



Géosciences pour une Terre durable
brgm



ONEMA

Office national de l'eau
et des milieux aquatiques

2012 – Thème pollutions diffuses – Action 56

Aide à l'optimisation des actions de protection des captages

Méthodologie de choix d'actions pertinentes en fonction des typologies de transfert sur une Aire d'Alimentation de Captage.

Rapport final

Frédéric BARREZ (Irstea)
Guy LE HENAFF (Irstea)
Jean François VERNOUX (BRGM)
Clotaire CATALOGNE (Irstea)
Nadia CARLUER (Irstea)

Mai 2013

Document élaboré dans le cadre de : convention ONEMA-Irstea et convention ONEMA-BRGM

- **AUTEURS**

Frédéric BARREZ, hydrogéologue (Irstea), frederic.barrez@irstea.fr

Guy LE HENAFF, agronome (Irstea), guy.le-henaff@irstea.fr

Jean-François VERNOUX, hydrogéologue (BRGM), jf.vernoux@brgm.fr

Clotaire CATALOGNE, hydrogéologue, (Irstea) ; clotaire.catalogne@irstea.fr

Nadia CARLUER, hydrologue » (Irstea), nadia.carluer@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

Onema : Nicolas DOMANGE, chargé de mission « pollutions diffuses » (ONEMA), nicolas.domange@onema.fr

Partenaire :

Nadia CARLUER, hydrologue, animatrice de l'équipe « pollutions agricoles diffuses », Unité de Recherche Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollutions - Lyon (Irstea), nadia.carluer@irstea.fr

Jean-François VERNOUX, hydrogéologue (BRGM), jf.vernoux@brgm.fr

Droits d'usage : accès libre

Niveau géographique : national

Couverture géographique : nationale

Niveau de lecture : professionnels, experts

- **RESUME**

La transposition de la DCE en droit français a entraîné l'identification d'environ 2700 captages prioritaires, dits « Captages SDAGE » qu'il convient de protéger en priorité vis-à-vis des pollutions diffuses (notamment nitrates et pesticides). Par ailleurs, le Grenelle de l'Environnement a entraîné le choix d'environ 500 captages parmi les plus menacés par les pollutions diffuses. Ces captages, dits « Grenelle » sont inclus parmi les captages prioritaires SDAGE et devaient faire l'objet d'une protection de leur aire d'alimentation dès 2012.

Pour opérer la protection de ces captages vis-à-vis des pollutions diffuses, il convient de définir et de mettre en œuvre des programmes d'action adaptés pour protéger et/ou améliorer efficacement la qualité de l'eau. La démarche prévoit la délimitation et le diagnostic de vulnérabilité de l'Aire d'Alimentation de Captage (AAC), le diagnostic territorial des pressions agricoles, la définition d'un plan d'action, puis le suivi de celui-ci. Or, ces programmes d'action sont difficiles à élaborer, notamment parce qu'ils réclament au préalable une bonne connaissance du milieu naturel et des modes de transfert des contaminants pour définir les actions les plus pertinentes à mettre en œuvre.

Une méthode de délimitation et de diagnostic de vulnérabilité des AAC a été mise au point par le BRGM pour les captages en eau souterraine, et par Irstea pour les captages en eau de surface. Toutefois dans la majorité des cas, l'origine des eaux captées est mixte. Dans ce contexte, cette action s'attache à construire une typologie des modes de transferts possibles sur une AAC, afin de permettre ensuite une utilisation harmonisée et cohérente des deux guides AAC ESO et ESU. La mise en œuvre de ces méthodes de diagnostic peut être complétée, quand des données adéquates sont disponibles, par un diagnostic hydrochimique. Les différents aspects que peut aborder un tel diagnostic sont abordés dans un rapport conjoint, qui expose les différents éléments qui peuvent être étudiés pour aider à une meilleure compréhension du fonctionnement de l'AAC, ou permettre d'évaluer a priori l'efficacité d'un plan d'action

Ce rapport recense enfin les actions que l'on peut envisager dans le cadre d'un plan d'action, et les classe selon leur pertinence en fonction des modes de transfert de contaminants dominants sur une AAC. Il ne paraît toutefois pas possible à ce stade d'indiquer le degré d'efficacité que l'on peut atteindre de chaque type d'action, compte tenu de la variété des conditions agro-pédo-climatiques que l'on peut trouver sur l'Hexagone.

- **MOTS CLES**

Aire d'alimentation de captage ; Eaux de surface ; Eaux souterraines ; Pollutions Diffuses ; Typologie de transfert ; Plan d'action

- **METHODOLOGY FOR SELECTION OF PERTINENT ACTIONS ACCORDING TO CONTAMINANT TRANSFERT TYPOLOGY ON DRINKING WATER CATCHMENT AREA**
- **ABSTRACT**

The application of the Water Framework Directive in France led to the identification of roughly 2700 priority catchments for drinking water called « Captages SDAGE », which should deserve a special attention for what concerns non point source pollution (nitrogen and pesticides). On top of that, the “Grenelle de l’Environnement” brought about the choice of around 500 catchments for drinking water specially concerned by non point source pollution. For each of these catchments, called “Grenelle” and which are part of the “SDAGE” ones, one action plan was supposed to be designed before the end of 2012.

In order to achieve this goal, it is necessary to define and apply adapted action plans in order to protect or improve water quality. The method supposes the delimitation of drinking water catchment area (DWCA), the diagnosis of its vulnerability and agricultural pressures, the design of an action plan, and then the monitoring of the plan in order to assess its efficiency. Yet, these action plans are difficult to design because they suppose to well know the physical area and the dominant contaminant pathways, in order to define the most pertinent actions to be applied.

A method to delimit a DWCA and define its vulnerability was elaborated by BRGM for groundwater, and by Irstea for surface water. Yet, in most cases, harnessed water has a mixed origine. Under this context, this action aims to elaborate a typology of possible transfer dominant pathways on an DWCA, in order to allow an harmonised use of both groundwater and surface water methods. When data is sufficient, these methods application may be completed by an hydrochemical diagnosis (Barrez et al., 2013),.

Then, this report presents the kind of actions which may be decided in an action plan. These actions are classified depending on the dominant transfer processes on the considered DWCA.

KEY WORDS

Drinking Water Catchment Area ; Freshwater ; Groundwater ; Non point source pollution ; Transfer typology ; Action plan.

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE**

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE, directive 2000/60/CE) fixe des objectifs pour la préservation et la restauration de l'état des eaux superficielles (eaux douces et eaux côtières) et pour les eaux souterraines. Son objectif est d'atteindre un « bon état » écologique et chimique de toutes les eaux communautaires d'ici à 2015. La DCE, transposée en droit français par la loi du 21 avril 2004, est appliquée en France à travers les SDAGE, Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux, déclinés par grands bassins hydrographiques. Les objectifs ambitieux en matière de reconquête de la ressource en eau de la DCE ont permis de définir à l'échelle de chaque bassin un certain nombre de captages prioritaires, dits « captages SDAGE » qu'il convient de protéger en priorité vis-à-vis des pollutions diffuses (notamment nitrates et pesticides). Ils représentent sur le territoire national, environ 2700 captages prioritaires. Par ailleurs, le Grenelle de l'Environnement a conduit à mettre en exergue parmi ces captages prioritaires environ 500 captages dits « Grenelle », parmi les plus menacés par les pollutions diffuses, qui devaient faire l'objet d'une protection de leur aire d'alimentation dès 2012.

Pour opérer la protection de ces captages vis-à-vis des pollutions diffuses, il convient de définir et de mettre en œuvre des programmes d'action adaptés pour protéger et/ou améliorer efficacement la qualité de l'eau. La démarche d'élaboration du plan d'action prévoit 4 étapes successives : la délimitation et le diagnostic de vulnérabilité de l'Aire d'Alimentation de Captages ; le Diagnostic Territorial des Pressions Agricoles ; la définition du plan d'action, tenant compte du contexte socio-économique local ; la mise en œuvre du plan et le suivi de son efficacité.

Le besoin d'une **méthodologie harmonisée** au niveau national pour la première étape a donné lieu à la rédaction de deux guides méthodologiques pour la délimitation et le diagnostic de vulnérabilité de l'AAC, l'un pour les **eaux souterraines** (Vernoux et al, 2007) et l'autre pour **les eaux de surface** (Le Hénaff et Gauroy, 2011). Un retour d'expérience a été réalisé sur l'application du premier guide (Vernoux et al., qui a mis en évidence le besoin fréquent de données supplémentaires et disponibles avec une résolution suffisante. Il semble de surcroît nécessaire d'aborder également le cas des **captages « mixtes »**, que nous définissons comme des captages où l'eau constituant la ressource exploitée a eu un trajet pour partie superficiel et pour partie souterrain, ce qui constitue la majorité des cas. Cette mixité peut provenir :

- soit d'écoulements pour partie superficiels ou peu profonds et pour partie souterrains dans la même zone de l'AAC,
- soit de la juxtaposition de zones où les écoulements sont essentiellement superficiels pour l'une et souterrains pour l'autre.

Dans ce contexte, cette action s'est attachée à élaborer une typologie des principaux types de transfert que l'on peut trouver sur une AAC. Pour chaque grand type de situation, le rapport précise quelle(s) méthodologie(s) doi(ven)t être mise(s) en œuvre. Le constat est que les situations où une seule des deux méthodologies ESO ou ESU suffit sont rares, et qu'il est la plupart du temps souhaitable, voire nécessaire d'utiliser les deux méthodologies en parallèle. En particulier, dans le cas des aquifères se trouvant en milieu discontinu ou karstique, il apparaît le plus souvent nécessaire d'établir, en complément à la mise en œuvre de la méthode « ESO » dédiée, les cartes de risque de contamination surface, afin de mieux cerner les zones contribuant le plus à la contamination.

Pour chaque grand type de situation : captage dans un aquifère continu, dans un aquifère discontinu, dans un aquifère karstique, ou en eau superficielle, un organigramme est proposé, qui permet, selon le type d'alimentation de l'aquifère, d'identifier les méthodologies à mettre en œuvre. Des exemples sont donnés qui permettent d'illustrer chacun de ces cas types et de mettre en évidence la nécessité d'utiliser dans chaque cas la méthodologie ESU et la méthodologie ESO correspondant au type d'aquifère considéré.

La suite de ce rapport passe en revue les principales actions envisageables sur une AAC, selon qu'elles sont plutôt adaptées à la limitation de la contamination par les nitrates ou par les phytosanitaires, et qu'elles concernent la limitation des transferts, le raisonnement de l'utilisation des

intrants, ou la limitation du recours aux intrants. Un organigramme est ensuite fourni, qui structure les actions en fonction des modes de transfert dominants, et en distinguant cultures annuelles et viticulture, où les actions envisageables diffèrent parfois, compte tenu notamment de la présence d'une culture pérenne dans le deuxième cas. Il n'apparaît toutefois pas possible à ce stade de quantifier l'efficacité des actions, d'une part par suite de manque de données expérimentales pour certaines des actions proposées, d'autre part par suite de la grande diversité des situations agro-pédo-climatiques : les efficacités mesurées dans une situation sont difficilement transposables ailleurs. L'acquisition de données de référence doit donc se poursuivre, au fur et à mesure de la mise en place de plans d'action et du suivi de leur efficacité, pour enrichir le panel de données disponibles et permettre de « doser » les actions à mettre en place en fonction du fonctionnement du milieu et des objectifs affichés.

Le rapport se conclut par une synthèse des éléments à prendre en compte et des données nécessaires à chaque étape de la définition puis de la mise en œuvre d'un plan d'action.

Les méthodologies de diagnostic citées dans ce rapport peuvent utilement être complétées par un diagnostic hydrochimique, dont les différents aspects qu'il peut revêtir sont abordés dans un rapport conjoint (Barrez et al, 2013) : **1** – étude des conditions chimiques du milieu, notamment les paramètres Redox ou les données concernant la dénitrification, **2** – étude des données disponibles pour les substances actives phytosanitaires, en mettant l'accent sur les molécules nouvellement interdites ou mises sur le marché, ainsi que sur les connaissances que peut apporter le suivi des métabolites, **3** – analyse des isotopes. Ces méthodes complémentaires n'ont encore été que peu mises en œuvre faute notamment de données suffisantes pour les appliquer de façon satisfaisante. Il nous semble toutefois important de souligner leurs apports potentiels, et par là-même la nécessité de bien définir le protocole d'acquisition des données, en amont de la phase de diagnostic, ou, à défaut, au moment de la définition du plan d'action.

Pour en savoir plus :

Barrez F, Le Hénaff G, Vernoux JF, Catalogne C, Carluier N. (2013). Aide à l'optimisation des actions de protection des captages. Apports du diagnostic hydrochimique à la connaissance des Aires d'Alimentation de Captages Irstea -BRGM - Onema. 48 p.

Gourcy, L. , Petelet-Giraud E. (2011). Utilisation des outils isotopiques pour la délimitation des aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable, BRGM-ONEMA: 72 p.

Le Hénaff, G. , Gauroy C. (2011). Délimitation des aires d'alimentation de captages en eaux de surface et caractérisation de leur vulnérabilité vis à vis des pollutions agricoles diffuses par les pesticides. Guide méthodologique. Cemagref. MAAPAR-BSE / MEDDLT-DEB : 54 p.

Vernoux, J. F., Barrez F. , Wuilleumier A. (2011). Analyse des études de délimitation et de vulnérabilité des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine "Grenelle", BRGM. Onema. 87p.

Vernoux, J. F., Wuilleumier A. and Dörfliger N. (2007). Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR: 75 p.

• **SOMMAIRE**

1. Introduction	8
2. Typologie des transferts sur une Aire d’Alimentation de Captage	10
2.1. Intérêts de la méthodologie	10
2.2. Identification des transferts théoriques sur une AAC	10
2.3. Synthèse des mécanismes de transfert au sein d’une AAC	17
2.4. Identification des différents types d’aires d’alimentation de captage	19
2.5. Elaboration de l’organigramme et méthodologie	21
2.6. Présentation des différents cas possibles à partir du mode de captation des eaux	23
2.7. Exemples	37
2.8. Conclusions	51
3. Inventaire des actions possibles pour limiter l’impact des pollutions agricoles sur une AAC	53
3.1. Les actions pour limiter les pollutions ponctuelles	53
3.2. Les actions pour limiter les pollutions diffuses	54
4. Eléments de synthèse pour la mise en place d’actions pertinentes limitant le transfert des pollutions diffuses à partir du diagnostic de vulnérabilité	60
4.1. Inventaire des éléments à répertorier pour la définition du programme d’action	60
4.2. Caractérisation de la zone d’action pertinente	64
4.3. Critères de choix des actions	64
5. Synthèse et conclusion	66
6. Bibliographie	67
7. Table des illustrations	69
8. Annexe 1 : Rapport de Valérie Wibaux (2011)	71
9. Annexe 2 : Rapport de Sandra Cambournac (2011)	71

- **AIDE A L'OPTIMISATION DES ACTIONS DE PROTECTION DES CAPTAGES : METHODOLOGIE DE CHOIX D' ACTIONS PERTINENTES EN FONCTION DES TYPOLOGIES DE TRANSFERT SUR UNE AIRE D'ALIMENTATION DE CAPTAGE.**

1. Introduction

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE, directive 2000/60/CE) du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. Elle fixe des objectifs pour la préservation et la restauration de l'état des eaux superficielles (eaux douces et eaux côtières) et pour les eaux souterraines. Son objectif est d'atteindre un « bon état » écologique et chimique de toutes les eaux communautaires d'ici à 2015.

La DCE, transposée en droit français par la loi du 21 avril 2004, est appliquée en France à travers les SDAGE, Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux, déclinés par grands bassins hydrographiques. Les objectifs ambitieux en matière de reconquête de la ressource en eau de la DCE ont permis de définir à l'échelle de chaque bassin un certain nombre de captages prioritaires, dits « captages SDAGE » qu'il convient de protéger en priorité vis-à-vis des pollutions diffuses (notamment nitrates et pesticides). Ils représentent sur le territoire national, environ 2700 captages prioritaires¹.

D'autre part, l'article 27 de la loi de programmation du 3 août 2009 (loi 2009-967) pour la mise en œuvre des conclusions du Grenelle de l'Environnement prévoit d'assurer la protection d'un peu plus de 500 captages parmi les plus menacés par les pollutions diffuses. Ces captages, dits « Grenelle » sont inclus parmi les captages prioritaires SDAGE et doivent faire l'objet d'une protection de leur aire d'alimentation dès 2012.

Pour opérer la protection de ces captages vis-à-vis des pollutions diffuses, il convient de définir et de mettre en œuvre des programmes d'action adaptés pour protéger et/ou améliorer efficacement la qualité de l'eau. Or, ces programmes d'action sont difficiles à élaborer, notamment parce qu'ils réclament au préalable une très bonne connaissance :

1. du milieu naturel et des modes de transfert des contaminants
2. des pressions en zone agricole et non agricole
3. du contexte socio-économique local
4. des actions possibles pour limiter l'utilisation des intrants et leurs transferts, ainsi que leurs modalités d'agencement dans le programme d'action

Les études préliminaires au programme d'action permettent de répondre aux 3 premiers points :

- deux guides méthodologiques permettent de délimiter et de cartographier la vulnérabilité de l'aire d'alimentation de captage (AAC). L'un définit la méthodologie à employer pour les captages d'eau souterraine (Vernoux et al., 2007), l'autre pour les captages d'eau de surface (Le Hénaff et Gauroy, 2011)
- l'établissement du diagnostic des pressions repose sur un mémento (2010) et un cahier des charges (2010) définis par les agences de l'eau et les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement
- l'Agence de l'Eau Seine-Normandie a développé une méthodologie (2010) et un cahier des charges (2010) pour définir le diagnostic socio-économique agricole sur une aire d'alimentation de captage.

Cependant, il existe une lacune méthodologique importante pour le quatrième point, aucun guide méthodologique « technique » permettant d'élaborer un plan d'action efficace en termes de qualité de l'eau n'ayant encore pu être élaboré à ce jour. Ceci peut s'expliquer notamment parce qu'il est complexe de définir quelles actions (hors interdiction ou absence d'apports azotés et/ou phytosanitaires) sont à privilégier pour protéger la ressource en eau, comment définir leur efficacité a

¹ On n'a considéré dans ce décompte que les captages relevant des cas 3 et 4 du SDAGE pour ce qui concerne l'Agence de l'Eau Seine Normandie, qui a classé « SDAGE » de plus nombreux captages que les autres Agences. Les captages classés en cas 3 sont ceux dépassant le seuil de vigilance (soit 25mg/L de nitrates et/ou pour les substances phytosanitaires 0,05µg/l par substance et 0,25µg/l pour la somme) avec une tendance à la hausse. Ceux classés dans le cas 4 du SDAGE dépassent le seuil d'action renforcé (soit 37mg/l de nitrates et/ou pour les substances phytosanitaires 0,075µg/l par substance et 0,35µg/l pour la somme)

priori, et comment les articuler dans le programme d'actions en tenant compte des aspects réglementaires, techniques (incorporation notamment dans la conduite agronomique), sociologiques (acceptation) et économiques (coût des mesures).

Une telle méthodologie prenant en compte l'ensemble de ces paramètres est encore trop complexe à élaborer à ce jour. Un travail préliminaire doit être en effet effectué sur la typologie des transferts prédominants sur les AAC afin de permettre d'identifier pour chaque situation quelles actions seront les plus pertinentes pour les limiter et éviter ainsi la contamination des eaux par les pollutions diffuses.

Pour réaliser ce travail, dans le cadre de l'action financée par l'ONEMA et intitulée- « Aide quant à l'optimisation des actions pour protéger un captage : méthodologie de choix d'actions pertinentes en fonction des typologies de transfert sur une AAC - Application sur les captages grenelles », nous proposons l'approche suivante :

- l'élaboration d'une typologie théorique des transferts prédominants sur les aires d'alimentation de captage et son application sur quelques sites d'étude
- *de façon complémentaire, quand les données le permettent, la définition d'un diagnostic hydrochimique, permettant à partir des données de qualité d'eau de renforcer la compréhension que l'on a du fonctionnement du milieu et du transfert de contaminants. Ce diagnostic peut ensuite servir de base à l'élaboration du suivi qualité mis en place pour suivre l'efficacité du programme d'action. Ce volet est abordé dans le rapport conjoint « Apports du diagnostic hydrochimique à la connaissance des AAC » (Barrez et al, 2013)*
- l'inventaire des actions (modifications de pratiques, aménagement du territoire, de l'occupation du sol...) et l'évaluation de leur impact possible sur la qualité de l'eau en fonction de leur influence théorique sur la limitation des transferts
- la réalisation d'un diagnostic théorique des actions à mettre en place en fonction des types de transferts rencontrés et l'évaluation de la hiérarchisation des actions en termes d'efficacité pour l'amélioration de la qualité de l'eau vis-à-vis des pollutions diffuses.

Enfin, nous discuterons dans la conclusion des perspectives et des besoins en termes de retour d'expériences nécessaires pour améliorer la compréhension du fonctionnement du milieu, et permettre un meilleur positionnement et une plus grande pertinence dans le choix et l'intensité des actions à mettre en place.

2. Typologie des transferts sur une Aire d’Alimentation de Captage

La mise en place d’actions efficaces en termes de réduction des pollutions diffuses et d’amélioration et/ou de préservation de la qualité de l’eau, réclame une connaissance fine des processus de transfert intervenant au sein des aires d’alimentation de captage en surface, en profondeur et au niveau de l’interaction eau de surface/eau souterraine. En effet, le devenir des contaminants, notamment des produits phytosanitaires, dépend fortement du trajet suivi entre la parcelle où ils sont épandus et la ressource en eau d’intérêt. Pour les phytosanitaires, qui ont la capacité d’être dégradés ou adsorbés sur l’argile ou la matière organique du sol, la « qualité » du milieu traversé du point de vue de ces processus influe de façon significative sur les flux transférés, Une typologie des processus de transfert apparaît donc nécessaire, afin de permettre ensuite de rattacher chaque AAC (ou chaque portion d’AAC) à un type de situation, et de guider ainsi la démarche de diagnostic de la vulnérabilité, puis la proposition d’actions correctives (ou préventives) pertinentes.

2.1. Intérêts de la méthodologie

Le but est ici d’élaborer une typologie de transfert sur les aires d’alimentation de captage afin de :

- 1) discerner les différents types de transferts intervenant dans le transport des pollutions diffuses sur les aires d’alimentation de captage et donc distinguer quelles cartes de vulnérabilité sont à établir et à partir de quel(les) méthodologie(s) (BRGM et/ou Irstea)
- 2) localiser les zones sur lesquelles des actions doivent être envisagées en priorité
- 3) pouvoir opérer un choix des actions entreprises (mise en place de haies, fascines, réduction de doses de produits phytosanitaires, changement d’occupation du sol, enherbement d’inter-rangs...) en fonction des types de transfert rencontrés (drainage, infiltration, ruissellement hortonien...).

Pour établir cette méthodologie, on se basera à la fois sur les deux guides de cartographie de vulnérabilité (BRGM et Irstea) disponibles et sur quelques sites d’étude pour lesquelles des données (pédologiques, hydrogéologiques, etc...) ont pu être fournies.

2.2. Identification des transferts théoriques sur une AAC

Il existe actuellement deux méthodes de caractérisation de la délimitation et la cartographie de la vulnérabilité des aires d’alimentation de captage :

- la première s’adresse aux captages d’eau souterraine et a été définie par le BRGM (Vernoux et al., 2007)
- la seconde s’applique aux captages d’eau de surface et a été définie par Irstea (ex-Cemagref) (Le Hénaff et Gauroy, 2011)

Ces deux méthodes ont pour objectif, *in fine*, de permettre aux bureaux d’étude en charge de la délimitation des AAC et de la cartographie de leur vulnérabilité de se baser sur des méthodologies communes pour l’ensemble des AAC sur le territoire national, qui respectent un certain nombre de règles. Ainsi, quel que soit l’utilisateur de la méthode, les résultats obtenus pourront être sensiblement comparables et les cartes de vulnérabilité produites cohérentes d’une AAC à une autre.

Ces deux méthodes demandent à être articulées pour répondre notamment à l’enjeu des captages dits « mixtes », ce qui sera exposé dans la suite de cette partie. On définit comme captage « mixte » une AAC où la ressource prélevée provient d’un mélange d’eau de surface et d’eau souterraine. La Figure 1 illustre ainsi le cas typique des captages en nappe alluviale, classés en ESO mais où l’eau peut avoir une origine très « superficielle » ou a contrario le cas des captages en calcaires fissurés classés comme ESU si le prélèvement se fait dans de l’eau à surface libre malgré un parcours de l’eau en grande partie souterrain.

En premier lieu, la présentation des deux méthodologies permet d’exposer les mécanismes considérés comme prépondérants pour chacune d’entre elles, ce qui servira de base à l’élaboration d’une typologie des transferts pouvant être rencontrés sur une aire d’alimentation de captage.

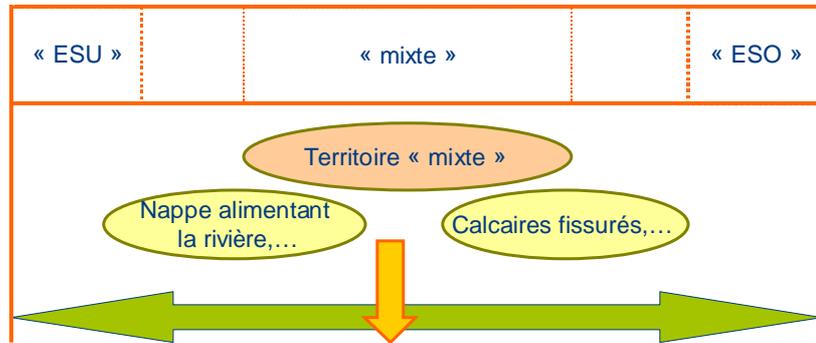


Figure 1 : Schématisation de la partition des aires d'alimentation de captage (ESU = Eau de Surface, ESO = Eau Souterraine). Situations intermédiaires courantes.

2.2.1. Délimitation et cartographie de la vulnérabilité des AAC d'eau souterraine

Le but de la méthodologie définie par Vernoux et al. (2007) est de délimiter et de cartographier l'aire d'alimentation d'un ouvrage (au sens du dictionnaire SANDRE)² captant des eaux souterraines.

Cette méthode comprend 3 étapes :

- l'étude géologique et hydrogéologique détaillée de l'ensemble du bassin versant souterrain
- la délimitation de la portion de nappe alimentant le captage et l'identification de la zone en surface susceptible d'influer sur la qualité de l'eau du captage
- la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aire d'alimentation du captage

Que ce soit pour la délimitation de l'AAC ou la cartographie de la vulnérabilité, la méthode proposée dépend du type d'aquifère. Trois types d'aquifère ont ainsi été définis :

- Les aquifères continus (alluvions, sables...)
- Les aquifères discontinus fissurés (roches cristallines, métamorphiques...)
- Les aquifères discontinus karstiques (certains calcaires...)

Lorsque des aquifères de types différents sont rencontrés (par exemple un aquifère karstique alimentant une nappe alluviale), la portion de l'AAC qui correspond à chaque aquifère doit être différenciée et les méthodes correspondant aux deux types d'aquifère doivent être combinées.

Pour la deuxième phase de l'étude, il importe de distinguer la Portion de Nappe Alimentant le Captage (PNAC), de l'AAC (Figure 2). Lorsque la PNAC est délimitée, il est alors possible de délimiter l'AAC. Plusieurs cas de figure peuvent exister :

- L'AAC peut être la simple projection en surface de la PNAC délimitée précédemment
- La surface de l'AAC peut s'avérer plus importante que la projection de la PNAC si la nappe est alimentée par ses bordures, la projection en surface de la nappe alimentant le captage étant étendue en intégrant ces bordures
- La surface de l'AAC peut être moins importante que la projection de la PNAC si une partie de l'aquifère est captive par exemple.

² Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (2011) - Zonages Techniques et Réglementaires du Domaine de l'Eau – Thème « Zonages », v1, 132p.

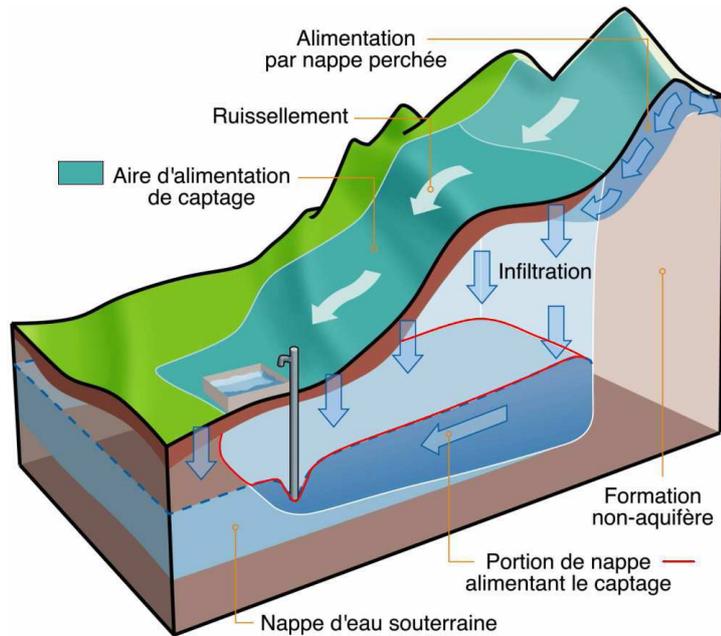


Figure 2 : Aire d'Alimentation de Captage et Portion de Nappe Alimentant le Captage

Pour la troisième phase, c'est à dire la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, la démarche proposée par Vernoux et al. (2007) s'appuie sur un ensemble de critères de vulnérabilité combinés à l'échelle d'une unité cartographique au travers d'une somme pondérée :

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=n} (W_j R_j)$$

Avec D_i : index de vulnérabilité global d'une unité cartographique

W_j : facteur de pondération du paramètre j

R_j : index du paramètre j

n : nombre de paramètres pris en compte

Les paramètres pris en compte varient selon le type d'aquifère (Figure 3). Ils s'inspirent de méthodes existantes tout en ayant été adaptés à la problématique de la protection des captages vis-à-vis des pollutions diffuses. **Pour un aquifère continu par exemple, il est considéré que l'infiltration** (au sens hydrogéologique du terme, c'est-à-dire- la percolation « profonde » au sens hydrologique) **et les caractéristiques du sol sont les paramètres les plus importants** à prendre en compte pour caractériser la vulnérabilité. Dans le cas **d'un aquifère fissuré, c'est la présence de fractures (paramètre discontinuités)** qui est considérée comme prépondérante. Enfin dans le cas **d'un aquifère karstique, c'est l'infiltration par les zones de dolines et de pertes en rivière**. Chacun de ces paramètres est pondéré par un facteur variant de 0 à 1 selon l'importance qu'on lui accorde vis-à-vis de la vulnérabilité intrinsèque, la somme des facteurs étant égale à 1. Les valeurs préconisées par la méthode ont bien entendu un caractère relatif et peuvent être le cas échéant adaptées au contexte local.

