



# Aménagement des bétaires en Haute-Normandie – Etat de l’art et préconisations de bonnes pratiques

Rapport final

BRGM/RP-58795-FR

Novembre 2010



# Aménagement des bétoires en Haute-Normandie – Etat de l’art et préconisations de bonnes pratiques

Rapport final

**BRGM/RP-58795-FR**

Novembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 10EAU39

**David P.-Y., Moisan J., Nachbaur A., Dörfliger N.**

Avec la collaboration de

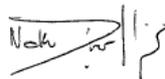
**Mathon C.**

## Vérificateur :

Nom : Nathalie Dorfliger

Date : 30/11/2010

Signature :



## Approbateur :

Nom : Eric Gomez

Date : 10/12/2010

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



**Mots clés :** bétoire, aquifère de la craie, karst, perte, engouffrement rapide, aménagement, technique de traitement des bétoires, étude préalable, dossier loi sur l'eau, AEP, turbidité, Haute-Normandie, Eure, Seine-Maritime.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : David P.-Y., Moisan J., Nachbaur A., Dörfliger N. (2010) – Aménagement des bétoires en Haute-Normandie – Etat de l'art et préconisations de bonnes pratiques – Rapport final. Rap. BRGM/RP-58795-FR, 218 p., 39 ill., 10 ann.

## Synthèse

La Haute-Normandie s’étend en grande partie sur de vastes plateaux crayeux impactés par des phénomènes karstiques (processus d’altération-dissolution de la roche carbonatée). Une des caractéristiques des paysages karstiques est la faible proportion d’écoulements de surface. Les eaux superficielles s’infiltrent donc préférentiellement dans le sous-sol. Selon les niveaux lithologiques et le contexte structural local, la craie est plus ou moins fracturée et les processus d’altération-dissolution sont à l’origine du développement de bétoires (appellation régionale de dolines ou points d’infiltration préférentielle des eaux de surface) et de réseaux karstiques plus ou moins bien connectés avec les bétoires, qui se développent dans l’aquifère.

En domaine de plateau, la craie est recouverte de formations superficielles hétérogènes qui masquent certains phénomènes karstiques ; elles peuvent jouer des rôles hydrogéologique et géotechnique complexes.

Dans ce contexte de faible densité de réseau hydrographique et de zones à fort risque d’inondation, les bétoires ont pu être utilisées dans le passé comme points d’infiltration des eaux de ruissellement par les particuliers ou comme points d’infiltration situés à l’exutoire des ouvrages hydrauliques de lutte contre les ruissellements et les inondations par les collectivités ou même comme points de rejet des eaux usées ou des eaux usées traitées.

Or la quasi-totalité des besoins en eau potable de Haute-Normandie sont satisfaits à partir des eaux souterraines prélevées dans l’aquifère crayeux. Ces rejets représentent ainsi un risque direct pour la ressource en eau potable de la région.

Les principaux dangers liés aux bétoires sont donc de quatre natures :

- le risque sanitaire : les bétoires peuvent établir un lien direct entre des eaux superficielles de qualité dégradée et la ressource en eau souterraine (risque de pollution de la ressource en eau souterraine, pollution de captages...),
- le risque géotechnique : lié à la présence de bétoires situées à proximité d’une infrastructure (bâtiment, route, digue...) pouvant les déstructurer,
- le risque hydrologique : lié à l’impact de tout aménagement de bétoires : modification du rôle de la bétoire dans le cycle de l’eau (infiltration des eaux de surface vers les eaux souterraines) pouvant accentuer des risques d’inondation, diminuer la productivité de captage,... Il faut en effet s’assurer que l’aménagement ne provoque pas : une amplification des volumes de ruissellement et un risque d’inondation à l’aval, une diminution des débits de sources situées à l’aval et utilisées pour la pisciculture, cressiculture, l’AEP...) liées à une diminution de l’infiltration.

- le risque hydraulique correspond à un risque de dysfonctionnement d'un ouvrage hydraulique (perçement de bassin de rétention, effondrement sous ou proche d'une digue, d'un barrage,...). Ces bétoires peuvent entraîner des problèmes de gestion des eaux pluviales et des eaux usées (cas des lagunes d'assainissement).

En l'absence de règles de l'art dans ce domaine, la DREAL a sollicité le BRGM pour dresser un bilan de l'état de l'art et rédiger des préconisations de bonnes pratiques à l'attention des Maîtres d'Ouvrage, des services de l'Etat ou encore des bureaux d'études.

Les objectifs de cette étude sont ainsi de faire le bilan de l'état de l'art et de disposer de préconisations de bonnes pratiques en matière d'aménagement de bétoires et de l'étude à mener au préalable.

Ce rapport est organisé en sept chapitres. Après un chapitre introductif, le second chapitre donne des éléments de contexte concernant la typologie des bétoires, leur distribution, leurs impacts. Le troisième chapitre présente le travail d'inventaire qui a été réalisé pour dresser l'état de l'art. Le quatrième chapitre détaille les différentes techniques d'aménagements recensées dans l'inventaire, les retours d'expériences et les préconisations sur ces techniques de traitement. Le cinquième chapitre présente les choix d'aménagement de bétoires qui sont actuellement fait selon le contexte de situation des bétoires et propose dans un second temps, des préconisations d'aménagement contexte par contexte et en fonction de l'objectif poursuivi (risque géotechnique, risque hydraulique, risque sanitaire) et de la typologie des bétoires à traiter. Ces propositions d'aménagement en fonction du contexte de la bétoire et du risque associé ont pour but de concilier à la fois les problématiques de lutte contre les inondations, de stabilité géotechnique d'infrastructures et l'objectif de préservation de la qualité de la ressource en eau souterraine fixé par la Directive Cadre Européenne sur l'eau.

La conception de l'aménagement d'une bétoire ne pouvant se faire sans une connaissance suffisante du contexte hydrologique et hydrogéologique du secteur, le sixième chapitre décrit les différentes données à acquérir pour étudier la faisabilité d'un aménagement de bétoires.

Enfin le dernier chapitre propose quelques recommandations concernant le contenu des dossiers « loi sur l'eau » nécessaires à tout aménagement de bétoires.

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>11</b>
1.1. CONTEXTE .....	11
1.2. OBJECTIFS DU RAPPORT.....	12
1.3. CONTENU DU RAPPORT.....	13
<b>2. Eléments de contexte</b> .....	<b>15</b>
2.1. CARACTERISTIQUES DU KARST CRAYEUX.....	15
2.2. IMPORTANCE DES PHENOMENES KARSTIQUES DE SURFACE EN HAUTE NORMANDIE .....	17
2.3. APPARENCE DE L’EXOKARST EN HAUTE NORMANDIE .....	18
2.4. PROCESSUS GENETIQUES DE FORMATION DES BETOIRES.....	20
2.5. TYPOLOGIE ET ROLE HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES ARGILES A SILEX.....	25
2.5.1. Typologie des argiles à silex .....	25
2.5.2. Rôle hydrologique et hydrogéologique des formations superficielles.....	28
2.6. IMPACT DES PHENOMENES EXOKARSTIQUES EN HAUTE NORMANDIE	30
<b>3. Inventaire des pratiques actuelles d’aménagement de bétoires</b> .....	<b>35</b>
<b>4. Les techniques existantes de traitement de bétoires</b> .....	<b>41</b>
4.1. DESCRIPTION DES DISPOSITIFS RENCONTRES (ETAT DE L’ART) .....	41
4.1.1. Descriptifs des dispositifs infiltrants existants.....	42
4.1.2. Descriptifs des dispositifs colmatants existants (comblement étanche de la bétoire).....	44
4.1.3. Dérivation totale des flux (noüe, merlon) .....	46
4.1.4. Descriptifs des purges avant traitement .....	47
4.1.5. Aménagement particulier rencontrés.....	47
4.2. RETOUR D’EXPERIENCE SUR CES DISPOSITIFS.....	48
4.2.1. Dysfonctionnement observés de certains dispositifs .....	48
4.2.2. Synthèse des dysfonctionnements techniques observés .....	54

4.3. PRECONISATIONS TECHNIQUES DES TRAITEMENTS ENVISAGEABLES	55
4.3.1. Géosynthétiques utilisés	55
4.3.2. L’excavation (purge) de la bétoire	57
4.3.3. Le comblement du fond de la bétoire / la stabilisation de la bétoire	58
4.3.4. Les aménagements de type étanchéification	59
4.3.5. Les aménagements de type infiltration	60
4.3.6. Les aménagements de type détournement de flux	62
4.3.7. Les aménagements qui améliorent la stabilité du comblement	62
<b>5. Choix d’aménagement d’une bétoire, tenant compte de sa situation au sein du bassin versant</b>	<b>65</b>
5.1. DESCRIPTION DES AMENAGEMENTS DE BETOIRE RECENSES SELON LE CONTEXTE ET LES OBJECTIFS HYDROLOGIQUES (ETAT DE L’ART)	65
5.1.1. Cadre des aménagements de bétoire recensés	65
5.1.2. Choix techniques observés selon le contexte de la bétoire	66
5.1.3. Exemple d’utilisation de bétoires comme exutoires	68
5.1.4. Dysfonctionnements hydrologiques observés à l’échelle du bassin versant, suite à un aménagement de bétoire	70
5.1.5. Evaluation de l’efficacité des aménagements	70
5.2. RAPPEL DES DIFFERENTES REGLEMENTATIONS ET DOCTRINES A PRENDRE EN COMPTE POUR LES AMENAGEMENTS DE VERSANT ET LES AMENAGEMENTS DE BETOIRE	72
5.2.1. Doctrines existantes concernant la gestion de l’infiltration des eaux en Haute-Normandie	72
5.2.2. Rappel des objectifs de la Directive Cadre sur l’Eau (DCE)	73
5.3. PRECONISATION D’AMENAGEMENT A ENVISAGER SELON LA SITUATION DE LA BETOIRE	73
5.3.1. Cas des vallées sèches à forte activité karstique	76
5.3.2. Cas des bétoires ouvertes sous ou à proximité immédiate d’infrastructures	77
5.3.3. Cas des bétoires ouvertes dans les zones de rétention, prairies inondables, lagunes	77
5.3.4. Cas des bétoires ouvertes dans les bassins ou aires d’infiltration	78
5.3.5. Cas des bétoires situées à l’aval d’un ouvrage hydraulique	79
5.3.6. Cas des bétoires en lien avec un captage d’eau potable (traçage positif)	80
5.3.7. Cas des bétoires situées en fossés	80
5.3.8. Cas des bétoires situées dans les rivières ou sur les berges	81
<b>6. Etude préalable à la conception d’un aménagement d’une bétoire</b>	<b>85</b>
6.1. CONTENU DE L’ETUDE PREALABLE	85

6.1.1. Etude des enjeux et du contexte .....	85
6.1.2. Etude du contexte hydrologique .....	86
6.1.3. Etude du contexte géologique .....	87
6.1.4. Première évaluation de la qualité des eaux d’engouffrement.....	88
<b>6.2. COMPLEMENTS D’ETUDE NECESSAIRES SELON LA LOCALISATION ET LE ROLE DE LA BETOIRE.....</b>	<b>90</b>
6.2.1. Cas d’une bétoire située dans un BAC ou dans un périmètre de protection (PP) .....	90
6.2.2. Cas d’une bétoire située dans un cours d’eau .....	91
6.2.3. Cas d’une bétoire ouverte dans un bassin de gestion des eaux usées (lagunes, aires d’infiltration...) ou un bassin de rétention ou infiltration (ouvrage de gestion/de lutte contre les ruissellements et inondations) ....	92
6.2.4. Cas d’une bétoire ouverte à proximité immédiate d’une infrastructure ....	92
6.2.5. Analyse des caractéristiques géotechniques des matériaux en place .....	93
<b>7. Recommandations concernant la réalisation de dossiers « loi sur l’eau » pour l’aménagement des bétoires .....</b>	<b>95</b>
7.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE : DECLARATION OU AUTORISATION ?.....	95
7.1.1. Cas de l’infiltration des eaux de surface dans les bétoires.....	95
7.1.2. Cas du colmatage des bétoires .....	96
7.2. CONTENU DES DOSSIERS LOI SUR L’EAU POUR LES AMENAGEMENTS DE BETOIRES.....	96
<b>8. Autres recommandations .....</b>	<b>101</b>
<b>9. Autres documents de références.....</b>	<b>103</b>
<b>10. Bibliographie.....</b>	<b>105</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : montrant le faible développement du réseau hydrographique en Haute Normandie .....	11
Illustration 2 : Ensembles lithologiques caractéristiques des aquifères karstiques de Haute-Normandie (Laignel, 1997) .....	16
Illustration 3 : Carte de localisation des bétoires recensées dans le cadre de l’inventaire régional des bétoires en cours de réalisation – en date du 05/07/2010.....	17
Illustration 4 : Photos présentant des exemples de bétoires anthropisées .....	19
Illustration 5 : Schéma d’une « Doline bétoire », dont l’origine est une racine d’altération qui a recoupé un drain karstique, d’après NICOD J., CNRS 1994 (doline de soutirage, suffosion lente ou répétitive, cuvette à fond mobile) .....	22
Illustration 6 : Les grandes fosses de la forêt d’Evreux (Rodet, 1991).....	22
Illustration 7 : Bétoires et traçages positifs du secteur du Sec-Iton (Extrait de l’inventaire régional Bétoires/Traçages) .....	23
Illustration 8 : Coupe et plan du gouffre Guy-Denizot (Rougemontier, Eure) (Rodet, 1991) .....	24
Illustration 9 : Schéma des différents contextes d’apparition des bétoires (karst crayeux sous couverture d’argiles à silex, loess).....	25
Illustration 10 : Coupe schématique des formations meubles du Pays de Caux (Seine Maritime) (d’après Lautridou, 1984) : 1- craie sénonienne à silex gris, 2- sable et argile résiduelle tertiaire, 3 – argile rouge ou brune à silex, 4 – formation sableuse à silex, 5 – loess, 6 – argile limoneuse rouge à silex peu nombreux, -7 prsle (dépôt de pente crayeux de période froide), 8 – colluvions.....	26
Illustration 11 : Synthèse des données lithologiques et typologie des RS de plateau (SiO <sub>2</sub> : teneur élevée en SiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> : teneur faible en SiO <sub>2</sub> ; Intertstratifiés 7/14sm : interstratifiés kaolinite/smectite) (extrait de la thèse de B. Laignel,1997). .....	27
Illustration 12 : Cartographie des 73 STEP touchées par la présence de bétoires - Bétoires situées au niveau d’une lagune, d’une aire d’infiltration, d’un fossé ou d’une mare situés dans le trajet de l’eau rejeté Source : étude technique – Problématique des bétoires en STEP – N. TOPIN – 2007.....	31
Illustration 13 : En 2001, sur 413 ouvrages de lutte contre les inondations recensés, 62 avaient connus une ouverture de bétoires (15%) - Bétoires ouvertes dans le fond de la rétention ou même sous le corps de digue - Source : recensement des ouvrages de luttés contre les inondations en Seine Maritime – AREAS – Décembre 2001 .....	31
Illustration 14 : Ouverture de la bétoire dans le fond d’un ouvrage hydraulique de rétention des eaux pluviales (bassin de rétention du Val Postel – SERSAEP) – observation BRGM d’avril 2010.....	32
Illustration 15 : Doline Bétoire n°14016 - ouverte dans le fond du bassin rétention/infiltration des eaux de rejet de la STEP de Criqueot l’Esneval – Observation de l’engouffrement des eaux du bassin dans la bétoire (observation BRGM d’avril 2010) .....	32

