



**HAL**  
open science

**La qualité des eaux souterraines : processus et enjeux.  
Géologue n°179 : Un exemple de pollution industrielle à  
la nitrosomorpholine en milieu crayeux karstique,  
Seine-Maritime - France**

Emmanuel Hauchard, Nicolas Bretot, Didier Pennequin, Pierre-Yann David

► **To cite this version:**

Emmanuel Hauchard, Nicolas Bretot, Didier Pennequin, Pierre-Yann David. La qualité des eaux souterraines : processus et enjeux. Géologue n°179 : Un exemple de pollution industrielle à la nitrosomorpholine en milieu crayeux karstique, Seine-Maritime - France. Géologues, 2013, La qualité des eaux souterraines : processus et enjeux., 179. hal-02571199

**HAL Id: hal-02571199**

**<https://brgm.hal.science/hal-02571199>**

Submitted on 12 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Un exemple de pollution industrielle à la nitrosomorpholine en milieu crayeux karstique,  
Seine Maritime-France.**

**Emmanuel Hauchard<sup>1</sup>, Nicolas Bretot<sup>2</sup>, Didier Pennequin<sup>3</sup>, Pierre-Yann David<sup>4</sup>**

Une campagne nationale menée au premier semestre 2012 par l'agence nationale de sécurité sanitaire (ANSES) pour rechercher d'éventuelles nouvelles substances indésirables dans les eaux destinées à la consommation humaine, a débouché sur la détection d'une molécule de la famille des nitrosamines (n-nitrosomorpholine i.e. NMOR) dans la nappe souterraine qui alimente en eau potable les villes de Bolbec et de Gruchet-le-Valasse situées en Seine-Maritime, dans le Bec de Caux. Cette molécule ne fait pas partie des substances prioritaires (annexe 10 de la DCE) et n'est généralement pas recherchée dans le cadre des suivis réglementaires mis en place pour l'eau potable ; elle fait partie de ce qui est communément appelé aujourd'hui les « polluants émergents ». Cet article a pour objet de présenter l'apparition de cette pollution, la complexité de l'hydro-système dans lequel elle évolue, les premières actions correctives mises en place, la connaissance actuelle que nous avons de son étendue et de son évolution, les hypothèses vraisemblables sur son évolution à venir et les inconnues qui demeurent et qu'il faudra lever.

### **1. Contexte géologique et hydrogéologique régional**

La terminaison nord-ouest du bassin de Paris est constituée par un plateau crayeux karstique (Pays de Caux) d'une altitude moyenne de 100 mètres au-dessus du niveau de la mer. Ce plateau est incisé par un important réseau de thalwegs mis en place au cours du Pléistocène sous climat périglaciaire, le pergélisol favorisant les écoulements de surface. Durant les périodes interglaciaires et actuellement l'essentiel des écoulements se fait de façon souterraine au sein d'un plateau karstifié. Vallons et fonds de vallées sont totalement secs, seules les parties aval des vallées les plus encaissées sont drainées par une rivière (Fig. 1).

D'un point de vue géologique le plateau est constitué pour l'essentiel des terrains crayeux du Crétacé supérieur (Fig. 2). Se succèdent ainsi du bas vers le haut sur 150m : les sables de l'Albien surmontés de l'argile de Gault pour le crétacé inférieur, les sables verts et la craie gréseuse glauconneuse du Cénomani, les craies du Turonien, Coniacien, Santonien et Campanien pour le crétacé supérieur. L'ensemble du plateau est recouvert par des altérites à silex sur une épaisseur de 10 à 15m issues de la décalcification de la craie au cours du Tertiaire et du Quaternaire. Au-dessus de ces altérites ou mélangés à celles-ci on trouve des dépôts tertiaires (grès thanétiens et sables plio-pléistocènes) largement décapés par l'érosion et conservés à la faveur d'entonnoirs de dissolution, d'effondrements

- 
- (1) Directeur adjoint délégué, direction Cycle de l'Eau, Communauté de l'Agglomération Havraise (CODAH)/ Chercheur associé laboratoire M2C UMR CNRS 6143, dpt. de géologie, Univ. de Rouen
  - (2) IDDEA, Directeur de projets, 289 Bd. Duhamel du Monceau 45 160 OLIVET, 45 160 Olivet-RCS Orléans
  - (3) BRGM, Directeur et hydrogéologue, Direction régionale Haute Normandie, 14 Route de Houpeville, 76130 Mont St Aignan
  - (4) BRGM, Hydrogéologue Direction régionale Haute Normandie, 14 Route de Houpeville, 76130 Mont St Aignan

d'origine karstique ou tectonique. Enfin au Pléistocène l'ensemble de la région a été recouverte par des loess dont l'épaisseur est en moyenne de 3 à 4 mètres. En terme structural le plateau est parcouru par divers accidents d'origine tectonique de direction armoricaine (N120-130/N160), ou varisque (N70), mais également de direction W-E (N90-100). A ces failles principales qui parcourent le plateau sont associées de nombreuses failles secondaires, parallèles aux premières, au sein de fuseaux allant de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres de large. S'ajoutent également de nombreuses diaclases parcourant la craie augmentant ainsi la fissuration du plateau notamment sous les vallées sèches. Sur le plan hydrogéologique, on trouve principalement trois nappes sur le plateau de Caux. La nappe la plus importante, est la nappe libre de la craie que l'on retrouve principalement dans les craies cénomaniennes, turoniennes et coniaciennes. Son mur est constitué par la couche imperméable des argiles de Gault. Cette nappe constitue régionalement la principale ressource pour l'AEP. Au-dessous des argiles du Gault se trouve la nappe captive de l'Albien. Considérée comme ressource stratégique elle ne fait pas l'objet d'exploitation. Enfin il existe des nappes alluviales dans les vallées les plus importantes, dont celle de la vallée de la Seine. Globalement les vallées drainent la nappe de la craie créant ainsi des thalwegs piézométriques qui correspondent souvent, mais pas de façon exclusive aux vallées en surface. Lorsque les vallées sont suffisamment encaissées pour recouper le niveau piézométrique de la nappe de la craie, alors des sources par débordement donnent naissance à des cours d'eau en surface. Sur le littoral de la Manche, la nappe est rabattue au niveau des falaises. Au gré des variations de la stratigraphie on observe des résurgences sur la falaise, en pied de falaise sous le cordon de galet, voire sur le platier rocheux ; dans ce dernier cas certaines sont alors recouvertes par la mer à marée haute. On observe un phénomène similaire sur les falaises bordant la vallée de la Seine au sud du plateau. Il existe alors des résurgences en pied de falaise ou sous les alluvions de la Seine.