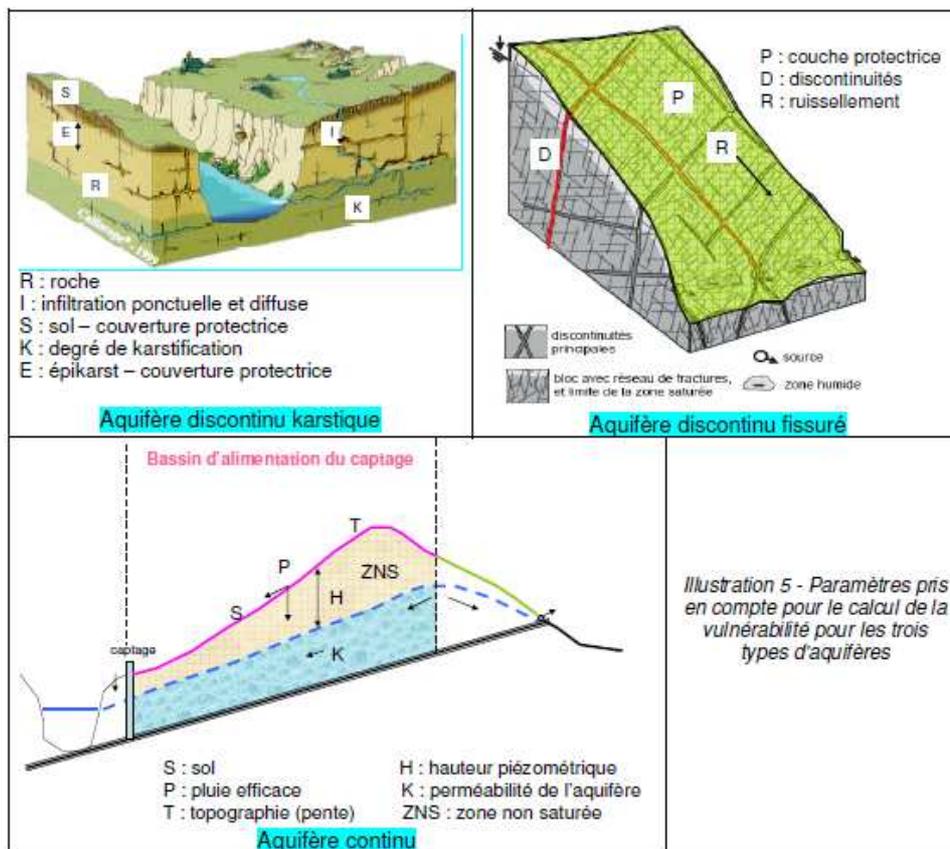


Figure 3 : Paramètres pris en compte pour le calcul de la vulnérabilité intrinsèque pour les 3 types de système aquifère (Vernoux et al., 2007)

2.2.2. Cartographie de la vulnérabilité des Aires d'Alimentation de Captage d'eau de surface

Le but de la méthodologie définie par Le Hénaff et Gauroy (2011) est de délimiter et de cartographier l'aire d'alimentation d'un ouvrage (au sens du dictionnaire SANDRE)³ captant des eaux de surface ou « majoritairement alimentées en eaux de surface ». Elle est subdivisée en deux étapes :

- La délimitation de l'AAC,
- La caractérisation de la vulnérabilité.

Cette méthodologie se différencie nettement par son approche de celle de Vernoux et al. (2007). En effet, cette dernière débouche sur une carte de vulnérabilité intrinsèque globale où les paramètres de vulnérabilité sont pondérés, ce qui permet de localiser la (ou les) zone(s) la(es) plus sensible(s) sur l'AAC au transfert des nitrates et phytosanitaires vers les eaux souterraines (notamment via infiltration) et *in fine* d'identifier les zones qui seront à prioriser dans le plan d'action. La méthodologie définie par Le Hénaff et Gauroy (2011) aboutit quant à elle, à la réalisation d'un ensemble de cartes de vulnérabilité définies chacune par type de risque de transfert. Cette dernière approche a l'avantage d'améliorer la pertinence du choix des actions à mettre en place en fonction de leur qualité à limiter tel ou tel type de transfert. Elle demande par contre éventuellement au gestionnaire / décideur de hiérarchiser les différents types de risque.

³ Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau (2011) - Zonages Techniques et Réglementaires du Domaine de l'Eau – Thème « Zonages », v1, 132p.

Vulnérabilité des aires d'alimentation de captage en eaux de surface : segmentation selon les types de transferts							
Types transferts	Caractérisation de la circulation de l'eau	ruissellement			écoulements de sub-surface		dérive
		érosif	diffus de surface	diffus de surface	hypodermique	drainage agricole	atmosphérique
étape 1 : paramètres	sélection des paramètres Qualifiants le fonctionnement hydrique des sols Pédologie, Géologie, pédopaysage		R. hortonien	R. sur surface saturée			
		battance (érodibilité)	battance	hydromorphie	rupture de perméabilité socle proche géologie, pédologie	présence / absence	proximité "cours d'eau" statuts CE
		couverture du sol	pluie Quantité, Intensité-Durée-Fréquence	pluie saisonnalité		% surface drainée : _ RGA communale (cantonale) _ parcellaire et spatialisée (Petite aire)	BCAE longueurs avec zones tampons Zone Non Traitée
	selon la taille de l'aire	pente	épisodes intenses	excédent hydrique	excédent hydrique		
	selon la pertinence et la disponibilité des données	pluie Quantité, Intensité-Durée-Fréquence	densité réseau hydrographique données locales de Rsslt	réseau hydrographique : densité forte révélatrice d'écoulements latéraux importants données locales de Rsslt			densité réseau hydrographique
		Données pédologiques indispensables					
Etape 2 représentation du phénomène							
Cartes thématiques		Vulnérabilité au ruissellement érosif	Vulnérabilité au ruissellement hortonien	Vulnérabilité au ruissellement sur surface saturée	Vulnérabilité au écoulements hypodermiques	Vulnérabilité au drainage enterré	Vulnérabilité à la dérive
Couverture du sol protection physique des sols,	Corine Land Cover déclarations PAC + RGA 2000 "début" du DTPA	occupation "grossière" des sols agricoles : prairies permanentes, temporaires, cult. hiver ou printemps					
Etape 3 : Éléments du milieu							
Zones Tampons:	Eléments paysagers et fonctionnalité des bandes enherbées, haies, talus, bois, prairies						
		carte opérationnelle vulnérabilité au ruissellement érosif	carte opérationnelle vulnérabilité au ruissellement hortonien	carte opérationnelle vulnérabilité au ruissellement sur surface saturée	carte opérationnelle vulnérabilité aux écoulements hypodermiques	carte opérationnelle vulnérabilité au drainage enterré	carte opérationnelle vulnérabilité à la dérive
	Très Grand Bassin : distance priorisation des zones en fonction de la distance au point de prélèvement de l'eau	carte zones de protection					
							positions précises des parcelles drainées et repérage parties amont du réseau hydrographique lors du DTPA (diagnostic territorial des pressions agricoles)

Figure 4 : Typologie de transfert de polluants à la prise d'eau via les eaux de surface (Le Hénaff et Gauroy, 2011)

Pour la première étape de la méthodologie définie par Le Hénaff et Gauroy (2011), la délimitation de l'AAC correspond le plus souvent à délimiter le bassin versant défini par la topographie. Cependant, les limites du bassin versant peuvent ne pas coïncider avec les crêtes topographiques notamment lorsqu'en limite de bassin versant, des ouvrages d'origine anthropique (fossés de drainage, canaux...) drainent des surfaces extérieures au bassin versant topographique ou permettent l'exportation d'eau de ce bassin vers d'autres bassins. De même, la complexité des transferts d'eau avec le sous-sol peut aussi naturellement influencer les contours définissant l'aire d'alimentation de captage (par exemple : résurgence dans le bassin topographique d'une nappe karstique alimentée à l'extérieur de ce même bassin).

Concernant la deuxième étape, l'approche permettant de caractériser la vulnérabilité sur l'aire d'alimentation de captage est sensiblement différente de celle du BRGM. Ici, l'objectif est de réaliser des cartes de vulnérabilité par type de transfert afin d'identifier les actions les plus pertinentes pour les réduire. Il a donc été choisi volontairement de ne pas proposer une carte globale de vulnérabilité à l'échelle de l'AAC, mais plutôt une carte par type de transfert.

Pour cette méthodologie, les principaux types de transfert ayant été retenus sont les suivants (Figure 4) :

- Le ruissellement (érosif, diffus de surface de type hortonien ou sur surface saturée)
- Les écoulements de sub-surface (hypodermique et drainage agricole)
- La dérive de pulvérisation

On peut donc aboutir à 6 cartes différentes à considérer.

D'autre part, il est à noter que l'échelle de travail est déterminée suivant la taille de l'aire d'alimentation et les échelles disponibles pertinentes pour les paramètres jugés indispensables à la détermination de la vulnérabilité. Des limites de classes ont ainsi été proposées en tenant compte des échelles restituables sur un format A4⁴ :

- Pour les très petites aires (quelques km²), l'échelle de travail sera au 1/5000^e
- Pour les petites aires (<30km²), l'échelle de travail sera au 1/25000^e
- Pour les aires moyennes (30 à 100km²), l'échelle de travail sera au 1/50000^e
- Pour les aires moyennes (100 à 500km²), l'échelle de travail sera au 1/100000^e
- Pour les aires moyennes (> 500km²), l'échelle de travail sera au 1/250000^e

Pour les très grandes aires, la réalisation d'un pré-diagnostic est nécessaire afin de déterminer les zones « sensibles » en se référant aux diagnostics régionaux quand ils existent (GRAPPE, méthodologie CORPEN), puis en travaillant à l'échelle la plus pertinente selon les tailles des zones les plus contributives.

2.2.3. Temps de transfert

Les échelles de temps de transfert sur les aires d'alimentation de captage d'eau de surface et celles d'eau souterraine sont très différentes. En effet, si les temps de transfert pour les premières sont de l'ordre de quelques heures à quelques jours (dans le cas de transferts via ruissellement notamment) pour les secondes, les temps de transfert doivent intégrer à la fois le temps de transfert dans la Zone Non Saturée (ZNS, cf Tableau 1) et celui dans la Zone Saturée (ZS, cf Tableau 2). Suivant les types d'aquifères, les temps de transfert peuvent donc varier de quelques heures lors d'un épisode de crue d'un aquifère karstique à quelques années voir plusieurs dizaines d'années pour un aquifère crayeux avec une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres de ZNS. A noter que pour des produits phytosanitaires, les temps de transfert peuvent être plus importants encore, ceux-ci s'adsorbant plus ou moins au milieu

Tableau 1 : Quelques vitesses de transfert dans la Zone Non Saturée suivant le type d'aquifère

NATURE DE LA ZONE NON SATURÉE	VITESSES MOYENNES DE TRANSFERT VERTICAL
Craie (Champagne, région Nord)	De 0,5m à 1m/an ¹ 3m/an (si pluviosité très forte) ²
Calcaires de Beauce	1m/mois ³
Granite altéré (Kerbenez) ⁴	2-3m/an (transfert de type écoulement-piston) 19cm/h (transfert après un évènement pluvieux)

⁴ Le format A4 n'est pas un objectif en soi mais cette approche permet de cerner le type (et la précision) des données de travail dont on a besoin pour l'échelle retenue

¹ Wellings, 1984 ; Barraclough et al., 1994 ; in Haria et al., 2003 ; Vachier et al., 1987

² Bastin, 2005 ; Serhal, 2006

³ Lallemand-Barrès et Roux (1999)

⁴ Legout et al. (2007)

Tableau 2 : Quelques exemples de vitesse d'écoulement des eaux souterraines en zone saturée (Drogue, 1971 dans Lallemand-Barrès et Roux, 1999)

AQUIFERES	VITESSES MOYENNES DE TRANSFERT
Nappes captives des sables verts du bassin parisien et des sables inférieurs d'Aquitaine	2 à 5m par an (=5 à 14 mm par jour)
Nappes d'alluvions de grandes vallées (Rhin, Rhône, Seine à Mortereau)	0,5 à 2 km par an (= 1 à 5 m par jour)
Nappes d'alluvions grossières de vallées alpines	30 à 300 km par an (= 100 à 1000m par jour)
Nappes de la craie fissurée et karstifiée en Normandie et dans le Sénonais (vitesses maximales)	(= 1 à 10 km par jour)
Circulations dans les aquifères karstiques (en conduites, très variables selon les débits)	Quelques dizaines (en moyenne) à plusieurs centaines de mètres à l'heure (en crue) (= 1 km par jour à plusieurs dizaines de km par jour).

2.3. Synthèse des mécanismes de transfert au sein d'une AAC

A partir des deux méthodologies présentées dans les paragraphes précédents, une synthèse des mécanismes de transfert à prendre en compte pour couvrir tous les types d'AAC est proposée en Figure 5 et dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Synthèse des principaux types de transferts rencontrés à l'échelle de l'AAC⁵

Ruissellement	Erosif ⁶	
	Diffus de surface	Ruissellement hortonien
		Ruissellement de surface saturée ⁷
Écoulement de sub-surface	Hypodermique	
	Drainage agricole	
Dérive atmosphérique		
Infiltration vers la nappe	Directe via zones préférentielles ⁸	
	Diffuse	Directe
		Indirecte ⁹
Artificielle		
Drainance	Entre aquifères ¹⁰	
	Avec la surface	Echanges nappe/rivière

⁵ Les mécanismes de transfert traités ici ne prennent pas en compte ceux à l'échelle de la plante, notamment l'évapotranspiration et l'absorption par la plante

⁶ Le ruissellement érosif est en toute rigueur assimilable au lieu de sa genèse à du ruissellement hortonien ou sur surface saturée. Il est abordé de façon spécifique car demande des solutions correctives adaptées.

⁷ Y compris exceptionnellement sur sols gelés

⁸ On entend par « zones préférentielles » de transfert par infiltration les pertes, gouffres, dolines... A noter que les forages peuvent aussi représenter des voies de transfert préférentielles lorsqu'ils ne sont pas protégés ou mal étanchéifiés (contamination via le massif filtrant depuis la surface par exemple).

⁹ Infiltration après ruissellement ou via une nappe perchée par exemple

¹⁰ On prendra en compte les possibilités de transfert via des piézomètres ou forages mal réalisés permettant la communication entre deux aquifères, y compris les ouvrages miniers

		Remontée de nappe
Apports latéraux entre aquifères		

Cette synthèse correspond aux transferts « théoriques » qu'il est possible de rencontrer à l'échelle de l'AAC. L'étude de cas pratiques (voir paragraphes suivants) permettra de constater si cette synthèse est représentative de la totalité des cas possibles ou s'il est nécessaire de la compléter. Enfin, on notera que certains types de transferts, tels que les apports latéraux entre aquifères, même s'ils peuvent s'avérer importants, ne pourront faire l'objet d'actions de limitation de leur impact pour des raisons évidemment techniques.

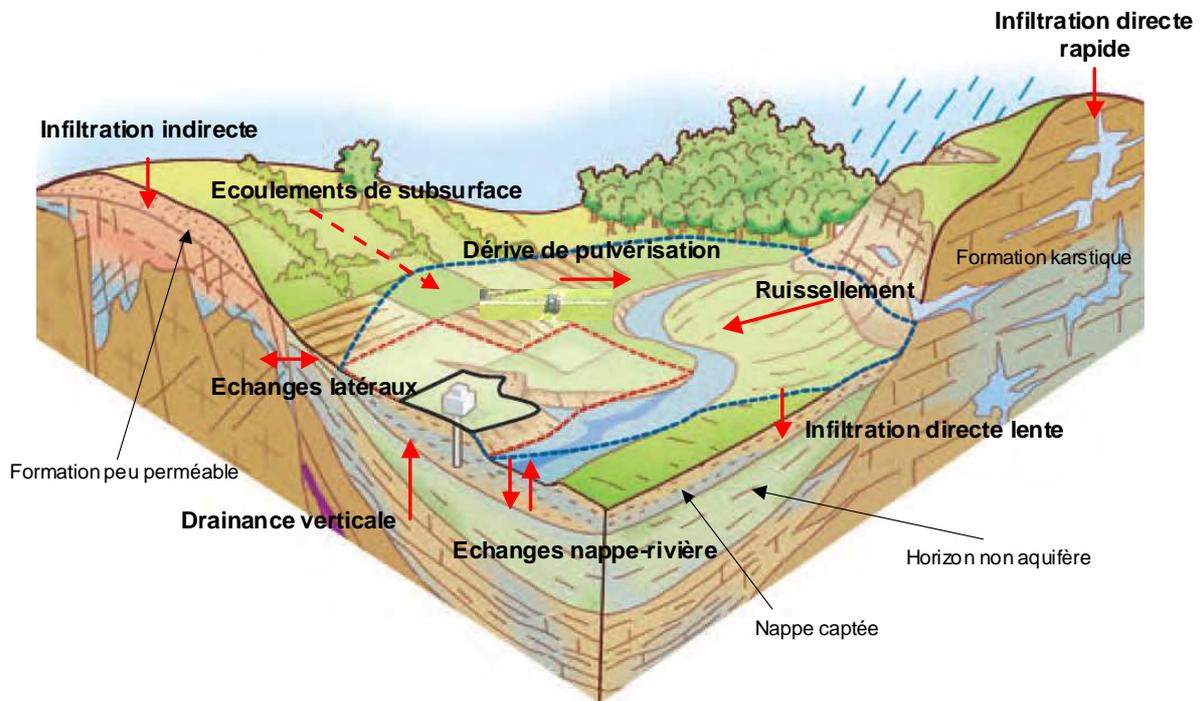


Figure 5 : Synthèse de quelques principaux types de transfert de la pollution diffuse sur une AAC (document BRGM modifié). Les traits pointillés rouge et bleu désignent respectivement les périmètres de protection rapproché et éloigné.

2.4. Identification des différents types d'aires d'alimentation de captage

Remarque préalable : Une proposition de typologie de transfert est présentée dans ce paragraphe. Cependant, avant d'avoir pu être élaborée, plusieurs typologies ont été testées sur plusieurs types d'aire d'alimentation de captage. On se reportera à l'annexe 1 pour plus de détails.

2.4.1. Les aires d'alimentation de captage ESU/ESO

Il existe actuellement deux guides de cartographie de la vulnérabilité, l'un s'adressant aux aires d'alimentation d'eau souterraine (Vernoux et al., 2007), l'autre s'adressant aux aires d'alimentation d'eau de surface (Le Hénaff et Gauroy, 2011). Afin de savoir dans quel cadre utiliser l'un ou l'autre des guides, il est nécessaire de définir ce que sont « une aire d'alimentation d'eau de surface » et « une aire d'alimentation d'eau souterraine ».

D'un point de vue administratif et gestion de la ressource en eau, la séparation entre captage d'eau souterraine et captage d'eau de surface repose sur le mode de captation de la ressource :

- les prises d'eau en forage ou de résurgence de source sont considérées comme des captages d'eau souterraine, les analyses de qualité d'eau sont répertoriées dans la base ADES du BRGM.
- les prises d'eau de surface, c'est à dire au fil de l'eau (rivières, fleuves...) ou en retenue sont considérées comme des captages d'eau de surface. Les analyses de qualité d'eau sont répertoriées par le ministère en charge de la Santé

Si cette dichotomie est représentative du mode de captation, elle ne caractérise pas le mode de transfert ou l'origine de l'eau. Par exemple, un captage d'eau souterraine peut prélever des eaux ayant majoritairement transité via la surface. Pour illustrer cette observation, deux cas de figure sont présentés en Figure 6 et Figure 7 :

- Dans le cas 1, le captage prélève l'eau de surface d'un plan d'eau alimenté par une nappe d'eau souterraine. Celle-ci est alimentée majoritairement via infiltration sur le bassin. On a donc un captage d'eau de surface alimenté par des eaux souterraines.

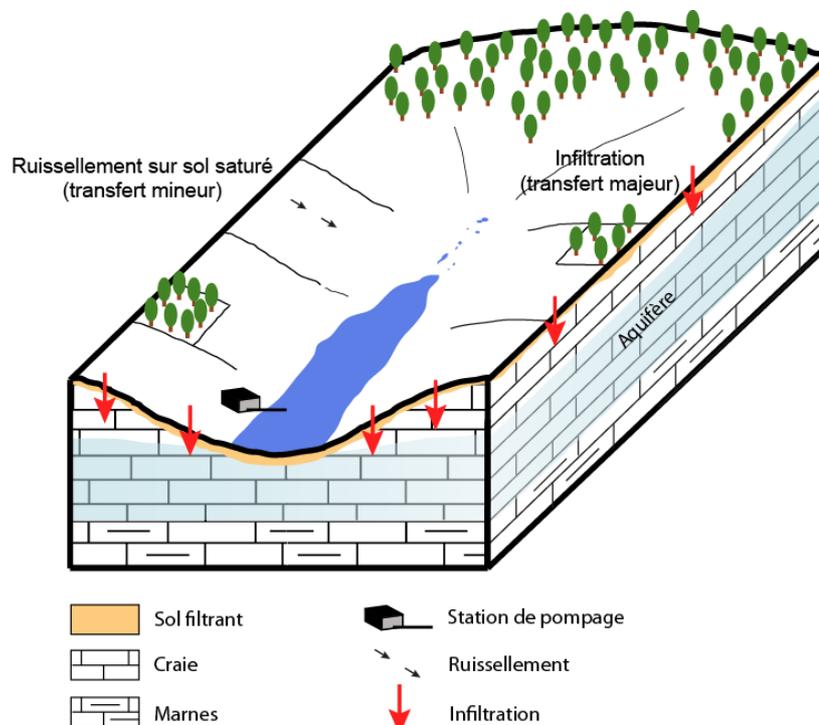


Figure 6 : Cas 1 ; exemple d'un captage d'eau de surface où l'infiltration est le transfert majoritaire

- Dans le cas 2, le captage prélève l'eau d'un forage situé dans la nappe d'accompagnement d'une rivière circulant sur un socle imperméable. Cette nappe est alimentée par la rivière, qui est elle-même alimentée essentiellement par des écoulements de surface et/ou de subsurface sur le bassin. On est donc en présence d'un captage d'eau souterraine alimenté par des eaux ayant transité par des eaux de surface.

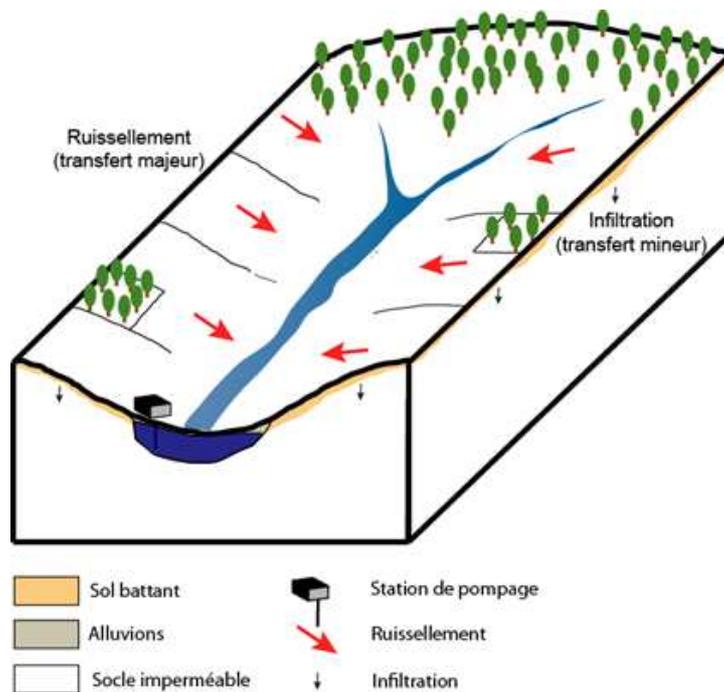


Figure 7 : Cas 2 ; exemple d'un captage d'eau souterraine où les transferts majoritaires se réalisent en surface et/ou sub-surface (cas d'un captage dans la nappe d'accompagnement d'une rivière sur un socle imperméable).

Or, la dichotomie eau de surface/eau souterraine employée par les guides de cartographie de la vulnérabilité ne fait pas référence au mode de captation mais aux types de transfert sur l'aire d'alimentation de captage. Rappelons en effet, que la cartographie de vulnérabilité a pour but de :

- localiser dans l'espace les zones potentielles les plus vulnérables au transfert des nitrates et des pesticides notamment (c'est à dire limiter la zone d'action pour optimiser le plan d'action)
- permettre de déterminer quelles actions seront les plus pertinentes et efficaces pour limiter le transfert des pollutions diffuses (adéquation actions/transferts)

2.4.2. Les aires d'alimentation de captage mixtes

Sur la plupart des aires d'alimentation de captage, les transferts peuvent être mixtes, c'est à dire que l'on peut à la fois observer des transferts via infiltration ou via la surface ou subsurface. Des zones sur l'aire d'alimentation peuvent être plus ou moins sensibles au ruissellement (par exemple, les zones composées de sols argileux) tandis que d'autres seront plus sensibles à l'infiltration (par exemple, les zones composées de sols caillouteux filtrants). Deux grands types d'aires d'alimentation de captage mixtes peuvent exister :

- les aires d'alimentation où l'ensemble de l'aire peut être à la fois le siège de transferts verticaux et latéraux durant toute l'année ou partiellement dans l'année lors de certains épisodes pluvieux (par exemple les aires d'alimentation composées de sols limoneux battants sur craie karstique)
- les aires d'alimentation où l'ensemble de l'aire peut être composée de zones homogènes en termes de transfert, soit verticaux, soit horizontaux.

Actuellement, bien que ce type d'aire d'alimentation soit très représentatif des cas rencontrés sur le terrain, il n'existe pas de guide de cartographie de la vulnérabilité dédié à ce type de contexte. La cartographie de la vulnérabilité doit faire appel à la fois à la méthode BRGM et à la méthode Irstea. Nous verrons plus loin dans cette étude quels sont les éléments à recueillir et quels critères retenir pour établir une carte de vulnérabilité pour ce type d'aire d'alimentation.

2.4.3. Définitions

A partir des observations précédentes et en vue d'une utilisation correcte des guides de cartographie de vulnérabilité existants, on définira les termes suivants ainsi :

- **Une aire d'alimentation de captage d'eau de surface** correspond à une aire d'alimentation d'un ouvrage prélevant une ressource d'eau localisée en surface et alimentée par des eaux ayant transité majoritairement via la surface ou la subsurface
- **Une aire d'alimentation de captage d'eau souterraine** correspond à une aire d'alimentation d'un ouvrage prélevant l'eau d'un aquifère dont la recharge est essentiellement réalisée via la surface par infiltration ou par drainance avec un autre aquifère alimenté lui aussi par la surface via infiltration. Pour ce type de contexte, on considèrera que la part de transferts horizontaux via la surface ou subsurface est minime par rapport à l'infiltration.
- **Une aire d'alimentation de captage mixte** correspond, quel que soit le mode de captation, à une aire d'alimentation sur laquelle des transferts verticaux et horizontaux sont rencontrés, soit de manière pérenne ou de manière récurrente lors de certains épisodes pluvieux. On parlera d'AAC mixte indifféremment pour une aire d'alimentation où les transferts sont mixtes sur l'ensemble de l'aire ou lorsque l'ensemble de l'aire comprend à la fois des zones à transferts horizontaux de surface/subsurface majoritaires et des zones à transferts verticaux majoritaires.

Ce concept de typologie des aires d'alimentation de captage ESO/ESU/mixte est schématisé en Figure 8.

