU < 30 : eau légèrement trouble.
- NTU > 50 : eau trouble.

de fournir une eau douce provenant d'un karst et ne sont pas soumises à des intrusions salines. Le karst est toujours en pression par rapport à la Manche et aucun phénomène d'intrusion par un réseau de diaclases ou des conduits émissifs plus profonds, ne semble compromettre son usage.

Le captage de ce karst à l'intérieur des terres a nécessité plus de 20 ans de recherches sur le conduit karstique. Sa localisation à l'intérieur des terres a nécessité la collaboration des hydrogéologues de plusieurs organismes et la ténacité remarquable du maître d'ouvrage.

Actuellement la CODAH exploite le captage à 11 000 m<sup>3</sup>/jour. La capacité totale de production est de 25 000 m<sup>3</sup>/jour. En raison de raccordement récent, la production va monter à 15 000 m<sup>3</sup>/jour et pourrait à moyen terme passer à 20 000 m<sup>3</sup>/jour. La CODAH dispose d'une autorisation de prélèvement allant jusqu'à 50 000 m<sup>3</sup>/jour. À titre de comparaison, un pompage d'essai de longue durée a fourni une capacité potentielle de 100 000 m<sup>3</sup>/jour pour ce forage. À ce jour, il s'agit de la seule source littorale captée et exploitée pour la production d'eau potable en France, mais l'étendue considérable du bassin d'alimentation, la présence de multiples bêtouilles, points d'accès à la nappe et la relation avec la rivière de Lillebonne rendent la ressource très vulnérable aux pollutions.

### Références bibliographiques

- Archambault J., Delu R. et Fougeirol D., 1978. Recherche d'eau pour la ville du Havre dans les régions d'Étretat et d'Yport, colloque régional « Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris », Rouen 25-26 mai 1978. Document du BRGM n° 1, p. 1-4
- Fournier M., Massei N., Balakowicz W., Dussart-Baptista L., Rodet J. et Dupont J., 2007. Using turbidity dynamics and geochemical variability as a tool for understanding the behavior and vulnerability of a karst aquifer. *Hydrogeology Journal*. 15 (4), 689-704 p.
- Gaillard T., Hauchard E. et Roux J.-C., 2012. Les « Fontaines d'Yport » (Seine-Maritime). Émergences majeures du littoral normand crayeux. Exploitation et vulnérabilité de la ressource en eau. Dix-huitièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. Ressources et gestion des aquifères littoraux, Cassis, 2012.
- Gaillard T. et Posiadol, 2013. Étude du bassin d'alimentation du forage d'Yport. Délimitation du bassin d'alimentation et analyse de la vulnérabilité intrinsèque du bassin. Rapport SAFE-GE 11 NRH 006.
- Gaillard T. et Hauchard E., 2018. Les horizons karstogènes de la craie : apport de la stratigraphie aux écoulements de la Pointe de Caux (France), 22<sup>ème</sup> journée technique du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues « Hydrogéologie de la Craie », Le Havre, mai 2018.
- Hauchard E., Bretot N., Pennequin D. et David P.-Y., 2014. Un exemple de pollution industrielle à la N-nitrosomorpholine en milieu karstique, Seine-Maritime France. *« Géologues »* n° 179, p. 72-79.
- Hauchard E. et Laignel B., 2008. Évolution morphotectonique de la marge nord-occidentale du Bassin de Paris, *Z. Geomorph.* N.F. 52 4 Berlin - Stuttgart December 2008, p. 463-488.
- Hoyez B., 2008. Falaises du Pays de Caux, lithostratigraphie des craies Turono-Campaniennes, Publications des Universités de Rouen et du Havre, 350 p.
- Juignet P. et Breton G., 1997. Brèches de silex, diagénèse et déformations dans la craie de Haute Normandie (France). Flint breccias, diagenesis and deformation of the Chalk in Haute-Normandie (France). *Ann Soc Geol du Nord*, 5, (2) : 227-240.
- Lacroix M., Rodet J., Wang N. et Dupont J.-P., 2000. Origine des matières en suspension dans un système aquifère karstique : apports de la microgranulométrie. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - series IIA - Earth and Planetary Science* 330 (5), p. 347-354.
- Mortimore R.-N., Wood C.-J. et Gallois R.-W., 2001. British Upper Cretaceous Stratigraphy, *Geological Conservation Review Series*, No. 23, Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, 558 p.
- Roux J.-C. et Bassompierre P., 1968. Étude hydrogéologique des « Fontaines d'Yport » (Seine-Maritime), *Rapp. BRGM 68 SGL 084 PNO*.
- Roux J.-C. et Holé J.-P., 1978. Vulnérabilité aux pollutions du bassin hydrogéologique d'Yport (Seine-Maritime), *Rapp. BRGM 78 DSGN132 PNO*.
- Roux J.-C. et Laubiès P., 1986. Étude et procédure pour la mise en place des périmètres de protection du nouveau captage en eau potable de la ville du Havre à Yport (Seine-Maritime). *Hydrogéologie* n° 4, 1986, p. 353-364.
- Roux J.-C., Artis H. et Trémembert, 1977. Carte hydrogéologique du département de la Seine-Maritime, *in Atlas hydrogéologique de la Seine Maritime*, éd. BRGM - 1981.
- Roux J.-C., Gaillard T. et Hauchard E., 2018. Les sources littorales d'Yport : Exploitation de la ressource et vulnérabilité du bassin d'alimentation. 22<sup>èmes</sup> journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues « Hydrogéologie de la Craie », Le Havre, mai 2018.
- Rodet J., 1992. La Craie et ses karsts, Centre Normand d'Étude du Karst et des cavités du sous-sol (CNEK.), 560 p.