Illustration 16 : Doline Bétoire n°10079 : effondrement du 04/11/2009 sous une route à St Jouin de Bruneval – diamètre de l’ordre d’une dizaine de mètres (observation du 06/11/2009- Bétoire recevant les eaux des talwegs inondés à l’amont) .....	33
Illustration 17 : Dépouillement des informations .....	36
Illustration 18 : Codification des informations (colonnes en bleu).....	36
Illustration 19 : Tableau présentant les sept contextes identifiés dans lesquels peuvent se situer les bétoires et dont les caractéristiques influencent le choix de l’aménagement .....	38
Illustration 20 : Résultat du recensement des différents types de traitement de bétoire (réalisés dans les « règles de l’art ») .....	41
Illustration 21 : Exemple d’un aménagement d’une bétoire par mise en place d’enrochements.....	42
Illustration 22 : Schémas de l’aménagement réalisé sur la bétoire « Croix blanche » à PLainville et photos des dysfonctionnements observés en avril 2010 .....	49
Illustration 23 : Photos des dysfonctionnements observés en avril 2010 sur l’aménagement des bétoires situées dans un fossé à Criquetôt l’Esneval (Source : photos BRGM) .....	50
Illustration 24 : Champs de bétoires dans la 3ème lagune d’Ouille l’Abbaye (extrait du rapport de N. Topin, 2007) .....	51
Illustration 25 : Cas des bétoires de la commune de Tomer-la-Sôgne (extrait du rapport de N. Topin, 2007) .....	51
Illustration 26 : Schéma du 2 <sup>nd</sup> comblement de la bétoire du bassin de Manéglise (Source : CODAH) .....	52
Illustration 27 : Bétoire n°9816 aménagée par un avaloir en béton amenant les eaux de ruissellement vers le réseau d’eau pluvial. La bétoire s’est réouverte au droit de l’avaloir, photo du 17/07/09 .....	53
Illustration 28 : Exemple type d’aménagement d’une bétoire par la mise en place d’une plaque béton au sommet du colmatage (extrait de la plaquette du pôle de compétence Sol et Eau Haute Normandie) .....	54
Illustration 29 : Ouverture d’une bétoire en 2008 au point d’entrée de l’aire d’infiltration de la STEP de Saint Germain les Essourts (photo extraite du guide de la DISE de décembre 2009 concernant les Aires d’infiltration).....	54
Illustration 30 : Géosynthétiques utilisés pour des aménagements de bétoires. A) géotextile. B) Géogrille, C) Géomembrane. D) Géosynthétiques bentonitiques. Source : Fiche IGS « classification des géosynthétiques », Bathurst R.J.....	57
Illustration 31 : Cartographie des 31 ouvrages hydrauliques de la Seine-Maritime rejetant dans des bétoires - Source : recensement des ouvrages de lutte contre les inondations en Seine Maritime – AREAS – Décembre 2001 .....	68
Illustration 32 : Champs de bétoires après le rejet de la station de Sainte Marie des Champs – Source N. Topin, 2007.....	69
Illustration 33 : Bétoire à l’aval de la station d’Hautot-Saint-Sulpice – Source N. Topin, 2007 .....	69
Illustration 34 : Tableau récapitulatif des aménagements réalisés et prévus par la DUP de 1997 sur les bétoires en périmètre immédiat satellite (sources : rapport Mathieu Désestres – SERSAEP(SERP) / Université Rouen) .....	71

Illustration 35 : Schéma des différents types d’infiltration (document extrait du guide de conception et de gestion des aires d’infiltration des stations d’épuration DISE 76 – décembre 2009).....	74
Illustration 36 : Synthèse des préconisations de choix d’aménagement en fonction du contexte de la bétoire .....	83
Illustration 37 : Qualité des eaux d’engouffrement en fonction de la localisation géographique de la bétoire (tableau extrait de la plaquette « Les Bétoires en Haute Normandie, une démarche collective » du pole de compétence SOL et EAU Haute Normandie) .....	89
Illustration 38 : Données à acquérir pour étudier la faisabilité de l’utilisation des matériaux en place pour le traitement de la bétoire .....	94
Illustration 39 : Exemple de la comparaison pour chaque type de risques (géotechnique, hydraulique, sanitaire, hydrologique) de l’état initial et de l’état après aménagement. Cas d’une bétoire située en tête de vallée sèche comportant de nombreuses habitations. Aménagement retenu : colmatage de la bétoire, noues à redents et prairies inondables en amont de la bétoire.....	99

## Liste des annexes

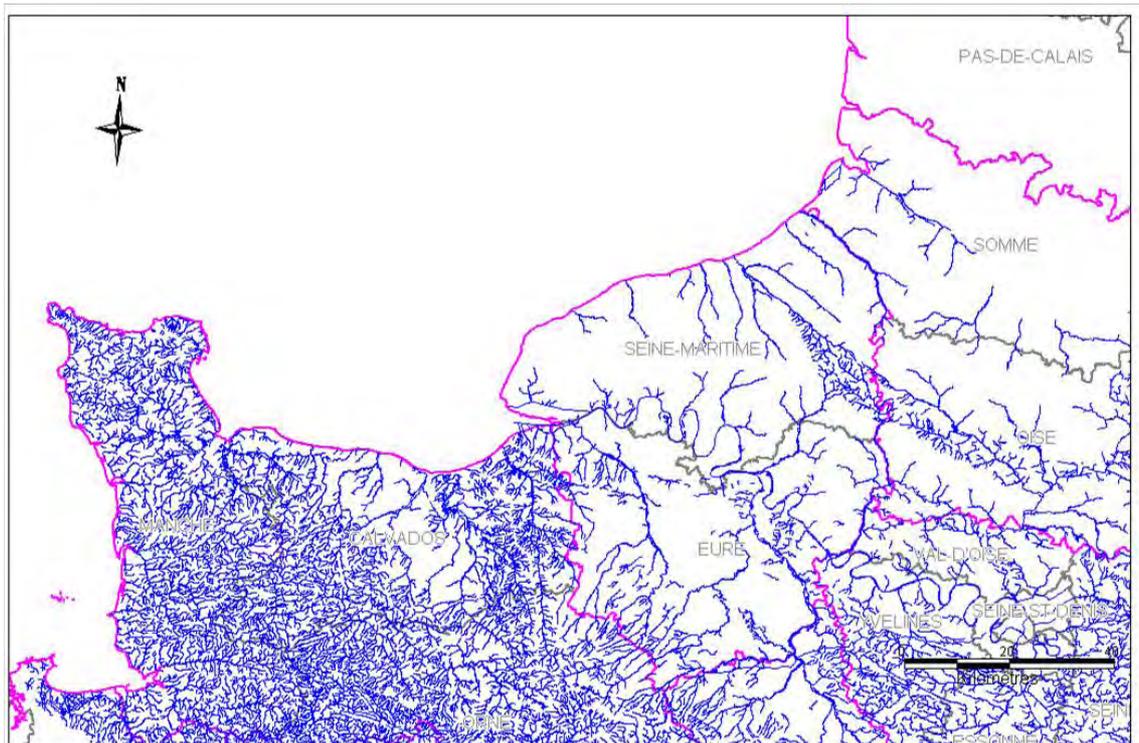
Annexe 1 - Typologie des bétoires .....	117
Annexe 2 - Exemples d’aménagements de bétoires non réalisés dans les règles de l’art.....	123
Annexe 3 - Carte des épaisseurs moyennes régionales des RS (extrait de la Thèse de F. Quesnel, 1997) .....	127
Annexe 4 - Répartition géographique des faciès de RS (extrait de la Thèse de B. Laignel, 1997).....	131
Annexe 5 - Carte de sensibilité des sols à la battance (extrait du guide de conception et de gestion des aires d’infiltration des stations d’épuration de la DISE 76) .....	135
Annexe 6 - Etat de l’art : types d’aménagements de bétoires rencontrés dans les 7 contextes identifiés .....	139
Annexe 7 - Fiches terrain d’évaluation du vieillissement d’un échantillon d’aménagements de bétoires .....	167
Annexe 8 - Méthodes géophysiques applicables au contexte haut-normand.....	195
Annexe 9 - Extrait des doctrines et guides existants concernant la gestion de l’infiltration des eaux en Haute-Normandie.....	201
Annexe 10 - Fiches de principe des aménagements .....	205

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

La Haute-Normandie s’étend en grande partie sur de vastes plateaux crayeux affectés par des phénomènes karstiques (processus d’altération-dissolution de la roche carbonatée).

Une des caractéristiques des paysages karstiques est la faible proportion d’écoulements de surface. La densité linéaire de cours d’eau pérenne est en effet particulièrement faible (0,2 km/km<sup>2</sup>) comme le montre l’illustration 1. Les eaux superficielles s’infiltrent donc préférentiellement dans le sous-sol. Certains bassins hydrologiques ne comptent pas de cours d’eau superficiels pérennes mais des vallées sèches.



*Illustration 1 : montrant le faible développement du réseau hydrographique en Haute Normandie*

En domaine de plateau, la craie est recouverte par des formations superficielles qui peuvent avoir une fonction de stockage transitoire des eaux infiltrées dans les sols limoneux (Jardani, 2007) avant leur introduction dans l’aquifère via des bétaires identifiées ou des crypto-bétaires (bétaires supposées sous couverture). L’aquifère de la craie est ainsi alimenté d’une part par des eaux d’infiltration ponctuelle au niveau

des bétoires fonctionnant comme pertes temporaires et collectant les eaux de ruissellement et d'autre part par une infiltration régionalisée.

Au-delà du contexte géologique, l'évolution des pratiques agricoles, le remembrement, l'urbanisation (et l'augmentation des zones imperméabilisées) sont autant de facteurs qui ont conduit la Haute-Normandie, ces dernières décennies, à être reconnue comme une région sensible au risque d'inondation à l'échelle nationale.

Dans le cadre de la lutte contre les inondations, les bétoires ont pu être utilisées comme points d'infiltration des eaux de ruissellements par les particuliers ou comme points d'infiltration situés au niveau des exutoires des ouvrages hydrauliques de lutte contre les ruissellements et les inondations par les collectivités.

De la même façon, la faible densité du réseau hydrographique voire son absence a pu amener les particuliers ou les acteurs locaux à utiliser les bétoires comme points d'infiltration à l'exutoire de stations de traitement d'eaux usées voire de réseaux d'assainissement.

Or la quasi-totalité des besoins en eau potable de Haute-Normandie sont satisfaits à partir des eaux souterraines prélevées dans l'aquifère de la craie. Ces rejets représentent ainsi un risque direct pour la ressource en eau potable de la région.

Enfin, l'ouverture de bétoires dans des zones urbanisées, à proximité de routes ou d'infrastructures ou même au droit des ouvrages hydrauliques de lutte contre les inondations représente un risque géotechnique de toute importance.

Compte tenu de cette particularité régionale, les aménagements de bétoires sont courants en Haute-Normandie. Leurs objectifs sont divers et parfois contradictoires : protection géotechnique d'infrastructures, protection de la ressource en eau potable, infiltration des eaux de surface dans le cadre de la lutte contre les inondations....

En l'absence de règles de l'art dans ce domaine, la DREAL a sollicité le BRGM pour dresser un bilan de l'état de l'art en matière de gestion des bétoires quel que soit l'objectif recherché et pour rédiger des préconisations de bonnes pratiques à l'attention des Maîtres d'Ouvrage, des services de l'Etat ou encore des bureaux d'études.

## **1.2. OBJECTIFS DU RAPPORT**

Les objectifs sont ainsi de faire le bilan de l'état de l'art et de disposer de préconisations de bonnes pratiques en matière d'aménagement de bétoires et de l'étude à mener au préalable.

Le bilan de l'état de l'art ne prend pas en compte les aménagements « artisanaux » de bétoires, mais seulement ceux réalisés par des collectivités.

Il ne s’agit en aucun cas de procéder à des dimensionnements d’ouvrages. Ces derniers nécessitent une étude au cas par cas. A noter que ce guide ne concerne pas l’aménagement ou le rebouchage de cavités anthropiques de type marnière.

Ce rapport est destiné aux administrations, collectivités territoriales, bureaux d’études, ainsi qu’à tout maître d’ouvrage.

### **1.3. CONTENU DU RAPPORT**

Ce rapport est organisé en sept chapitres. Après ce chapitre introductif, le second chapitre donne des éléments de contexte concernant la typologie des bétoires, leur distribution, leurs impacts.

Le troisième chapitre présente le travail d’inventaire qui a été réalisé pour dresser l’état de l’art.

Le quatrième chapitre détaille les différentes techniques d’aménagement recensées dans l’inventaire, les retours d’expériences et les préconisations sur ces techniques de traitement.

Le cinquième chapitre présente le choix d’aménagement de bétoires qui sont actuellement fait en fonction du contexte de situation des bétoires, et propose dans un second temps, des préconisations d’aménagement contexte par contexte et en fonction de l’objectif poursuivi (risque géotechnique, risque hydraulique, risque sanitaire) et de la typologie des bétoires à traiter.

Le sixième chapitre décrit les différentes données à acquérir pour étudier la faisabilité d’un aménagement de bétoires.

Enfin le dernier chapitre propose quelques recommandations concernant le contenu des dossiers « loi sur l’eau » d’aménagement de bétoires.



## 2. Eléments de contexte

### 2.1. CARACTERISTIQUES DU KARST CRAYEUX

Les aquifères qui se développent au sein de la craie, peuvent être en fonction du développement de la karstification et de l'évolution du niveau de base, considérés comme des aquifères karstiques ou comme des aquifères de type milieu fissuré. Le milieu aquifère, à savoir la craie, se démarque des autres formations carbonatées de par sa texture fine et de par sa porosité.

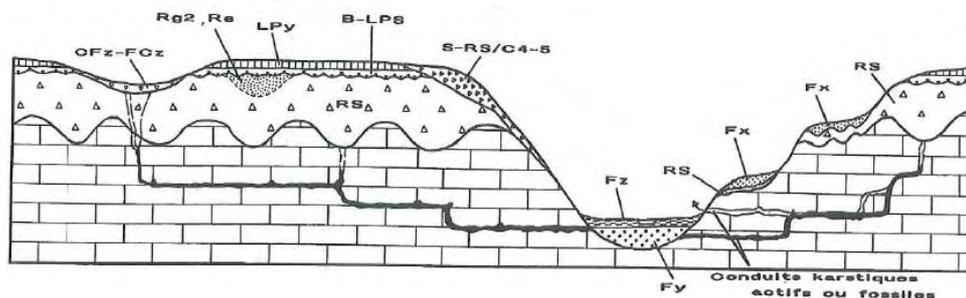
L'aquifère de la craie est ainsi caractérisé par l'existence d'une triple porosité, une porosité de matrice, de fracture et de conduits telle que décrite ci-dessous :

- la porosité matricielle inter-granulaire a une fonction capacitive conséquente (de 15 à 45% selon les horizons lithologiques et les auteurs) ; cependant la porosité efficace reste faible ; les valeurs des conductivités hydrauliques ou perméabilités sont de l'ordre de  $10^{-8}$  m.s<sup>-1</sup>. Ces valeurs traduisent des vitesses de transport dans le milieu souterrain de l'ordre du mètre par an ;
- la porosité de fracture, selon l'importance de la fracturation et des processus de dissolution qui peuvent les affecter, conduit à des perméabilités de l'ordre de  $10^{-4}$  m.s<sup>-1</sup> à  $10^{-6}$  m.s<sup>-1</sup>, correspondant à des vitesses de transfert de l'ordre de quelques mètres par mois. Cette porosité est associée à la fonction de stockage temporaire dans les formations superficielles ; elle pourrait expliquer le retard de la recharge de l'aquifère comme l'atteste les variations piézométriques au cours d'un cycle hydrologique. Cette porosité peut ainsi jouer un rôle dans la fonction capacitive de l'aquifère, mais exerce surtout un rôle primordial dans la fonction transmissive de l'aquifère et dans l'organisation des gradients hydrauliques ;
- la porosité de conduits karstiques peut, localement (selon des connexions actives avec les bétaires), assurer des vitesses de transfert (depuis un point d'infiltration préférentiel à l'exutoire du système karstique) dépassant fréquemment 100 m par heure (contexte hydrologique de hautes eaux). Les perméabilités sont ainsi de l'ordre de  $10^{-1}$  m.s<sup>-1</sup> à  $10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup>. La porosité de conduit n'a qu'un rôle transmissif dans les transferts rapides. Ce rôle transmissif reste en partie contrôlé par les gradients hydrauliques hérités de la porosité de fracture et le contexte structural régional ; son importance et les vitesses de transfert qui en découlent exercent aussi un rôle primordial sur la vulnérabilité des ressources exploitées.