Le développement du réseau karstique dans la craie au niveau des zones fissurées (failles et diaclases) permet une circulation en grand dans des conduits dont la taille peut varier de quelques cm à plusieurs mètres pour les plus importants. Ces conduits sont en grande partie guidés par la fracturation et se situent principalement sous les vallées sèches. En l'absence de pluie ceux-ci drainent exclusivement l'eau matricielle de la nappe, par le biais d'une relation continue, matrice crayeuse, zone fissurée épikarstique, conduit karstique. Ces conduits sont reliés à la surface en zone vadose par le biais de diaclases ou de failles qui rejoignent des poches de dissolution sur la partie supérieure altérée de la craie. En surface ce sont alors des gouffres (appelés bétoires sur le plateau de Caux) qui vont absorber les ruissellements mettant en contact ces eaux très souvent chargées en MES et polluants (produits azotés, phytosanitaires) avec la nappe de la craie au sein des conduits karstiques. Une analyse de la turbidité journalière sur une série de 22 ans sur l'une des sources principales d'approvisionnement de l'agglomération havraise a montré que 94% du temps les conduits karstiques qui alimentent les sources drainent une eau matricielle, et a contrario une eau de surface le reste du temps.

Fig. 1 Carte de localisation et extension de la pollution à la N-MOR.

Fig. 2 Coupe géologique de la pointe de Caux au niveau du fossé d'effondrement bordant la faille Fécamp-Lillebonne.

## **2. La pointe de Caux et l'exploitation de la ressource en eau par l'agglomération havraise.**

La pointe de Caux, où se situe l'agglomération havraise, est séparée du reste du plateau par un accident tectonique majeur (fossé d'effondrement) d'une largeur d'environ 4km, bordé sur sa partie orientale par une faille importante (Faille de Fécamp-Lillebonne dont le rejet est de l'ordre de 120m) et sur sa partie occidentale par une faille secondaire (12m de rejet). Ce fossé d'effondrement s'étend des rives de la vallée de la Seine au sud, jusqu'au littoral de la Manche au Nord. Il est parcouru par la rivière du Commerce affluent de la Seine qui s'écoule vers le sud, tandis que plus au nord il recoupe le bassin versant de surface qui s'écoule vers Etretat, puis débouche sur la Manche au niveau de la vallée d'Yport (Fig. 1). A l'ouest de ce fossé tectonique les couches sédimentaires qui constituent la terminaison nord-occidentale du bassin de Paris se redressent très nettement faisant affleurer l'Albien et le CénoManien dans la vallée de la Lézarde qui borde la partie orientale de la ville du Havre. Plus à l'ouest les terrains jurassiques arment la base du cap de la Hève, terminaison occidentale du plateau de Caux au niveau de l'estuaire de la Seine et de la ville du Havre.

L'alimentation en eau de l'agglomération havraise repose principalement sur trois sites d'approvisionnement puisant exclusivement dans la nappe de la craie (Fig. 1). Le plus ancien, le site des sources du Saint-Laurent, se situe au niveau d'un affluent de la vallée de la Lézarde à quelques kilomètres de la ville du Havre. Il est constitué de sources et de forages situés dans la craie cénomaniennne. Le bassin d'alimentation de ces captages est de l'ordre de 100km<sup>2</sup>. La production actuelle est de 18 100 m<sup>3</sup>/jour, pour une capacité totale de 21 200 m<sup>3</sup>/jour et une autorisation de prélèvement de 46 200 m<sup>3</sup>/jour. Les deux autres ressources importantes de l'agglomération se situent toutes les deux au niveau du fossé d'effondrement qui délimite la pointe de Caux. Le premier site se trouve au sud du fossé d'effondrement en bordure de la vallée de la Seine à environ 20 km du Havre sur la commune de Radicatel (Fig. 1), (Fig. 2). Il est constitué de sources et de forages situés dans la craie turonienne. Le bassin d'alimentation de ces captages d'une superficie de 105 km<sup>2</sup> capture une bonne partie du bassin versant de surface amont et moyen de la vallée du Commerce. La production actuelle est de 18 000 m<sup>3</sup>/jour, pour une capacité totale de 55 000 m<sup>3</sup>/jour et une autorisation de prélèvement de 63 000 m<sup>3</sup>/jour. Le second site se situe à plus de 40 km du Havre sur le petit bassin versant d'Yport situé au bord de la Manche (Fig. 1), (Fig. 2). Il est constitué d'un seul forage qui recoupe un conduit karstique très important dans la craie turonienne. Le débit du conduit en charge varie autour de 2,2 à 2,5 m<sup>3</sup>/s ce qui en fait l'un des plus importants du nord-ouest de la France. Il draine un bassin d'alimentation de l'ordre de 200 km<sup>2</sup> qui capture la totalité du bassin versant de surface d'Etretat et une partie du bassin versant amont du Commerce. Le conduit karstique a pour exutoire principal une résurgence située sur le platier littoral visible uniquement par marée basse de vives eaux (Photo Fig. 1). Le forage intercepte donc ce karst à plus d'1,5km à l'intérieur des terres. La production actuelle est de 12 200 m<sup>3</sup>/jour, pour une capacité totale de 25 000 m<sup>3</sup>/jour et une autorisation de prélèvement de 50 000 m<sup>3</sup>/jour. La position de ces deux sites est étroitement liée à l'organisation structurale de la pointe de Caux et de son impact sur le fonctionnement hydrodynamique de la nappe. En effet le fossé d'effondrement a permis de conserver une épaisseur importante de craie turonienne et coniacienne (Fig. 2), ce qui explique qu'au sein de la partie la plus marquée de ce fossé d'effondrement, large de 5km et d'une longueur d'environ 40km, la puissance de la nappe de la craie soit estimée entre 90m et 180m, constituant ainsi un important réservoir. A titre de comparaison, la puissance de la nappe de la craie n'est que d'environ 30m à 90m sur le bassin d'alimentation des captages de Saint-Laurent et de moins de 30m au niveau de la ville du Havre. En outre la forte tectonisation qui affecte l'ensemble du fossé d'effondrement avec de nombreuses failles parallèles en escalier (séparant des blocs eux-mêmes plus ou moins basculés) et une importante fissuration associée favorise un drainage efficace de ce réservoir naturel par un système karstique et épikarstique particulièrement développé. Les sites de Radicatel et d'Yport constituent deux captages Grenelle. A noter également que la communauté de commune située sur le bassin versant du Commerce exploite 6 forages (Saint-Antoine, Saint-Marcel (3 forages) le Becquet, La Fontaine-Murée) produisant 7800 m<sup>3</sup>/jour, tous étant situés au sein du fossé d'effondrement dans la basse vallée du Commerce (Fig. 1).

