Année : 2017



N° d'ordre : 42376

UNIVERSITÉ DE LILLE, 1 SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement LGCgE

Discipline : Génie Civil

Ecole Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

Analyse et modélisation hydro-géo-mécanique : Applications aux processus d'instabilités de terrain et à la gestion optimisée de la ressource en eau

Par

Jamal EL KHATTABI

Soutenue publiquement-le jeudi 29 juin 2017 devant le jury composé de :

Hua Qing WANG	Professeur à l'Université Du Havre Normandie, Laboratoire Ondes et Milieux complexes, UMR CNRS 6294	Rapporteur
Lahcen ZOUHRI	EC-HDR à l'Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais	Rapporteur
Hassan SMAOUI	Directeur de Recherches CEREMA, Laboratoire Roberval UMR CNRS 7337	Rapporteur
Erick CARLIER	Professeur à l'Université de Lille, Laboratoire Génie Civil et Géo-Environnement, Lille Nord de France	Garant
Isam SHAHROUR	Professeur à l'Université de Lille, Laboratoire Génie Civil et Géo-Environnement, Lille Nord de France	Examinateur
Daniel BERNARD	Ancien PAST-HDR à l'Université de Lille (LGCgE) et Chef de service à l'Agence Artois-Picardie	Membre invité



Laboratoire Génie Civil et géoEnvironnement Lille Nord de France

Préambule

Les travaux présentés dans ce document sont le fruit de nombreuses collaborations avec les étudiants, les membres de mon équipe de recherche au LAMH, puis au LML et enfin au LGCGE et les collègues français et étrangers.

Je tiens à remercier très sincèrement les doctorants (Samia, Fadi, Hanane et Hind) et les stagiaires de Master 2 et Mastère spécialisé qui m'ont permis au travers de leurs travaux d'avancer sur mes questions scientifiques. Merci ! Sans vous les choses avanceraient beaucoup moins vite. Nous avons fait un bout de chemin ensemble et j'espère qu'il vous aura été profitable aussi.

Merci à toi Erick (Carlier) pour ton aide depuis ma thèse de Doctorat. Tu as Co-encadré quasiment toutes les thèses et tu as participé activement à la publication des travaux. Merci pour ton amitié et d'avoir accepté encore une fois d'être mon garant pour ce travail. Je ne saurais trop remercier Daniel Bernard pour notre collaboration au sein du mastère spécialisé mais aussi son engagement actif dans les recherches sur la qualité de de la nappe de la craie. Sa connaissance de la ressource en eau dans le bassin Artois-Picardie a fortement contribué à l'aboutissement de ces travaux. Toute ma reconnaissance à Isam (Shahrour) pour sa présence et son appui ; toujours disponible aux sollicitations. Je remercie sincèrement les trois collègues rapporteurs (Lahcen zouhri, Hassan Smaoui et Hua Qing Wang) pour avoir accepté d'examiner mes travaux.

Merci à Barbara (Louche) qui m'a épaulé dans certains travaux, mais aussi pour sa présence. Son amitié et sa contribution réelle à la gestion du Master2 IHG permettant ainsi à de nombreux étudiants, chaque année, de finaliser leur parcours et d'intégrer le monde de travail. Merci aux ami(e)s d'ici ou d'ailleurs d'être la en toutes circonstances.

Un grand merci à mon épouse, à mes frères et sœur et à ma belle-famille pour leurs encouragements. Je dédie cette thèse à ma petite Anya qui remplit depuis peu mes journées de bonheur ; des conditions extrêmement favorables pour avancer dans la rédaction.

Une pensée à toutes les équipes avec qui j'ai travaillé. Je commence avec la direction de l'Université avec qui j'ai partagé des moments de bonheur mais aussi des moments d'inquiétudes et de stress. Merci à toi Philippe (Rollet) de m'avoir choisi pour t'épauler dans ta mission de Président de notre université. Un clin d'œil à Michèle, Salah, Nina, Nicolas,... sans oublier l'équipe de la Vie étudiante (Ingrid, Mélanie, Alain, Annie-Claude, Hélène, Eric). Puis les membres des autres services. Un grand merci aux secrétaires avec qui je travaille depuis 2008 : Sandrine Walle, Christelle Sandras, Monique Marti,....

Enfin, je salue tous les amis avec qui je partage au quotidien la réflexion sur le devenir de l'Université ou encore les questions plus larges sur l'humanité et l'évolution du monde. Ils sont très nombreux pour les citer tous.

« Lorsque la dernière goutte d'eau sera polluée, le dernier animal chassé et le dernier arbre coupé, l'Homme blanc comprendra que l'argent ne se mange pas » Sitting Bull (1831 - 1890), Chef de tribu des Lakotas Hunkpapas (Sioux).

« Une goutte d'eau suffit pour créer un monde » Gaston Bachelard (1884 - 1962), Philosophe français des sciences, de la poésie et du temps.

« C'est quand le puits est sec que l'eau devient richesse. » Proverbe français

« Des milliers de gens ont vécu sans amour, pas un n'a vécu sans eau » Wystan Hugh Auden (1907 - 1973), Poète et Critique anglo-américain

« L'eau est une impossibilité scientifique » Wilfried Hacheney (1924 - 2010), physicien allemand et chercheur sur l'eau

Résumé

Les travaux présentés dans le cadre de la thèse d'habilitation à diriger les recherches s'organisent autour des thématiques liées à la Géologie de l'Ingénieur. Elles se déclinent en deux grands domaines : l'étude de la stabilité des versants et les processus d'écoulements dans les sols saturés et non saturés. L'eau comme source vitale est également un facteur déterminant dans l'activité des sociétés humaines : sa présence contribue au développement économique comme elle peut le retarder par son action destructrice que ce soit lors des épisodes pluvieux exceptionnels ou par son action déstabilisatrice au sein des massifs.

Les versants sous contraintes naturelles et/ou anthropiques sont en évolution perpétuelle. La compréhension de cette dynamique, considérée comme une catastrophe par l'Homme, passe par l'analyse et la modélisation des mouvements de terrain en y appliquant une approche pluridisciplinaire (géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique). En bordure littorale, les conséquences de ces mouvements est le recul du trait de côte ; ce qui constitue une préoccupation majeure qui intéresse les scientifiques et les aménageurs. Deux cas de figures sont traités ; les glissements de terrain affectant les versants naturels de la chaîne rifaine (Nord du Maroc), une région qui se distingue par ses caractéristiques géographiques et géologiques très contrastées. Elle est également marquée par de fréquents mouvements de terrain endommageant régulièrement l'habitat, ainsi que le réseau routier et ses infrastructures. La méthode mise en place a abouti à l'identification des facteurs macro-déstabilisateurs et les mécanismes micro-déstabilisateurs à l'origine des instabilités. La seconde application concerne les instabilités affectant les falaises crayeuses et les côtes sableuses de la région "les Hauts de France" dont la conséquence majeure est le recul du trait de côte, bien marqué au niveau des côtes sableuses d'Hardelot. Les travaux menés ont abouti à identifier l'ensemble des facteurs de prédisposition et de déclenchement ainsi que les mécanismes associés qui sont à l'origine des écroulements observés au sein des falaises crayeuses du cap Blanc Nez. Ces résultats ont été confortés aux simulations numériques bidimensionnelles basées à la fois sur la méthode des éléments finis et celle des éléments distincts. A Hardelot-Plage, une méthodologie basée sur deux approches conceptuelles a été appliquée en matière d'aménagement durable du littoral. Cette méthodologie associe à tous les niveaux les SIG. La première approche est consacrée à la mesure de l'évolution du trait de côte des dunes et la seconde méthodologie associe un couplage SIG/ModFlow en développant un modèle adapté aux enjeux. La saturation en eau observée dans la partie sud d'Hardelot est liée à la proximité de la nappe superficielle, ce qui fixe le sable et provoque le dégraissement des dunes du front littoral. Une implication des lentilles de tourbes a également été prouvée.

Les processus d'écoulements dans les sols saturés et non saturés ainsi que l'impact des pressions naturelles et/ou anthropiques sur la qualité des eaux est l'autre volet des travaux présentés. Ainsi, la compréhension des mécanismes de transport hydrique et des solutés dans un milieu poreux non saturé est essentielle pour répondre aux interrogations concernant le devenir des polluants appliqués à la surface du sol. Les approches utilisées sont analytiques, probabilistes et modélisatrices. Les applications concernent en premier lieu la région Nord de la France mais aussi le Nord marocain et le Nord-Ouest algérien. Dans le nord de la France, les concentrations en nitrates mesurées dans la nappe de la craie atteignent ou dépassent "fréquemment" le seuil de potabilité fixé à 50 mg/l par la Directive Européenne transcrite en droit francais en 2001. Cet état de fait est la conséguence direct de l'essor de l'agriculture intensive, l'industrialisation ou encore la croissance démographique. Pour remédier à cette situation, plusieurs programmes ont été mis en place : Ferti-mieux dans le domaine de l'agriculture, raccordement aux stations d'épuration et traitement des rejets. L'impact de ces mesures a été évalué dans certains sites (Cambraisis, Béthunois,...) à travers un modèle intégré basé sur le couplage de différents modules permettant d'établir un bilan du cycle de l'azote dans la zone racinaire (Agriflux) et son transit dans la zone non saturée infra-racinaire (VS2DT-WHIUNSAT) jusqu'à la zone saturée (MT3D-MODFLOW). Dans d'autres modèles, les SIG et les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été intégrés. Le rôle important des caractéristiques physiques du milieu dans l'évolution des polluants dans le sous-sol et l'amélioration associée au programme de la fertilisation raisonnée ainsi qu'une dégradation ponctuelle liée aux rejets près des zones urbaines ont été établi.

La contamination des nappes peut également être le résultat de pressions naturelles via l'interaction avec le milieu géologique. La pollution géogénique est un phénomène assez courant lié à la composition chimique des couches géologiques mais aussi aux conditions du milieu. Ainsi, le relargage des éléments (notamment des métaux) dans le milieu se réalise dans des conditions précises d'un point de vue hydrodynamique et physico-chimique. Le dépassement des normes de potabilité de certains éléments comme le sélénium, le nickel ou le fer requiert la nécessité de traitement de l'eau brute avant la distribution. Les études menées ont permis de mieux connaître le contexte géologique et hydrogéologique de la nappe de la craie et de déterminer l'origine des éléments détectés ainsi que l'influence de l'occupation du sol et surtout les conditions du milieu. Ils ont permis de proposer des modes de gestion des captages afin de minimiser les problèmes liés aux fortes concentrations en éléments en s'orientant essentiellement sur le contrôle et la maîtrise des pompages. D'autres travaux, au Maroc et en Algérie ont porté respectivement sur la caractérisation physico-chimique des eaux souterraines et des eaux de surfaces. Ainsi, dans le Nord du Maroc (Rif Central), les intrusions salines d'origine tectoniques contaminent la nappe. La répartition spatiale de la salinité est due à la pente du substratum (charriage tectonique) et au temps de séjour de l'eau dans le milieu. Une cartographique d'aide à la décision a été élaboré en vue de la reconnaissance des zones favorables à l'implantation de nouveaux captages aussi bien agricoles que pour l'alimentation en eau potable. Par ailleurs, les lacs du pourtour méditerranéen, et plus particulièrement ceux de l'Afrique du nord, connaissent une dégradation qualitative et quantitative, résultant de contraintes naturelles (carences des précipitations et écoulements) et anthropiques (prélèvements, rejets). Ainsi, les caractéristiques physico-chimiques des eaux du lac Oubeira dans le nord-ouest algérien ont été étudiées dans les conditions sévères en période de sécheresse.

Mots clés : Instabilités, glissements, écroulements, retrait du trait de côte, ressources, milieux poreux, modélisation-géo-hydro-mécanique, pollution, contamination, aide à la décision.

Abstract

The works presented here are organized into topics related to the engineering geology. They cover two main areas: the study of slope stability and the flow processes in saturated and unsaturated soils. Water, as a vital source, is a determining factor of the human activity. Its presence contributes to economic development as it can retard it by its destructive action, whether during exceptional rainy episodes or by its destabilizing action within massive land.

The slopes under natural and/or anthropic constraints are in perpetual evolution. Understanding this dynamic, considered as a catastrophe by Man, requires an analysis and modeling of ground movement by applying a multidisciplinary approach, such as geomorphology, geology, hydrogeology and geotechnics. At the coastal edge, the consequence of these movements is the retreat of the coastline; which is a major concern for scientists and developers. Two issues are dealt with; the landslides affecting the natural slopes of mountain range of the Rif (northern Morocco), a region distinguished by its very varied geographical and geographical features. It is also marked by frequent mass movements regularly damaging the habitat, as well as the road network and its infrastructures.

The method implemented has led to the identification of macro-destabilizing factors and microdestabilizing mechanisms at the origin of the instabilities. The second application concerns instabilities affecting chalk cliffs and sandy coasts of the "Hauts de France" region, whose major consequence is the retreat of the coastline well marked on sandy coasts of Hardelot. The work carried out allowed identify the whole factors of predisposition and release as well as associated mechanisms responsible for the observed collapses in chalk cliffs of cape Blanc Nez. These results were reinforced by bidimensional numerical simulations based on both the finite element method and the distinct element method. In Hardelot-Plage, a methodology based on two conceptual approaches has been applied to sustainable management of the littoral zone. This methodology has been implemented thanks to GIS (Geographical Information System). The first approach is dedicated to measuring shoreline change along dunes and the second methodology combines a GIS / ModFlow coupling by developing a model adapted to the stakes. The water saturation observed in the southern part of Hardelot beach is related to the proximity of the piezometric surface, which fixes the sand and causes the depletion of coastal front dunes. An implication of peat lenses has also been proved. The presence of peat would induce seawater restrain and make possible to mainly explain the complex distribution of freshwater and saltwater interface in this sector.

The other aspects of the work are the flow processes in saturated and unsaturated soils and the impact of natural and / or anthropogenic pressures on water quality. The approaches used are analytical, probabilistic and numerical. The applications concern primarily the northern region of France but also the Moroccan North and the Algerian Northwest. In northern France, concentrations of nitrates measured in the chalk aquifer reach or frequently exceed the drinking water standards set at 50 mg / I by the European framework directive transcribed in French law in 2001. This is a direct consequence of the to intensive agriculture, industrialization and demographic growth. Several programs were launched in order to resolve this situation: "Ferti-better" or the use of fertilizer in moderation, installation and amelioration of wastewater collect and treatment systems. The impact of these programs has been improved in some sites (Cambrai and Béthune districts,...) using an integrated approach based on the use of four numerical models: AgriFlux, VS2DT,(VS2DT-WHIUNSAT), Modflow and MT3D. In other models, GIS and ANN (Artificial Neural Network) have been integrated. The important role of the environment physical in the evolution of pollutants in the subsoil and the improvement associated with the program of rational fertilization as well as a degradation linked to the discharges near urban areas have been established.

The contamination of groundwater can also be the result of natural pressures through interaction with the geological environment. The Geogenic pollution is a rather common phenomenon linked to the chemical composition of geological layers but also to environmental conditions. Thus, the saltingout of elements (especially metals) into the environment occurs under precise hydrodynamic and physico-chemical conditions. Exceeding the potability standards for certain elements such as selenium, nickel or iron requires to treat raw water before distribution. The studies carried out led to a better knowledge of the geological and hydrogeological context of the chalk aquifer and allowed to identify the detected elements origin as well as the influence of land use and especially the

environmental conditions. They have also made possible to propose ways of managing catchments in order to minimize problems associated with high concentrations of elements, focusing mainly on the pumping control. Other studies in Morocco and Algeria have focused on the physico-chemical characterization of groundwater and surface waters. Thus, in northern Morocco (Central Rif), saline intrusions of tectonic origin contaminate the water table. The spatial distribution of salinity is due to the slope of the substratum (tectonic overthrust) and the residence time of the water in the medium. A mapping of decision aids has been developed for the purpose of recognizing the optimal areas for to the implantation of new drinking water catchments. Moreover, the lakes around the Mediterranean, especially those in North Africa are affected by qualitative and quantitative degradations resulting from natural (precipitation and runoff deficiencies) and anthropogenic (withdrawals, discharges) constraints. Thus, the physico-chemical characteristics of lake Oubeira waters in northwestern Algeria have been studied under severe conditions during periods of drought.

Key words: Instabilities, landslides, collapses, retreat of coastline, water resource, geo-hydromechanical modeling, pollution, contamination, decision aids.

Table des matières

NOTICE INDIVIDUELLE ET CURRICULUM VITAE	8
INTRODUCTION GENERALE	18
THEME 1	25
ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE COTIERE ET DE LA STABILITE DES VERSANTS (ANALYSE ET MODELISATION) L'APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE (GEOMORPHOLOGIE, GEOLOGIE, HYDROGEOLOGIE ET GEOTECHNIQ	PAR (UE)25
Chapitre 1: Mise en place d'une demarche methodologique pluridisciplinaire pour l'etude des instabilites d	DE
VERSANTS	26
Introduction	26
Application de la méthode aux versants du Rif central	26
Application de la méthode aux écroulements	
affectant les falaises crayeuses du cap Blanc Nez dans le Nord de la France	
CHAPTIRE Z TINFLUENCE DE L'HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE SUR LA DYNAMIQUE DUNAIRE ET LE RECUL DU TRAIT DE CU	JIE : CAS 20
Introduction	
Analyse de la mornhodynamique du littoral	40
Élaboration d'un modèle hydrodynamique littoral	
Conclusion	
Bibliographie	46
THEME 2	
PROCESSUS D'ECOULEMENTS ET IMPACTS SUR LA QUALITE DE L'EAU DANS LES SOLS SATURES ET NON SATURES	l 49
CHAPTIRE 5 : LTUDE DE LA MINERALISATION DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE, IMPACTS ET ENJEUX ECONOMIQUE.	5. CAS DES
Introduction	
Minéralisation de la nanne des flyschs sous l'effet	
des intrusions salifères d'origine tectonique	
Evolution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des eaux du lac Oubéira imposée par les	;
conditions sévères de la sécheresse (Extrême NE algérien)	53
Evolution des paramètres : T°, O_2 , pH, CE	55
Cations et anions majeurs	56
Conclusion	58
Bibliographie	59
CHAPITRE 4 : IMPACT DES PRATIQUES CULTURALES ET DES REJETS URBAINS SUR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES	60
Introduction	60
Etude d'impact de la minéralisation azotée d'origine domestique et agricole	61
sur l'exploitation d'eau potable de la nappe de la craie dans le Cambresis	61
Etude d'Impact de la mineralisation azotee d'origine domestique et agricole sur rexploitation d'ea	U munos
de Catillon sur Sambre et Deiet de Pequilieu	munes 66
Drádiction spatial dos concontrations on nitratos dans la nanno do la craio do Róthuno - Counlago	00 ráco a uv
de neurones artificiels et SIG	73
Conclusion	
Bibliographie	
CHAPITRE 5. MODALITES ET PROCESSUS DE LA CONTAMINATION NATURELLE DE LA NAPPE DE LA CRAIE PAR LES METAUX	80
Introduction	80
Origine et évolution du Nickel en solution de la nappe de la craie	80
Présence du sélénium dans la nappe de la craie	88
Bibliographie	96
CONCLUSION GENERALE	98
ANNEXES (SELECTION D'ARTICLES)	100

Notice individuelle et curriculum vitae

Jamal EL KHATTABI

Maître de Conférences Polytech'Lille, Université de Lille Sciences et Technologies

Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement Lille Nord de France, École Polytech'Lille, avenue Paul Langevin 59655 Villeneuve d'Ascq cedex Université de Lille1, 59655 Villeneuve d'Ascq, France. Tél. 03.28.76.74.18 Tél. 03.28.76.74.89 jamal.elkhattabi@polytech-lille.fr

TITRES UNIVERSITAIRES

Doctorat Génie Civil, spécialité Géologie de l'Ingénieur.

Laboratoire Artois Mécanique et Habitat (LAMH)

Thèse obtenue avec mention très honorable le 18 décembre 2001 à l'Université d'Artois sous la direction du Professeur Erick CARLIER.

"Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : Application aux versants du Rif Central (Maroc)."

Président :

Jean Pierre COLBEAUX, Maître de Conférences, Université Lille 1,

Rapporteurs :

Gérard BALLIVY, Professeur, Université Sherbrooke (Québec, Canada), Jacky MANIA, Pr. Directeur Dép. Géotechnique-Génie Civil, EUDIL - Université Lille 1 Bernard CLEMENT, Pr. Directeur du CDGA, Université de Bordeaux 1

Directeur et co-directeur :

Erick CARLIER, Professeur, Université d'Artois Chérif BOULEMIA, Maître de Conférences, Université d'Artois

Examinateurs :

Lahcen ASEBRIY, Chef Dép. Géologie, Institut Scientifique de Rabat (Maroc) Stéphane LASSUE, Directeur du LAMH, Université d'Artois Nor Edine ABRIAK, Professeur, École des Mines de Douai François Xavier MASSON, DRAF, Professeur associé à l'Université d'Artois

DEA Géographie Physique : Ressources, risques naturels et préventions

"Caractérisation des zones à risques le long du tracé routier Jebha - Cala Iris : exemple du secteur Cala Iris-Taghzoute (Rif, Maroc)".

Diplôme obtenu avec mention Assez Bien, 1997 à l'Université Lille 1.

Maîtrise en géologie fondamentale et appliquée

1994 - Université Lille 1.

Licence en géologie fondamentale et appliquée

1993 - Université Lille 1.

DEUG B Mention Biologie-Géologie

Février 1992 - Université Lille 1.

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

1999-2001

Attaché Temporaire d'Enseignement et de recherche (ATER) en Géologie et Génie Civil à l'Université d'Artois

2004-2005

Chargé d'enseignement vacataire en Géologie et Génie Civil à l'Université d'Artois

2005-2008

Chargé d'enseignement vacataire à l'Université Lille 1, École Polytechnique Universitaire de Lille -Licence 2 (S3) Sciences Pour l'Ingénieur option Génie Civil

2006

Contrat Post-Doctoral effectué au sein de l'Équipe Génie de l'Eau et Urbain, du Laboratoire Mécanique de Lille (UMR CNRS 8107) et en collaboration avec l'Agence de l'Eau "Artois-Picardie".

2007

Ingénieur Projet ANR au sein du Service de la Recherche, Valorisation et Formation Doctorale de l'Université Lille1 Sciences et Technologies

Depuis 2008

Maître de Conférences, Polytech'Lille, Université Lille1 Sciences et Technologies

THEMES DE RECHERCHE

Mes thèmes de recherche se déclinent en deux grands domaines :

1. Étude de la dynamique côtière et de la stabilité des versants (analyse et modélisation) par l'approche pluridisciplinaire (géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique).

- Glissements de terrain affectant les versants naturels de la chaîne rifaine (Nord du Maroc).
- Problématique du recul de trait de côte liée aux instabilités affectant les falaises crayeuse et les côtes sableuses du Nord Pas de Calais.

2. Processus des écoulements dans les sols saturés et non saturés ; impact sur la qualité des sols et des eaux.

- La protection et la mise en valeur des eaux souterraines.

* Impact des pratiques culturales et des rejets urbains sur la qualité des eaux souterraines * Étude de la minéralisation de la nappe sous pressions naturelles et/ou anthropiques

Mots clés : Instabilités, glissements, écroulements, retrait du trait de côte, modélisation hydro-géo-mécanique, ressources, milieux poreux, pollution diffusion, contamination, aide à la décision

ANIMATION DE RECHERCHE

COLLABORATIONS INTERNATIONALES ET MONTAGE DE PROJETS

- Participation à l'organisation de : *La Conférence d'Alger sur la gestion des milieux urbains* (sols, ouvrages, environnement, ressources en eau et risques). Université d'Artois (France), Université d'Alger (Algérie) et Université de Sherbrooke (Canada), Alger 16 et 17 juin 2002.

- Participation, en tant que correspondant du groupe environnement au Laboratoire Artois Mécanique Habitat de l'Université d'Artois, au Montage du projet PREDIS (Plan Régional d'Élimination des Déchets Industriels et Spéciaux) sur *la valorisation des boues de dragages en B.T.P.*

- Convention de recherche CNRST (Maroc) /CNRS-2009 (SP104/09) intitulée : Risques de mouvements de terrain et leurs impacts sur le littoral méditerranéen du Rif ; entre Tétouan et Al Hoceima (Maroc) :

impacts sur la gestion et l'aménagement du territoire. Ce projet est le prolongement de l'Action Intégrée N° MA/05/120 STU du programme VOLUBILIS (Collaboration scientifique avec l'Université Mohamed V de Rabat et l'Institut Scientifique), 3ans.

CONTRATS SCIENTIFIQUES

- Collaboration de recherche avec NOREADE et l'Agence de l'Eau ARTOIS PICARDIE sur la modélisation de la migration des nitrates dans la nappe de la craie dans le bassin versant des captages de Catillon sur Sambre, 2011.

- Collaboration de recherche avec NOREADE, LMCU, BRGM, Agence de l'Eau ARTOIS PICARDIE sur Les causes de la minéralisation de la nappe de la craie par le Sélénium : Application à la gestion des champs captants de NOREADE et Lille Métropole Communauté Urbaine de Lille, 2010-2013.

ENGAGEMENT AU SEIN DE L'UNIVERSITE

- Membre de la commission des spécialistes : vivier de la section CNU 60.

ACTIVITES SCIENTIFIQUES

- Membre du comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement.

- Membre de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement.

- Membre de la Société Géologique du Nord.

- Hydrogéologue agréé en matière d'hygiène publique pour les départements Nord, Pas de Calais et l'Aisne.

ENCADREMENT DE TRAVAUX DE RECHERCHE ET PROFESSIONNELS

Mémoires de Maîtrise Génie Civil

- 1. Ahmad MECHAYMECH (2001) : Caractérisation en laboratoire des matériaux schisteux.
- 2. Grégory BOIGELOT, Arnaud DELEPLACE, Romuald JAKUBIAK (2001) : Etude de stabilité des talus par l'utilisation du logiciel PETAL LCPC : méthodes Fellenius et Bishop.

Mémoires de DEA Génie Civil

1. Samia SEDKI (2000) : Analyse de l'instabilité de la falaise d'Escalles au Cap Blanc Nez (Nord - Pas de Calais)

Mémoires de Master Ingénierie Hydraulique et Géotechnique (Sol & Eau)

Directeur des études depuis 2010.

2010-2011 : BENOUDA Adil, SEHLI Farid, RENIER Colin.

- **2011-2012** : MORAWSKI François, RAOUDANE Kamal, YAACOUBI Hussein.
- 2012-2013 : Clément MESSIEN, Abdelbasset BELHADEF, BENGUAGUI MAROUANE, OWCZAREK RUDY, ABASSI Noaman, OSTROUCH KAROL.
- 2013-2014 : EL ATTAR Mekki, JELIBAN Mouhsine, NOMBRE Koumbo Glwadys, SAHLI Sabri, TOUNSI Othman, WECXSTEEN Hugo, MUNEZERO Bella.
- 2014-2015 : AGNAOU Adil, OUCIEF Nedjla, BERNES Franck, EL HAJOUJI Abdelilah, RAZANAKOLONA Ndretsa Mona, AFFETO Richard.
- 2015-2016 : ONRE Alexis, SAMBOU Cyrille, BEROYAL Driss, BOUCIOUF Fathi, BOUTAMBA MBINA Sixela, CHELKI Mohamed, DJEBABRA Abderrahim, LAMHAMDI Maryem, EL HAJJI Mohamed Ayoub.

Mémoires de Mastère Spécialisé en Génie de l'Eau

Directeur depuis 2009.

- **2009-2010** : DOMINISKOWSKI Maxime, LESAGE Julien, MARSAN Jean-Christophe, PROUIN Laure, FAILLE Julien, SMUSZ Maxime, LEGRAND Matthieu, GUERRIOT Pierre.
- 2010-2011 : VANHECKE Jean-François, DENUDT Pierre, CORRARD Solène, PARIENTE SARTORI Federica, DUBOIS Cathy, CHIARELLA Laure, BENABDALLAH Noura, AL WARYACHI EI Houssine.
- 2011-2012 : SBAI EL OTMANI Faiçal, BERNAL ESCALANTE German Joaquin, IURETIG Gregory, TEULET Bertrand, NAMAOUI Lamia, BELON Emilie, TLILI Mouna, DUQUENNE Damien, KIRKHUS Timothée, HABCHI Johnny, HABCHI Rabib.
- **2012-2013** : BAK Alexandre, BOULAY Emmanuelle, CARPENTIER Marie, CAUSSE Mathieu, LENOIR Guillaume, LESAGER Stéphane, THENOT Aurélie, VERDUN Eric, YANOGO Victoire.
- **2013-2014** : BOURET Mathilde, CAUMARTIN Alban, FORRO Danaï, GUELFI JIMENEZ Jean Michael, LEBAIL Lenaïg, LEGRAIN Xavier, MAQUET Joris, SANGARE Aïssata.
- 2014-2015 : AZAZAR Saloua, BA Amadou-Lamine, DIALLO Modibo, GUERROUJI Rafik, HELLOW MEZAKENG Florent, HENNEQUIN Coline, LAYOUNE Jihane, MATUSZAK Mathieu, MUNENWA NAHIDUE Olivier, SAGNA Mariètou, SOUMAHORO Falikou, VANWYNSBERGHE Mathieu.
- 2015-2016 : BERNES Franck, BAILLY Laurent, LAAYOUN Jihane, DJEMBA MOUNA KINGUE Jean François, BECHIR ADOUM Hamdan, BELHADJ Amar, KENNOUCH Sofiane, ABDILLAHI Mickael, NLOMNGOI Georgia Anthonie, TOUZI Mohamed Ali.

Thèses de Doctorat en Génie Civil

1 - <u>Nom et Prénom</u>: Samia SEDKI (2005)

Taux d'encadrement : 80%

<u>Titre</u> : Analyse et modélisation géomécanique et hydromécanique des instabilités des falaises du Cap Blanc Nez (Pas de Calais, France) Encadrement : **E. CARLIER & J. EL KHATTABI**

Encadrement : E. CARLIER & J. EL KHAI IABI

2 - Nom et Prénom : Fadi SHAABAN (2011)

Taux d'encadrement : 20%

<u>Titre</u> : Apport potentiel des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) pour une meilleure gestion d'un littoral dans une optique de développement durable : Approches conceptuelles et méthodologiques appliquées dans le Nord de la France

Encadrement : E. CARLIER, B. LOUCHE, E. MASSON & J. EL KHATTABI

3 - <u>Nom et Prénom</u> : Hanan DARWISHE (2011)

Taux d'encadrement : 20%

<u>Titre</u> : Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) à la gestion et à l'aide à la décision : approche pluridisciplinaire pour l'évaluation des aspects à risques (application dans le nord de la France)

Encadrement : E. CARLIER, B. LOUCHE, E. MASSON & J. EL KHATTABI

4 - <u>Nom et Prénom</u> : Hind BENABDERRAZIQ (2014) Taux d'encadrement : 80%

<u>Titre</u> : Modalités et processus de contamination des eaux souterraines : Application à la présence du sélénium dans la nappe de la craie (Nord de la France)

Encadrement : I. SHAHROUR & J. EL KHATTABI

ACTIVITE PEDAGOGIQUE

ENSEIGNEMENT

J'assure un enseignement diversifié depuis 1999 en géologie générale et appliquée, hydrogéologie, géotechnique, géophysique (192h -250h)... et dans différentes formations : Licence, Master, cycle Ingénieur et Mastère spécialisé. J'ai également dispensé une formation au Centre National de la Fonction Publique Territoriale portant sur les Systèmes d'Information Géographique. Les enseignements dispensés sont :

- Géologie générale (cours, TD, TP).
- Géologie pour l'ingénieur (cours, TD, TP).
- Géodynamique (cours).
- Géotechnique (cours, TD, TP).
- Hydrogéologie (cours, TD, TP).
- Géophysique (cours, TD, TP).
- Visite de chantier et sorties de terrain.

PARTICIPATION AUX JURYS

- Soutenances de stages en entreprise : 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} Année IUP, Faculté des Sciences Appliquées de Béthune, Université d'Artois.
- Jury de la Licence 2 Génie Civil.
- Président du Jury Master Ingénierie Hydraulique et Géotechnique.
- Président du Jury Mastère Spécialisé en Génie de l'Eau.

ACTIVITES ADMINISTRATIVES

- De 2010 à 2016 Vice-Président de l'Université Lille1 en Charge de la Vie Étudiante.

- Depuis 2009 **Directeur du Mastère spécialisé en Génie de l'Eau** accrédité par la Conférence des Grandes Écoles (CGE).

- Depuis 2010 Directeur des études du Master 2 Sol & Eau (nouvelle habilitation : Ingénierie Hydraulique et Géotechnique).

- Participation à la construction de l'Université de Lille : Pilote de deux groupes de Travail **Politiques** " Vie de Campus " et " Vie Sportive "

Participation dans divers conseils et commissions :

- Ancien membre du **Conseil d'Administration**, Université des Sciences et Technologies de Lille1.
- Ancien membre du **Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire**, Université des Sciences et Technologies de Lille1.
- Ancien membre du Conseil Scientifique, Université des Sciences et Technologies de Lille1.
- Ancien membre du **Conseil d'Administration** du Centre Régional des Œuvres Universitaires et Sociales (**C.R.O.U.S Nord-Pas-de-Calais**).
- Ancien membre du **Conseil Académique de l'Éducation Nationale** (C.A.E.N Nord-Pas-de-Calais).

Ces mandats ont été accompagnés de participations dans diverses commissions (formation, culture, aménagement, vie sociale et associative,...).

PUBLICATIONS, RAPPORTS ET TRAVAUX

MEMOIRE DE DEA

[1] " Caractérisation des zones à risques le long du tracé routier Jebha - Cala Iris : exemple du secteur Cala Iris-Taghzoute (Rif, Maroc)".

Diplôme d'Études Approfondies, Université Lille I, octobre 1997.

THESE D'UNIVERSITE

[2] " Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : Application aux versants du Rif Central (Maroc)".

Thèse de Doctorat, Spécialité Génie Civil, Université d'Artois, 18 décembre 2001.

RAPPORT SCIENTIFIQUE

[3] "Modélisation de la migration des nitrates dans la nappe alluviale du bassin versant des captages de Catillon-sur-Sambre (Nord de la France) ".

Contrat de recherche financé par Noréade et l'Agence de l'eau Artois Picardie, 2011.

ARTICLES ET COMMUNICATIONS

Revues à comité de lecture

[4] E., El Khattabi, J. Carlier, E. and Louche, B. 2017. The Effect of Rock Collapse on Coastal Cliff Retreat along the Chalk Cliffs of Northern France. Journal of Coastal Research (Accepted).

- [5] Carlier, E. and El Khattabi, J. 2016. Impact of global warming on Intensity-Duration-Frequency (IDF) relationship of precipitation, A Case Study of Toronto, Canada. Open Journal of Modern Hydrology, 2016, 6-1, 1-7. (DOI: 10.4236/ojmh.2016.61001).
- [6] Carlier, E. and El Khattabi, J. 2015. A Probabilistic Approach for Spring Recession Flows Analysis. Open Journal of Modern Hydrology, 2015, 5,-2, 11-18. (DOI: 10.4236/ojmh.2015.52002).
- [7] Cary, L., Benabderraziq, H., El Khattabi, J., Gourcy, L., Parmentier, M., Picot, J., Khaska, M., Laurent, A. and Négrel, Ph. 2014. Tracking selenium in the Chalk aquifer of northern France: Sr isotope constraints. Applied Geochemistry, 48, 70-82.
- [8] Alayat, H, El Khattabi, J. et Lamouroux, C. 2013. Évolution spatiale des caractéristiques physicochimiques des eaux du lac Oubeira imposé par les conditions sévères de la sécheresse (extrême NE algérien). European Scientific Journal, 9-36, 564-579.
- [9] Chaaban, F., Darwishe, H., Battiau-Queney, Y., Louche, B., Masson, E., **El Khattabi**, J. and Carlier, E. 2012. Using ArcGISH Modelbuilder and Aerial Photographs to Measure Coastline Retreat and Advance: North of France. Journal of Coastal Research, 28-6, 1567–1579.
- [10] Chaaban, F., Darwishe, H., Louche, B., Battiau-Queney, Y., Masson, E., El Khattabi, J. and Carlier, E. 2012. Geographical Information System (GIS) approach for environmental management in coastal area (Hardelot-Plage : France). Environmental Earth Sciences, 65-1, 183-193.
- [11] Chaaban, F., ., Masson, E., Darwishe, H., Louche, B., El Khattabi, J., Battiau-Queney, Y. et Carlier, E. 2010. SIG et modélisation hydrogéologique littorale : application à la plage d'Hardelot (Pas-de-Calais, France. Géomatique Expert, 76, 58-67.
- [12] Serhal, H., Bernard, D., El Khattabi, E., Bastin-Lacherez, S. and Shahrour, I. 2009. Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer, Northern France. Environmental geology, 57-7, 1579-1592.

- **[13]** Bernard, D., **El Khattabi, J.,** Lefèvre, E., Serhal, H., Bastin-Lacherez, S. and Shahrour, I. 2008. Origin of nickel in water solution of the chalk aquifer (Northern of France) and geochemical factors of variation. **Environmental geology**, 53-5, 1129-1138.
- [14] Carlier, E., El Khattabi, J. and Potdevin, JL. 2006. Solute transport in sand and chalk : a probabilistic approach. Hydrological Processes, 20, 1047-1055.
- [15] Carlier, E. and El Khattabi, J. 2005). Proposal for a probabilistic model of dispersion: a first validation. Mathematical and Computer Modelling, 42, 1137-1144.
- [16] El Khattabi, J. and Carlier, E. 2004. Tectonic and hydrodynamic control of slope instabilities in the northern area of the Central Rif (Morocco). Engineering Geology, 71, 255-264.
- [17] El Khattabi, J. Carlier, E. et Louche, B. 2004. Une approche pluridisciplinaire pour l'identification de la typologie, la cartographie et l'analyse des mouvements de terrain dans le Rif Central (Maroc). Africa Geosciences Review, 11-1, 1-15.
- [18] El Khattabi, J. et Louche, B. (2004). Influence de la pente du substrat sur la qualité des eaux de la nappe des flyschs dans le Rif Central (Maroc). Africa Geosciences Review, 11-4, 265-280 (Rock View).
- [19] EL Khattabi, J., Boulemia, B., Carlier, E. et Henry, E. 2003. Étude des glissements de terrain dans la région nord du Rif Central (Maroc) : Analyse et modélisation. Travaux de l'Institut Scientifique de Rabat, 21, Série Géologie et Géographie Physique, numéro spécial sur apports des connaissances géologiques au développement socio-économique des régions Nord du Maroc, 241-253.
- [20] EL Khattabi, J., Boulemia, B., Henry, E., et Carlier, E. 2002. Démarche méthodologique pluridisciplinaire pour l'étude des instabilités de versants : Application aux glissements du Rif Central (Maroc). Revue Française de Géotechnique, 100, 109-119.