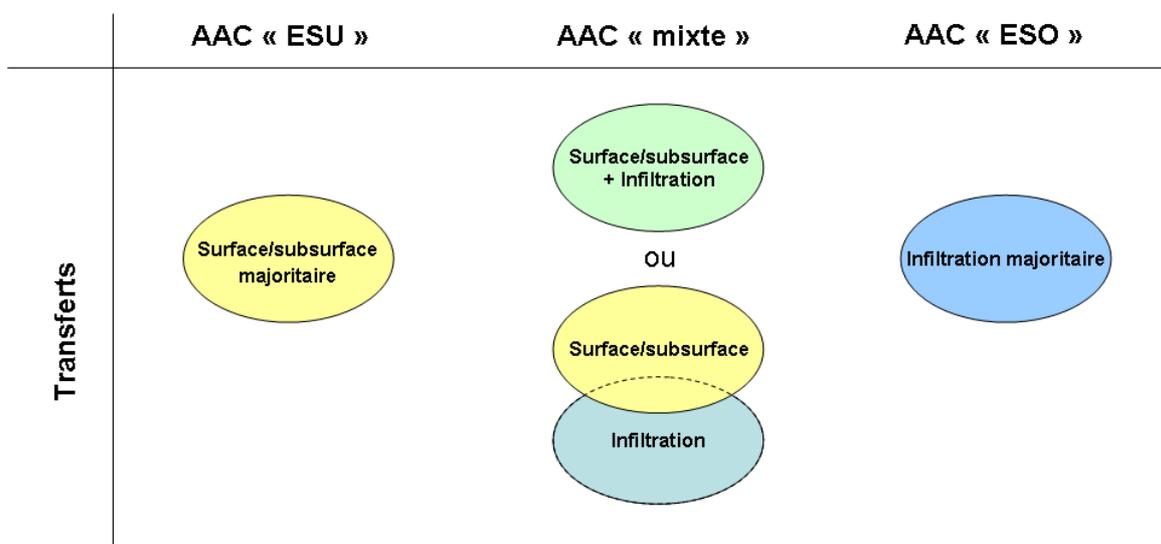


Figure 8 : Schématisation des aires d'alimentation de captage ESO/ESU/mixte en fonction des types de transfert majeur

2.5. Elaboration de l'organigramme et méthodologie

2.5.1. Découplage transferts / sols / aquifères

Les sols résultent de la transformation de roches in-situ ou de matériaux résultant de transports hydriques, éoliens ou gravitaires, sous l'effet du climat et de l'action des êtres vivants. Les grands traits de leur formation sont assujettis à trois grands types de mécanismes : l'altération de la roche, l'incorporation de matières organiques et la redistribution, la migration et l'accumulation de matières au sein du volume de sol. Ces mécanismes conduisant à la différenciation des sols sont étroitement imbriqués dans l'espace et au cours du temps. Le sol s'approfondit à sa base par altération de la roche mère, perd de la matière par drainage, mais aussi en surface par ruissellement et érosion (Gis Sol, 2011).

Certains sols sont particulièrement sensibles à certaines catégories de transfert. Par exemple, les sols limoneux, sont souvent battants, entraînant alors un transfert par ruissellement érosif à leur surface lors des épisodes pluvieux. Les sols sableux, au contraire, sont plutôt des sols filtrant, permettant aux eaux météoritiques de s'infiltrer vers les eaux souterraines. Si l'on part du constat que les sols sont fortement liés à la nature du sous-sol, il pourrait être envisagé que certains types de sols soient caractéristiques de certains types d'aquifère (milieu continu, discontinu, karstique), ou tout au moins plus fréquemment observés au-dessus de tel ou tel type d'aquifère. Cette hypothèse aurait pour conséquence que les types de transfert engendrés notamment par la « couche sol » seraient caractéristiques de certains types d'aquifère.

Cependant, cette hypothèse ne peut être retenue pour au moins 3 raisons :

- Un sol n'est pas seulement issu de l'altération de la roche mère sous-jacente. Des processus externes au milieu in-situ, tel qu'un enrichissement de matière dû à des apports éoliens ou hydriques, peuvent participer à sa formation.
- Au sein d'une aire d'alimentation de captage d'eau souterraine d'un même aquifère, les sols peuvent être très hétérogènes en termes de nature et de comportement vis-à-vis des transferts
- L'aquifère exploité peut être complètement déconnecté de la roche mère du sol (cas de certains aquifères profonds par exemple).

Par conséquent, dans l'organigramme retenu pour l'établissement de la méthodologie de la typologie de transfert, les cartes de transfert générées par la « couche sol » seront en général complètement déconnectées du type d'aquifère rencontré sur l'aire d'alimentation de captage. Ces cartes pourront toutefois être établies selon qu'elles soient pertinentes ou non pour l'étude. On notera cependant que pour une AAC caractérisée par des transferts majoritaires de surface, ces cartes seront essentielles au diagnostic de vulnérabilité.

2.5.2. Concepts de base pour l'élaboration de la typologie

Le premier concept repose sur le fait que dans les bases de données et dans le vocabulaire utilisé majoritairement par le public, les termes « captage d'eau de surface » et « captage d'eau souterraine » font référence au mode de captation de l'eau (à noter que le terme « captage » devrait être remplacé par « ouvrage de prélèvement » selon le dictionnaire du SANDRE). Il est donc nécessaire dans l'établissement de la typologie d'en tenir compte et de se servir du mode de captation comme point d'entrée pour la méthodologie.

Deuxièmement, il a été décidé de déterminer très tôt dans l'approche méthodologique :

- lorsque le captage prélève des eaux souterraines : le type d'aquifère exploité (continu, discontinu, karstique) et les liens entre le réseau hydrographique et les autres aquifères (exemple : aquifères de coteaux)
- lorsque le captage prélève des eaux de surface : le lien entre le réseau hydrographique et les eaux souterraines

En effet, pour un captage prélevant une nappe d'eau souterraine, l'identification d'une alimentation de l'aquifère par le réseau hydrographique implique de tenir compte des transferts de surface et subsurface en plus de l'infiltration pour caractériser la vulnérabilité. Inversement, pour un aquifère déconnecté du réseau hydrographique (soit parce qu'aucun lien n'existe entre l'aquifère et le réseau hydrographique, soit parce que ce réseau n'existe pas de par la nature du sol et du substrat) et alimenté seulement par de l'infiltration (ou par un autre aquifère alimenté lui-même majoritairement via infiltration), les transferts latéraux de surface/subsurface ne seront pas pris en compte, mais uniquement la vulnérabilité à l'infiltration. A l'autre extrémité, pour une prise d'eau de surface, lorsque le réseau hydrographique est complètement déconnecté des eaux souterraines, seuls les transferts horizontaux de surface/subsurface sont pris en compte.

D'autre part, les transferts majeurs sur les aires d'alimentation ont été simplifiés en 4 grandes catégories afin de mieux pouvoir effectuer le choix du ou des guides de cartographie de vulnérabilité à adopter pour établir les cartes de vulnérabilité au transfert :

- les aires d'alimentation où l'infiltration directe constitue le transfert dominant. Dans ce cas, l'aire d'alimentation est de type ESO et le guide BRGM devra être utilisé pour établir la carte de vulnérabilité.
- les aires d'alimentation où l'infiltration indirecte est dominante. S'il n'est pas observé d'écoulement de surface avant infiltration, l'aire d'alimentation est considérée comme une aire ESO et le guide BRGM doit être utilisé pour l'établissement des cartes de vulnérabilité. Inversement, si des écoulements de surface sont observés avant ré-infiltration, l'aire d'alimentation est dite « mixte » et les guides BRGM et Irstea de cartographie de vulnérabilité doivent être utilisés conjointement.
- les aires d'alimentation où les écoulements sont mixtes (infiltration + écoulements de surface/subsurface). Dans ce cas, l'aire d'alimentation est dite « mixte » et les guides BRGM et Irstea doivent être utilisés conjointement.

- Les aires d'alimentation où les écoulements de surface/subsurface sont prépondérants et l'infiltration est quasi absente. Pour ce dernier cas, l'aire d'alimentation est de type ESU et seul le guide de cartographie de la vulnérabilité de l'Irstea doit être utilisé.

Cette distinction doit en fait être effectuée pour chaque zone homogène de l'AAC du point de vue de son fonctionnement, et la typologie établie pour chacune de ces zones.

Enfin, nous sommes partis du constat qu'il était préférable de partir de la caractérisation hydrogéologique/hydrologique de l'aire d'alimentation de captage et non du sol pour déterminer le ou les types de transferts majeurs sur l'aire d'alimentation. En effet, dans l'un des paragraphes précédents, nous avons vu qu'il était nécessaire de déconnecter le compartiment sol du type d'aquifère rencontré, le lien entre le comportement des deux en termes de transfert n'étant pas possible à systématiser simplement. Pour les milieux où l'infiltration est prédominante à l'échelle de l'aire d'alimentation, les cartes de vulnérabilité au transfert par ruissellement érosif, diffus de surface et aux écoulements de sub-surface seront toutefois établies selon la méthodologie « Irstea » lorsque celles-ci seront pertinentes. Ce peut être le cas par exemple d'une aire d'alimentation de captage dont la ressource captée est un aquifère crayeux, surmonté d'un sol pouvant être battant suivant les conditions climatiques. On notera que le fait de ne pas appliquer à ces dernières cartes de pondération entre elles, permet de garder l'intégrité de l'information.

2.6. Présentation des différents cas possibles à partir du mode de captation des eaux

2.6.1. Prises d'eau de surface

Lorsqu'un captage prélève dans le réseau hydrographique, trois cas peuvent exister :

- 1) Le réseau hydrographique est déconnecté de l'influence des eaux souterraines. Deux sous cas peuvent être possibles : soit le réseau hydrographique repose sur un substratum imperméable (Figure 9), soit le ou les aquifères présents sur l'aire d'alimentation sont alimentés par le réseau hydrographique et n'ont pas d'influence sur celui-ci (Figure 10). Les transferts majeurs de pollutions diffuses sont donc opérés en surface via les écoulements de surface/sub-surface. L'aire d'alimentation de captage est de type ESU.

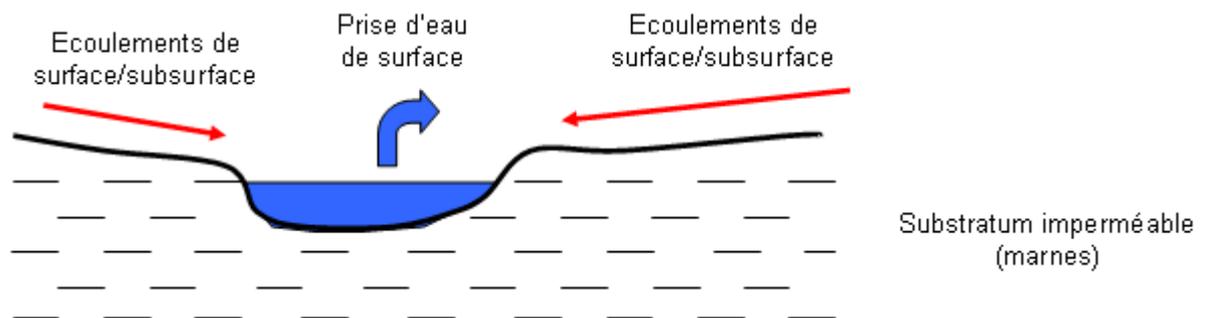


Figure 9 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique déconnecté du sous-sol : circulation d'une rivière sur un socle marneux. Les transferts dominants sont les écoulements de surface/subsurface sur le substratum imperméable.

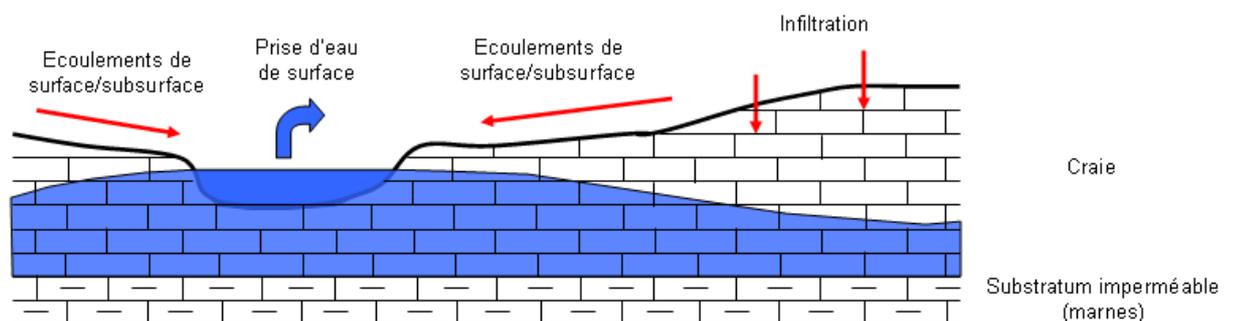


Figure 10 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimentant la nappe. L'infiltration bien que présente sur ce schéma n'est pas prise en compte car la nappe n'influence pas la qualité de la prise d'eau de surface.

- 2) Sur l'aire d'alimentation, les transferts de surface/sub-surface sont observables et le réseau hydrographique est connecté à un ou plusieurs aquifères qui l'alimente(nt), de façon permanente ou non. Cette alimentation peut se faire via des échanges verticaux plus ou moins directs entre l'aquifère sous-jacent et le réseau hydrographique (cas des échanges nappe/rivière, voir Figure 11) ou via une résurgence d'un ou plusieurs aquifères sur l'aire d'alimentation (cas d'un aquifère de coteau alimentant l'aire d'alimentation par exemple, Figure 12). Pour ces types de cas, l'aire d'alimentation est dite « mixte ».

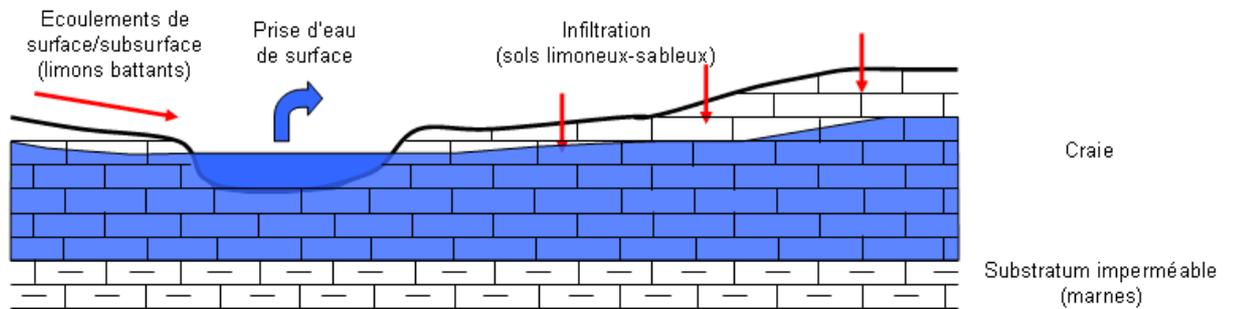


Figure 11 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimenté par une nappe sous-jacente (le sens des transferts nappe/rivière peut s'inverser sur le profil de la rivière et selon les saisons)

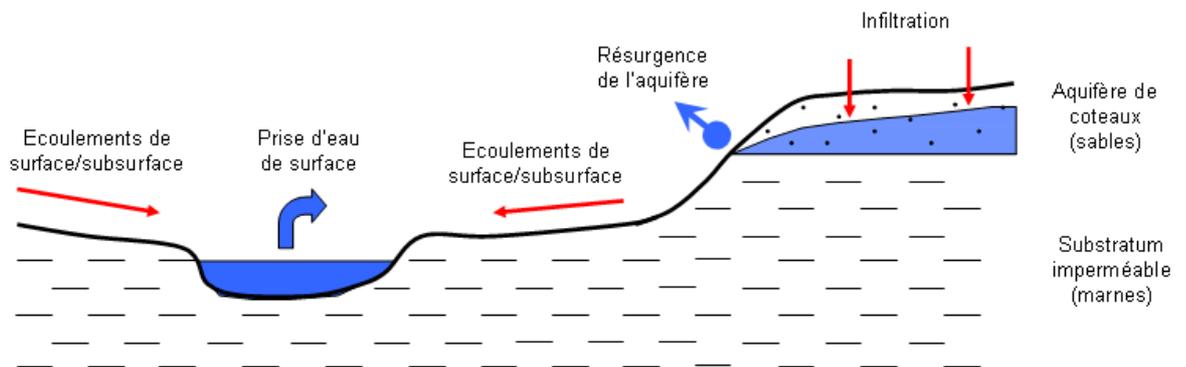


Figure 12 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimenté par une nappe de coteau.

- 3) Le réseau hydrographique est essentiellement alimenté par un aquifère sous-jacent et est peu alimenté par des transferts horizontaux de surface/sub-surface. C'est le cas par exemple de certaines rivières drainant l'aquifère de la Craie. Les sols crayeux sont filtrants et peu sensibles au ruissellement (lorsque les sols sont eux aussi filtrants). De nombreuses vallées sont sèches, mais certaines peuvent être ennoyées lorsqu'elles sont situées sous le niveau de la nappe (elles drainent alors la nappe). Dans ce cas, l'AAC est dite mixte, bien qu'elle relève essentiellement du point de vue des écoulements des ESO.

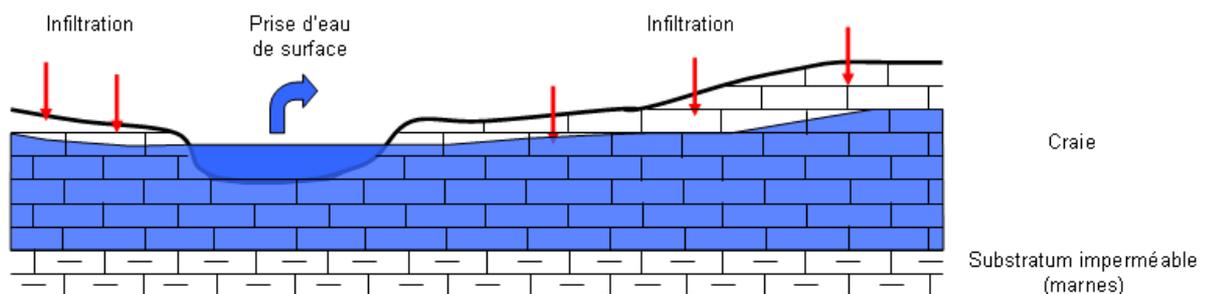


Figure 13 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimenté par la nappe et dont l'aire d'alimentation est majoritairement infiltrante (cas d'une rivière drainant un aquifère crayeux).

Dans la schématisation globale de la typologie, bien que les configurations en Figure 10 et en Figure 13 peuvent exister, elles seront écartées car peu représentatives. Tout d'abord, pour un contexte équivalent à celui de la Figure 13, les prélèvements se font plutôt dans la nappe, les captages étant plus faciles à protéger et l'eau étant censée être de meilleure qualité (car filtrée par le massif crayeux). D'autre part, le plus souvent les relations nappe-rivière varient au cours du temps et le long du profil du cours d'eau, rendant les échanges verticaux possibles dans les deux sens. Or, lorsque des communications sont possibles, l'aire d'alimentation doit être considérée comme mixte et les deux guides de cartographie de vulnérabilité doivent être utilisés en parallèle.

Pour les « captages ESU » deux grands types de possibilité sont retenues (Figure 14) :

- Le captage n'est pas soumis à l'influence des eaux souterraines et les écoulements majoritaires sur l'aire d'alimentation se manifestent essentiellement en surface. Dans ce cas le guide Irstea uniquement doit être utilisé.
- Le captage est soumis à la fois à l'influence d'eaux souterraines et aux transferts en surface et subsurface. Dans ce cas, les écoulements sont considérés comme étant mixtes sur l'ensemble de l'AAC et les deux guides de cartographie de vulnérabilité (Irstea et BRGM) doivent être utilisés conjointement.

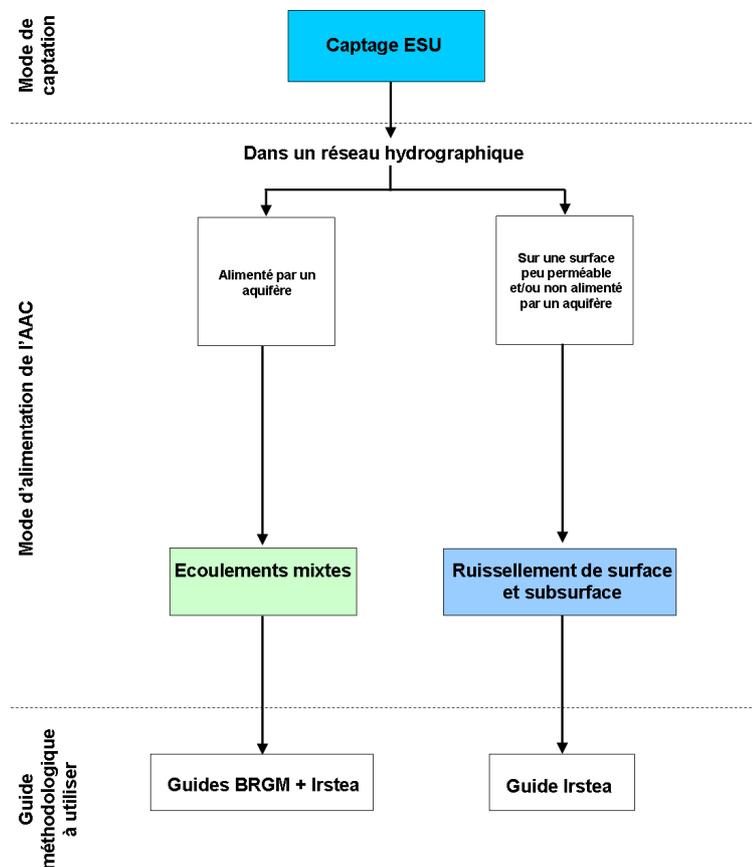


Figure 14 : Choix des guides de cartographie de vulnérabilité pour les « captages ESU » selon les types d'écoulement sur l'aire d'alimentation

2.6.2. Prélèvement d'eau souterraine

Pour cette partie, la hiérarchisation de la typologie repose sur deux aspects :

- **Le type d'aquifère exploité, celui-ci pouvant être d'après le guide BRGM de type continu, discontinu ou karstique**
- **La ou les relations entre l'aquifère exploité et d'autres aquifères et/ou le milieu hydrographique.**

A noter que pour des raisons de pédagogie, il a été choisi pour chaque cas (continu, discontinu fissuré et discontinu karstique) de garder le même type de schéma conceptuel ainsi que la

présentation des cas possibles pour un captage ESU à la droite des organigrammes. **D'autre part, il a été fait le choix d'identifier dans un premier temps le fonctionnement global de l'aire d'alimentation sans tenir compte de l'influence de la nature du sol. Lorsque l'organigramme recommande d'utiliser le guide BRGM et que la nature du sol peut engendrer des écoulements de /surface/subsurface non négligeables, il est fortement conseillé en annexe à la méthodologie BRGM de réaliser les cartes rendant compte des transferts de surface à partir du guide Irstea :**

- soit sur l'ensemble de l'aire d'alimentation si ces types de transfert peuvent être rencontrés sur l'intégralité de l'aire (de manière permanente ou non)
- soit uniquement sur la ou les zone(s) affectée(s) par ces types de transfert.

2.6.2.1. Captage dans un aquifère de type continu

Pour les milieux continus la méthodologie de cartographie de vulnérabilité intrinsèque proposée par le BRGM (Vernoux et al., 2007) est une méthode à pondération de critères de vulnérabilité et repose sur la caractérisation des paramètres suivants :

- La pluie efficace, paramètre élaboré à partir de la pluviométrie, de l'évapotranspiration et de la réserve utile des sols
- La couverture protectrice sol, paramètre qui prend en compte la couverture pédologique et son comportement hydrodynamique. Ce paramètre est élaboré à partir de l'épaisseur, de la texture et de la pierrosité du sol
- L'infiltration/ruissellement. Pour ce paramètre, la méthode proposée par le BRGM utilise l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR). Celui-ci permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité des formations géologiques présentes en surface ou en sub-surface à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie
- L'épaisseur de la zone non saturée
- La perméabilité de l'aquifère, paramètre qui prend en compte la capacité de l'aquifère à laisser circuler l'eau.

Pour ce type de contexte hydrogéologique (sables, graviers, grès peu cimentés...), le cas le plus simple correspond à une alimentation de la nappe via une infiltration directe plus ou moins homogène sur l'ensemble de l'aire d'alimentation. Dans ce cas, la méthodologie seule du BRGM peut être utilisée pour cartographier la vulnérabilité intrinsèque de l'aire d'alimentation du captage (Figure 18). Cependant, lorsque la nature du sol est susceptible d'influencer les écoulements en surface (sols battants du Pays de Caux, présence d'un drainage agricole conséquent sur l'aire d'alimentation...), la réalisation de cartes supplémentaires présentant les transferts de surface à partir du guide Irstea s'avère judicieux et conseillé.

Au cas simple d'une infiltration directe plus ou moins homogène, peuvent s'ajouter des contextes plus complexes en termes de transfert. L'aquifère exploité peut être alimenté :

- 1) par un autre aquifère via drainance verticale (Figure 15)

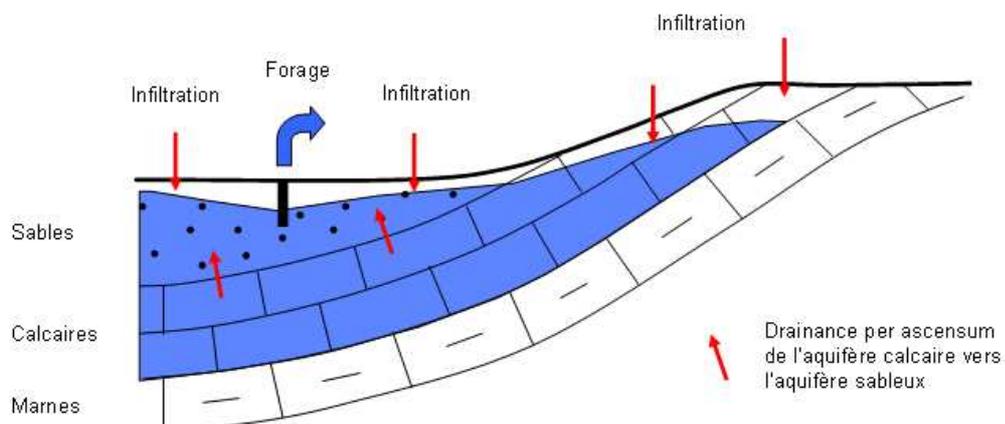


Figure 15 : Exemple d'alimentation d'un aquifère sableux par drainance per ascensum d'un aquifère calcaire

- 2) par un aquifère superficiel ou un aquifère de coteau (Figure 16)

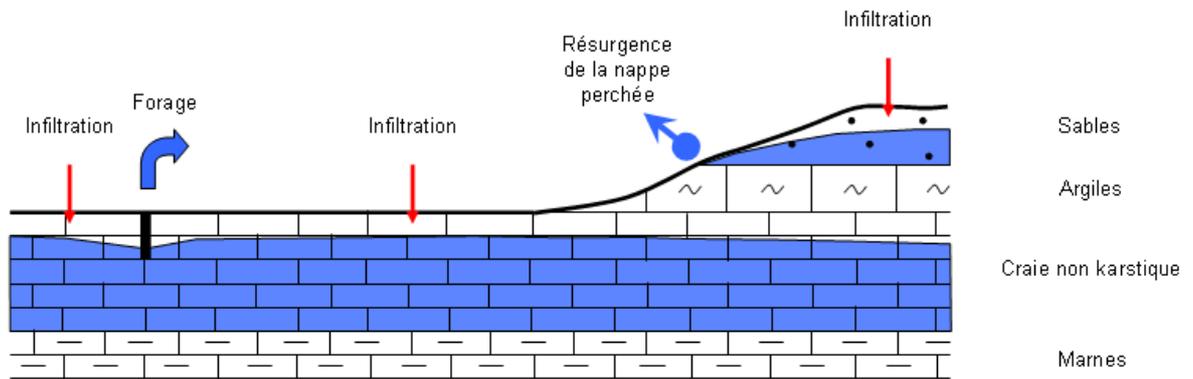


Figure 16 : Exemple d'alimentation d'un aquifère crayeux non karstique¹¹ par une nappe perchée

- 3) par des écoulements latéraux de sub-surface (Figure 17)

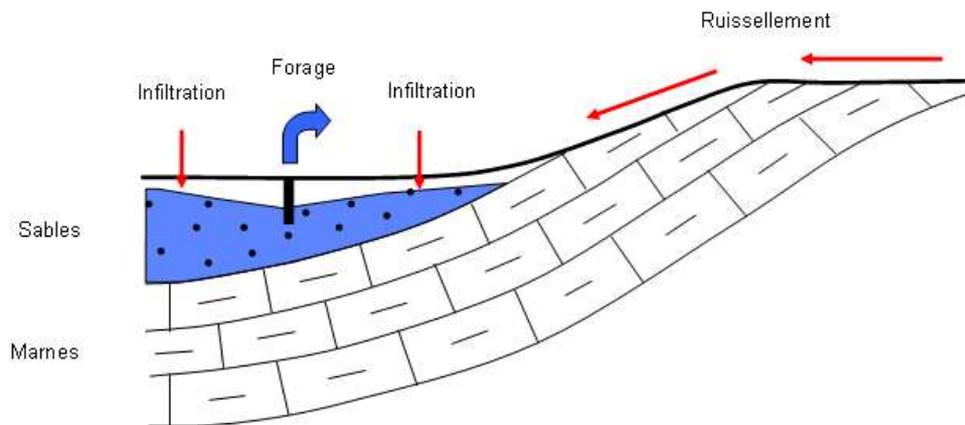


Figure 17 : Exemple d'alimentation d'un aquifère sableux par des écoulements latéraux

- 4) par un cours d'eau

Pour les cas 1 et 2, les apports vers la nappe sont considérés comme indirects et lorsqu'aucun ou très peu d'écoulements de surface ou sub-surface sont observés, la méthodologie BRGM pour les milieux continus peut être utilisée seule. Inversement, si des écoulements en surface sont observés, les écoulements sur l'ensemble de l'aire d'alimentation de captage sont considérés comme mixtes et les guides Irstea et BRGM doivent être utilisés conjointement.

Pour les cas 3 et 4, les transferts sont à la fois latéraux et verticaux sur l'aire d'alimentation. Les écoulements étant mixtes, les méthodologies BRGM et Irstea doivent être utilisées en parallèle afin de rendre compte de l'ensemble des possibilités de transfert.