Si l'aquifère de la craie est karstifié, ses caractéristiques sont les mêmes que celles des aquifères karstiques (domination des écoulements au sein de réseaux karstiques connectés à une matrice rocheuse fissurée) (cf. BRGM RP-58237-FR, pour plus de détail).

La caractéristique principale des aquifères de la craie pour la partie occidentale du Bassin de Paris réside dans la présence de formations de recouvrement datant du Tertiaire et du Quaternaire. Les formations superficielles sont à prendre en considération pour les aquifères de type craie sous couverture. Elles ont joué un rôle prépondérant dans le développement de la karstification sous jacente. Ces formations sont soit des dépôts sableux, soit des argiles à silex, soit encore de la craie altérée. De plus, la nature de la perméabilité de ces formations va influencer le type de recharge de l’aquifère. Deux types de formations superficielles sus-jacentes à la craie aquifère sont envisagés :

- les formations superficielles présentent une perméabilité hydraulique en grand du type de celle des sables ; l’eau d’infiltration arrive de manière diffuse au toit de la craie et la dissolution prend place de manière homogène sur toute la surface, les hétérogénéités étant liées à la présence de fractures ;
- les formations superficielles sont globalement imperméables : soit le toit de la craie est protégé par les formations de recouvrement, soit dans le cas d’une hétérogénéité spatiale des formations, des points préférentiels d’engouffrement des eaux provoquent des dissolutions de la craie ; la dissolution serait davantage contrôlée par la nature de la couverture que par la fracturation. Les entonnoirs de dissolution sont ainsi les racines du manteau d’altération de la craie et constituent les bétoires naturelles.

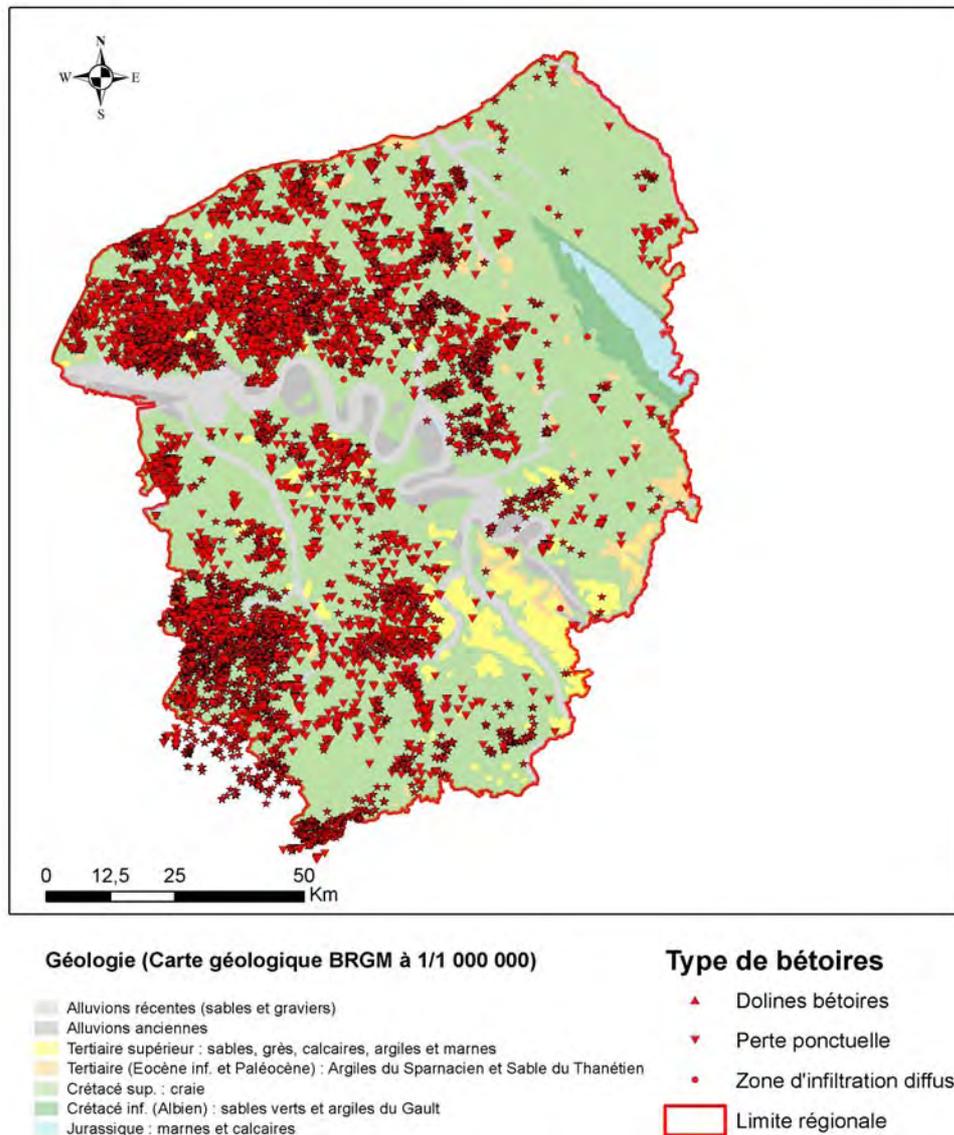


LP <sub>y</sub>	: Loess	S-RS/C <sub>4-5</sub>	: Formation à silex solfluée sur craie sénonienne
F <sub>z</sub>	: Alluvions fines holocènes	B-LPS	: Limon à silex
F <sub>y</sub>	: Alluvions grossières weichseliennes	RS	: Formation résiduelle à silex
F <sub>x</sub>	: Alluvions anciennes périglaciaires pléistocènes	R <sub>c</sub> ou R <sub>g2</sub>	: Sables cénozoïques en poches résiduelles
CF <sub>z</sub> -FC <sub>z</sub>	: Colluvions-alluvions des vallées sèches		

Illustration 2 : Ensembles lithologiques caractéristiques des aquifères karstiques de Haute-Normandie (Laignel, 1997)

## 2.2. IMPORTANCE DES PHENOMENES KARSTIQUES DE SURFACE EN HAUTE NORMANDIE

Les formations de la craie en Haute-Normandie sont caractérisées par une forte densité de phénomènes morphologiques de surface, associés à une karstification. Les bétoires font partie de ces phénomènes dits « exokarstiques » (en surface, par opposition à « endokarstiques » pour les phénomènes morphologiques situés au sein d’un massif carbonaté : conduits, grottes). L’inventaire régional des bétoires en cours de réalisation a déjà recensé près de 8500 bétoires à l’échelle de la région (Illustration 3).



*Illustration 3 : Carte de localisation des bétoires recensées dans le cadre de l’inventaire régional des bétoires en cours de réalisation – en date du 05/07/2010*

La densité est de 1,4 bétaires/km<sup>2</sup> en moyenne sur la région (nombre de bétaires / surface de la région Haute-Normandie) mais peut être beaucoup plus importante dans certains bassins versants.

A ce stade de l'inventaire des bétaires, cette carte de répartition des bétaires montre que la densité des bétaires est moindre dans l'Est que dans la région centrale et occidentale.

### 2.3. APPARENCE DE L'EXOKARST EN HAUTE NORMANDIE

En Haute-Normandie, les phénomènes exokarstiques sont variés.

A la différence des karsts<sup>1</sup> nus méditerranéens ou alpins, le karst Haut Normand est sous une couverture d'argiles à silex (résidus de l'altération de la craie appelé aussi manteau d'altération de la craie) augmentés de dépôts variés : loess, sables d'origine tertiaires...(cf 2.1.).

L'apparence du karst en surface résulte de phénomènes d'érosion de la couverture, donnant lieu à des formes généralement « feutrées » à l'échelle régionale. Les formes exokarstiques peuvent être différentes et également de densité différente, en fonction de leur localisation : sur les plateaux ou dans les vallées.

**En plateaux**, la morphologie du karst de Haute-Normandie est principalement constituée de vallonnements et de dépressions (dolines). Effacées, les dolines peuvent être plus marquées dans le cas où elles sont absorbantes : les eaux de ruissellement s'engouffrant vers les eaux souterraines de façon rapide entraînent le matériel meuble en profondeur (processus de suffosion). Ce processus provoque l'agrandissement et l'approfondissement de ces dépressions.

Dans de très rares cas, l'exokarst prend la forme de cavités pénétrables par l'homme atteignant directement le réseau karstique sous-jacent (exemple : Gouffre Denizot, près de Rougemontiers (Eure)).

**En vallées**, les formes de l'exokarst sont plus nombreuses. On observe en effet, l'ouverture de dépressions préférentiellement le long des vallées sèches, qui constituent généralement des zones de fracturation de la craie. Ces dolines forment alors fréquemment des alignements. Dans certaines vallées sèches, la densité de dépressions est telle que la coalescence de certaines dolines est observable, donnant lieu à des formes géométriques ovales. Comme sur les plateaux, ces dolines peuvent engouffrer de façon rapide les eaux de surface.

Les phénomènes de karstification affectent également certains cours d'eau (vallées humides) pouvant entraîner en période d'étiage leurs assèchements (cas du « Sec-Itton » dans l'Eure), lié à l'absorption totale du ruissellement par des pertes.

---

<sup>1</sup> Le terme de karst ici est utilisé en tant qu'objet morphologique.

**Le terme local « bétaire » est utilisé dans ce rapport pour décrire ces diverses formes de l’exokarst uniquement dans le cas où elles constituent des points d’engouffrement rapide des eaux de surface vers les eaux souterraines. Ce sont des points naturels et non artificiels, comme le sont les marnières. Le terme bétaire évoque plus une notion fonctionnelle qu’un phénomène naturel et génétique particulier du karst (présence d’eau temporaire en surface et infiltration dans la zone non saturée de l’aquifère pour rejoindre la zone saturée, le réseau de conduits karstiques quel que soit son développement).**

Le terme « bétaire » regroupe donc des formes variées de l’exokarst qui ont pour origine des processus génétiques divers.

### **Morphologie des bétaires :**

Les bétaires, dolines dont le fond est colmaté de formations meubles, peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres de diamètre et de profondeur. Cependant, dans les zones entretenues et occupées par l’homme (champs, prairies à vaches, zones urbanisées,...), les dimensions observées sont généralement beaucoup plus faibles du fait des rebouchages réguliers de ces effondrements (Illustration 4).



*Illustration 4 : Photos présentant des exemples de bétaires anthropisées*

On peut distinguer au moins 3 types de morphologie de bétaires :

- **Perte ponctuelle** : trou de faible profondeur ou de faible diamètre ou simple orifice centimétriques à la surface du sol, engouffrant les eaux de surface temporairement suite aux précipitations. L’identification des pertes n’est souvent pas aisée, l’infiltration pouvant être rapide. Les pertes ne marquent pas toujours de façon nette la morphologie ; il y a absence d’incision, le processus d’infiltration étant à ses débuts.

- « **Doline bétoire** » : doline prononcée (diamètre et profondeur importants) faisant apparaître en son fond des orifices centimétriques d'engouffrement des eaux. Le diamètre pouvant aller de 2 à plusieurs dizaines de mètres.
- « **Dolines coalescentes** » : forme ovale dont la plus grande dimension est dans le sens du talweg.

Des planches photographiques illustrant cette typologie sont présentées en Annexe 1.

A noter que la morphologie de la bétoire (diamètre, profondeur) n'est pas liée à sa capacité d'absorption.

## 2.4. PROCESSUS GENETIQUES DE FORMATION DES BETOIRES

Les processus génétiques de formation des bétoires font encore aujourd'hui l'objet de travaux de recherche. Le but de ce paragraphe n'est pas de décrire précisément la genèse des bétoires, mais plutôt de distinguer différents processus possibles mettant en évidence des contextes propices à l'apparition de bétoires.

### 1 - Les bétoires développées au gré de la tectonique

- Les pertes développées au-dessus des diaclases : les systèmes karstiques de la craie peuvent se développer par ouverture de diaclases. Les vallées sèches sont des lieux privilégiés, car elles constituent des zones de fracturation de la craie. Le réseau de fissures n'a pas besoin d'être très ouvert pour induire des bétoires importantes ; il suffit d'une vitesse de circulation des eaux de quelques centimètres par seconde dans des réseaux de quelques centimètres d'ouverture (De La Quèrière, 2000) ;
- Les pertes liées aux failles de décompression (ou fissuration de détente) : l'ampleur de la décompression est liée à l'importance du contraste créé entre le massif et la vallée (appel du vide résultant de l'incision des vallées); Rodet cite l'exemple du « trou fumeux » (dans la forêt de Jumièges, (76)) ouvert sur le rebord de l'abrupt qui domine les méandres de la Seine au Mesnil-sous-Jumièges (Rodet, 1991). Elle se présente sous la forme d'une longue fissure verticale de 21m de profondeur, de plus en plus étroite vers sa partie inférieure ;
- Les pertes de contact par faille : ce cas peut se produire dans diverses situations topographiques : en situation de plateau (exemple du bassin karstique du Hannetot (76) où le drainage amont superficiel devient souterrain au contact de l'accident (perte du Bébec à Villequier (76) (Rodet, 1991) ou en position de vallée (exemple de la vallée du Commerce où la rivière traverse la faille avec des pertes mises en évidence par traçage) ; un autre exemple de bétoires liées à des accidents tectoniques semble être l'effondrement survenu en août 1981 dans le bassin n°1 de stockage d'eau industrielle à Norville (à 4km au SO de la perte du Bebec), 60 000m<sup>3</sup> d'eau absorbée (Mathon, et De La Quèrière, 1981) ;

- Les pertes liées aux plis-bombements ou anticlinaux : l’exemple le plus connu dans la région est le cours d’eau de l’Iton qui traverse un bombement tectonique. Ce bombement provoque un décrochement du drainage superficiel au-dessus de l’aquifère crayeux, générateur de pertes au profit d’une circulation karstique. Sur ce tronçon, le cours d’eau peut s’assécher en étiage (Sec Iton).