Actes de colloques internationaux à comité de lecture

- [21] L. Cary, H. Benabderraziq, J. El khattabi, M. Parmentier, L. Gourcy, Ph. Négrel (2014). Tracking selenium behaviour in chalk aquifer (northern France): Sr and 34S-sulphates isotopes constraints. EGU General Assembly Apr. 2014, Vienne, Austria, 16.
- [22] L. Cary, L. Gourcy, H. Benabderraziq, J. El khattabi, A. Laurent, Ph. Négrel (2013). Multi isotopic tools to understand selenium origins in groundwaters of the Chalk aquifer in Northern France. EGU General Assembly Apr. 2013, Vienne, Austria, 15.
- [23] Alayat, H, El Khattabi, J. Mouissi, S. et Satouh, R. 2012. Contribution à la connaissance de l'envasement et à la distribution spatiale de N, P, K de la vase du lac Oubeira (extrême NE algérien). Conférence WATMED 6 (5th International Conference on Water Resources in Mediterranean Basin), 10-12 octobre 2012, Sousse, Tunisie.
- [24] Chaaban, F., Louche, B., El Khattabi, J., Masson, E., Battiau-Queney, Y. et Carlier, E. 2010. Apports potentiels de systèmes d'information géographique (SIG) et de systèmes de modélisation de l'eau souterraine (GMS) pour une meilleure gestion d'un littoral dans une optique de développement durable : Exemple : littoral du secteur Hardelot-plage, Pas-de-Calais. Conférence WATMED 5 (5th International Conference on Water Resources in Mediterranean Basin), 26-28 mai 2010, Université Lille1, France.
- [25] Darwishe, H., Louche, B., Masson, E., El khattabi, J., Chaaban, F. et Carlier, E. 2010. Gestion de la ressource en eau de la nappe de la craie dans le secteur de Béthune (nord de la France) : Couplage des Systèmes d'Information Géographique et de la modélisation hydrogéologique. Conférence WATMED 5 26-28 mai 2010, Université Lille1, France.
- [26] Chaaban, F., Louche, B., Masson, E., El Khattabi, J., Darwishe, H., Battiau-Queney, Y. and Carlier, E. 2010. Application of GIS and GMS for coastal management (North of France). Conference AWRA (<u>American Water Resources Association</u>), Spring Specialty Conference « Geographic Information Systems (GIS) and Water Resources VI », 29-31mars 2010, Orlando, Florida, USA.

- [27] Darwishe, H., Masson, E., Louche, B., El Khattabi, J., Chaaban, F. and Carlier, E. 2010. Coupling GIS with Hydrogeological Modeling, case study: Chalk aquifer of Northern France. Conference AWRA (<u>American Water Resources Association</u>), Spring Specialty Conference « Geographic Information Systems (GIS) and Water Resources VI », 29-31mars 2010, Orlando, Florida, USA.
- [28] El Naghi, F., Bernard, D., Emsellem, Y., Bastin-Lacherez, S., Serhal, H. et El Khattabi, J. 2006. Contribution à la modélisation de la migration des pesticides vers la nappe à travers la zone non saturée : Cas de l'Atrazine. 3^{ème} Conférence Internationale sur les "Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen", WATMED 3, Tripoli, Liban, 1-3 novembre.
- [29] Serhal, H., Bernard, D., Bastin-Lacherez, S., El Khattabi, J. et Shahrour, I. 2006. La protection et la mise en valeur des eaux souterraines : Impact des pratiques culturales et des rejets urbains sur la qualité de la nappe de la craie (bassin Artois Picardie, France). 3^{ème} Conférence Internationale sur les "Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen", WATMED 3, Tripoli, Liban, 1-3 novembre.
- [30] Serhal, H., Bastin-Lacherez, S., Bernard, D. and El Khattabi, J. 2006. Study of nitrate migration in the unsaturated-saturated soil zone : Impacts on the ground water quality. Colloque international "Gestion des grands aquifères", AIH and BRGM, 30th May - 31st May - 1st June, Dijon, France, pp. 78-92.
- **[31]** Sedki, S., **El Khattabi**, J., Carlier, E. and Duthoit, B. 2006. Multi-disciplinary approach to the evaluation of collapse risk of the Blanc Nez cape cliffs, France. IAEG2006 Congress, Engineering geology for tomorrow's cities, 6 10 September 2006 Nottingham, United Kingdom.
- [32] El Khattabi, J., Boulemia, C., Carlier, E. and Sedki, S. 2002. Identification of instabilities factors and their integration in a model of rupture : a method of safety coefficient evaluation. 15th Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers (ASCE), Columbia University in the City of NewYork, USA, June 2-5.
- **[33] El Khattabi**, J., Boulemia, C., Carlier, E. and Van Laethem, F. 2002. The water levels : an essential parameter in the study of ground stability and safety coefficient. 5th International Conference on Hydroinformatics, International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), IWA Publishing, Cardiff, UK, 1400-1407.

Actes de colloques nationaux à comité de lecture

- [34] Chaaban, F., Masson, E., Darwishe, H., Louche, B., El Khattabi, J., Battiau-Queney, Y. et Carlier, E. 2010. SIG et modélisation hydrogéologique littorale : application à la plage d'Hardelot (Pas-de-Calais, France). Conférence Francophone ESRI, SIG 2010, 29-30sep, Versailles, France.
- [35] Darwishe, H., Louche, B., Masson, E., El Khattabi, J., Chaaban, F. et Carlier, E. 2009. Système d'Information Géographique pour une meilleure compréhension et gestion des données de modélisation hydrogéologique. Conférence Francophone ESRI, SIG 2009, Versailles, France.
- [36] El Khattabi, J. 2002. Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : Application aux versants du Rif central (Maroc). Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert », Innovation et Développement en Génie Civil et Urbain, Association Française de Génie Civil (AFGC), Association Universitaire de Génie Civil (AUGC) et Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation (IREX), Toulouse 30 6 31 Mai.
- [37] El Khattabi, J., Colbeaux, JP., Van Laethem, F. et Boulemia, C. 2002. Identification de la typologie des mouvements de terrain du Rif Central (Maroc) à l'aide d'une démarche méthodologique pluridisciplinaire : résultats de l'étude préliminaire. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS), Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR), Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement (CFGI) et l'Institut National Polytech. de Lorraine (INPL), Nancy 8-9 Octobre.
- [38] El Khattabi, J., Boulemia, C., Carlier, E., Colbeaux, JP. 2002. Identification des facteurs et des mécanismes à l'origine des glissements plans profonds dans le Rif Central (Maroc) à l'aide d'une démarche méthodologique pluridisciplinaire : Résultats de l'étude détaillée. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, CFMS, CFMR, CFGI et INPL, Nancy 8 et 9 Octobre.

- [39] El Khattabi, J. et Carlier, E. 2004. Facteurs et mécanismes générateurs des glissements de la zone littorale du Rif Central (Maroc) : analyse et modèle conceptuel. JNGG - Géotechnique et Aménagement, CFMS, CFMR, CFGI en association avec le Groupement Belge de Mécanique des Sols (GBMS), le Groupement Belge de Mécanique des Roches (GBMR) et le Groupement Belge de Géologie de l'Ingénieur (GBGI), Lille 28-30 juin.
- [40] Carlier, E. et **El Khattabi**, J. 2004. Approche probabiliste de la dispersion et de l'adsorption de polluants en milieu à simple et double porosité. Journées Nationales de JNGG Géotechnique et Aménagement, CFMS, CFMR, CFGI en association avec GBMS, GBMR et GBGI, Lille 28-30 juin.

Résumés, présentations orales, posters...

- [41] El Khattabi, J., Lamouroux, C. et Boulemia, C. 1999. Caractéristiques des matériaux grésopelitiques le long de La Rocade routière Tetouan-Al Hoceima (Rif, Maroc). 4^{ème} Congrès de Mécanique, Mohammedia, Maroc.
- **[42] El Khattabi**, J. 2003. Mise en place d'une démarche méthodologique pluridisciplinaire pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc). Séminaire du Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences, Université du Havre, 7 février.

Introduction Générale

L'eau est omniprésente dans la mémoire commune. Elle est abordée de manière ubiquitaire dans les écrits ou les pratiques religieuses. Elle est citée souvent comme une source de vie et de purification, comme elle est associée aux miracles et aux processions. A titre d'exemple, le fleuve sacré du Gange représente pour les hindous une association de la vie et de la mort. Mourir et y être incinéré, garantit la Moksha ou la libération qui met fin au cycle de la réincarnation et ainsi l'accession au Nirvana. Les religions du Livre (judaïsme, christianisme et islam) ont toutes pris naissance dans des zones désertiques, où l'eau reste précieuse, cette rareté constitue un" don de Dieu " (Anne Luigi-Duggan). L'eau occupe une place prépondérante dans l'Islam, non seulement de par sa valeur intrinsèque, pour une civilisation qui s'est surtout développée dans des pays désertiques, mais aussi par la symbolique très précise qu'elle véhicule. Le rite et les symboles liés à l'eau et la purification sont nombreux dans la religion juive. L'eau intervient souvent dans le déroulement d'un culte comme vecteur de pureté et de spiritualité. Enfin, le baptême reprend la scène décrite par les Evangiles où Jésus s'est fait immergé dans le Jourdain par Jean le Baptiste.



Le Baptême du Christ, Lambert Sustris (1915-1920 à vers 1584).

Au-delà du fait religieux l'eau a marqué l'histoire humaine. Autour des sources, des rivières ou de grands fleuves, les civilisations sont nées, ont évoluées et dominées le monde. Ainsi, l'eau est source de conflits car elle est le secret pour produire les richesses, les transporter et les commercialiser. Sans eau, la nature change de visage, la terre devient aride et hostile au développement de la vie. Des peintures et gravures rupestres sont les seuls témoins de tels événements qui ont transformé les milieux, jadis riche en faune et en flore.



Peintures et gravures rupestres du Tassili (Algérie).

Compte tenu de ces bouleversements et le rôle que joue l'eau dans le développement des civilisations, le génie humain n'a cessé d'inventer des techniques pour assurer l'approvisionnement des cités par des techniques ingénieuses. Les *qanats* constituent peut-être l'avancée technique la plus importante de toute l'histoire de l'irrigation en Perse. Les premiers d'entre eux auraient été creusés

au nord-ouest du plateau iranien vers la fin du l^{er} millénaire av. J.-C. En raison de son efficacité, cette technique s'est étendue lentement par la suite vers les autres pays arides comme, le Maroc, l'Algérie, la Libye, le Proche Orient et la zone ouest de l'Afghanistan.



Malgré ces faits, l'Homme continu à maltraiter son milieu en étant l'acteur et le témoin. Il est ainsi le principal pollueur de la ressource. Une nouvelle ère, l'anthropocène, qui a débuté selon Paul Crutzen (Prix Nobel de chimie) autour de 1800 avec l'avènement de la révolution industrielle, mis fin à la logique humaniste d'apercevoir le milieu naturel comme le jardin commun. Les effets sont irrémédiables, surtout à un moment où l'on ressent de plus en plus les conséquences du changement climatique tant redouté.



Au pays noir (1890), Constantin Meunier (1831 – 1905).

L'eau comme source vitale est également un facteur déterminant dans l'activité des sociétés humaines. Sa présence contribue au développement économique comme elle peut le retarder par son action destructrice que ce soit lors des épisodes pluvieux exceptionnels ou par son action déstabilisatrice au sein des massifs. La connaissance des ressources en eau souterraine, l'évaluation de ses réserves, son exploitation rationnelle et sa pérennisation, est d'une importance primordiale pour la mise en valeur et le développement agricole, économique ou industriel d'une région.



Mer agitée à Etretat (1883), Claude Monnet (1840 - 1926).

L'eau est une question éthique et politique. L'accès à l'eau et à l'assainissement n'est pas assuré à l'ensemble de la population mondiale même si des améliorations sont constatées à base de données fournies par les états. Selon l'OMS, encore aujourd'hui 748 millions de personnes n'ont pas facilement accès à une source améliorée d'eau potable. Et des centaines de millions de personnes n'ont ni eau propre ni savon pour se laver les mains, ce qui favorise la propagation de maladies diarrhéiques, deuxième cause de mortalité chez les enfants de moins de cinq ans. Ainsi, les fonds mondiaux pour améliorer l'accès à l'eau, sont dirigés en priorité aux régions mal desservies, notamment l'Afrique subsaharienne, l'Asie du Sud et l'Asie du Sud-Est. Quant à l'assainissement, 2.5 millions d'hommes, de femmes et d'enfants dans le monde sont encore dépourvus d'accès à des services d'assainissement de base. Près d'un milliard de personnes continuent de pratiquer la défécation à l'air libre.

La géologie de l'ingénieur, à travers ses nombreuses disciplines (hydrologie, hydrogéologie, géotechnique, géomorphologie,...), s'intéresse aux différents aspects et comportements de l'eau dans le milieu. Sa présence, Son écoulement, son interaction, son action... font l'objet d'études analytiques et de modélisation. Ainsi, de nombreuses techniques sont mises en œuvre pour déterminer les paramètres physiques nécessaires à la mise en place de modèle et d'outils d'aide à la décision. Ces processus font partie d'une évolution historique de développement de l'hydrogéologie comme discipline dont l'apparition reste très récente sous sa forme technique. Ainsi, il est apparu que le sous-sol est, lorsqu'il le permet, un réservoir d'eau extrêmement complexe, et que le fait de trouver et d'exploiter de l'eau souterraine posait d'importantes questions liées à la qualité de l'eau exploitée, et à la pérennité de cette qualité. Les chimistes, en s'intéressant au comportement des ions et substances dissoutes dans l'eau souterraine, ont ainsi développé les techniques utilisées actuellement par les hydrogéochimistes, dont le professeur Scholler fut l'un des principaux initiateurs. Plus récemment, c'est l'amélioration des techniques d'analyses et des moyens informatiques qui donnent accès à des évolutions significatives dans le domaine de l'hydrogéologie.

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches est une synthèse de mes principaux travaux de recherche menés au sein de différents laboratoires universitaires. Depuis ma thèse j'ai approfondi ma thématique de recherche sur les mouvements de terrain mais je l'ai également développée en travaillant sur la thématique portant sur les processus d'écoulements dans les sols saturés et non

saturés. L'ensemble des travaux représente une cohérence qui identifie l'eau comme un facteur fondamental dans le développement économique. Les études ont été menées dans des contextes géographiques et géologiques aussi divers montrant ainsi les différents impacts.



Along the river Beaumont, Louis Aston Knight (1873–1948).

Problématique

Les dégâts causés par les catastrophes naturelles, dont les glissements de terrain et les écroulements de massifs rocheux, ont toujours engendré un climat d'anxiété impliquant, surtout depuis plusieurs décennies un intérêt particulier pour l'étude des causes des instabilités dans l'objectif de diminuer les dommages tant sur le plan matériel qu'en pertes de vies humaines.

De nombreuses équipes de recherche considèrent comme une préoccupation majeure l'étude de la stabilité des versants naturels et des massifs rocheux [Kheder, 1996], [Sjoberg, 1999], [Lebourg,2000], [El khattabi, 2001], [El Khattabi and Carlier, 2004], [Ghosh et *al.*, 2014]. Leur objectif réside dans la détermination des facteurs à l'origine des instabilités, indispensables à toute modélisation prédictive fiable. En raison de la complexité de l'étude liée, entre autres, aux conditions d'observations sur le terrain, à la cinétique des mouvements et aux mécanismes réactionnels qui sont difficilement dissociables (suite à la conjonction des facteurs), la compréhension des phénomènes observés n'est pas toujours possible. S'ajoute à cela, le problème de la diversification des méthodes d'étude existantes. C'est pourquoi les approches adoptant des démarches pluridisciplinaires offrent des résultats plus réalistes.

Un des premiers aspects qui concerne l'étude est la détermination des facteurs à l'origine des mouvements. Ce travail comprend à la fois l'identification physique et mécanique en laboratoire et in situ. La détermination des caractéristiques des matériaux est fondamentale pour identifier les causes des instabilités [El Khattabi, 2001; Sedki, 2005]. Ainsi, les massifs rocheux sont souvent sujets à des problèmes d'instabilité, liés généralement à divers facteurs comme leur structure, les conditions hydrogéologiques, les facteurs anthropiques. L'objectif de mes travaux a été d'identifier les facteurs à l'origine des instabilités et de définir les mécanismes qui s'opèrent dans les mouvements de terrain en m'appuyant sur une démarche pluridisciplinaire. L'élaboration de modèles fiables et représentatifs constitue l'aboutissement des travaux réalisés.

Le second axe traite les processus des écoulements dans les sols saturés et non saturés ainsi que leur impact sur la qualité des eaux. La compréhension des mécanismes de transport hydrique et des solutés dans un milieu poreux non saturé est essentielle pour répondre aux interrogations concernant le devenir des polluants appliqués à la surface du sol [Carlier et al., 2006; Carlier and El Khatttabi, 2015]. Les approches utilisées sont analytiques, probabilistes et numériques. Les études de cas concernent en premier lieu la région Nord de la France mais aussi le Nord marocain et le Nord-Ouest algérien. Dans le nord de la France, les concentrations en nitrates mesurées dans la nappe de la craie atteignent ou dépassent fréquemment le seuil de potabilité fixé à 50 mg/l par la Directive Européenne transcrite en droit français en 2001. Cet état de fait est la conséquence direct de l'essor de l'agriculture intensive, l'industrialisation ou encore la croissance démographique [Serhal, 2006; Serhal et al., 2009; Darwishe, 2011; El Khattabi, 2011]. Pour remédier à cette situation, plusieurs programmes ont été mis en place : Ferti-mieux dans le domaine de l'agriculture, raccordement aux stations d'épuration et traitement des rejets.... Pour améliorer la gualité de la nappe de la région (95% de l'eau distribuée dans la région) j'ai participé à différentes études intégrant la modélisation et les SIG. La contamination de la nappe peut également être le résultat de pressions naturelles via l'interaction avec le milieu géologique. Ainsi, le relargage des éléments, notamment des métaux, dans le milieu se réalise dans des conditions précises d'un point de vue hydrodynamique et physicochimique. Le dépassement des normes de potabilité de certains éléments comme le sélénium, le nickel ou le fer requiert la nécessité de traitement de l'eau brute avant la distribution. [Vallée, 1999 ; Lefèvre, 2006 ; Bernard et al., 2008; Benabderrazzig, 2014 ; Cary et al., 2013 et 2014]. Les études que j'ai menées ont permis de mieux connaître le contexte géologique et hydrogéologique de la nappe de la craie et de déterminer l'origine des éléments détectés ainsi que l'influence de l'occupation du sol et surtout les conditions du milieu. D'autres travaux, au Maroc et en Algérie ont porté respectivement sur la caractérisation physico-chimique des eaux souterraines et les eaux de surfaces. Ainsi, dans le Nord du Maroc, les intrusions salines d'origine tectoniques contaminent la nappe des flyschs, ce qui empêche le développement agricole et rend difficile l'approvisionnement des villages en eau potable [El khattabi et al., 2004]. Par ailleurs, les lacs du pourtour méditerranéen, et plus particulièrement ceux de l'Afrique du nord, connaissent une dégradation qualitative et quantitative, résultant de contraintes naturelles (carences des précipitations et écoulements) et anthropiques (prélèvements, rejets). Ainsi, les caractéristiques physico-chimiques des eaux du lac Oubeira dans le nord-ouest algérien ont été étudiées dans les conditions sévères en période de sécheresse [Alayat et al., 2013].

Axes de recherche

Mes thèmes de recherche se déclinent en deux grands domaines :

1. Étude de la dynamique côtière et de la stabilité des versants (analyse et modélisation) par l'approche pluridisciplinaire (géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique).

- Glissements de terrain affectant les versants naturels de la chaîne rifaine (Nord du Maroc).
- Problématique du recul de trait de côte liée aux instabilités affectant les falaises crayeuses et les côtes sableuses du Nord Pas de Calais.

2. Processus des écoulements dans les sols saturés et non saturés ; impact sur la qualité des sols et des eaux.

- La protection et la mise en valeur des eaux souterraines et les eaux de surface.
 - * Impact des pratiques culturales et des rejets urbains sur la qualité des eaux souterraines et de surface ;
 - * Étude de la minéralisation de la nappe sous pressions naturelles et/ou anthropiques.

Organisation du document

Ce mémoire s'articule autour de six chapitres. Dans un premier temps, j'aborderai le thème de la dynamique côtière et de la stabilité des versants (analyse et modélisation) par l'approche pluridisciplinaire (géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique). Ce thème est composé

de deux chapitres. Le **chapitre 1** qui comporte deux exemples d'applications de la méthode de l'approche multidisciplinaire à des mouvements de terrain. La première application concerne l'analyse des glissements de terrain affectant les versants du Rif central (Nord du Maroc) qui menaçaient la future liaison routière : la rocade méditerranéenne et engendrant un faible recul du trait de côte. Quant à la seconde application, elle est orientée sur les écroulements rocheux affectant les falaises crayeuses du Cap Blanc Nez (Nord de la France) et qui sont à l'origine d'un recul du trait de côte non négligeable jusqu'à 0.25 m/an. Au-delà de ce recul, ces instabilités représentent un danger réel dans un site très fréquenté (1millions de visiteurs par an). **Le chapitre 2** est consacré à la dynamique sédimentaire côtière et en particulier, la dynamique dunaire d'Hardelot-Plage (un secteur touristique) à l'origine d'un fort recul du trait de côte par l'influence de l'hydrodynamique de la nappe.

Le second thème (Processus des écoulements et impacts sur la qualité des sols saturés et non saturés), comporte quatre chapitres. Le **chapitre 3** aborde la question de la minéralisation des eaux souterraines dans la rive sud de la méditerranée à travers deux exemples : cas de la nappe des flyschs (Rif central, Maroc) et le lac d'Oubeira (Nord Est algérien). Le **chapitre 4** est consacré à l'impact des pratiques culturales et des rejets urbains sur la qualité des eaux souterraines dans le bassin Artois Picardie. Plusieurs études seront exposées utilisant des approches similaires basées sur l'analyse et des modèles intégrés allant de la zone racinaire jusqu'à le milieu saturé en passant par la zone non saturée ainsi qu'une approche statistique couplée au SIG. Enfin, le **chapitre 5** complète l'étude réalisée au sein du bassin Artois Picardie par la pollution géogénique via les modalités et les processus de la contamination naturelle de la nappe de la craie par les métaux. Plusieurs éléments sont pris en compte dans cette partie, il s'agit en particulier du nickel et le sélénium.

Bibliographie

- Alayat, H., El Khattabi, J. et Lamouroux, C. 2013. Évolution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des eaux du lac Oubeira imposé par les conditions sévères de la sécheresse (extrême NE algérien). European Scientific Journal, 9-36, 564-579.
- Benabderraziq, H. 2014. Modalités et processus de la contamination des eaux souterraines : application à la présence du sélénium dans la nappe de la craie (Nord de la France). Thèse Université Lille1, 208p.
- Bernard, D., El Khattabi, J., Lefèvre, E., Serhal, H., Bastin-Lacherez, S. and Shahrour, I. 2008. Origin of nickel in water solution of the chalk aquifer (Northern of France) and geochemical factors of variation. Environmental geology, 53-5, 1129-1138.
- Carlier, E., El Khattabi, J. 2015. A Probabilistic Approach for Spring Recession Flows Analysis. Open Journal of Modern Hydrology, 2015, 5-2, 11-18.
- Carlier, E., El Khattabi, J. and Potdevin, J.L. 2006. Solute transport in sand and chalk: a probabilistic approach. Hydrological Processes, 20, 1047-1055.
- Cary, L., Benabderraziq, H., El Khattabi, J., Gourcy, L., Parmentier, M., Picot, J., Khaska, M., Laurent, A. and Négrel, Ph. 2014. Tracking selenium in the Chalk aquifer of northern France: Sr isotope constraints, Applied Geochemistry, 48, 70-82.
- Cary, L., Benabderraziq, H., El Khattabi, J., Parmentier, M., Gourcy, L. and Négrel, Ph. 2014. Tracking selenium behaviour in chalk aquifer (northern France): Sr and 34S-sulphates isotopes constraints. EGU General Assembly Apr. 2014, Vienne, Austria, 16.
- Darwishe, H. 2011. Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) à la gestion et à l'aide à la décision : approche pluridisciplinaire pour l'évaluation des aspects à risques dans le nord de la France site d'application. Thèse, Université de Lille 1, France. 182p.
- El Khattabi, J. 2001. Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc). Thèse d'Université d'Artois, 258 p.
- El Khattabi, J. 2011. Modélisation de la migration des nitrates dans la nappe alluviale du bassin versant des captages de Catillon-sur-Sambre (Nord de la France), Rapport scientifique pour Noréade et l'Agence de l'eau Artois Picardie, 28p.
- El Khattabi, J. and Carlier, E., 2004. Tectonic and hydrodynamic control of slope instabilities in the northern area of the Central Rif (Morocco). Engineering Geology, 71, 3-4, 255-264.

- El Khattabi, J., Carlier, E. and Louche, B. 2004. Une approche pluridisciplinaire pour l'identification de la typologie, la cartographie et l'analyse des mouvements de terrain dans le Rif Central (Maroc) Africa Geosciences Review, 11-1, 1-15.
- Ghosh, S., Kumar, A., and Bora, A. 2014. Analyzing the stability of a failing rock slope for suggesting suitable mitigation measure: a case study from the Theng rockslide, Sikkim Himalayas, India. Engineering Geology and Environment, 73, 4, 931-947.
- Kheder, K. 1996. Méthodologie d'étude de la stabilité des carrières souterraines complexes exploitées par chambres et piliers abandonnés. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Lebourg, T. 2000. Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales, Thèse de Doctorat Géologie appliquée, Université de Bordeaux I, 276p.
- Lefèvre, E. 2006. Etude de la minéralisation de la nappe de la craie sous pressions naturelles et anthropiques : application à la présence de l'azote, du soufre et du nickel dans les eaux souterraines. Thèse Université de Lille1, 162p.
- Sedki, S. 2005. Analyse et modélisation géomécanique et hydromécanique des instabilités des falaises du Cap Blanc Nez (Pas de Calais, France). Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 158 p
- Serhal, H. 2006. Influence des pressions anthropiques sur l'évolution des concentrations en nitrates dans la nappe de la craie du Nord de la France. (Applications au Cambrésis et nord Audomarois). Thèse, Université de Lille 1, France. 200p.
- Serhal, H. Bernard, D., El Khattabi J., Bastin-Lacherez, S. and Shahrour, I. 2009. Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer, Northern France. Environmental geology, 57-7, 1579-1592.
- Sjoberg, J. 1999. Analysis of large-scale rock slopes. Doctoral thesis, Lulea University of Technology, Department of civil and mining engineering, Division of Rock Mechanics, 790p.
- Vallée, K. 1999. Le nickel dans les eaux alimentaires. Application à des champs captants du bassin Artois-Picardie. Thèse Université de Lille1.

Thème 1

Étude de la dynamique côtière et de la stabilité des versants (analyse et modélisation) par l'approche pluridisciplinaire (géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique).

Les dégâts causés par les catastrophes naturelles, dont les glissements de terrain et les écroulements de massifs rocheux, ont toujours engendré un climat d'anxiété impliquant, surtout depuis plusieurs décennies, un intérêt particulier pour l'étude des causes des instabilités dans l'objectif de diminuer les dommages tant sur le plan matériel qu'en pertes de vies humaines.

De nombreuses équipes de recherche considèrent comme une préoccupation majeure l'étude de la stabilité des versants naturels et des massifs rocheux. Leurs travaux s'inscrivent dans la détermination des facteurs à l'origine des instabilités, indispensables à toute modélisation prédictive fiable. En raison de la complexité de l'étude liée, entre autres, aux conditions d'observations sur le terrain, à la cinétique des mouvements et aux mécanismes réactionnels qui sont difficilement dissociables (suite à la conjonction des facteurs), la compréhension des phénomènes observés n'est pas toujours possible. S'ajoute à cela, le problème de la diversification des méthodes d'étude existantes. C'est pourquoi les approches actuelles adoptent de plus en plus de démarches pluridisciplinaires qui offrent des résultats plus réalistes. Les versants littoraux soumis à une dynamique littorale sont marqués par des mouvements dont la conséquence majeure est le recul du trait de côte. Cette préoccupation a fait l'objet de mes travaux qui ont porté à la fois sur les mouvements de terrain affectant les versants côtiers et la dynamique dunaire.

Chapitre 1: Mise en place d'une démarche méthodologique pluridisciplinaire pour l'étude des instabilités de versants.

Introduction

Les instabilités de terrain font l'objet de nombreuses études regroupées en deux grandes méthodes : les méthodes naturalistes et les méthodes mécaniciennes. Ces méthodes, qui adoptent une approche qualifiée de linéaire, aboutissent souvent à des résultats partiels, d'où l'intérêt de la mise en place d'une approche transversale. J'ai formulé une démarche méthodologique pluridisciplinaire qui s'appuie sur une approche transversale. Elle associe à la fois géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique. Le fondement de la méthodologie repose sur l'analyse de l'instabilité, suivie de la modélisation et de la cartographie des risques (Figure 1.1).



Figure 1.1. Schéma global de l'étude des instabilités de versants.

Application de la méthode aux versants du Rif central

Pour mettre en pratique la méthodologie, une première expérimentation a été effectuée dans les versants du Rif central au bord de la mer Méditerranée (Maroc Septentrional). L'objectif fixé dans cette étude consiste à identifier les facteurs et les mécanismes associés à l'origine des glissements de terrain (phase 1) en vue de les modéliser et cartographier les risques éventuels (phase 2).



Figure 1.2. Localisation et géologie du secteur d'étude [Andrieux, 1971].

Cette région (Figure 1.2) qui se distingue par ses caractéristiques géographiques et géologiques très contrastées est également marquée par de fréquents mouvements de terrain endommageant

régulièrement l'habitat, ainsi que le réseau routier et ses infrastructures. Lors de la première phase d'étude, les phénomènes naturels ont été décrits d'un point de vue géologique et les matériaux qui y sont impliqués ont été caractérisés. Ainsi, une typologie des mouvements de terrain dans cette région a été dressée [Maurer, 1965 et 1968 ; Milliés-Lacroix, 1968; Andrieux, 1971; Andrieux et Mégard, 1973; Malatrait 1975; Flageollet, 1989; El Khattabi, 2001], en orientant l'étude sur les glissements profonds (Figure 1.3).



Figure 1.3. Localisation des glissements et leur corrélation aux écoulements souterrains.

Ensuite, les facteurs macro-déstabilisateurs ont été déterminés en réalisant des cartes de synthèse. Ainsi, les différents facteurs relèvent des domaines de la néotectonique liée à l'intense activité sismique à laquelle est soumise la région, la géomorphologie, caractérisée notamment par les pentes très accentuées, l'hydrogéologie avec un écoulement souterrain conforme aux sens des glissements (Figure 1.4), la structure géologique marquée par une fracturation intense et un plan du charriage à pendage variable.



Figure 1.4. Corrélation entre les glissements et les écoulements souterrains.

Ce dernier, qui correspond au mur de la nappe phréatique, est fortement impliqué dans la déstabilisation des versants et identifié comme le facteur majeur d'instabilité [El Khattabi, 1997 et 2001; El Khattabi et *al.*, 2002, El Khattabi et Carlier, 2004].

La deuxième phase a permis de compléter la première par l'étude géotechnique et par la modélisation des glissements plans. L'étude en laboratoire à travers la caractérisation des matériaux schisteux, analyses physiques, minéralogiques et chimiques (eau et matériaux), observations microscopiques (optique et MEB) et essais mécaniques, a permis d'identifier les mécanismes microdéstabilisateurs. Ces derniers se résument essentiellement aux transformations d'ordre microstructural (Figure 1.5) des matériaux schisteux situés à proximité de la zone du charriage. Ces changements, qui sont liés à l'action de l'eau, très abondante dans ces niveaux, sont facilités par la présence d'une minéralogie marquée par la présence d'interstratifiés de type illite/smectite et chlorite/smectite.



A : schiste intact (état initial), B : schiste remanié (état final), C : schiste à éléments intacts (état intermédiaire). Figure 1.5. Différents états des schistes de Chouamat (analyses au MEB).

Ainsi, les schistes remaniés (altérés) se distinguent par l'apparition d'une porosité secondaire inter et intragrégat non connectée (Figure 1.5). Par ailleurs, les analyses chimiques de l'eau souterraine ont révélé une forte minéralisation. Ce constat nous a conduit à entamer une étude hydrogéochimique pour comprendre cette minéralisation et en déduire l'origine. Toutefois, la répartition aléatoire des glissements dans les différents domaines établis, les analyses en laboratoire (matériaux et eaux) et les observations de terrain ont montré que le déclenchement des mouvements n'est pas en relation avec le chimisme des eaux. Par contre, les transformations observées dans les schistes (schistes remaniés "altérés") sont à l'origine de la chute des caractéristiques mécaniques et hydrauliques des matériaux [El Khattabi, 2001 et 2002 ; El Khattabi et *al.*, 2002, El Khattabi and Carlier, 2004]. À titre d'exemple, la perméabilité mesurée en laboratoire pour des échantillons soumis à des charges variables évolue entre 10⁻⁵ et 10⁻⁷ m/s pour les schistes intacts et entre 10⁻⁹ et 10⁻¹¹ m/s pour les schistes remaniés ; ce qui confère à ces derniers le rôle du mur de la nappe.

La compréhension de la genèse des glissements de terrain à travers les facteurs et les mécanismes mis en jeu, a conduit à élaborer un modèle conceptuel adapté aux glissements plans profonds et à un premier travail de cartographie des risques. La mise en place d'un modèle de comportement dépend des caractéristiques géométriques et physiques des glissements plans définis. Ces mouvements qui se distinguent par une surface de rupture préexistante plus ou moins plane, un substratum imperméable de faibles caractéristiques mécaniques (schistes remaniés) et une épaisseur des formations glissantes qui varie de manière décroissante de l'amont vers l'aval, m'orienté vers un modèle de rupture de pente de hauteur finie.

Le coefficient de sécurité (F) a été déterminé par des approximations successives sur la masse globale et s'écrit :

$$\mathsf{F} = \frac{R+P'p}{T+P'a} \tag{1}$$

R : force de résistance maximum au cisaillement,

P'p : force de butée

T : composante tangentielle du poids des terres,

P'a : force de poussée

Avec :

$$R = \frac{n * b * \left\{ C' * \cos^2 \beta * \tan \varphi' \left[\gamma * \left(Z - n * \frac{b}{2} * \tan \alpha \right) + hw \left(\gamma_{sat-} \gamma_w - \gamma \right) \right] \right\}}{\cos \beta}$$
(2)

$$T = n * b * \sin \beta * \left[\gamma * \left(Z - n * \frac{b}{2} * \tan \alpha \right) + h_w * \left(\gamma_{sat} - \gamma \right) \right]$$
(3)

$$P'_{a} = \frac{1}{2} * \cos \beta^{2} * \left[\gamma * (Z - hw)^{2} * \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) + (\gamma_{sat} - \gamma_{w})^{*} hw^{2} * \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_{sat}}{2} \right) + \gamma_{w} * hw^{2} \right]$$
(4)

$$\mathbf{P}_{p} = \frac{1}{2} * \cos \beta^{2} * \left[\gamma * (Z - hw)^{2} * \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) + (\gamma_{sat} - \gamma_{w}) * hw^{2} * \tan^{2} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{sat}}{2} \right) - \gamma_{w} * hw^{2} \right]$$
(5)

Sur le plan hydrogéologique, deux domaines ont été identifiés : l'arrière-pays caractérisé par des précipitations abondantes et surtout par des infiltrations facilitées par la présence des bancs gréseux fracturés et la zone littorale, marquée par des précipitations et des infiltrations moins importantes, hormis dans les vallées (Figure 1.6).



Figure 1.6. Influence du niveau piézométrique par écoulements souterrains suite à une variation brusque établi pour l'arrière-pays.

Pour cette dernière zone, les remontées piézométriques sont lentes et linéaires ; en revanche, dans la partie amont, des remontées rapides sont envisageables. Un processus d'alimentation de la nappe profonde s'effectue par un écoulement vertical puis latéral conditionné par la perméabilité et la porosité des matériaux gréso-schisteux de la nappe de Tisirène. L'évaluation de la hauteur d'eau (hw), qui intervient dans les calculs de F dans cette zone, est considérée à partir d'une équation dépendante des variables hydrodynamiques selon le modèle ainsi établi (Figure 1.7).



Figure 1.7. Modèle d'influence du niveau piézométrique par écoulement souterrain suite à une chute brusque.

D'autres cas de figure peuvent être envisagés. En effet, les remontées d'eaux peuvent également être linéaires simples ou linéaires avec des paliers, à l'image des crues de rivières [Heydarizadeh, 1996]. Cependant, compte tenu des faibles variations développées par ces cas, nous ne considérerons que celui de la remontée brusque.

Suite aux spécificités géographiques ainsi identifiées, deux secteurs seront pris en compte dans l'évaluation de F. Nous évaluerons surtout le niveau de la nappe d'eau h_W à l'arrière-pays en considérant les écoulements qui obéissent à des lois spécifiques. En partant de l'équation unidirectionnelle de la variation de la hauteur d'eau qui a été définie par Boussinesq :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{T}{\mu} * \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \text{ ou } \frac{\partial h}{\partial t} = A * \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \qquad \text{avec } A = \frac{T}{\mu}$$
(6)

T : Transmissivité m²/s,

μ: Porosité efficace

La résolution de l'équation (6) en utilisant la transformée de Laplace a permis d'établir les expressions analytiques suivantes :

- le cas d'une remontée brève suivie d'un niveau d'eau constant (Δhw = cte)

$$h(x,t) = h_{w} + \Delta h_{w} * \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{T_{u}} * t}\right)$$
(7)

"Pour une distance donnée, le niveau d'eau augmente en fonction du temps et le surplus initial demeure constant.