### **3. Apparition de la NMOR, premières mesures et premières études.**

En 2011, la Direction Générale de la Sante (DGS) a confié à l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (ANSES) via son laboratoire d'hydrologie de Nancy (LHN) la réalisation d'une campagne nationale de mesures de substances émergentes dans les eaux destinées à la consommation humaine. Cette campagne d'échantillonnage a concerné environ 300 ressources réparties sur le territoire national. En mai 2012, les résultats de cette campagne ont mis en évidence des concentrations anormalement élevées en NMOR (au regard des valeurs guides existantes utilisées dans d'autres pays) sur un captage situé dans la vallée du commerce en Seine-Maritime (76) : le captage AEP du Becquet. La Nitrosomorpholine (NMOR) fait partie de la famille des nitrosamines, substances non recherchées dans le cadre du contrôle sanitaire des eaux, (absence de norme en France concernant les limites de qualité pour ces substances). Il existe cependant un intérêt croissant pour les nitrosamines en raison de leur génotoxicité et cytotoxicité: Les nitrosamines sont classées, par le Centre International de Recherche sur le Cancer, comme cancérogène possible (2A) ou probable (2B) pour l'homme.

(NDMA: classe 2A). Face à cette découverte, l'ARS de Haute-Normandie a lancé au début de l'été 2012 des investigations complémentaires sur d'autres captages AEP du secteur et sur la rivière du Commerce. En parallèle, la Direction Générale de la Santé (DGS) a saisi l'ANSES pour évaluer le risque lié i) à l'ingestion de l'eau et ii) au transfert dans la chaîne alimentaire. Les analyses réalisées en juin/juillet 2012 ont montré que plusieurs captages AEP du secteur étaient contaminés dans la vallée du Commerce au sud de Bolbec avec des teneurs en NMOR comprises entre 1500 et 3000 ng/l (Fig. 1). Des analyses réalisées sur la rivière du Commerce ont également révélé de fortes concentrations en NMOR, avec des valeurs de l'ordre de 17 500 ng/l en partie amont, à la sortie d'un site industriel situé à Bolbec, et 3800 ng/l à Gruchet-le-Valasse plus à l'aval. Plus surprenant, dans le même temps la CODAH mettait en évidence des teneurs en NMOR de l'ordre de 100 ng/l mesurées sur son captage AEP à Yport (forage du bois de la vierge : 00568X0061) situé à plus de 20km au nord de la ville de Bolbec. Ces investigations mettent en évidence l'importante étendue géographique de cette pollution. (Fig. 1). Parallèlement, l'ANSES conclut dans son avis n°2012-SA-0172 d'octobre 2012 que :

- « au regard des données toxicologiques actuelles, la consommation journalière d'eau de boisson présentant une concentration en N-nitrosomorpholine inférieure à 100 ng/L n'entraîne pas d'excès de risque pour la santé des consommateurs supérieur à  $10^{-5}$  <sup>1</sup>,
- la N-nitrosomorpholine est difficilement éliminable dans les filières de traitement de l'eau destinée à la consommation humaine à des niveaux de concentration de l'ordre du nanogramme par litre. »

Au vu de ces premiers résultats et de la toxicité à long terme de cette substance, une recommandation de ne pas consommer l'eau du robinet a été diffusée par le Préfet le 23 juillet 2012 (20 000 habitants concernés).

Les analyses réalisées sur la rivière du Commerce ont par ailleurs permis de rapidement remonter à la principale source de pollution ; un site industriel situé à Bolbec qui utilise de la morpholine (MOR) dans ses procédés de fabrication et qui rejette les eaux de sa station d'épuration (STEP) dans le Commerce à l'aval de son site. Face à ce constat, le Préfet a signé un arrêté de mesures d'urgence le 13 juillet 2012 prévoyant notamment l'interdiction de rejeter des effluents susceptibles de contenir de la morpholine (MOR) ou de la n-nitrosomorpholine (NMOR) vers la STEP du site industriel de Bolbec, et des mesures correctives à cet effet au sein même du site industriel ont immédiatement été mises en place sous l'impulsion des services de la DREAL.