## **2 – Les bétoires liées aux contacts stratigraphiques**

- Elles se développent au niveau des variations latérales de faciès. C’est le cas dans le Pays d’Ouche (Eure, Eure et loir et Orne) où un ensemble de bétoires ponctue le passage des dépôts de sables argileux (perche) à la craie (crétacé supérieur). Ainsi le drainage superficiel très organisé dans le Perche en une multitude de petits cours d’eau, se concentre en quelques rivières qui disparaissent alors en aval des bétoires (Rodet, 1991) ;
- Effondrements provoqués par les soutirages dus aux écoulements de sub-surface dans les formations superficielles (cas de la bétoire ouverte dans le bassin du Val Postel – SERSAEP)

## **3 – Les bétoires liées à l’effondrement de l’endokarst**

### 3a - Effondrement du toit d’un drain karstique en vallée

Les conduits souterrains (endokarst) sont souvent établis le long des vallons, en liaison avec les zones de détente qu’engendre la topographie de surface (Geze, 1974 dans Rodet, 1991), ainsi que les éléments structuraux. Les bétoires et les dolines d’effondrement sont en conséquence plutôt disposées à proximité des talwegs, sur le flanc des vallons. Elles sont alors alignées, jalonnant alors probablement le drain souterrain (cas supposé des bétoires d’une des vallées sèches d’Yport).

### 3b - Effondrement du toit d’un drain karstique en plateau

L’effondrement de l’endokarst peut également être suivi par la remontée de l’instabilité jusqu’en surface, au travers du recouvrement superficiel des plateaux.

Deux cas particuliers d’apparition d’effondrement en surface sont décrits ci-dessous.

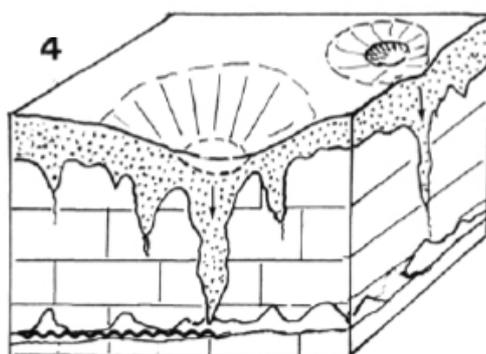
#### *- Cas des racines d’altérations recoupant un drain karstique en profondeur*

Il est tout d’abord nécessaire de rappeler que l’interface entre le massif crayeux et son manteau d’altération est une surface très irrégulière : succession d’entonnoirs formant les structures en « doigts de gant » observables au niveau des falaises côtières du pays de Caux. Ce sont les « racines » du manteau d’altération de la craie.

Certaines dolines absorbantes de plateau sont ainsi le résultat d’une connexion entre une racine d’altération et un drain karstique (processus conjoint d’approfondissement de la racine d’altération et/ou d’une remontée du toit du conduit karstique par fontis).

Les circulations d’eau peuvent alors évacuer le remplissage de la racine d’altération. J. Rodet (Rodet, 1991) distingue 3 types de racines du manteau d’altération :

- type stable : celles qui ne sont pas connectées à un drain majeur à leur base,
- type à évolution lente : celles qui rejoignent un drain majeur non fonctionnel,
- type instable : celles qui sont drainées par un collecteur fonctionnel.



*Illustration 5 : Schéma d'une « Doline béttoire », dont l'origine est une racine d'altération qui a recoupé un drain karstique, d'après NICOD J., CNRS 1994 (doline de soutirage, suffosion lente ou répétitive, cuvette à fond mobile)*

L'un des exemples le plus spectaculaire est donné par les effondrements de la Forêt d'Evreux, sur la commune des Ventes (Eure) où des dolines de dimensions importantes sont observées.

	Dimension (en m)	Profondeur (en m)
Fosse des champs Guérin	40 x 40	15
Fosse aux Vaches	10 x 10	4
Fosse des Dix Acres	15 x 15	10
Fosse de la Butte Rouge	40 x 40	15
Fosse des Murets	30 x 40	10
Fosse du Voisin	40 x 40	10
Fosse des Machines	20 x 20	8

*Illustration 6 : Les grandes fosses de la forêt d'Evreux (Rodet, 1991)*

On peut supposer que les circulations karstiques du « Sec Iton » mises en évidence par traçage (Illustration 7) se manifestent en surface par l'apparition de ces dolines de grande dimension (fosses) qui criblent ce secteur, aussi bien au niveau des vallées que des plateaux.

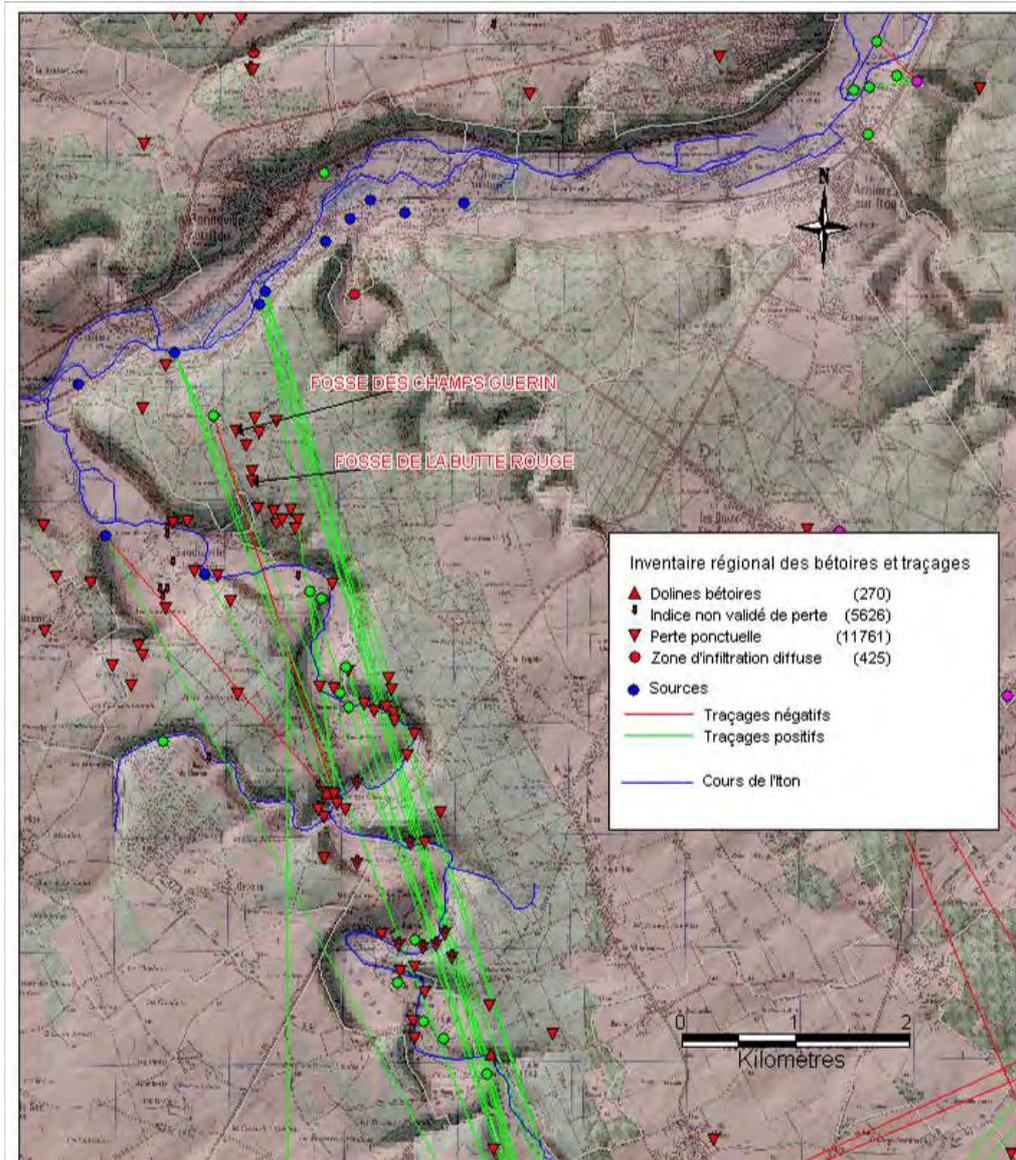


Illustration 7 : Bétaires et traçages positifs du secteur du Sec-Iton (Extrait de l’inventaire régional Bétaires/Traçages)

- Endokarst atteignant la surface

Pour la majorité des cas cités précédemment, les effondrements donnent lieu à des dolines sans orifices pénétrables ; les conduits verticaux sont comblés par des formations superficielles. Dans de rares cas, le karst donne lieu à des avens pénétrables dans la craie, comme c’est le cas pour le gouffre « Guy Denizot » à Rougemontier (Eure). En décembre 1967, pendant les travaux de déboisement et de nivellement de l’emprise du futur transformateur EDF, un engin a intercepté un aven (Illustration 8). J. Rodet (Rodet, 1991) interprète ce phénomène par le décapage d’une

ancienne cheminée d'équilibre karstique. Ce cas serait resté unique en Haute-Normandie.

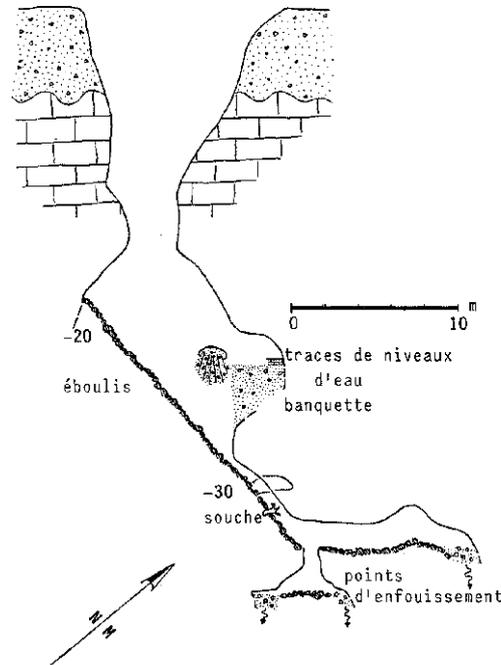


Illustration 8 : Coupe et plan du gouffre Guy-Denizot (Rougemontier, Eure) (Rodet, 1991)

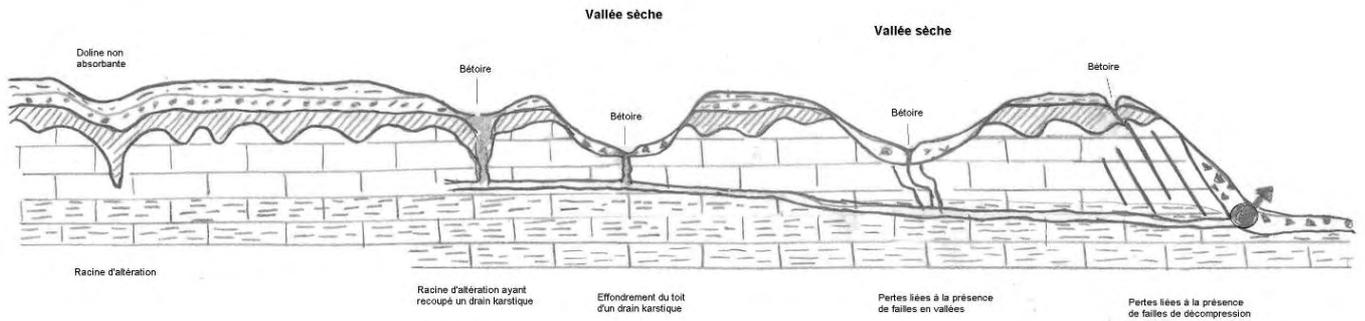
Ces phénomènes d'ouverture de fonds de dolines colmatés, ou d'ouverture au-dessus de zones fracturées de la craie (vallées sèches) font généralement suite à de fortes pluies qui déstabilisent les colmatages argileux. Rebouchées régulièrement de façon naturelle ou anthropique, ces bétaires sont réouvertes périodiquement.

Tous les mécanismes présentés précédemment sont accélérés par l'introduction concentrée de l'eau.

A noter que les formes de dépressions observées en Haute-Normandie peuvent être également d'origine anthropique résultant de l'effondrement d'une cavité anthropique (marnière). Ces cas ne sont pas abordés dans ce rapport comme indiqué dans le 1<sup>er</sup> chapitre.

#### 4 – Cas particulier des pertes en cours d'eau

Les formes de pertes peuvent varier du simple « suçoir » situé dans le lit du cours d'eau (perte du Val Gallerand, à Grosley sur Risle, Eure) à une importante dépression qui « absorbe » la totalité du débit du cours d'eau, du moins en étiage comme la perte du Ruisseau du Bébec à Villequier en Seine-Maritime, en passant par toutes les variations possibles comme les nombreux exemples présents dans la région (ex. le « Sec Iton » ou bassin de l'Avre).



*Illustration 9 : Schéma des différents contextes d'apparition des bétaires (karst crayeux sous couverture d'argiles à silex, loess)*

## 2.5. TYPOLOGIE ET ROLE HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DES ARGILES A SILEX

### 2.5.1. Typologie des argiles à silex

Les argiles à silex (notées RS) constituent un ensemble hétérogène. Ce résidu de décalcification de la craie situé sous la couverture limoneuse est constitué essentiellement de silex dans une matrice d'argile rouge, éluviale au moins en partie, augmentée par des apports sédimentaires tertiaires, argileux ou sableux. Des poches ou des lentilles de sédiments tertiaires peuvent être présents à l'intérieur du résidu à silex (Rodet, 1991).

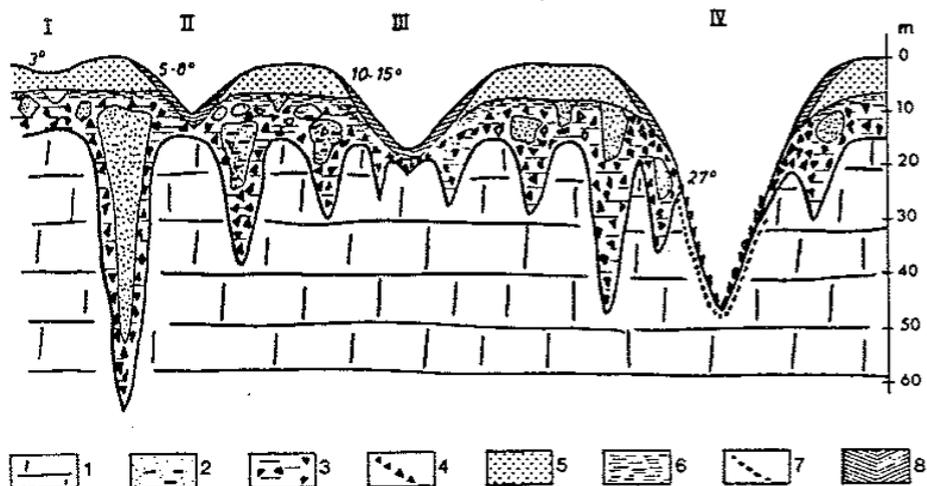


Illustration 10 : Coupe schématique des formations meubles du Pays de Caux (Seine Maritime) (d’après Lautridou, 1984) : 1- craie sénonienne à silex gris, 2- sable et argile résiduelle tertiaire, 3 – argile rouge ou brune à silex, 4 – formation sableuse à silex, 5 – loess, 6 – argile limoneuse rouge à silex peu nombreux, -7 prsle (dépôt de pente crayeux de période froide), 8 – colluvions.