- le cas d'une remontée brève suivie d'une baisse verticale ($\Delta hw = \Delta hw - k.t$, k étant la perméabilité des matériaux gréso-schisteux).

$$h'(x,t) = h_{w} + (\Delta h_{w} - a.t - \frac{a.x^{2}.\mu}{2.T}).erfc[\frac{x}{2.\sqrt{\frac{T}{\mu}.t}}] + \frac{a.t.x}{\sqrt{\pi.\frac{T}{\mu}.t}}.e^{-\frac{x^{2}.\mu}{4.T.t}}$$
(8)



Niveau permanent de la nappe hw = 10m, remontée initiale Δ hw = 10m, T = 3.6m²/h, μ = 0.01, a=0.036m/s. Figure 1.8. Courbe d'évolution de hw avec diminution de Δ hw, en fonction de la distance x pour un t donné en h.

A l'arrière-pays, en tenant compte des variations piézométriques selon l'équation h(x,t), le coefficient de sécurité diminue avec la longueur potentielle du glissement (X) et avec l'augmentation temporelle du niveau piézométrique. Tandis que, en considérant h'(x, t) une diminution du coefficient de sécurité en fonction de la distance parcourue X s'opère et un accroissement avec l'élévation

30

temporelle du niveau piézométrique. Cela s'explique par la chute progressive du niveau d'eau à l'origine engendrant une chute importante de la force de poussée. Ces simulations ont été réalisées en considérant les caractéristiques des matériaux schisteux remaniés. Les valeurs du coefficient de sécurité sont nettement supérieures dans le cas d'un schiste intact, aux caractéristiques mécaniques plus élevées comme le montre la figure 1.9.



Figure 1.9. Influence de la nature des schistes sur le coefficient de sécurité (arrière-pays).

Par comparaison des résultats avec ceux obtenus en utilisant le logiciel PETAL – LCPC, les conclusions de l'étude ont été validées et permettent de distinguer deux secteurs affectés par ces mouvements et de caractéristiques physiques différentes : arrière-pays et zone littorale (Figure 1.10).



Figure 1.10. Coupe synthétique globale N-S illustrant la localisation des glissements profonds dans leur contexte géologique et géographique (échelles exagérées).

Application de la méthode aux écroulements affectant les falaises crayeuses du Cap Blanc Nez dans le Nord de la France

En vue de déterminer les conditions de l'applicabilité de la démarche, nous l'avons étendue à d'autres secteurs d'étude. Le second travail effectué concerne la région les Hauts de France, et plus précisément les falaises du Cap Blanc Nez "grand site national classé" (Figure 1.11). Cette étude réalisée dans le cadre d'une thèse de Doctorat [Sedki, 2005], a fait l'objet d'une collaboration avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (CEREMA) de Lille et a permis d'identifier les facteurs et les mécanismes d'instabilités à l'origine des écroulements et d'en réaliser des simulations moyennant des codes de calcul numérique.

Quand il s'agit de la frange littorale, les phénomènes naturels (mouvements de terrain, érosion) peuvent affecter la stabilité du milieu en contribuant au recul du trait de côte menaçant par endroit les habitations limitrophes. Depuis la seconde guerre mondiale, les techniques utilisées se sont bien développées (photographie aérienne, logiciel de rectification, usage des SIG) ce qui permet de suivre mieux les variations de la ligne de rivage [Crowell et *al.*, 1993; Gaillot and Chaverot, 2001; Moore, 2000; Robin, 2002; Chaaban *et al.*, 2012]. En France, la tendance générale est à l'érosion, même si par endroit on peut constater une avance du rivage (progradation) [Battiau-Queney et *al.*, 1995, 2003]. Dans le secteur du Cap Blanc Nez le recul du trait de côte a été évalué à 0.25m/an [Pierre et Lahousse, 2006]. Ce recul a effacé l'allure du cap du site qui n'a de cap que le nom.

Le Blanc Nez ne se présente pas réellement sous l'aspect d'un cap mais correspond plutôt à la section Nord de la branche de l'Artois ceinturant le Boulonnais. Situé à 13 kilomètres à l'ouest de Calais, Il couvre une surface d'environ 50 hectares. De Sangatte, une pente relativement faible et régulière amène le plateau au point sommital à 134 m pour plonger brusquement sur Escalles. La falaise toute entière est taillée dans la craie. De la partie sommitale à la plage se succèdent les différentes couches géologiques : Turonien vers le haut, Cénomanien vers le bas (Figure 1.11).



Figure 1.11. Secteur du Cap Blanc Nez. A : Vue panoramique des falaises, B : Litholostratigraphie.

Sur le plan lithostratigraphique on distingue trois niveaux à partir du haut de la falaise :

- les craies et les craies marneuses jusqu'à la limite du Turonien moyen, représentant les niveaux très perméables,

- les marnes bleues du Turonien inférieur et cénomanien moins perméables [Amédro et Robaszynski, 1989],

- finalement les argiles du Gault, de couleur gris bleu, qui sont quasi imperméables.

La reconstitution de la géométrie du milieu, à travers les mesures de fracturation, s'est faite à deux échelles : un relevé le long de tout le secteur des falaises du Cap Blanc Nez (2500 m) et un relevé focalisé sur la zone de Cran d'Escalles (100m) (Figure 1.12).



Figure 1.12. Etat de la fracturation des falaises crayeuses du Nord.

L'étude de la fracturation sur toute falaise (2500m) et sur un tronçon de 100m au Cran d'Escalles s'est basée sur l'analyse photogrammétrique et stéréographique. La projection stéréographique révèle au niveau global la présence de deux grandes familles très disparates (Figure 1.13A). La première s'assimile aux directions variant entre 125N et 170N (Figure 1.13B) avec des pendages allant de 15° à 90°. Au Cran d'Escalles (100m), les directions dominantes évoluent entre 110N et 170N avec des pendages aussi variés allant de 10° à 90°. Une nette prépondérance des classes situées entre 120 et 150N s'explique par l'addition de directions de fractures récentes et d'origine tectonique.



Figure 1.13. Représentation de la fracturation de toute la falaise sur le Stéréogramme de Schmidt. A : Pôles et plans de directions, B : Rosace de directions, C : Densité de pôles, D : Pôles des pôles et leurs directions.

Cette variabilité de direction s'explique par la nature des fractures présentes qui correspondent à des fractures conjuguées dont on distingue ici deux types à azimuts égaux et inégaux (Figure 1.14). Cette distinction a été également constatée au niveau des domaines des pôles (Figure 1.13) qui révèlent quatre directions principales. Ces directions se différencient par leur densité.



Figure 1.14. Schéma des fractures conjuguées. A : azimuts inégaux, B : azimuts égaux.

Les observations effectuées sur le terrain ont permis de déceler une dynamique des fractures en étudiant leurs sens de propagation selon le critère de griffith. Comme le laisse supposer les observations, les mécanismes principaux à l'origine de cette dynamique sont liés au comportement des matériaux situés en pied de falaise (niveaux marneux : craie bleue). Ces matériaux s'écrasent sous le poids des couches sus-jacentes. La caractérisation physique et mécanique des différents niveaux crayeux de la falaise a révélé la fragilité des craies bleues marquées par de faibles caractéristiques mécaniques et par leur sensibilité à l'eau (Tableau 1.1) en raison de leur forte proportion en argiles, en particulier en smectites, comme l'indique leur indice de gonflement (Cg=0.06). Ces niveaux, qui se situent à la base de la falaise, supportent le poids des formations sus-jacentes impliquant leur tassement (Cc = 0.11), leur consolidation (Cv = 0.18).

La proportion des argiles dans les 3 niveaux de craies n'est pas non plus sans conséquences sur leur comportement hydraulique. Ainsi la craie bleue en pied de falaise dont la proportion d'argiles varie entre 25 et 30% montre une très faible perméabilité (de 10⁻⁷ m/s à 10⁻⁶ m/s) qui lui attribue le rôle du mur de la nappe de la craie. La fracturation de ce niveau explique aussi l'apparition des résurgences d'eau. Pour les craies grises, dont la composition minéralogique (10 à 20%) implique une meilleure résistance et une perméabilité qui évolue cette fois-ci entre 10⁻⁷ m/s et 10⁻⁵ m/s. En ce qui concerne les craies blanches ; elles se présentent avec une perméabilité plus importante en raison d'une faible présence d'argiles (<1%) et à sa forte porosité (41%).

L'état chaotique de la falaise s'explique par sa fracturation très dense. Toutefois, une chronologie des événements permet de reconstituer cet état des lieux. Comme il a été montré lors de l'analyse stéréographique, les plans conjugués peuvent être réguliers : c'est le cas du petit et du grand Blanc Nez (Figure 1.14A), ou inclinés au niveau du Cran d'Escalles (Figure 1.14B). Ainsi, au niveau du grand Blanc Nez la contrainte principale demeure verticale, soit dans le sens de la gravité, et les fractures conjuguées restent régulières à tous les niveaux de la falaise : craies bleue et grise.

Tableau 1.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux crayeux.											
Test	E	Blue Chalk		Altered Blue Chalk		Grey Chalk		White Chalk			
		73.42 %		61.04		84.52%		99.901%			
Calcimetry		71.96%	71.96% 63.18 87.94%					99.72 %			
		75.82% 69.25 82.82%						99.62%			
γ _{sec} (kN/m³)	25.58				24.85			23.77			
γ _d (kN/m³)	19.53				22.57			21.1			
γ _{sat} (kN/m³)		24.5 23.8					22.1				
W (%)		28 9.88					34.82				
WL		25,45 24.78					26.41				
WP		14,51 17.88					22.62				
	CU	CD	CD		CU	CD	CD	CU	CD	CD	
Water content W _w (%)	17.04	14.53	1.47		13.73	13.31	1.02	27.46	25.4	0.119	
Cohesion (kPa)	C _u =141	C′=79	C'=490		C _U =357	C'=144	C′=819	C _U =193	C'=83	C′=676	
Internal friction angle	φ _{CU} =25	φ′=28	φ′=11		φ _{CU} =30	φ′=33	φ′=23	φ _{CU} =38	φ′=41	φ′=18	
Compressibility Cc	0.11				0.06			0.1			
Swelling coefficient Cg	0.06				0.02			0.01			
			Short r	ange (total cha	racteristics)					
γ _{sat} (kN/m³)		24.5				23.8			22.1		
E (kN/m²)		1.4.106				1.5.106			9.1.105		
ν		0.25				0.15			0.174		
C (kN/m²)		79			144			83			
φ (°)		28			33			41			
Long range (effective characteristics)											
γ (kN/m³)		23.15				22.57			21.1		
E (kN/m²)		1.4.106				1.5.106			9.1.105		
ν	0.25				0.15			0.174			
C' (kN/m²)	141				357			193			
φ′ (°)	25				30			38			

Cette fracturation est plus dense dans les niveaux de craie bleue qui se démarque par un écrasement intense du milieu. Dans le secteur du Cran d'Escalles où les fractures conjuguées sont inclinées, on décèle une rotation de la contrainte principale à l'origine de ces fractures. Ceci s'explique par un changement d'orientation de l'axe de cette contrainte par l'influence de la contrainte latérale due à la variation de la charge engendrée par la différence des épaisseurs des formations turoniennes composant le Grand Blanc Nez. Si on remplace les formations sus-jacentes à la craie bleue, par une charge répartie selon le profil topographique, on retrouve la surface où se développe la contrainte verticale en fonction de la profondeur. Ce cas s'assimile à l'étude de l'effet d'une contrainte verticale appliquée à un massif de sol étudié par plusieurs auteurs [Philipponnat et Hubert, 1996].

Cette hypothèse a été vérifiée à base du code de calcul CESAR-LCPC avec des déplacements latéraux résultant du poids propre atteignant 3cm au Cran d'Escalles. Ces déplacements s'atténuent en s'éloignant du haut Blanc Nez par chute de l'influence de la contrainte latérale induite par la charge que représentent ces formations. A l'inverse, dans le secteur du Petit Blanc Nez ces déplacements sont quasi nuls (Figure 1.15).





La fracturation parachève son action par déstabiliser le haut de la falaise. Celle-ci se matérialise par l'apparition des fissures de décompression qui déterminent le volume élémentaire mobilisable (Figure 1.15). Avant le déclenchement d'un mouvement, la fissure doit atteindre le point critique dans son développement. L'évolution de ces fissures, qui ont fait l'objet d'un suivi dans le temps, révèle alternativement, des ouvertures et des fermetures.



Figure 1.15. Joints de décompression et localisation des plots de mesures (LRPC, 1999).

Le suivi de l'évolution de l'ouverture des joints au cours du temps diffère d'un emplacement à l'autre. Les plots situés vers le sommet de la falaise, présentent les ouvertures horizontales et les déplacements verticaux les plus importantes (Figure 1.16).



Figure 1.16. Déplacements mesurés au niveau des plots. A : horizontaux, B : verticaux.
Lorsque les ouvertures progressives des fissures de décompression atteignent leur seuil critique, la masse déstabilisée s'écroule sous son propre poids. Cette étape constitue ainsi la dernière phase d'un cycle de déstabilisation de la falaise. Les conditions hydrauliques interviennent directement dans cette dernière phase puisque elles accentuent le phénomène en provoquant les ouvertures et les fermetures des fissures de décompression suite aux développements des pressions liées aux oscillations saisonnières ou occasionnelles du niveau de la nappe.

La modélisation numérique bidimensionnelle reposant sur les méthodes des éléments finis et distincts a été élaborée dans le but d'apporter des éléments de réponse expliquant les observations de terrain. Le modèle en éléments finis construit avec CESAR-LCPC, révèle des déformations affectant l'ensemble des formations (craies grise et bleue), avec des déplacements maximaux de 2 cm (Figure 1.17). Le pied de falaise est marqué par le développement d'un domaine de plasticité.



Figure 1.17. Répartition et orientation des vecteurs déplacements (à gauche) et Isovaleurs de la norme des déformations plastiques (à droite).

Par ailleurs, la prise en compte des discontinuités dans le modèle numérique (au moyen du code de calcul UDEC) a mis en évidence des simulations plus réalistes donnant des résultats identiques à ceux du modèle continu avec des grandeurs moins importantes, en raison de la précision considérable des calculs (Figure 18). Nos modèles ainsi établis, permettent de visualiser les processus d'évolution naturelle de la falaise, et de mettre en évidence les mouvements observés.

La répartition des vecteurs déplacement illustre une importante concentration en pied de falaise, ceci est concordant avec les observations de terrain : sous l'effet de leurs poids propres, les blocs se tassent et comme les déplacements sont autorisés vers la mer, les blocs ont tendance à avancer vers le front de falaise. Ces déplacements sont favorisés par la forte fracturation des craies bleues et leurs résistances moindres comparées à celle des craies grises sus-jacentes. Néanmoins, la grandeur de ces déplacements reste faible, de l'ordre de 0.2 cm (Figure 1.18A).

Pour simuler l'effet de l'eau sur l'équilibre du massif, la nappe a été intégrée. La première conséquence se traduit par des déplacements ascendants : c'est un gonflement du massif (Figure 1.18B). En effet, par la pression qu'elle exerce, l'eau ouvre les fractures dans lesquelles elle circule ; ainsi chaque bloc bouge légèrement (vers le haut et du côté de la mer), poussant les blocs qui lui sont adjacents. Dans un second temps, les blocs ainsi déplacés en position de déséquilibre se réarrangent par un léger tassement et par une nouvelle avancée de la falaise. Ceci provoque un basculement de la falaise vers l'avant. L'ensemble de ces déplacements demeure très faibles (max 0.5cm). Le gonflement de la falaise peut expliquer les fermetures des fissures de décompressions mesurées. Toutefois, il convient de rappeler que ces déplacements ascendants ne sont qu'une conséquence de l'action mécanique de l'eau dans les fractures. Il faudrait, cependant, lui additionner le gonflement de la craie et celui propre aux argiles riches en smectites qui atteignent les 30% dans les niveaux craies bleues en pied de falaise.



Figure 1.18. Vecteurs déplacements des blocs au sein de la falaise.

Chapitre 2 : Influence de l'hydrodynamique de la nappe sur la dynamique dunaire et le recul du trait de côte : cas du secteur d'Hardelot-Plage dans le Nord de la France.

Introduction

L'érosion côtière est un phénomène naturel, mais le processus d'érosion ne peut pas toujours être considéré comme issu de causes naturelles, car les actions anthropiques ont pu induire un déséquilibre, notamment en limitant le volume de sable nécessaire à la stabilité des plages [Paskoff, 1998]. Les zones côtières sont naturellement dynamiques avec des changements pouvant se produire à l'échelle temporelle humaine et qu'il convient de quantifier. L'évolution du trait de côte est un excellent indicateur de ces changements. Ainsi, la connaissance de la dynamique littorale est un préalable indispensable à la gestion des rivages, et notamment, celle des plages sur lesquelles repose en grande partie l'économie locale. Pour mener à bien une telle investigation, il est souvent nécessaire d'effectuer une étude diachronique de la position du trait de côte [Grenier et Dubois, 1990 ; Paskoff, 1993].

Le recul ou l'avancée du trait de côte dans les zones de Hardelot-plage et de Sainte Cécile-Plage (zones d'étude) a été quantifié par des mesures selon des transects (292) perpendiculaires au trait de côte en estimant ainsi l'érosion côtière pour en déduire le taux de récession [Chaaban et al., 2012]. Associée à cette investigation géomorphologique, une recherche sur le fonctionnement de l'hydrosystème côtier a été réalisée, justifiée par l'influence pressentie de l'hydrodynamique de l'eau souterraine sur l'évolution locale du trait de côte. Le site d'Hardelot-Plage est divisé en deux parties distinctes : le Nord et le Sud. La partie nord du site étudié est constituée de sable sec. Au sein de cette partie, le système plage-dune est fonctionnel [Tresca, 2006]. Le long des dunes d'Ecault, l'évolution de trait de côte n'est uniforme ni dans le temps ni dans l'espace [Battiau-Queney et al., 2006]. Par contre, dans la partie sud du site d'Hardelot-Plage, le recul est plus rapide sur la période 1989-1995 et peut dépasser localement 3 m/an. Les marques d'érosion sont présentes au contact de la plage et des sables dunaires. Dans cette partie il n'y a pas d'avant-dune mais une falaise sableuse exposant plusieurs niveaux de paléosols de type podzolique [Battiau-Queney et al., 2006]. Le haut de plage reste humide à marée basse et il est parcouru par des ruissellements d'eau douce colorée par des diatomées. Il existe donc une menace sur la ressource sédimentaire constituant la plage touristique. La compréhension de la dynamique dunaire différenciée entre le nord et le sud est primordiale pour apporter des solutions pérennes en vue de protéger le milieu et permettre l'accès aux plages à l'économie touristique qui est empêchée dans la partie sud par l'humidité du sable. En combinant, l'étude de cette dynamique à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique et dispersif, une stratégie de gestion globale parait plausible.

La commune d'Hardelot est située dans le département du Pas-de-Calais (Figure 2.1). Sa plage est localisée à l'aval d'un petit bassin versant littoral de l'un des fleuves côtiers de l'Artois. La zone d'étude s'étend sur 4km en façade maritime. L'extension spatiale est bornée par la Canche au Sud et de la Manche à l'Ouest. Cette zone a fait l'objet d'une analyse de l'évolution du trait de côte, sur environ 14 km, des dunes d'Ecault (au nord d'Hardelot-plage) aux dunes de Camiers (rive nord de l'estuaire de la Canche). Sur l'ensemble du secteur, la hauteur de pluie moyenne varie de 700 à 850 mm, avec une augmentation lorsqu'on se déplace vers le plateau crayeux.

Au regard de la géomorphologie, la disposition topographique à Hardelot-plage est différente de celle rencontrée au Sud de la Canche. Cette dernière est marquée par le passage de la mer vers le plateau de craie, en traversant un complexe dunaire externe, une plaine inter-dunaire, un complexe dunaire interne, un marais maritime poldérisé, une falaise morte et le plateau crayeux [Battiau-Queney *et al.*, 2006 ; 1995]. Par contre au Nord de la Canche, il reste un seul complexe dunaire et le plateau crayeux se trouve à proximité de la côte. A Hardelot-Plage, la géomorphologie diffère entre la partie nord et la partie sud [Battiau-Queney *et al.*, 2006].



Figure 2.1. Carte géologique de la zone d'étude.

D'un point de vue hydrogéologique, la nappe dunaire est alimentée par les précipitations efficaces. Dans le secteur situé entre la Canche et la limite Sud de la Boutonnière du Boulonnais, la nappe de la craie et la nappe des dunes seraient en continuité hydraulique [Louche, 1997]. Dans le secteur d'étude, la nappe des dunes est libre à l'est de la falaise fossile.

Analyse de la morphodynamique du littoral

Le sous-sol a été caractérisé grâce à la résistivité électrique. L'interprétation des résultats a permis d'établir différentes coupes lithologiques. Pour la partie Ouest, les faciès sableux reposent sur les calcaires jurassiques au Nord alors qu'ils recouvrent directement la craie au Sud. Le site d'Hardelot-Plage peut donc être divisé en deux parties distinctes : zone Nord et zone Sud. Les épaisseurs des couches sableuses y sont variables et présentent des intercalations de tourbe. L'épaisseur globale de ce faciès à succession de tourbes et sables peut varier de 1,5 m à 35 m. L'épaisseur de la craie varie quant à elle entre 35 m et 75 m.

La coupe géologique montre l'irrégularité spatiale des intrusions de l'eau salée. D'une part l'eau salée est présente au-dessus de l'eau douce en raison de la marée [Louche, 1997] et, d'autre part, la profondeur atteinte par l'eau salée est différente sur un axe nord-sud pour le littoral d'Hardelot-Plage. Cela démontre l'absence de biseau salé dans les conditions observées [Louche *et al.*, 1998]. L'hydrogéologie qui en résulte est de ce fait singulière et relativement complexe car dépendante des successions des formations quaternaires, du Crétacé et du Jurassique qui constituent la géologie du littoral étudiée (Figure 2.2).



Figure2.2. Coupe géologique Nord-Sud sur le cordon littoral d'Hardelot-plage d'après sondage électrique SPRL, 2006 [Chaaban et al., 2010, b ; 2011].

L'étude de l'évolution du trait de côte de Hardelot-plage, Saint Cécile et l'estuaire de la Canche s'est appuyée sur l'utilisation des photographies aériennes de plusieurs missions. La plus ancienne date de 1946 et la plus récente de 2005. L'obtention des images géoréférencées sous la plateforme d'ArcGIS 9.3.1 passe par la préparation de données. Ces images ont subi par la suite une projection (système de coordonnées) de type Lambert II étendu pour uniformiser les données. Après le traitement de ces derniers, elles ont fait l'objet d'un stockage (géodatabase) pour regrouper toutes les classes d'entités (traits de côte) qui sont créées et qui ont le même système de coordonnées (Lambert II étendu) et le même type de géométrie : la ligne (Figure 2.3).



Figure 2.3. Les données créées dans ArcCatalog et ArcMap (ArcGIS 9.3.1). a : Géodatabase, jeu de classe d'entité et classes d'entité créés dans ArcCatalog b : échantillonnage des traits de côte digitalisés, ligne de base et transects créés dans ArcMap

Par la suite Le géotraitement a été réalisé pour mesurer la distance entre la ligne de base (appelé ici Ref1) et les traits de côte pour chaque transect (Ref2). L'analyse des changements a été éffectuée entre 1947 et 2005. Les changements du littoral le long des transects dont 6,85% seulement d'entre eux sont situés à l'intérieur de la marge d'erreur (±10m) (Figure 2.4).



Figure 2.4. Tronçons de la zone étudiée et évolution moyenne du trait de côte entre 1947 et 2005.

Les résultats obtenus ont montré que l'évolution du trait de côte se caractérise globalement par un recul moyen de 31,95m et un écarte type de 41,82m en prenant en compte tous les transects dont 82,2% ont des valeurs négatives (c'est-à-dire traduisant un recul). De telles valeurs se traduisent par des vitesses de recul d'environ 0,55 m/an. Par contre, l'analyse locale donne des valeurs différentes de sorte que les valeurs d'évolution peuvent être soit classées selon le type (recul ou avancée), soit regroupées avec un écart type diminuant (Tableau 2.1).

Section	Transects	Evolution moyenne (m)		Taux d'évolu	ution (m/an)	Lieu dite
		Avec marge d'erreurs	Sans marge d'erreurs	Avec marge d'erreurs.	Sans marge d'erreurs.	
1	1-53	-26,43	-26,43	-0,46	-0,46	Dunes d'Ecault
2	54-56	-93,47	-93,47	-1,61	-1,61	Dunes d'Ecault
3	57-75 (Digue)	0	0	0	0	Hardelot-Plage
4	76-199	-23,66	-25,39	-0,41	-0,44	Dunes du Chevalier Sansot
5	200-220	34,81	40,52	0,60	0,7	Sainte-Cécile-Plage
6	221-289	-75,49	-85,4	-1,30	-1,47	Dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche)
7	290-292	236,12	236,12	4,07	4,07	Dunes de Camiers (Réserve naturelle de la Baie de Canche)

Tableau 2.1. Evolution moyenne et taux d'évolution du trait de côte (1947-2005).

Le trait de côte dans les sections S1, 2, 4, 6 est en total retrait avec un changement moyen de 26,43m (18,2 % de transects), 93,47m (1% de transects), 23,66m (42,5% de transects) et 75,49 m (23,6% de transects) respectivement (Tableau 2.1). Par contre, le rivage dans les sections S5 et S7 s'est avancé avec un changement moyen de 34,81m (7,2 % de transects) et de 236,12m (1% de transects) respectivement. L'avancée importante dans la section 7 peut être interprétée par la dynamique de l'estuaire de la Canche.

Élaboration d'un modèle hydrodynamique littoral

La modélisation hydrodynamique de la plage d'Hardelot a permis à travers les scénarii d'aide à la décision, d'élaborer une stratégie de gestion de la plage. Le modèle pose le problème de la saturation en eau quasi constante du sable de la plage et de son érosion sur la partie sud. Compte tenu de la position littorale du secteur d'étude, une attention particulière a été portée sur l'interface eau douce-eau salée. Le modèle hydrodynamique a également la fonctionnalité d'envisager des scénarii d'aide à la décision pour l'élaboration d'une stratégie de gestion de la plage d'Hardelot.

Le système dunaire de la plage d'Hardelot présente un déficit d'alimentation lié à la saturation en eau quasi constante du sable de la plage. L'humidité du sable diminue nettement la capacité de déflation [Bauer *et al.*, 2009 ; Davidson-Arnott *et al.*, 2008 ; Wiggs *et al.*, 2004 ; Namikas et Sherman, 1995 ; McKenna Neuman et Nickling, 1989] et prive donc le système dunaire de sa principale source d'alimentation sédimentaire. L'origine de cette saturation en eau de la plage résulte essentiellement de l'alimentation de la nappe des sables par résurgence de la nappe de la craie sous-jacente [Louche, 1997]. Il semble donc que la dynamique hydrogéologique impacte la dynamique sédimentaire.

Dans le modèle mis en place, les couches retenues sont les sables, la tourbe et la craie. Pour la modélisation de l'ensemble de la zone, un maillage carré uniforme de 1 km de côté a été choisi. Par contre, un maillage beaucoup plus fin distingue la zone d'Hardelot-plage (100m X 100m). Le modèle hydrodynamique a été réalisé en régime permanent pour l'année 1995 puis en régime transitoire de 1995 à 2006. La simulation de l'évolution de l'interface eau douce / eau salée a ensuite été réalisée à l'aide du modèle hydrodispersif MT3d. La carte obtenue montre un écoulement global de la nappe vers le littoral et la vallée de la Canche Figure 2.5.



Figure 2.5. Cartes piézométriques de la nappe de la craie : initiale (à droite) [Louche, 97] et après calage (à gauche).

Pour l'intrusion de l'eau salée, les calculs du transport et de la concentration en eau salée ont été réalisés à l'aide du code MT3D, utilisé de manière couplée avec le logiciel MODFLOW. Les concentrations en eau salée ont été considérées comme des paramètres initiaux de simulation dans MT3D. Dans ce modèle l'eau salée est transportée par convection-dispersion. La mer est la source de sel où la concentration est égale à 35 g /l [Dauvin, 2008]. Par contre cette concentration est de 0.025

g/l dans l'eau douce. Étant en milieu littoral à forte porosité (sédiments quaternaires et calcaires), il existe une intrusion d'eau salée dans les aquifères sableux et crayeux du littoral. La modélisation effectuée sous MT3d a permis de spatialiser cette intrusion saline qui est affectée d'un gradient hydraulique marqué vers l'est. Les variations spatiales des courbes iso-halines que l'on peut observer (Figure 2.6) correspondent aux variations de la concentration en sel dans l'eau (salée/douce), pour l'aquifère superficiel des sables et l'aquifère de la craie. Cette concentration diminue irrégulièrement de la côte vers l'intérieur des terres.



Figure 2.6. Concentrations en sel dans les aquifères sableux et crayeux].

La lecture des cartes confirme que le biseau salé classique n'est pas systématiquement observé [Louche et Hallet, 2001]. En effet, les différents sondages de SPRL [2006] ont mis en évidence la présence d'eau salée, saumâtre ou douce à des profondeurs variables. A Hardelot-Plage, l'interface eau douce/eau salée ne répond pas donc au concept classique de biseau salé [Bear, 1972]. Elle présente une allure plus complexe qui se rapproche fortement du concept de « doigts de gant » [Lebbe *et al.*, 1989].

Afin de tenter d'assécher la plage dans la partie Sud de Hardelot-Plage (SE09) par un rabattement du niveau piézométrique, 4 puits de pompage ont été implantés dans le modèle hydrodynamique. Plusieurs modèles de simulation ont été exécutés avec l'observation de l'évolution du rabattement au niveau des sables mais également le suivi de l'intrusion marine liée au pompage. Les diverses simulations ont permis de faire varier le débit dans les quatre puits. A un débit de 1 m³.h⁻¹, les pompages ont impacté le niveau de la nappe. Cependant le rabattement reste insuffisant. A un débit de 5m³.h⁻¹, l'allure des iso-pièzes au niveau de la zone de pompage a permis de visualiser un rabattement de la nappe variant de 0.4 m à 0.9 m. Ces valeurs de débit seraient donc suffisantes. Pour vérifier l'influence de la tourbe sur la piézométrie, la modélisation a été effectuée avec absence ou présence de tourbe (Figure 2.7A et 2.7B).



Figure 2.7. Influence de la présence de tourbe A : sur la piézométrie littorale B : sur les concentrations en sel.

Lorsque la tourbe est absente, les pompages influencent peu la piézométrie. Par contre, en présence de tourbe, les cônes de rabattement sont bien à l'endroit de la présence de la tourbe (Figure 2.7A). Ceci s'explique par l'individualisation d'une série de petits aquifères ce qui confère à l'aquifère des sables l'aspect hétérogène multicouche à perméabilité complexe. De la même façon quand la tourbe est absente, les pompages influencent peu la concentration en sel, alors qu'en présence de tourbe, les cônes de concentration en sel sont visibles sur les cartes ci-dessous (Figure 2.7B).

Cette influence marquée de la tourbe tant sur la piézométrie que sur les concentrations en sel s'explique par les propriétés hydrophiles de ce matériau organique. En effet, les formations tourbeuses peuvent atteindre et dépasser 90 % de leur volume en eau [Porteret, 2005]. Lorsque l'intensité des précipitations est forte [Cubizolle, 2007], une partie de l'eau ne peut s'infiltrer dans la tourbe du fait de sa faible conductivité hydraulique. En conséquence la tourbe joue un rôle important en raison de sa capacité de stockage. Ce comportement hydrologique particulier explique également le problème du sable mouillé de la plage.

Conclusion

L'objectif de mes travaux sur la dynamique superficielle à travers les mouvements de terrain et l'érosion côtière est de mieux approcher les phénomènes en vue de les prévenir et d'y apporter des solutions adaptées en fonction de chaque contexte. Pour les mouvements de terrain l'enjeu consiste à définir les facteurs et les mécanismes qui les engendrent et leur intégration dans un modèle de calcul de rupture adéquat. Pour ce faire, j'ai mis en place une démarche méthodologique pluridisciplinaire, basée sur une approche transversale pour une bonne compréhension des phénomènes d'instabilité complexes. La démarche méthodologique est fondée sur une analyse, menée de manière descendante, hiérarchique et structurée selon cinq étapes (étude préliminaire, étude détaillée, corrélations, modélisation et cartographie des risques). A l'intérieur de ces étapes ont été associés tous les éléments de connaissance provenant de diverses spécialités que l'on classe traditionnellement en deux grandes catégories : les naturalistes et les mécaniciens. Dans un esprit de transversalité, ces éléments de connaissance sont traités de manière complémentaire. Ils participent à des processus fortement itératifs.

La démarche élaborée répond largement au cahier des charges que je m'étais fixé que ce soit dans son application aux glissements de terrain du Rif central ou pour les écroulements des falaises crayeuses du Nord de la France. Ainsi, à l'issu de l'étude des glissements affectant les versants naturels de la chaine rifaine façonnés dans les flyschs, il en ressort une compréhension plus fine des instabilités. Ces glissements sont localisés dans deux endroits géographiquement opposés. L'arrièrepays se démarque par la présence de glissements de grandes dimensions conditionnés par les facteurs suivants : précipitations abondantes, pentes raides, écoulements souterrains conformes aux sens des mouvements, gradients hydrauliques élevés, pendage du charriage fort et fracturation intense. Quant à la zone littorale, les seuls facteurs à l'origine des instabilités correspondent à l'affleurement du charriage (ou de la nappe de Chouamat) et à l'absence de la butée. Cette configuration est liée à un jeu de failles, normales et/ou décrochantes, à composante verticale importante. Dans ce dernier contexte, les mouvements participent au recul du trait de côte qui reste faible le long des falaises rocheuses.

L'application de la démarche aux instabilités de falaises du Cap Blanc Nez a permis à travers un processus de définir la typologie des mouvements et leur localisation. Ainsi, les facteurs déstabilisateurs et les mécanismes associés à l'origine des écroulements ont été démontrés en orientant le travail de modélisation en l'optimisant. Les modèles établis à éléments finis et à éléments distincts ont visualisé les processus d'évolution naturelle de la falaise, et de mettre en évidence les mouvements observés. La prise en compte de l'existence d'une nappe d'eau montre que son rôle se restreint uniquement à son action mécanique. Nous avons ainsi réussi à trouver des explications plausibles aux phénomènes observés. Son apport a été la confirmation des résultats issus de la phase analytique, en détaillant le rôle précis de certains facteurs (eau et fracturation). Dans le secteur du Cap Blanc Nez, Le recul du trait de côte est évalué en moyenne à 0.25 m/an. Ce recul a effacé l'allure du Cap du site qui ne garde aujourd'hui de cap que le nom.

Le recul du trait de côte est plus marqué dans les côtes sableuses. La gestion de la mobilité et l'érosion du trait de côte dans le nord de France (dunes d'Ecault, dunes du Chevalier Sansot et dunes de Camiers), nécessitait la conception de modèles explicatifs et des méthodologies d'investigation en utilisant un couplage SIG-Modèle hydrogéologique pour créer un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement littoral dans une optique de développement durable. En s'appuyant sur 14 photographies aériennes (1946-2005), la quantification des changements du trait de côte à l'aide des SIG (ArcGIS 9.3.1) a été réalisée dans les secteurs Hardelot-Plage et Sainte Cécile-Plage où se localisent les dunes d'Ecault, les dunes du Chevalier Sansot et les dunes de Camiers. 292 transects perpendiculaires au trait de côte ont été utilisés pour estimer l'érosion côtière et en déduire le taux de recul. Ce travail a été complété par la modélisation hydrogéologique (hydrodynamique et hydrodispersive) du secteur d'Hardelot qui est principalement basée sur la spatialisation d'un jeu de données environnementales mobilisant plusieurs sources d'information géographique. Le modèle a justifié la saturation en eau observée dans la partie sud d'Hardelot par la proximité de la nappe d'eau douce superficielle. L'aquifère des sables est en continuité hydraulique avec la nappe de la craie sous-jacente. De plus, ce secteur est caractérisé par la présence de lentilles de tourbe dont le comportement hydrophile explique la rétention d'eau de mer en surface dans les formations sableuses ainsi que la répartition complexe de l'interface eau douce - eau salée sur le littoral d'Hardelot. Les diverses simulations entreprises avec la réalisation de forages captant de l'aquifère des sables ont permis de démontrer que le rabattement de la nappe de 0.5 m, permettant un assèchement de la plage, nécessiterait un pompage continu avec un débit de 5 m³/h. Ceci n'est valable que lorsque la tourbe est intercalée dans le sable. En l'absence de tourbe, les débits de pompages sont bien trop importants pour envisager cette solution.

Bibliographie

- Amédro, F., Robaszynski, F. 1989. Caractères et stratigraphie des craies cénomaniennes traversées par le tunnel sous la Manche. Dans « Tunnel sous la Manche, Géologie et géotechnique »sous la direction de Pierre Duffaut et Patrick Margron. Actes des journées d'études organisées par l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris., 31 Mai – 1Juin 1989. 57 – 64.
- Andrieux, J. 1971. La structure du Rif central : étude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 235, Rabat, 152p.
- Andrieux, J. et Mégard, F. 1973. Carte géologique : Feuille de Béni Boufrah (Maroc) à 1/100 000, Sous-Secrétariat d'Etat au Commerce, à l'Industrie, aux Mines et à la Marine Marchande, Direction des Mines et de la Géologie, Division de la Géologie, Editions du Service Géologique du Maroc, Notes et Mémoires, 217.
- Battiau-Queney, Y., Billet, J.F., Chaverot, S. and Lanoy-Ratel, P. 2003. Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France. *Marine Geology*, 194, 31-45.
- Battiau-Queney, Y., Fauchois, J., Lanoy-Ratel, P. and Seguin, A. 1995. Un patrimoine paysager à protéger : les dunes littorales de Merlimont et de Berck (Pas-de-Calais). *Hommes et Terres du Nord*, 1(2), 21-30.
- Battiau-Queney, Y., Malaterre, G. and Tresca, A. 2006. Expertise géomorphologique de la plage de Neufchatel-Hardelot. Rapport de synthèse. Université des Sciences et Technologie de Lille.
- Bauer, B.O., Davidson-Arnott, R.G.D., Hesp, P.A., Namikas, S.L., Ollerhead, J. and Walker, I.J. 2009. Aeolian sediment transport on a beach: Surface moisture, wind fetch, and mean transport. Geomorphology 105 (1-2), pp. 106-116.
- Bear, J. 1972. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier Eds. 764p.
- Chaaban, F., Darwishe, H., Battiau-Queney, Y. Louche, B., Masson, E., El Khattabi, J. and Carlier E., 2012. Using ArcGIS Modelbuilder and Aerial Photographs to Measure Coastline Retreat and Advance: North of France, *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1567–1579.
- Chaaban, F., Darwishe, H., Louche, B., Battiau-Queney, Y., Masson, E., El Khattabi, J. and Carlier, E. 2011. Geographical information system approach for environmental management in coastal area (Hardelot-Plage, France). Environmental Earth Sciences, 65-1, 183-193.