Ces premières mesures couplées à des actions spécifiques liées à la production d'eau potable ont permis (1) de faire significativement baisser les fortes teneurs en NMOR mesurées lors de la première campagne de prélèvements et d'analyses des eaux et (2) de remettre en service l'alimentation en eau potable du secteur. Toutefois, après plusieurs mois, des teneurs significatives en NMOR perduraient dans de nombreux captages (Fig. 3, Fig.4) et l'ARS a missionné le BRGM pour qu'il donne un avis sur la situation et qu'il dimensionne une campagne de surveillance appropriée au regard du contexte hydrogéologique compliqué du secteur.

L'expertise du BRGM a notamment débouché sur la recommandation de lancer une étude visant à :

- 1- améliorer la connaissance du fonctionnement de l'hydro-système, et en particulier des cheminements possibles, des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines et des évolutions de la configuration des écoulements dans le temps,
- 2- rechercher d'éventuels foyers de pollution secondaires ou de zones encore contaminées au droit de deux terrains appartenant au site industriel incriminé, et de zones ayant servi à l'épandage des boues de STEP,
- 3- mettre en place un suivi synchrone de l'évolution des teneurs en NMOR, MOR et produits azotés au niveau d'une cinquantaine de points sur les eaux superficielles et souterraines de l'hydro-système de la Craie en aval de Bolbec et plus généralement dans le Bec de Caux.

---

<sup>1</sup> *Excès de Risque Individuel (ERI) : probabilité de survenue d'un danger, au cours de la vie entière d'un individu, liée à une exposition à un agent cancérigène (sans unité)*

De son côté la CODAH a lancé une nouvelle campagne de traçages quantitatifs, confiée au bureau d'étude IDDEA, (Uranine et Sulforhodamine B) dans la vallée du Commerce afin de préciser la dynamique de transfert du polluant entre la zone impactée et le forage d'Yport pourtant distant de plus de 20km. Un premier traçage réalisé en février 2010 (dans le cadre de l'étude Bac de Radicatel) dans la rivière du Commerce, juste en aval du site industriel concerné, avait permis de confirmer une relation entre la partie amont de la rivière et les forages de la vallée du Commerce, ainsi que l'absence de relation entre cette rivière et l'ensemble du champ captant de Radicatel. Toutefois le site d'Yport n'avait pas été suivi. La découverte de la N-Mor à Yport en 2012 a donc amené la CODAH à reproduire ce traçage en décembre de la même année, dans les mêmes conditions d'injections et de niveaux de nappes, avec les mêmes points de suivi à savoir le site de Radicatel, l'ensemble des forages de la vallée du Commerce auquel a été cette fois ajouté le forage d'Yport. Les résultats ont confirmé les relations entre la rivière amont du Commerce et l'ensemble des forages de cette même vallée (vitesse de transit entre 70 et 90 m/h). Ils ont également confirmé l'absence de relation avec le champ captant de Radicatel, mais ils ont surtout confirmé l'existence d'une relation importante de la rivière du Commerce à Bolbec avec le forage d'Yport (vitesse de transit de plus de 400 m/h), (Fig. 1). Cette dernière relation entre la zone de Bolbec et le forage d'Yport s'est révélée similaire à ce qui avait été observé entre la perte de Mirville et le forage d'Yport en février 2012, traçage réalisé dans le cadre de l'étude du bac d'Yport et qui avait mis en évidence un transfert rapide de 341 m/h. Afin de vérifier la continuité de cette relation karstique rapide entre la zone de perte de la rivière Commerce à Bolbec, celle du ruisseau de Mirville plus au nord et enfin le forage d'Yport, un dernier traçage a été réalisé au niveau d'un gouffre karstique situé sur le tracé de la faille principale un peu au nord de Bolbec (site de Beau Soleil) en novembre 2012. Une vitesse de transfert de 446 m/h a alors été mise en évidence. Les taux de restitution des traceurs ont par ailleurs atteint des valeurs très importantes (plus de 50%) pour la perte de Mirville et le gouffre de Beau soleil et de l'ordre de 1,6% pour les pertes partielles du Commerce au niveau de Bolbec (Fig. 1). Parallèlement à ce programme de traçage, la CODAH en partenariat et à la demande de la communauté de communes fortement impactée sur la vallée du Commerce a mis en place un secours AEP permanent depuis son site de Radicatel vers la vallée du Commerce (secours de 3300m<sup>3</sup>/j pouvant aller jusqu'à 4500m<sup>3</sup>/j). On mesure ici l'importance du fait que les écoulements souterrains alimentant le site de Radicatel (Fig. 1) proviennent de la partie amont et moyenne du bassin du Commerce, donc en amont de la zone de pollution et de la rivière, épargnant ainsi le champ captant de la CODAH !

#### **4 Situation actuelle : premiers résultats du plan de surveillance, hypothèses et inconnues à lever**

A l'issue des premières observations et campagnes de mesures effectuées nous pouvons mettre en évidence un certain nombre d'éléments avérés amenant plusieurs hypothèses, qui devront être vérifiées afin de lever un nombre encore important d'incertitudes, notamment concernant l'étendue, la dynamique de transfert et l'évolution de cette pollution dans un environnement qui demeure complexe.