Enfin, on notera que plusieurs de ces cas peuvent être rencontrés simultanément. Si des transferts en surface se produisent et sont considérés comme non négligeables, les deux méthodologies doivent être utilisées conjointement. D'autre part, un aquifère continu peut être alimenté par un aquifère discontinu et inversement. Les méthodologies utilisées doivent être adaptées à chaque type d'aquifère rencontré sur l'aire d'alimentation, ce qui peut aboutir à la mise en place de plusieurs méthodologies pour une même aire d'alimentation. Par exemple, une aire d'alimentation d'un captage en nappe alluviale alimentée par des coteaux karstiques peut requérir l'association de 3 méthodes de cartographie de vulnérabilité intrinsèque différentes :

- la méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque pour les coteaux karstiques (méthode PAPRIKA du BRGM)
- la méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des milieux continus du BRGM pour la nappe alluviale
- la méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'Irstea pour les zones sensibles aux transferts de surface et sub-surface.

¹¹ Dans ce cas la craie peut être considérée comme un milieu continu

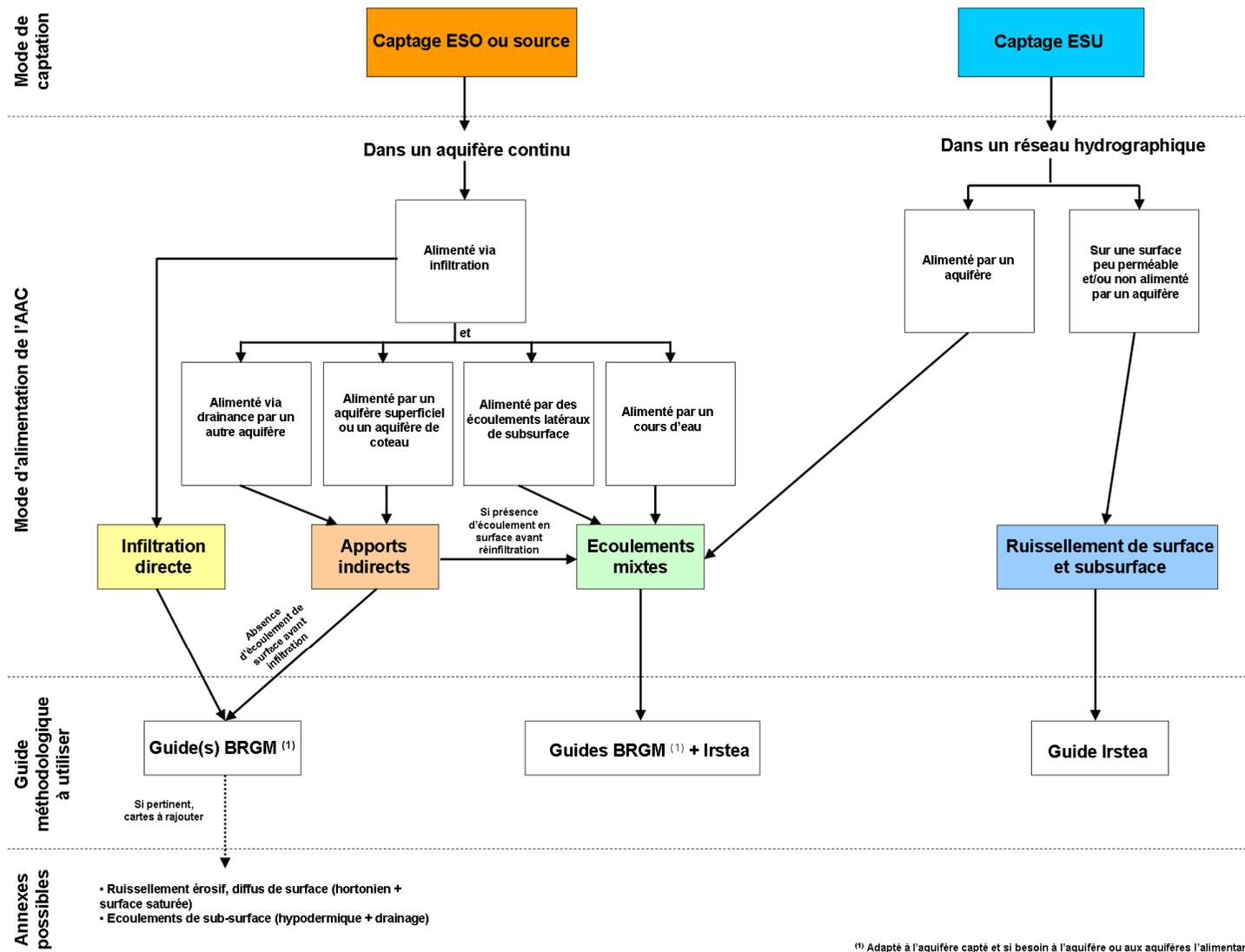


Figure 18 : Typologie de transfert sur une aire d'alimentation de captage captant un aquifère continu

2.6.2.2. Captage dans un aquifère de type discontinu fissuré

Les aquifères classés dans le type « discontinu fissuré » correspondent à des milieux hétérogènes à circulation rapide (granites, gneiss, grès calcaires durs...) où l'eau circule majoritairement via le réseau de fissures et dans les zones altérées, mais peu ou pas (en comparaison avec les réseaux de fissures et les zones altérées) dans la matrice rocheuse peu altérée.

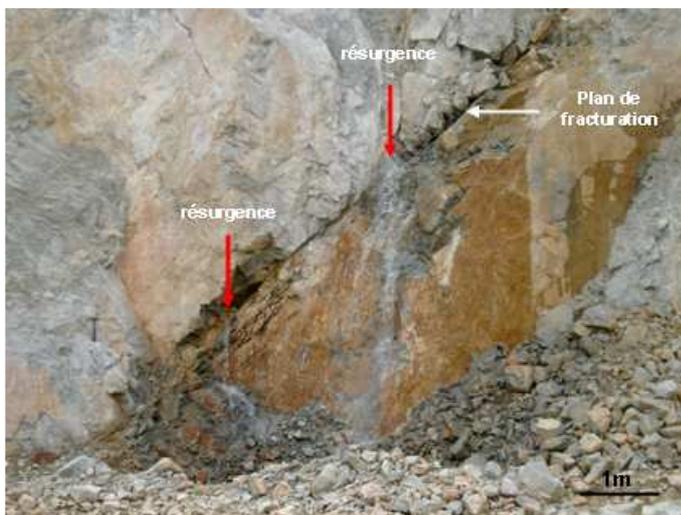


Figure 19 : Illustration de la circulation de l'eau dans un aquifère discontinu fissuré (Calcaires du Carbonifère, carrière d'Avesnes sur Helves, 59)

A titre d'illustration, la photo en Figure 19 permet de constater que ce type d'écoulement peut être très localisé dans l'espace (la photo est une vue d'un affleurement en carrière). A une échelle plus large, **le repérage des zones de circulation le long de plans de fractures en surface passe par une couverture fine du terrain** (géomorphologie, sondages...) et parfois par de la prospection géophysique (profils électriques, profils sismiques haute résolution...).

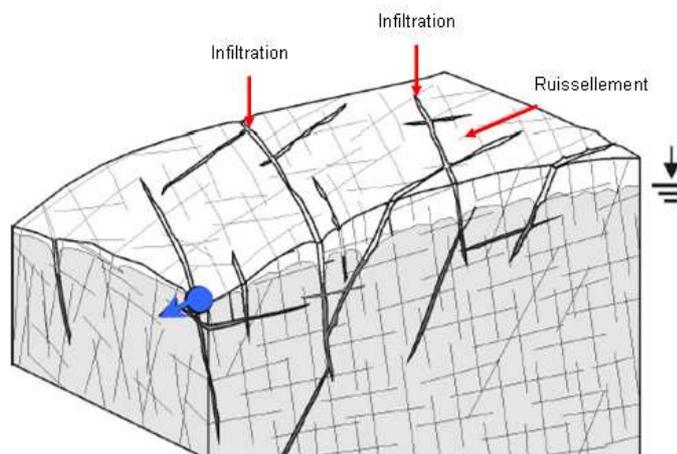


Figure 20 : Schématisation des écoulements majeurs d'un aquifère discontinu fissuré (dessin modifié de Pochon et Zwahlen, 2003)

Ainsi, pour ce type de milieu, **les écoulements sont dits « mixtes » car ils ont systématiquement deux composantes** (Figure 20) :

- une composante latérale avec des écoulements en surface/sub-surface dans les zones où l'eau ne peut s'infiltrer profondément (l'eau peut néanmoins circuler en sub-surface dans la zone altérée de la roche par exemple)
- une composante verticale avec des zones d'infiltration situées au droit de couloirs de fracturation par exemple.

Pour rappel, la méthode proposée par le BRGM pour les milieux discontinus fissurés intègre déjà l'influence des écoulements de surface, celle-ci reposant sur la caractérisation de trois paramètres :

- Les discontinuités qui caractérisent le transfert d'eau au sein de l'aquifère fissuré entre la zone d'infiltration et le captage,
- La couverture protectrice – sol qui a pour effet de retarder ou de déplacer l'effet protecteur du sol et des couches géologiques au-dessus de l'aquifère,
- L'infiltration/ruissellement comprenant tous les processus à la surface avant infiltration (utilisation de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR)).

Cependant, cette méthode utilisée seule ne tient pas suffisamment en compte des types de transfert de surface dans la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque. Par exemple, le critère « infiltration/ruissellement » ne tient pas compte de la battance du sol. De même, les écoulements hypodermiques et le drainage ne sont pas considérés. Or, pour les milieux discontinus fissurés où l'infiltration est très hétérogène sur l'ensemble de l'aire d'alimentation, la prise en compte des transferts de surface est essentielle pour améliorer la pertinence des actions. Aussi, même s'il est vrai que la méthodologie BRGM permet à moindre coût (car ne réclamant pas une étude pédologique affinée) de souligner les zones les plus vulnérables aux transferts des pollutions diffuses vers les eaux souterraines, il paraît important de mieux considérer les transferts de surface et sub-surface en utilisant en parallèle le guide de cartographie de la vulnérabilité aux transferts de surface pour mieux identifier l'intégralité des types de transfert couvrant l'aire d'alimentation.

Ainsi, à partir de ce constat, une typologie de transfert sur les aires d'alimentation de captage prélevant des eaux souterraines d'aquifères discontinus fissurés a pu être élaborée en Figure 21. En faisant un parallèle avec la typologie de transfert identifiée pour le prélèvement dans un milieu continu, le cas de base correspond ici à un aquifère discontinu alimenté via infiltration directe au niveau des discontinuités majoritairement et alimenté par des écoulements latéraux de surb-surface. A ce cas de base, d'autres types d'alimentation peuvent venir s'ajouter :

- 1) Une alimentation via drainance par un autre aquifère
- 2) Une alimentation par un aquifère superficiel ou un aquifère de coteau
- 3) Une alimentation par un cours d'eau.

Pour l'intégralité de ces cas, les écoulements étant mixtes, il est préférable d'utiliser les deux guides de cartographie de vulnérabilité en parallèle. Cependant, il peut aussi être envisagé d'utiliser la méthodologie de cartographie de vulnérabilité des milieux discontinus fissurés du BRGM sur la globalité de l'aire d'alimentation et une utilisation locale de la méthodologie Irstea sur les zones clés où la pression en contaminants est importante et où les écoulements de surface/sub-surface sont conséquents, notamment lorsque les données pédologiques sont partielles et qu'aucun cours d'eau n'alimente l'aquifère.

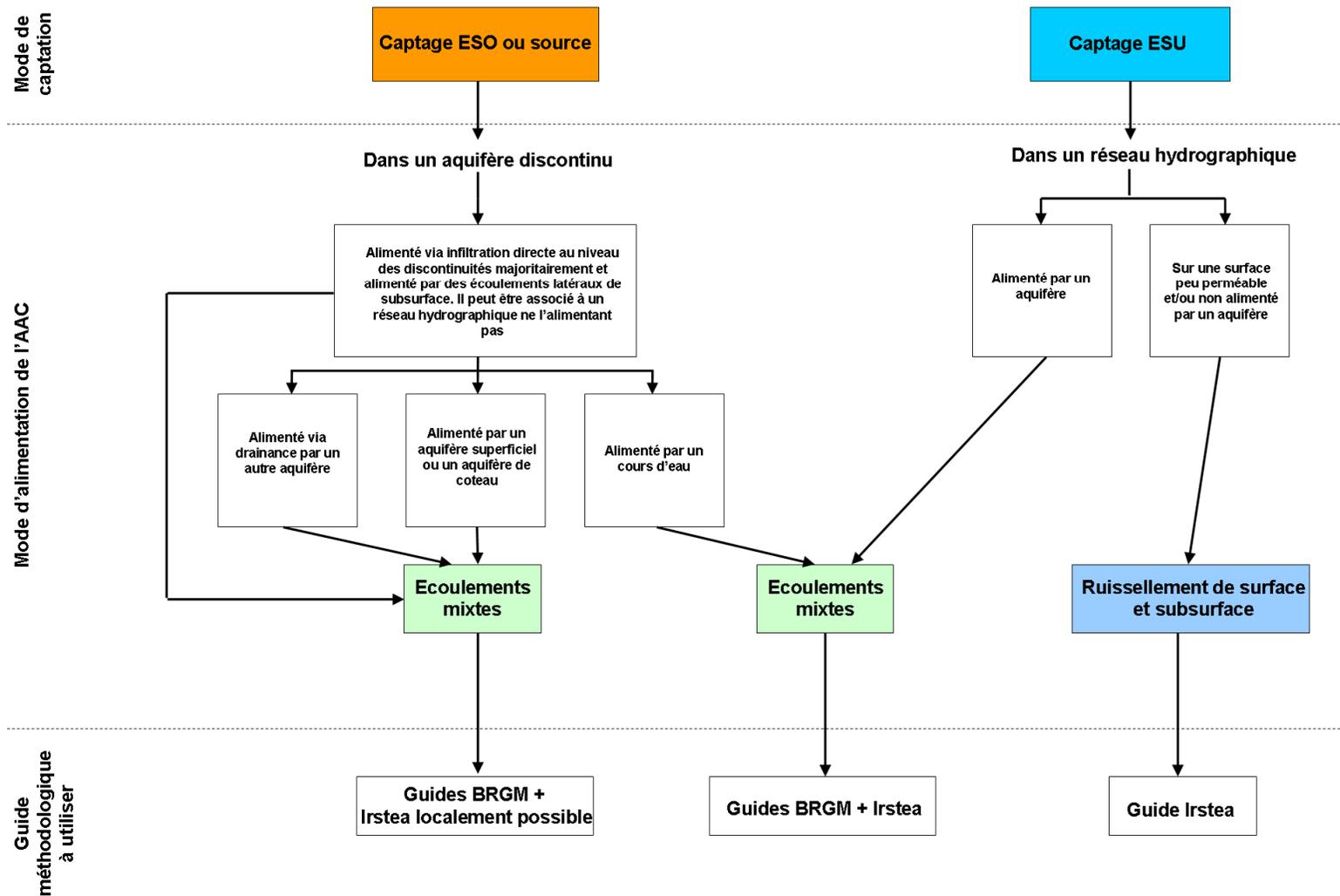


Figure 21 : Typologie de transfert sur une aire d'alimentation de captage captant un aquifère discontinu fissuré

2.6.2.3. Captage dans un aquifère de type karstique

Les aquifères karstiques (calcaires, dolomie, craie karstique...) sont des milieux hétérogènes, à circulations souvent très rapides, constitués d'un réseau de drains. Ils possèdent une morphologie spécifique (Figure 22), en surface avec la présence de dolines, de vallées sèches, de lapiaz, de gouffres et, à l'intérieur du massif carbonaté, avec l'existence de réseaux de conduits pénétrables ou non par l'homme (Dörfliger et Plagnes, 2009).

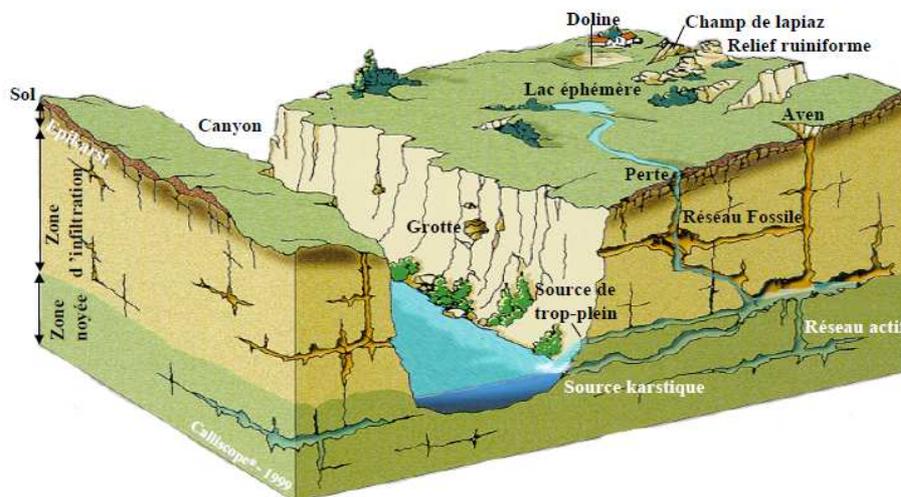


Figure 22 : Représentation schématique d'un aquifère karstique (Bakalowicz, 1999)

Lorsque des écoulements de surface contribuent à l'alimentation de la zone noyée à partir de pertes, le système comprend la partie aquifère proprement dit et le bassin de surface drainé par des pertes. On distingue donc (Figure 23) :

- Les systèmes karstiques unaires (système karstique = aquifère karstique)
- Les systèmes karstiques binaires (système karstique = aquifère karstique + bassin de surface drainé par des pertes)

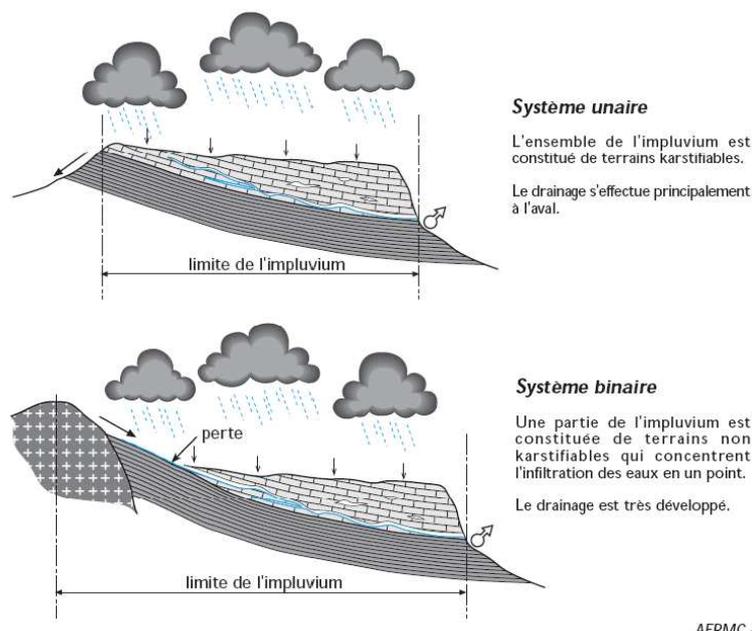


Figure 23 : Les deux types de système karstique (Agence de l'Eau RM&C, 1999)

Le fonctionnement d'un aquifère karstique possède différentes caractéristiques (Bakalowicz, 1999) :

- Une variabilité spatiale et temporelle importante des paramètres hydrodynamiques du milieu aussi bien dans la zone d'infiltration que dans la zone noyée
- L'existence de forts contrastes de perméabilité
- L'existence de vitesses d'écoulement très rapide (quelques centaines de m/h)
- Des crues importantes rapides et de forte intensité, suivies d'une décrue rapide et d'un long tarissement.

Ainsi, par rapport aux autres contextes hydrogéologiques et notamment par rapport au milieu continu de type craie non karstique, les systèmes karstiques sont marqués par des vitesses de transfert des contaminants très rapides. La réactivité de ces milieux présente en revanche l'avantage de pouvoir apprécier l'efficacité des plans d'action vis-à-vis des pollutions diffuses rapidement.

La méthode de cartographie de vulnérabilité intrinsèque caractérisant les aquifères karstiques est **PaPRIKa** (ex méthode RISKE 2 ; Dörfliger et al., 2004 ; Plagnes et al., 2005 ; Pranville et al., 2008). **PaPRIKa** est une méthode pour la **Protection des aquifères** qui nécessite d'acquérir par des sources bibliographiques et par des investigations de terrain des données intrinsèques au milieu concernant la **Protection** prise en charge par les sols et l'épikarst, la roche **Réservoir**, les modalités d'**Infiltration** à travers les pentes et les morphologies de surface et ainsi que l'état de **Karstification** du système concerné.

La méthode PaPRIKa (Dörfliger et Plagnes, 2009) est là encore une méthode de cartographie à pondération de critères de vulnérabilité. Le choix des critères est en adéquation avec la spécificité en termes de structure et de fonctionnement des aquifères karstiques. Les critères sont au nombre de 4, à savoir :

- Le critère P pour couverture protectrice résultant de la combinaison la plus protectrice entre les critères S lié au sol (au sens large), la lithologie, l'épaisseur et la fracturation de la zone non saturée et le critère E représentatif du fonctionnement épikarstique
- Le critère R pour la nature de la roche du réservoir souterrain
- Le critère I pour la nature de l'infiltration (diffuse ou ponctuelle au niveau de phénomènes exokarstiques)
- Le critère Ka pour le degré de karstification et le fonctionnement du système karstique (Figure 24, Figure 25).

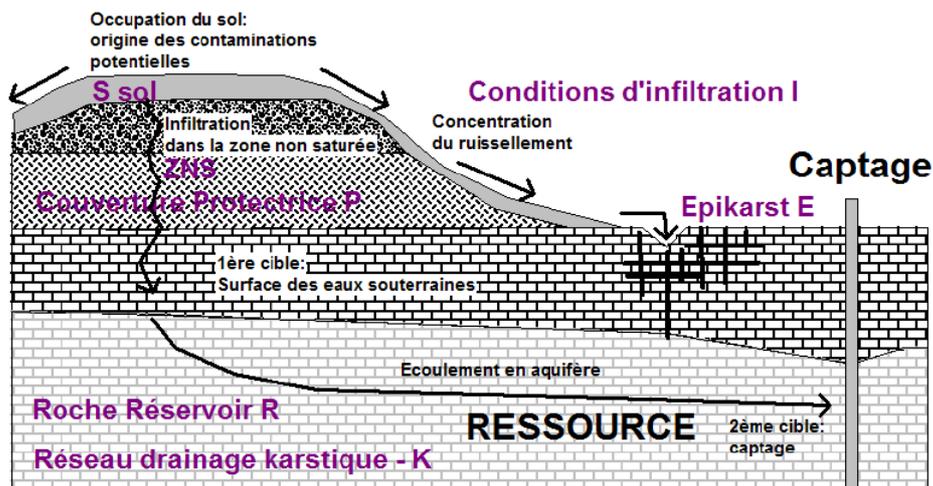


Figure 24 : Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères (d'après COST 620, Zwahlen et al., 2004, in Dörfliger et Plagnes, 2009)

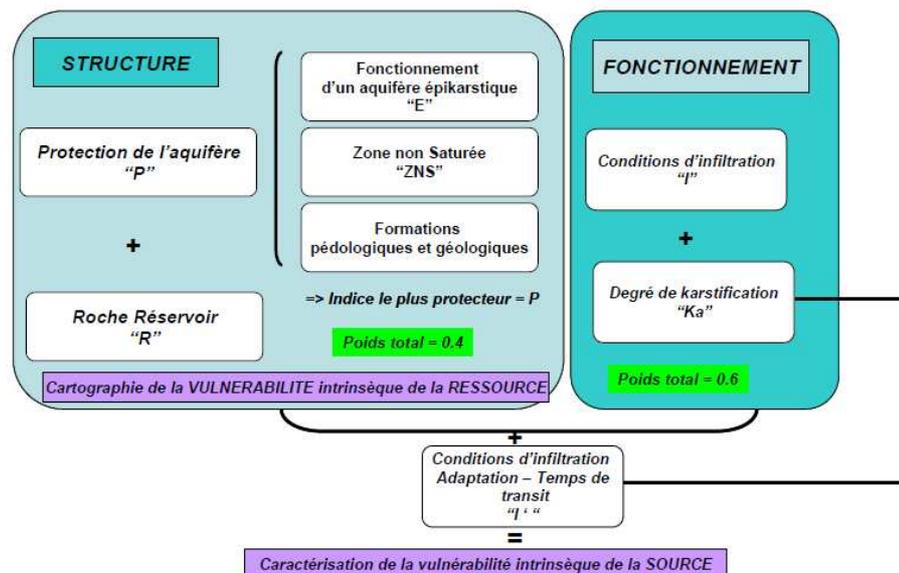


Figure 25 : Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques (Dörfliger et Plagnes, 2009)

Pour ce type de contexte, tout comme pour les milieux discontinus fissurés, les écoulements sont mixtes le plus souvent, avec des transferts importants à la fois en surface et sub-surface et via infiltration (y compris pour le cas de systèmes karstiques unaires). De même que pour les contextes hydrogéologiques précédents, d'autres types d'alimentation de l'aire d'alimentation peuvent venir s'ajouter (Figure 26) :

- 1) Une alimentation via drainance par un autre aquifère
- 2) Une alimentation par un aquifère superficiel (type épikarst) ou un aquifère de coteau
- 3) Une alimentation par des écoulements latéraux de surface (karst binaire)
- 4) Une alimentation par un réseau hydrographique via des pertes

Si la méthode PaPRIKa prend en compte le ruissellement, elle ne tient pas suffisamment compte de la pédologie (battance des sols, écoulements hypodermiques...). **D'autre part, il a été remarqué que de nombreuses aires d'alimentation karstique sont marquées par la présence de réseaux de drainage artificiels dont les drains sont reliés aux pertes, court-circuitant le cheminement naturel des écoulements et rendant très vulnérable l'aquifère aux transferts de contaminants.** Aussi, pour ce type de contexte, un travail de terrain apparaît indispensable et primordial pour l'élaboration de la carte de vulnérabilité intrinsèque. Celui-ci doit permettre notamment de :

- **Identifier et cartographier les bétoures, dolines, pertes, gouffres... ainsi que leurs bassins d'alimentation individuels pour ceux qui peuvent impacter de façon non négligeable l'aire d'alimentation** (un travail minutieux de terrain peut être requis dans certains cas, les bassins versants des dolines n'étant pas toujours repérables sur une carte IGN au 1/25000^e). Le repérage de ces zones permettra de connaître précisément l'étendue de la zone concernée par le ruissellement pour chaque doline par exemple et de mettre en place les actions adéquates (création de zones tampons artificielles, mise en prairie...)
- **Identifier les zones où un drainage agricole existe et repérer si les exutoires de ces réseaux de drainage correspondent aux bétoures.** Les réseaux de drainage étant le plus souvent pérennes, des zones tampons humides artificielles peuvent être imaginées au niveau de ces exutoires pour limiter le transfert vers la nappe karstique. Il en va de même si des écoulements concentrés rejoignent des bétoures, des zones tampons « sèches » n'étant dans ce cas en général pas suffisamment efficaces.

Ainsi, à partir de ces différents constats, il peut être recommandé d'opérer de la façon suivante :

- **pour les contextes de karsts unaires « simples » dont l'infiltration directe constitue le transfert majeur et les karsts unaires alimentés via drainance ou par un autre aquifère (cas 1 et 2) mais dont les apports indirects n'engendrent pas d'écoulements de surface majeurs, il est possible d'utiliser la méthode PaPRIKa sur l'ensemble de l'aire d'alimentation et localement, pour les bassins versants des dolines par exemple, la méthode Irstea pour caractériser les écoulements de surface dans ces zones**
- **Pour les autres contextes où les écoulements de surface sont non négligeables (cas 3 et 4) les deux méthodes de cartographie de la vulnérabilité doivent être utilisées conjointement.**

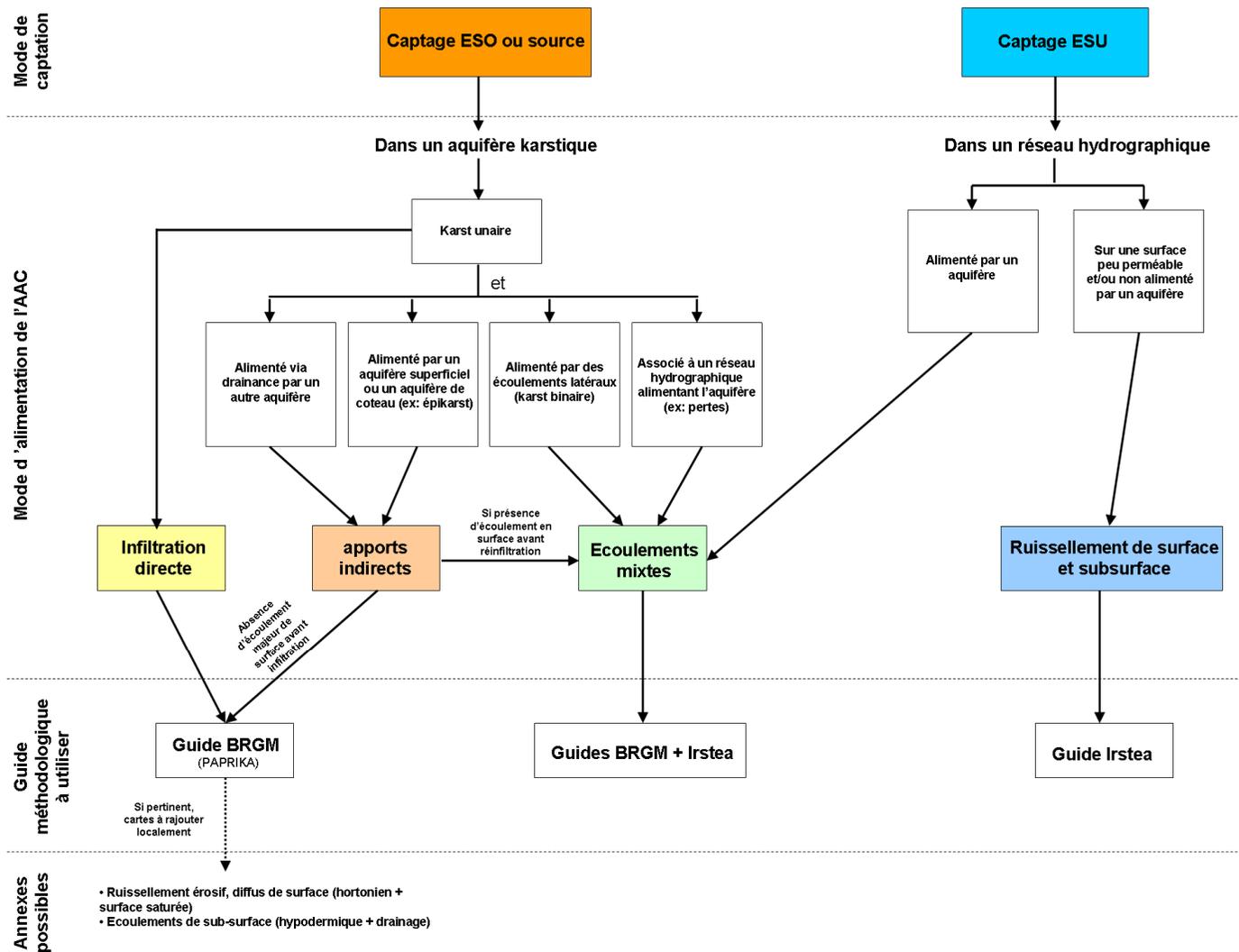


Figure 26 : Typologie de transfert sur une aire d'alimentation de captage captant un aquifère karstique

2.7. Exemples

Afin d'illustrer la méthodologie, plusieurs exemples concrets d'aires d'alimentation de captages sont donnés dans ce rapport. Après la présentation du contexte hydrologique/hydrogéologique, une démarche est proposée pour définir la cartographie de vulnérabilité de ces sites en tenant compte de la typologie définie antérieurement et des guides de cartographie de vulnérabilité du BRGM et de l'Irstea.