- Chaaban, F., Louche, B., Masson, E., El Khattabi, J., Darwishe, H., Battiau-Quene, Y. and Carlier, E. 2010. Application of GIS and GMS for coastal management (North of France). American Water Resources Association (AWRA) 2010, Spring Specialty Conference « Geographic Information Systems (GIS) and Water Resources VI, (p. 6). Orlando, Florida.
- Chaaban, F., Masson, E., Darwishe, H., Louche, B., El Khattabi, J., Battiau-Queney, Y. and Carlier. 2010. SIG et modélisation hydrogéologique littorale : application à la plage d'Hardelot (Pas-de-Calais, France). Géomatique expert (76), 58-67.
- Chaverot, S. 2006. Impact des variations des conditions météo-marines sur les littoraux meubles du Nord Pasde-Calais. Lille: Lille1 University, Thesis, 279 p.
- Crowell, M., Leatherman, S.P. and Buckley, M., 1993. Shoreline change rate analysis: long term versus short-term data. *Shore and Beach*, 61(2), 13-20.
- Cubizolle, H. 2007. Origine, fonctionnement et conservation des tourbières. Actes du colloque du château de Goutelas (42), octobre 2005. Publications de l'Université de Saint-Etienne, 381 p.
- Dauvin, JC. 2008. The main characteristics, problems, and prospects for western European coastal areas,. Marine Pollution Bulletin , 57, 22-40.
- Davidson-Arnott, R.G.D., Yang, Y., Ollerhead, J., Hesp, P.A. and Walker, IJ. 2008. The effects of surface moisture on aeolian sediment transport threshold and mass flux on a beach. Earth Surface Processes and Landforms 33 (1), 55-74.
- El Khattabi, J. 1997. Caractérisation des zones à risques le long du tracé routier Jebha-Cala iris : Exemple du secteur Cala iris- Taghzoute (Rif, Maroc). Rapport de DEA, UFR de géographie et de l'aménagement, USTL, 150 p.
- El Khattabi, J. 2001. Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc). Thèse d'Université d'Artois, 258 p.
- El Khattabi, J., Boulemia, C., Henry, E., and Carlier, E., 2002. Démarche méthodologique pluridisciplinaire pour l'étude des instabilités de versants : Application aux glissements du Rif Central (Maroc). *Revue Française de Géotechnique*, 100, 109-119.
- EL Khattabi, J., Boulemia C., Carlier, E. and Van Laethem, F. 2002. The water levels : an essential parameter in the study of ground stability and safety coefficient, 5th International Conference on Hydroinformatics, International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), IWA Publishing, Cardiff, UK, 1400-1407.
- EL Khattabi, J., Boulemia C., Carlier, E. and Sedki, S., 2002. Identification of instabilities factors and their integration in a model of rupture : a method of safety coefficient evaluation, 15th Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers (ASCE), Columbia University in the City of NewYork, USA, June 2-5.
- El Khattabi, J. and Carlier, E., 2004. Tectonic and hydrodynamic control of slope instabilities in the northern area of the Central Rif (Morocco). *Engineering Geology*, 71, 3-4,, 255-264.
- Flageollet, JC. 1989. Les mouvements de terrain et leur prévention, Collection Géographie, 224p.
- Gaillot, S., and Chaverot, S. 2001. Analyzing the kinematics of low-mobility coastlines: methodology and results for the Golo delta (Corsica) and the Touquet coast (Pas-de-Calais) in France. In: Géomorphologie : relief, processus, environnement, 7(1), 47-54.
- Grenier, A. and Dubois, J.N. 1990. Évolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique. *Photo-interprétation*, (6), 3-16.
- Heydarizadeh, M. 1996. Modélisation synthétique des régimes hydrologiques : Evaluation des modèles de synthèse QdF en cas d'échange nappes-rivières actifs et activables, test sur un bassin très perméable, le Rival (Isère), Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, 198p.
- Lebbe, L., Walraevens, K., Van burm, P. et Breuck (de), W. 1989. L'évolution de la distribution des eaux douces et salées dans la nappe libre de la plaine maritime aux environs de la frontière belgo-française. Ann. Soc. Géol. Nord , 55-65.
- Louche, B. 1997. Limites littorales de la nappe de la craie dans la région Nord Pas-de-Calais, Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer. Thèse. Publiction N 24. I.S.S.N. 0291 3062. Univ. Lille1. 277p.

- Louche, B. and Hallet, V. 2001. Determination of tectonic structure in the chalk aquifer along the nord-pas-decalais coast by geophysical prospecting coupled to observations by drilling. consequences on the salted water distribution. Rev.Sci.Eau , 14/3, 265-280.
- Louche, B., Crampon, N. and Bracq, P. 1998. Qualité et comportement de l'aquifère crayeux sur le littoral Nord-Pas-de-Calais(Quality and bebaviour of the chalk aquifer on the Nord-Pas-de-Calais shoreline). Académie des sciences, Paris, Sciences de la terre et des planètes. Earth and Planetary Sciences , 327, 463-470.
- Malatrait, AM. 1975. Mouvements gravitaires dans le territoire couvert par la feuille de St-Jean-de Maurienne (Savoie) à 1/50 000. B.R.G.M 75, S.G.N. 229 AME, 218p.
- Maurer, G. 1965. Carte géomorphologique du Rif central, Travaux de l'Institut Scientifique Chérifien, Rabat, Service Géographie Physique,
- Maurer, G. 1968. Les montagnes du Rif central, étude géomorphologique (Thèse d'Etat), Travaux de l'Institut Scientifique Cherifien, Service de la Géographie Physique, Rabat, 500p.
- McKenna Neuman, C. and Nickling W.G. (1989). A theoretical and wind tunnel investigation of the effects of capillary water on the entrainment of sediment by wind, Can. J. Soil Sci. 69, 79–96.
- Milliés-Lacroix, A. 1968. Les glissements de terrain, présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de masses dans le Rif (Maroc septentrional), Mines et Géologie, 27, 45–54.
- Moore, L.J., 2000. Shoreline mapping techniques. Journal of Coastal Research, 16 (1), 111-124.
- Namikas, S.L. and Sherman, DJ. 1995. A review of the effects of surface moisture content on Aeolian sand transport. In: Tchakerian, V.P. (Ed.), Desert Aeolian Processes. Chapman and Hall, New York, 269–293.
- Paskoff, R. 1993. Côtes en danger. Paris : Masson, 250p.
- Paskoff, R. 1998. Les Littoraux, impact des aménagements sur leur évolution. Paris : Masson, 183p.
- Philipponnat, G. et Hubert, B. 1998. Cours de Mécanique des sols, Eyrolles, 798p.
- Pierre, G. and Lahousse, Ph. 2006. The role of groundwater in cliff instability: an example at cape Blanc-Nez (Pas-de-Calais, France), *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 31-45.
- Porteret, J. 2005. Etude du fonctionnement hydrologique d'une tourbière basse du nord-est du Massif Central français : la Prenarde dans les Monts du Forez. Colloque. Château de Goutelas, Loire, 5-7 oct, France.
- Robin, M. 2002. Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. In Baron- Yelles N. et al. (Ed.): Le littoral regards, pratiques et savoirs. Paris : Presses de l'École normale supérieure, 95-115.
- Sedki, S. 2005. Analyse et modélisation géomécanique et hydrmécanique des instabilités des falaises du Cap Blanc Nez (Pas de Calais, France). Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 158 p
- SPRL. 2006. Ville d'Hardelot-Plage, Prospection géophysique, Sondages électriques 3-5 Mai 2006, Rapport. Bureau Conseil en Géologie SPRL, Dossier 05375.
- Tresca, A. 2006. Évolution géomorphologique d'une côte sableuse anthropisée: l'exemple d'hardelot-plage, Mémoire de Master Recherche, Université des Sciences et Technologies de Lille, 149p.
- Wiggs, G.F.S., Baird, A.J. and Atherton, R.J. 2004. The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind, Geomorphology, 59 (1-4), 13-30.

Thème 2.

Processus d'écoulements et impacts sur la qualité de l'eau dans les sols saturés et non saturés.

L'eau est l'origine de la vie sur la terre, elle est vitale pour tous les êtres vivants. Les civilisations sont apparues et développées grâce à la présence de l'eau, mais aussitôt disparues avec sa carence ; pour en citer une, la civilisation Maya est l'exemple le plus parlant. L'eau, en se combinant à la terre, a donc accompagné l'être humain depuis l'aube de l'humanité. Elle a accompagné dans son évolution, son développement économique et civilisationnel, sa culture et ses croyances. Ainsi les récits monothéistes s'y référent de manière insistante ; il y est un moyen de purification comme dans les autres croyances à l'image de la rivière sacrée du Gange dans l'hindouisme.

L'eau comme ressource naturelle constitue, aujourd'hui un enjeu majeur pour la stabilité des états. Source de conflits dans de plusieurs parties du monde, son exploitation connait des bouleversements importants. Ainsi, la désalinisation de l'eau de mer devient un moyen de production d'eau douce qui se répand peu à peu dans différentes régions du monde remplaçant ainsi l'exploitation traditionnelle des nappes, des rivières et des retenues. C'est le cas par exemple des pays sud du pourtour méditerranéens. Dans les pays du nord, les facteurs anthropiques que constituent l'agriculture intensive et l'industrialisation, sont à l'origine de la dégradation de la qualité des nappes et des rivières. A cette pression anthropique qui s'exerce sur le milieu naturel s'ajoutent les pressions naturelles par le relargage des métaux dans le milieu en interaction avec la géologie locale. C'est le cas de la région nord Pas de Calais (Hauts de France) marquée par un passé industrielle, une fertilisation intensive et une géologie qui contribue particulièrement à cet état de fait.

Pour faire face au défis futurs, au-delà de l'état de l'art, connaitre le potentiel de la ressource, sa gestion raisonnée, son évolution en fonction des besoins et des prévisions climatiques, les travaux réalisés ont abordé le domaine de l'hydrogéologie sur ses différentes facettes. De la compréhension de l'hydrodynamisme des milieux fissurés et poreux, du transfert des particules et la diffusion ainsi que de l'hydrochimie des eaux souterraines. Leur application concerne l'exploitation et la protection des ressources souterraines. La compréhension des phénomènes s'opérant dans le milieu aqueux ainsi que la gestion de la ressource a fait l'objet d'études précises pour la mise en place d'outils d'aide à la décision basés sur différentes approches : probabilistes, analytiques, numériques et systèmes d'information géographique.

Chapitre 3 : Etude de la minéralisation des eaux souterraines et de surface, Impacts et enjeux économiques : cas des flyschs de la chaine tello-rifaine (rive sud de la méditerranée).

Introduction

Cet axe concerne l'estimation des réserves en eau et des besoins, l'évaluation de sa qualité, la protection des ressources contre la pollution anthropique et/ou naturelle. Un des objectifs est d'élaborer des outils d'aide à la décision, facilitant la gestion des eaux souterraines comme de surface. Le pourtour méditerranéen, et plus particulièrement l'Afrique du nord, est soumis à des contraintes naturelles (précipitations, écoulements, géologie) et anthropiques (prélèvements, rejets) qui rendent difficile l'exploitation et la gestion des eaux souterraines comme celles de surface. Ainsi, la forte minéralisation des nappes ou encore la dégradation qualitative et quantitative des lacs, a eu des conséquences sur le développement économique de certaines régions. Au nord du Maroc, le Rif central connaît un développement urbain et une activité agricole locale qui répond surtout aux besoins de la population rurale, ce qui implique une demande croissante en eau potable. Néanmoins, la connaissance sur l'hydrogéologie de ce secteur reste faible. Afin, de palier à ces lacunes, j'ai mené une étude basée sur le recueil et l'exploitation de données piézométriques et hydrogéochimiques. L'objectif principal a été de mettre en place une stratégie pour l'aide à la décision pour orienter les campagnes hydrogéologiques de protection et/ou d'implantation de nouveaux captages d'alimentation en eau potable. Le lac Oubeira, situé dans le Nord-Est algérien d'une superficie de 21.73 Km2, reçoit des rejets d'eaux usées de petites localités et subit en saison sèche des prélèvements destinés à l'irrigation. Ces actions ont pour l'instant peu d'effets sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux (température, conductivité, oxygène dissous...). Les apports de la saison sèche des affluents sont habituellement faibles et incapables d'apporter d'intenses perturbations dans la masse aquatique. En raison de sa situation en zone nord-africaine, soumise au climat méditerranéen, la région est marquée par de très fortes pertes par évaporation.

Minéralisation de la nappe des flyschs sous l'effet des intrusions salifères d'origine tectonique

La géographie du secteur se distingue par un relief assez marqué entrecoupé de vallées orientées N-S. Les versants en bordure de la méditerranée sont sous l'influence maritime mais ne reçoivent pas suffisamment de précipitations qui dépassent rarement les 300mm/an (Figure 3.1).



Figure 3.1. Localisation et schéma structural de la région d'étude [El Khattabi, 2001].

La géologie est caractérisée par un empilement de nappes de charriages (de bas vers le haut : Kétama, Chouamat et Tisirène), elles-mêmes constituées de flyschys avec des matériaux schisteux (ou pélitiques), gréseux auxquels s'ajoutent par endroits des niveaux carbonatés. Au regard de ces matériaux et leurs caractéristiques physiques, on s'aperçoit rapidement de leur aspect d'aquitard. Toutefois, les vallées avec des dépôts alluvionnaires constituent des aquifères non négligeables. Les schistes correspondent au mur de la nappe pour ces alluvions et le charriage tectonique, par sa nature pâteuse et broyée, pour les grès des flyschs.

Pour aboutir à la caractérisation des faciès des eaux souterraines que ce soit pour les nappes alluviales ou pour les nappes des versants, les diagrammes de Piper et de Schoeller ont été utilisés (Figure 3.2) appuyés par l'analyse statistique en composantes principales (ACP).



Figure 3.2. Représentation des différentes eaux et leur étendue chimique sur le diagramme de Scholler.

L'interprétation des données hydrochimiques montre sur l'ensemble du secteur un faciès chlorosodique avec des concentrations plus faibles dans les vallées. Celle-ci a permis d'identifier l'origine des différentes eaux en corrélant l'ensemble des éléments chimiques (Figure 3.3). Le facteur F1 oppose essentiellement les éléments chimiques provenant des minéraux du substrat rocheux marqué par les flyschs caractérisés par les alternances de matériaux pélitiques et gréseux et de matériaux carbonatés, aux formations superficielles. Les nitrates seraient d'origine superficielle, liés essentiellement à l'utilisation de fertilisants naturels dans l'agriculture. Par conséquent le facteur F1 oppose des eaux ayant séjourné ou traversé les niveaux schisto-gréseux et carbonatés, aux eaux ayant subi un passage dans l'horizon pédologique et ayant rejoint l'aquifère.

		ALISA	TON	

Figure 3.3. ACP chimisme des eaux des versants par forages au cours du cycle 83/84 : Espace F1-F2.

Dans le domaine des flyschs, une augmentation de la conductivité, du sud vers le nord, a pu être mise en évidence en relation avec le sens d'écoulement de la nappe. À l'échelle du secteur d'étude, l'aquifère des flyschs peut être considéré comme homogène. En revanche, il existe une hétérogénéité spatiale de l'eau souterraine, influencée par la pente du substrat conditionnant les vitesses d'écoulement. Ceci nous a amené à proposer une nouvelle répartition des différents types d'eau. En effet, la minéralisation croissante du sud vers le nord est en étroite relation avec la pente du substratum (Figure 3.4). La correction par α (pente du substrat=pendage du charriage tectonique) de la distance parcourue par les eaux détermine un seul domaine de répartition de conductivités électriques (Figure 3.4).



Figure 3.4. Evolution de la conductivité.



La réalisation d'une carte de répartition des conductivités électriques constitue un premier outil d'aide à la décision pour la reconnaissance des zones favorables à l'implantation de nouveaux captages aussi bien agricoles que d'alimentation en eau potable (Figure 3.5).



Figure 3.5. Répartition des différents domaines hydrochimiques dans les flyschs du Rif Central.

Evolution spatiale des caractéristiques physico-chimiques des eaux du lac Oubéira imposée par les conditions sévères de la sécheresse (Extrême NE algérien)

Le lac endoréique d'Oubeira doit sa pérennité à un équilibre subtil entre une évaporation d'environ 1500 mm/an et une alimentation pluviale d'environ 850 mm/an [Alayat, 1991]. La dimension du bassin versant et l'apport non négligeable des nappes en saison sèche, permettent de compenser ces pertes importantes et de pérenniser le lac. Le déséquilibre entre les apports et l'évaporation, à cette époque de l'année, suite aux prélèvements anthropiques, à la forte insolation et aux températures élevées engendre chaque année un rétrécissement temporaire du lac. L'eau se retire sur 100 à 200 m et parfois plus, notamment vers le Nord-Ouest et le Nord Est. Ce lac qui se maintient depuis le quaternaire, s'est asséché complètement à la fin de l'été 1990, suite à des pompages importants destinés à l'AEP et à une séquence d'années sèches. Par conséquent, le potentiel hydrique même s'il est suffisant n'est pas inépuisable.



Figure 3.6. Carte de situation de la zone d'étude

Selon les nombreux travaux [Joleaud, 1936 ; Kieken, 1961 ; Durand Delga, 1969 ; Raoult, 1974 ; Vila, 1980], la géologie de la région est très complexe en raison de nombreuses surfaces de chevauchement et de failles qui ont eu de nombreux rejeux perturbant les successions de formations, en particulier lors des phases alpines. Le Numidien (Oligocène à Burdigalien) affleure largement dans le bassin versant du lac. Il est représenté par une formation essentiellement gréseuse comportant à la base et au sommet respectivement des argiles numidiennes et des argiles associées à des marnes (Figure 3.7). Le pléistocène est visible à l'Est du lac. Il est constitué de sables provenant de la marmorisation de grès numidien.



Figure 3.7. Carte géologique simplifiée de la région [vila, 1980]. 1 : Quaternaire ; 2 : Pléistocène ; 3 : Flysch non différencié (surtout grès numidiens et argiles de base) ; 4 : étendues d'eau ; 5 : Contacts géologiques ; 6 : Failles ; 7 : Limites du bassin versant

Six transects parallèles ont été réalisés au niveau du lac Oubeira (Figure 3.8). Les mesures ont été effectuées sur des verticales en fonction de la lame d'eau. Un point de mesure au milieu de la verticale pour une lame d'eau de moins d'un mètre et deux points de mesures (l'un à proximité du fond et l'autre à proximité de la surface) pour une lame d'eau de plus d'un mètre.



Figure 3.8. Carte des transects bathymétriques

Une cinquantaine de points de mesure ont ainsi été réalisés dans le lac, afin de mieux cerner la bathymétrie, l'envasement et l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques. Les mesures insitu réalisées concernent la hauteur de la lame d'eau et l'épaisseur de la vase avec une perche graduée, la conductivité électrique, TDS et la température de l'eau, le pH et l'oxygène dissous. Quant aux analyses physico-chimiques, elles ont porté sur les chlorures, les sulfates, les nitrates, le fluor, les cations majeurs et les éléments traces.

Les profils bathymétriques réalisés en octobre 2009, représentent l'état du fond du lac Oubeira à ce moment-là. La géomorphologie du lac déduite des isobathes montre une stabilité du fond, avec un accroissement de la profondeur des berges vers le centre et l'absence de haut fond ou de bas fond (Figure 3.9). La profondeur maximale observée est de 1.50m.



Figure 3.9. Morphologie du lac. A gauche : Carte des isobathe, A droite : Carte iso-épaisseur vase.

La carte en isopaques de la vase du lac montre que le fond du lac est recouvert d'une épaisse couverture de vase, qui atteint sa puissance maximum au centre. La répartition de la vase épouse celle de la bathymétrie. Cet envasement pourrait entraîner à terme une grave déstabilisation de ce milieu qui est un témoin environnemental extrêmement précieux.

Evolution des paramètres : T°, O₂, pH, CE

Au début de la saison sèche, l'eau de surface se réchauffe sous l'influence du rayonnement solaire et la chaleur se propage en profondeur. Les profils thermiques verticaux réalisés soulignent parfois de légères disparités entre la surface et le fond. A la fin de saison sèche la température de l'eau du fond est généralement plus élevée que celle de la surface, de l'ordre de 0.5 à 1 °C. Cette différence s'explique par la lenteur des phénomènes de réchauffement et/ou de refroidissement, qui se déroulent dans la colonne d'eau [Dandelot S. et *al.*, 2005 ; Constant P. et *al.*, 2005]. La confrontation de la température du lac à celle de l'air montre une différence de l'ordre de 3 à 7 °C (Figure 3.10).



Figure 3.10. Carte isotherme (à gauche) et carte isoplèthe (à droite) de la concentration en 0_2 de la surface du lac.

Pour l'oxygène dissous, il dépend essentiellement de la respiration et de la photosynthèse des populations planctoniques et de la minéralisation de la biomasse. La teneur en oxygène dissous dans

l'eau est étroitement liée au régime thermique du lac. La température élevée de la saison engendre une prolifération algale et par conséquent, une forte augmentation de la concentration en 0₂ dissous. L'isoplèthe de concentration 10mg/l délimite à la surface du lac et en profondeur deux masses aquatiques distinctes. L'une appauvrie en oxygène dissous et l'autre sursaturée. Des sursaturations en oxygène peuvent atteindre des concentrations de 16mg/l (Figure 3.10). Le lac subit également en cette saison, une poussée de zooplancton qui consomme la population algale de l'été et entraîne la disparition de la couche sursaturée en oxygène dans sa partie Ouest. Une mauvaise homogénéisation peut être en partie à l'origine de cette situation. L'oxygène dissous est bien corrélé avec la T°.

La photosynthèse algale consomme beaucoup de CO₂ et provogue ainsi une augmentation notable du pH des eaux. La respiration, au contraire, contribue à son abaissement par production de gaz carbonique. De même lors de la minéralisation de la matière organique, la production de CO₂ entraîne une baisse du pH [Alayat, 2006]. Enfin, la précipitation de carbonates induit une alcalinisation et leur dissolution une acidification. Les disparités alcalimétriques ne sont pas imputables, aux apports de rivières ou de pluies de la saison, plus acides. Les stations situées à l'Ouest montrent un pH, proche de 8 par contre à l'Est le pH avoisine 9. Cette différence s'explique par la minéralisation de la matière organique créant une diminution du pH vers la rive Ouest du lac et par l'activité des populations zooplanctoniques. L'évolution spatiale du pH se traduit par une désalcalinisation de la masse aquatique, en surface et au fond, de l'Est vers l'Ouest, parallèlement à la diminution de la concentration de l'oxygène dissous.

L'intérêt des mesures de la CE se manifeste surtout dans leur évolution spatiale [Stournaras et al., 1989]. Les mesures de la CE montrent l'accroissement de la minéralisation des eaux dès qu'on s'éloigne des rives, notamment vers le SE et le SW. Les contrastes de CE ne permettent pas de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélanges ou de drainance. En effet les faibles apports de fin de saison sèche des affluents ne peuvent pas être à l'origine de la variation de la CE des eaux du lac. La CE varie peu ou pas selon la profondeur. Les disparités de conductivités électriques entre les stations ne sont pas imputables aux rejets ni aux mesures, qui ont été vérifiées in situ et refait à deux reprises.

Cations et anions majeurs

Les teneurs en Ca+Mg, Na+K, HCO3+CO3 et CI+SO4 des eaux du lac et des affluents (Figure 3.11), montrent que le principal radical acide est le chlore et le principal radical basique est le sodium (Tableau 3.1). Les teneurs en nitrates des eaux lacustres sont très faibles de l'ordre de 10 à 500µg/l. Ces eaux ont également des teneurs relativement moyennes en Ca (35 à 45 mg/l) et en Mg (13 à 15 mg/l) par rapport à la minéralisation globale. Ces valeurs plaident en faveur d'une absence de pollution par les affluents et par l'activité agricole traditionnelle de saison (culture de l'arachide).

Tableau 3. 1. Teneurs en cations et anions des éaux du transect transversal, des oueus et de la pluie								
Stations	Ca+Mg	Ca+Mg	Na+K	Na+K	HCO3+CO3	HCO3+CO3	CI+SO4	CI+SO4
Stations	meq/l	%	meq/l	%	meq/l	%	meq/l	%
V2	3.13	45.04	3.82	54.96	2.44	34.13	4.71	65.87
V5/1	3.07	44.43	3.84	55.57	2.32	32.77	4.76	67.23
V5/2	3.15	44.81	3.88	55.19	2.24	30.52	5.10	69.48
V11/1	3.12	45.15	3.79	54.85	2.68	35.64	4.84	64.36
V11/2	3.10	46.13	3.62	53.87	2.64	35.97	4.70	64.03
V17/1	3.07	44.43	3.84	55.57	2.56	33.55	5.07	66.45
V17/2	3.08	45.43	3.70	54.57	2.40	33.06	4.86	66.94
V22/1	2.96	43.92	3.78	56.08	2.68	35.97	4.77	64.03
V22/2	3.08	44.96	3.77	55.04	2.52	34.47	4.79	65.53
V27/1	3.07	44.49	3.83	55.51	2.12	32.17	4.47	71.47
V27/2	3.06	44.35	3.84	55.65	2.20	31.47	4.79	68.53
Pluie	0.87	52.78	0.78	47.22	0.93	62.00	0.57	38.00
Demenet et Rehan	0.87	38.67	1.38	61.33	0.57	26.39	1.59	73.61
Boumerchen	1.17	46.61	1.34	53.39	0.80	32.79	1.64	67.21
Bouhchicha	3.6	46.51	4.14	53.49	3.26	40.85	4.72	59.15
Degrah	3.03	43.85	3.88	56.15	0.82	11.80	6.13	88.20

Tableau 2.1. Topours on cations at anions dos eaux du transport transversal, dos eueds at de la pluie

Les affluents Demenet er Rehan, Boumerchen, Degrah et Bouhchicha qui reçoivent des rejets d'eaux usées sur leur cours, présentent à leur embouchure une eau juste un peu plus minéralisée que celle du reste du lac, à cette époque de l'année. Ceci s'explique par l'auto-épuration, le faible débit (quelques litres/secondes) et l'effet de filtre qu'offrent les sables à leur exutoire. La teneur la plus élevée en nitrate des affluents est observée à l'exutoire de l'oued Boumerchen (soit 2 mg/l).

Les teneurs en Ca+Mg, Na+K, HCO3+CO3 et Cl+SO4 des eaux de pluies montrent que le principal radical acide est le calcium et le principal radical basique est le bicarbonate. Ces eaux ont de très faibles teneurs en calcium (de l'ordre de 14mg/l) et en magnésium (de l'ordre de 2mg/l). Les nitrates restent faibles mais dépassent les teneurs observées dans le plan d'eau pour atteindre plus de 1mg/l. Ils proviennent de l'oxydation de l'azote ammoniacal. La minéralisation de ces eaux est très faible (CE = 204µS/cm). Dans les eaux de surface de la région, les nitrates proviennent principalement de l'épandage d'engrais azotés (chimiques ou organiques) et du cycle biologique naturel, soit par décomposition de la matière organique, soit par production active de la part de certaines plantes, en zone saturée comme en zone non saturée [Travi et Mudry, 1997 ; Le Borgne, 2006].

Le report des résultats d'analyses des transects transversaux et longitudinaux sur un diagramme triangulaire montre la superposition et le regroupement des stations étudiées en amas, en raison de la faible variabilité des concentrations d'une station de mesure à l'autre (Figure 3.11). Les points figuratifs des oueds Demenet er Rehane, Boumerchen et Bouhchicha sont associés à ceux du lac. Seuls les points représentant l'oued Degrah et la pluie s'en écartent de façon significative. Il s'ensuit que les eaux lacustres et celles des affluents sont chlorurées sodiques et potassiques par contre celles de la pluie sont bicarbonatées calciques et magnésiennes.



Figure 3.11. Faciès chimiques des eaux du profil transversal du lac Oubeira, des oueds Demeneter Rehan, Boumerchen, Degrah, Bouhchicha et de pluie

En dépit de faibles variations de concentrations des éléments majeurs observées vers le large, le diagramme de Piper attribue donc le même faciès chimique à la masse d'eau lacustre. Il ne reflète pas les hétérogénéités longitudinales et transversales identifiées pour la température, le potentiel hydrogène et la conductivité électrique qui apprécie la quantité de sels dissous dans l'eau. Les eaux du lac peu minéralisées à moyennement minéralisées (390-760µS/cm) sont chlorurées sodiques de type Na-Cl. Elles sont différentes des eaux de pluies, bicarbonatées calciques et magnésiennes, faiblement minéralisées (204µS/cm) de type Ca-Mg-HCO3, par contre très proches de celles des affluents, qui sont moyennement minéralisées. L'eau du lac a une minéralisation comparable à celle des affluents peu influencée par les activités humaines. Les sédiments quaternaires de taille fine et localisés au fond du lac sont les produits d'altération et d'érosion du Numidien gréso-argileux. Ils

peuvent transmettre à l'eau lacustre une part des caractéristiques géochimiques. De plus, les eaux de pluies et celles des affluents Demenet er Rehan et Boumerchen perdent leurs caractéristiques principales au contact des eaux du lac. Les concentrations en éléments majeurs semblent croître en fonction du temps de séjour dans l'eau. Les eaux de l'affluent Degrah se différencient nettement de celles du lac par les faibles teneurs en HCO3 - et des teneurs en Cl⁻ et en SO4²⁻ un peu plus élevées. Enfin, Les eaux de l'oued Bouhchicha possèdent des teneurs plus élevées en HCO³⁻ et des teneurs en Cl⁻ un peu plus faibles.

Conclusion

Connaître la qualité de l'eau permet, non seulement d'éviter les problèmes de santé, mais aussi de guider le choix des projets de développement, notamment dans les domaines agricole, industriel et aquacole et d'éviter à terme une grave déstabilisation de ce milieu. Dans la région du Rif central (Nord du Maroc), en particulier, celle dominée par les flyschs souffre de la carence d'eau et de la qualité médiocre liée à une conductivité électrique élevée sous l'influence des sels chloro-sodiques. Les vallées présentent un potentiel plus important en termes de productivité avec des conductivités moins élevés qu'au niveau des versants. Toutefois, la présence de linéaments structuraux influence la qualité qui se dégrade ponctuellement. L'analyse des données acquises a permis d'identifier le rôle du charriage et en particulier, sa pente. Ainsi, un zonage à base de la conductivité a été réalisé pour la nappe identifiant le secteur sud avec les vallées comme les plus propices à l'exploitation de la ressource.

Le lac Oubeira dans l'Est algérien est un témoin environnemental extrêmement précieux, qui intègre de nombreux paramètres hydroclimatiques qui réagissent rapidement. A la fin de la saison sèche le comportement général de la température du lac est presque identique. Il ne présente pas de stratification thermique. La stratification lacustre est perturbée par la direction et l'intensité des vents violents, capables de réinstaurer une homogénéisation dans la colonne d'eau. Le mauvais temps engendre un brassage progressif jusqu'au retour homothermique de la masse aquatique du lac. La rive Nord possède des eaux plus chaudes que la rive Sud, en raison des vents dominant et de son exposition. L'évolution verticale de l'oxygène dissous se manifeste de manière comparable sur toutes les stations des profils longitudinal et transversal. Les isoplèthes de concentration suivent ainsi le profil thermique du lac identifiant deux masses aquatiques différentes ; l'une sursaturée et l'autre moins oxygénée. Cette zonation s'explique en partie par le comportement microbiologique et par l'exposition de la rive Est aux vents dominants qu'induit un brassage des eaux. En effet, la minéralisation des particules organiques entraîne la consommation d'oxygène dissous et l'abaissement du pH. En fin de saison sèche, la partie Ouest du lac subit une désoxygénation dont le seuil s'abaisse autour de 7.4mg/l. L'ensemble des mesures de pH montre que la masse d'eau à cette époque de l'année est basique et qu'il existe des disparités alcalimétriques, entre la rive Est et Ouest du lac Oubeira. Elles ne sont pas affectées par des apports exogènes. L'alcalinité aquatique observée est due essentiellement à l'activité biologique et accessoirement aux précipitations des carbonates. Si les variations verticales de la conductivité électrique des eaux du lac Oubeira sont très peu sensibles en fin de saison sèche, les variations spatiales sont importantes. En effet, l'eau est plus riche en sels dissous vers le large qu'en bordure et notamment vers le SE et le SW. Cependant, l'eau du lac demeure douce. Les écarts de conductivité électrique relevés s'expliquent par le comportement des populations planctoniques, les réactions physico-chimiques et le temps de séjour des eaux dans le lac. L'éventuelle alimentation souterraine du lac, à cette époque de l'année, par des eaux plus minéralisées est une hypothèse à vérifier, dans la partie SE du lac. L'auto-épuration activée par le brassage continu des eaux fait que la teneur des composés d'azote et de phosphore est très faible et montre l'absence de dégradation particulière de la qualité de l'eau qui serait à l'origine de l'eutrophisation. La faible puissance de la colonne d'eau lacustre, fait que les algues en se décomposant n'affectent pas de manière significative la quantité d'oxygène dissous dans l'eau. Enfin, le faciès des eaux lacustres et celui des affluents est chloruré sodique par contre celui des eaux de pluie est bicarbonaté calcique et magnésien. Enfin, l'envasement du lac est un problème majeur qui a long termes entraînera la modification de l'écosystème. Un dragage s'impose.

- Alayat, H. 1991. Les eaux superficielles et la nappe phréatique de la plaine d'Annaba. Thèse de Doctorat, Université de Nancy II, 382p.
- Alayat, H. 2006. Evolution spatio-temporelle du chimisme des eaux thermo minérales des monts de la cheffia (NE algerien). *Kartologia*, *48*, *23-28*.
- Constant, P., Poissant, L. et Villemur, R. 2005. Impact de la variation du niveau d'eau d'un marais du lac Saint-Pierre (Québec, Canada) sur les concentrations et les flux d'hydrogène, monoxyde de carbone, méthane et dioxyde de carbone. *Revue des Sciences de l'Eau, 521-539.*
- Dandelot, S., Matheron, R., Le Petit, J., Verlaque, R. et Cazaubon A., 2005. Variations temporelles des paramètres physicochimiques et microbiologiques des trois écosystèmes aquatiques (Sud-Est de la France) envahis par des *Ludwigia. Comptes Rendus Biologies, 328, 991-999.*
- Durand Delga, M. 1969 Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publications du Service de la Carte géologique d'Algérie, *Bulletin de la Société Géologique de France, 7, 328-337.*
- El Khattabi, J. 2001. Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc). Thèse d'Université d'Artois, 258p.
- Feller, W. 1966. An introduction to probability theory and its applications, *Wiley*, New York.
- Joleaud, L. 1936. Etude géologique de la région de Bône-la Calle. B.S.G.A. (2), 12, 199p.
- Kallenberg, O. 1997. Foundations of modern probability, *Springer-Verlag*, New York.
- Kieken, M., 1961. Les traits essentiels de la géologie algérienne. In livre Mémoires du Professeur P. Fallot, Mémoires. Hors-série. *Société Géologique de France*, (1960-1962), I, p. 545-614, 6p.
- Le Borgne, F. 2006. Bilan des impacts hydrogéochimiques naturels et anthropiques à l'intérieur du réseau karstique du Val d'Orléans établi à l'aide des éléments majeurs. *Bulletin de la Société Géologique de France, 1, 37-50.*
- Raoult, J.F. 1974. Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord du constantinois, Algérie). Thèse Sc. Paris. Mémoires de la *Société Géologique de France*, N.S., LIII, Mémoires, 121, 1-163.
- Stournaras, G., Panagoupoulo,s A. et Sotiropoulou, K. 1989. La signification hydrogéologique des conditions hydrochimiques et géomorphologiques d'un terrain gypseux. Les sources de Drymos (Grèce occidentale). *Annales de l'université de provence, tome XVI, 4, 311-320.*
- Travi, Y. et Mudry, J. 1997. Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Bulletin du B.R.G.M. 1, 13-21.*
- Vila, J.M. 1980. La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens. Thèse de doctorat ès sciences naturelles, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 2 t, 665p.

Chapitre 4 : Impact des pratiques culturales et des rejets urbains sur la qualité des eaux souterraines.

Le Nord - Pas-de-Calais a une forme générale de triangle à pointe dirigée vers l'est. Sur la carte géologique schématique (Figure 4.1), apparaissent essentiellement de vastes affleurements de terrains post-paléozoïques que recouvre en grande partie un manteau de limons. Les dépôts mésozoïques et cénozoïques s'appuient à l'Est sur les formations paléozoïques du massif ardennais, alors qu'ils s'ennoient du Sud vers le Bassin de Paris, au Nord vers le Bassin de Bruxelles [Porel, 1988].



Figure 4.1. Carte géologique schématique de la région Nord – Pas-de-Calais.

Cette région a été marquée par la tectonique primaire et secondaire. On peut distinguer dans le socle paléozoïque du Nord de la France, deux parties séparées par un ensemble de failles orientées grossièrement NW-SE, qui ont surélevé la partie sud au cours de l'orogenèse alpine du Cénozoïque.

Introduction

Ce chapitre présente un ensemble de travaux de recherches, portant sur le thème de la qualité de la nappe d'eau souterraine sous pressions anthropiques réalisés au sein du Laboratoire de Mécanique de Lille (UMR-CNRS 8107) et du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement – Nord de France. C'est la nappe de la craie du Nord de la France qui a fait particulièrement l'objet de nos recherches car outre le fait d'être très étendue, une superficie totale d'environ 19500 km² (Figure 4.2), elle représente environ 96 % de la ressource exploitée destinée à la consommation.