B. Laignel (Laignel, 1997), précise que les altérites à silex (RS) se subdivisent en deux grands ensembles : les RS de plateau et les RS de versant (également appelés biefs à silex). Les RS de plateau s’organisent en six familles géographiques aux caractéristiques lithologiques bien distinctes. Les biefs à silex en revanche ne s’organisent pas de manière régionale, mais en fonction de la nature et de la pente du versant.

F. Quesnel (Quesnel, 1997), a établi une carte des épaisseurs des RS de plateau sur la base de 2500 sondages rassemblés principalement dans la banque du sous-sol (BSS, brgm). Cette carte (Annexe 3) met en évidence plusieurs ensembles :

Zone géographique	Epaisseurs de RS
Est du pays de caux, Est de l’Eure, Talou	<10m
Pays de caux (excepté l’Est)	Variables : 10 à 15 m en moyenne mais peuvent dépasser 30m
RS sous les alluvions des hautes terrasses de la Seine et de l’Eure	2 à 3m
Secteur restreint au Sud du Lieuvin et au Nord-Ouest du Pays d’Ouche	<10m
Pays d’Auge et Perche	<10m
Le reste de la région (Eure, Est excepté)	>10m pouvant atteindre 20m et plus dans la partie centrale (orientée selon un axe N-S à NNW-SSE)

Concernant la caractérisation lithologique des RS réalisée par B. Laignel (Laignel, 1997), l’étude de 21 sites de RS en plateau, montre que quelque soit le secteur considéré, verticalement (de haut en bas), on retrouve la coupe schématique suivante :

- limons de plateau, plus ou moins épais (0 à 5 m voir plus) ;
- RS limoneux à limono-argileux, sur une épaisseur de 0,5 à 2m. Faciès pauvre en silex correspondant au passage entre les limons et les RS sous-jacents ;
- RS argileux à argilo-limoneux. Il s’agit des RS proprement dits, et donc du faciès dominant qui constitue l’essentiel des coupes. Il est composé d’une matrice de teinte variable suivant les secteurs étudiés ;
- liseré argileux brun foncé, noir ou gris vert à silex. Il se trouve systématiquement à la base des coupes de RS, au contact de la craie. Son épaisseur est en général de l’ordre de 0,5m mais peut atteindre parfois 2m. Seul le RS reposant sur les sables du Perche ne présente pas de liseré argileux brun foncé.

Le travail de B. Laignel, a abouti à une typologie des RS de plateau, où sont distinguées 5 familles :

Faciès RS de plateau		Teinte matrice	Granulométrie matrice (< 2 mm)	Minéralogie (< 2 µm)	Chimie matrice (< 2 mm)	% silex (> 20 mm)	Observations macro silex
RS limoneux à argilo-limoneux		variable	limoneuse à limono-argileuse	hétérogène	hétérogène	pauvre	/
RS sableux		variable	sableuse à sablo-argileuse	kaolinite	SiO2 Al2O3 MnO	variable	/
liseré argileux de la base des coupes		brun foncé, noir ou gris vert	argileuse	smectite interstratifiés 7/14sm	Fe2O3 MgO, CaO, K2O, Na2O MnO	/	/
RS argileux à argilo-limoneux (faciès dominant)	Est Pays de Caux, Talou ①	brun (ocre)	limono-argileuse	smectite interstratifiés 7/14sm	SiO2 TiO2	42 à 45	- gris, noirs - rognons, irréguliers - fragmentation < 15% - non oxydés
	Pays de Caux (excepté l’Est) ②	rouge à brun-rouge	argilo-limoneuse	kaolinite dominante	SiO2 Fe2O3 MgO, CaO K2O, Na2O TiO2	44 à 47	- gris, qq bruns - rognons - fragmentation ≈ 20% - peu oxydés
	Eure ③	- rouge - beige, rose, blanc	argileuse à argilo-limoneuse	variable (kaolinite dominante)	SiO2 Al2O3 MnO	0-10 m : 42 à 54 10-15 m : 60 à 70 > 15 m : 70 à 80	- bruns, gris - rognons, irréguliers - fragmentation 15-30% - oxydés nombreux
	Perche ④	- bigaré rouge, blanc - blanc	argileuse à argilo-limoneuse	kaolinite	SiO2 Al2O3 Fe2O3	≈ 50	- gris - irréguliers - fragmentation < 10% - peu oxydés
	Eure et Loir ⑤	- rouge - beige, rose, blanc	argileuse à argilo-limoneuse		MgO, CaO K2O, Na2O	0-10 m : 39 à 51 10-15 m : 60 à 70 > 15 m : 70 à 80	- bruns, gris - rognons, parallélépipédés - fragmentation ≈ 30% - oxydés assez nombreux

Illustration 11 : Synthèse des données lithologiques et typologie des RS de plateau (SiO2 : teneur élevée en SiO2, SiO2 : teneur faible en SiO2 ; Interstratifiés 7/14sm : interstratifiés kaolinite/smectite) (extrait de la thèse de B. Laignel, 1997).

La carte de la répartition géographique de ces différents faciès de RS de plateau est présentée en Annexe 4.

Les différences d'un site à un autre se situent au niveau des RS argileux à argilo-limoneux, mais également au niveau de l'association des RS avec les formations sableuses cénozoïques. Ces formations sableuses sont conservées sporadiquement en poches au sein des RS et peuvent perturber les caractéristiques lithologiques de ces derniers.

La variabilité spatiale en termes de type d'argiles en présence (smectite, kaolinite,...) peut avoir des répercussions en termes de comportements géotechniques de ces matériaux. Par ailleurs la variabilité des formations superficielles (présence ou non de formations sableuses dans les RS par exemple), montrent l'importance d'une bonne connaissance de la géologie du site avant de concevoir tout aménagement.

### **2.5.2. Rôle hydrologique et hydrogéologique des formations superficielles**

Les RS sont surmontées de loess dont l'épaisseur peut dépasser 10m sur les plateaux. Cette formation de loess aux perméabilités variables peut jouer un rôle de stockage temporaire. La nature argileuse des RS peut constituer un écran plus ou moins imperméable. Des nappes perchées apparaissent alors localement dans les loess. Les RS peuvent également avoir une fonction de stockage transitoire des eaux infiltrées dans les sols limoneux sus-jacents (Jardani, 2007) avant leur introduction dans l'aquifère via des bétôires identifiées ou des crypto-bétôires (petites bétôires supposées sous couverture). L'aquifère de la craie est ainsi alimenté d'une part par des eaux d'infiltration ponctuelle au niveau des bétôires fonctionnant comme pertes temporaires et collectant les eaux de ruissellement et d'autre part par une infiltration régionalisée du fait notamment de l'hétérogénéité des RS.

Par ailleurs, suite à des précipitations importantes, une « croûte » peut se former et transformer la couverture de loess en surfaces quasi-imperméables (stagnations anormales de l'eau et de glaçage des sols), traduisant le phénomène de battance des sols (dégradation des sols) (cf. carte de sensibilité des sols à la battance en Annexe 5). De plus apparaît très souvent dans ces sols, vers 60 cm de profondeur, un horizon d'accumulation d'éléments fins, réduisant la capacité d'infiltration, et accentuant les phénomènes de ruissellement vers les points d'engouffrement rapide (bétôires).

La contribution hydrologique de l'« aquifère » superficiel (Limon et RS) est actuellement mal connue et fait encore l'objet de travaux de recherche, en particulier à l'université de Rouen.

Le rôle hydrologique des formations de surface peut avoir notamment une importance dans l'explication de certains effondrements de surface. En effet, il semble que ces derniers ne soient pas toujours liés à la concentration de l'infiltration des ruissellements de surface, mais parfois à des écoulements de subsurface au sein de l'« aquifère » superficiel.

Lors des entretiens réalisés dans le cadre de cette étude, plusieurs observations en ce sens ont été recueillies.

Nous citerons le résultat de la campagne de géophysique réalisée au niveau de la bétoire ouverte dans le bassin du Val Postel pour le compte du SERSAEP : au lieu-dit « Val-Postel ». Une bétoire s’est ouverte dans un bassin de rétention en 2001 et a été comblée. Elle s’est réouverte en 2003, probablement suite à la mise en eau du bassin. Deux études ont été menées parallèlement pour estimer si cette bétoire était isolée et pouvait être recomblée, ou si elle n’était que la manifestation d’une zone à risque compromettant la réhabilitation du bassin. En octobre 2003, la société Géocarta a réalisé une prospection géophysique avec le système ARP et une cartographie de conductivité EM-31 qui ont permis de mettre en évidence la présence, en surface, d’une forte anomalie de résistivité de 4m de profondeur et de 20m de large. La bétoire s’est ouverte à l’aplomb de cette anomalie. En novembre 2003, parallèlement à cette étude géophysique, une étude géotechnique a été réalisée autour de la bétoire par des sondages destructifs. Les résultats ont montré la présence en surface d’un niveau d’argile à silex sur 3 à 4m surmontant des sables limoneux ou des graves. D’après Geocarta, l’anomalie de forte résistivité identifiée par la prospection géophysique se présente sous la forme d’un chenal alluvionnaire. Ils considèrent d’autre part que la craie n’ayant pas été rencontrée par ces sondages, ne signifie pas qu’un réseau karstique soit absent, mais plutôt que celui-ci se localiserait plus en profondeur.

En juillet 2004, une nouvelle prospection géophysique alliée à une mise en eau artificielle du bassin a été faite pour comprendre le devenir des fuites de la bétoire (soit l’écoulement en direction de la nappe est verticale, soit elle se fait horizontalement en empruntant le chenal alluvionnaire et rejoint la nappe de façon différée). Un suivi temporel de mesures de résistivité électrique 2D (méthode des panneaux électriques) et de mesures de polarisation spontanée a été effectué.

D’après Geocarta, cette nouvelle prospection a confirmé la présence d’un paléo-chenal dans l’emprise du bassin de rétention du Val-Postel. Les panneaux électriques auraient mis en évidence une forte hétérogénéité structurale du sous-sol dans l’axe du thalweg. Il conclut que l’ouverture de la bétoire est liée au chenal et à l’hétérogénéité des matériaux. Le toit du substrat crayeux apparaît comme étant très irrégulier. Le suivi temporel de la résistivité électrique par panneaux électriques alliée à la mise en eau artificielle de la bétoire a permis de mettre en évidence un écoulement horizontal de l’eau dans la partie supérieure du chenal au niveau de la bétoire. Cependant il n’est pas improbable qu’une partie de l’eau injectée dans la bétoire s’écoule verticalement au travers d’un conduit de petite taille, mais non détectable au moyen des méthodes géophysiques.

<p>La complexité du rôle hydrogéologique des formations superficielles, démontre l’intérêt de réaliser des études préalables permettant de concevoir un aménagement le plus adapté possible au contexte hydrogéologique spécifique de chaque site.</p>
--

## **2.6. IMPACT DES PHENOMENES EXOKARSTIQUES EN HAUTE NORMANDIE**

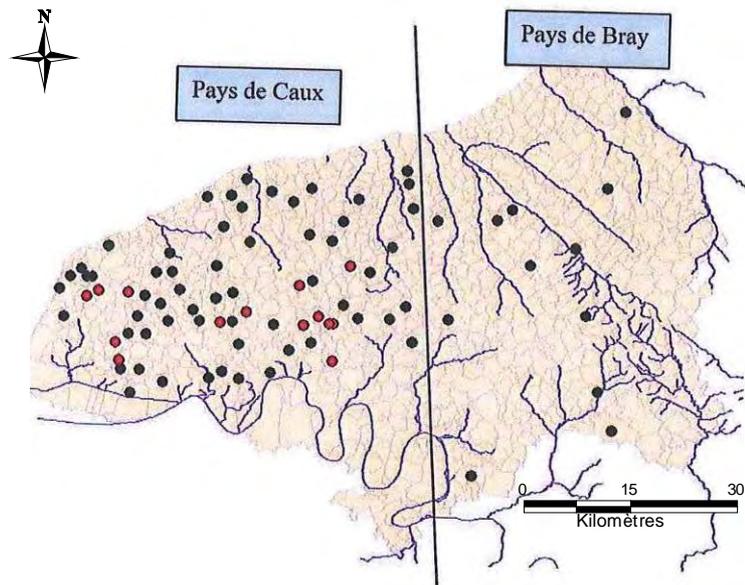
En Haute-Normandie, l'essentiel de la ressource en eau potable provient de l'exploitation de la nappe de la craie. Dans ce contexte de substratum crayeux karstifié, les eaux de ruissellement s'écoulent vers les bétoires directement connectées avec le réseau de fissures et conduits karstiques situés dans l'aquifère de la craie. Ce transfert rapide vers l'aquifère se traduit par la restitution d'épisodes turbides à des vitesses de transfert élevées (supérieures à 100m/h en conditions hydrologiques de hautes eaux) au niveau des sources et des forages d'alimentation en eau potable situés dans les vallées. Les introductions rapides et concentrées des eaux de surface dans les bétoires constituent donc un point de vulnérabilité de l'aquifère de la craie.

Selon le Schéma Départemental d'Alimentation en Eau Potable de la Seine Maritime édité en 2002 et actualisé en 2004, 90 des 249 points d'eau sont sujets à la turbidité, dont 76 de façon chronique (plus de trois épisodes de turbidité depuis 1992).

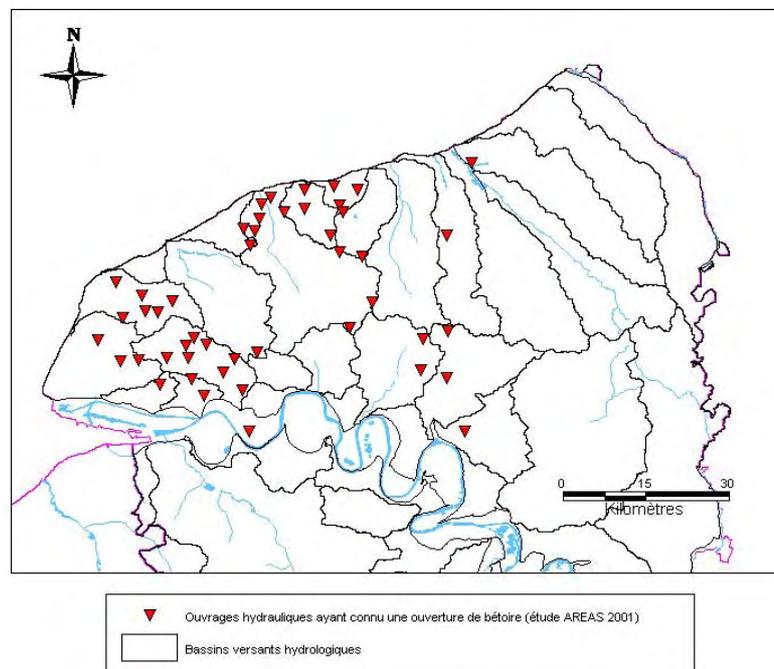
Outre l'enjeu lié à la vulnérabilité de la ressource en eau souterraine, le soutirage des matériaux des formations superficielles vers les vides du karst d'introduction génère des risques géotechniques vis-à-vis des infrastructures (habitations, ouvrages routiers, petits barrages...) ou des risques de dysfonctionnement d'ouvrages hydrauliques (percement des bassins de rétention par des bétoires,...).

Ainsi dans son étude technique sur la problématique des bétoires en STEP (stations d'épuration), N. Topin (Topin, 2007) a recensé 73 STEP touchées par la présence de bétoires (bétoires situées au niveau d'une lagune, d'une aire d'infiltration, d'un fossé ou d'une mare situés dans le trajet de l'eau rejetée) (Illustration 12 et Illustration 15).