2.7.1. Exemple d'un captage d'eau de surface : la prise d'eau de Carly (62).

Contexte hydrologique/hydrogéologique

La prise d'eau de surface de Carly (non classée parmi les captages Grenelle) est située sur la Liane au sud-est de Boulogne sur Mer. La Liane est un fleuve côtier du Pas-de-Calais prenant sa source à Quesques (62) et qui se jette dans la Manche. Le bassin versant est de 271km² (source SANDRE). Un travail de délimitation et de cartographie de vulnérabilité de l'aire d'alimentation par le BRGM et le bureau d'études GEONORD de cette prise d'eau de surface est mené en 2012-2013 afin de proposer un plan d'action visant à protéger le captage des pollutions diffuses. Une délimitation du bassin versant est proposée par le BRGM est présentée Figure 27 (rapport à paraître).

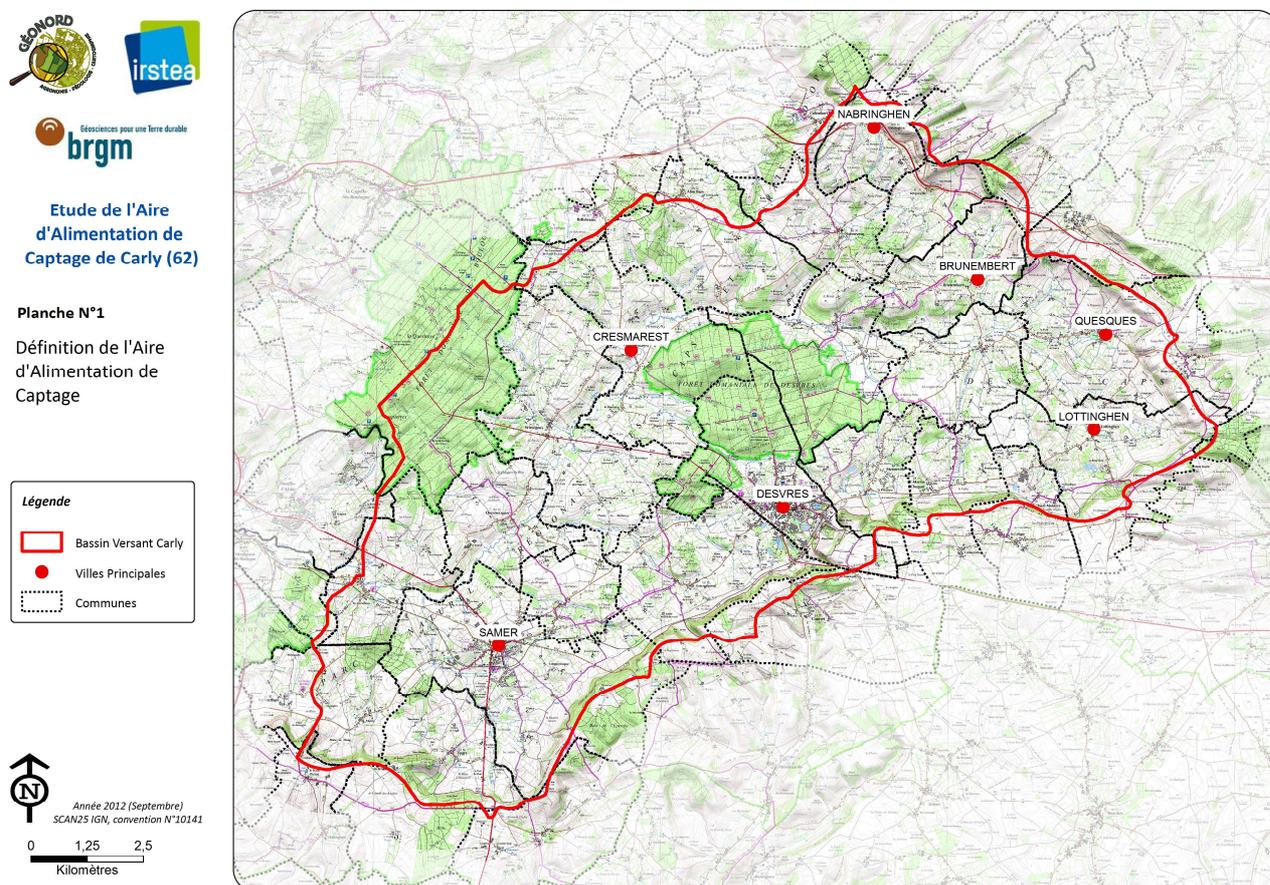


Figure 27 : Délimitation du bassin versant de Carly (document BRGM)

La Liane est alimentée en amont par des résurgences de l'aquifère contenu dans la craie séno-turonienne et s'écoule sur des terrains à tendance majoritairement argileuse du jurassique (Figure 28).



Figure 28 : Bassin de la Liane et carte géologique locale (source Infoterre).

En termes de mode d'alimentation de l'AAC, on peut distinguer deux zones, schématisées en Figure 29 :

- Une zone amont de type AAC ESO, où l'infiltration vers l'aquifère crayeux constitue le transfert dominant.
- Une zone aval de type AAC ESU, réceptacle à la fois des eaux de l'aquifère crayeux en tête de bassin versant de la Liane et des eaux de pluie, et où les écoulements de surface (ruissellement) et sub-surface (drainage par exemple) prédominent.

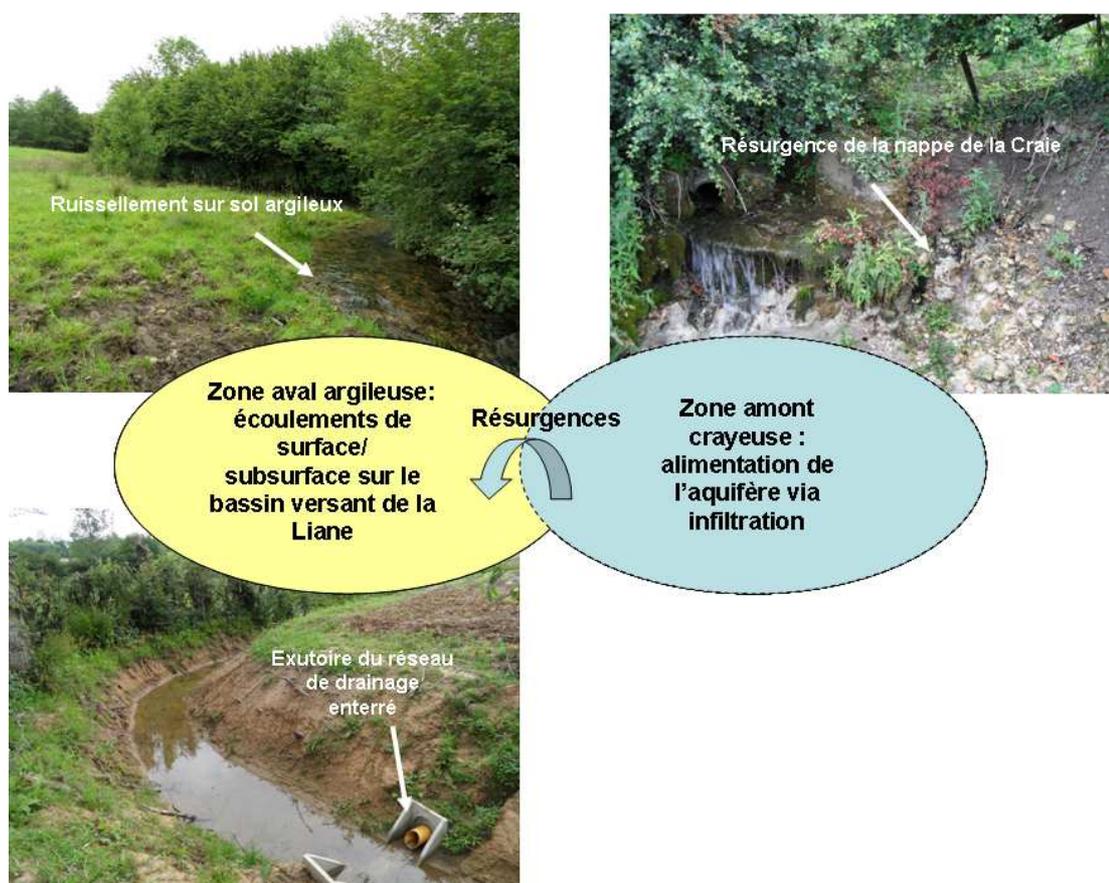


Figure 29 : Photos et schématisation de l'AAC de Carly : la zone amont est composée de terrains crayeux infiltrants, tandis que la zone aval correspond au bassin versant de la Liane composé de terrains argileux sur lesquels les transferts de surface et subsurface sont majoritaires.

Approche méthodologique pour la cartographie de vulnérabilité

L'aire d'alimentation du captage d'eau de surface de Carly **peut être qualifiée d'AAC « mixte »** en termes de mode d'alimentation puisque l'on observe à la fois des transferts en surface/sub-surface et des transferts via infiltration. Le traitement de cette AAC est ici particulier puisqu'il existe une zonation spatiale assez distincte des modes de transfert.

L'AAC peut être ainsi subdivisée en deux zones lors de l'établissement de la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque :

- Une zone amont où l'infiltration vers l'aquifère crayeux constitue le transfert majeur. Pour cette zone, le guide BRGM de cartographie de vulnérabilité des milieux continus peut être utilisé (sous réserve que le sol soit principalement infiltrant et que l'aquifère crayeux soit dans cette zone non karstique).
- Une zone aval où les transferts majeurs sont observés en surface et sub-surface étant donné la nature plutôt argileuse des terrains. Pour cette zone, c'est le guide Irstea qui doit être mis en pratique.

Il est à noter que pour ce type de contexte, après avoir vérifié qu'au vu de l'occupation du sol la zone amont peut contribuer à la contamination, il pourrait être intéressant d'effectuer des mesures de qualité de l'eau en nitrates et produits phytosanitaires au niveau des résurgences en tête de bassin, afin de déterminer quels sont les apports potentiels de l'aquifère crayeux en termes de contaminants par rapport au reste du bassin versant de la Liane. Dans le cas où les apports de la nappe constitueraient des flux faibles et négligeables de contaminants (quelque soit la saison), la cartographie de vulnérabilité de l'AAC pourrait se limiter à la partie aval de l'AAC, c'est à dire à l'utilisation du guide Irstea dans la zone du bassin versant où les écoulements de surface/subsurface sont majoritaires.

2.7.2. Exemple d'un captage en milieu continu : le champ captant de Quiery la Motte (62)

Contexte hydrologique/hydrogéologique

Le champ captant de Quiery la Motte, constitué de 5 points de prélèvement (F01 à F04 HBNPC + Quiéry-la-Motte), est classé « Grenelle » avec une problématique double, nitrates et produits phytosanitaires, pour lesquelles des actions de lutte contre les pollutions diffuses ont déjà été mises en place.

Le champ captant de Quiéry la Motte (62) alimente la communauté d'agglomération d'Hénin-Carvin. L'aquifère capté est celui de la Craie, correspondant dans cette zone, à un aquifère libre sub-affleurant et continu. L'hydrogéologie au niveau de ce champ captant est relativement bien documentée (Bastin, 2005 ; Lacherez, 1996 ; Lacherez, 2000).

En 1995, une procédure réglementaire de protection des forages a été engagée, précédée par la mise en place d'un Projet d'Intérêt Général (PIG)¹² limitant les activités polluantes à proximité des forages. Les délimitations du PIG et des périmètres de protection sont présentées en Figure 30.

¹² Le PIG correspond à la Déclaration d'Utilité Publique (DUP) élargie

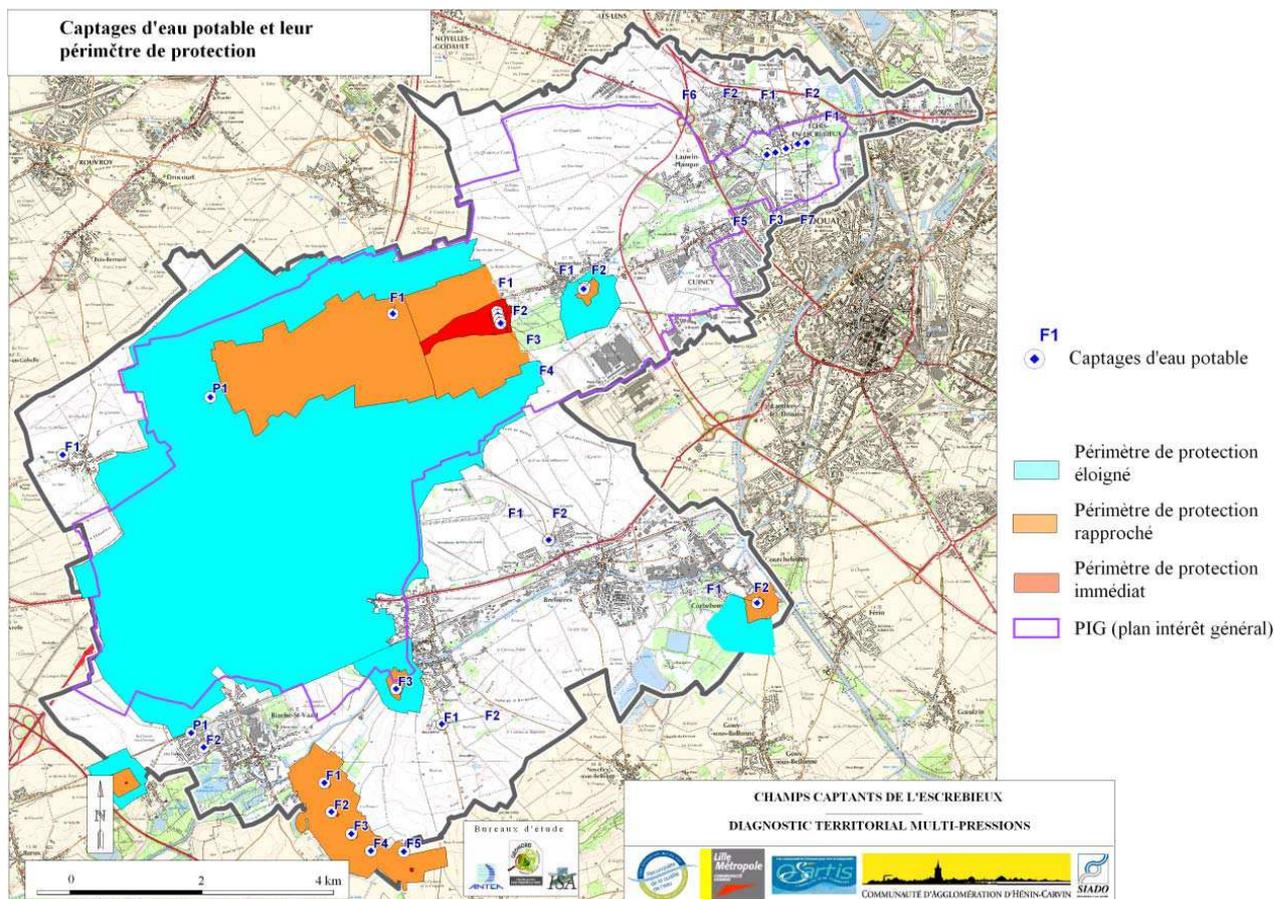


Figure 30 : Limites du Projet d'Intérêt Général et des périmètres de protection du champ captant de Quiry la Motte (ANTEA et al., 2009)

L'aire d'alimentation du champ captant est marquée par la présence d'un cours d'eau, l'Escrebieux (affluent de la Scarpe) asséché une partie de l'année, son alimentation dépendant du niveau piézométrique de la nappe de la Craie qui l'alimente en période de hautes eaux (ANTEA et al., 2009). Une coupe schématique de la vallée de l'Escrebieux est présentée en Figure 31.

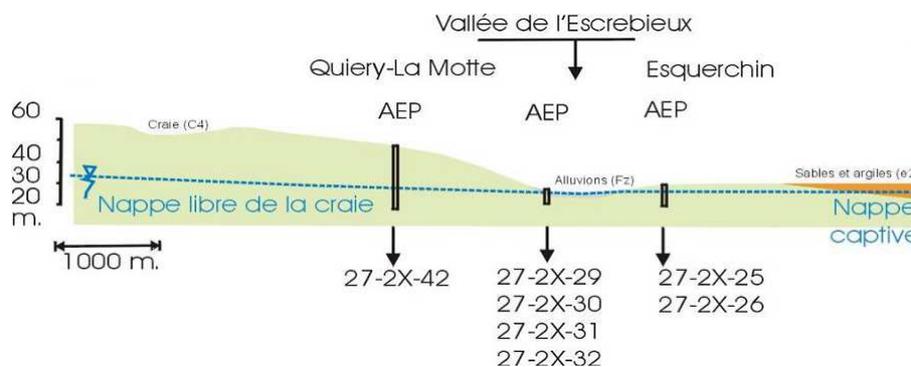


Figure 31 : Coupe schématique transversale Nord-Sud de la vallée de l'Escrebieux (ANTEA et al., 2009)

Le lit de ce cours d'eau est d'autre part étanchéifié en majeure partie dans l'objectif de limiter l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe (Figure 32).

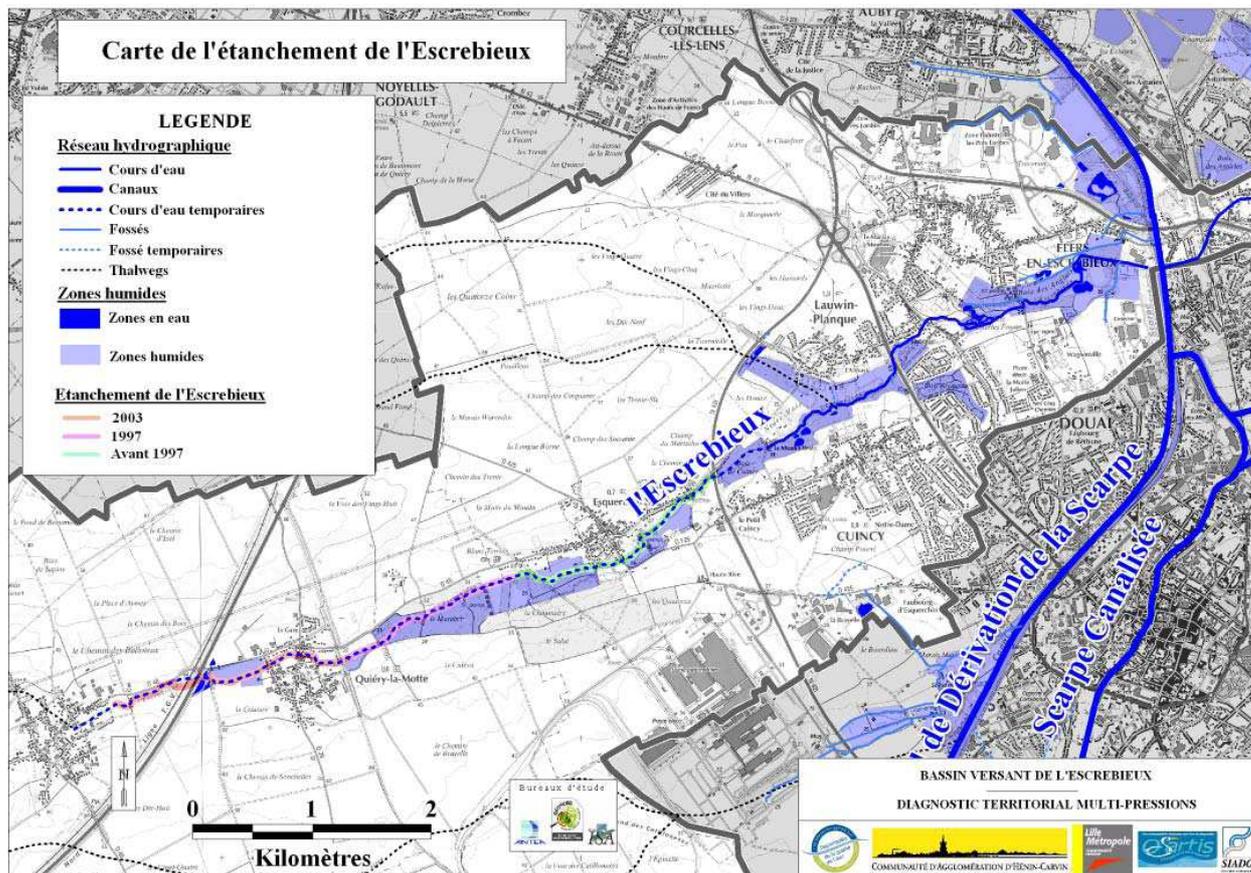


Figure 32 : Répartition des zones étanchéifiées de l'Escrebieux (ANTEA et al., 2009).

Approche méthodologique pour la cartographie de vulnérabilité

Le champ captant de Quiry la Motte a fait l'objet d'un diagnostic territorial multipressions comprenant une étude de la vulnérabilité de l'aire d'alimentation (ANTEA et al., 2009) et d'une étude de modélisation (SB₂O Ingénierie & Environnement, 2009).

Pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque, les auteurs ont séparé la vulnérabilité du bassin en deux parties, l'une concernant les eaux souterraines, l'autre concernant les eaux superficielles (les captages de cette AAC sont des captages d'eau souterraine pouvant avoir une alimentation mixte eau de surface/eau souterraine). Les méthodologies de délimitation et de cartographie de la vulnérabilité employées sont antérieures et différentes de celles définies par le BRGM et Irstea. Elles ont fait l'objet d'une présentation dans un rapport exposant un retour d'expérience des méthodes ayant été employées pour cartographier les aires d'alimentation de captage des captages Grenelle (Vernoux et al., 2011).

Une carte illustrant la cartographie de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines à laquelle aboutit la méthodologie alternative utilisée est présentée en Figure 33.

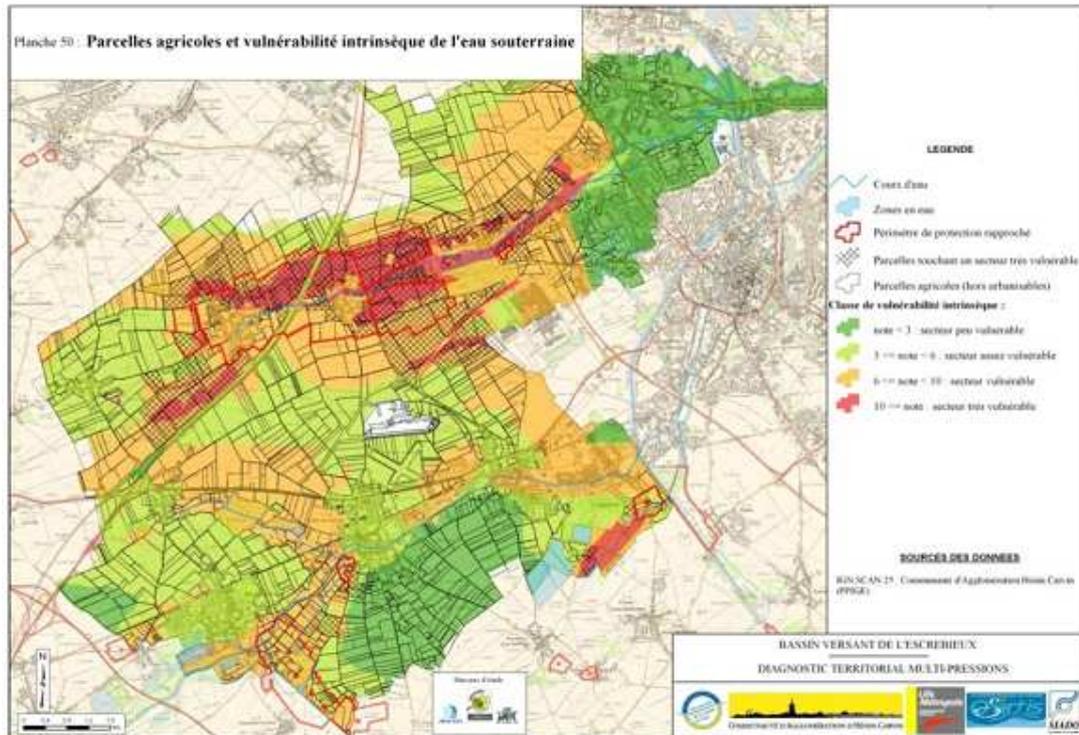


Figure 33 : Vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine sur le PIG du champ captant de Quiery la Motte (ANTEA et al., 2009).

Sur la rive droite de l'Escrebieux (au Sud), les sols sont fortement battants, et de plus en bord de cours d'eau, les sols sont fortement à très fortement hydromorphes, ce qui induit du ruissellement en bordure de cours d'eau et jusqu'à l'Escrebieux. Lorsqu'on s'éloigne perpendiculairement du cours d'eau, les sols deviennent non hydromorphes et plus profonds favorisant l'infiltration, bien que cette zone soit classée en zone de forte battance (d'autres données complémentaires sont attendues afin de connaître les valeurs de ces phénomènes de battance).

Sur la rive droite de l'Escrebieux (au Nord), les sols sont moins battants et non hydromorphes. Bien que la réserve utile (0,30 à 0,40 m) et la profondeur des sols soit faible, l'infiltration est présumée comme étant le mécanisme de transfert dominant, la nappe présentant une bonne perméabilité verticale et se trouvant à 5 m de profondeur. Toutefois en période de très hautes eaux (tous les 7ans environ selon les responsables du site de Quiéry-la-Motte), la nappe peut affleurer et provoquer des phénomènes de ruissellement.

Ainsi, après analyse des données récupérées auprès de la Communauté d'Agglomération d'Hénin-Carvin (CAHC), il ressort que ce site d'étude est essentiellement régi par de l'infiltration directe des eaux de pluie. Des problèmes peuvent toutefois se présenter : entrainement des contaminants présents dans la réserve utile lors des remontées de nappe ou phénomènes de battance lors d'épisodes de pluie.

Cependant, le ruissellement engendré par la battance ne semble pas être une voie de transfert majeure pour les pollutions diffuses sur cette AAC, les zones de réinfiltration étant limitées et l'Escrebieux étant imperméabilisé. L'eau qui ruisselle sur la couche battante se déverse ainsi dans ce cours d'eau mais ne s'infiltre pas et est exportée hors du bassin d'alimentation vers la Scarpe

En conséquence, trois principaux types de transfert ont pu être mis en évidence (voir Figure 34) :

- l'infiltration diffuse directe ou indirecte
- le ruissellement suite à des phénomènes de battance
- la réalimentation du cours d'eau via l'affleurement de la nappe (résurgence puis ruissellement jusqu'à l'Escrebieux)

Le mécanisme de transfert prépondérant sur cette AAC correspond à de l'infiltration.