Les fortes concentrations urbaines et les activités industrielles de la région les Hauts de France ont provoqué une progressive sur-minéralisation de la nappe qui ne jouit que rarement d'une protection argileuse naturelle continue. L'intensification de la productivité agricole à partir du début des années soixante a ainsi été un facteur aggravant les lessivages et les infiltrations des fertilisants non consommés par la végétation. La lenteur des infiltrations et des cheminements des substances polluantes dans le sous-sol a conduit à l'apparition et à la persistance de molécules dans certains captages d'eau potable rendant l'eau impropre à la consommation humaine. Cela a été notamment le cas des nitrates et plus récemment des produits phytosanitaires. Depuis 1975, l'Europe a mis en place sa politique de lutte contre la pollution des eaux et la dégradation des milieux aquatiques à travers une trentaine de directives et règlements. Dans le nord de la France, les concentrations en nitrates mesurées dans la nappe de la craie atteignent ou dépassent parfois le seuil de la potabilité fixé à 50 mg/l par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) en 2000 transcrite en droit français en 2001. Cet état de fait est la conséquence direct de l'essor de l'agriculture intensive, l'industrialisation ou encore la croissance démographique.



Figure 4.2. Cadre géologique de la zone d'étude.

Pour remédier à cette situation plusieurs programmes ont été mis en place, notamment Fertimieux dans le domaine de l'agriculture ainsi que le raccordement aux stations d'épuration et le traitement des rejets. Pour estimer l'influence réelle des pressions anthropiques sur la qualité de l'eau souterraine à l'ensemble du bassin Artois Picardie, des validations préalables à l'échelle de la parcelle, de la commune et de l'arrondissement ont été nécessaires. L'impact de ces mesures dans l'arrondissement de Cambrai (Nord) a été évalué à travers un modèle intégré basé sur le couplage de différents modules permettant d'établir un bilan du cycle de l'azote dans la zone racinaire (Agriflux) et son transit dans la zone non saturée infra-racinaire (VS2DT) jusqu'à la zone saturée (Modflow et MT3D) [Serhal, 2006 ; serhal et al., 2009]. Dans ce secteur un travail complémentaire a été réalisé en appliquant la même méthode au niveau de la nappe alluviale à l'Est de l'arrondissement de Cambrai dans le secteur des deux communes de Catillon-sur-Sambre et Rejet-de-Beaulieu afin d'évaluer la quantité des nitrates qui migrent du sol vers la nappe, et d'estimer les concentrations dans les forages implantés dans les deux communes [El Khattabi, 2011]. Dans le Béthunois, la prédiction spatiale de la pollution en nitrates de la nappe de la craie a été effectuée à base d'un modèle combinant les SIG, la modélisation hydrodynamique, la modélisation hydrodispersive et les réseaux de neurones artificiels (RNA) [Darwishe, 2011]. Le but recherché était de définir les débits optimums de prélèvements d'eau dans les forages de manière à fournir une alimentation en eau potable dans le secteur de Lens tout en préservant la capacité de dénitrification de l'aquifère exploité. Des scénarios de prélèvements, simulés par Modflow et à l'aide du RNA, ont été définis et testés pour des années sèches et humides au cours de la période 1972-2008. La prédiction spatiale de pollution par les nitrates des eaux souterraines a été évaluée pour l'horizon 2025.

Etude d'impact de la minéralisation azotée d'origine domestique et agricole sur l'exploitation d'eau potable de la nappe de la craie dans le Cambrésis

L'arrondissement de Cambrai (Nord de la France) est composé de 115 communes totalisant 900 km² (Figure 4.3). Le relief de l'arrondissement est caractérisé par un vaste plateau à l'Ouest et par un secteur vallonné à l'Est de "Le-Cateau". La déclivité générale est orientée du Sud-Est (+186m) vers le Nord (+33m). Le climat dans l'arrondissement est de type tempéré à dominante océanique. La température moyenne annuelle s'établit à 9.7°C avec des moyennes mensuelles extrêmes de 2.8°C en janvier et 17°C en juillet. Les précipitations varient du Nord-Ouest au Sud-Est (de 650 à 750 mm), résultat de la direction des vents dominants et du relief.



Figure 4.3. Localisation du secteur d'étude.

Le sous-sol de la zone d'étude est essentiellement composé par la craie du Séno – Turonien sous limons, avec par endroits un recouvrement par des formations tertiaires constituées de sables et d'argiles. L'épaisseur de la zone non saturée n'est pas uniforme. L'alimentation en eau potable des communes de l'arrondissement est assurée par une centaine des captages. Si les débits sont généralement satisfaisants, il n'en est pas de même pour la qualité de l'eau ; ainsi, la concentration en nitrates était préoccupante en de nombreux sites de production.

Afin de pouvoir réaliser la modélisation à l'échelle de l'arrondissement, il a été nécessaire de valider au préalable la modélisation à l'échelle parcellaire. Cette démarche permet de caler les paramètres des modèles par comparaison de leurs résultats avec les profils azotés réels obtenus des sondages des parcelles de référence et avec l'utilisation des historiques culturaux obtenus par les enquêtes. Quatre outils de modélisation ont été utilisés et couplés pour la réalisation de cette étude. Aux pressions azotées agricoles percolant sous la couche racinaire, calculées par le module AgriFlux [Banton et *al.*, 1993] s'ajoutent le flux de nitrates aux endroits urbains (domestiques et industriels) estimé. Les flux de l'eau et de nitrates ainsi obtenus sont intégrés dans le module VS2DT [Healey. 1990] pour simuler les transferts dans la zone non saturée. Enfin, la lame d'eau et les concentrations en nitrates obtenus à la sortie de la zone non saturée, sont introduites dans ModFlow [McDonald, 1988] et MT3D [Zheng, 1990] pour évaluer les concentrations en nitrates dans l'eau de la nappe et des captages.

Evaluation des transferts dans la zone racinaire et infra-racinaire

Azote d'origine agricole

Les résultats obtenus à l'échelle de la parcelle tenant compte des pratiques culturales réelles (rotation culturelle, fertilisation et rendement), des profils du sol et des conditions météoriques, ont été validés par comparaison aux profils azotés réels [Serhal, 2006 ; serhal et *al.*, 2009]. Le passage à l'échelle du bassin versant exige un découpage du domaine en entités homogènes : mailles de 500 m de côté, donnant un total de 6656 mailles. Chaque maille est caractérisée par un profil du sol (épaisseur et type de recouvrement, épaisseur de la zone non saturée de la craie) et une activité agricole. Dans cette dernière, l'estimation des pressions agricoles à l'échelle de l'arrondissement s'est

basée sur les données fournies par le Recensement générale agricole (2000). Il s'agit du type et la superficie des cultures pratiquées dans chaque commune, ainsi que l'élevage. Selon ces données, 78% du territoire est dédié à l'agriculture. Le blé est la culture dominante, occupe 29000 hectares, puis les Superficie Toujours en Herbe (STH) qui vient en deuxième classe et occupe 12500 hectares.

Un scénario de rotation et de fertilisation dans la modélisation des activités agricoles a été choisi. La simulation qui débute en 1950, continue jusqu'en 2020 afin de prévoir l'évolution de la concentration en nitrates dans l'eau de recharge. En respectant la distribution des cultures durant la période de polyculture [1980-2020], la culture du blé a été répétée 20 fois, l'orge 4 fois, les betteraves 6 fois, pois protéagineux 2 fois, le maïs fourrage 4 fois, les légumes 2 fois et les autres cultures 2 fois. L'utilisation des engrais de synthèse débute en 1960, avec une fertilisation excessive entre 1960 et 1980, devenant plus modérée entre 1980 et 1990. A partir de 1990, des pratiques de fertilisation raisonnée sont mises en place.



Figure 4.4. Concentrations calculées en nitrates dans l'eau lessivée sous la zone racinaire Les concentrations en nitrates obtenues à la sortie de la zone racinaire (Figure 5.5) montrent un pic après l'année 1960 qui serait dû au retournement de prairie [Gaury, 1992 ; Boiffin et al., 1974] et au commencement de l'utilisation de l'engrais chimique. La rotation qui débute en 1980, provoque une légère diminution des concentrations en nitrates qui atteignent les minimas lors de la mise en place du programme de fertilisation raisonnée en 1990 (contrôle des quantités d'engrais appliqués).

Les valeurs des concentrations en nitrates et la hauteur d'eau lessivée sous la zone racinaire, sont introduits comme données d'entrées dans le logiciel VS2DT qui sert à poursuivre la simulation du transfert dans la zone infra-racinaire et la zone non-saturée de la craie, pour estimer la concentration en nitrates dans l'eau de recharge de la nappe.

La vitesse de transport verticale des nitrates à travers la zone non saturée varie entre 0.6 et 1.25 m/an. Cette vitesse varie selon la texture du sol et de la précipitation. Dans un premier temps les nitrates ne parviennent à la nappe que dans les secteurs des vallées où les nappes sont sub-affleurantes (Figure. 4.5A). Les surfaces contaminées s'accroissent au fur et à mesure en fonction du temps. A partir des années 1980 – 1990 (Figure. 4.5B), des fortes concentrations arrivent à la nappe.



Figure 4.5. Concentration en nitrates (mgL⁻¹ NO₃) calculée dans l'eau de recharge (A: 1970 et B: 1990).

Estimation des pressions azotées urbaines et industrielles

En se référant à l'étude réalisée par IFEN SCEES [2001], la demande en eau par habitant s'élève à 38 m³/an sur les dix dernières années, soit près de 1041/jour par habitant. A l'horizon 2015, ce ratio n'a pas varié significativement en raison de la prise de conscience concernant le gaspillage de la ressource et les mesures concourant à l'économie des consommations (équipement en appareils ménagers plus économes par exemple).

L'arrondissement de Cambrai bénéficie de 28 unités d'épuration dont les capacités de traitement et les rendements sont très variables. Pour chaque station sont indiqués les communes raccordées, le taux de collecte (le volume réel d'eau usée, domestique et industriel, qui arrive à la station) ainsi que le rendement de la station. Les zones non raccordées au réseau collectif constituent pour chaque commune un ensemble d'émissions ponctuelles proches les unes des autres et qui peuvent être assimilées à une émission diffuse sous les zones urbanisées. L'état général de l'assainissement des collectivités dans le bassin Artois Picardie (DCE, 2004) suggère que 50% des habitants qui ne sont pas ou sont mal raccordés rejettent directement dans les eaux de surface alors que les autres 50% sont desservis par des systèmes d'Assainissement Non Collectif. En s'appuyant sur cette hypothèse, nous avons calculé la quantité de l'azote qui reste dans le sol rejoignant la nappe à travers la zone non saturée. En divisant cette quantité d'azote par la superficie des zones urbanisées on calcule ainsi le flux spécifique d'azote (kg.ha⁻¹.an⁻¹ N) pour chaque commune de l'arrondissement (Figure 4.6). Le flux spécifique d'azote calculé est compris entre 4 kg.ha⁻¹.an⁻¹ N pour les communes possédant à la fois des taux de desserte et de collecte élevés (comme Proville avec un taux de collecte de 58%), et 50 kg.ha⁻¹.an⁻¹ N pour les communes à faible taux de raccordement et à forte densité (population). Les résultats issus de la modélisation dévoilent un flux de nitrates lessivés moyens de 15.2 kg.ha⁻¹.an⁻¹ N sous les parcelles agricoles. Cette valeur est inférieure à celle rencontrée en domaine urbain. Cependant, l'impact de l'agriculture sur les eaux souterraines est plus important en raison de sa superficie (78%) nettement plus élevée que celle des agglomérations (7%).



Figure 4.6. Flux spécifiques des nitrates lessivés dans les secteurs urbanisés.

La quantité de produit azoté rejeté varie d'une activité à l'autre. Les flux les plus importants concernent les secteurs du bois, papier, engrais, produits chimiques, fer et acier, cokeries, cuir, textile et fabrications agro-alimentaires. La station d'épuration de Cambrai collecte les rejets de onze établissements industriels. La plupart sont équipés par des systèmes d'épurations. La quantité d'azote global brut produit par ces établissements est 424 kg.jour⁻¹ de NGL, mais la quantité qui rejoint la station est 88 kg.jour⁻¹ de NGL. La quantité d'azote industriel qui n'est pas collecté par les stations d'épuration et qui rejoint les cours d'eau est estimée à 50 t.an⁻¹ de NGL.

Estimation de taux des nitrates atteignant la nappe et présents dans les captages

La simulation a été réalisée sur la période de 1985 à 2020. Pour les simulations prospectives

(jusqu'à 2020), il a été nécessaire de prendre en compte des années pluviométriques contrastées alternant entre années sèches et très humide. En plus des concentrations initiales en nitrates de l'eau de la nappe (valeurs réelles mesurées dans les captages en 1985), les concentrations ayant transité par la zone non saturée et arrivant à la zone saturée sont introduites dans le module MT3D. Dans une première approche, il n'a été considéré que l'azote d'origine agricole. A ce stade, nous remarquons une bonne concordance à la fois dans les ordres de grandeur et dans le synchronisme des événements dans certains captages, notamment ceux qui ne se situent pas en aval des zones urbanisées. L'influence de l'azote d'origine urbaine apparaît clairement dans les captages situés en aval des agglomérations (Figure 4.7). En tenant compte l'azote d'origine agricole seul, on constate une grande différence. En additionnant les nitrates urbains à ceux d'origine agricole, cette différence s'atténue.



Figure 4.7. Comparaison entre les courbes de concentration mesurées et calculées en tenant compte des pressions azotées agricoles et urbaines.

Bien que l'agglomération de Caudry qui compte 13662 habitants soit desservie par une station d'épuration depuis 1973 dont le taux de collecte de l'azote est de 68%, la concentration en nitrates dans la nappe sous l'agglomération demeure élevée. A tel point qu'un forage situé à 2 km en aval de la commune a été fermé en 1982. Ceci s'explique par l'épaisseur de la zone non saturée, variant entre 25 et 35m, fortement chargée en nitrates qui continuent à migrer vers la nappe. Cette vague d'eau chargée en nitrates influence également les captages de Boussière En Cambrésis, Saint Hilliaire Lez Cambrai et Ramillies situées en aval de cette agglomération.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'évolution prospective des concentrations en nitrates dans la nappe pour les années 2005, 2010, 2015 et 2020, elles sont en amélioration dans la partie nord de la zone d'étude et en dégradation dans la partie sud-ouest.





Figure 4.8. Evolution de la concentration en nitrates d'origine agricole et urbaine dans l'eau de la nappe calculée pour (1995 et 2020).

La mise en place du programme de fertilisation raisonnée et le raccordement aux stations d'épuration de la plupart des communes du Cambrésis, ont fait diminuer la quantité d'azote entrant dans le sol. Mais le temps de transfert des nitrates à travers la zone non saturée de la craie peut atteindre par endroit plus de 75 ans (zone sud-ouest) ; et par conséquent des fortes concentrations en nitrates vont continuer à arriver à la nappe justifiant la dégradation de la qualité de l'eau souterraine dans cette partie de l'arrondissement (Figure 4.8).

Etude d'impact de la minéralisation azotée d'origine domestique et agricole sur l'exploitation d'eau potable de la nappe alluviale à l'Est de l'arrondissement de Cambrai dans le secteur des deux communes de Catillon-sur-Sambre et Rejet-de-Beaulieu

Catillon-sur-Sambre et Rejet-de-Beaulieu sont deux communes situées dans le département du Nord et appartiennent au canton du Cateau-Cambrésis et à l'arrondissement de Cambrai. La superficie de Catillon-sur-Sambre est de 13.4 km², elle se situe géographiquement à une altitude de 149 mètres environ. Celle de Rejet-de-Beaulieu est de 6.3 km² et est caractérisée par une altitude 144 mètres environ. La pente du bassin hydrographique varie de 1 à 4.5%.

La géomorphologie est fortement liée au contexte géologique. En effet, comme le montre la figure 4.9, dans la vallée de la Sambre, la craie séno-turonienne a été érodée et les alluvions sablograveleuses à argileuses reposent sur les marnes du turonien moyen. Seuls des lambeaux de craie du turonien supérieur ont été conservés à l'amont de la vallée et sur les plateaux. Dans ce secteur nous avons pour les coteaux et les plateaux les terrains suivants :

- Une couverture quaternaire de limons qui recouvre les terrains plus anciens du secondaire composés de formations crétacées appartenant au turonien ;

- Craie du turonien supérieur sur le plateau Nord de la route Catillon-La Groise, constituée par une craie franche à gros silex cornus ;

- Marne du turonien moyen au Sud de la route précitée et sur les flancs de la vallée, formé de marnes argileuses, plastiques, imperméables, bleuâtres ou grises, avec trois bancs intercalaires de craie marneuse blanche, lourde et dure.

Dans la vallée on trouve des alluvions récentes composées en tête de limons jaunes argilo-sableux et de sable fin dont l'épaisseur varie de 2.5 m à 4 m et peut atteindre localement 7 à 8 mètres recouvrant des alluvions antérieures plus sableuses, graveleuses et caillouteuses épaisses de 3 à 4 m et pouvant aller jusqu'à 8 à 10 mètres d'épaisseur. Elles reposent directement sur les marnes du turonien moyen. La nappe alluviale présente des débits très différents, faible dans les limons et les alluvions récents et moyens à élevés (25 à 80 m³/h) dans les alluvions anciennes lorsqu'elles sont grossières. Ces dernières sont concentrées essentiellement dans la partie axiale de la vallée de la

Sambre. Le bassin versant souterrain de ces formations correspond sensiblement au bassin versant superficiel, il se développe essentiellement en rive droite de la Sambre où sont implantés tous les ouvrages : F1 Cation-Sur-Sambre, F3 Cation-Sur-Sambre, F4 Rejet-de-Beaulieu à l'exception des F1 et F2 de Rejet-de-Beaulieu.



Figure 4.9. Carte géologique du secteur d'étude.

Modélisation des flux azotés

L'eau de recharge contient naturellement des nitrates, même sans l'utilisation de fertilisants. Ces nitrates proviennent essentiellement de la minéralisation de l'humus et de l'eau de pluie. Les études menées par J. Beckelynck et *al.* en 1982 montrent que dans les régions rurales, l'eau contient 1.34 mg/l d'azote. De même que Foster et *al.* [1982] estiment que l'eau de recharge de la nappe sous les forêts contient 2mg/l d'azote.

Pour la zone racinaire, d'un point de vue agricole, les données concernent le Recensement Général de l'Agriculture (RGA), l'occupation du sol et les rotations culturales. Pour le RGA nous nous sommes appuyés sur le recensement de l'année 2000. Selon ce RGA, le blé est la principale culture dans la région d'étude, elle occupe 42% de la superficie suivie par le maïs fourrage et l'orge escourgeon. Au niveau de l'occupation des sols, une différenciation des zones urbanisées des zones agricoles des deux communes Catillon-sur-Sambre et Rejet-de-Beaulieu a été réalisée. L'identification des zones urbanisée permet d'augmenter les flux de nitrates dans le modèle pour se rapprocher de la réalité du terrain. Ces flux correspondent aux rejets d'eau usée. Ainsi une quantité de 15 a été rajoutée aux forages situés près des zones urbanises à savoir les forages F1 Catillon-sur-Sambre et F1 Rejet-de-Beaulieu.

Quant à la rotation des cultures, durant la période allant de 1980 et 1990, nous avons considéré que les sols étaient cultivés, la fertilisation au cours de ces années était moyenne. Pour la période suivante, comprise entre 1990 et 2005, nous avons suivi les données de l'occupation du sol. L'application des engrais a commencé à diminuer à partir de ces années. Le blé étant la culture dominante, elle intervient dans les 30 rotations culturales qui ont permis la simulation 15 fois, le maïs fourrage 7, l'orge 4, betterave 2, autres céréales 2. La quantité d'engrais appliquée à chaque culture est listée dans le tableau suivant :

Analyse et modélisation hydro-géo-mécamique :	Applications aux processus d'instabilité de terrain et à la	gestion optimisée de la ressource en eau

Tableau 4.1. Quantités d'engrais apportées aux différentes cultures.					
Culture	Périodes	Doses apportées (Kg N/ha)			
DIÁ	1980 – 1990	220			
DIE	1991 – 2010	170			
Maic	1980 – 1990	160			
IVIDIS	1990 – 2010	140			
	1980 – 1990	200			
Orge escourgeon	1990 - 2010	160			
Pottoravos	1980 – 1990	160			
Dellelaves	1990 - 2010	110			

Les concentrations en nitrates dans la zone racinaire ont été calculées pour chaque parcelle. Afin de rendre plus accessible l'introduction des données dans les étapes qui suivent la modélisation (WHI UnSat, ModFlow), une moyenne des concentrations en nitrates issues de la zone racinaire a été calculée pour chaque groupe de parcelle qui entoure les captages. Ainsi sept zones ont été déterminées. Les simulations ont été réalisées pour la période allant de l'année 1980 à l'année 2010. De l'année 1980 à 1990, il a été considéré que toutes les zones agricoles ont été cultivées. De l'année 1990 à 1998 et de 2000 à 2010 nous avons suivi le plan de l'évolution de l'occupation du sol. Quatre zone ont été définies, les concentrations calculées sont illustrées par les figures 4.10 et 4.11.





Figure 4.11. Évolution des concentrations en nitrates dans l'horizon racinaire (zone 3 et 4).

Pour toutes les zones, les concentrations en nitrates de l'année 1980 à l'année 1990 sont assez élevées, sachant que pendant cette période les parcelles ont été considérées comme cultivées et la culture de blé occupe une rotation sur deux. Dans la zone 1 qui représente les terres agricoles entourant le forage F1 Catillon-sur-Sambre, les concentrations atteignent en cette décennie (où l'apport en fertilisant était encore considérable) 120 mg/l. Étant donné la nature argileuse des sols dans ce secteur en devenant sableuse à la base, les nitrates résident et s'accumulent dans cette tranche du sol avant d'être lessivées. De même pour les zones 3 et 4 qui représentent respectivement les terrains qui entourent F4 Rejet-de-Beaulieu et F1 Rejet-de-Beaulieu, les concentrations restent élevées entre 1980 et 1990. Dans les simulations de la zone 4 l'orge escourgeon a été la culture dominante.

La zone2 qui englobe les terrains entourant le forage F3 de la commune Catillon-sur-Sambre montre des concentrations en nitrates dans la zone racinaire beaucoup plus faibles (max 26 mg/l) que dans les autres secteurs. Ce résultat s'explique par la dominance des terrains boisés sur les terrains cultivés. A partir de l'année 1990, les données de l'occupation du sol ont permis de varier les simulations. Ainsi plusieurs parcelles agricoles se sont transformées en prairies ou forêts ce qui explique la chute des concentrations en nitrates dans leur évolution sur les figures ci-dessus. Dans la zone 1, les concentrations ont chuté de 120mg/l à 30mg/l. On constate néanmoins, une légère augmentation entre 1999 et 2002 années où les précipitations ont été abondantes et par conséquent une recharge en nitrates. Après 2000 là où les pratiques culturales ont repris, on constate une nouvelle augmentation des concentrations en nitrates mais avec des valeurs inférieures par rapport aux années 1980-1990 et cela est probablement dû, à l'application de la politique de l'agriculture raisonnée !

Le flux azoté issu de la zone racinaire a permis de simuler les concentrations dans la zone non saturée. Pour ce faire, nous avons déterminé dans un premier temps, l'épaisseur au niveau spatial de ce second horizon. Cette épaisseur joue un rôle important dans la détermination du temps de transfert des nitrates vers la nappe. Au-delà de l'épaisseur, le modèle (WHI UnSat) a été établi en intégrant les paramètres physiques et hydrauliques des différentes couches qui constituent cette horizon ainsi que les précipitations qui déterminent les flux (les mêmes que celles intégrées dans AgriFlux). La figure 5.12 montre la répartition des concentrations dans la zone non saturée à différents pas de temps.

Dès la première simulation, correspondant à l'année 1980, les nitrates atteignent très rapidement la base de la zone non saturée dans le secteur de Bazuel et F1 Rejet-de-Beaulieu. Dans le premier secteur (Bazuel), l'épaisseur de la couche non saturée est faible (5m), les nitrates traversent donc rapidement cette épaisseur. Dans le second secteur (F1 Rejet-de-Beaulieu), bien que l'épaisseur de la zone non saturée soit plus élevée les concentrations en nitrates atteignent 17 mg/l. Cela est dû à la nature de la zone non saturée et au type de culture considéré dans la simulation (dominance de blé et orge escourgeon). Bien que nous ayons considéré en cette période que les parcelles étaient cultivées dans toute la région d'étude, les concentrations en nitrates restent faibles avec un maximum de 17mg/l. Les simulations pour l'année 1985 indiquent que les concentrations augmentent considérablement dans toute la région d'étude et atteignent un maximum de 68 mg/l dans le secteur de F1 Catillon-sur-Sambre et La Groise. Le minimum qui est de 17mg/l est localisé à Mazinghien alors qu'il était, en 1980 dans le même secteur, de 9 mg/l. A partir de l'année 1990 et grâce aux informations de l'évolution de l'occupation du sol de 1990-1998, les prairies ont été incluses dans les simulations. En effet, plusieurs parcelles agricoles se sont transformées en prairies d'où la diminution des concentrations en nitrates telles que dans le secteur de F3 Catillon-sur-Sambre où les concentrations sont passées de 24 mg/l en 1985 à 19 mg/l en 1990 et de 67 mg/l à 43 mg/l (maximum) dans le secteur F1 Catillon-sur-Sambre. En 1995 les concentrations continuent à baisser pour atteindre un maximum de 28 mg/l. Cela est, non seulement dû à la présence des prairies, mais aussi à la baisse des quantités des fertilisants appliqués à partir de cette année. L'évolution de l'occupation du sol entre 2000-2005 indigue un retour aux cultures et on constate qu'à partir de l'année 2000, les concentrations augmentent progressivement de nouveau dans toute la région d'étude pour atteindre en 2010 un maximum de 66 mg/l dans le secteur de F1 Catillon-sur-Sambre. Malgré la fertilisation raisonnée, le retour aux cultures entraîne une augmentation de la concentration en nitrates.



Figure 4.12. Répartition spatiale et temporelle des concentrations en nitrates dans la zone non saturée.

Les concentrations en nitrates obtenues par les simulations dans la zone non saturée ont été introduites dans le modèle MT3D en tant que recharge pour modéliser les concentrations en nitrate dans la nappe. La modélisation hydrodispersive s'est basée sur le calage du paramètre de dispersion qui a été considéré de l'ordre de 20 m. Les résultats issus de cette modélisation montrent une assez bonne répartition des concentrations en nitrates mesurées dans la nappe (Figure 4.13).



Figure 4.13. Comparaison des concentrations en nitrates mesurées et calculées dans la nappe (F1 Catillon-Sur-Sambre).

Prévisions

Deux scénarios de prévision des concentrations en nitrates ont été envisagés, de l'année 2015 à l'année 2035:

- Le premier scenario consiste à estimer les concentrations du sol vers la nappe en considérant que toute la région d'étude est cultivée pendant les 20 ans de simulation.
- Dans le deuxième scenario, aucune culture n'a été considérée, juste les apports en azote nécessaires aux prairies ont été introduits comme données.

Les résultats des simulations dans la zone non saturée illustrés dans la figure 4.14 montrent que dans le scenario I, la concentration des nitrates augmente continuellement. Dans ce scenario de prévision, le rôle de l'épaisseur de la zone non saturée, la nature de la formation sont une fois de plus mis en évidence. Dans les secteurs ou l'épaisseur est faible, les concentrations non seulement augmentent mais sont élevées. Elles passent de 79 mg/l en 2015 à 92 mg/l en 2035.



Figure 4.14. Évolution des concentrations en nitrates dans la zone non saturée selon les scénarios de prévisions.

Dans le scenario II, les concentrations en nitrates restent basses à l'exception du secteur du captage F1 Catillon-sur-Sambre, cela est probablement dû à la nature du sol de la zone non saturée. Dans tout le secteur d'étude les concentrations se stabilisent avant de baisser pour atteindre 10mg/l en 2035. Les concentrations en nitrates qui atteignent la nappe, dans le cas d'une culture intense sont très élevées par rapport à l'état actuel où certaines parcelles sont cultivées et d'autres restent sous prairies. Dans le cas de la simulation selon le scénario I, les concentrations passent d'une valeur maximale de 32mg/l (F4 Rejet-de-Beaulieu) à 48.48 mg/l. C'est le cas également pour les autres forages. Les concentrations les plus élevées caractérisent le forage F1 Catillon-sur-Sambre où les valeurs passent de 50 mg/l en cultures variée à 85.21 mg/l (Figure 4.15). En revanche, les simulations selon le scénario II les concentrations dans la nappe chutent considérablement et atteignent au maximum 15 mg/l.



Figure 4.15. Évolution des concentrations en nitrates dans la zone saturée selon les scénarios de prévisions.

Le cas de mise en culture du forage F1 Catillon-sur-Sambre, qui donne des valeurs dépassant le seuil de potabilité en raison du transfert rapide des flux azotés, a fait l'objet d'une étude singulière en prenant en compte différentes cultures. Ainsi, des simulations supplémentaires on été réalisées sur ce captage en ne considérant qu'une seule culture, celle des betteraves qui ne demande pas une grande quantité d'azote. Les résultats des concentrations en nitrates obtenus (Figure 4.16) au niveau de la nappe sont proches du seuil de potabilité (50 mg/l). En combinant ce cas de figure à la transformation en prairie au bout de 20 ans, le forage retrouve des concentrations proches du seuil de potabilité.



Figure 4.16. Évolution des concentrations en nitrates dans la zone non saturée et dans la nappe. A gauche : utilisation des cultures de betteraves, A droite : utilisation des alternances betteraves-prairies.

Pour atteindre des valeurs inférieures à ce seuil, nous avons effectué des simulations complémentaires en considérant des alternances annuelles betteraves-prairie. Les résultats obtenus (Figure 4.17) montrent des concentrations, cette fois-ci, constamment inférieures au seuil de potabilité mais elles restent assez proches.
Prédiction spatial des concentrations en nitrates dans la nappe de la craie de Béthune : Couplage réseaux de neurones artificiels et SIG

La zone étudiée se situe au sein du département de Pas de Calais (Figure 4.18). D'un point de vue géologique, la partie nord est constituée de terrains du Cénozoïque représentés du haut vers le bas, par les sables d'Ostricourt d'une épaisseur moyenne de 10 à 15m et par les argiles de Louvil d'une épaisseur comprise entre 10 à 15m. Les terrains du Mésozoïque sont composés par la craie du Sénonien d'une épaisseur de l'ordre de 50m qui surmonte la craie du Turonien supérieur. Cette dernière a une épaisseur moyenne d'une dizaine de mètres. Les différentes couches géologiques présentent un pendage général vers le Nord. Les formations crayeuses sont couvertes par une épaisseur croissante de formations tertiaires sableuses et argileuses en proportion variable et qui confère une protection à la nappe de la craie (régime captif). L'existence d'un phénomène de dénitrification sous cette couverture, en milieu anaérobie, contribue à la protection de la ressource en eau potable vis-à-vis des pollutions azotées.



Figure 4.18. Localisation géographique de la zone d'étude. Prédiction spatiale de la concentration en nitrates dans les eaux souterraines

Le travail a consisté à l'utilisation conjointe du RNA et du SIG, comparé et validée par un modèle de transport (MT3D), pour la prédiction spatiale de la pollution en nitrates des eaux souterraines de la nappe de la craie à Béthune (Figure 4.19).



Figure 4.19. Méthodologie suivie.

Ainsi, le modèle de réseau de neurones artificiels [Najjar et *al., 1997*; Al-Barqawi and Zayed, *2006*] a été implémenté. Selon la localisation géographique de la nappe, trois zones ont été définies : une zone où la nappe est captive, une zone où elle est libre (concentration supérieure à la concentration maximale admissible de 50 mg/l) et une troisième zone à la limite de la captivité. Les échantillons provenant de 14 piézomètres ont été analysés sur 5 ans (de 1999 à 2003). Les vecteurs de sorties de RNA ont été exportés vers le logiciel de ArcGIS 9.3.1. Les cartes de concentrations en nitrates ont été créées, tout d'abord, pour les années antérieures (2003 et 2004) afin de comparer les concentrations prédites et mesurées. Ensuite le SIG a été utilisé dans la préparation et le traitement des données de sorties du RNA et dans la construction des cartes spatiales prospectives, en l'occurrence l'année 2025. Par la suite, un modèle numérique hydrodispersif a été créé avec le code MT3D, en s'appuyant sur les données de concentrations provenant des mêmes piézomètres. Les sorties du modèle ont été exportées vers ArcGIS et les cartes des concentrations en nitrates élaborées ont fait l'objet d'une comparaison celles issues du modèle RNA afin de valider ce dernier. Pour élaborer ces modèles plusieurs paramètres ont été nécessaires (Tableau 4.2).

	Paramètres d'entrée (X)						
X1	X (m)						
X2	X2 Y (m)						
X3 Temps (second)							
X4	Type de l'aquifère (captive, libre ou limite de captivité)						
X5	Recharge (mm/an)						
	Classe selon la concentration de nitrate :						
V4	Classe 1= 0 (la concentration = 0- 2 mg/l)						
ΛŬ	Classe 2= 0 (la concentration = 2- 15mg/l)						
	Classe 3= 0 (la concentration = 15- 100 mg/l)						

Le tableau 4.2. Données utilisées dans le modèle RN	A.
---	----

Les paramètres épaisseur de la zone non saturée et la recharge en nitrates sont pris en compte implicitement dans le temps entre l'année 1999 et 2003. Les données disponibles ont été divisées en trois lots distincts. Le premier lot (52 %) sert à entraîner le réseau de neurone (L'apprentissage). Dans cette phase les paramètres de connexion du réseau sont déterminés à l'aide d'une technique d'optimisation. Le deuxième lot (24 %) sert à la phase de test qui consiste à vérifier le réseau déterminé lors de la phase d'apprentissage sur des données non utilisées lors de cette dernière. La phase de validation est effectuée sur le dernier lot de données (24 %). A travers les résultats obtenus, le modèle a une bonne performance avec un ratio de régression de 0.1067769. Le coefficient de corrélation est supérieur à 99% pour l'entraînement, 99% pour la vérification et 99% pour le test, ce qui montre un bon accord entre les concentrations en nitrates mesurées et celles prédites (Figure 4.20).



Figure 4.20. Régression linéaire entre la concentration mesurée et calculée par le modèle RNA.

Les cartes de concentrations en nitrates mesurées ont été élaborées selon la méthode du krigeage ordinaire [Cressie, 1986 et 1990], tout d'abord pour des années antérieures comme l'année 2003 et 2004, puis comparées avec les concentrations prédites selon le modèle RNA et le modèle hydrodispersif à titre de validation. On constate une certaine ressemblance entre les cartes de concentrations mesurées et calculées par le RNA et le MT3D pour les années 2003 et 2004. La fourchette des valeurs des concentrations réelles mesurées dans les forages d'observations évolue entre 0 et 83 mg/l en 2003 à 91.7 mg/l en 2004. La concentration en nitrates calculée en 2003 par le RNA couvre une fourchette de valeurs surestimées entre 0 et 86 mg/l, alors que le modèle le MT3D a donné des valeurs sous-estimées entre 0 et 80 mg/l. Par contre, les concentrations en nitrates calculées en 2004 par le modèle RNA et par le modèle MT3D sont toutes les deux sous-estimées (Figure 5.20). Le calcul de la différence entre les concentrations observées et calculées donne une valeur évoluant entre -3.67 et 1.24 pour le modèle RNA₂₀₀₃ et entre -10.8 et 6.51 pour RNA₂₀₀₄. Par contre le modèle MT3D donne des valeurs plus élevées en différence, par exemple pour MT3D₂₀₀₃ varie entre -11.5 et 17.9 et entre -9.91et 16.9 pour MT3D₂₀₀₄. Les cartes de répartition de la concentration en nitrates obtenues par le modèle de RNA sont plus proches des cartes des concentrations mesurées. La différence maximum entre les concentrations mesurées et calculées par RNA₂₀₀₃ est de 3.67 mg/l et de 10.8 mg/l pour RNA₂₀₀₄. Cette différence maximum est localisée dans les zones où l'on ne dispose pas suffisamment d'échantillons de mesure.





Figure 4.21. Comparaison de la concentration en nitrates (mg/l) mesurée et prédite selon le modèle (RNA et MT3D) pour les années 2003 et 2004.

Deux scénarii ont été considérés pour prédire la concentration en nitrates pour l'année RNA₂₀₂₅ en se basant sur l'impact de la recharge. Dans le premier scénario, on a supposé une année 2025 déficitaire avec une recharge de 150 mm/an et dans le second, l'année est supposée pluvieuse, avec une recharge de 500 mm/an. Les résultats sont illustrés par une distribution spatiale de la concentration en nitrates selon trois domaines. Le premier domaine correspond à une concentration en nitrates comprise entre 0 et 15 mg/l, le second entre 16 et 50 mg/l et le dernier à plus de 50 mg/l. La lecture de ces cartes montre que la recharge joue un rôle majeur dans la distribution spatiale de la concentration en nitrates. En effet, la limite autorisée pour l'eau potable (50 mg/l ; Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001) va progresser vers le nord en cas de faible précipitations (Figure 4.22). Cela s'explique par l'abaissement du niveau de l'eau souterraine et en conséquence, une partie de l'aquifère passe d'un état captif à libre. En fonction de ces résultats, nous délimitons ainsi une zone dont l'exploitation de la nappe dans des conditions réglementaires, dépend uniquement de la recharge (Figure 4.23).



Figure 4.22. Comparaison de la distribution spatiale de la concentration prévisionnelle en nitrates (mg/l) selon le modèle RNA pour l'année 2025 en fonction de la pluviométrie.



Figure 4.23. Zone sensible aux nitrates en fonction des conditions pluviométriques.

Conclusion

Les recherches menées dans ce chapitre sur la pollution azotée dans différents sites du bassin Artois Picardie, à travers une méthodologie basée sur des modèles numériques intégrés et statistiques en y intégrant les SIG, ont permis d'évaluer l'impact des activités de surface sur la qualité de la nappe de la craie. Cette démarche a permis de prédire l'évolution de la pollution selon divers scénarii qui mettent en jeu les facteurs tels que : la pluviométrie ou la recharge, l'activité agricole et les cultures utilisées ou encore l'amélioration de la gestion des eaux usées.