De même, dans son recensement de 2001, l'AREAS a noté que sur 413 ouvrages de lutte contre les inondations recensés, 62 avaient connu une ouverture de bétoires (15%) (Bétoires ouvertes dans le fond de la rétention ou même sous le corps de digue) (Illustration 13 et Illustration 14).



*Illustration 12 : Cartographie des 73 STEP touchées par la présence de bétôires - Bétôires situées au niveau d'une lagune, d'une aire d'infiltration, d'un fossé ou d'une mare situés dans le trajet de l'eau rejeté Source : étude technique – Problématique des bétôires en STEP – N. TOPIN – 2007*



*Illustration 13 : En 2001, sur 413 ouvrages de lutte contre les inondations recensés, 62 avaient connus une ouverture de bétôires (15%) - Bétôires ouvertes dans le fond de la rétention ou même sous le corps de digue - Source : recensement des ouvrages de luttés contre les inondations en Seine Maritime – AREAS – Décembre 2001*



Illustration 14 : Ouverture de la bétoire dans le fond d’un ouvrage hydraulique de rétention des eaux pluviales (bassin de rétention du Val Postel – SERSAEP) – observation BRGM d’avril 2010



Vue du Nord



Vue du Sud, de l’intérieur de la bétoire

Illustration 15 : Doline Bétoire n°14016 - ouverte dans le fond du bassin rétention/infiltration des eaux de rejet de la STEP de Criquetot l’Esneval – Observation de l’engouffrement des eaux du bassin dans la bétoire (observation BRGM d’avril 2010)



*Illustration 16 : Doline Bétoire n°10079 : effondrement du 04/11/2009 sous une route à St Jouin de Bruneval – diamètre de l’ordre d’une dizaine de mètres (observation du 06/11/2009- Bétoire recevant les eaux des talwegs inondés à l’amont)*

Ces différents exemples montrent que la problématique des bétoires n’est pas à envisager uniquement de façon curative (choix du type d’aménagement), mais qu’elle demeure bien un risque à prendre en compte de façon préventive en amont de tout projet d’aménagement du territoire dans la région (recherche d’indices en amont, cf. § 6 –études préalables).



### **3. Inventaire des pratiques actuelles d’aménagement de bétoires**

Cette phase de l’étude a consisté à faire l’inventaire le plus complet possible des pratiques actuelles d’aménagement de bétoires.

Une recherche bibliographique a été effectuée, en s’appuyant sur divers documents tels que :

- des rapports géotechniques, des études de dimensionnement, des études de reconnaissance, des diagnostics (15 documents),
- des études hydrauliques, hydrologiques, les propositions techniques et financières, les rapports de recensement, les bilans d’analyse (35 documents),
- des avis d’hydrogéologues agréés, des guides, des arrêtés d’autorisation, des rapports et notes techniques (43 documents),
- des dossiers d’autorisation, de déclaration, des dossiers d’enquête publique des études environnementales, des notices d’incidences, des études d’impacts (17 documents).

En parallèle des enquêtes ont été menées auprès de différents acteurs :

- DDAF 76 et 27, DIREN, AREAS, AESN
- SMBV Dun Veules ; SMBV Saône, Vienne, Scie ; SBV Pointe de Caux, SMBV Austreberthe Saffimbec
- Bureaux d’études : SOGETI, ANTEA, INGETEC
- CODAH, communauté de communes de Saint Romain de Colbosc
- SERPN, SYDESA, SYDAR
- Université des Sciences et Techniques de Rouen
- Hydrogéologues agréés : M. ALLAIN, M. DE LA QUERIERE

Ces entretiens ont permis d’obtenir :

- des avis, des doctrines sur l’aménagement de bétoire,
- des exemples d’aménagements,

- des informations sur le suivi et le retour d’expérience,
- des éléments sur les difficultés rencontrées.

Nous nous sommes attachés uniquement aux aménagements réalisés ou en projet (plan projet) ; les aménagements « artisanaux » réalisés par les particuliers n’ont pas été pris en compte. Les informations collectées ont été dépouillées dans un tableau afin de trier les informations et de pouvoir les comparer :

Suivi du dossier	Bassin Versant	Commune	Année travaux	Maitre d'ouvrage	Bureau d'étude	Entreprise	Géologie du site	Typologie et localisation de la bétoire	Rôle de la bétoire	Objectif(s) visé(s)	Etude de faisabilité préalable aux travaux	Solution technique mise en œuvre	Coût aménagement	Difficultés rencontrées, aménagement supplémentaire	Entretiens et surveillance des aménagements prévus	Atteinte des objectifs	Documents disponibles (rapports bureau d'études, rapports de chantier, etc...)
------------------	----------------	---------	---------------	------------------	----------------	------------	------------------	---	--------------------	---------------------	--	----------------------------------	------------------	---	--	------------------------	--

Illustration 17 : Dépouillement des informations

Puis ces données ont été classées et codifiées en fonction de différents critères :

ID	Suivi du dossier	Bassin Versant	Commune(s)	Année(s) des travaux	Situation/contexte de la bétoire (lexique)	Objectif(s) visé(s) aménagement (Lexique)	Aménagement bétoire stricto sensus (lexique)	Aménagement périphérique (Lexique)	Aménagement réalisé
5			bassin "Val des Francs"	1999?	1	4	1		1
30	SIAEP de la région de Boos	Bassin du forage de St Aubin-Epinay	Montmain	1989	1	1	1	2	0
53	SMBV dun-Veules		Autigny, 2 bétoires "Carville 31"	2004	1	1 et 2	1		1
55	SMBV dun-Veules		la Chapelle sur Dun	2002 et suite	1				1
64	BRGM		Hauts St Michel bolbec	2001	1	1	1 et 6	2	0

Illustration 18 : Codification des informations (colonnes en bleu)

Afin de pouvoir les comparer, les différents choix techniques d’aménagements (envisagés ou réalisés) ont été classés en fonction du risque contre lequel ils ont été conçus (sanitaire, hydrologique, hydraulique ou géotechnique) et du contexte dans lequel se situe la bétoire.

Pour chaque aménagement recensé, quatre éléments ont donc été renseignés :

- type de risque,
- type de contexte dans lequel se situe la bétoire,
- type d’aménagement de bétoire (réalisé ou envisagé),
- type d’aménagement de versant (réalisé ou envisagé).

Le critère « Risque » : risque que représente la présence de la bétoire ou son aménagement :

- le risque sanitaire apparaît lorsqu’une bétoire établit un lien direct entre des eaux superficielles de qualité dégradée et la ressource en eau souterraine (risque de pollution de la ressource en eau souterraine, pollution de captages...),
- le risque géotechnique est lié à la présence de bétoires situées à proximité d’une infrastructure (bâtiment, route, digue...) pouvant les déstructurer,
- le risque hydrologique : est lié à l’impact de tout aménagement de bétoires : modification du rôle de la bétoire dans le cycle de l’eau (infiltration des eaux de surface vers les eaux souterraines) pouvant accentuer des risques d’inondation, diminuer la productivité de captage,... Il faut en effet s’assurer que l’aménagement ne provoque pas : une amplification des volumes de ruissellement et un risque d’inondation à l’aval, une diminution des débits de sources situées à l’aval et utilisées pour la pisciculture, cressiculture, l’AEP...) liées à une diminution de l’infiltration,
- le risque hydraulique correspond à un risque de dysfonctionnement d’un ouvrage hydraulique (percement de bassin de rétention, effondrement sous ou proche d’une digue, d’un barrage,...). Ces bétoires peuvent entraîner des problèmes de gestion des eaux pluviales et des eaux usées (cas des lagunes d’assainissement),

Le critère « Contexte de la bétoire » identifie l’environnement dans lequel se situe la bétoire, dont les caractéristiques influencent le choix de l’aménagement. Les sept contextes considérés sont présentés dans le tableau ci-après :

Contexte de la bétoire		Caractéristique de ce contexte	Risque principal à éviter
<b>1. Bétoire située dans un bassin hydraulique (rétention ou infiltration)</b>	ouvrages de lutte contre les inondations (bassins de retenue à sec ou en eau, digue avec une prairie inondable, digue avec une mare en amont,...)	- bétoires soumises à de fortes charges hydrauliques - certains de ces ouvrages ne sont pas en eau de façon permanente (cycle d’assèchement et d’humidification du fond de ces ouvrages)	- risque hydraulique - risque hydrologique (- risque sanitaire)
	ouvrages liés aux stations de traitement des eaux usées (aires d’infiltration, lagunes,...)		- risque hydraulique - risque sanitaire
<b>2. Bétoire située sous ou à proximité immédiate d’un ouvrage hydraulique structurant (digue, barrage,...) (30 - 35m de l’ouvrage)</b>		- le contexte est lié à la stabilité de l’ouvrage qui doit être assurée ainsi que le bon fonctionnement de l’ouvrage hydraulique	- risque géotechnique - risque hydraulique (- risque sanitaire)
<b>3. Bétoire située en aval de l’ouvrage hydraulique</b>		- contexte de rejet d’un bassin de rétention	- risque hydrologique - risque sanitaire
<b>4. Bétoire située dans une zone sans ouvrages structurants</b>			- risque hydrologique - risque sanitaire
<b>5. Bétoire située sous ou à proximité immédiate d’une infrastructure (route, bâtiment)</b>		- la difficulté est liée à la stabilité de l’ouvrage qui doit être assurée - les eaux de qualité dégradée (proximité d’enjeu) ne doivent pas s’infiltrer vers les eaux souterraines	- risque géotechnique - risque sanitaire
<b>6. Bétoire située dans un fossé</b>		- bétoires soumises à de forts débits, contexte érosif, forts ruissellements - les eaux sont concentrées et plus ou moins turbides	- risque hydrologique - risque sanitaire
<b>7. Bétoire localisée dans ou proche d’une rivière</b>		- bétoires subissent un flux continu, fonctionnement permanent de la bétoire - participation potentielle de ces bétoires en soutien aux débits des sources situées à l’aval - contexte érosif des cours d’eau	- risque hydrologique - risque sanitaire

Illustration 19 : Tableau présentant les sept contextes identifiés dans lesquels peuvent se situer les bétoires et dont les caractéristiques influencent le choix de l’aménagement

Le critère « Type d’aménagement de la bétaire » recense les principales catégories d’aménagement rencontrées sur le terrain et dans les rapports :

Dispositifs étanches :

- colmatage étanche,
- dérivation totale des flux autour et en aval de la bétaire (noue, merlon) avec ou sans remblaiement de la bétaire.

Dispositifs infiltrants :

- bétaire laissée en l’état,
- remblaiement grossier pour bloquer la suffosion de la bétaire,
- comblement de la bétaire par mise en place d’un massif filtrant,
- aménagement de la bétaire en puits d’infiltration,
- dérivation partielle des flux autour et en aval de la bétaire (débit de fuite s’infiltrant dans la bétaire : exemple merlon avec un débit de fuite vers la bétaire).

Ces modes de traitement sont abordés dans le chapitre 4. L’état de l’art et les retours d’expérience concernant les aménagements rencontrés en Haute-Normandie sont détaillés dans les § 4.1 et 4.2. A partir de cela, les préconisations plus générales qui en découlent sont synthétisées dans le § 4.3.

Enfin le dernier critère « Type d’aménagements de versant » concerne les aménagements complémentaires réalisés sur le bassin versant en amont ou en aval de la bétaire :

- L’hydraulique douce (bandes enherbées, noues, fascines, talus, bois billonnés,...) permet de limiter les ruissellements en amont et d’améliorer la qualité de l’eau ruisselante.
- L’hydraulique de rétention (bassin de stockage, prairie inondable avec une digue,...) permet de contrôler les débits de ruissellement (contrôle des débits de fuite), d’abattre les charges de matières en suspension, de décanter.

La problématique des aménagements de versant est abordée dans le chapitre 5.

Les résultats de cet inventaire sont présentés à la fois dans les paragraphes 4.1, 4.2 et 5.1. L’Annexe 6 présente de manière détaillée les différents types d’aménagements recensés en Haute-Normandie. Ils sont regroupés par contexte de bétaire.



## 4. Les techniques existantes de traitement de bétaires

Ce chapitre s’intéresse seulement aux techniques existantes pour traiter la bétaire, stricto sensu. L’aménagement global (bétaire et gestion des écoulements) qui dépend étroitement du contexte global et des objectifs hydrologiques, ne sera évoqué que dans le chapitre suivant.

### 4.1. DESCRIPTION DES DISPOSITIFS RENCONTRES (ETAT DE L’ART)

L’inventaire des aménagements recensés en Haute-Normandie (aménagements en projet ou réalisés ; présentés en Annexe 6) a mis en évidence plusieurs types de traitement de bétaire actuellement utilisés. Les paragraphes ci-dessous reprennent les principales caractéristiques techniques des dispositifs rencontrés, sans les corréler, dans cette première phase, à leur contexte. Ceci permet d’avoir un panel de ce qui est actuellement proposé, ce qui constitue dans une première approche, un éventail de dispositifs pour les bureaux d’études confrontés à cette problématique.

Aménagement de bétaire stricto sensu	Nombre de cas recensés	Proportion (en %)
Colmatage étanche	37	48
Dérivation totale des flux	28	36.4
Remblaiement grossier pour bloquer la suffosion	2	2.6
Comblement par massif filtrant	6	7.8
Aménagement en puits d’infiltration	2	2.6
Dérivation partielle des flux	2	2.6
<b>TOTAL</b>	<b>77</b>	<b>100 %</b>

*Illustration 20 : Résultat du recensement des différents types de traitement de bétaire (réalisés dans les « règles de l’art »)*

#### 4.1.1. Descriptifs des dispositifs infiltrants existants

**Ces dispositifs ont comme objectif de maintenir le potentiel infiltrant de la bétoire et ou de bloquer son évolution.**

Tous ces dispositifs infiltrants sont parfois accompagnés d’aménagements de versant en amont, ayant pour but d’améliorer la qualité de l’eau avant infiltration dans la bétoire (hydraulique douce, hydraulique de rétention,...). Cependant il a été observé des cas où des aménagements infiltrants étaient prévus pour des eaux dont la qualité était dégradée (sortie de STEP, eaux de stabulation...).

##### ***Mise en place d’un massif autobloquant***

**Ces dispositifs ont simplement comme objectif de bloquer l’évolution de la bétoire.**

Ce dispositif consiste à combler la bétoire de matériaux grossiers (gros blocs, gros silex, galets). L’emploi de ces massifs autobloquants a pour objectif le blocage de la suffosion de la bétoire. Le pouvoir filtrant de ce dispositif est très limité.

Ce dispositif est peu utilisé, il a été recensé à seulement deux reprises : sur la bétoire de Cocusseville à l’aide d’enrochements grossiers (diapo 28 de l’Annexe 6) et sur celle d’Ecuquetot, à l’aide d’un rideau de palplanches (diapo 41 de l’Annexe 6).



*Illustration 21 : Exemple d’un aménagement d’une bétoire par mise en place d’enrochements*

##### ***Mise en place d’un massif filtrant***

Les dispositifs avec un remplissage grano-classé permettent de constituer un filtre avant que les eaux de surface n’atteignent les conduits karstiques (cf. fiches en

Annexe 10). Ce dispositif est généralement constitué de matériaux grossiers en fond de comblement, puis de matériaux plus fins vers la surface (« sable », « gravier calibré »).