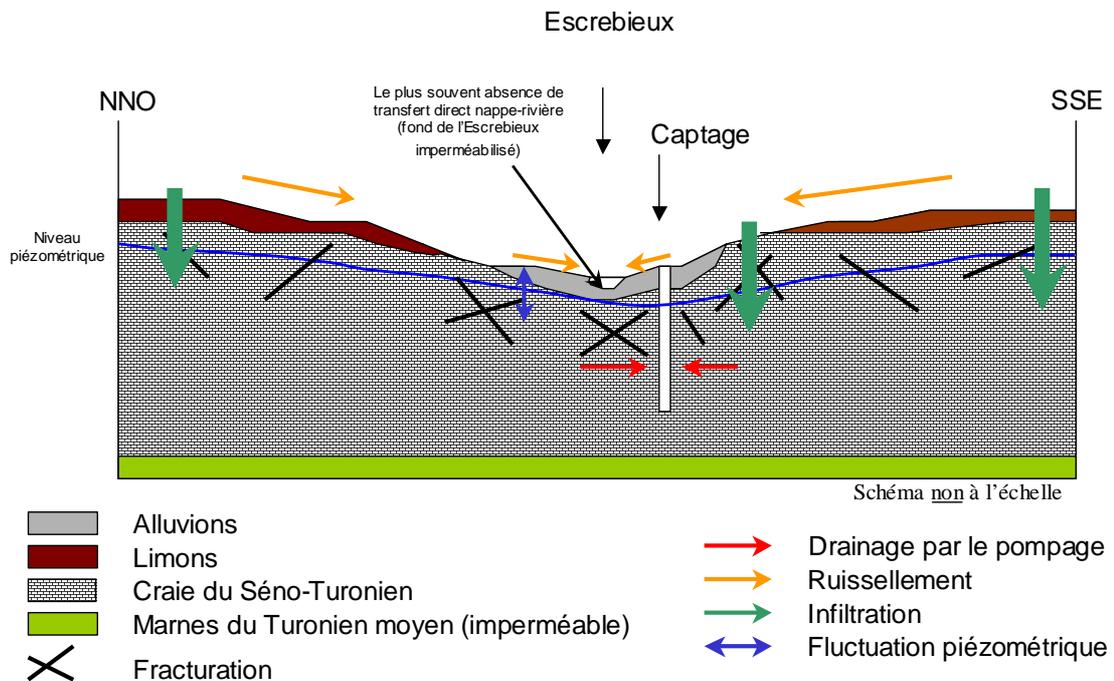


Figure 34 : Coupe schématique représentant les principaux transferts au sein de l'AAC de Quiéry-la-Motte (à partir du rapport ANTEA et al, 2009 et de la modélisation de SB20 Ingénierie & Environnement, 2009)

Par conséquent, pour ce contexte, la cartographie de vulnérabilité du milieu aurait pu se limiter à l'utilisation de la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines par la méthode des milieux continus du BRGM. A noter que si une alimentation de la nappe de la Craie par l'Escrebieux avait été observée, l'application du guide Irstea en parallèle aurait été justifiée, d'autant que les sols dans la zone du PIG sont battants.

2.7.3. Exemple d'un captage en milieu discontinu fissuré : les sources Couron (commune de Castanet, 82)

Contexte hydrologique/hydrogéologique

La commune de Castanet est alimentée par les sources Couron classées parmi les captages Grenelle. Elles ont fait l'objet d'une étude de délimitation et de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de leur aire d'alimentation par l'association des bureaux d'études ANTEA-GINGER-CALLIGEE (2010) afin de mettre en place un programme d'action visant à leur protection vis-à-vis des pollutions diffuses (les teneurs en nitrates pour ces sources sont proches des valeurs maximales admissibles pour la distribution d'eau potable). Les informations présentées ci-dessous proviennent du rapport de l'association des bureaux d'études (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).

Les sources Couron sont au nombre de cinq et se trouvent en bordure d'un vallon. Elles émergent de l'aquifère des grès du Trias au contact de niveaux peu perméables composés d'argilites. Cet aquifère est classé parmi les milieux discontinus fissurés avec la présence de fractures détectées par la prospection géophysique, et une variabilité rapide des débits et des paramètres physico-chimiques (conductivité, température) à la suite d'un épisode pluviométrique. La nappe est libre.

Le fonctionnement hydrogéologique des sources est le suivant (Figure 35) :

- alimentation par la pluie sur son bassin hydrogéologique et plus particulièrement sur le plateau,
- infiltration dans la zone altérée et/ou fissurée,
- écoulement dans la zone altérée de surface sur une distance d'une centaine de mètres et une profondeur de 0 à 10 m, et écoulement dans la zone fissurée sur une profondeur de 10 à 30 m,
- émergences au contact des argilites qui constituent un niveau imperméable dans une zone très fracturée.

L'écoulement en profondeur est limité par les niveaux peu fissurés des grès du Trias et les argilites.

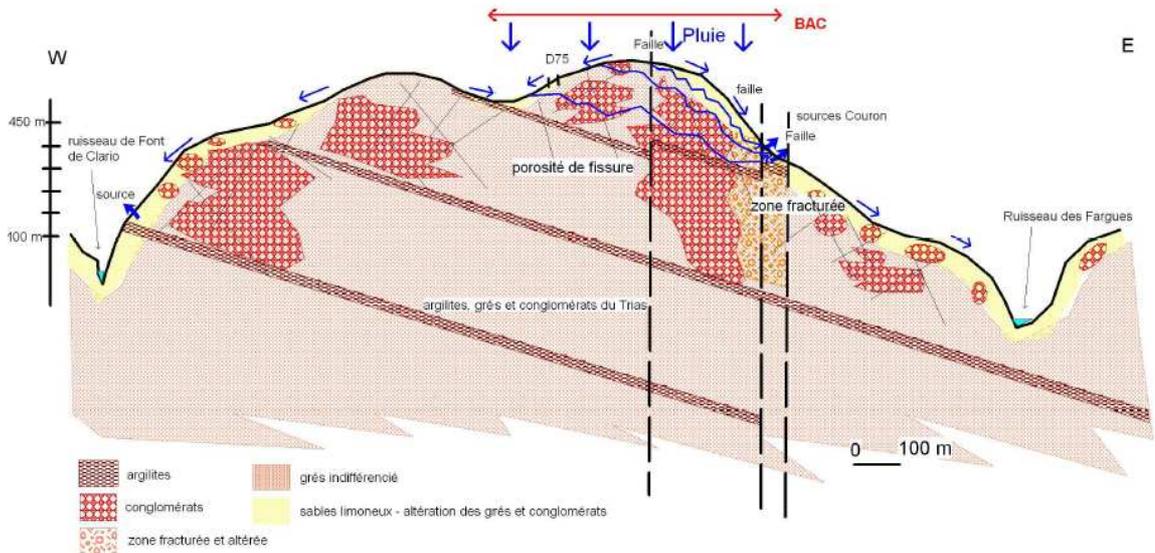


Figure 35 : Coupe hydrogéologique schématique (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).

Les limites de l'AAC hydrogéologique ont été déterminées à partir de la fracturation, du contexte géologique, de la topographie, de la situation des sources et du bilan hydrologique. Les limites de l'AAC globale ont été déterminées en intégrant les périmètres de protection et en prenant en compte le volume estimé sur un cycle hydrologique (celui de 1996). La superficie de l'AAC est ainsi estimée à près de 71ha (Figure 36).

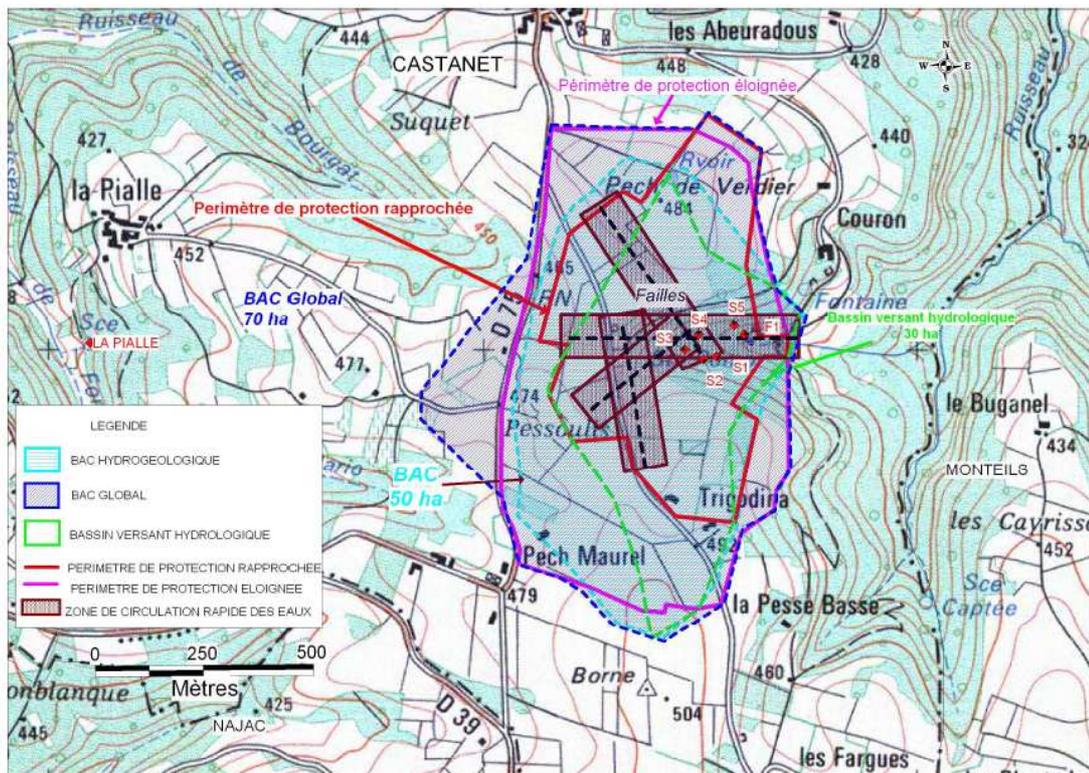


Figure 36 : Délimitation de l'aire d'alimentation de captage des sources Couron (AAC = BAC global) (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).

Approche méthodologique pour la cartographie de vulnérabilité

L'aquifère capté a été classé parmi les milieux discontinus fissurés par ANTEA-GINGER-CALLIGEE. La méthodologie adoptée par cette association de bureaux d'études pour

cartographier la vulnérabilité intrinsèque est celle proposée par le BRGM (Vernoux et al., 2007) pour les milieux discontinus fissurés.

La carte de vulnérabilité intrinsèque finale est présentée Figure 37.

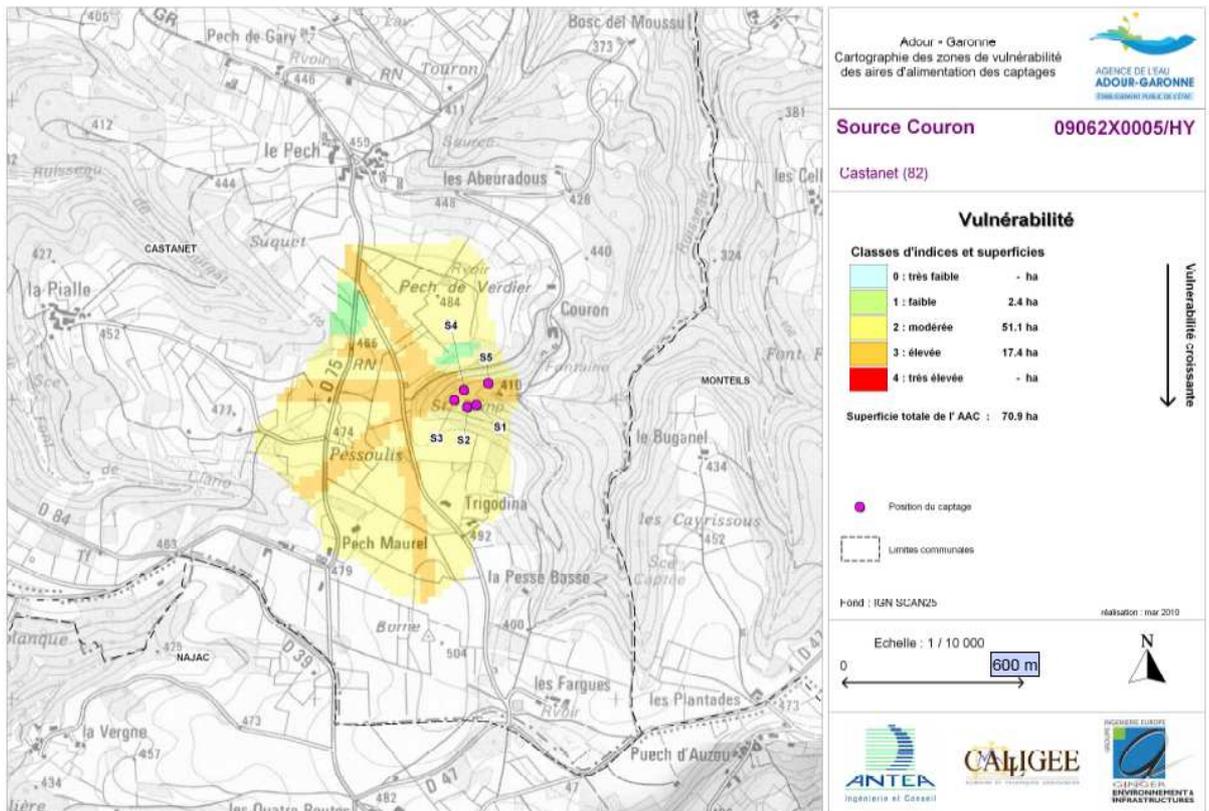


Figure 37 : Carte de vulnérabilité intrinsèque des sources Couron (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).

La carte de vulnérabilité montre que les zones les plus vulnérables pour l'aquifère (en orange sur la carte) sont situées dans les zones fracturées, voies préférentielles pour l'infiltration des eaux de surface. Sur le reste de l'AAC, la vulnérabilité est classée comme « modérée », les formations des grès et conglomérats du Lias étant peu fracturées (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).

Cependant, dans la méthodologie BRGM pour les milieux discontinus fissurés, le sol n'est pas suffisamment pris en compte pour ce type de contexte où les écoulements sont surtout mixtes (l'eau migre souvent en (sub)surface via ruissellement ou écoulements hypodermiques avant infiltration via le réseau de fissures). Certains phénomènes de transfert tels que les écoulements de sub-surface hypodermiques (prise en compte des écoulements latéraux à quelques centimètres de profondeurs) ou encore la battance ne sont pas considérés. Aussi, pour ce type de contexte hydrogéologique, l'utilisation combinée de la méthode BRGM pour le repérage des zones d'infiltration et de la méthode Irstea pour la caractérisation des écoulements de surface apparaît nécessaire pour combler ces lacunes. Cela permettrait d'améliorer la prise en compte de l'ensemble des transferts de (sub)surface (ruissellement, écoulements hypodermiques, dérive de pulvérisation...) et par conséquent d'améliorer le positionnement et la pertinence des actions lorsqu'on les choisit en fonction de la limitation de tel ou tel type de transfert. Pour cette aire d'alimentation, une étude pédologique plus poussée apparaît donc nécessaire.

2.7.4. Exemple d'un captage en milieu karstique : le captage de Fontaine Ronde (70)

Contexte hydrologique/hydrogéologique

La source captée de Fontaine Ronde est classée parmi les captages Grenelle. Des contaminations à l'atrazine, déséthylatrazine, mecoprop, bentazone ou encore isoproturon ont été enregistrées notamment (Cabinet Reilé Pascal, 2004).

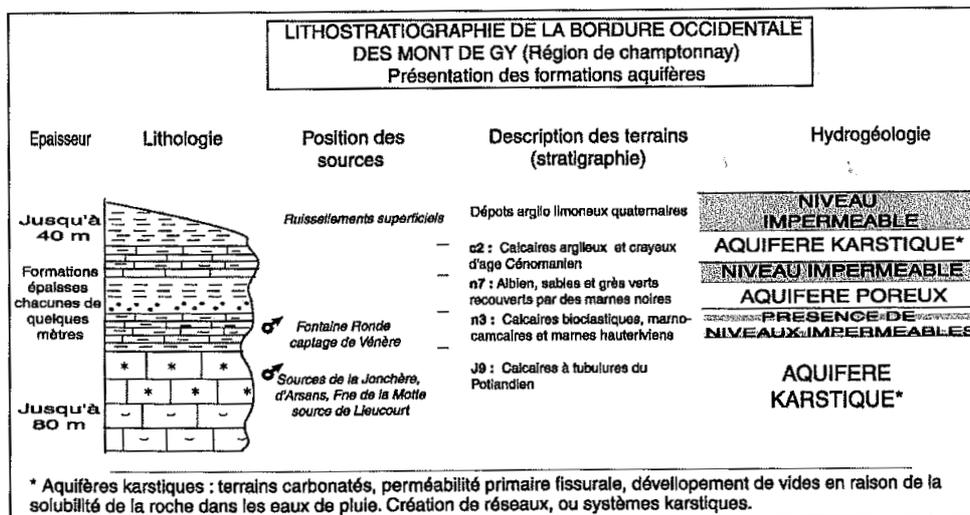


Figure 38 : Coupe lithostratigraphique de la bordure occidentale des Monts de Gy

La source de Fontaine Ronde émerge dans le fossé d'effondrement de la Saône, en bordure des Monts de Gy. La formation géologique qui prédomine dans l'unité géologique du fossé de Saône est celle des calcaires à tubulures du Portlandien (Jurassique supérieur).

En se rapprochant des Monts de Gy, les calcaires forment une légère dépression synclinale où des terrains crétacés apparaissent en recouvrement du Portlandien. Cet affleurement crétacé forme une « boutonnière » au milieu du plateau à dominante portlandienne. C'est une formation aquifère, puissante de quelques mètres au droit du captage, essentiellement composée de calcaires bioclastiques et marno-calcaires (Figure 38). Sa partie basale, imperméable, est composée de marnes de l'Hauterivien. Fontaine Ronde émerge des niveaux calcaires de l'Hauterivien.

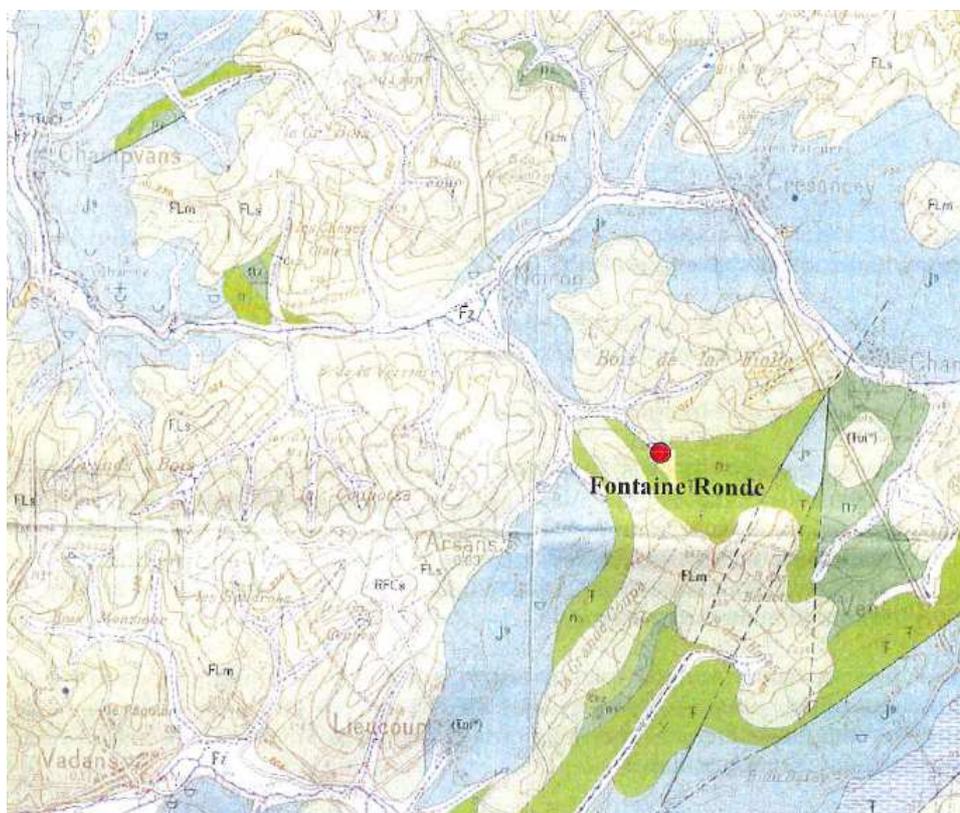


Figure 39 : Extrait de la carte géologique de Gray au 1/50000

Géologiquement, le relief des Monts de Gy est un graben, structuré le long de failles de direction N60° (voir Sud-Est de la carte géologique en Figure 39). Les Monts de Gy viennent chevaucher le fossé de Saône au niveau de la Faille de Vénère. La boutonnière crétacée de Champtonnay est déformée par un faisceau de failles secondaires. Ces failles qui convergent vers le village de Champtonnay, cisailent le synclinal Crétacé en quatre compartiments (Figure 40) :

- Le compartiment effondré de Vénère-Champtonnay, où dominent les sables et argiles de l'Albien
- Deux « horsts », ou compartiments hauts au niveau du Bois des Haies,
- La bordure Ouest du synclinal, d'où émerge Fontaine Ronde

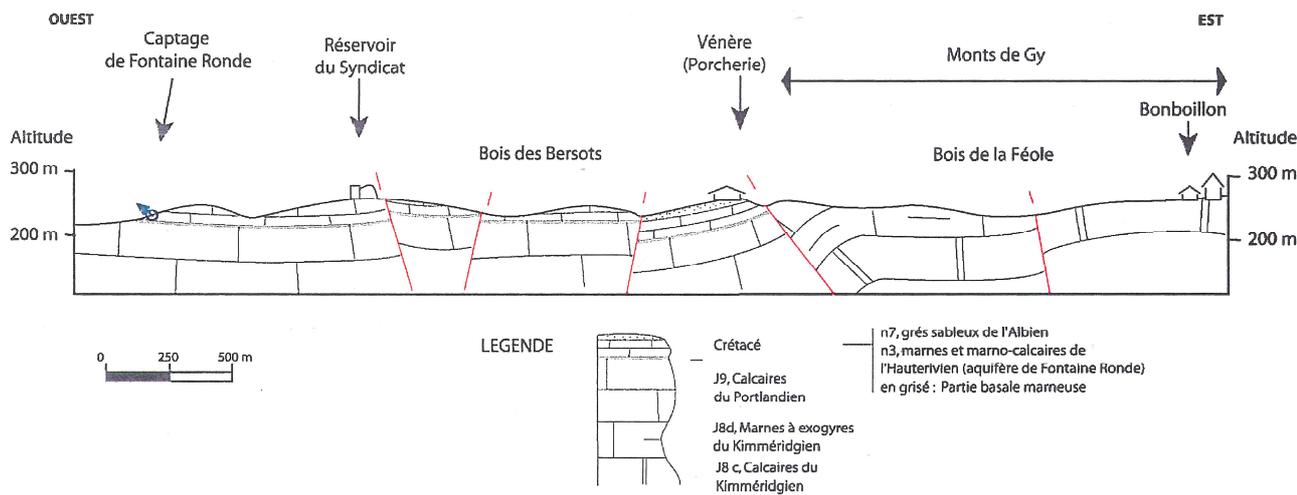


Figure 40 : Coupe géologique de la bordure occidentale des Monts de Gy (Situation de la source captée de Fontaine Ronde)

Afin de délimiter l'aire d'alimentation du captage de Fontaine Ronde, un certain nombre de traçages ont été réalisés (Figure 41). Ceux-ci montrent une partition des écoulements assez complexe. Ainsi, les traçages de Vénère, d'Arsans et de la Perrière mettent en évidence :

- La partition de la boutonnière Crétacé de Champtonnay en plusieurs unités aquifères par les failles qui structurent cet ensemble. Sa partie Nord-Est alimente les sources de Vénère. Les compartiments hauts intermédiaires sont drainés par la source de la Fontaine de Champtonnay, et le ruisseau des Vaux Errards. Seule la partie occidentale des terrains crétacés alimente Fontaine Ronde.
- Une direction dominante Sud-Nord des circulations souterraines d'eau.
- L'existence de transferts hydrauliques entre les formations du Crétacé et les calcaires du Portlandien (Jurassique supérieur). Les marnes présentes à la base du Crétacé ne constituent donc pas un niveau étanche séparant les calcaires jurassiques et crétacés en deux aquifères indépendants.

Seul le traçage de la Combe Vaudemont n'aboutit pas aux conclusions ci-dessus. Cette constatation pourrait être liée à la situation de hautes eaux lors de sa réalisation : absence de perte du ruissellement présent dans le bois le long de la route.

En basses eaux, il n'est pas exclu qu'une reconnaissance de circulations souterraines à partir de la même doline aboutisse au captage de Fontaine Ronde. Le bassin d'alimentation de cette venue d'eau s'étendrait donc jusqu'au niveau de la faille suivant le talweg des Vaux Errards (Figure 41). L'enfoncement dans le plateau calcaire de la zone saturée, en période de basses eaux, expliquerait donc la perte partielle des écoulements présents dans cette dépression.

Fontaine Ronde semble être l'exutoire principal du système karstique. Les autres sources proviennent de circulations fissurales.

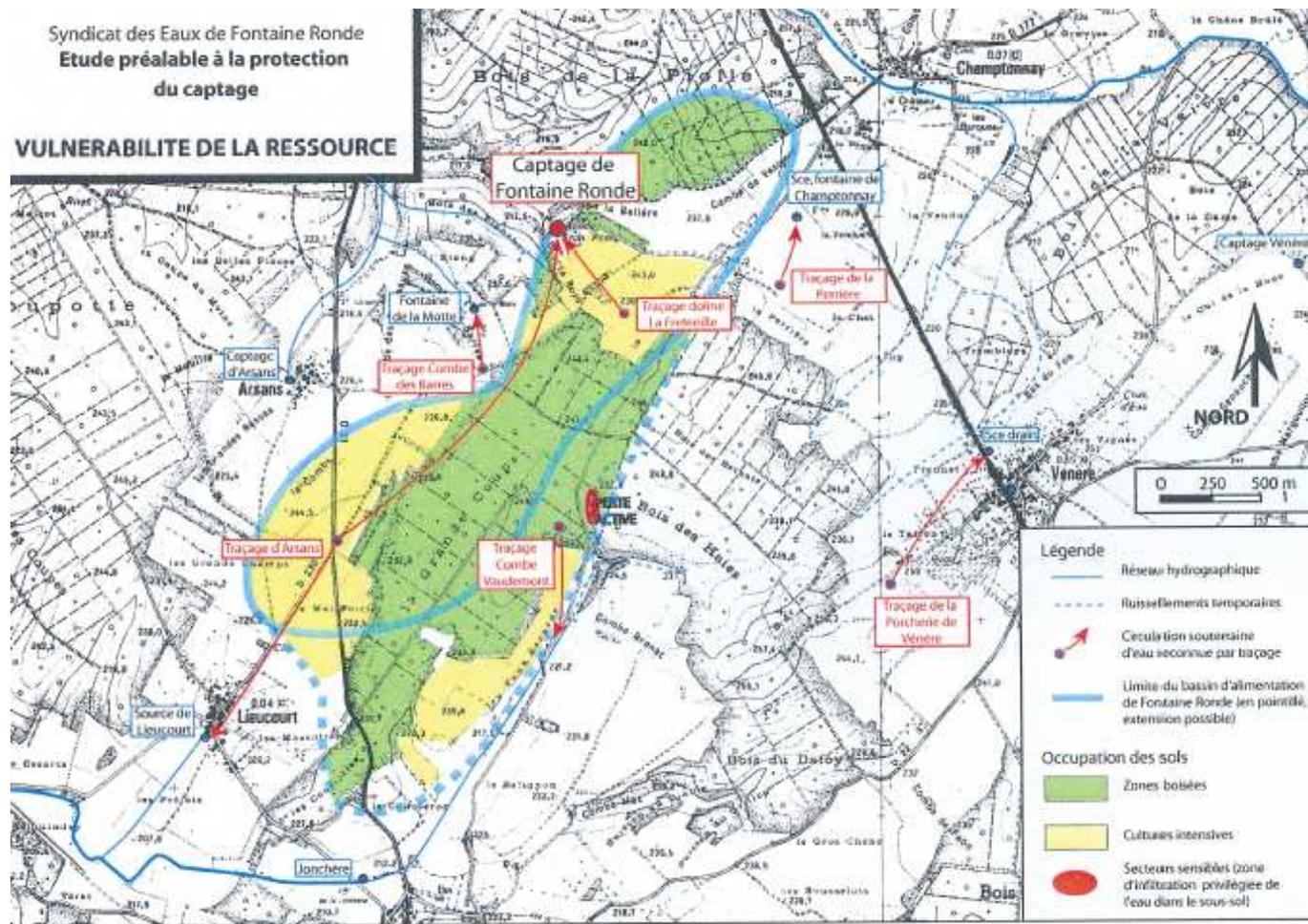


Figure 41 : Aire d'Alimentation du Captage de Fontaine Ronde : reconnaissance des circulations souterraines par traçage (Cabinet Reile, 2010)

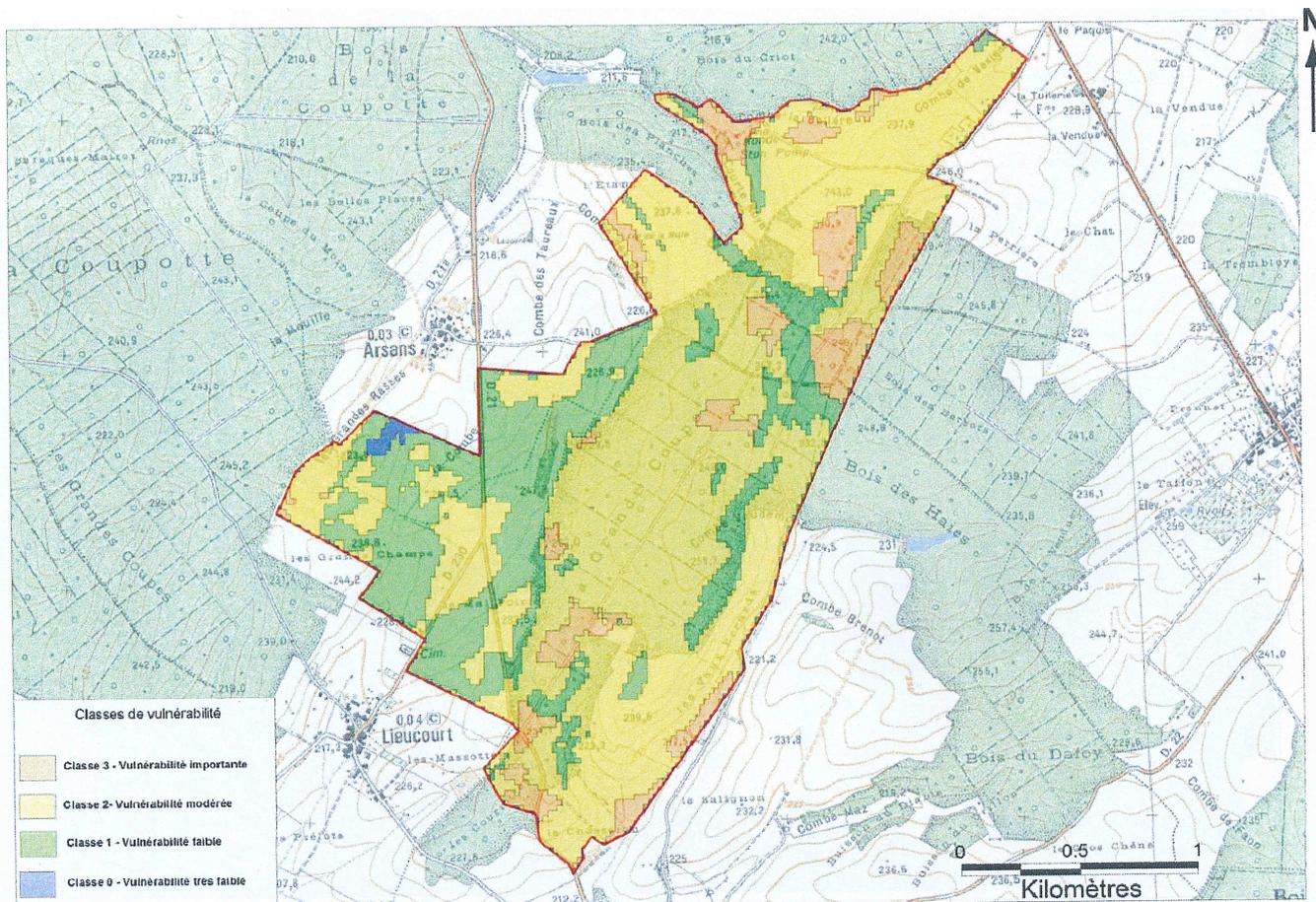


Figure 42 : Carte de vulnérabilité intrinsèque du captage de Fontaine Ronde (Cabinet Reile, 2010)

Approche méthodologique pour la cartographie de vulnérabilité

Dans le cas présent, le bureau d'étude a utilisé la méthode RISKE « modifiée » (Vergnes et al., 2006) qui correspond à la méthode de cartographie de vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques (méthode préconisée par le BRGM avant la méthode PaPRIKa). Elle aboutit à la carte présentée sur la Figure 42 (Cabinet Reile Pascal, 2010).