A l'échelle de l'arrondissement de Cambrai ont été quantifié et modélisé l'impact de l'azote urbain et agricole sur les eaux souterraines. Le modèle mis en place intègre trois modèles spécifiques à chaque horizon : AgriFlux pour la zone racinaire, WHI UnSat pour la zone non saturée et ModFlow et MT3D pour la zone saturée. Les résultats obtenus montrent que les concentrations moyennes en nitrates d'origine agricole dans l'eau lessivée sont étroitement liées aux pratiques culturales. Elles étaient de l'ordre de 80 mgL⁻¹ avant les années 1990, date de début de programme fertilisation raisonnée, pour atteindre des concentrations voisines de 30 mgL⁻¹ après la mise en place de ce programme. Les superficies touchées par les pollutions diffuses d'origine agricole sont plus importantes que celles touchées par les pollutions d'origine urbaine. Ceci est lié au pourcentage élevé (78%) qu'occupe la surface agricole utilisée par rapport à celle des agglomérations (7%). Par contre, ces dernières engendrent des pollutions de plus fortes concentrations pouvant atteindre 95 mgL⁻¹ de NO₃. Toutefois, le flux d'azote lessivé sous les agglomérations, obtenu à partir de l'état actuel de l'assainissement, est estimé à 115 t.an⁻¹ de NGL. Alors que sous les parcelles agricoles, après la mise en place du programme de fertilisation raisonnée, ce flux est de 1000 t.an⁻¹ (10 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de N sous les parcelles de pâturage et 15.2 kg.ha⁻¹.an⁻¹ de N sous les parcelles de rotation). On en déduit donc que seulement environ 11% de l'azote qui rejoint la nappe est d'origine urbaine et environ 89% d'origine agricole. Dans la partie Nord de la zone d'étude, la nappe n'étant pas trop profonde, l'épaisseur de la zone non saturée varie entre 0 et 30 m. Le temps nécessaire pour que les nitrates puissent parcourir cette épaisseur varie entre 0 et 45 ans, donc la modification des pratiques agricoles et de fertilisation et l'installation des stations d'épuration, provoquent, à moyen terme, une modification dans la qualité d'eau de recharge. D'après les mesures réelles et la modélisation, la tendance de la qualité d'eau est vers l'amélioration. Les fortes concentrations provoquées par les surfertilisations appliquées avant les années 90 sont déjà en parties éliminées. Par contre dans la partie Sud-Ouest, la nappe étant très profonde, l'épaisseur de la zone non-saturée atteignant plus de 70 m

dans certaines zones, le temps de transfert des nitrates peut dépasser 75 ans. Les fortes concentrations en nitrates dues aux sur-fertilisations, n'ont pas encore traversé la zone non saturée. De l'eau chargée en nitrates va continuer à arriver dans la nappe, ce qui va provoquer une dégradation de la qualité de l'eau de la nappe de cette zone.

En complément à cette étude, nous avons appliqué le même modèle intégré au secteur situé à l'Est de l'arrondissement de Cambrai. Un des résultats majeur de ce travail a été la confirmation de l'impact du programme de la fertilisation raisonnée depuis sa mise en place. Ainsi une chute considérable des concentrations moyennes en nitrates atteignant la base de la zone non saturée a été vérifiée. Ces concentrations sont passées de 68 mg/l en 1985 à 30 mg/l en 2010, à l'exception du secteur du forage F1 Catillon-sur-Sambre, marqué par une épaisseur de la zone non saturée faible, où même en 2010 la concentration reste élevée. Les concentrations en nitrates dans la nappe fluctuent fortement mais ne dépassent pas les 40 mg/l dans les forages F3 Catillon-sur-Sambre F1 et F4 Rejet-de-Beaulieu. Le forage F1 Catillon-sur-Sambre présente encore une fois de fortes concentrations en nitrates qui atteignent 55 mg/l. Deux scenarii ont été envisagés avec toutes les zones cultivable et sans culture. Il en ressort de cette simulation prévisionnelle de fortes concentrations dans la nappe dans le cas du premier scénario. Par contre, lorsque les parcelles ne sont pas cultivées au contraire, les concentrations en nitrates dans la nappe restent très basses. Il en découle donc, que les concentrations en nitrates dans la nappe sont étroitement liées aux pratiques culturales ainsi qu'à la quantité d'engrais utilisée et à un degré moindre aux caractéristiques du sol (nature du sol et épaisseur de la zone non saturée). Il est recommandé pour garder une eau de qualité ne dépassant pas les 50mg/l en nitrates une gestion raisonnée accompagnée de rotations de cultures et de transformations en prairie. Ainsi pour les secteurs des forages F3 Catillon-sur-Sambre, F1 et F4 Rejet-de-Beaulieu, une transformation en prairie s'impose tous les 20 ans sans exigence sur les rotations de cultures. Par contre, le forage F1 Catillon-sur-Sambre, compte tenu de sa sensibilité à l'apport en nitrates par les cultures, il est nécessaire d'utiliser les cultures produisant le moins de flux azotés de type betteraves. Cela devrait s'accompagner de transformations en prairie dans des durées inférieures que précédemment, à savoir 15 ans. Pour s'assurer de la pérennité de l'exploitation de ce forage une alternance betterave-prairie annuelle s'impose également. D'autres scénarios peuvent être utilisés pour retrouver les conditions adéquates pour exploiter convenablement le forage F1 Catillon-sur-Sambre sans se restreindre à la seule culture de betteraves. Parmi ces solutions figure une répartition spatiale différenciée des diverses cultures.

Pour prédire la distribution spatiale de la concentration en nitrates du secteur de Béthune, où l'aquifère est en partie captif et en partie libre, le modèle de réseau de neurone artificiel a été utilisé comme un outil de prédiction pour l'exploration et la modélisation des concentrations en nitrates en fonction du temps. Les SIG constituent un moyen de visualisation des données très performant, ce qui améliore la compréhension et en conséquence la prise de bonnes décisions en matière de gestion de l'eau souterraine. Une simple combinaison du RNA-SIG validée par un modèle numérique hydrodispersif a été précieuse pour la prédiction et la gestion de la pollution par les nitrates des eaux souterraines. Le modèle a permis de prédire l'évolution spatiale des concentrations en nitrates pour l'année 2025 selon une recharge défavorable (150 mm/an) ou favorable (500 mm/an). En raison, de battement de la nappe et le changement d'état qui s'en suit, il apparait une zone qui peut être exploitée si l'année 2025 est pluvieuse alors que cette zone n'est pas exploitable si la recharge est faible. Les cartes réalisées constituent un outil d'aide à la décision en matière de gestion durable de la ressource en eau souterraine.

- Al-Barqawi, H., and Zayed, T. 2006. Condition Rating Model for Underground Infrastructure Sustainable Water Mains. Journal of Performance of Constructed Facilities 20, 126-135.
- Banton, O., Larocque, M. Surateau, F. et Villeneuve, J.P., 1993. AgriFlux Logiciel d'évaluation des pertes en composés azotés vers les eaux souterraines et superficielles. INRS-Eau. (Rapport de recherche No. R-380). Québec, Canada. 144p.
- Beckelynck J., L'Hopitault JC. et Philippo, A. 1982. Étude de l'influence de la pollution atmosphérique sur les eaux de pluie. Rapport pour la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche du Nord-Pas-de-Calais par le BRGM, 82 SGN 1001 NPC, 23p.
- Boiffin, J. et Fleury, A. 1974. Quelques conséquences agronomiques de retournements de prairies permanentes. Annales Agronomiques, 25, 4, 555-575.
- Cressie, N. 1986. Kriging nonstationary data. Journal of the American Statistical Association, v81, 395, 625-634.
- Cressie, N. 1990. The origins of kriging. Mathematical Geology, vol. 22, 3, 239-252.
- Darwishe, H. 2011. Contribution des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) à la gestion et à l'aide à la décision : approche pluridisciplinaire pour l'évaluation des aspects à risques dans le nord de la France site d'application. Thèse, Université de Lille 1, France. 182p.
- El Khattabi, J. 2011. Modélisation de la migration des nitrates dans la nappe alluviale du bassin versant des captages de Catillon-sur-Sambre (Nord de la France), Rapport scientifique pour Noréade et l'Agence de l'eau Artois Picardie, 28p.
- Foster, SSD., Cripps, AC. and Smith-Carington, A. 1982. Nitrate leaching to groundwater. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences, 296, 477–489.
- Gaury, F. 1992. Systèmes de culture et teneurs en nitrates des eaux souterraines. Dynamique passée et actuelle, en région de polyculture – élevage sur le périmètre d'un gîte hydrominéral. Thèse ENSA Rennes, France. 229p.
- Healey, RW. 1990. Simulation of solute transport in variably saturated porous media with supplemental information on modifications to the US Geological Survey computer program VS2D. Water resource investigations report 90 4025. Denver, Colorado, USA.
- IFEN SCEES. 2001. Enquête : Eau potable, réalisée par l'institut français de l'environnement (Ifen), le service central des enquêtes et des études statistiques du Ministère de l'agriculture et de la pêche (Scees), en partenariat avec les Agences de l'eau permet de souligner les inégalités géographiques, démographiques et structurelles existantes s'agissant du prix de l'eau.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A. W. 1988. MODFLOW, a modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Technique of Water resources Investigations of the U.S. Geological Survey, Book 6, 586p.
- Najjar, YM., Basheer, IA. and Hajmeer, M. N. 1997. Computational neural networks for predictive microbiology: I. Methodology. International Journal of food microbiology 34, 27-49.
- Porel, G. 1988. Transfert de soluté en aquifère crayeux: causes de modifications des résultats de traçages.
- Serhal, H. 2006. Influence des pressions anthropiques sur l'évolution des concentrations en nitrates dans la nappe de la craie du Nord de la France. (Applications au Cambrésis et nord Audomarois). Thèse Université Lille 1, France. 200p.
- Serhal, H. Bernard, D., El Khattabi, J., Bastin-Lacherez, S. and Shahrour, I. 2009. Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer, Northern France. Environmental geology, 57-7, 1579-1592.
- Zheng, CC. 1990. MT3D, a modular three-dimensional transport model. S.S. Report to the U.S. Environmental Protection Agency. Papadhópoulos and Associates, Inc., Rockville, Maryland. 170p.

Chapitre 5. Modalités et processus de la contamination naturelle de la nappe de la craie par les métaux.

Introduction

La pollution géogénique (c'est-à-dire d'origine naturelle) des sols, des sédiments et des eaux constitue un enjeu majeur. Certains sols ou sédiments, localisés dans des contextes géographiques particuliers, affichent des concentrations naturelles élevées en arsenic, antimoine, fluor, nickel ou sélénium, bien supérieures aux normes sanitaires définies au niveau mondial ou européen. Ces concentrations se diffusent progressivement et peuvent affecter l'eau qui transite dans ces sous-sols. De nombreux aquifères sont ainsi naturellement impropres à la production d'eau potable. Aujourd'hui, les moyens de détection sont de plus en plus fiables et les réglementations permettent d'accroître la connaissance du problème. En Europe, le renforcement des normes sur l'eau potable en 1998 (directive 98/83/CE) et la directive cadre sur l'eau (DCE) en 2006 ont conduit à développer des moyens scientifiques d'évaluation de l'eau et à accroître les connaissances des sous-sols (origine de chaque élément, distinction apports anthropiques/apports géogéniques...). Dans ce cadre, j'ai mené des travaux qui concernent l'impact de la pollution géogénique de la nappe de la craie du Nord de la France. Le premier travail a été réalisé dans le cadre de la thèse d'Emelie Lefèvre [2006] et il a intéressé trois sites de la région situés au sein du bassin minier margués par la contamination en nickel. Il s'agit de Wingles, Hulluch, Houplin-Ancoisne et Flers-en-Escrebieux. Dans les terrains étudiés, le nickel peut être présent dans les tourbes, les argiles confinant la nappe de la craie. On le retrouve également incrusté dans des nodules de marcassite (pyrite blanche) dans les formations crayeuses cénomaniennes.

Le second travail réalisé dans le cadre de la thèse de Hind Benabderraziq [2014] avait comme objectif de déterminer les origines du sélénium en solution dans la nappe de la craie exploitée dans le Sud de Lille en mettant en place une stratégie de contrôle de la présence du sélénium dans l'eau exploitée. Une méthodologie intégrant l'ensemble des aspects de l'origine naturelle et anthropique du sélénium et la détermination des mécanismes hydrauliques et des processus chimiques contrôlant la mobilisation de l'élément. Le sélénium est un élément peu abondant mais il est ubiquitaire [Winkel et *al.*, 2011] avec quatre états d'oxydation : séléniure (Se²⁻), Se élémentaire (Se⁰), sélénite (Se⁴⁺) et séléniate (Se⁶⁺), ainsi que plusieurs composés organiques, dans tous les compartiments de l'écosystème. Cet antioxydant, fait partie des oligo-éléments qui est essentiel pour la fonction cellulaire dans la vie végétale et animale. Toutefois, un équilibre fragile doit être maintenu, car à de fortes concentrations, il devient toxique; ce qui lui confère un caractère double en fonction de sa concentration.

Les contaminations récurrentes au Se justifient les exigences de l'OMS et celles de la Directive Cadre Européenne (98/83/CE) relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine définissant une limite de qualité fixée à 10 µg.l⁻¹. Cette concentration est reprise dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, en France.

Origine et évolution du Nickel en solution de la nappe de la craie

Les eaux souterraines captées au droit des sites d'étude présentent des dépassements de la norme de potabilité en nickel atteignant parfois les 100 µg/l. Pour chaque champ captant, le régime naturel de la nappe de la craie est captif sous un recouvrement d'argiles tertiaires et d'alluvions quaternaires. Cependant, l'exploitation de ces champs captants peut conduire en certaines périodes à l'abaissement du niveau piézométrique sous le toit de la craie et ainsi à la disparition provisoire du régime captif, provoquant une modification brutale des conditions d'oxydoréduction du milieu.

Le champ captant d'Houplin-Ancoisne (Figure 6.1) se situe dans une vallée recouverte de dépôts quaternaires dans laquelle a été aménagé l'embranchement du canal de Seclin. Les écoulements souterrains s'alignent dans l'axe de la vallée de direction Nord-Ouest – Sud Est. Au Sud-Ouest se place un important champ captant induisant une dépression piézométrique susceptible d'accroître les relations canal-nappe. Le long de ce champ captant, on constate une diminution des teneurs en *80*

nitrates qui pourrait résulter à la fois d'une dénitrification et d'une dilution de la nappe de la craie avec des eaux de la nappe alluviale [Simon, 1986].

Concernant le champ captant de Flers-en-Escrebieux (Figure 6.1), il se situe en limite de captivité de la nappe de la craie. Le bassin d'alimentation est bien protégé dans la partie Est par un recouvrement argileux (limon ou Tertiaire), ce qui entraîne une alimentation de l'Ouest, secteur où la nappe est libre et donc sensible aux pollutions. Le long de l'Escrebieux plusieurs zones d'infiltration ont été mises en évidence, et la part d'alimentation provenant des cours d'eau n'est pas négligeable en régime de très basses eaux [Talbot et Tillie, 1979]. Au droit des points d'échantillonnage, le niveau piézométrique se situe globalement dans les alluvions tourbeuses qui recouvrent des terrains argileux tertiaires. Le passage en captivité de la nappe s'accompagne d'un phénomène naturel de dénitrification [Simon, 1986].

Sur le site de Pecquencourt (Figure 5.1), aucune trace de nitrates n'est détectée. Cette absence de nitrates au droit de ce site est la conséquence d'un phénomène de dénitrification s'opérant bien en amont du secteur d'étude.



Figure 5.1. Zones de recouvrement de la craie d'après les cartes géologiques du BRGM au 1/25000ème de Douai et Carvin et coupes géologiques schématiques des sites.

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées dans 18 forages. Dans le secteur de Flers-en-Escrebieux, les deux campagnes ont eu lieu en Juillet et Novembre, entre lesquelles la nappe a subi une baisse de 2 mètres environ. Sur les deux autres sites, un changement de la répartition des pompages sur les forages a été opéré entre les deux campagnes d'échantillonnage. A Pecquencourt, les prélèvements ont été réalisés en Mai, tout d'abord pendant les pompages à plein régime puis après quatre jours de pompage à plus faible débit qui a permis une remontée de la côte piézométrique de quelques mètres. Enfin, à Houplin-Ancoisne, la première campagne a eu lieu après une réduction de la production du champ captant d'une durée de 4 jours ; alors que la deuxième a été réalisée 3 jours après la reprise de la production à plein régime.

Les paramètres mesurés in situ sont : $I'O_2$ dissous, le potentiel d'oxydoréduction (Eh), le pH, la température (T°) et la conductivité (Cd). Pour les éléments majeurs, les analyses ont portés sur les nitrites (NO₂⁻), les nitrates (NO₃⁻), l'ammonium (NH₄⁺) et les sulfates (SO₄²⁻). Les autres analyses concernent le Carbone Organique Total (C.O.T.) et les métaux (fer, nickel, manganèse et cobalt).

Causes de la mobilisation et origine du Nickel

La présence de pyrite est fréquente dans des niveaux alluvionnaires, tourbeux, argileux de tertiaires et crayeux secondaires. Son oxydation induit l'augmentation des teneurs en sulfates et en métaux traces dans les aquifères. A l'état naturel, ce phénomène se rencontre fréquemment lors du passage en captivité de la nappe où initialement la nappe libre constitue un flux d'éléments oxydants (notamment les nitrates) vers le milieu captif réducteur. La pyrite intervient comme échangeur d'électrons dans la réaction globale de dénitrification (Eq. 1) suivante [Mariotti, 1994].

$$FeS_2 + 14 NO_3^- + 4 H^+ \rightarrow 7 N_2(g) + 10 SO_4^{2-} + 5 Fe^{2+} + 2 H_2O$$
 (1)

Dans la partie oxydante le fer ferreux est instable en solution et précipite sous forme d'oxyde ou d'hydroxyde. En présence de teneurs élevées en nitrates, il peut aussi réduire les nitrates selon la réaction globale [Strebel et *al.*, 1990 ; Kölle et *al.*, 1990].

5 Fe²⁺ + NO₃⁻ + 7 H₂O → 5 FeOOH +
$$\frac{1}{2}$$
 N₂(g) + 9 H⁺ (2)

Par ailleurs, l'oxydation de la pyrite peut également intervenir en présence d'oxygène moléculaire. L'oxydation a alors lieu suivant la réaction globale [Kamei, 2000],

$$FeS_{2} + 15/4 O_{2} + 7/2 H_{2}O \rightarrow Fe(OH)_{3 (s)} 2 SO_{4}^{2-} + 4H^{+}$$
(3)

Les travaux de Kamei et *al.*, [2000] indiquent que l'équilibre en solution n'est pas atteint entre les espèces $O_2(d)$, SO_4^{2-} et les produits de réaction. En milieu carbonaté, la libération de protons provoquée par cette réaction sera tamponnée par dissolution de carbonates. Les travaux de Descotes [2001] montrent qu'en milieu alcalin, la faible solubilité du fer entraîne la disparition du fer sous forme aqueuse au-delà de pH = 6 au profit de la sidérite (FeCO3) et de la goethite (FeOOH). Seuls les ions sulfates sont encore en solution. En milieu plus alcalin, le fer est complexé à la fois par les carbonates et les hydroxydes et reste sous forme aqueuse. Ces observations nous permettent de reconnaître par la suite, les conditions du milieu pour chaque site et d'en déduire le phénomène mis en jeu et son influence sur la libération de nickel dans les eaux.

Lors du passage en captivité de la nappe, les espèces oxydantes sont progressivement réduites dans le sens de mise en captivité [Blum, 2002]. Tandis que l'oxygène disparaît du milieu, les microorganismes présents utilisent les différents accepteurs d'électrons selon la séquence suivante : $O_2(d)$, NO_3^- , Mn^{2+} , Fe^{2+} , SO_4^{2-} et CO_2 . Dans la solution, il reste difficile de discerner ces différentes étapes simplement à l'aide du potentiel rédox [Stumm et Morgan, 1981]. Néanmoins la présence d'espèces plus ou moins oxydantes ou réductrices permet d'évaluer les conditions du milieu [Washington et *al.*, 2004]. Globalement, on peut représenter le gradient rédox par la succession de trois états d'oxydoréduction différents [Champ et *al.*, 1979 ; Groffman et *al.*, 1999] :

- Zone oxydante où les oxyanions O₂ et NO₃⁻ sont les éléments mobiles et le fer et le manganèse restent immobiles sous forme hydroxyde.
- Zone réductrice Fe-Mn où les métaux passent sous forme ionique soluble suite à la consommation des espèces oxydantes. Certains métaux de transition comme Ni, Co, Cu, Zn peuvent également apparaître en solution.
- **Zone très réductrice** où le soufre passe sous forme **sulfures.** Les métaux précipitent alors sous forme de sulfures insolubles.

L'analyse de la répartition des différentes espèces indique que les forages F6, F5, F8 et F2 de Flersen-Escrebieux (Figure 5.2) ainsi que les forages F6, F5 et F2 d'Houplin-Ancoisne (Figure 1 6.3) se situent en phase oxydante. On y trouve la présence concomitante d' $O_2(d)$ et d'ions nitrates. Pour les deux sites, un phénomène de dénitrification se produit pendant cette phase et provoque la diminution progressive des teneurs en ions nitrates le long des axes d'écoulement.





Figure 5.2. Profil Hydrochimique de Flers-en-Escrebieux

Les concentrations en nitrates plus élevées rencontrées à Houplin-Ancoisne ([NO₃⁻]_{moy} = 59 mg/l) décrivent des conditions plus oxydantes qu'à Flers-en-Escrebieux ([NO₃⁻]_{moy} = 17 mg/l). Cette variation se décèle également au niveau des valeurs de potentiel rédox (Eh_{HOUPLIN} = 399 mV et Eh_{FLERS} = 255 mV).



Figure 5.3. Profil hydrochimique d'Houplin-Ancoisne

L'absence d'ions nitrates ainsi que les teneurs importantes en fer dissous mesurées sur les forages F9 et F7 (de 325 à 882 µg/l) de Flers-en-Escrebieux et sur l'ensemble des forages de Pecquencourt (55 µg/l à 3640 µg/l) (Figure 5.4) caractérisent un milieu réducteur. Les valeurs de potentiel rédox et la variabilité des teneurs en fer sur les deux campagnes de Pecquencourt (basses et hautes eaux) exige de distinguer deux groupes : d'une part les forages F1, F2, F3, F5 et F7 pour lesquels les valeurs de potentiel varient entre 300 mV et 450 mV et d'autre part, les forages F8 et F9, pour lesquels les valeurs de potentiel ne dépassent pas 300 mV. Dans le premier groupe, les concentrations maximales

Nappe Basse

---- Nappe Haute

en fer dissous varient de façon très importante d'une campagne à l'autre : [Fe]moy = 95 µg/L en nappe haute et 358 µg/L en nappe basse). Quant au deuxième groupe, les teneurs en fer total restent élevées. Toutefois, ces teneurs semblent moins sensibles aux variations du niveau de la nappe, ce qui caractérise un milieu réducteur plus stable.



Figure 5.4. Profil hydrochimique de Pecquencourt

Il convient de signaler le faciès intermédiaire des forages F11 (Houplin-Ancoisne) et F8 (Flers-en-Escrebieux) pour lesquels la présence d'ions nitrates est associée à celle du fer en solution. Ainsi, le faciès hydrochimique du forage F11 se distingue fortement du profil global (Figure 6.4), ce qui s'expliquerait par sa position particulière sur la rive opposée du canal de Seclin où l'on distingue la présence d'une faille le long de ce canal (Figure 5.2). Celle-ci contribue à instaurer une discontinuité hydraulique et hydrogéochimique au sein de l'aquifère crayeux. Par conséquent, ce forage bénéficie d'un mode d'alimentation spécifique par rapport au reste du champ captant. A Flers-en-Escrebieux (Figure 6.3), le forage F8 s'inscrit dans la transition phase oxydante / phase réductrice du profil.

Recherche de l'origine du nickel

Les teneurs maximales en nickel sont détectées sur Flers-en-Escrebieux au cours de la transition phase oxydante/phase réductrice, au droit des forages F2 et F8 où les concentrations avoisinent 40 µg/l. Globalement, les teneurs augmentent lorsque la concentration en nitrates diminue, ce qui suggère que la dénitrification pourrait être impliquée dans la mise en solution de nickel. En revanche à Houplin-Ancoisne, les teneurs en nickel restent constantes tout au long du profil : elles ne semblent pas être influencées par la dénitrification et n'affichent aucun lien avec la concentration en fer total dans l'eau. La teneur maximale est enregistrée pour le forage F11. Enfin, à Pecquencourt, la présence de nickel intervient sur la phase moins réductrice et moins stable du profil.

Pour l'ensemble des sites, les profils hydrochimiques mettent en évidence la disparition du nickel soluble dans les phases réductrices stables des profils (F9 et F7 de Flers-en-Escrebieux et F8 et F9 de Pecquencourt).

Dans les terrains aquifères rencontrés, le nickel peut être présent dans les tourbes, les argiles confinant la nappe de la craie et incrusté dans des nodules de marcassite (pyrite blanche) dans les formations calcaires cénomaniennes. Sa concentration au sein de ces nodules peut atteindre 400 mg/kg [Vallée, 1999]. En solution, à pH < 10, la forme dominante du nickel est l'état ionique (Ni²⁺). Son rayon atomique (0.0690 nm) étant proche de celui du fer (0.0645 nm), il est donc susceptible de coprécipiter avec des composés ferrugineux (goethite, hématite, pyrite). Il peut se substituer au fer dans la goethite jusqu'à 0,055 mol/mol [Cornell et *al.*, 1992], au-dessus de cette concentration, il s'adsorbe à la surface de la goethite ou précipite sous forme de Ni(OH)₂. Les sources de nickel principalement invoquées en milieu naturel sont donc les sulfures de fer par coprécipitation, les

Nappe Basse

·∆--- Nappe Haut

(hydr)-oxydes de fer et manganèse par coprécipitation et surtout par adsorption.

Par ailleurs, on rapproche fréquemment le comportement du nickel à celui du cobalt [Denis et *al.*, 1999, Laurent et Henry, 1979] : ces deux métaux présentent des rayons atomiques proches (ra(Co) = 0.0545nm), des propriétés d'adsorption similaires [Mendes et Martins, 2004] et ne précipitent qu'en très faibles proportions avec l'hydroxyde de fer [Vallée, 1999, Cornell et *al.*, 1992]. Dans les formations pyritiques, le cobalt accompagne le nickel [Nielsen, 1990; Aktor, 1996; Cornell et Giovanoli, 1989], et lors d'une dissolution de la phase pyritique, ils passeraient en solution dans les mêmes conditions, conservant ainsi le rapport de concentration existant au sein des cristaux de sulfure de fer. Les travaux menés dans le nord de la France et la Belgique sur différents aquifères carbonatés influencés par la dissolution de pyrite [Denis et *al.*, 1999] montrent que dès que le nickel apparaît en des teneurs détectables, le cobalt est présent également en solution. La corrélation entre ces deux éléments détermine leur origine. Elle est géologique (naturelle) lorsque le rapport nickel/cobalt est en moyenne de 5; par contre si ce rapport est supérieur à 10, l'origine anthropique s'impose [Denis et *al.*, 1999.]

Sur le site de Flers-en-Escrebieux, une forte corrélation existe entre les teneurs en nickel et cobalt avec un rapport moyen Ni/Co proche de 6. La distinction de deux groupes de forages permet de retrouver de meilleures corrélations. D'une part on trouve des rapports Ni/Co variant entre 5,8 et 8,3 pour les forages F2, F8 et F9. Ces valeurs sont compatibles avec une origine géologique. D'autre part, les rapports Ni/Co des forages F5 et F6 varient entre 10 et 16,6 ce qui suggère une influence anthropique dans l'apport de nickel (Figure 5.5).



Figure 5.5. Corrélations des teneurs en nickel et en cobalt des échantillons.

Pour le site de Houplin-Ancoisne, trois des quatre forages ont un comportement identique. Leurs teneurs en Nickel et Cobalt sont très proches et leur rapport Ni/Co s'élève à environ 13, le forage F 11 apparaît complètement isolé et présente un rapport de 2,5. Par conséquent, mis à part pour le forage F 11, l'indice Ni/Co suggère pour l'ensemble du champ captant de Houplin-Ancoisne une origine anthropique.

Sur le site de Pecquencourt, il existe une forte corrélation entre les teneurs en Nickel et en Cobalt des forages ($R^2 = 0.99$). De plus, une valeur moyenne de 4 pour le rapport Ni/Co appuie une origine géologique. Le nickel n'est pas détecté sur les forages F8, F9 et F2bis. Ainsi, l'indice Ni/Co indique une origine naturelle du nickel pour l'ensemble des forages où il apparaît. L'application de l'indice Ni/Co aux sites d'étude indique une origine géologique du nickel pour les forages suivants :

- les forages F1, F2, F3, F5 et F7 de Pecquencourt,
- les forages F2, F8 et F9 de Flers-en-Escrebieux,
- le forage F11 de Houplin-Ancoisne.

Etude corrélative des teneurs en nickel et sulfates des eaux

Secteur de Flers-en-Escrebieux

L'analyse des données de ce champ captant indique la présence de teneurs détectables en nickel au droit des forages F1, F2, F3, F5, F6, F7, F8 et F9. Dans l'ensemble, bien que l'origine du nickel soit supposée pyritique, les corrélations nickel/sulfates restent médiocres. Les résultats des forages F8 et F5 (Figure 5.6) présentent les meilleurs résultats (R² = 0.45 pour chacun des sites).



Figure 5.6. Corrélations entre les teneurs en nickel et en sulfates des eaux des forages F5 et F8 de Flers-en-Escrebieux.

Les teneurs en nickel et sulfates pour les deux forages évoluent conjointement, ce qui est cohérent avec le relargage du nickel par la dissolution de pyrite. De même, les teneurs élevées en nitrates du site jouent en faveur de la formation d'hydroxydes de fer et manganèse. Ceci peut expliquer l'absence de corrélations significatives entre le nickel et les sulfates (sur l'ensemble des forages) impliquant ainsi une influence des phénomènes d'adsorption du nickel à la surface des hydroxydes de fer et de manganèse. Ces phénomènes contribuent donc à la modification des concentrations en nickel dans les eaux masquant la relation nickel/sulfates.

Secteur de Pecquencourt

Dans ce secteur de bonnes corrélations entre les deux éléments sont observées pour les forages F1 à F5. Les forages F1 et F2 se distinguent par des relations de type logarithmique (Figure 5.7). En effet, on observe une forte augmentation des teneurs en nickel pour des teneurs en sulfates de 20 à 55 mg/l suivie d'une augmentation conjointe des deux paramètres.



Figure 5.7. Teneurs en nickel et sulfates des forages F1 et F2 de Pecquencourt.

Ce type d'évolution suggère l'influence forte des phénomènes d'adsorption désorption qui engendre un stockage du nickel puis un lessivage sans variations des teneurs en sulfates (Figure 5.8).



Figure 5.8. Relations théoriques induites par les phénomènes de dissolution et de désorption et comparaison aux évolutions des teneurs en nickel et sulfates des forages F1 et F2.

Les teneurs en nickel et sulfates des forages F3 à F5 présentent des corrélations linéaires (Figure 5.9), plus compatibles avec un phénomène simple de dissolution de la pyrite sans adsorption du nickel. Cet effet plus faible du phénomène d'adsorption est probablement dû à des conditions du milieu moins propices à la formation d'hydroxydes de fer et manganèse.



Figure 5.9. Evolution des teneurs en nickel et sulfates des forages F3, F4 et F5.

Quelques points se distinguent néanmoins de cette tendance sur les forages F3 et F4 qui présentent des teneurs en nickel proche du seuil de détection analytique (5µg/l pour les analyses normalisées du contrôle sanitaire) associées à de fortes teneurs en sulfates (ces points n'ont pas été pris en compte dans le calcul des coefficients de régression).

La comparaison des corrélations nickel/sulfates de ces forages avec la droite de dissolution théorique de la marcassite (Figure 5.10) fait apparaître des teneurs en nickel relativement élevées dans les eaux. Ces teneurs peuvent correspondre à l'apport supplémentaire du nickel stocké par adsorption ou au transfert d'une concentration initiale de nickel dans l'eau provenant par exemple des forages F1 et F2.



Figure 5.10. Droites de dissolution théorique de pyrite dans une eau exempte de nickel et à concentration initiale de 20 µg/l et leur comparaison aux analyses des forages F3, F4 et F5.

En ce qui concerne les forages F7, F8, F9, F10 et F11 leurs teneurs nickel sont plus faibles que celles des forages précédents avec quelques exceptions qui se détachent, suggérant une influence épisodique des forages précédents. Enfin, les recherches de corrélations entre teneurs en nickel et sulfates mettent en évidence la complexité du phénomène de relargage du nickel en milieu naturel. Le secteur de Pecquencourt donne de bons résultats qui permettent notamment de distinguer les forages où les phénomènes d'adsorption-désorption dominent (F1 et F2). Les résultats du secteur de Flers-en-Escrebieux restent très moyens, sans aucun doute en raison de la dualité « conditions oxydantes » / « dénitrification bactérienne ».

Présence du sélénium dans la nappe de la craie

La problématique de l'occurrence de sélénium dans les eaux souterraines dépassant les normes de potabilité se pose dans plusieurs départements de France (Figure 6.11) : Bassin Rhin-Meuse (Aquifère du Jurassique et du Trias), Bassin de Paris (Aquifère de l'Eocène, Aquifères de l'Oligocène) [Vernoux et al., 1998], Roche-Posay en Vienne (Nappe du Turonien), Manteau de terrains détritiques tertiaires aux environs du site et les argiles noires de l'Eocène basal (uranifères), Bassin aquitaine: Aquifère de l'Eocène. Dans notre cas, c'est l'aquifère séno-turonien dans bassin d'Artois-Picardie qui est sujet à des pics importants de sélénium (Figure 5.11). Les départements du Nord et du Pas-de-Calais ont enregistré des concentrations dans la ressource dépassant les normes de potabilité (60 µg/l dans le champ captant des Ansereuilles). Ces dépassements ont incité les pouvoirs publics et les autres acteurs concernés par les ressources en eau à mener des travaux de recherche et des investigations afin de comprendre l'origine de ces concentrations.

L'aquifère crayeux du bassin Artois-Picardie est présent dans un secteur vulnérable avec des différentes activités humaines en surface. On retrouve les problématiques de pollution anciennes (nitrates, sulfates, nickel,...) mais aussi de nouveaux éléments comme le sélénium qui dépasse la norme de potabilité dans plusieurs sites (valenciennes, quelques points sur le littoral et surtout au sud de Lille).



Figure 5.11. Présence de Sélénium dans les eaux souterraines en France septentrionale.

Dans ce dernier site, la concentration en sélénium est très variable entre les quatre champs captants présents (Emmerin, Houplin-Ancoisne, Ansereuilles (valeurs les plus élevées) et Salomé) et au sein d'un même champ captant on peut y constater des variations notables entre les forages (Figure 5.12).



Figure 5.12. Localisation des champs captants de sud de Lille avec les variations des concentrations en Se.

Origine du sélénium dans les eaux de la nappe de la craie

Pour déterminer l'origine du sélénium dans les forages d'eau des différents champs captants, l'étude a porté sur l'analyse des données existantes de 65 forages, la sélection de forages pour une première campagne d'eau, la sélection de cinq points d'eau pour un suivi mensuel, les campagnes de terrain pour l'échantillonnage des matériaux rocheux régionaux, les campagnes d'échantillonnages des matériaux rocheux aux bords des forages d'eau et les campagnes complémentaires dans les sédiments des cours d'eau situés à proximité des champs captants.

Pour la phase solide (cuttings de forage) une analyse chimique complète a été réalisée. Des extractions chimiques séquentielles ont été utilisées pour l'identification des états d'oxydation d'un élément. L'utilisation des extractions séquentielles permet d'avoir des informations détaillées sur l'origine, l'occurrence, la biodisponibilité, la disponibilité physicochimique, la mobilité et la remobilisation potentielle dans les sols et les sédiments et selon les différentes conditions environnementales.

A l'issue de la phase analyses, les résultats obtenus montrent des différenciations entre les sites. Ainsi, la craie d'Emmerin n'a décelé aucune présence de sélénium ; tandis que celle de Templeuve décèle une présence de sélénium dans les argiles et les sables du tertiaire ainsi que dans les limons du quaternaire avec une teneur de 4.87 mg/kg dans les argiles ypresiennes.



Figure 5.13. Description lithologique de la carotte A13 et localisation des prélèvements d'analyses.

L'étude détaillée du quaternaire s'est basée sur des carottages réalisés à proximité des forages jusqu'à la transition quaternaire/secondaire (Marnettes). A titre d'exemple la description de la carotte à proximité du forage A13, se distingue à la fois par une présence des niveaux argileux mais aussi par la présence de remblais de 1,6m d'épaisseur. Plusieurs échantillonnages ont fait l'objet d'analyses totales et des extractions sélectives (Figure 5.13). Les résultats issus de ces extractions avec 5 attaques différentes a permis d'obtenir 5 phases. La sommation de ces résultats donne le Se total calculé. Les taux en Se obtenus pour les quatre carottes à proximité des forages S3, H4, H11 et A13 sont marqués par des valeurs élevées enregistrées au niveau du A13 avec 4.8 ppm et surtout localisées dans les niveaux argileux (Figure 5.14).



Figure 5.14. Variation de [Se]_{total} dans les carottes S3, H4, H11 et A13 en fonction de la profondeur.

L'analyse des sédiments, à différents points des cours d'eau situés dans la zone d'étude et à proximité des points d'eau étudiés, a montré une présence importante de sélénium avec une valeur maximale de 26 ppm (Tableau 5.1) au niveau de la tortue (bras mort de la Deûle). Le sélénium présent dans ces sédiments est soumis à des conditions réductrices qui peuvent empêcher son transfert vers le sous-sol.

	Les points de prélèvements							
	Le ca	anal de la D	nal de la Deûle La Tort		ortue	Le canal de Seclin		
	D1	D2	D3	T1	T2	S1	S2	La Naviette
Profondeurs				Concentra	tions en sélé	nium en mg/kg de l	MS	
Entre 2-5 cm	2.1	4.4	8.8	14.9	26.4	3.2	6.7	2.4

13.3

15.8

13.5

7.9

87

11

69

4.3

11.3

4.3

4.4

99

10.9

8.3

Tableau 5.1. Concentration en Se dans les sédiments des cours d'eau (selon la profondeur).

Pour la phase aqueuse, les analyses chimiques ont porté sur les prélèvements des eaux souterraines et des eaux de surface incluant les éléments figurant dans le Tableau 5.2. En ce qui concerne les cours d'eau, les teneurs en sélénium restent faibles et ne dépassant pas les 5 µg/L. La valeur maximale 4.7 5 µg/L a été mesurée dans la Deûle qui voit son état qualitatif s'améliorer.