A la base du massif filtrant proprement dit, certains dispositifs intègrent un radier en béton perforé (exemple de la bétoire Fosse Cossex, diapo 24 de l’Annexe 6), ou une géogrille (exemple de la bétoire Le Noyer, diapo 30 ou de la bétoire à Goderville, diapo 31 de l’Annexe 6), pour maintenir la stabilité d’ensemble sans gêner l’infiltration. Dans les deux cas, un géotextile complémentaire empêche l’écoulement des matériaux fins en profondeur. Un des aménagements propose que le géotextile enveloppe l’intégralité du massif filtrant de surface, ce qui permet de limiter les colmatages, d’optimiser la capacité filtrante du massif et de permettre un remplacement du filtre plus aisé.

Six dispositifs de type massif filtrant ont été recensés dont la bétoire Fosse Cossex, diapo 24 de l’Annexe 6, la bétoire Le Noyer, diapo 30 de l’Annexe 6, et la bétoire de la Haye, diapo 29 de l’Annexe 6).

### ***Transformation de la bétoire en puits d’infiltration***

Ce dispositif consiste à drainer l’eau par la bétoire tout en maintenant sa pérennité par un cuvelage latéral.

La bétoire est purgée et un cuvelage, généralement en béton, est mis en place. Un des aménagements propose un cuvelage en béton avec anneau anti-renard. Dans les exemples rencontrés, ce cuvelage est ancré en fond de fouille, sur une dalle en béton ou directement dans la craie saine. Un remplissage par des matériaux grossiers ou filtrants est ensuite réalisé, soit à l’intérieur, soit autour du cuvelage.

Deux dispositifs de type puits filtrant ont été actuellement recensés (le bassin à Ethainus, diapo 23 de l’Annexe 6, et la bétoire 21 à Bosc Bénard Crescy diapo 35 de l’Annexe 6).

### ***Ceinturage de la bétoire par un merlon avec un débit de fuite***

Ce dispositif consiste à mettre en place un merlon de ceinturage constitué de matériaux étanches, autour de la bétoire. Le merlon est traversé par un ou plusieurs tuyaux assurant l’entrée des eaux extérieures avec un débit contrôlé. Le débit s’infiltrant dans la bétoire est donc limité/contrôlé par le diamètre de la canalisation (exemple du bassin de lagunage de Criquetôt l’Esneval, diapo 10 de l’Annexe 6).

La bétoire elle-même est comblée de matériaux filtrants (exemple du bassin de lagunage de Criquetôt l’Esneval, diapo 10 de l’Annexe 6) ou laissée à l’état naturel.

#### **4.1.2. Descriptifs des dispositifs colmatants existants (comblement étanche de la bétoire)**

Ces dispositifs ont comme objectif d’une part d’empêcher l’infiltration des eaux de surface de qualité dégradée vers les eaux souterraines et d’autre part de maintenir la stabilité de la surface. L’un et l’autre étant liés.

La majorité des aménagements recensés en Haute-Normandie appartiennent à cette catégorie. Trois systèmes d’étanchéification se distinguent. Des systèmes de comblement du fond de la bétoire, de géogrille et de couverture végétale sont également discutés ci-après.

##### **a) Système d’étanchéification par couches d’argiles compactées**

Ce type de comblement est constitué d’une superposition de couches d’argiles compactées, avec parfois en fond de fouille une géogrille pour assurer la stabilité. Certains aménagements à enjeux (sous une digue) préconisent une superposition de trois couches d’argile compactées et de trois géogrilles (bassin de Blacqueville, diapo 13, Annexe 6). Certains dispositifs prévoient, au milieu du comblement entre deux couches d’argile, un complexe bentonitique pour améliorer l’étanchéité :

- étanchéification au fond du massif argileux (exemple du bassin de la côte du Gourney, diapo 8, de la bétoire d’Ecrainville, diapo 18 et de la bétoire de Goderville, diapo 31 de l’Annexe 6)
- une nappe bentonitique, au sommet du massif argileux, à la base de la digue du bassin de Blacqueville (diapo 13 de l’Annexe 6).

Pour assurer l’impermeabilité, il est souvent évoqué des argiles compactées, sans préconisation complémentaire. Quand il existe des précisions sur les conditions d’impermeabilité, il peut s’agir de :

- « *argile entièrement purgée de ses silex* »,
- « *limons argileux A2, à moins de 15% > 400 µm, compactés à 95% de l’OPN<sup>2</sup>* », surmonté du même niveau, compacté à 98,6 % de l’OPN avec un traitement à la chaux-ciment par sécurité, pour servir de dalle de répartition si la bétoire se réactive (la bétoire de l’Hôtellerie, RN 13, diapo 39 et le bassin du Saussay, diapo 7 de l’Annexe 6).
- « *argile purgée, de faible perméabilité (coefficient < 10<sup>-6</sup>m. s<sup>-1</sup>), compactée par couches de 20 à 30 cm* » (exemple du bassin à Ethainus, diapo 16, et de la bétoire d’Ecrainville diapo 18 de l’Annexe 6).

---

<sup>2</sup> L’*Optimal Proctor Normal (OPN)* est la teneur en eau pour laquelle le compactage conduit à une masse volumique sèche (ou un poids volumique) maximum

- « une couche imperméable ( $k = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ ) sur 1 m d'épaisseur » (Bretteville du Grand Caux, diapo 9 de l'Annexe 6).

### **b) Système d'étanchéification par comblement par du béton fluide**

L'utilisation de béton fluide pour combler la bétoire, peut permettre d'assurer la stabilité de la bétoire tout en limitant la perméabilité. Cependant, ce dispositif n'est pas imperméable et doit, de toutes manières, être complété par un matériau étanche complémentaire. L'utilisation de béton fluide en domaine karstique est risqué (risque de perte du béton dans le milieu).

Deux aménagements de ce type prescrivent l'utilisation :

- d'un béton dosé à  $250 \text{ kg/m}^3$  sur 1 m d'épaisseur (bétoire du Bassin du Saussay (diapo 7 de l'Annexe 6),
- de béton fluide à faible « slump » (5 à 7 cm d'affaissement au cône) (la bétoire de l'Hôtellerie, RN 13, diapo 39 de l'Annexe 6)

### **c) Système d'étanchéification par granulométrie décroissante**

La bétoire est purgée, puis comblée de matériaux de granulométrie décroissante avec une couche d'argile (ou membrane imperméable) au sommet : blocs de silex, puis graviers, sables, argiles. Des feutres non tissés sont mis en place pour éviter le mélange des matériaux de granulométrie différente.

Exemple de préconisation du granuloclassement :

- gros blocs, 40 – 60 mm, 5 – 15 mm et 0 – 5 mm (Exemple de la bétoire de la Croix Rouge, diapo 40, Annexe 6) avant un feutre non tissé et de l'argile ;
- blocs de silex 30 x 40 cm, graviers, sables (Exemple de la bétoire à Coulonges, diapo 49 de l'Annexe 6) avant un feutre non tissé pour éviter les mélanges et une membrane imperméable (pour remplacer l'argile), séparée par du sable.

### **Comblement du fond de la bétoire**

Sous le complexe étanche, plusieurs solutions de comblement du conduit en connexion avec la craie, sont proposées :

- par du gravier calibré surmonté d'une géogrid (bassin à Thomer la Sogne, diapo 6 de l'Annexe 6) ;
- par du matériau calibré, appelé « amortisseur » (sable argileux 0/40) surmonté d'une géogrid (bassin du Val des Francs, diapo 5 / bassin à à Ethainus, diapo 16 / bassin à Ecrainville, diapo 18 de l'Annexe 6) ;

- par un massif autobloquant (bassin des Hauts de Saint Michel, diapo 15 de l'Annexe 6) ;
- par du béton fluide à faible slump (5 à 7 cm d'affaissement au cône) (bétoire de l'Hôtellerie, RN 13, diapo 39 de l'Annexe 6) ;
- d'un béton dosé à  $250 \text{ kg/m}^3$  sur 1 m d'épaisseur (bétoire du bassin du Saussay (diapo 7 de l'Annexe 6) ;
- par « *des gros silex à granulométrie comprise entre 20 et 50 cm* » (bétoire 1 au Petit Moulin, diapo 48 / bétoires 2 et 3 du Petit Moulin, diapo 32 de l'Annexe 6) ;
- par une cimentation du puits de la bétoire au fond, au niveau du toit de la craie (Bretteville du Grand Caux, diapo 9 de l'Annexe 6).

## **Géogrille**

Les géogrilles sont utilisées la plupart du temps à la base du massif argileux, quelques fois intercalées entre chaque niveau de fouille (pour supporter le poids du remplissage) (Ecrainville, diapo 18 / Ethainus, diapo 16 de l'Annexe 6). Certains bureaux d'études proposent la mise en place de géogrilles « dans les deux directions » de la fouille (horizontale et verticale) (la bétoire de l'Hôtellerie, diapo 39 de l'Annexe 6).

Les caractéristiques des géogrilles rencontrées :

- géogrille à 35 DaN (bassin de Blacqueville, diapo 13 de l'Annexe 6) ;
- géogrille type Huesker Fornit 20/20 (bétoire d'Ecrainville, diapo 18 de l'Annexe 6) ;
- géogrille de résistance 100 kN /m (bétoire de l'Hôtellerie, RN 13, diapo 39 de l'Annexe 6).

## **Couverture végétale**

La couverture végétale est généralement recommandée au sommet de l'aménagement (compresse humide) afin de maintenir l'humidité et ainsi lutter contre la dessiccation du complexe argileux. Ceci permet également de maintenir l'efficacité du complexe bentonitique, s'il existe.

### **4.1.3. Dérivation totale des flux (noue, merlon)**

D'autres dispositifs consistent simplement à empêcher l'infiltration des eaux de surface dans la bétoire. Différents procédés de détournement des eaux sont utilisés :

- Un merlon de ceinturage étanche autour de la bétoire, de 0,5 m de hauteur (bassin de Blacqueville, diapo 11 de l'Annexe 6) ;
- Des noues enherbées contournant la bétoire, elle-même protégée par un talus (Saint Helier, diapo 19 / Saussay, diapo 20/ Saint Paer, diapos 21 et 22 / Saint Helier, diapo 34 de l'Annexe 6) ;
- Un auget (bétoire à Boscherons, diapo 47 de l'Annexe 6) ;
- Un busage en béton (forme trapézoïdale) dans l'axe des zones de pertes (bétoire à Criquetot l'Esneval, diapo 43 de l'Annexe 6) ;
- Une canalisation dans l'axe du fossé au-dessus d'une bétoire obturée par une dalle de béton (bétoire de la Croix Blanche, diapo 44 de l'Annexe 6).

#### **4.1.4. Descriptifs des purges avant traitement**

Enfin une variabilité importante dans les pratiques de purge (excavation réalisée au niveau de la bétoire avant son comblement) est observée concernant :

- Sa géométrie : excavation cylindrique, rectangulaire ou en paliers de diamètres décroissants ;
- Son emprise : variant de 1 m à 10m autour de la bétoire ; des préconisations font état d'un diamètre d'excavation de 3 à 5 fois celui de la bétoire ;
- Sa profondeur : variant de 2 à 5 m en général et dans de rares cas pouvant atteindre 10 mètres. Des préconisations font état d'une profondeur d'excavation atteignant l'interface argile à silex/craie ou à minima 10 mètres.

Une emprise et une profondeur insuffisantes de purge de la bétoire peuvent conduire à une mauvaise tenue de l'aménagement (réouverture précoce de la bétoire) (cf. cas du bassin de Manéglise présenté dans le § 4.2.1).

#### **4.1.5. Aménagements particuliers rencontrés**

Parmi cette variété d'aménagement rencontrée, plusieurs particularités méritent d'être soulignées :

- la pose d'un témoin sur la zone traitée afin de pouvoir localiser l'ouvrage et suivre son évolution (Bassin du Val des Francs, diapo 5, Bassin à Ethainus, diapo 16 de l'Annexe 6) ;
- l'édification de pieux d'ancrage en ciment (forage + injection de ciment liquide) sur lesquels est fixé un géotextile surmonté de matériaux filtrants (bassin à Thomer la Sogne, diapo 6 de l'Annexe 6) ;

- dans le cas d'enjeu en surface (chaussée ou ouvrage hydraulique), le traitement de la couche limoneuse-argileuse, la plus superficielle, à la chaux-ciment par sécurité, pour servir de dalle de répartition si la bétôire se réactive, en complément de comblement déjà pérenne (bétôire de l'Hôtellerie, RN 13, diapo 39 et bassin du Saussay, diapo 7 de l'Annexe 6) ;
- la consolidation du terrain autour de la bétôire (cas de terrains alluvionnaires surmontant la craie karstifiée), par injection de ciment à faible pression (bétôires 1, 2 et 3 au Petit Moulin, diapo 48 et 32 de l'Annexe 6) ;
- le comblement à double casier : un lit d'argile côté rivière pour limiter les infiltrations latérales et un massif de graviers filtrant côté berge pour drainer les infiltrations verticales.

## 4.2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR CES DISPOSITIFS

Les aménagements rencontrés sont très variés et il existe peu de recul concernant leur efficacité. Très peu de dossiers de récolement, ou autre document permettant de connaître les aménagements finalement réalisés, ont pu être collectés au cours de la phase de recueil de données. Il est donc difficile de valoriser les retours d'expérience dans ce cas. Nous avons tenté de valoriser ici tous ce qui pouvait se rapporter à un retour d'expérience sur les aménagements réalisés.

### 4.2.1. Dysfonctionnement observés de certains dispositifs

Au cours de cette étude, plusieurs contrôles terrain ont été réalisés sur des aménagements de bétôires dont les plans avaient été retrouvés. Deux journées ont été réalisées en mars/avril 2010 ainsi que quelques contrôles dans le cadre de l'inventaire bétôires/traçages. Pour chaque aménagement observé, une fiche signalétique, rappelant l'objectif de protection, le contexte, l'aménagement prévu, les observations terrains, a été établie (cf. fiches en Annexe 7).

Nous avons constaté, sur le terrain, que certains aménagements s'étaient dégradés.

**Cas 1 - Sur la commune de Plainville (27)**, au lieu-dit la Croix Blanche, deux bétôires se sont ouvertes dans un fossé, absorbant les eaux de ruissellement et les eaux agricoles. Dans la fin des années 1990, ces bétôires ont été comblées par du gravier, recouvertes d'une dalle béton sur laquelle repose une canalisation de 800 mm de diamètre qui avait pour but de buser le fossé au-dessus de la bétôire colmatée pour éviter toute infiltration. Lors de la visite de terrain du 26 mars 2010, plusieurs affouillements ont été observés au niveau de la canalisation, le regard (composé de plusieurs anneaux en béton empilés sur une hauteur de 1,9 m environ) s'est effondré et laisse apparaître au fond un treillis en fer (la dalle en béton s'est probablement rompue). Aucun entretien n'a été effectué, le regard est caché sous la mousse et le fossé est envahi par les ronces. Cette déstructuration est probablement liée aux infiltrations d'eau venant des directions perpendiculaires au fossé qui ont réactivé la bétôire (affouillements visibles).