Suivant cette démarche nous examinerons ici successivement I- les origines de la pollution et les principaux foyers concernés, II- les vecteurs en surface et souterrains III- l'évolution des teneurs en N-Mor. I- L'origine de la pollution est à ce jour relativement bien connue, puisque la N-MOR retrouvée provient d'une réaction entre la morpholine (MOR) utilisée par l'industriel dans ses procédés de fabrication et les produits azotés présents dans l'environnement immédiat des sites de production. On sait par ailleurs que la N-Mor une fois formée est particulièrement soluble et plutôt conservative, et que soumise aux UV elle est détruite et reforme de la MOR. Il existe deux sites de production : le premier, historique, situé à l'amont de la vallée du Commerce où la MOR a été utilisée de 1985 à 1991 et, le second, situé sur le plateau en rebord de la vallée du Commerce où la MOR est utilisée depuis 1992 jusqu'à ce jour. Selon les éléments fournis par l'industriel, en moyenne 25 à 35t/an de MOR ont

été envoyées jusqu'à l'été 2012 vers la station d'épuration du site (STEP), et environ 2 à 5t/an de Mor en moyenne étaient alors rejetées dans la rivière du Commerce (via l'exutoire de la STEP). Sur le site historique la N-MOR a donc bien été retrouvée dans les effluents de la STEP (eaux et boues), mais également au niveau des eaux souterraines au droit de la STEP et plus généralement sur le site historique. Sur le second site plus récent, de faibles quantités de MOR ont été retrouvées vers 8 m de profondeur au niveau d'un poste de dépotage près de l'unité de production de la morpholine. Par ailleurs un incident sur la canalisation de transfert vers la STEP (transportant donc de la MOR) entre les deux sites a pu provoquer une pollution qui semble cependant être restée ponctuelle et très localisée.

Cependant, même si l'origine de la pollution est plus ou moins bien comprise aujourd'hui, tous les foyers de pollution n'ont peut-être pas encore été mis à jour. D'autre part, les concentrations en MOR dans l'environnement et, notamment dans le sous-sol non saturé, restent inconnues à ce jour en raison du peu de mesures réalisées et des techniques utilisées dont le seuil de quantification demeure élevé (2000 ng/l dans l'eau, 0,25 mg/kg dans les sols). Les processus réactifs dans le milieu naturel conduisant à la transformation de la MOR en N-MOR ne sont en outre pas encore vraiment connus, mis à part le fait que la présence de substances azotées et un milieu acide sont nécessaires.

II Les vecteurs de cette pollution sont la rivière du Commerce (appelée Bolbec en amont), la nappe sous-jacente et les flux d'échanges qui interviennent entre les eaux de surface et les eaux souterraines : La rivière du Bolbec/Commerce a joué un rôle de réceptacle de la pollution NMOR rejetée par la STEP du site industriel et l'a véhiculée en aval. Depuis l'été 2012, l'arrêt des rejets de MOR vers la STEP, a conduit à fortement tarir cette source de pollution, sans toutefois complètement l'éliminer. De son côté, la nappe transfère également les polluants vers l'aval, sans doute ceux issus de foyers secondaires présents dans le sous-sol notamment sous la STEP. Les différents éléments observés permettent de souligner l'existence d'une « langue » de pollution depuis le site industriel de Bolbec en amont de la vallée du Commerce jusqu'à la bordure du fossé d'effondrement tectonique. Nous savons par ailleurs que vers le forage d'Yport au nord, le transfert de la pollution s'effectue en continu par le biais d'un conduit karstique. Au sud, il existe une langue de pollution à l'aval de Bolbec et Gruchet dans la basse vallée du Commerce car plusieurs ouvrages sont affectés alors qu'ils ne sont pas tous connectés à un réseau karstique. Ces éléments nous permettent d'avancer plusieurs hypothèses dont :

- H1 le partage des écoulements souterrains au passage du système faillé principal bordant le fossé d'effondrement pourrait s'effectuer selon un écoulement matriciel vers le sud et à la fois selon un écoulement matriciel et karstique vers le nord.
- H2 le partage des écoulements souterrains pourrait se faire selon un écoulement matriciel vers le sud et selon un écoulement exclusivement karstique vers le nord.

Ces hypothèses posées, il reste toutefois des inconnues importantes : quelle est la part de polluant qui emprunte la voie vers le nord et celle qui part vers le sud ? Existe-t-il d'autres voies de transferts à partir de foyers de pollutions encore inconnus ? Existe-t-il un transfert de polluant entre le site industriel du plateau et la vallée ? Ce schéma est toutefois compliqué par les interactions qui existent entre la rivière et la nappe de la Craie (alluvions incluses). Ces interactions sont complexes dans la portion amont de la rivière, sans doute au moins jusque dans le secteur de Bolbec. En effet, dans sa partie amont, la rivière a plutôt tendance à drainer la nappe de la craie, ce qui explique notamment qu'en dépit de l'arrêt des rejets de N-MOR et de MOR en rivière, à la source au niveau du site industriel, on observe une remontée des teneurs en N-MOR en allant vers le système faillé bordant le fossé d'effondrement (la nappe étant polluée). Nous savons également que plus en aval entre Bolbec et les forages de la vallée du Commerce à Gruchet, la rivière est perchée par rapport à la nappe, ne

permettant qu'un transfert de flux de la rivière vers la nappe. Plusieurs inconnues demeurent, dont une de taille : nous ne connaissons pas le type de relation entre la nappe et la rivière sous la ville de Bolbec au sein du fossé d'effondrement qui constitue pourtant une zone pivot dans la dynamique de répartition du transfert de la pollution. Pourtant, quelque part dans ce secteur, au droit de la faille ou en aval, la rivière doit réalimenter partiellement la nappe. Sur ces bases, deux hypothèses complémentaires peuvent être également émises :

- H1 : concernant le transfert vers le nord (Yport), les pertes partielles du Commerce pourraient s'effectuer au passage du système faillé bordant la partie orientale du fossé d'effondrement.
- H2 : Après le passage du système faillé, la rivière constitue un vecteur de transfert de la pollution vers les captages de la vallée du Commerce, soit au niveau de pertes naturelles de la rivière vers la nappe dans la zone de Gruchet où elle est perchée, soit par le biais d'une réalimentation induite par les pompages au droit des zones de forages, soit encore par les deux mécanismes qui se superposent. On se heurte toutefois ici à l'absence de connaissance sur la localisation des pertes et de leurs débits. Par ailleurs les relations relativement rapides mise en évidence par les traçages pourraient également suggérer des relations de « type karstique » y compris vers le sud dans la vallée du Commerce, et il est donc très difficile de faire la part des choses entre écoulements rapides de surface et écoulements karstiques pour la partie sud.