Tableau 5.2. Eléments mesurés.						
Elámonte majoure	Les anions: F ⁻ , Fer, Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ , PO ₄ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , SO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ , SiO ₂					
Elements majeurs	Les cations: Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺					
Eléments traces	Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Ni, Pb, Se total, Sr, U, Zn, S ²⁻					
Chargo organiquo	COD (carbone organique dissous)					
charge of ganique	COT (carbone organique total)					
Spéciation Se Se(IV) et Se(VI)						
Icotopos stablos	δ ² H (H ₂ O) et δ ¹⁸ O (H ₂ O)					
isotopes stanies	δ^{34} S (SO ₄) et δ^{18} O (SO ₄)					
Datation des eaux	Datation des eaux CFC (chlorofluorocarbures) et SF6 (Hexafluorure de soufre)					

Une première analyse à l'issue des analyses chimiques a consisté à vérifier les relations entre le sélénium, les nitrates et le niveau dynamique (ND). A Houplin-Ancoisne, les teneurs élevées en sélénium sont enregistrées quand les valeurs des nitrates sont faibles. Par contre au niveau des Ansereuilles, les valeurs sont élevées avec des concentrations moyennes en nitrates. Ces observations ont été vérifiées pour certains points d'eau (exemple H4 et A16) (Figure 5.15) en fonction des variations du niveau piézométrique. Pour le cas du forage H4, le niveau de la nappe influence les concentrations en nitrates. D'ailleurs, les mêmes pics sont observés sur les deux paramètres. Par contre, les variations en sélénium n'apparaissent qu'en fin 2007 sans relation avec les autres

Entre 16-19 cm

Entre 34-37 cm

éléments. Cela peut s'expliquer par des conditions fortement oxydantes ou réductrices de la nappe. Durant la première période des hautes eaux, les valeurs en sélénium sont faibles et celles en nitrates sont fortes et durant la deuxième période des hautes eaux, les valeurs en Se et celles des nitrates augmentent. Entre ces deux périodes, le niveau dynamique a varié d'environ dix mètres.



Figure 5.15. Relation entre les nitrates, le sélénium et le niveau dynamique de la nappe dans H4.

Etude des rapports élémentaires

L'aquifère de la craie est considéré comme un milieu relativement homogène avec des variabilités spatiales à grande échelle. Dans le secteur d'étude, malgré l'étroitesse de sa superficie, les rapports binaires entre Ca/Sr et Mg/Sr révèlent trois influences majeures sous formes de trois pôles. Elles sont ainsi identifiées :

- pôle caractéristique des formations tertiaires (sables landéniens et argiles yprésiennes),
- pôle carbonaté des craies séno-turoniennes,
- pôle caractéristique des eaux captives de la nappe de la craie sous couverture tertiaire et des eaux des sables d'Ostricourt.



Figure 5.16. Ca/Sr vs Mg/Sr (molaire) pour les eaux souterraines prélevées en juin 2011.

Cette répartition en trois pôles détermine des influences par interactions eau-roche. Le couplage aux analyses isotopiques dont les rapports en strontium ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr et la datation des eaux par CFC et SF₆ montrent des mélanges d'eau évoluant entre un pôle A26 (0.707887) avec des eaux les plus

anciennes et un pôle Emmerin (0.708457) avec des eaux les plus récentes (âge moyen après 2000). Les analyses isotopiques de soufre et oxygène des sulfates suggèrent un enrichissement isotopique avec une diminution des concentrations en sélénium. Dans les milieux réducteurs, le sélénium majoritairement présent est de type élémentaire. Ce sont les phénomènes de précipitation et de dissolution des soufres des phases solides qui contrôlent les concentrations du sélénium présent. Dans les conditions oxydantes, l'apport de l'oxygène gouverne l'apport en Se. Il est constaté que les forages d'Emmerin et les cours d'eau sont sous l'influence des eaux de pluie et la surface (Figure 5.17).





Sur la base des enseignements tirés des résultats précédents et des interprétations de l'état du milieu aqueux, ces fortes concentrations du sélénium dans les matériaux rocheux impactent la qualité de la nappe par des modes de circulation des eaux dans les différents milieux saturés et non saturés. Dans le milieu saturé, l'infiltration des eaux de surface et les battements de la nappe en mode lent (variation annuelle) et en mode rapide (effet de pompage) sont des phénomènes majeurs de mobilisation du sélénium tandis qu'au sein même du milieu saturé.



Figure 5. 18. Fluctuation piézométrique, pompage et coupe géologique dans les forages H4.

Ces modes se résument aux transferts latéraux consécutifs aux forts gradients hydrauliques de la nappe, des interdépendances entre les forages et les transferts entre secteurs par écoulement. Néanmoins, la complexité de l'élément sélénium, du milieu et de ses conditions de mobilisation sous influence de pompages rendent difficile la compréhension des phénomènes mis en jeux (Figures 5.19 et 5.20).



Importante teneur en sélénium

Faible teneur en sélénium

Figure 5.19. Re-largage du sélénium contenu dans les formations quaternaires en fonction de la piézométrie influencée par les pompages à Houplin-Ancoisne.



(à gauche faible teneur en Se et à droite teneurs élevées).

Modélisation conceptuelle

La caractérisation de la mobilisation du sélénium en fonction de champ captant est une démarche nécessaire pour mieux appréhender le système à petite échelle.

- Dans le champ captant d'Emmerin, le re-largage du sélénium est lié au transit des eaux d'infiltration récentes chargées en nitrates.



Figure 5.21. Système de fonctionnement de relargage du sélénium dans le champ captant d'Emmerin.

- Au niveau des Ansereuilles, le relargage de sélénium dans ce système est fortement dépendant de l'influence de la remontée de la nappe qui lessive les horizons riches en sélénium. Ce mécanisme s'appuie sur les variations répétitives et brusques du niveau piézométrique induisant des changements au niveau des conditions d'oxydo-réduction. Les forages sous couverture tertiaire (sable Landénien) montrent des teneurs en sélénium très basses, suite aux conditions réductrices, favorables à l'immobilisation du sélénium.

Alluvions		07
Argiles	Lessivage Se	Fortes fluctuations
Marnettes	SeO4	de la nappe Gradient hydraulique important
Craie	A13: [NO ₃ ²⁻] 뇌 Min: 2,8 mg/l Max: 4,5 mg/l Moy: 3.6 mg/l	[O2] 7 Niveau de nappe

Figure 5.22. Système de fonctionnement de relargage du sélénium dans le champ captant des Ansereuilles (hors forage Nord).

- Les variations lithologiques à Houplin-Ancoisne déterminent un système double. La présence des argiles se traduit par une influence unique par les fluctuations de la nappe par le bas ; tandis que son absence légitime la coexistence des deux phénomènes : infiltration des eaux pluviales et remontée de nappe. A cela s'ajoute les interconnexions entre les forages et l'influence des eaux d'Emmerin par écoulement gravitaire. Le H11 bénéficie d'une position particulière marquée par 2 directions de failles et la proximité des affleurements Tertiaires.



Figure 5.23. Système de fonctionnement de relargage du sélénium dans le champ captant de Houplin-Ancoisne.

 A Salomé, le relargage de sélénium serait fortement influencé par les transferts des eaux provenant de la nappe des sables d'Ostricourt en contact avec les argiles de Louvil. Les transferts verticaux et latéraux restent plausibles mais de moindre ampleur.



Figure 5.24. Système de fonctionnement de relargage du sélénium dans le champ captant de Salomé.

Conclusion

La pollution géogénique présente un enjeu majeur dans la gestion des champs captants à l'échelle mondiale. C'est le cas du bassin Artois-Picardie où l'exploitation de certains forages est devenue critique en raison de dépassement des seuils de potabilité. Ainsi, nos investigations ont mis en évidence l'influence du fonds géologique de nos sites dans l'apparition du nickel en solution. Les résultats confirment l'intérêt du rapport nickel/cobalt en tant qu'indicateur de l'origine naturelle ou anthropique du nickel dans les eaux des aquifères crayeux. Cet indice nous a permis de statuer rapidement une origine anthropique sur le site d'Houplin-Ancoisne et d'approfondir les recherches sur les sites de Flers-en-Escrebieux et Pecquencourt dont l'origine a été qualifiée de géologique.

L'utilisation des profils hydrochimiques a montré que le nickel apparaît en solution suite à la diffusion d'éléments oxydants comme les nitrates ou l'oxygène atmosphérique en milieu captif à semi-captif. L'application des connaissances sur les processus d'oxydation de la pyrite, révèle qu'une pollution aux nitrates constitue un facteur déterminant. A Flers-en-Escrebieux, les nitrates paraissent clairement impliqués dans le phénomène de dissolution de la pyrite, ce qui constitue un argument supplémentaire pour la lutte et la résorption de ce type de pollution. Malgré l'origine pyritique du nickel (Fe_(1-x) Ni S) sur les secteurs de Flers-en-Escrebieux et Pecquencourt, les corrélations entre teneurs en nickel et sulfates sont peu significatives, ce qui a été imputé aux réactions d'adsorption du nickel à la surface des hydroxydes de fer et manganèse. Les phénomènes d'adsorption du nickel contribuent à la modification de la concentration de ce métal dans les eaux et masquent la relation nickel/sulfates.

Pour le sélénium, il est apparu de manière manifeste que son origine est essentiellement naturelle dans les formations tertiaires et dans les formations quaternaires, ce qui contrôle sa répartition spatiale dans les différents niveaux rocheux. Ainsi les caractéristiques du milieu et de les conditions naturelles et d'exploitation qui impactent la dynamique de la nappe et conditionnent sa mobilisation. A ceci, il faut ajouter les transferts entre forages et l'impact de l'infiltration de la recharge. Pour autant, il ne faut pas négliger les activités anthropiques de surface qui peuvent contribuer directement par un apport en sélénium et/ou indirectement en faisant intervenir les nitrates soit par oxydation ou en retardant la réduction du sélénium. A ceci s'ajoute l'apport possible des sédiments des cours d'eau. Nos travaux permettent de mieux placer cette problématique dans son contexte complexe. D'importants résultats permettent ainsi de mieux comprendre les variations du taux de sélénium dans les eaux de la nappe de la craie. Malgré l'étroitesse de sa superficie, les rapports binaires entre Ca/Sr et Mg/Sr révèlent trois influences majeures sous formes de trois pôles. Un pôle caractéristique des formations tertiaires, un pôle carbonaté des craies séno-turoniennes et un pôle caractéristique des eaux captives de la nappe de la craie sous couverture tertiaire et des eaux des sables d'Ostricourt. Cette répartition en trois pôles détermine les influences par interactions eauroche. Le couplage aux analyses isotopiques dont les rapports en strontium ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr et la datation des eaux par CFC et SF₆ montrent des mélanges d'eau évoluant entre un pôle A26 (0.707887) avec des eaux les plus anciennes et un pôle Emmerin (0.708457) avec des eaux les plus récentes (âge moyen après 2000). Les analyses isotopiques de soufre et oxygène des sulfates suggèrent un enrichissement isotopique avec une diminution des concentrations en sélénium. Dans les milieux réducteurs, le sélénium majoritairement présent est de type élémentaire. Ce sont les phénomènes de précipitation et de dissolution des soufres des phases solides qui contrôlent les concentrations du sélénium présent. Dans les conditions oxydantes, l'apport de l'oxygène gouverne l'apport en Se. Au terme de ces travaux, les origines et les causes des fluctuations des teneurs en éléments traces, en particulier le nickel et le sélénium sont mieux cernés. Ces résultats constituent une base sérieuse pour la mise en place de programmes d'amélioration de la qualité des eaux produites dans les

Bibliographie

champs captant conformément à la Directive Européenne.

Aktor, H. 1996. Removal of nickel without sludge generation. International workshop on micropolluants. I.W.S.A., Vienne Atteia O (2005) Chimie et pollution des eaux souterraines, Lavoisier Ed., 398p.

- Benabderraziq, H. 2014. Modalités et processus de la contamination des eaux souterraines : application à la présence du sélénium dans la nappe de la craie (Nord de la France). Thèse Université Lille1, 208p.
- Blum, A., Chery, L., Barbier, J., Baudry, D. and Petelet-Giraud, E. 2002. Contribution à la caractérisation des états de références géochimiques des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Final report, BRGM RP-51549-FR, 5
- Champ, DR., Gulens, J. and Jackson, RE. 1979. Oxidation-reduction sequences in ground water flow systems. Canadian Journal Earth Sciences, 16, 12–23.
- Cornell, RM. and Giovanoli, R. 1989. Effect of cobalt on the formation of crystalline iron oxides from ferrhydrite in alkaline media. Clays Clay Minerals, 37 65-70.
- Cornell, RM., Giovanoli, R. and Schneider, W. 1992. The effect of nickel on the conversion of amorphous iron(III) hydroxide into more crystalline iron oxides in alkaline media. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 53, 73–79.
- Denis, M., Bernard, D., Vallée, K. et Maillot, H. 2000. Le nickel d'origine géologique dans les eaux alimentaires belges et françaises. Techniques Sciences Méthodes, génie urbain génie rural, 6, 122–134.
- Descotes, M. 2001. Evaluation d'une perturbation oxydante en milieu argileux : Mécanisme d'oxydation de la pyrite. Thèse université Paris VII, 358p.
- Groffman, AR. and Crossey, LJ. 1999. Transient redox regimes in a shallow alluvial aquifer. Chemical Geology, 161, 415–442.
- Kamei, G. and Ohmoto, H. 2000. The kinetics of reactions between pyrite and O2-bearing water revealed from in situ monitoring of DO, Eh and pH in a closed system. Geochimca Cosmochimica Acta, 64, 2585–2601.
- Kölle, W., Strebel, O. and Böttcher, J. 1990. Reduced sulphur compounds in sandy aquifers and their interactions with groundwater. In: Proceedings of Dresden Symposium, March 1987: Groundwater monitoring and management. IAHS, 173, 23–30.
- Laurent, E. et Henry, J. 1979 La technique de l'eau et de l'assainissement 389, 9–16
- Lefèvre, E. 2006. Etude de la minéralisation de la nappe de la craie sous pressions naturelles et anthropiques : application à la présence de l'azote, du soufre et du nickel dans les eaux souterraines. Thèse Université de Lille1, 162p.
- Mariotti, A. 1994. Dénitrification in situ dans les eaux souterraines, processus naturels ou provoqués. Hydrogéologie, 3, 43–68.
- Mendes, FD. and Martins, AH. 2004. Selective sorption of nickel and cobalt from sulphate solutions using chelating resins. International Journal of Mineral processing, 74, 359–371.
- Nielsen, J. 1990. Drinking water criteria document for nickel. Report: Danish Environmental Protection Agency.
- Simon, B. 1986. Apports de la biogéochimie isotopique à la connaissance de la dénitrification dans les eaux souterraines. Thèse Université de Paris VI.
- Strebel, O., Böttcher, J. and Fritz, P. 1990. Use of isotope fractionation of sulfate sulfure and sulphate-oxygen to asses bacterial desulfurization in a sandy aquifer. Journal of Hydrology 121, 155–172.
- Stumm, W. and Morgan, JJ. 1981. Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters, 2nd Ed, Wiley-Interscience, Hoboken, 780p.
- Talbot, A. and Tillie, B. 1979. Modèle mathématique de gestion du Douaisis.-Alimentation en eau des sites industriels retenus par le SDAU. Report BRGM 79 SGN 692 NPC.
- Vallée, K. 1999. Le nickel dans les eaux alimentaires. Application à des champs captants du bassin Artois-Picardie. Thèse Université de Lille1.
- Vernoux, J.F., Barbier, J. et Chery, L., 1998. Les anomalies en sélénium dans els captages d'Ile-de-France (Essonne, Seine-et-Marne). Rapport BRGM/RP-40114-FR, 46p.
- Washington, JW., Endale, DM., Samarkina, LP. and Chappell, KE. 2004. Kinetic control of oxidation state at thermodynamically buffered potentials in subsurface waters. Geochimica Cosmochimica Acta, 68, 4831–4842.

Conclusion Générale

Ce travail de synthèse de mes activités de recherche depuis 15 ans tente de mettre en cohérence les travaux menés d'une part sur la dynamique de surface à travers la dynamique sédimentaire littorale et les mouvements de terrain et d'autre part sur les processus d'écoulements dans les sols saturés et non saturés en estimant l'impact sur la qualité de l'eau.

La compréhension des mouvements de terrain, comme phénomènes naturels à risques majeurs, passe par la détermination des facteurs et des mécanismes déstabilisateurs qui les engendrent et leur intégration dans de modèles conceptuels ou numériques afin de les prévenir. La mise en place d'une démarche méthodologique pluridisciplinaire, basée sur une approche transversale pour une bonne compréhension des phénomènes d'instabilité complexes a permis à travers deux applications, dans des contextes géographiques et géologiques différents, de comprendre l'origine des instabilités affectants les versants étudiés. Dans la région du Rif central au Nord du Maroc, les facteurs macrodéstabilisateurs et les mécanismes micro-déstabilisateurs à l'origine des glissements plans affectant les versants façonnés dans les flyschs ont été déterminés. Un modèle conceptuel prenant en compte l'hydrodynamique de la nappe a permis de suivre les fluctuations du coefficient de sécurité en fonction du niveau piézométrique et en fonction de l'état micro-structurel des matériaux schisteux. Les falaises crayeuses du cap Blanc Nez dans le Nord de la France sujettes à des écroulements provoquant un recul du trait de côte qui peut atteindre jusqu'à 0.25 m/an par endroits a été l'objet d'une seconde application de la démarche. Les facteurs déstabilisateurs et les mécanismes associés à l'origine des écroulements ont été démontrés permettant ainsi d'orienter le travail de modélisation en l'optimisant. Les modèles établis à éléments finis et à éléments distincts ont visualisé les processus d'évolution naturelle de la falaise, et de mettre en évidence les mouvements observés. La prise en compte de l'existence d'une nappe d'eau montre que son rôle se restreint uniquement à son action mécanique.

La gestion de la mobilité et l'érosion du trait de côte dans le nord de France est beaucoup plus spectaculaire dans les côtes sableuses; c'est le cas Hardelot-Plage et Sainte Cécile-Plage. Les recherches menées dans ce secteur ont apporté des explications aux retraits observés dont les répercussions économiques sont réelles. La conception de modèles explicatifs et des méthodologies d'investigation en utilisant un couplage SIG-Modèle hydrogéologique ont été élaborées pour créer un outil d'aide à la décision en matière d'aménagement littoral dans une optique de développement durable. La modélisation hydrogéologique (hydrodynamique et hydrodispersive) du secteur d'Hardelot a justifié la saturation en eau observée dans la partie sud d'Hardelot par la proximité de la nappe d'eau douce superficielle. L'aquifère des sables est en continuité hydraulique avec la nappe de la craie sous-jacente. Les diverses simulations entreprises avec la réalisation de forages captant l'aquifère des sables ont permis de démontrer que le rabattement de la nappe de 0.5 m, permettant un assèchement de la plage, nécessiterait un pompage continu avec un débit de 5 m³/h. Ceci n'est valable que lorsque la tourbe est intercalée dans le sable.

Les processus des écoulements dans les sols saturés et non saturés en estimant l'impact sur la qualité des sols et des eaux a fait l'objet de plusieurs travaux. Connaître la qualité de l'eau permet, non seulement d'éviter les problèmes de santé, mais aussi de guider le choix des projets de développement. C'est un domaine stratégique dans les pays en voie de développement où l'accroissement urbain, agricole ou industriel est sous la contrainte de la disponibilité de la ressource en termes de quantité et de qualité. Deux études ont été menées dans la rive sud de la méditerranée, au Maroc et en Algérie. Au Nord du Maroc, dans la région du Rif central marquée par la présence de flyschs fortement structurés, des intrusions salines d'origine tectonique contaminent les nappes alluviales et des grès du domaine des flyschs. L'eau présente une conductivité électrique élevée et un faciès chloro-sodique. Au terme de cette étude, un premier travail cartographique d'aide à la décision a été élaboré en vue de la reconnaissance des zones propices à l'implantation de nouveaux captages aussi bien agricoles que pour l'alimentation en eau potable.

Plus à l'Est et dans un contexte géographique et géologique très proche, le lac Oubeira dans l'Est algérien est un témoin environnemental extrêmement précieux, qui intègre de nombreux paramètres hydroclimatiques qui réagissent rapidement. Le lac est soumis à des contraintes naturelle

et anthropique sévères, pendant la saison sèche. Sa configuration géométrique et son exposition aux vents font que ses eaux sont bien brassées sur toute la colonne d'eau. Les premiers résultats qui couvrent tout le plan d'eau, peu profond, montrent la minéralisation moyenne des eaux tempérées chaudes, qui libèrent du CO2 dans l'atmosphère, un pH alcalin, supérieur à 8, lié à l'évaporation intense et à l'activité biologique, notamment la photosynthèse et à la précipitation de calcite. Les mesures physico-chimiques se sont révélées d'un apport considérable pour identifier l'individualisation de deux masses d'eau distinctes, l'une à l'Est et l'autre à l'Ouest et l'absence de couches limnologiques. Enfin, l'envasement du lac est un problème majeur qui a long terme entraînera la modification de l'écosystème. Un dragage s'impose.

La pollution azotée a fait l'objet de nombreux travaux dans différents sites du bassin Artois Picardie, à travers une méthodologie fondée sur un modèle intégré basé sur le couplage de différents modules permettant d'établir un bilan du cycle de l'azote dans la zone racinaire (Agriflux) et son transit dans la zone non saturée infra-racinaire (VS2DT-WHIUNSAT) jusqu'à la zone saturée (MT3D-MODFLOW). Dans d'autres modèles, les SIG ont été intégrés. Les résultats obtenus illustrent d'une part, un rôle important des caractéristiques physiques du milieu dans l'évolution des polluants dans le sous-sol et d'autre part, une amélioration associée au programme de la fertilisation raisonnée ainsi qu'une dégradation ponctuelle liée aux rejets près des zones urbaines. Aussi, la prédiction de la pollution a été évaluée par des simulations prospectives selon divers scénarii qui mettent en jeu les facteurs tels que : la pluviométrie ou la recharge, l'activité agricole et les cultures utilisées ou encore l'amélioration de la gestion des eaux usées.

Le faciès chimique naturel des eaux souterraines répond à un déterminisme en partie dû à la nature lithologique des aquifères et des terrains traversés par l'eau. La pollution géogénique constitue la dernière partie de mes travaux. Le bassin Artois-Picardie n'est pas épargné par cette contamination qui rend difficile voire impossible l'exploitation de certains forages en raison de dépassement des seuils de potabilités. Ainsi, à travers des investigations, il a été mis en évidence l'influence du fonds géologique de nos sites dans l'apparition du nickel en solution. Les résultats confirment l'intérêt du rapport nickel/cobalt en tant qu'indicateur de l'origine naturelle ou anthropique du nickel dans les eaux des aquifères crayeux. Cet indice nous a permis de statuer rapidement une origine anthropique sur le site d'Houplin-Ancoisne et d'approfondir les recherches sur les sites de Flers-en-Escrebieux et Pecquencourt dont l'origine a été qualifiée de géologique. Pour le sélénium, il est apparu de manière manifeste que sa présence dans les champs captants de sud de Lille est d'origine essentiellement naturelle. Il est localisé dans les formations tertiaires et quaternaires, ce qui contrôle sa répartition spatiale dans les différents niveaux rocheux. Ainsi les caractéristiques du milieu et les conditions d'exploitation qui impactent la dynamique de la nappe, conditionnent la mobilisation du sélénium. A ceci, il faut ajouter les transferts entre forages et l'impact de l'infiltration de la recharge. Pour autant, il ne faut pas négliger les activités anthropiques de surface qui peuvent contribuer directement par un apport en sélénium et/ou indirectement en faisant intervenir les nitrates soit par oxydation ou en retardant la réduction du sélénium. A ceci s'ajoute l'apport possible des sédiments des cours d'eau. Au terme de ces travaux, les origines et les causes des fluctuations des teneurs en éléments traces, en particulier le nickel et le sélénium sont mieux cernés. Ces résultats constituent une base sérieuse pour la mise en place de programmes d'amélioration de la qualité des eaux produites dans les champs captant conformément à la Directive Européenne.

Il est envisagé pour la suite de mes travaux de recherche un intérêt confirmé pour les thématiques de l'érosion littorale et le recul du trait de côte qui représente un enjeu majeur pour les prochaines décennies en raison des changements climatiques qui se font ressentir de plus en plus. La pollution anthropique et géogénique continue à peser sur la qualité des eaux souterraines. Ce domaine m'intéresse toujours autant pour y apporter une expertise notamment dans d'autres pays. Enfin, mes nouveaux objectifs concernent en particulier la thématique des techniques alternatives pour la gestion de la ressource et des rejets. Cette thématique s'intègre dans la transition écologique visant à l'amélioration de l'état chimique et biologique de la ressource ainsi que, de manière générale, celui du milieu environnemental. Les techniques alternatives m'intéressent autant pour les aspects théoriques qu'expérimentaux que ce soit pour des modèles réduits, en laboratoire ou les essais in situ.

Annexes (sélection d'articles)

Il fallait faire un choix pour la rédaction de cette HDR. La sélection d'article qui suit fait référence aux thématiques traitées dans ce manuscrit. J'ai choisi de présenter des articles de revues internationales mais également des articles publiés dans des revues nationales. Même si elles sont moins bien cotées par les outils bibliométriques actuels, je considère ces publications importantes car ces articles sont lus par les opérationnels, ce qui me semble être un de nos objectifs dans nos recherches appliquées dans le domaine de l'eau.

Journal of Coastal Research	00	0	000-000	Coconut Creek, Florida	Month 0000
The Effect of Rock C	ollaps	e on C	Coastal Clif	ff Retreat along	Suitbuches
the Chalk Cliffs of N	orther	n Fra	ice		S
Jamal El Khattabi*, Erick Carlie	r, and Ba	rbara Lo	uche		ECC
Civil Engineering and Geo-Environment	Laborator	y .			91 FOUNDAT
University of Lille 1					
Polytech'Lille, Avenue Paul Langevin 59655 Villeneuve d'Ascq, France					www.cerl-jcr.org

ABSTRACT



El Khattabi, J.; Carlier, E., and Louche, B., 0000. The effect of rock collapse on coastal diff retreat along the chalk cliffs of northern France. Journal of Coastal Research, 00(0), 000–000. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Coastal retreat is a topic that concerns all countries located on the coastal edge. This is the case for the chalky diffs located in the north of France. Here, the cliff base is characterized by chalk rock rich in clay with low mechanical characteristics. To understand the appearance of rock collapses causing cliff retreat, the methodology applied in this report is based on an analytical study and numerical modeling. The model developed with CESAR (*i.e.* finite element software dedicated to stability) shows deformation affecting gray and blue chalk with separations reaching 3 cm. Simulations carried out with UDEC (*i.e.* Universal Distinct Element Code) show that constraints are organized around joints when the blocks neurrange themselves, and the effects are mainly seen at the base of the cliff. This study demonstrates the appearance of irregular conjugate fractures within the marly levels of the blue chalk. This type of fracture appears as a result of pressure from the overlying layers and the influence of lateral stress induced by the "Grand Blanc Nez" formation. These fractures propagate towards the gray chalk and set the limits of different blocks. The displacement of these blocks leads to the obstruction of conduits, which increases the water pressure. The destabilization of the cliff is reflected in the appearance of release cracks, which are strongly influenced by variations in groundwater level. These findings were verified by numerical modeling. This example demonstrates that rock collapses are responsible for coastline retreat in this area. The combination of unpredictable natural phenomena associated with a concentrated spatial area creates a high-risk coastal area retreating at around 0.25 m/y.

ADDITIONAL INDEX WORDS: Fracturing, geomechanics, collapse, coastline retreat, modeling.

INTRODUCTION

Coastal erosion is a natural phenomenon, but this process is not always the result of natural causes, because anthropogenic actions can lead to an imbalance, notably by limiting the volume of sand required for the stability of beaches (Paskoff, 1998). Littoral areas are naturally dynamic, and changes can occur on a short timescale and must be quantified to reach an understanding of the mechanisms at work. The evolution of the coastline is a very good indicator of these changes. Therefore, knowledge of coastal dynamics is a necessary precondition for the management of coasts and, in particular, beaches, which may contribute significantly to a local economy. To complete such an investigation successfully, it is often necessary to characterize how the position of the coastline has changed overtime (Grenier and Dubois, 1990; Paskoff, 1993). The morphological characteristics and historical context of the north coast of France (Opale coast), extending for 140 km from Authie's estuary in the south to the Belgian border in the north. have been the focus of several erosion studies (Battiau-Queney et al., 1995, 2003; Briquet, 1930).

Natural phenomena (mass movements, erosion) can affect the stability of the coastline by contributing to coastline retreat and threatening bordering houses or other structures or infrastructure (Genna *et al.*, 2005). Since the Second World War, techniques for the characterization of shoreline variations have advanced immensely (aerial photography, software for terrain correction, usage of GIS; *e.g.*, Chaaban *et al.*, 2012; Crowell, Leatherman, and Buckley, 1993; Gaillot and Chaverot, 2001; Moore, 2000; Robin, 2002). At a global level, as in France, the general trend is for coastal erosion. Thus, on sandy coasts, average retreats of between 0.5 and 1 m/y are most frequent, but these values can occasionally be much greater, for example, in the center of Wissant Bay (more than 4 m/y) in the Pas-de-Calais region (Meur-Férec and Morel, 2004).

Retreat of coastal cliffs is directly linked to the stability of rock masses. Mass movements depend on instability factors (e.g., El Khattabi and Carlier, 2004; Ghosh, Kumar, and Bora, 2014; Sjoberg, 1999), which can be internal (*i.e.* groundwater, geomechanics, slope, structure, and geological nature, *etc.*) and/or external (*i.e.* anthropogenic, swell, sea spray, wind, rainfall, *etc.*).

In Upper Normandy and Picardy (France), or in East Sussex and Kent (U.K.), cliff retreat occurs as a result of unpredictable and sudden collapses of vertical coastal cliffs composed entirely of chalk (Duperret et al., 2004; Hutchinson, 2002; Mortimore et al., 2004). In the north of France, coastline evolution depends on the nature of the shoreline (sand or bedrock) but also on the geological nature of the cliffs (Figure 1). Thus, sandy coasts are marked by retreat, which can be more than 4 m/y; this is the case in Wissant Bay. The cliffs there consist of lithological successions of sandstones and clays of Upper Jurassic age,

DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-16-00116.1 received 27 June 2016; acceptal in revision 21 February 2017; corrected proofs received 5 May 2017; published pre-print online XX Month XXXX. *Corr esponding author; jamal.elkhattabi@univ-lille1.fr *Coastal Education and Research Foundation, Inc. 2018



Engineering Geology

Volume 71, Issues 3-4, February 2004, Pages 255-264



Tectonic and hydrodynamic control of landslides in the northern area of the Central Rif, Morocco

Jamal El Khattabi^{1,} [™], Erick Carlier ≜ · [™] 표 **Show more**

http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00137-6

Get rights and content

Abstract

The northern edge of the Central Rif (Morocco) is subject to numerous landslides where mechanisms do not correspond to the classical models used by geomechanics specialists. It is necessary to adopt a multidisciplinary approach that combines geomorphology, geology, hydrogeology, and geotechnics in order to understand how such slope failures are generated, especially in a region with a heterogeneous structure characterised by significant lithological differences, severe fracturing, and thrust sheets where tectonic contacts play a major role in groundwater circulation. This report shows that these failures are essentially controlled by the tectonic contact separating the Tisirene and Chouamat thrust sheets and by subsurface hydrodynamic conditions. A model of spatial and temporal variations in the factor of safety is proposed.

Keywords

Instability; Central Rif; Hydrodynamics; Geologic structure; Rupture model

Environ Earth Sci DOI 10.1007/s12665-011-1080-2

ORIGINAL ARTICLE

Geographical information system approach for environmental management in coastal area (Hardelot-Plage, France)

Fadi Chaaban · Hanan Darwishe · Barbara Louche · Yvonne Battiau-Queney · Eric Masson · Jamal El Khattabi · Erick Carlier

Received: 30 April 2010/Accepted: 24 April 2011 © Springer-Verlag 2011

Abstract The use of geographic information system (GIS) minimizes the effort and improves the efficiency of numerical models. The GIS provides a platform for high capacity collection, management, manipulation, analysis, modeling and display of spatial data. The conceptual model is created using GIS objects including points, arcs and polygons so that it can accurately represent real world condition. According to the research problem, the geographical model is based on Hypergraph Based Data Structure method, and a conceptual data model has been created from which a physical data model was elaborated in ArcGIS9.3 platform. The groundwater modeling system (GMS) provides a powerful tool for hydrodynamics modeling and it is able to solve complex problems such as the groundwater flow and seawater intrusion. The sand-dune system of Hardelot-Plage (North of France) suffers from a lack of well-developed foredune. This problem is linked to the almost constant saturation of beach sand which is the potential source of dune nourishment. In the south of

F. Chaaban (⊠0) · H. Darwishe · J. El Khattabi · E. Carlier Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Université Lille1: Sciences et Technologies, Polytech'Lille, Avenue Paul Langevin, 59650 Villeneuve d'Ascq, France e-mail: fadish81@yahoo.com

B. Louche Faculty Jean Perrin, Université Artois, Lens Cedex, France

Y. Battiau-Queney Laboratoire de Préhistoire, Géomorphologie et Quaternaire, UFR de Géographie, Université Lille1: Sciences et Technologies, Lille, France

E. Masson

Laboratoire Territoires, Villes, Environnement et Société, UFR de Géographie, Université Lille1: Sciences et Technologies, Lille, France

Published online: 20 May 2011

Hardelot, the coastline is slowly, but constantly retreating. To remedy this situation, a coupling between a GIS and GMS was adopted, in order to find the possible scenarios which could lower the piezometric surface in the concerned area and allow dune nourishment again. The GMS used supports the Modflow-2000 code. A direct approach to designing Modflow finite difference model is tedious and less intuitive, specifically for complex boundary and initial conditions. Therefore, a Modflow model can be developed either using a grid or conceptual model approach. The preparation of input data modeling is tedious and takes a long time. The model created in GMS was calibrated against the historical and observed water level data for 1995-2006. Then a hydrodispersive model (MT3d code in GMS) was launched for evaluating sea-water intrusion. The model was run to generate groundwater and salt concentration scenario during pumping tests.

Keywords GIS · MODFLOW · HBDS · Shoreline · Conceptual model · Seawater intrusion

Introduction

Currently, the technology of numerical modeling has become a method increasingly used by researchers and managers for managing water resources (Marsily 1981; Konikow 1996; Konikow and Reilly 1998). There are many groundwater modeling software (visual, numerical) based on different methods, such as groundwater modeling system (GMS) (EMRL 2005). GMS supports several types of numerical codes and provides a complete interface for the MODFLOW code (hydrodynamic modeling), MT3D code (contaminant transport modeling), etc. Geographic information system (GIS) is more and more used and

D Springer

Résumé

Démarche méthodologique pluridisciplinaire pour l'étude des instabilités de versants : application aux glissements du Rif central (Maroc)

Les instabilités de terrain font l'objet de nombreuses études regroupées en deux grandes méthodes : les méthodes naturalistes et les méthodes mécaniciennes. Ces méthodes, qui adoptent une approche qualifiée de linéaire, aboutissent souvent à des résultats partiels, d'où l'intérêt de la mise en place d'une approche transversale. Dans cet article, nous avons formulé une démarche méthodologique pluridisciplinaire qui s'appuie sur une approche transversale. Elle associe à la fois géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique. Le fondement de la méthodologie repose sur une analyse de l'instabilité, suivie d'une modélisation et d'une cartographie.

Pour mettre en pratique la méthodologie, une première expérimentation a été effectuée dans les versants nord du Rif central (Maroc). Les résultats obtenus ont permis d'identifier les facteurs macrodéstabilisateurs et les mécanismes microdéstabilisateurs à l'origine des instabilités en révélant le rôle du charriage tectonique. L'intégration de ces résultats dans un modèle de rupture nous a conduits à la réalisation de simulations en 2D. Cette méthodologie peut s'avérer particulièrement appropriée pour analyser et modéliser les phénomènes et cartographier les risques en zones rurales ou urbaines implantées dans des sites potentiellement instables.

Mots-clés : démarche méthodologique pluridisciplinaire, instabilités, facteurs macrodéstabilisateurs, mécanismes microdéstabilisateurs, Rif central.

Multidisciplinary methodological process for the study of slope instabilities : application to landslides in the Central Rif (Morocco)

Abstract

Ground instabilities have been the subject of numerous studies using two main methods: the naturalist and the mechanic methods. Those methods use an approach described as linear often lead to partial results, which makes it necessary to set up a transversal approach.

In this paper we have elaborated a multidisciplinary methodological process, based on a transversal approach associating geomorphology, geology, hydrogeology and geotechnics.

The base of the methodology lies on instability analysis followed by modeling and mapping.



Laboratoire artois mécanique et habitat (LAMH) Équipe hydrologie, sol et environnement (HSE) Université d'Artois, Faculté des sciences appliquées de Béthune Technoparc Futura 62400 Béthune

REVUE FRANÇAISE DE GÉOTE

Trav. Inst. Sci. Rabat, Série Géol. & Géogr. phys., nº 21, 2003, p : 241 - 252

Etude des glissements de terrain dans la région nord du Rif Central (Maroc): Analyse et modélisation

Jamal EL KHATTABI, Cherif BOULEMIA, Erick CARLIER et Eric HENRY

Laboratoire Artois Mécanique et Habitat, Equipe Hydrologie, Sol et Environnement Université d'Artois Technoparc Futura 62400 Béthune, France, e-mail : Jamal.el-khattabi@fsa.univ-artois.fr

Résumé.- Dans le nord du Maroc, les versants naturels, ainsi que les talus routiers sont souvent affectés par différents mouvements de terrain. Dans la région nord du Rif Central, caractérisée par des matériaux essentiellement schisto-gréseux-carbonatés (domaine des flyschs), ces phénomènes sont divers. Cependant, ceux liés aux glissements plans se démarquent par leur dimension et les dégâts causés. Afin de comprendre la genèse de ces mouvements ainsi que les facteurs et les mécanismes mis en jeu, nous avons effectué une étude globale axée approche pluridisciplinaire qui associe à la fois géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique. Cette approche a permis d'identifier à la fois les facteurs et les mécanismes micro-déstabilisateurs associés. Ces derniers ont été intégrés dans un modèle de rupture, permettant d'évaluer le coefficient de sécurité (Fs) dans un modèle spatio-temporel.