Cependant, si la méthode du BRGM pour la cartographie de vulnérabilité intrinsèque des milieux karstiques permet de repérer sur un vaste territoire les zones les plus vulnérables au transfert à l'infiltration vers la nappe, il peut être intéressant, voire nécessaire dans certains cas, d'utiliser en parallèle la méthode Irstea pour cartographier les transferts de surface pour ce type de contexte.

Prenons, en effet, l'exemple d'une doline visible sur l'aire d'alimentation de Fontaine Ronde : la doline de Fretenille. Celle-ci se situe au nord de l'AAC (voir localisation en Figure 41 et photos en Figure 43) et était cultivée auparavant (en 2010, elle était en blé par exemple). Elle est aujourd'hui enherbée. Lors de certains épisodes pluvieux, un remplissage de la doline par des eaux provenant à la fois du ruissellement des eaux de surface et de la résurgence de la nappe karstique est observé.

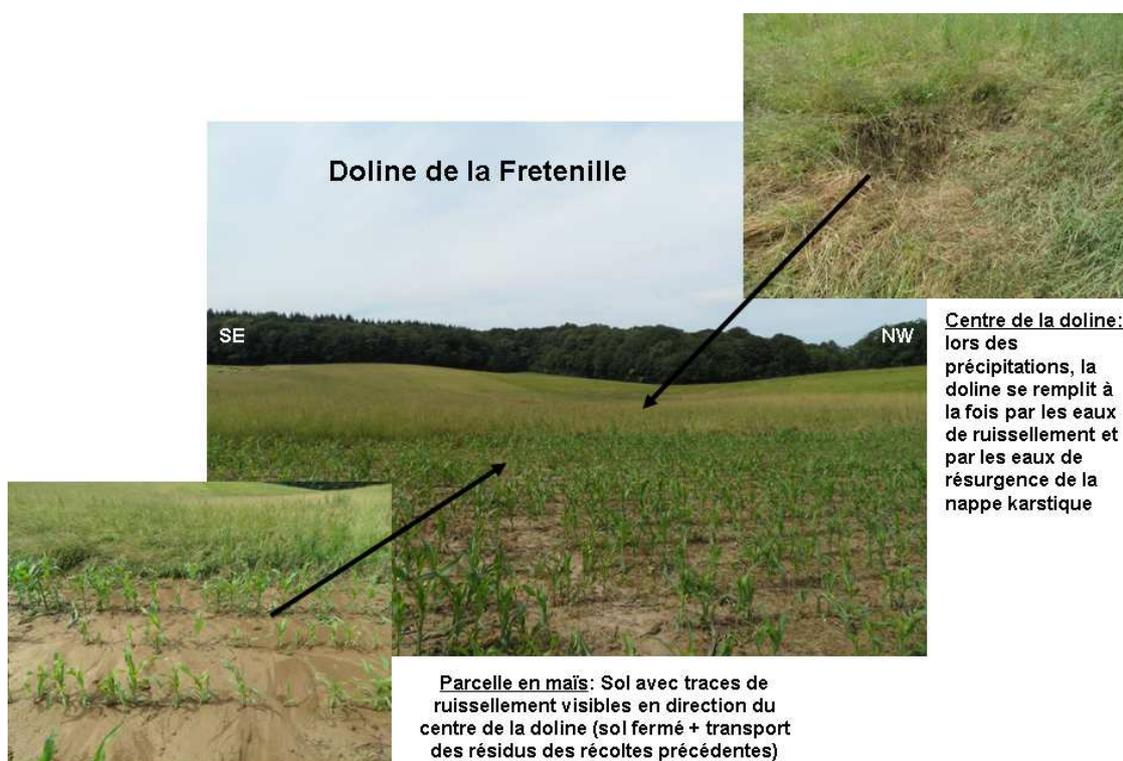


Figure 43 : La doline de la Fretenille.

D'autre part, cette doline est le siège de transferts rapides des eaux de surface vers le captage. En effet, un traçage à la fluorescéine réalisé par le Cabinet Reile Pascal en 2003 (Cabinet Reile Pascal, 2004) a révélé une vitesse apparente de l'eau dans le milieu souterrain de 122m/h.

Un traitement particulier de cette zone pour la caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque est donc requis, avec un travail amont de terrain ici nécessaire et une prise en compte du guide Irstea pour les raisons suivantes :

- **La zone de la doline doit être bien délimitée dans l'espace afin de positionner au mieux les actions.** Le facteur « Infiltration » pris en compte dans la cartographie de vulnérabilité intrinsèque repose, pour les informations topographiques, le plus souvent sur les données des cartes IGN au 1/25000^e. **A l'échelle de la doline de la Fretenille, dont la dépression topographique n'est que de quelques mètres, la carte IGN n'est pas adaptée et une identification des parcelles situées dans la doline doit être réalisée sur le terrain** (le recours à un MNT avec une résolution plus élevée peut être aussi envisagé si celui-ci est disponible).
- **Les propriétés de transfert à la surface et sub-surface de la doline doivent être déterminées afin de déterminer quels types d'actions devront être mis en place en priorité dans la zone de la doline** (le sol est-il filtrant sur l'ensemble de la doline ? La doline constitue-t-elle un réceptacle d'eaux de drainage ?...). Dans le cas présent, lorsque

l'on étudie le sol du bassin versant de cette doline, on constate que celui-ci correspond à un sol limoneux en surface. D'autre part, des sondages à la tarière montrent la présence importante d'argile marbrée vers 40cm de profondeur et de traces d'hydromorphie légère dès 50 cm de profondeur. Ces indices montrent ainsi un sol propice au ruissellement des eaux de surface et faiblement infiltrant : en hiver, le sol est fermé suite au gonflement des argiles, ce qui conduit à une infiltration lente et à une circulation préférentielle en surface. Il n'a pas été observé en revanche de réseaux de drainage.

Par conséquent, pour ce type de contexte, l'exemple de l'aire d'alimentation du captage de Fontaine Ronde montre la nécessité de mieux prendre en compte les écoulements de surface et de ne pas se limiter à la seule utilisation de la méthode RISKE pour la cartographie de la vulnérabilité intrinsèque. Celle-ci conduirait (dans le cas d'une lecture seule de la carte finale) à se focaliser sur des actions de limitation d'intrants dans les zones les plus vulnérables au transfert vers la nappe en omettant les transferts en surface des contaminants. D'autre part, une cartographie fine sur le terrain des transferts dans les zones de doline (repérage de court-circuit aux transferts tel qu'un réseau de drainage...) et une meilleure délimitation des bassins versants des dolines pour la mise en place des actions, apparaît indispensable.

2.8. Conclusions

Sur la plupart des aires d'alimentation de captage, les transferts sont mixtes. Soit parce que les transferts de surface et verticaux peuvent être rencontrés simultanément, soit parce qu'ils peuvent être rencontrés de manière zonée sur l'aire d'alimentation (cas par exemple de l'aire d'alimentation de Carly). La prise en compte des deux guides de cartographie de vulnérabilité apparaît donc souvent nécessaire, même s'il est possible de n'utiliser ces guides que de manière partielle sur l'aire d'alimentation (division de l'aire d'alimentation possible en zones de types de transfert majoritaires par exemple).

Cependant, il est à noter que pour améliorer la cartographie de vulnérabilité intrinsèque, deux grands axes doivent être améliorés :

- La connaissance de la **pédologie**
- **Les observations de terrain** et des écoulements de surface

La prise en compte de la pédologie dans les études de cartographie de vulnérabilité doit être en effet améliorée. Celle-ci constitue le plus souvent le point clé pour comprendre quel chemin l'eau de pluie empruntera. Aussi est-il nécessaire d'améliorer son intégration dans les méthodes de cartographie de vulnérabilité du BRGM. Néanmoins, il est constaté que les informations pédologiques sont le plus souvent soit absentes, soit très partielles. Et lorsque des cartes existent, elles ne sont pas forcément partagées avec le maître d'œuvre.

D'autre part, la connaissance du terrain apparaît essentielle pour pouvoir interpréter correctement les cartes de vulnérabilité établies et ne pas exagérer ou omettre certains phénomènes de transfert. Le travail d'observation de terrain, même s'il n'est de quelques jours sur une aire d'alimentation de grande taille est **PRIMORDIAL** pour plusieurs raisons :

- Pour repérer et cartographier précisément les zones d'infiltration directe et le bassin versant qu'elles affectent (bétoires, pertes, gouffres, dolines...). Ces zones d'infiltration directe constituent les plus vulnérables sur les aires d'alimentation karstiques et sont non ou peu visibles sur les cartes topographiques.
- Pour repérer les lignes de source, zones particulièrement sensibles au transfert lorsqu'elles sont situées dans des zones cultivées
- Pour mieux comprendre le cheminement de l'eau à l'échelle parcellaire et repérer les court-circuits (réseaux de drainages enterrés, fossés non répertoriés sur les cartes IGN au 1/25000^e, thalwegs, talus...)
- Pour observer l'aménagement du territoire et des parcelles (bandes enherbées le long des cours d'eau, présence de talus, haies, fossés...) et l'état du chevelu hydrographique et sa sensibilité au transfert (dérive de pulvérisation, drainage...)

- Pour examiner la pédologie et observer l'existence d'écoulements de sub-surface et de sols hydromorphes (à noter que la photographie aérienne peut aussi être utilisée)
- Pour repérer les pratiques agricoles à risques ou celles à encourager lorsque cela est possible (tournières enherbées, interrangs de vignes enherbés...)
- Pour repérer les zones tampons, les bassins recueillant les eaux de drainage... et les zones qui pourront être utilisées pour la création de nouvelles zones tampons ou qui pourront être aménagées pour limiter les transferts (mise en place de haies, talus...)

Pour les grandes aires d'alimentation, il ne s'agit pas de réaliser des observations de terrain sur l'intégralité de l'aire d'alimentation qui demanderait des semaines, voire des mois de mission de terrain, mais de réaliser une mission de quelques jours sur des zones représentatives (en termes de transfert et de culture) afin de mieux interpréter les cartes réalisées (et connaître leur limite d'interprétation notamment) et effectuer des recommandations générales pour les zones non observées. A noter qu'il est préférable de faire ces observations de préférence après ou pendant un épisode pluvieux conséquent, ce qui permet de mieux apprécier les cheminements de l'eau. Même si ces observations de terrain représentent un coût financier, elles sont IMPERATIVES car elles permettent de mieux cadrer à la réalité et à l'étude d'être mieux acceptée par les acteurs de terrain (agriculteurs notamment).

3. Inventaire des actions possibles pour limiter l'impact des pollutions agricoles sur une AAC

Dans cette partie, nous traiterons du panel des types d'action à mettre en place pour protéger un captage vis-à-vis des pollutions diffuses (restreintes aux nitrates et produits phytosanitaires) **sans tenir compte de leur efficacité en termes de réduction de l'utilisation des intrants ou de leurs transferts vers les eaux de surface et souterraines (sujets traités dans le rapport final)**. Nous nous attacherons ici uniquement à différencier les actions suivant leur impact sur la réduction de l'utilisation et/ou du transfert des produits phytosanitaires ou des apports azotés. D'autre part, ce rapport étant « préliminaire », nous ne pouvons pas être exhaustifs quant à l'inventaire des actions. Enfin, afin de balayer au maximum les possibilités d'action, nous nous affranchirons des aspects socio-économiques et des contraintes de la conduite agronomique.

3.1. Les actions pour limiter les pollutions ponctuelles

Ce rapport préliminaire a surtout pour objectif de réaliser une synthèse des actions de lutte contre les pollutions diffuses. Cependant, un rappel sur les actions permettant de lutter contre les pollutions ponctuelles constitue un pré-requis essentiel d'autant que ces actions sont le plus souvent simples à mettre en place.

Les pollutions ponctuelles représentent l'ensemble des déversements accidentels ou non de produits phytosanitaires. Elles peuvent avoir pour source le renversement de bidons, un mauvais remplissage lors de la préparation de la bouillie, la vidange d'un fond de cuve, une gestion inappropriée des bidons vides...

Afin d'éviter ce type de contamination, des actions, synthétisées dans le diagnostic du corps de ferme, sont envisagées. Elles concernent essentiellement:

- L'application de la législation en vigueur, notamment l'arrêté du 12 septembre 2006 relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des produits visés à l'article L.253-1 du code rural
- l'aménagement de l'aire de remplissage : dimensionnement adapté, étanchéification, mise à disposition de clapets anti-retour, d'un système de séparation des eaux de lavage/eaux de pluie
- la vérification du matériel de pulvérisation et de son nettoyage
- la préparation des bouillies (éviter les débordements par exemple) et la gestion des volumes, notamment des fonds de cuve et des surplus
- la mise en place d'un stockage sécurisé des produits phytosanitaires (local fermé à clé, zone de manipulation sécurisée)
- la destruction des déchets (lavage des bidons, gestion des Emballages Vides de Produits Phytosanitaires - EVPP et des Produits Phytosanitaires Non Utilisés - PPNU)

La prévention des pollutions ponctuelles a fait l'objet d'un projet européen Life-Environnement entre 2005 et 2008 ; le projet TOPPS (Train the Operators to prevent Pollution from Point Sources – Former les utilisateurs de produits phytopharmaceutiques agricoles à la prévention des pollutions ponctuelles). Celui-ci a permis par exemple de montrer que la mise en place de formations, d'actions de démonstration ou de tout autre levier de « sensibilisation » apparaissent aussi comme des éléments essentiels pour lutter contre les pollutions ponctuelles (Vaçulik et al., 2008).

Par ailleurs, la mise en sécurité de l'accès aux forages constitue un point important pour éviter les risques de contamination directe via injection ou indirecte via ruissellement ou dérive de pulvérisation par exemple. Les piézomètres opérationnels doivent être cadenassés tandis que ceux qui ne sont plus opérationnels doivent être rebouchés conformément à la réglementation.

3.2. Les actions pour limiter les pollutions diffuses

Les actions pour limiter les pollutions diffuses sont très diverses et peuvent concerner des domaines très différents tels que l'agronomie, la réglementation, la formation, la gestion de l'occupation du sol.

3.2.1. Les grandes classes d'action

On peut les inventorier ainsi :

- les actions réglementaires : elles peuvent concerner l'interdiction de molécules sensibles au lessivage par exemple, l'interdiction d'utilisation sur certaines zones, le contrôle du respect des conditions d'application et d'utilisation des produits phytosanitaires...
- les actions concernant l'acquisition foncière : il s'agit ici d'adapter les pratiques culturales ou l'occupation du sol à la vulnérabilité du milieu par des échanges ou l'achat de parcelles situées dans les zones les plus vulnérables de l'AAC.
- la gestion de l'occupation du sol et de l'aménagement parcellaire : elle regroupe des actions telles que le boisement, la remise en herbe, l'agriculture biologique (en tant qu'occupation pertinente sur les zones les plus vulnérables), la mise en place de zones tampons, de haies, talus...
- les actions agissant sur le mode opératoire : utilisation et vérification du matériel, utilisation de buses anti-dérive homologuées...
- les outils d'aide à la décision : ils permettent notamment une meilleure évaluation du risque et ainsi, une réduction de la fréquence des traitements et des doses. Cependant, ils doivent être validés.
- les actions agronomiques : elles rassemblent des actions telles que la modification des assolements, le développement de Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates (CIPAN), l'agroforesterie, le travail du sol... Ces actions vont a priori plus loin que les optimisations permises par les outils cités à l'item précédent.
- les actions participatives (concertation entre les réseaux et les acteurs locaux) et la formation
- les actions en Zone Non Agricole : diminution voire abandon de l'utilisation des produits phytosanitaires dans les plans de désherbage des communes, gestion différenciée, acquisition de références techniques sur les méthodes alternatives au désherbage chimique (désherbage mécanique, thermique, mesures préventives telles que le paillage), amélioration de l'assainissement...

3.2.2. Essais de hiérarchisation

A partir de l'expertise scientifique INRA-Cemagref sur la réduction des pesticides et la limitation de leurs impacts environnementaux (Aubertot et al., 2005), les actions peuvent être classées en 3 groupes (Tableau 4) :

- Réduire la dispersion des intrants dans l'environnement, limiter les transferts (actions de type « T »)
- Raisonner l'utilisation des intrants (actions de type « R »)
- Réduire le recours aux intrants (actions de type « S »)

Tableau 4 : hiérarchisation des actions de lutte contre les pollutions diffuses

TYPES D'ACTION	ACTIONS AGISSANT SUR LES NITRATES	ACTIONS AGISSANT SUR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES
Réduire la dispersion des intrants dans l'environnement – limitation des transferts	Adapter l'occupation du sol suivant la vulnérabilité : boisement, remise en herbe, localisation de la jachère sur les zones les plus vulnérables, passage à l'agriculture biologique, développement de cultures énergétiques à bas intrants	
	Mise en place de Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN)	
	Mise en place de rotations adaptées des cultures, permettant la mise en place de Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates (CIPAN)	
	<p>Développement de zones tampons :</p> <p>Zones Tampons Humides (ZTH) à l'exutoire des réseaux de drainage</p> <p>Mise en place de bandes enherbées</p> <p>Mise en place de talus et/ou de haies</p>	
	Couverture du sol (enherbement permanent, paillage...)	
	Travail du sol suivant les courbes de niveau	
	Travail de rugosité afin de limiter le ruissellement et de favoriser l'infiltration (ex : barbuttes, semis en sols mottes)	
	Développement des Techniques Culturelles Simplifiées (résultats positifs variables suivant le type de sol)	
	<p>Passage à l'agroforesterie (diminution de la minéralisation de l'azote et du transfert des nitrates via infiltration)</p> <p>Choix pertinents des périodes d'épandage des effluents d'élevage et amélioration des techniques d'épandage</p> <p>Limitation de l'accès du bétail au cours d'eau</p>	<p>Réduction de la dérive de pulvérisation (emploi de buses anti-dérive adaptées...)</p> <p>Adapter les usages de produits phytosanitaires aux conditions de milieu</p> <p>Adapter la taille et la forme des parcelles à la pente (avec coupures enherbées, haies...)</p> <p>Mise en place de chemins d'écoulement végétalisés</p> <p>Favoriser lorsque c'est possible, le double semis dans les zones accumulant le ruissellement</p> <p>Mise en place d'ouvrages dispersifs</p>

		<p>(fascines) en cas de concentration des écoulements</p> <p>Enrichissement en humus (l'augmentation de la matière organique permet une meilleure structure de l'horizon de surface et limite ainsi le ruissellement)</p> <p>Isolement amont et aval des parcelles (chevet adapté, fourrières enherbées)</p> <p>Respect des préconisations en sols drainés</p>
Raisonner l'utilisation des intrants	Appel aux Outils d'Aide à la Décision validés	
	<p>Appel aux bulletins d'information (ex Bulletin de la Santé du Végétal) et flashs techniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> -méthode des bilans -fractionnement -méthodes de pilotage -fertilisants à relargage progressif 	
	<p>Améliorer la gestion de l'épandage de l'azote</p>	<p>Actions de formation des agriculteurs et des utilisateurs de produits phytosanitaires en ZNA</p> <p>Modification de l'assolement</p> <p>Optimiser l'efficacité du traitement suivant les stades de croissance et les périodes climatiques favorables</p> <p>Améliorer la formation sur le mode de fonctionnement des produits phytosanitaires pour favoriser un choix pertinent du produit</p> <p>Favoriser le fractionnement des doses et leur réduction</p> <p>Substitution des molécules les moins adaptées par rapport à la vulnérabilité du milieu, changement de formulation</p> <p>Raisonner l'utilisation des herbicides selon les risques saisonniers de transfert (par exemple reporter l'utilisation d'herbicides l'automne en sortie d'hiver lorsque cela est pertinent)</p> <p>Recours aux techniques biologiques (confusion sexuelle, trichogramme)</p>
Réduire le recours aux intrants, actions sur les systèmes de production	Passage à la production intégrée	
	Passage à l'Agriculture Biologique	
	Choix variétal : mise en place de cultures peu exigeantes en termes d'intrants (robustes vis-à-vis des maladies,...)	

	Mise en place de Bois Raméal Fragmenté (BRF)	
		Passage au désherbage mécanique ou thermique Mise en place de solutions alternatives au désherbage (paillage) Enherbement inter rang pour les cultures pérennes (ex: vignes) Allongement des rotations

3.2.3. Actions en fonction des types de transfert

L'étape suivante consiste à proposer un classement des actions suivant les types de transfert qu'elles limitent afin de pouvoir opérer les choix les plus pertinents dans le programme d'action de limitation des pollutions diffuses (Tableau 5). Les transferts ont été simplifiés ici en 4 grandes catégories :

- L'infiltration
- Le ruissellement
- Les écoulements de subsurface
- La dérive de pulvérisation

On notera que les actions permettant de raisonner l'utilisation des intrants et celles agissant sur la réduction au recours aux intrants et agissant sur les systèmes de production peuvent être efficaces sur chacun des types de transfert. Aussi, nous ne les reprendrons pas dans le tableau ci-dessous.

Concernant l'efficacité de chaque action en termes de limitation des transferts, une partie de la bibliographie a été effectuée par Cambournac (2011, joint en annexe). Cependant, il est **très difficile de déterminer une efficacité réelle en termes de réduction d'impact des pollutions diffuses, même de façon qualitative, tant celle-ci dépend de nombreux paramètres** (type de sol, influence du climat, des systèmes de rotation...). **Aussi, préférons-nous nous abstenir d'effectuer un classement en termes d'efficacité des actions en renvoyant l'opérateur vers des retours d'expériences locales par rapport au site étudié. Ainsi, clairement, des travaux plus poussés doivent être envisagés notamment par l'acquisition d'un panel de références de l'efficacité des différentes actions en fonction des conditions agro-pédo-climatiques.**

Tableau 5 : Proposition de classement des actions en fonction du type de transfert qu'elles limitent

Limitation du transfert	Grandes cultures et élevage	Viticulture	Commentaires
Infiltration	Adapter l'occupation du sol suivant la vulnérabilité : boisement, remise en herbe, localisation de jachères sur les zones les plus vulnérables, passage à l'agriculture biologique, développement de cultures énergétiques à bas intrants		Cette adaptation peut passer par des modifications de pratiques, des changements de systèmes culturaux, des échanges parcellaires, des achats fonciers. Elle requiert le plus souvent des changements profonds et qui doivent être durables

	Développement de zones tampons dans les zones d'infiltration directe (pertes, dolines...) et limitation de la mise en culture de ces zones sensibles au transfert		
	Raisonner les usages de produits phytosanitaires et adapter l'emploi aux conditions de milieu (date d'intervention + choix des produits)		
	Mise en place de CIPAN et de rotations adaptées des cultures, permettant la mise en place de CIPAN	-	
	Choix pertinents des périodes d'épandage des effluents d'élevage et amélioration des techniques d'épandage	-	
	Passage à l'agroforesterie (diminution de la minéralisation de l'azote et du transfert des nitrates via infiltration)	-	Intérêt faible pour la viticulture sachant que les apports en azote sont assez faibles
Ruissellements	Adapter l'occupation du sol suivant la vulnérabilité (cf infiltration) en visant si possible une bonne couverture des sols lors des épisodes pluvieux importants		
	Développement de zones tampons pour limiter le ruissellement diffus : bandes enherbées intraparcélaires, mise en place de haies, talus... Agir sur le ruissellement concentré et les courts-circuits, sources de transferts rapides par voies hydriques		Diagnostic et actions de remédiations
	Couverture du sol (enherbement permanent, paillage, semis direct sous couvert...)		
	Travail du sol suivant les courbes de niveau	Plantation selon les courbes de niveau, voire en terrasses	
	Agir sur la rugosité des sols afin de limiter le ruissellement et de favoriser l'infiltration (ex : barbuttes, semis en sols motteux)	Travail du sol : création de micro reliefs tels que micro-barrages lors du uttage, chevrons (griffage)	
	Développement des Techniques Cultureles Simplifiées (résultats positifs variables suivant le type de sol)		
	Limitation de l'accès du bétail au cours d'eau		
	Adapter la taille et la forme des parcelles à la pente (avec coupures enherbées, haies...)		
	Mise en place de chemins d'écoulement végétalisés		

	Favoriser lorsque c'est possible, le double semis dans les zones des ruissellements	-	
	Enrichissement en humus (l'augmentation de la matière organique permet une meilleure structure de l'horizon de surface et limite ainsi le ruissellement)		
	Isolement hydraulique amont et aval des parcelles (chevet adapté, fourrières enherbées)		
	Choix pertinents des périodes d'épandage des effluents d'élevage et amélioration des techniques	-	
	Adapter les usages de produits phytosanitaires aux conditions de milieu (date d'intervention + choix des produits)		
Ecoulements de subsurface	Adapter l'occupation du sol suivant la vulnérabilité (cf infiltration)		
	Respect des préconisations en sols drainés (éviter les produits phytosanitaires sensibles au transfert via drainage + limiter l'utilisation des phytosanitaires pendant les périodes de drainage)	Raisonner le choix des substances pour éviter l'application de molécules facilement transférables si le sol est très humide	
	Décompaction ou sous-solage du sol	Décompaction impossible (racines)	
	Développement de zones tampons humides à l'exutoire des réseaux de drainage		
Dérive de pulvérisation	Respect des obligations de protection des cours d'eau (bandes enherbées)		
	Développement/protection des ripysilves		
	Identification du petit chevelu (ruisseaux, fossés non notés sur les cartes IGN) et mise en place de zones tampons les protégeant		
	Réduction de la dérive de pulvérisation (emploi de buses anti-dérive adaptées, de matériel occasionnant moins de dérive...)		
	Adapter l'occupation du sol suivant la vulnérabilité (cf infiltration) et donc ici vis-à-vis du réseau hydraulique		

4. Éléments de synthèse pour la mise en place d'actions pertinentes limitant le transfert des pollutions diffuses à partir du diagnostic de vulnérabilité

Mettre en place un plan d'action pertinent et pérenne réclame de prendre en considération plusieurs facteurs, tous aussi complexes les uns que les autres et variables dans l'espace et le temps :

- la complexité du milieu et des transferts
- les itinéraires techniques et les filières
- le contexte socio-économique local et global

Dans ce rapport, seul le milieu et les transferts sont pris en compte pour la définition des actions. Ainsi, bien que des propositions d'actions soient réalisées, elles demanderont un effort supplémentaire pour savoir si elles peuvent être intégrées dans les itinéraires techniques et les filières ainsi que dans le contexte socio-économique.

Pour opérer un choix pertinent des actions, il faudra :

- réunir les éléments permettant de connaître le milieu, les transferts et les pratiques (agronomiques et en zone non agricole), ainsi que la caractérisation du contexte socio-économique du secteur
- caractériser les zones clés à protéger, c'est à dire la ou les zones d'action pertinentes ou efficaces
- définir les critères de choix des actions à mettre en place et les actions prioritaires

Nous proposons ainsi dans ce chapitre de récapituler la démarche amenant à l'élaboration du plan d'action.