III Enfin, si on examine attentivement l'évolution des teneurs en N-MOR sur les différents ouvrages impactés on peut avancer les éléments suivants : l'arrêt des rejets de la STEP a entraîné une forte baisse des teneurs en N-MOR dans les eaux de surface (rivière du Commerce) passant de 17 500 ng/l à des valeurs comprises entre 250 ng/l et 350 ng/l dès juillet 2012 et stagnant aujourd'hui entre 50 ng/l et 250 ng/l (ces dernières valeurs étant liées à la réalimentation par la nappe polluée de la rivière), mais n'a pas provoqué de diminution rapide notable sur les différents forages de la vallée du Commerce (Fig. 3). Pour le forage d'Yport l'impact de l'arrêt des rejets de la STEP n'est pas mesurable en l'absence de données avant l'arrêt de ces rejets, mais il est fort probable que celui-ci n'a pas eu non plus d'effet immédiat. En revanche un examen de la variation des teneurs en N-MOR pendant la durée d'un cycle hydrologique annuel complet suggère que celles-ci pourraient au moins partiellement être liées aux phénomènes de dilution induits par la recharge de la nappe de la craie, puisqu'on observe, que ce soit à Yport (Fig. 4) ou dans la vallée du Commerce (Fig. 3), une forte chute des valeurs de N-MOR à l'issue de la période de recharge. On pourrait dès lors s'attendre lors des périodes de tarissement de la nappe à ce que les valeurs de NMOR remontent. Cette tendance est perceptible lors de la première décharge rapide de la nappe sur les forages de la vallée du Commerce. Toutefois celle-ci ne semble pas se confirmer à ce stade sur la seconde et lente période de décharge (Fig. 3). Par ailleurs, nous ne pouvons pas observer ce processus sur Yport où la nappe est restée haute, y compris en fin de cycle hydrologique, sans amorcer de décharge significative ; l'effet dilution pourrait ainsi pleinement expliquer le maintien des teneurs en N-MOR sur un plateau bas. Un recul sur au moins deux à trois cycles hydrologiques sera néanmoins nécessaire pour pouvoir connaître de manière plus certaine si l'évolution des teneurs en N-MOR est plus liée à un phénomène de dilution ou au contraire à un tarissement partiel, voire total (mais peu probable à ce stade) des foyers de pollution.

Fig.3 : Evolution des teneurs en NMOR et variations de la piézométrie au niveau de la basse vallée du Commerce.

Fig. 4 Evolution des teneurs en NMOR et variations de la piézométrie au niveau du forage d'Yport.



## 5 Conclusion

Les résultats récents (concentrations en NMOR en légère hausse ou stagnantes sur les captages AEP, présence de fortes concentrations en NMOR et MOR sous le site industriel, ...) suggèrent plus à ce stade une tendance à la persistance de foyers de pollution dans le milieu naturel, aussi pour pouvoir avancer sur la gestion à terme de cette pollution, ainsi que sur la protection durable de la ressource et de l'alimentation en eau potable du secteur et, plus généralement, pour pouvoir agir de manière rationnelle face aux autres pollutions éventuelles qui pourraient survenir dans le secteur, il convient d'améliorer la connaissance des caractéristiques et du fonctionnement de l'hydro-système de la Craie (nappe de la craie + rivière du Commerce), et notamment de mieux appréhender la configuration des cheminements rapides et plus lents, des interactions entre la rivière et la nappe, et de leurs évolutions en fonction des saisons et des niveaux. Il convient par ailleurs également de mieux synchroniser les campagnes de suivi de la NMOR et de la MOR (pour laquelle les seuils de détection et de quantification devraient pouvoir être abaissés) et de poursuivre les investigations du sous-sol au droit des sites pollués ou susceptibles de l'être, en particulier en termes de MOR sans pour autant négliger la NMOR.