Mots clés. – Approche pluridisciplinaire, Rif Central, Glissement plan, Facteurs macro-déstabilisateurs, mécanismes micro-déstabilisateurs, modèle de rupture.

Absract : Landslides study in the northern area of Central Rif (Morocco) : Analyze and modelling : In the north of Morocco, natural slopes, as well as the road slopes are often affected by various movements of ground. It is the same for the area of central Rif characterized primarily by sandy, shistose and carbonated materials. These phenomena are varied, however, those related to the deep plane slips are dissociated by their dimension and their caused damages. In order to understand the genesis of these movements as well as the factors and the concerned mechanisms, we carried out a general study centered on a multidisciplinary approach involving simultaneously geomorphology, geology, hydrogeology and geotechnics. This approach allowed at the same time to determine the macro-destabilizing and their associated micro-destabilizing mechanisms. The latter were integrated in a model of rupture which allows to evaluate the safety coefficient (Fs) in a space-time model.

Key words. - Multidisciplinary approach, Central Rif, plane slip, Macro-destabilizing factors, Micro-destabilizing mechanisms, Rupture model.

INTRODUCTION

La future liaison côtière entre Tétouan et Al Hoceima dans le nord marocain est d'une importance primordiale pour cette région. Cependant, l'actuelle liaison, la nationale n°2, est souvent perturbée par de nombreux mouvements de terrain très fréquents dans la région. La faisabilité de la nouvelle route côtière demande donc de nouvelles études, prenant en compte des plans d'aménagements globaux. Notre recherche, menée en collaboration avec la Direction Générale de l'Hydraulique (Maroc), porte sur les instabilités de versants et s'appuie sur une approche pluridisciplinaire associant à la fois géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique. L'objectif est de définir les facteurs et les mécanismes qui engendrent les glissements de terrain afin de mieux les évaluer, les modéliser et d'établir un outil d'aide à la prévention de ces risques.

 Tableau I. Critères et supports d'identification des glissements plans profonds dans le Rif central. Degré des critères : XXX : fort,

 XX : moyen,
 X : faible,
 sans : nul.

Critère d'identification	Lié à l'activité	Moyen de repérage								
		Cartes topographiques	Carte géomorphologique	Carte géologique	Photos aériennes	Observations terrain				
formations superficielles d'éboulis	naturelle : dislocation et dépôt	RINA	xxx	XXX	xx	xxx				
niches d'arrachements et escarpements	naturelle	x	XXX	XXX	XXX	xxx				
irrégularités topographiques	naturelle	XXX	XX	х	XXX	XXX				
ligne de rivage	naturelle	XXX	RN2 -		XXX	XX				
amas d'éboulis	anthropique	and the second of a	and winder the same	Tanke showingst	XXX	XXX				
Sources	naturelle	XX	Xeniom			XXX				
habitations et agriculture	anthropique	XXX	: I : Localisation du se	X Figur	XXX	XXX				
évolution actuelle		Х	XXX	XX	XXX	XXX				



Available online at www.sciencedirect.com



MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

Mathematical and Computer Modelling 42 (2005) 1137-1144

www.elsevier.com/locate/mcm

Proposal for a Probabilistic Model of Dispersion: A First Validation

E. CARLIER^{*} AND J. EL KHATTABI Centre de Calcul et de Modélisation de Lens Faculté Jean Perrin, Université d'Artois SP 18, rue Jean Souvraz, 62 307 Lens cedex, France carlier@univ-artois.fr

(Received and accepted May 2004)

Abstract—The probabilistic approach is used to simulate the particle tracking for two types of porous media. The first one is sand grains with a single intergranular porosity. The particle tracking is carried out by advection and dispersion. The second one is chalk granulates with intergranular and matrix porosities. Sorption can occur with advection and dispersion during particle tracking.

The particle tracking is simulated as the sum of elementary steps with independent random variables in the sand medium. An exponential distribution is obtained for each elementary step and shows that the whole process is Markovian. A gamma distribution or probability density function is then deduced. The relationship between dispersivity and the elementary step is given using the central limit theorem.

The particle tracking in the chalky medium is a non-Markovian process. The probability density function depends of a power to the distance. Experimental simulation by dye tracer tests on a column have been performed for different distances and discharges.

The probabilistic approach computations are in good agreement with the experimental data. The probabilistic computation seems an interesting and complementary approach to simulate transfer phenomena in porous media with respect to the traditional numerical methods. @ 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords-Particle, Tracking, Groundwater, Dispersion, Modelling.

1. INTRODUCTION

The probabilistic approach of particle tracking in natural environment is not new. It was used successfully in sedimentary transport [1,2] in solutes transfer in porous medium without sorption phenomena [3,4] and in solutes transfer in fissured medium [5–7]. The modelling of particle tracking in a porous or fissured medium with sorption capacity is very difficult when the exchange coefficients between matrix and water are difficult to estimate. The modelling of such a process is carried out by the resolution of the dispersion equation by taking account of the sorption phenomena [8–17]. According to these authors, the models are very sensitive to the exchange coefficient values. The error on these coefficients must be very weak in order to keep the model reliable. Furthermore, particle tracking modelling using the classic solution of the

[&]quot;Author to whom all correspondence should be addressed.

^{0895-7177/05/8 -} see front matter © 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved. Typeset by AAAS-TEX doi:10.1016/j.mcm.2004.05.014

Environ Geol (2009) 57:1579-1592 DOI 10.1007/s00254-008-1433-7

ORIGINAL ARTICLE

Impact of fertilizer application and urban wastes on the quality of groundwater in the Cambrai Chalk aquifer, Northern France

Hani Serhal · Daniel Bernard · Jamal El Khattabi · Bastin-Lacherez Sabine · Isam Shahrour

Received: 22 September 2007/ Accepted: 11 June 2008/ Published online: 8 July 2008 © Springer-Verlag 2008

Abstract Since 1975, Europe sets up its policy to limit the degradation and the pollution of the aquatic environments through 30 directives and regulations. In the north of France, the nitrate concentrations measured in the groundwater exceed the water drinking limit fixed at 50 mg/L by the European framework directive in the field of water (2000/60/EC). This high concentration is due to intensive agriculture, industrialization and demographic growth. Several programs were launched in order to resolve this situation: "Ferti-better" or the use of fertilizer in moderation and installation and amelioration of wastewater collect and treatment systems. In order to estimate the influence of the anthropic activities on the quality of groundwater in the "Artois-Picardy" basin, a preliminary validation on parcel and district scale were necessary. The impact of these programs in the "Cambrai district" was evaluated using an integrated approach, which is based on the use of four numerical models: AgriFlux, VS2DT,

H. Serhal (M) · D. Bernard · J. E. Khattabi · B.-L. Sabine · I. Shahrour Laboratoire de Mécanique de Lille (CNRS UMR 8107), Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), Polytech-Lille, Avenue Paul Langevin, 59655, Villeneuve d'Ascq cedex, France e-mail: hserhal@polytech-lille.fr

D. Bernard e-mail: D.bernard@eau-artois-picardie.fr

J. E. Khattabi e-mail: Jamal.Elkhatabi@polytech-lille.fr

B.-L. Sabine e-mail: sabine.bastin@soreg.fr

I. Shahrour e-mail: Isam.Shahrour@polytech-lille.fr Modflow and MT3D. The results illustrate an improvement due to the "Ferti-Better" program initiated in 1990 and punctual degradation under urbanized areas. Predictions (2015) show a spatial evolution of nitrates concentration varying with the thickness of unsaturated layer. The integrated model constitutes an efficient tool for predicting the evolution of the groundwater quality. This approach is important to control the application of the new European laws in the water field.

Keywords Nitrate · Wastewater · Fertilization · Water quality · Chalk aquifer · Modeling

Introduction

The high concentration of nitrate in the chalk aquifer in the North of France is a result of farming activity (Préaux 1986; Maison 2000; Lacherez-Bastin 2005), industrialization and demographic growth (Serhal 2006). The massive use of fertilizers during the 1960–1970s, together with the untreated domestic and industrial waste water has largely contributed to the pollution of this aquifer. Ford and Tellam (1994) and Lemer et al. (1999) showed that the nitrate concentrations in the groundwater of urban areas are higher than those in the agriculture area. An evaluation of the nitrogen infiltration in the aquatic environment in Denmark showed that more than 85% of this infiltration was due to agriculture, whereas urban nitrogen represented only 15% of this infiltration (Schroder et al. 1985).

The European Framework Directive related to water policy (2000/60/EC) imposes the nitrate limit concentration in drinking water at 50 mg/L. The order of December 2001 introduced in French right the terms of this directive. This limit of 50 mg/L existed in France since 1989, and it

2 Springer

Environ Geol (2008) 53:1129-1138 DOI 10.1007/s00254-007-0704-z

ORIGINAL ARTICLE

Origin of nickel in water solution of the chalk aquifer in the north of France and influence of geochemical factors

Daniel Bernard · Jamal El Khattabi · Emilie Lefevre · Hani Serhal · Sabine Bastin-Lacherez · Isam Shahrour

Received: 4 October 2006/Accepted: 26 February 2007/Published online: 21 March 2007 © Springer-Verlag 2007

Abstract In the north of France, high registers of nickel are sometimes recorded within the chalk aquifer. In a confined context, the presence of pyrite in the covering clays or in the marcasite nodules encrusted in the clay may constitute a natural source of trace metals. With an objective of sanitary control, the limits of chemical contents regulating the quality of water destined for human consumption have been lowered by the European Framework Directive in the field of water policy (2000/60/EC). As a result, nickel limits have been reduced from 50 to 20 µg/l. The analyses, carried out on three water catchment fields in our area of study, were centred on variable parameters (Eh, O2(d), pH, Conductivity, To), major elements (SO4, NO3) and metals (Fe, Ni, Mn, Co). The acquired data enabled us to identify from one hand, the conditions which are presented within the site, special thanks to the evolution of nitrate and iron contents and on

D. Bernard - J. El Khattabi (M) - E. Lefevre -H. Serhal - S. Bastin-Lacherez - L. Shahrour Laboratoire de Mécanique de Lille (CNRS UMR 8107), Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), Polytech-Lille, Avenue Paul Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France e-mail: Jamal Elkhatabi@polytech-lille.fr D. Bernard

e-mail: D.bernard@eau-artois-picardie.fr

- E. Lefevre e-mail: Emilie.Lefevre@veoliaeau.fr H. Serhal
- e-mail: hserhal@polytech-lille.fr
- S. Bastin-Lacherez e-mail: sabine.bastin@soreg.fr
- I. Shahrour

e-mail: Isam.Shahrour@polytech-lille.fr

the other hand, the natural origin (geological) of nickel for two of the three sites studied based essentially on the evaluation of the Nickel/Cobalt ratio. Thus, on the first site, the evolution of nickel content and nitrate content showed the influence of the phenomenon of denitrification on the re-mobilisation of the nickel. Whereas on the second site, a high variation of total iron content and oxygen dissolved in solution highlighted a particular phenomenon of oxidation of the pyrite through molecular oxygen. Finally, the correlation with the sulphates clearly showed behaviour of the nickel, once released, that was entirely dependent on the phenomenon of adsorption on the iron and manganese hydroxides.

Introduction

Nickel is present at the trace state in many minerals (olivine, pyrites,...); it is also used in numerous alloys thanks to its characteristics of hardness and corrosion resistance. Its anthropogenic origin is related to mining activities or surface treatment. In natural water, the prevalent shape of nickel is Ni [2⁺], which is adsorbed easily by manganese and iron oxides. It is not common in surface water because it is fixed on the sediments of the rivers. In groundwater, according to conditions of pH and Eh, nickel could exist in dissolved form (Valley 1999; Atteia 2005).

In the natural environment, underground water has generally very low rates of nickel. In the region of Northern France, the layer of chalk which supplies nearly 97% of water requirements is subjected to strong anthropogenic stress (intensive agriculture, industrialisation,

D Springer
Applied Geochemistry 48 (2014) 70-82



Tracking selenium in the Chalk aquifer of northern France: Sr isotope constraints



L. Cary^{a,*}, H. Benabderrazig^b, J. Elkhattabi^b, L. Gourcy^a, M. Parmentier^c, J. Picot^c, M. Khaska^d, A. Laurent^a, Ph. Négrel^a

^aBRGM (French Geological Survey), 3 av. C. Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans Gedex 2, France ^b University of Lille 1, Polytech Lille, Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement, Lille, France

⁶BRGM, Synergie Park, 6 ter rue Pierre et Marie Curie, 59260 Lezennes, France
^d GIS Laboratory, University of Nimes, Georges Besse Scientific Park, Georges Besse Street 150, Nimes Cedex 1 30035, France

ARTICLE INFO.

Article history: Available online 16 July 2014 Editorial handling by M. Kersten

ABSTRACT

Groundwater at the southern and eastern edges of France's Paris Basin has a selenium content that at times exceeds the European Framework Directive's drinking-water limit value of 10 µg/L. To better understand the dynamics of the Chalk groundwater being tapped to supply the city of Lille and the Se origins, we used a combination of geochemical and isotopic tools. Strontium isotopes, coupled with Ca/Sr, Mg/Sr and Se/Sr ratios, were used to identify the main groundwater bodies and their mixings, with the Mg/Sr and Se/Sr ratios constraining a ternary system. Groundwater in the agricultural aquiferrecharge zone represents a first end-member and displays the youngest water ages of the catchment along with the highest Sr isotopic signature (0.70842) and low Se contents. Anaerobic groundwater constitutes a second major end-member affected by water-rock interactions over a long residence time, with the lowest Sr isotopic signature (0.70789) and the lowest Se content, its low SF6 content confirming the contribution of old water. Se-rich groundwater containing up to 30 ug/L of Se represents a third major end-member, with an intermediate Sr isotopic ratio (0.70826), and is mainly constrained by the clayey Se-rich formation overlying the Chalk aquifer. The spatial and temporal Se variability in the groundwater is clearly linked to the presence of this formation identified as Tertiary and also to the hydrological conditions; saturation of the Se-rich clays by oxygenated groundwater enhances Se mobility and also Sr adsorption onto the clays. This multi-tool study including Sr isotopes successfully identified the Se origins in the aguifer and has led to a better understanding of the regional mixing and processes affecting the Chalk groundwater.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

High concentrations of selenium (Se) in both surface and groundwaters over the past 30 years have emerged as a major issue world-wide. Se, which occurs naturally as a trace constituent in geologic formations e.g. Cretaceous black shale in the USA (Kulp and Pratt, 2004; Tuttle et al., 2014a) and associated soils, is currently contaminating catchments in mining areas (Chuncai et al., 2014; Liu et al., 2013; Vengosh et al., 2013), irrigated alluvial valleys (Bailey et al., 2013, 2012; Bajaj et al., 2011; Deverel and Gallanthine, 1989; Dhillon and Dhillon, 2003; Gates et al., 2009; Tuttle et al., 2014b), wetlands (Zawislanski et al., 2001; Zhang et al., 2012), and sediments (Beisner et al., 2009; Guan and Martin, 1991; Masscheleyn et al., 1990; Oremland et al., 1989)...

http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.07.014 0883-2927/@ 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Se is a non-metallic element of both nutritional and toxicological importance, but the window between its beneficial contribution to health and its toxic contribution (from excess to deficiency) is very narrow and the safety margin is unknown (Vinceti et al., 2009). Barron et al. (2012) showed that the main human Se inputs come from drinking water in regions where the groundwater has a high Se level. For the purpose of health control, the Water Framework Directive (2000/60/EC) defines an Se threshold value of 10 µg/L for human consumption. Nevertheless, there is no consensus on what is an appropriate standard of Se intake and Vinceti et al. (2013) have reaffirmed the need for a reassessment of the safe upper limit of selenium in drinking water.

Analyses of some groundwater bodies at the southern and eastern edges of France's Paris Basin over the past decade have shown a high Se content (Fig. 1) which raises concern as regards groundwater and tap-water quality. The high Se content in the Paris Basin is related mainly to the presence of Eocene, mainly Ypresian, and

^{*} Corresponding author. Tel.: +33 (0)238643260. E-mail address: Leary@brgm.fr (L. Cary).

Journal of Coastal Research	28	6	1567-1579	Coconut Creek, Florida	November 2012

Using ArcGIS[®] Modelbuilder and Aerial Photographs to Measure Coastline Retreat and Advance: North of France

Fadi Chaaban[†], Hanan Darwishe[†], Yvonne Battiau-Queney[‡], Barbara Louche[§], Eric Masson^{††}, Jamal El Khattabi[†], and Erick Carlier[†]



www.cerf-jcr.org

"Laboratoire Territoires, Villes,

Environnement et Société

Sciences et Technologies, France

UFR de Géographie

Université Lille 1

"Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE) Polytech'Lille Avenue Paul Langevin 59650 Villeneuve d'Ascq Université Lille 1 Sciences et Technologies, France fadish81@yahoo.com ¹Laboratoire de Préhistoire ¹Faculty Jean Perrin Géomorphologie et Quaternaire Université Artois, France Unité de Formation et de Recherche (UFR) de Géographie Université Lille 1 Sciences et Technologies, France

ABSTRACT



www.JCRonline.org

Chaaban, F.; Darwishe, H.; Battiau-Queney, Y.; Louche, B.; Masson, E.; El Khattabi, J., and Carlier, E., 2012. Using ArcGIS[®] Modelbuilder and aerial photographs to measure coastline retreat and advance: North of France. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1567–1579. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Coastal areas are naturally dynamic with changes occurring over periods of time. When the shoreline moves landward, coastal erosion becomes a serious problem, and the rate of change has to be calculated. Coastline retreat is one of the best indicators of coastal erosion. Here, the geographic information systems (GIS) platform (ArcGIS[®] 9.3.1; Esri software) is used to study the long-term (last 59 years) shoreline change in the area of Hardelot-Plage and Sainte Cécile–Plage (a north–south 14-km-long beach), in northern France. The primary aim of this study was to develop a methodology for calculating shoreline change using ArcGIS Modelbuilder and aerial photographs. Changes in 14 coastlines over the course of 59 years (from 1946 to 2005) were digitized and represented in ArcGIS 9.3.1 platform. Two hundred and ninety-two transects perpendicular to the shoreline were used to estimate coastal erosion and deduce the recession rate.

The Modelbuilders (two models) created and used in this work are generic models that can be used for geoprocessing linear features. One model can be used to ascertain the intersection between linear features (transects and shorelines), adding a new field to the attribute table and calculating the geometry of the intersection points. A second model can be used to add a new field to the attribute table and calculate the distance on the transect lines between the linear reference feature and other linear features, in this study between the baseline (established adjacent to the series of shoreline positions) and the shoreline. The results show that the shoreline change rates between 1947 and 2005 along the Hardelot and Sainte Cécile coasts are generally negative; 82.2% of transects have values less than zero (*i.e.*, retreat) and outside of the error margin (± 10 m). Nevertheless the shoreline change shows successive phases of advance and retreat over the same period.

ADDITIONAL INDEX WORDS: GIS, shoreline change, ArcGIS, Modelbuilder, aerial photographs, coastal erosion, linear features, northern France.

INTRODUCTION

Coastal erosion is of growing concern around the world (Bartlett and Smith, 2005). It is caused by natural forces such as currents, waves, storm surges, and winds, as well as anthropogenic developments (Heo, Kim, and Kim, 2009; Paskoff, 1998). It is a global problem and has economic implications for coastal tourism and sustainable development. Coastal changes are considered to be environmental indicators, all the more important, given that they directly impact coastal economic development and land management (Stokkom, Stokman, and Hovenier, 1993). Shoreline changes can be used as a good indicator of possible coastal erosion. The best indicator for describing coastline erosion is the shoreline retreat rate (Heo, Kim, and Kim, 2009). Several scientists have studied coastal erosion (Dolan and Vincent, 1972; Dolan *et al.*, 1979; Stafford and Langfelder, 1971; Zhang, Douglas, and Leatherman, 2004). Many methods have been proposed to measure coastal retreat. Among them are (i) the baseline approach (Dolan, Hayden, and Heywood, 1978); (ii) the dynamic segmentation approach (Liu, 1998; Li, Liu, and Felus, 2001; Srivastava *et al.*, 2005); (iii) the areabased approach (Ali, 2003); and (iv) the buffering and nonlinear least squares estimation approach (Heo, Kim, and Kim, 2009).

The baseline approach (also known as the transect approach) was proposed by Dolan Hayden, and Heywood (1978). In this method a baseline is chosen that is approximately parallel with the coastline, then the extent of retreat can be calculated by measuring orthogonal offsets of the transect lines. This method is popular and has been used in many studies of shoreline retreat (Hardaway *et al.*, 2001; Stewart, 1994).

Geographic information systems emerged in the 1970s and have been used in the 2000s in studies of coastal evolution (Leatherman, 2003). Various sources of data on the position of the coastline (aerial

DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00054.1 received 16 March 2011; accepted in revision 24 October 2011.

Published Pre-print online 1 February 2012.

[©] Coastal Education & Research Foundation 2012

HYDROLOGICAL PROCESSES Hydrol. Process. 20, 1047–1055 (2006) Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.5931

Solute transport in sand and chalk: a probabilistic approach

E. Carlier,1* J. El Khattabi1 and J. L. Potdevin2

¹ Centre de Calcul et de Modélisation de Lens, Faculté Jean Perrin, Université d'Artois, SP 18, rue Jean Souvraz, 62 307 Lens cedex, France

² Laboratoire des Processus et Bilans Sédimentaires, UMR 8110, Bât. SN5, Université des sciences et technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France

Abstract:

A probabilistic approach is used to simulate particle tracking for two types of porous medium. The first is sand grains with a single intergranular porosity. Particle tracking is carried out by advection and dispersion. The second is chalk granulates with intergranular and matrix porosities. Sorption can occur with advection and dispersion during particle tracking.

Particle tracking is modelled as the sum of elementary steps with independent random variables in the sand medium. An exponential distribution is obtained for each elementary step and shows that the whole process is Markovian. A Gamma distribution or probability density function is then deduced. The relationships between dispersivity and the elementary step are given using the central limit theorem.

Particle tracking in the chalky medium is a non-Markovian process. The probability density function depends on a power of the distance. Experimental simulations by dye tracer tests on a column have been performed for different distances and discharges.

The probabilistic approach computations are in good agreement with the experimental data. The probabilistic computation seems an interesting and complementary approach to simulate transfer phenomena in porous media with respect to the traditional numerical methods. Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

KEY WORDS chalk; sand; dye tracers; groundwater; dispersion; sorption; probability; modelling

INTRODUCTION

The probabilistic approach of particle tracking in a natural environment is not new. It was used successfully in sedimentary transport (Einstein, 1937; Yang and Sayre, 1971), in solutes transfer in a porous medium without sorption phenomena (Todorovic, 1967, 1970) and in solutes transfer in a fissured medium (Neretnieks, 1980, 1981, 2002). The modelling of particle tracking in a porous or fissured medium with sorption capacity is very difficult when the partition coefficients between matrix and water are difficult to estimate. The modelling of such a process is carried out by resolution of the dispersion equation that has to take into account sorption phenomena (Cameron and Klute, 1977; Sudicky and Frind, 1981, 1982; Maloszewski and Zuber, 1982, 1985, 1989, 1990, 1991; Zheng and Bennett, 1995; Pang *et al.*, 2003). According to these authors, the models are very sensitive to the partition coefficient values. The error on these coefficients must be very weak in order to keep the model reliable. Furthermore, particle-tracking modelling using the classical solution of the dispersion equation leads to an increase in apparent dispersivity with distance if adsorption phenomena occur but are not taken into account, or if the adsorption isotherm is wrongly considered to be linear (Carlier and Boulemia, 2002). The aim of this paper is to derive dispersion equations in a porous medium using a probabilistic

Copyright © 2006 John Wiley & Sons, Ltd.

Received 3 February 2004 Accepted 9 February 2005

^{*}Correspondence to: E. Carlier, Centre de Calcul et de Modelisation de Lens, Faculté Jean Perrin, Université d'Artois, SP 18 rue Jean Souvraz, 62 307 Lens cedex, France. E-mail: carlier@univ-artois.fr

Open Journal of Modern Hydrology, 2015, 5, 11-18 Published Online April 2015 in SciRes. http://www.scirp.org/journal/ojmh http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2015.52002



A Probabilistic Approach for Spring Recession Flows Analysis

Erick Carlier, Jamal El Khattabi

University Lille 1-Sciences and Technologies, Polytech'lille, LGCgE Villeneuve d'Ascq, France Email: <u>erick.carlier@polytech-lille.fr</u>

Received 1 December 2014; accepted 25 March 2015; published 27 March 2015

Copyright © 2015 by authors and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> © 0 Open Access

Abstract

Spring recession flows are analyzed from a Bayesian point of view. Two general equations are derived and it is shown that the classical formulas of recession flow are particular cases of both equations. It is shown that most of the recession equations reflect a non-Markovian process. That means that the groundwater storage exhibits a memory effect and that there is a nonlinear relationship between flow and storage. The Bayesian approach presented in this paper makes it possible to give a probabilistic meaning to recession flow equations derived according to a physical approach and can be an alternative to the study of complex reservoir for which the physical processes governing recession flow are unclear. Twelve spring recession flow series are analysed in order to validate the probabilistic approach presented in this paper and a conceptual model of storage- outflow is proposed.

Keywords

Recession, Spring, Groundwater, Bayesian Approach, Markovian Process

1. Introduction

The description of recession can have a variety of applications in hydrologic studies, including the evaluation of aquifer properties and the sustainability of ground-water discharge. Low flow characteristics have been increasingly utilized in recent years as the demand for water has increased. Information on low flow characteristics provides threshold values for different water-based activities and is required for water resource management issues such as water supply, irrigation, and water quality and quantity estimates. An understanding of the outflow process from groundwater or other delayed sources is also essential in studies of water budgets and catchment response.

The most commonly used method of modelling baseflow recession is to use a linear store. This method has a

How to cite this paper: Carlier, E. and El Khattabi, J. (2015) A Probabilistic Approach for Spring Recession Flows Analysis. Open Journal of Modern Hydrology, 5, 11-18. http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2015.52002



Analyse et modélisation hydro-géo-mécamique : Applications aux processus d'instabilité de terrain et à la gestion optimisée de la ressource en eau

VOLUME 11 • NUMBER 1 • 2004

SSN: 1117 - 370X

Africa Geoscience Review, Vol. 11, No. 1, pp. 1-15, 2004. Printed in France 1117-370X/2004 All rights reserved © 2004 Rock View Ltd

Typologie, analyse et cartographie des glissements de terrains dans le Rif Central (Maroc)

J. EL KHATTABI, E. CARLIER*, B. LOUCHE

Université d'Artois, Centre de Calcul et de Modélisation de Lens, Faculté Jean Perrin, rue Jean Souvraz, SP 18, 62307 Lens cedex, France *corresponding author

(First received 22 July, 2003; modified version accepted 7 May, 2004)

Résumé - Dans le nord du Maroc, les versants naturels ainsi que les talus routiers sont fréquemment affectés par différents types de mouvements de terrain. Une approche pluridisciplinaire, associant géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique, s'avère nécessaire pour comprendre la genèse des glissements de la région du Rif Central (domaine des flyschs). Dans cette note sont présentés les résultats préliminaires de l'étude concernant la distinction entre la dynamique superficielle et la dynamique profonde, ainsi que ceux relatifs aux facteurs et mécanismes générateurs des instabilités. Il est montré que les glissements sont contrôlés par le contact tectonique (charriage) qui sépare les nappes de Tisirène et de Chouamat, par les caractéristiques mécaniques des matériaux schisteux altérés appartenant aux formations sommitales de l'unité de Chouamat et par le gradient hydraulique souterrain.

Mots clés : Rif Central, géomorphologie, néotectonique, glissements de terrains, charriage.

Typology, analysis and cartography of the landslides in Central Rif (Morocco)

Abstract: The devastating effects of slope instability on both human lives and properties have led to a research policy on this kind of natural risks and especially, on the destabilisation of natural slopes and road embankments or cuts. The aim of such a research is to identify the factors responsible for such an instability, supposed to be essential for the development of reliable predictive models.

Owing to the complexity of the phenomena, clearly related to local field settings, including kinetics and complex mechanical and hydraulic processes, it is extremely difficult to characterize the different operative mechanisms. Solving this problem includes a variety of observations and mechanical study methods, which must be associated. It seems increasingly obvious that such a multidisciplinary approach is required in building valuable predictive models.

In North Morocco, natural slopes as well as road banks are often affected by ground movements. An approach combining geomorphology, structural geology, hydrogeology and geotectonics, proves to be necessary in order to understand the genesis of slope instability in the Central Rif (the "flyschs domain"). This paper offers preliminary results distinguishing the influence of subsurface dynamics (tectonics) from major superficial mechanisms of instabilities. As a result of this study, we insist on the major influence of the materials implied in landslides. The systematic involvement of a schistose weathered material at the base of the thrusted units referred to as the Chouamat thrust sheet, highlights the role of the crushed sediments separating the thrusted units in the location of dislocated slopes. This is triggered by the abundance of groundwater, pouring along a line of numerous springs. The major slides are plane surface type, their head being initiated along tectonic contacts. Many in land areas have beed dislocated by large-sized slope slides which are induced by the following factors: more abundant precipitations. stiff slopes, underground flows in conformity with the direction of the substrate structure, high hydraulic gradients and intense fracturing. In the littoral zone, the main factor at the origin of instabilities corresponds to the outcropping of the thrust separating Tisirene and Chouamat units. This outcropping is related to the influence of a set of normal faults revealing the thrust plane above sea-level. In the same area, an intense seismotectonic activity is reflected by the NS, NE-SW and NW-SE orientations of recent fault reactivations. The tectonic thrust contact therefore has a manifold role in the location of instabilities. It constitutes the major factor of instability in this part of the Central Rif because the schistose outcropping material of Chouamat unit undergoes rheological transformations under the influence of surficial factors, these changes resulting in a weakening of the mechanical characteristics of such a material.

Key words : Central Rif, geomorphology, neotectonic, landslides, over thrust.

Jamal EL KHATTABI



AFRICA GEOSCIENCE REVIEW ROCK VIEW INTERNATIONAL



AGR/CAK/BK/2005-056

DR. BARBARA LOUCHE* Université d'Artois, Faculté Jean Perrin, rue Jean Sourraz SP 18, 62307 Lens cedex, France

Paris, 9 March, 2005

Dear Dr. Louche,

We are happy to write to tell you that your manuscript with El Khattabi entitled :

" Influence de la pente du substratum sur la qualité des eaux de la nappe des flyschs dans le Rif Central (Maroc)"

has been accepted and is being processed to appear in AGR soon. Please accept our congratulations. Please read the final proofs very carefully, correct rigorously and return to us so that we can go to press as scheduled.

We expect to receive carefully corrected proofs and a duly signed copyright transfer form before publication. Please proof read very carefully to ensure we go to press without errors. When this is done, your article could be scheduled in the next number going to press on condition that we receive your proofs with a payment of $115 \in$ for a copy of the journal in which your article will appear by bank transfer or money order through the Post Office addressed to ROCK VIEW International. Indicate any order for pre-prints if required with the enclosed form.

Thanking you for your cooperation. Please indicate any corrections required and return as quickly as possible.

Kind regards

Bhofber

Prof. C. A. Kogbe Editor-in-Chief

New postal address CC Italie 2, 30, avenue d'Italie, Boîte 1078, 75013 Paris

> AFRICA GEOSCIENCE REVIEW ROCK VIEW INTERNATIONAL Tour Onyx 10 Rue Vandrezanne, 75013 Paris, France Tel : +33145805161 Fax : +33145809209 E-mail : geoscafr@wanadoo.fr

> > .

Africa Geoscience Review, Vol. 11, No. 4, pp. 265-280, 2004. Printed in France 1117-370X/2004 All rights reserved © 2004 Rock View Ltd

Influence de la pente du substratum sur la qualité des eaux de la nappe des flyschs dans le Rif Central (Maroc)

Jamal EL KHATTABI et Barbara LOUCHE*

(First received 2 April, 2004; modified version accepted 4December, 2004)

Résumé - Au Maroc, dans le Rif Central, le développement urbain et l'activité agricole importante sont à l'origine de la demande croissante en eau souterraine. Néanmoins, la connaissance sur l'hydrogéologie de ce secteur est faible. Afin de pallier à ces lacunes, une étude basée sur le recueil et l'exploitation des données piézométriques et hydrochimiques a été réalisée.

La zone d'étude est caractérisée par la présence de deux aquifères : l'aquifère alluvial d'âge quaternaire dans les vallées et l'aquifère des flyschs sous jacent du Céno-Sénonien, affleurant au niveau des versants. Ce dernier, compte tenu de sa lithologie peut être considéré comme hétérogène.

L'interprétation des données hydrochimiques montre sur l'ensemble du secteur un faciès chloro-sodique avec des concentrations plus faibles dans les vallées. Dans le domaine des flyschs, une augmentation de la conductivité, du Sud vers le Nord, a pu être mise en évidence en relation avec le sens d'écoulement de la nappe. A l'échelle du secteur d'étude, l'aquifère des flyschs peut être considéré comme homogène. Par contre il existe une hétérogénéité spatiale de l'eau souterraine, influencée par la pente du substrat conditionnant les vitesses d'écoulement.

Ceci amène à proposer une nouvelle répartition des différents types d'eau. En effet, la minéralisation croissante du Sud vers le Nord est en étroite relation avec la pente du substratum. La connaissance de la géologie du secteur devrait permettre la localisation de zones favorables à l'implantation de nouveaux captages aussi bien agricoles que d'alimentation en eau potable.

Mots clés: piézométrie, hydrochimie, structure, nappe alluviale, flyschs, vitesse d'écoulement, Rif Central, Maroc

Influence of the dip substratum on the groundwater quality of the flyschs aquifer in the Rif Central (Morocco)

Abstract - In Morocco, the Central Rif area characterised by both sub-wet and semi-arid climate on the southern high landss, the urban development and the significant agricultural activity are the origin of the increasing demand for underground water. Nevertheless, hydrogeological knowledge of this sector is limited. Moreover, the succession of dry seasons threatens the economy, primarily based on agricultural activity.

In order to mitigate this situation, a study based on the collection and the exploitation of the piezometric and hydrochimic data was carried out.

The studies of piezometry and the hydrochemical distribution reveal to highlight the heterogeneity of the subsoil waters which agrees conveniently with the heterogeneous structure. This one is characterised by significant lithological differences, important fractures and thrust sheets where tectonic contacts have a major role in groundwater circulation. This geological complexity is marked by the presence of two great fields : the dorsalien field, related to the solid mass of Bokoya (no studied case) and the flyschs field which was undertaken in this study. The structure of the area is characterised by two combined directions of strike-slip faults NW-SE and NE-SW at ENE-WSW on the one hand, and by

European Scientific Journal December 2013 edition vol.9, No.36 ISSN: 1857-7881 (Print) e - ISSN 1857-7431

EVOLUTION SPATIALE DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DU LAC OUBEIRA IMPOSE PAR LES CONDITIONS SEVERES DE LA SECHERESSE (EXTREME NE ALGERIEN)

Hacène Alayat

Laboratoire agriculture et fonctionnement des écosystèmes. Universitaire d'El Tarf, Algérie

Jamal El Khattabi

Université des Sciences et Technologies de Lille, UFR des Sciences de la Terre, Laboratoire génie civil et géo-environnement Lille Nord de France, bâtiment polytech, Villeneuve d'Ascq cédex, France

Christian Lamouroux

Université des Sciences et Technologies de Lille, UFR des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq cédex, France

Abstract

The endoreic lake Oubeira, vast lake located in Algeria (36°51' N-8°23' E), at an altitude of 23 m, is subject to severe natural and anthropic constraints during the dry season, which generally begins in April and is completed in October. Due to its geometrical configuration and wind exposure, the water of the lake is well brewed within the entire water column. The first results, covering all the shallow water level, show the average mineralisation of hot moderate water, which releases CO₂ in the atmosphere, an alkaline pH, higher than 8, related to intense evaporation and biological activity, in particular photosynthesis and calcite precipitation. Physicochemical measurements brought a considerable contribution to identify the individualization of two distinct water masses, one in the East and the other in the West, and the absence of limnologic layers. The conditions of the environment make organic particles degraded in the water column. Conservation of organic remains in the reducing environment, represented by the mud, is much reduced. Almost circular, the lake Oubeira has a flat bottom, generally covered with greyish mud, because of the presence of reduced iron, less than 2 m thick. The thickness of the water blade hardly exceeds 1.50 m and the maximum depth, between the surface of the lake and the substratum is about 3.50 m, in period of dryness.

564

117

Open Journal of Modern Hydrology, 2016, 6, 1-7 Published Online January 2016 in SciRes. <u>http://www.scirp.org/journal/ojmh</u> <u>http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2016.61001</u>



Impact of Global Warming on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Relationship of Precipitation: A Case Study of Toronto, Canada

Erick Carlier, Jamal El Khattabi

Polytech'lille, Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement (LGCgE), Université Lille 1, Sciences et Technologie, Villeneuve d'Ascq, France Email: erick.carlier@polytech-lille.fr

Received 27 May 2015; accepted 9 January 2016; published 12 January 2016

Copyright © 2016 by authors and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u> © 0 0pen Access

Abstract

Annual maximum rainfall intensity for several duration and return periods has been analyzed according to the Gumbel distribution. The Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves before and after 1980 have been computed and compared. For the city of Toronto, it is shown that the rainfall intensities after 1980 are lower than those from before this date. This is especially clear for those of short duration. Comparing our results with those of other authors, it appears that, for the moment, no general law on the impact of global warming on the curves intensity duration frequency cannot be made. It appears that the impact of global warming on rainfall varies with geographic location and that it is not possible to draw some general conclusions across the planet.

Keywords

Climate Change, Duration, Frequency, Intensity, Rainfall

1. Introduction

Regarding civil engineering, the knowledge and understanding of climate change is important because, if there are changes in the variables related to hydrological systems, it could imply changes in design criteria, as these are frequently based upon the assumption of the hydrological series stationary. Not doing so, could mean the under or over design of hydraulic infrastructures, thus creating performance deficiencies or over expensive solutions.

How to cite this paper: Carlier, E. and El Khattabi, J. (2016) Impact of Global Warming on Intensity-Duration-Frequency (IDF) Relationship of Precipitation: A Case Study of Toronto, Canada. Open Journal of Modern Hydrology, 6, 1-7. http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2016.61001