4.1. Inventaire des éléments à répertorier pour la définition du programme d'action

L'élaboration d'un programme d'action réclame au préalable la réalisation des études suivantes :

- 1) La délimitation et la cartographie de vulnérabilité intrinsèque de l'aire d'alimentation. En parallèle ou en amont, un diagnostic hydrochimique peut être réalisé
- 2) Le diagnostic territorial multi-pressions : il caractérise les pressions en zone agricole et non agricole et donne des pistes pour les limiter
- 3) Le diagnostic socio-économique : il complète le diagnostic territorial multi-pressions en permettant d'établir un plan d'action réaliste, avec la mise en place de mesures socio-économiquement acceptables par les acteurs

L'ensemble des données acquises par ces études est répertorié dans le Tableau 6. Celles-ci proviennent du recueil d'informations auprès de divers organismes institutionnels, syndicats d'eau... (cartes, données qualité...), des observations de terrain (localisation des bétoures, pédologie, transferts...), d'enquêtes auprès des acteurs (pratiques agronomiques...)...

On notera que certaines données peuvent être redondantes dans les différentes études.

Tableau 6 : Synthèse des données préalables à la définition du programme d'action

Thématique	Groupe de données	Données	Documents de synthèse des données
Milieu et transferts	•Aire d'Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> •Carte de délimitation de l'AAC •Carte topographique/ MNT •Carte des périmètres de protection 	Délimitation et cartographie de la vulnérabilité (en parallèle, diagnostic hydrochimique si possible)
	•Sol-substrat	<ul style="list-style-type: none"> •Carte géologique •Carte pédologique •Réserve utile des sols •Pierrosité •pH, % d'argile, Matière Organique 	
	•Aquifère	<ul style="list-style-type: none"> •Inventaire des forages et sources •Nature de l'aquifère et classement suivant typologie BRGM du ou des aquifères participant à l'alimentation du captage •Description physique de l'aquifère (structure, perméabilité, porosité...) •Cartes piézométriques •Données sur la couverture (épaisseur de ZNS, perméabilité...) •Vitesse d'écoulement en ZNS et ZS, temps de transfert •Relations ESU/ESO 	
	•Occupation du sol	<ul style="list-style-type: none"> •Carte d'occupation du sol •Carte des réseaux de drainage (drainage enterré, fossés) et des exutoires •Carte des zones irriguées •Carte des éléments paysagers (talus, haies...) 	
	•Transferts et observations de terrain	<ul style="list-style-type: none"> •Cartographie des zones d'infiltration directes •Repérage des court-circuits aux écoulements (drainage...) •Observation de la protection du chevelu •Identification de l'hydromorphie et d'écoulements de subsurface 	

		<ul style="list-style-type: none"> •Caractérisation des pratiques agricoles en termes de risques de transfert •Repérage des zones potentielles pouvant être aménagées pour limiter le transfert (création de zones tampons humides artificielles, mise en place de haies, talus...) 	
	•Qualité de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> •Localisation des points de suivi •Données nitrates, phytosanitaires et métabolites •Données paramètres rédox 	
	•Autres	<ul style="list-style-type: none"> •Données climatiques (précipitations efficaces...) •Données sur les problèmes d'assainissement •Données sur les sources de pollutions ponctuelles et accidentelles 	
Pressions	•Zone Agricole	<ul style="list-style-type: none"> •Caractérisation des pressions agricoles : occupation du sol, rotations culturales, description des pratiques, qualification des pratiques au regard des enjeux, quantification et spatialisation de l'importance des pressions sur le territoire défini. •Repérage des facteurs d'aggravation ou d'atténuation des pressions (particularités topographiques, structures paysagères, modalités d'occupation agricole de l'espace, susceptibles d'avoir une incidence sur l'impact des pressions d'origine agricole) •Délimitation de la zone d'action pertinente (ou « zone d'action efficace »), obtenue par croisement des données issues de l'étude de délimitation de l'AAC et de la caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque et l'étude de caractérisation des pressions •Elaboration de pistes de réflexion 	Diagnostic Territorial Multi-Pressions ¹³
	•Zone Non Agricole	<ul style="list-style-type: none"> •Caractérisation des zones sur lesquelles l'application de produits phytosanitaires peut impacter la ressource en eau et 	

¹³ Memento pour la réalisation d'un diagnostic territorial des pressions agricoles (DTPA) (2010).

		<p>des actions à entreprendre pour améliorer et protéger la qualité de l'eau</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation des zones susceptibles d'être le siège de défauts d'assainissement (problèmes de transfert d'azote urbain, de produits lessiviels...) et des actions à entreprendre pour améliorer et protéger la qualité de l'eau 	
Contexte socio-économique	<ul style="list-style-type: none"> • Définition des freins et leviers socio-économiques des agriculteurs et organismes agricoles à la mise en place de mesures 	<ul style="list-style-type: none"> • Définition du ou des systèmes de productions agricoles du territoire, en termes de pratiques et de productions • Définition du positionnement des exploitants, philosophiquement et rapporté aux pratiques, leurs compétences et leurs contraintes par rapport au marché • Définition du positionnement des partenaires, philosophiquement, économiquement et politiquement, et l'adéquation ou non avec leurs actes, de même que leurs compétences et leurs contraintes par rapport au marché • Caractérisation des sources de conseil disponibles et potentielles sur le territoire • Définition des objectifs à atteindre 	Diagnostic socio-économique ¹⁴
	<ul style="list-style-type: none"> • Définition des freins et leviers socio-économiques des collectivités à la mise en place de mesures 	<ul style="list-style-type: none"> • Définition des compétences des différentes collectivités • Inventaire des aides financières et techniques • Détermination de l'implication des collectivités dans le projet de restauration de la qualité de l'eau • Définition des objectifs à atteindre 	

¹⁴ Diagnostic socio-économique agricole sur une aire d'alimentation de captage (2010).

4.2. Caractérisation de la zone d'action pertinente

Le risque de transfert correspond au croisement des paramètres « exposition » et « danger ». En faisant le parallèle avec cette définition, **la caractérisation du risque de transfert de pollutions diffuses correspond au croisement de la cartographie de vulnérabilité intrinsèque avec la cartographie des pressions. Ce croisement permet d'identifier les zones d'actions pertinentes, c'est à dire celles sur lesquelles des actions doivent être mises en priorité pour protéger la ressource en eau** (par exemple, une zone boisée au-dessus d'une zone sensible à l'infiltration ne sera pas considérée comme un risque majeur a contrario d'une zone cultivée en grande culture au dessus de cette même zone sensible). **A noter que le plus souvent la carte des « pressions » correspond en fait à la carte d'occupation du sol** : certaines cartes de pression peuvent être construites à partir des données IFT¹⁵ régionales et affectées aux différentes parcelles ou encore, pour les petites aires d'alimentation de quelques dizaines d'hectares, il est possible de reconstituer les IFT locaux à partir d'enquêtes de terrain, mais ces types de carte sont le plus souvent rares, faute de données agronomiques disponibles pour le maître d'œuvre.

Suivant la typologie de l'aire d'alimentation, plusieurs cartes de risques de transfert peuvent être obtenues. La méthodologie de cartographie de vulnérabilité établie par l'Irstea ne prévoit pas de pondération des cartes de transfert entre elles. Lorsqu'un transfert est prédominant par rapport à un autre (exemple : dérive de pulvérisation), l'action prioritaire à mettre en place doit permettre de limiter ce transfert en priorité (dans ce cas la mise en place d'une zone tampon le long des cours d'eau). **En revanche, si la superposition des cartes montre que plusieurs types de transfert peuvent coexister au sein d'une même zone** (aucun type de transfert n'est prédominant), **de nouvelles observations de terrain peuvent être menées afin d'affiner le diagnostic. Cependant, il peut aussi être envisagé de mettre en place un panel d'actions sur une même zone répondant à la limitation des différents types de transfert** (exemple : mesure de réduction d'intrant associée à la mise en place de haies pour une zone à la fois sensible à l'infiltration et au ruissellement hortonien).

Ainsi, à cette étape, en utilisant le Tableau 5, le maître d'œuvre doit pouvoir :

- **Identifier quelles actions sont efficaces pour diminuer tel ou tel type de transfert de contaminants**
- **Positionner les actions en fonction des zones les plus vulnérables à la contamination.**

4.3. Critères de choix des actions

Le choix des actions doit être opéré en fonction de plusieurs paramètres :

- de leur pertinence vis-à-vis de la réduction des transferts de phytosanitaires et d'azote,
- des objectifs envisagés : diminution de la concentration maximale mesurée pour l'ensemble des produits phytosanitaires, diminution de la concentration d'une substance trop souvent détectée dans les analyses qualité, diminution globale des flux azotés etc...,
- de leur pertinence technique en termes de pratique agronomique et d'itinéraire technique,
- de leur pertinence en fonction des contraintes socio-économique, de l'existence ou du développement possible de filières compatibles avec les actions envisagées
- des actions précédentes et de la connaissance du milieu : suivant la maturité de la réflexion du plan d'action et des plans d'action précédents, les changements peuvent être plus profonds (amélioration au cours du temps du chevelu hydraulique),
- des références agronomiques et des guides disponibles (pour le dimensionnement, la mise en place et l'entretien des zones tampons par exemple).

Cependant, l'une des clés de l'efficacité du programme d'action réside dans le choix de ou des actions appropriées pour limiter les transferts de pollutions diffuses. Cette problématique est complexe car une même action peut être efficace pour un contexte agro-pédo-climatique donné et

¹⁵ Indice de Fréquence de Traitement

sans effet pour un autre contexte, voire pour le même contexte pour une autre molécule. Aussi dans ce rapport avons-nous préféré ne pas statuer sur l'efficacité en termes de limitation de tel ou tel transfert pour différentes actions faute de références solides pour un ensemble de pratiques et de contextes pédo-climatiques différents.

Cependant, quelque soit le contexte rencontré, nous recommandons de se focaliser sur les 5 axes suivants en parallèle :

- **La diminution générale des doses** (azote + produits phytosanitaires) : même si elle ne répond pas totalement à la problématique d'amélioration de la qualité de l'eau et tout au moins à la présence de pics de concentration pendant la période d'utilisation des produits phytosanitaires par exemple, elle permet une diminution de la tendance de fond de la concentration générale des pollutions diffuses.
- **La protection des zones d'infiltration directe pour les aquifères karstiques** (bétoires, gouffres...) : ces zones doivent faire l'objet d'un référencement précis (localisation, délimitation des parcelles alimentant ces zones...) et d'une protection (mise en herbe, création d'une zone tampon humide artificielle, ...), d'autant qu'elles constituent souvent des exutoires aux réseaux de drainage. Lorsque ces zones sont nombreuses sur le territoire de l'AAC, une réflexion globale sur la mise en place de zones tampons doit être menée (mise en place de bandes enherbées, fascines... en intraparcellaire en amont des écoulements concentrés), voire sur des changements plus profonds (nouvelles rotations, échange de parcelles, passage à l'agriculture biologique...)
- **La diminution du ruissellement concentré** : des actions doivent être mises en place pour limiter celui-ci dès l'amont du bassin versant pour éviter des flux trop importants en aval : double semis dans les zones de thalwegs, enherbement des tournières, etc...
- La veille au respect de **la mise en place de bandes enherbées le long des cours d'eau** conformément à la réglementation et, lorsque cela est possible la **protection du chevelu hydrographique**
- **Le respect des utilisateurs de produits phytosanitaires des précautions et conditions d'emploi de ces produits (respect des doses, zones non traitées...) et leur formation à des techniques ou des systèmes agronomiques requérant moins ou pas d'intrants.**

5. Synthèse et conclusion

En France, entre 1998 et 2008, 4811 captages ont été abandonnés, dont 878 abandons étaient liés à une dégradation de la qualité de l'eau vis-à-vis des nitrates et/ou pesticides (Direction générale de la santé 2012). De la même façon, 41% des masses d'eau souterraine, ressource majeure de l'alimentation en eau potable, étaient en mauvais état en 2010, dans le cadre de l'état des lieux pour la directive européenne 2000/60/CE, dite « Directive Cadre sur l'Eau » (DCE) ; l'origine de ce mauvais état étant dans 94% des cas due à des problèmes de contamination en pesticides ou nitrates (données ONEMA 2010, non publiées).

Les objectifs de reconquête de la qualité de la ressource en eau de la Directive Cadre sur l'Eau ainsi que la loi de programmation du 3 août 2009 pour la mise en œuvre des conclusions du Grenelle de l'Environnement prévoient d'assurer la protection de l'Aire d'Alimentation de 500 Captages (AAC) parmi les plus menacés par les pollutions diffuses (captages dits « Grenelle »).

Afin de lutter contre la contamination des captages AEP par les pollutions diffuses, des plans d'action efficaces et pérennes sont requis. Leur définition pertinente suppose la connaissance préalable du milieu et des modes principaux de transfert des contaminants sur l'AAC considérée. Ainsi, pour pouvoir opérer un choix pertinent des actions à mettre en place en fonction des types de transfert rencontrés sur une aire d'alimentation de captage, trois axes de travail sont dégagés :

- La détermination des zones clés à protéger, c'est-à-dire la ou les zones d'action pertinentes ou « efficaces »,
- La caractérisation des éléments permettant de comprendre le fonctionnement du système considéré, d'identifier les processus de transfert des polluants et de cerner les pratiques (agronomiques et en zone non agricole),
- La définition des actions à mettre en place en fonction des types de transfert rencontrés.

Ce rapport a permis de montrer quels éléments de réponse peuvent être apportés à chacun de ces axes de travail et comment ces éléments peuvent être organisés et utilisés dans la démarche de protection d'un captage vis-à-vis des pollutions diffuses.

Pour les deux premiers axes, l'élaboration d'une typologie de transfert sur les aires d'alimentation de captage permet de mieux appréhender les modes de transfert dominants suivant les caractéristiques pédologiques, hydrologiques et hydrogéologiques de l'aire d'alimentation du captage et d'identifier quelle méthode de cartographie de vulnérabilité utiliser et quelle carte de vulnérabilité établir. Celle-ci montre l'importance de l'amélioration de la prise en compte du critère « sol » dans les méthodes BRGM. D'autre part, il est souligné la nécessité d'effectuer des observations de terrain, même si celles-ci requiert un investissement financier important. Ces observations sont primordiales pour pouvoir réaliser puis commenter et utiliser les cartes de vulnérabilité. Sans ces observations, l'unique superposition de données dont la qualité et la précision sont le plus souvent disparates peut conduire à une mauvaise interprétation et à un plan d'action faussé en termes d'action et d'identification de zones d'actions prioritaires.

Le diagnostic hydrochimique, abordé dans un rapport conjoint (Barrez et al, 2013), apparaît potentiellement comme un outil complémentaire intéressant pour améliorer la compréhension du milieu et des transferts, en venant en appui des études préliminaires de délimitation et de cartographie de vulnérabilité intrinsèque et du diagnostic des pressions. Les données de qualité d'eau peuvent ainsi apporter de nombreuses informations sur les sources de contaminants, les modes de transfert etc... Cet exercice requiert le plus souvent des données importantes en termes de fréquence d'échantillonnage et de paramètres analysés, ce qui ne permet pas son élaboration sur tous les sites rencontrés. La synthèse établie dans ce document permet toutefois un certain nombre de recommandations pour améliorer le suivi de la qualité de l'eau et l'interprétation des données pour améliorer la compréhension du fonctionnement du milieu et donc l'amélioration du plan d'action.

Enfin, pour le troisième axe, un inventaire des actions en fonction des types de transfert rencontrés est proposé. Toutefois, la quantification de l'efficacité des actions en fonction de chaque type de transfert est volontairement écartée dans ce rapport. Les paramètres influençant l'efficacité de chacune des actions sont en effet trop nombreux (sol, climat, pratiques...) pour avancer une hiérarchisation « figée » de ces actions les unes par rapport aux autres. Un travail à part entière et tenant compte du contexte agro-pédo-climatique de chaque AAC est requis pour aller plus loin.

Certains éléments de cette étude requièrent à présent d'être mis en œuvre sur des cas concrets (typologie de transfert et diagnostic hydrochimique notamment) afin d'être validés. D'autre part, un travail supplémentaire doit être envisagé sur l'articulation du choix des actions en fonction des itinéraires techniques et du contexte socio-économique.

6. Bibliographie

- ANTEA, Géonord et Groupe ISA (2009). Diagnostic territorial multi-pressions des champs captants de l'Escrebieux. Rapport n°A53227/C, 321p.
- ANTEA-GINGER-CALLIGEE (2010). Délimitation des aires d'alimentation des captages prioritaires du bassin Adour Garonne. Phase 3 : vulnérabilité intrinsèque des aires d'alimentation des captages. Sources Coron – 09062X0005/HY – Commune de Castanet (82). 36p.
- Bakalowicz, M. (1999) - Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide Technique n°3, Lyon, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse.
- Barraclough D., Gardner C. M. K., Wellings S. R., Cooper J. D. (1994). A tracer investigation into the importance of fissure flow in the unsaturated zone of the British Upper Chalk. *Journal of Hydrology* 156: 459-469.
- Barrez F, Le Hénaff G, Vernoux JF, Catalogne C, Carlier N. (2013). Aide à l'optimisation des actions de protection des captages. Apports du diagnostic hydrochimique à la connaissance des Aires d'Alimentation de Captages Irstea -BRGM - Onema. 50 pp.
- Bastin S. (2005). Contribution à l'étude de la migration des nitrates dans le sol et la zone non saturée de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Modélisation intégrée des nitrates dans le bassin versant de l'Escrebieux. Thèse de 3ème cycle, Lille
- Cabinet Reile Pascal (2004) Traçages complémentaires. Analyses de pesticides. Rapport de bureau d'étude, 36p.
- Cabinet Reile Pascal (2010) Source de Fontaine Ronde. Délimitation de l'aire d'alimentation du captage. Analyse de la vulnérabilité – Méthode RISKE modifiée. Rapport de bureau d'étude, 56 p.
- Cambournac S. (2011) Evaluation de l'efficacité des Programmes d'Actions mises en place pour restaurer la qualité de l'eau de captages AEP impactés par des pollutions diffuses (Partie 1). Mémoire de fin d'étude. 126p.
- Diagnostic socio-économique agricole sur une aire d'alimentation de captage (2010). Cahier des Clauses Techniques Particulières, Rapport Ecodecision –Agrisystem pour l'Agence de l'Eau Seine Normandie, 7 p
- Diagnostic socio-économique agricole sur une aire d'alimentation de captage. Mémento (2010). Rapport Ecodecision –Agrisystem pour l'Agence de l'Eau Seine Normandie, 21 p.
- Diagnostic territorial des pressions d'origine agricole et non agricole. (2010). Cahier des Clauses Techniques Particulières, 9 p.
- Direction générale de la santé (2012). Abandons de captages utilisés pour la production d'eau destinée à la consommation humaine. Bilan Février 2012. . Disponible sur <http://www.sante.gouv.fr>, Publication du ministère en charge de la santé.: 21 pp.
- Dörfliger N., Jauffret D., Loubier S. (2004). Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques en Franche Comté, avec la collaboration de V. Petit, rapport BRGM RP-53576-FR, 121p., 24 ill., 4 annexes.
- Dörfliger N., Plagnes V. (2009). Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKA. Avec la collaboration de K. Kavouri et J. Gouin. Rapport BRGM RP-57527-FR, 105 p., 55 ill., 4 ann.
- Haria A. H., Hodnett M. G., Johnson A. C. (2003). Mechanisms of groundwater recharge and pesticide penetration to a chalk aquifer in southern England. *Journal of Hydrology* 275: 122-137.
- Lacherez S. (1996). Caractérisation et suivi de l'avancée d'un front de pollution azotée dans la zone non saturée d'un bassin-versant crayeux du Nord-Pas-de-Calais: la vallée de l'Escrebieux. Rapport de DEA, Ecole nationale Supérieure de Géologie de Nancy.
- Lacherez S. (2000). Fliers-en-Escrebieux (59) - Pollution par le nickel du champ captant. Rapport de la Société des Eaux du Nord, non publié R-00-0509: 21p
- Lallemand-Barrès A., Roux J-C. (1999). Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, 2ème édition. 334p.
- Legout C., Molenat J., Aquilina L., Gascuel-Oudoux C., Faucheux M., Fauvel Y., Bariac T. (2007). Solute transfer in the unsaturated zone-groundwater continuum of a headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 332, 427-441
- Le Hénaff G. et Gauroy C. (2011). Délimitation des aires d'alimentation de captage en eaux de surface et caractérisation de leur vulnérabilité vis à vis des pollutions agricoles diffuses par les pesticides, Guide méthodologique. Cemagref, 103 p..
- Margat J. (1978). Carte hydrogéologique de la France, Système aquifère au 1/1500000. Ed. BRGM
- Margat J. (1986) Abrégé sur les eaux souterraines de la France. Rapport BRGM 86/SGN/623/EAU, 53p.
- Mémento pour la réalisation d'un diagnostic territorial des pressions agricoles (DTPA) (2010). Rapport MEDDTL-MAAP, 13 p.

- Plagnes V., Théry S., Fontaine L., Bakalowicz M., Dörfliger N. (2005). Karst vulnerability mapping : Improvement of the RISKE method. KARST 2005, International conference and field seminar, Water resources and environmental problems in Karst, 14-19 september 2005 Belgrade-Kotor, Serbie
- Pochon A., Zwahlen F. (2003). Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré – Guide pratique. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne, 83p.
- Pranville J., Plagnes V., Rejiba F., Tremoulet J. (2007). Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines de la partie sud du Causse de Gramat. Rapport Université P. et M. Curie-Paris 6, UMR Sisyphe 7619, Parc naturel régional des Causses du Quercy et Agences de l'Eau Adour-Garonne, 143p.
- SB2O Ingénierie & Environnement (2009). Bassin versant de l'Escrebieux. Champ captant de Quiéry-la Motte. Modélisation de la nappe de la craie. Rapport final. Rapport n°R_09_012, version 4, 96p.
- Serhal H. (2006). Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive du transfert des flux azotés dans la zone racinaire, non saturée et saturée. Thèse de 3ème cycle, Lille.
- Vachier P., Dever L., Fontes J. C. (1987). Mouvements de l'eau dans la zone non saturée et alimentation de la nappe de la craie de champagne (France): approches isotopique et chimique. In: Int. Symp. on Isotope Hydrology, I.A.E.A., Vienne.
- Vaçulik A., Palagos B., Laplana R., Bonicelli B. (2008). Réduction des pollutions ponctuelles des eaux par les produits phytosanitaires agricoles – Premiers enseignements d'une enquête auprès de professionnels européens. Ingénieries - E A T, n°5 5-56, p45-60.
- Vergnes et al. (2006)
- Vernoux J.F., Barrez F., Wuilleumier A. (2011) - Analyse des études de délimitation et de vulnérabilité des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine « Grenelle », rapport BRGM/RP- 59583 -FR, 87 pages, 54 illustrations, 1 annexe
- Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007). Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR, 75 p., 14 ill.
- Wellings S. R. (1984). Recharge of the upper chalk aquifer at a site in Hampshire, England. 2. Solute movement. Journal of Hydrology 69: 275-285.
- Wibaux V. (2011). Mise en place d'une typologie de transfert au sein des captages Grenelle. Mémoire de stage de Master 2, Cemagref, 45p.
- Wilson, N. (1995) Soil and Ground Water Sampling. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA.

7. Table des illustrations

Figure 1 : Schématisation de la partition des aires d'alimentation de captage (ESU = Eau de Surface, ESO = Eau Souterraine). Situations intermédiaires courantes.	11
Figure 2 : Aire d'Alimentation de Captage et Portion de Nappe Alimentant le Captage.....	12
Figure 3 : Paramètres pris en compte pour le calcul de la vulnérabilité intrinsèque pour les 3 types de système aquifère (Vernoux et al., 2007)	13
Figure 5 : Synthèse de quelques principaux types de transfert de la pollution diffuse sur une AAC (document BRGM modifié). Les traits pointillés rouge et bleu désignent respectivement les périmètres de protection rapproché et éloigné.....	18
Figure 6 : Cas 1 ; exemple d'un captage d'eau de surface où l'infiltration est le transfert majoritaire..	19
Figure 7 : Cas 2 ; exemple d'un captage d'eau souterraine où les transferts majoritaires se réalisent en surface et/ou sub-surface (cas d'un captage dans la nappe d'accompagnement d'une rivière sur un socle imperméable).	20
Figure 8 : Schématisation des aires d'alimentation de captage ESO/ESU/mixte en fonction des types de transfert majeur	21
Figure 9 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique déconnecté du sous-sol : circulation d'une rivière sur un socle marneux. Les transferts dominants sont les écoulements de surface/subsurface sur le substratum imperméable.	23
Figure 10 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimentant la nappe. L'infiltration bien que présente sur ce schéma n'est pas prise en compte car la nappe n'influence pas la qualité de la prise d'eau de surface.....	23
Figure 11 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimenté par une nappe sous-jacente (le sens des transferts nappe/rievière peut s'inverser sur le profil de la rivière et selon les saisons)	24
Figure 12 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimenté par une nappe de coteau.....	24
Figure 13 : Cas d'un prélèvement d'eau de surface dans un réseau hydrographique alimenté par la nappe et dont l'aire d'alimentation est majoritairement infiltrante (cas d'une rivière drainant un aquifère crayeux).....	24
Figure 14 : Choix des guides de cartographie de vulnérabilité pour les « captages ESU » selon les types d'écoulement sur l'aire d'alimentation.....	25
Figure 15 : Exemple d'alimentation d'un aquifère sableux par drainance per ascensum d'un aquifère calcaire	26
Figure 16 : Exemple d'alimentation d'un aquifère crayeux non karstique par une nappe perchée	27
Figure 17 : Exemple d'alimentation d'un aquifère sableux par des écoulements latéraux	27
Figure 18 : Typologie de transfert sur une aire d'alimentation de captage captant un aquifère continu	28
Figure 19 : Illustration de la circulation de l'eau dans un aquifère discontinu fissuré (Calcaires du Carbonifère, carrière d'Avesnes sur Helves, 59)	29
Figure 20 : Schématisation des écoulements majeurs d'un aquifère discontinu fissuré (dessin modifié de Pochon et Zwahlen, 2003)	29
Figure 21 : Typologie de transfert sur une aire d'alimentation de captage captant un aquifère discontinu fissuré	31
Figure 22 : Représentation schématique d'un aquifère karstique (Bakalowicz, 1999)	32
Figure 23 : Les deux types de système karstique (Agence de l'Eau RM&C, 1999)	32
Figure 24 : Schéma conceptuel d'un aquifère karstique avec le positionnement des différents critères (d'après COST 620, Zwahlen et al., 2004, in Dörfliger et Plagnes, 2009)	33
Figure 25 : Organisation des différents critères de la méthode PaPRIKa en fonction de la structure et du fonctionnement des aquifères karstiques (Dörfliger et Plagnes, 2009)	34
Figure 26 : Typologie de transfert sur une aire d'alimentation de captage captant un aquifère karstique	36
Figure 27 : Délimitation du bassin versant de Carly (document BRGM)	37
Figure 28 : Bassin de la Liane et carte géologique locale (source Infoterre).	38
Figure 29 : Photos et schématisation de l'AAC de Carly : la zone amont est composée de terrains crayeux infiltrants, tandis que la zone aval correspond au bassin versant de la Liane composé de terrains argileux sur lesquels les transferts de surface et subsurface sont majoritaires.....	38
Figure 30 : Limites du Projet d'Intérêt Général et des périmètres de protection du champ captant de Quiery la Motte (ANTEA et al., 2009).....	40
Figure 31 : Coupe schématique transversale Nord-Sud de la vallée de l'Escrebieux (ANTEA et al., 2009).....	40
Figure 32 : Répartition des zones étanchéifiées de l'Escrebieux (ANTEA et al., 2009).	41

Figure 33 : Vulnérabilité intrinsèque de l'eau souterraine sur le PIG du champ captant de Quiery la Motte (ANTEA et al., 2009).	42
Figure 34 : Coupe schématique représentant les principaux transferts au sein de l'AAC de Quiéry-la-Motte (à partir du rapport ANTEA et al, 2009 et de la modélisation de SB2O Ingénierie & Environnement, 2009)	43
Figure 35 : Coupe hydrogéologique schématique (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).....	44
Figure 36 : Délimitation de l'aire d'alimentation de captage des sources Couron (AAC = BAC global) (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).	44
Figure 37 : Carte de vulnérabilité intrinsèque des sources Couron (ANTEA-GINGER-CALLIGEE, 2010).....	45
Figure 38 : Coupe lithostratigraphique de la bordure occidentale des Monts de Gy	46
Figure 39 : Extrait de la carte géologique de Gray au 1/50000.....	46
Figure 40 : Coupe géologique de la bordure occidentale des Monts de Gy (Situation de la source captée de Fontaine Ronde)	47
Figure 41 : Aire d'Alimentation du Captage de Fontaine Ronde : reconnaissance des circulations souterraines par traçage (Cabinet Reile, 2010)	48
Figure 42 : Carte de vulnérabilité intrinsèque du captage de Fontaine Ronde (Cabinet Reile, 2010)..	49
Figure 43 : La doline de la Fretenille.	50

8. Annexe 1 : Rapport de Valérie Wibaux (2011)

Wibaux V. (2011). Mise en place d'une typologie de transfert au sein des captages Grenelle. Mémoire de stage de Master 2, Cemagref, 45p.

9. Annexe 2 : Rapport de Sandra Cambournac (2011)

Cambournac S. (2011) Evaluation de l'efficacité des Programmes d'Actions mises en place pour restaurer la qualité de l'eau de captages AEP impactés par des pollutions diffuses (Partie 1). Mémoire de fin d'étude. 126p.

Onema
Hall C – Le Nadar
5, square Félix Nadar
94300 Vincennes

01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea
Groupement de LYON
UR MALY
Equipe Pollutions Diffuses
3, bis quai Chauveau, CP 220
69336 LYON cedex 09, France

04 72 20 87 87
www.irstea.fr

BRGM
Centre scientifique et
technique - Service EAU
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2

0238643434
www.brgm.fr