## Figures

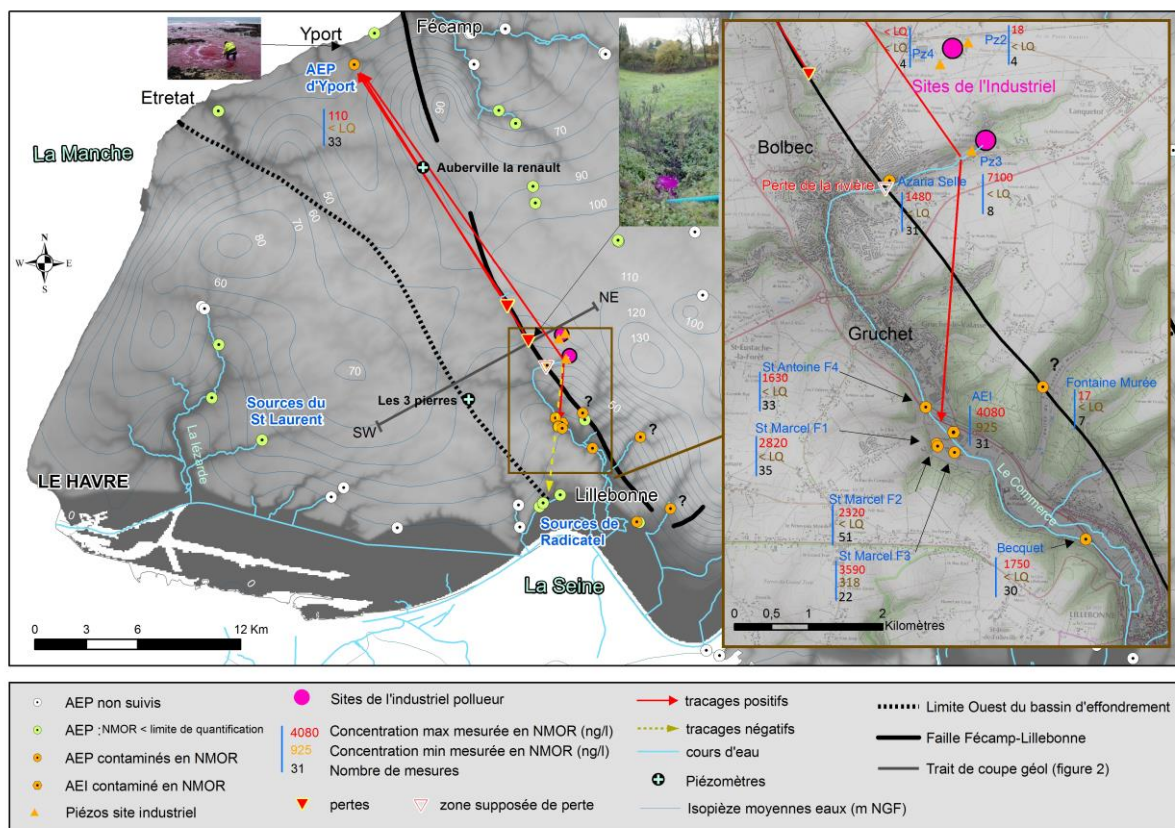


Figure 1

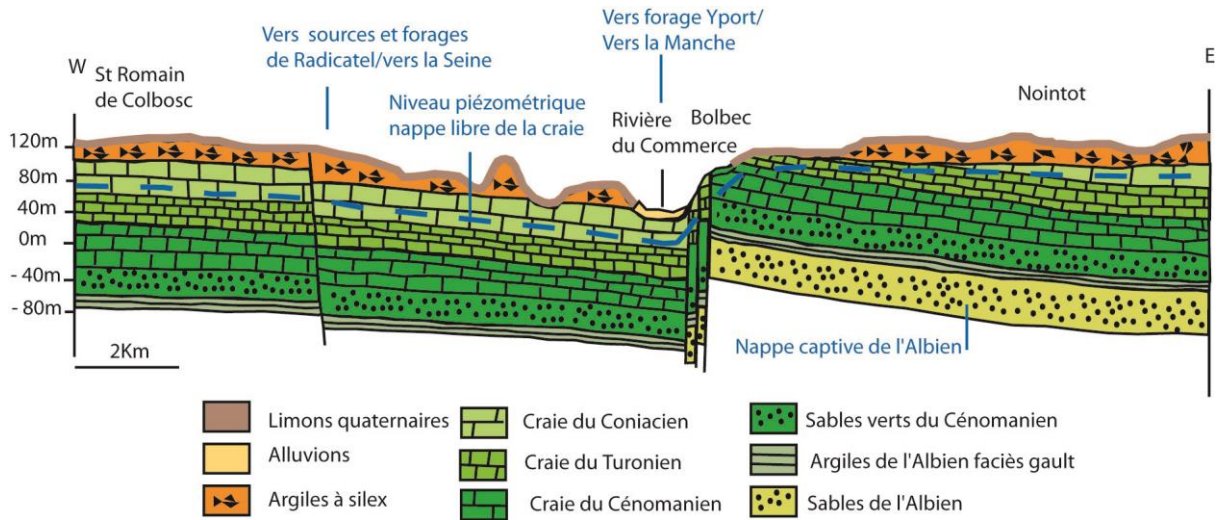


Figure 2

Évolution de la concentration de NMOR dans les forages de Gruchet

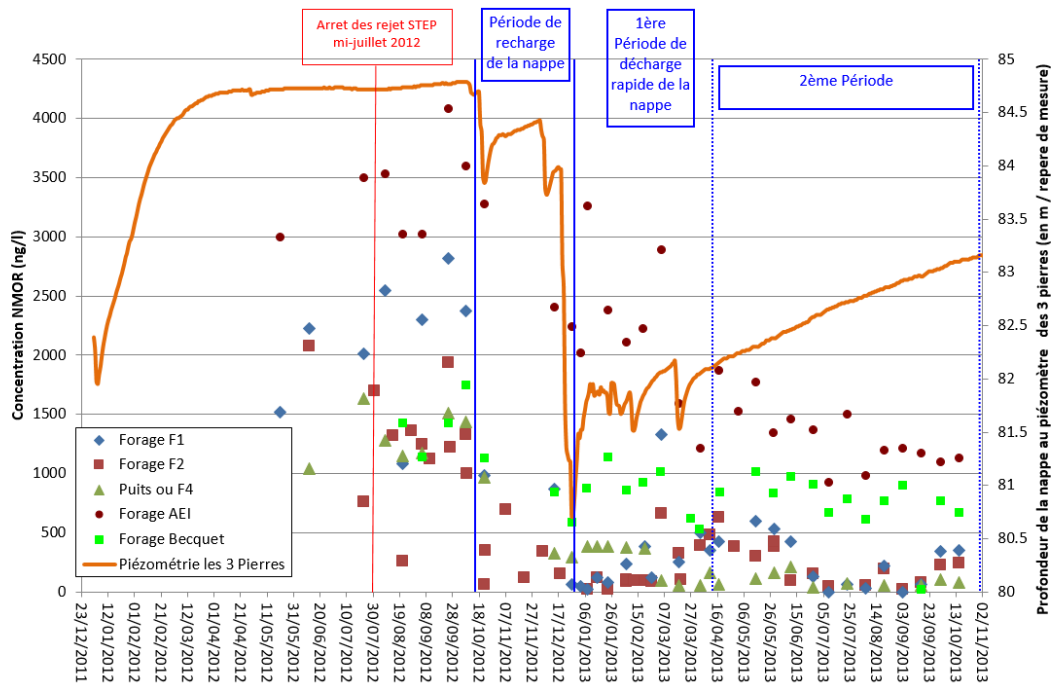


Figure 3

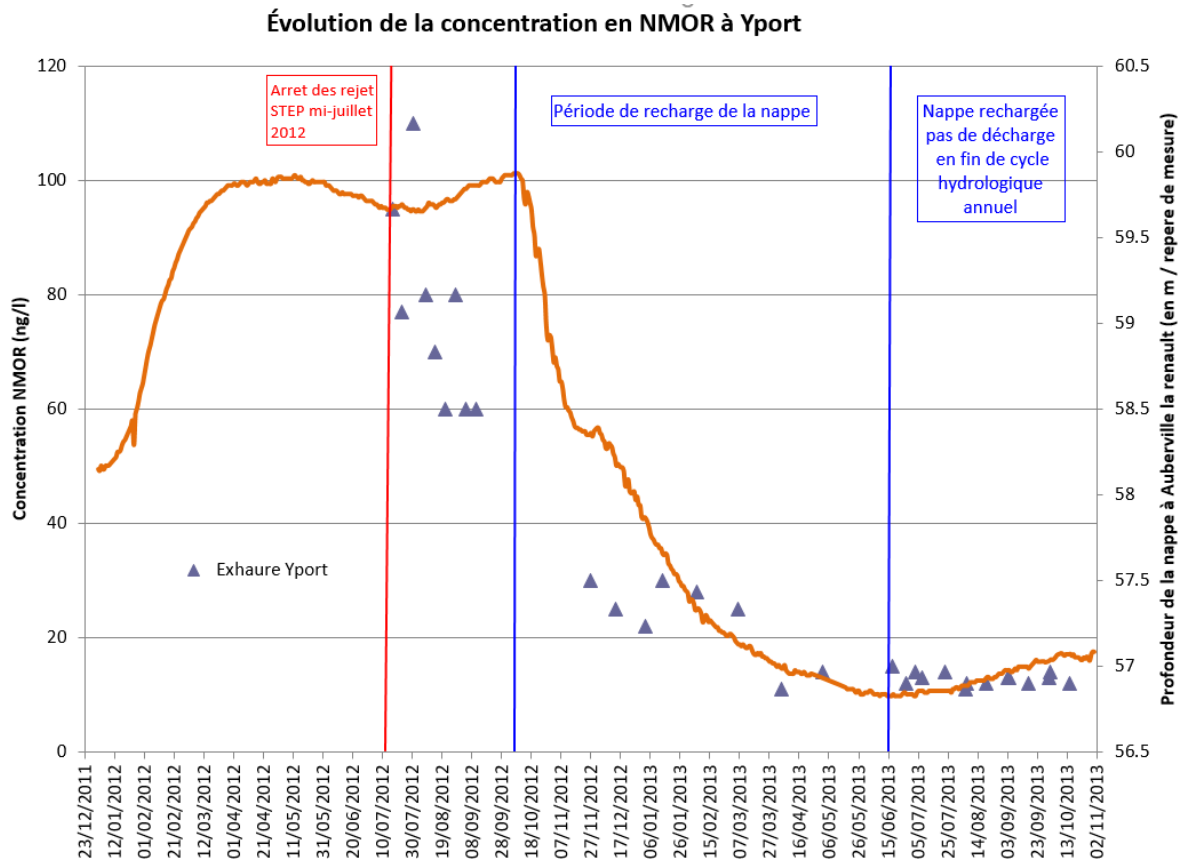


Figure 4

## Bibliographie

Avis de l'Anses Saisine n° 2012-SA-0172 relatif à « l'évaluation des risques sanitaires liés à la présence de N-nitrosomorpholine dans l'eau destinée à la consommation humaine ». 14p.

Avis de l'Anses Saisine n° 2012-SA-0188 relatif à « l'impact éventuel d'eau contaminée par la N-nitrosomorpholine (NMOR) sur la qualité sanitaire de certains produits agricoles ». 12p.

David, P.Y. et Pennequin, D (2013) : Pollution par la morpholine et la n-nitrosomorpholine dans le secteur de Bolbec et au-delà. Avis du BRGM. Rapport BRGM/RP – 62004-FR.95p.

Explore-CPGF Horizon (2012) : Etude diagnostique du Bassin d'Alimentation du Captage du Becquet 56p.

Ginger (2005) Etude de protection des captages de St Marcel et de St Antoine la Forêt 70p.

Hanin, G. (2010). Contrôles structural et hydrogéologique sur la dynamique d'un champ captant en contexte crayeux karstique et sa sensibilité aux variations du signal climatique : implications en matière de la vulnérabilité de la source. Thèse de Doctorat. Université de Rouen/CODAH 303p.

Hauchard, E. et Laignel, B., (2008). Evolution morphotectonique de la marge nord-occidentale du Bassin de Paris. Z. F. Geomorphologie. 52 (4). 463-488.

IDDEA (Avril 2010) « Multitraçages à Radicatel (76). Présentation des résultats et interprétations ». Rapport IC090185-4. 30 p 4 annexes

IDDEA (Mai 2012 ) « Multitraçages BAC d'Yport. Première campagne. Résultats finaux ». Rapport IC110187-2. 45p 11 annexes.

IDDEA Février 2013 – « Multitraçages BAC d'Yport. Troisième campagne. Résultats finaux ». Rapport IC120126-4. 45p 3annexes

Lattelais C. (2012). La turbidité : marqueur du fonctionnement d'un système karstique : cas du système karstique d'Yport. Master II mémoire de fin d'étude. Université de Rouen/CODAH 62p.

Safege (2012) : Etude du bassin d'alimentation du captage de Radicatel. Phase 1. Délimitation du bac et étude de la vulnérabilité. 140p.

Safege (2012) : Etude du bassin d'alimentation du forage d'Yport. Phase 1. Délimitation du bac et étude de la vulnérabilité 163p.