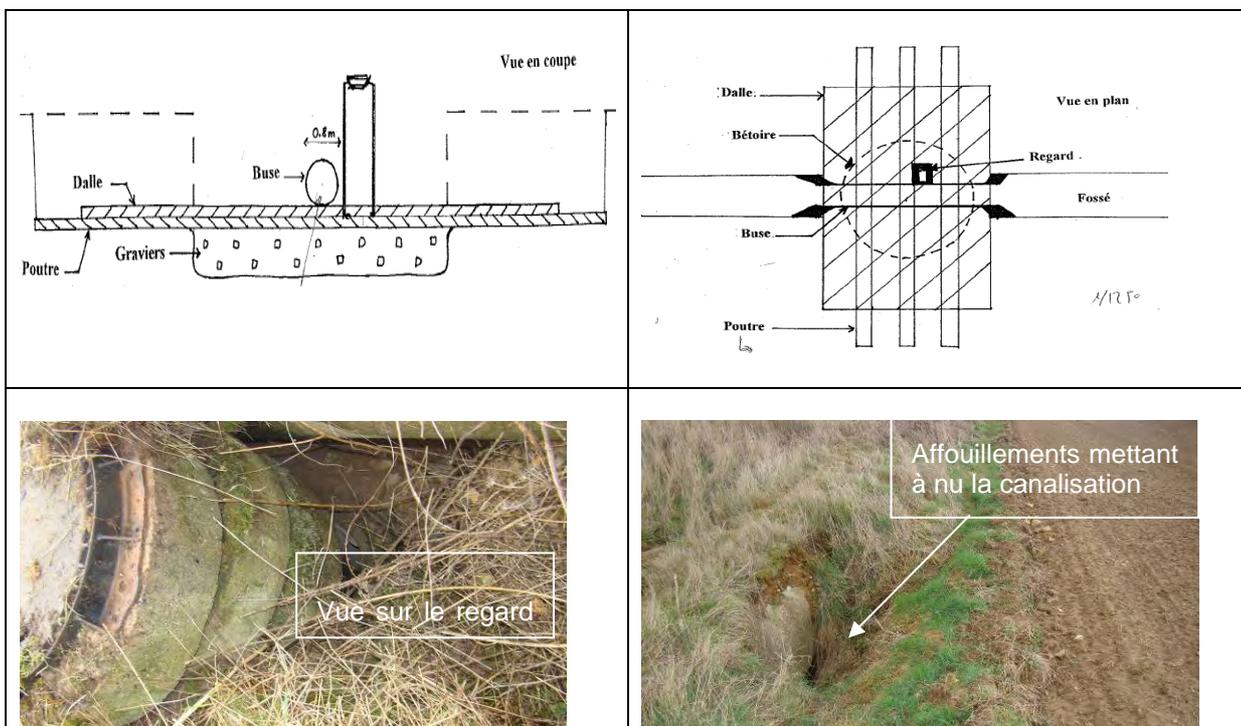


Illustration 22 : Schémas de l’aménagement réalisé sur la bétairie « Croix blanche » à Plainville et photos des dysfonctionnements observés en avril 2010

Type d’aménagement initial : comblement par gravier surmonté d’une dalle de béton et d’un drainage des flux unidirectionnel

Défaillance observée : rupture de la dalle de béton

Diagnostic envisagé : réactivation de la bétairie et/ou mauvais dimensionnement de la dalle de béton. Infiltrations d’eaux venant des directions perpendiculaires au réseau de drainage mis en place dans le fossé ou transitant par le massif de gravier sous-jacent.

**Cas 2 - Sur la commune de Tôtes (76)**, un effondrement est survenu dans le fossé situé à l’ouest de la chaussée, dans une partie en déblai de la route RN27, dans le sens Dieppe-Rouen en décembre 2000. A l’issue du curage, la bétairie a été comblée par un coulis de béton déversé en gravitaire mais le fossé n’a pas été étanchéifié. Un nouvel effondrement est apparu en 2010, à l’amont du premier (sous le bouchon de béton). Il est prévu une excavation pour observer l’effondrement plus en profondeur. Puis en fonction de la configuration des vides en profondeur, un bouchage au béton sera réalisé pour les parties éventuellement peu accessibles (sous le bouchon de béton ou sous la route) et les zones accessibles seront comblées avec de l’argile. Il est également prévu d’étanchéifier le fossé sur 10 m à l’amont et à l’aval de l’effondrement avec des cunettes béton.

Type d'aménagement initial : coulis béton (type : Colmatage étanche)

Défaillance observée : effondrement sous le bouchon béton

Diagnostic envisagé : accentuation de la bétoire sous le bouchon béton.

**Cas 3 - Sur la commune de Criquetôt l'Esneval (76)**, une bétoire s'est ouverte dans un fossé. Des cunettes béton (de forme trapézoïdale) ont été mises en place au niveau des zones de perte. Avec le temps, les buses ont été déstructurées et des affouillements apparaissent sous les cunettes. Ces affouillements sont liés à la concentration des ruissellements et à une emprise des cunettes insuffisante conduisant à la reprise de l'infiltration des eaux vers la bétoire.



*Illustration 23 : Photos des disfonctionnements observés en avril 2010 sur l'aménagement des bétoires situées dans un fossé à Criquetôt l'Esneval (Source : photos BRGM)*

Type d'aménagement initial : cunette béton (Type : Dérivation totale des flux)

Défaillance observée : affouillement de la cunette

Diagnostic envisagé : mauvais dimensionnement de la cunette. Absence d'imperméabilisation du fossé

**Cas 4 - Sur la commune d'Ouville l'Abbaye (76)**, N. Topin (Topin, 2001) cite l'exemple d'un merlon de ceinturage sommaire mis en place autour d'une bétoire ouverte dans le 3ème bassin de lagunage naturel. Quelques années plus tard, le merlon s'est totalement affaissé et d'autres bétoires se sont ouvertes aux alentours (Illustration 24).



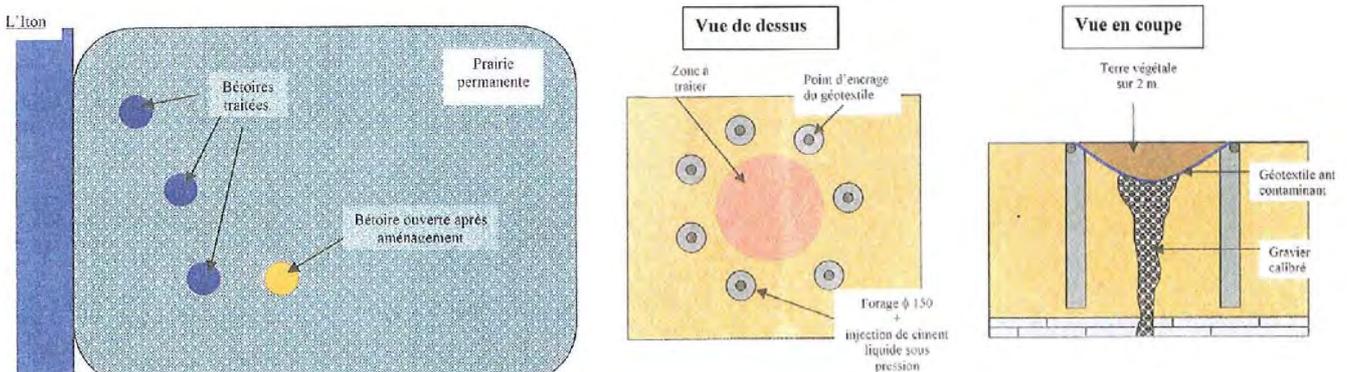
Illustration 24 : Champs de bétôires dans la 3ème lagune d’Ouville l’Abbaye (extrait du rapport de N. Topin, 2007)

Type d’aménagement initial : merlon de ceinturage (Type : Dérivation des flux)

Défaillance observée : déstructuration du merlon et nouvelle bétôire

Diagnostic envisagé : accentuation et apparition des bétôires probablement provoquée par le lagunage. Inadaptation de l’aménagement ponctuel par rapport à l’étendue de l’activité karstique du secteur.

**Cas 5 - Sur la commune de Thomer-la-Sône (27)**, trois bétôires situées dans une prairie permanente ont été colmatées (Illustration 25) (gravier calibré recouvert d’un géotextile anticontaminant ancré sur des pieux en béton, puis terre végétale). Peu après cette intervention, une nouvelle bétôire s’est ouverte révélant que de tels travaux n’étaient pas adaptés.



(D’après le mémoire de maîtrise en géologie de F. LEMENEZ (1999))

Illustration 25 : Cas des bétôires de la commune de Tomer-la-Sône (extrait du rapport de N. Topin, 2007)

Type d'aménagement initial : gravier calibré recouvert d'un géotextile anticontaminant ancré sur des pieux en béton, puis recouvert de terre végétale (Type : Comblement)

Défaillance observée : ouverture d'une nouvelle bétoire à proximité

Diagnostic envisagé : aménagement individuel non remis en question pour l'instant. Inadaptation des aménagements ponctuels par rapport à l'étendue de l'activité karstique du secteur.

**Cas 6 - Sur la commune de Manéglise (76)**, une bétoire s'est ouverte au fond du bassin. Elle a été comblée (pas de plan de récolement, date de comblement inconnue) mais s'est réouverte. La bétoire a donc été recombée (date inconnue) en réalisant une purge des matériaux hydromorphes sur une emprise plus importante. Actuellement (avril 2010) ce deuxième colmatage tient toujours. La bonne tenue du deuxième colmatage peut être expliquée par une emprise plus importante de la purge autour de la bétoire.

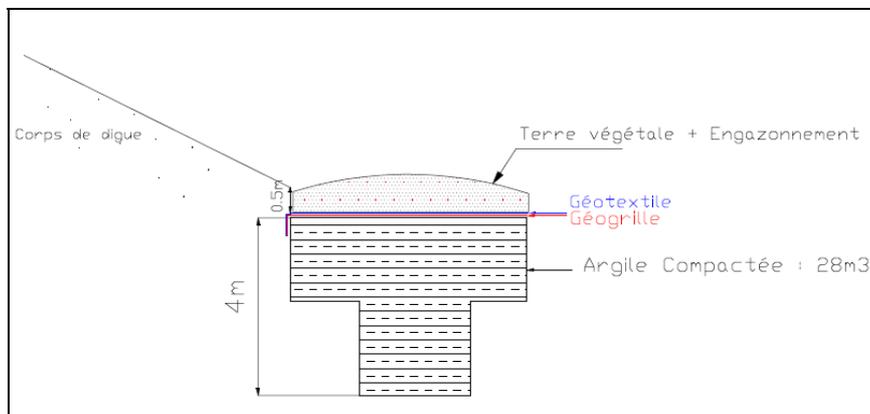


Illustration26 : Schéma du 2<sup>nd</sup> comblement de la bétoire du bassin de Manéglise (Source : CODAH)

Type d'aménagement initial : colmatage (non détaillé)

Défaillance observée : déboufrage du comblement

Diagnostic envisagé : diagnostic du maître d'ouvrage : emprise de la purge initiale insuffisante

**Cas 7 - A Saint Jouin de Bruneval**, une bétoire a été comblée de gros galets pour bloquer son évolution et permettre l'infiltration d'eau (sans système de filtration). En 2003, d'après les témoignages recueillis, la bétoire se serait colmatée provoquant des inondations. Les eaux d'engouffrement chargées ont provoqué ce colmatage.

Type d'aménagement initial : comblement par gros galets pour bloquer la suffosion (Type : Dispositif infiltrant)

Défaillance observée : colmatage du dispositif drainant

Diagnostic envisagé : colmatage du dispositif drainant lié à des eaux d'engouffrement trop chargées

Par ailleurs, plusieurs **exemples d’aménagement en béton ont montré une efficacité limitée** :

- **Cas 8** : Le sommet de la bétaire est colmaté par une dalle béton : les infiltrations reprennent autour de la plaque béton, des affouillements se forment et la plaque rompt (Illustration 28),
- **Cas 9** : Ouverture d’une bétaire en 2008 au point d’entrée de l’aire d’infiltration de la STEP de Saint Germain les Essourts (76) sous la dalle béton anti-affouillement (Illustration 29).
- **Cas 10** : Mise en place d’avaloir des eaux de ruissellement en lieu et place d’une bétaire afin de détourner les eaux de ruissellement vers le réseau d’eau pluvial. L’exemple de la bétaire du rond point de la Vatine à Mont Saint Aignan (76), montre que les infiltrations dans la bétaire ont repris autour de l’avaloir provoquant un nouvel effondrement (Illustration 27).



*Illustration 27 : Bétaire n°9816 aménagée par un avaloir en béton amenant les eaux de ruissellement vers le réseau d’eau pluvial. La bétaire s’est réouverte au droit de l’avaloir, photo du 17/07/09*

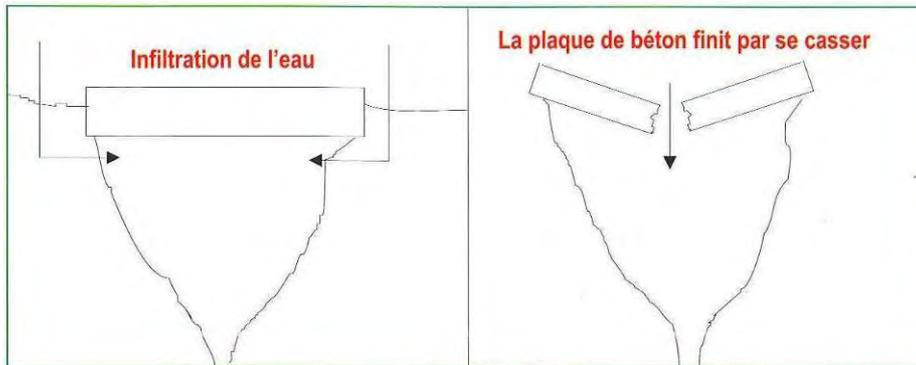


Illustration 28 : Exemple type d'aménagement d'une bétoire par la mise en place d'une plaque béton au sommet du colmatage (extrait de la plaquette du pôle de compétence Sol et Eau Haute Normandie)

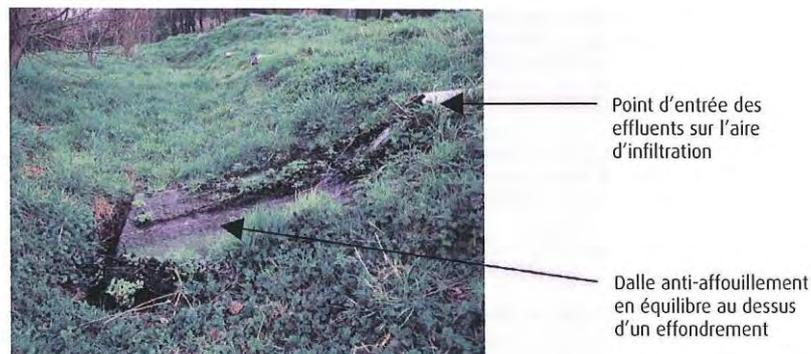


Illustration 29 : Ouverture d'une bétoire en 2008 au point d'entrée de l'aire d'infiltration de la STEP de Saint Germain les Essourts (photo extraite du guide de la DISE de décembre 2009 concernant les Aires d'infiltration).

#### 4.2.2. Synthèse des dysfonctionnements techniques observés

La plupart des aménagements qui ont montré des défaillances, sont soumis à des charges hydrauliques ou à une concentration d'écoulements (fossé), de part leur fonction hydraulique qui doit pouvoir participer à expliquer le dysfonctionnement observé. Cependant, il faut rappeler que l'apparition d'une bétoire crée, de manière quasiment irréversible, un drain dans la couverture superficielle, mettant en contact les eaux superficielles avec le substratum karstifié. Ceci n'est que l'illustration d'un phénomène qui ne peut qu'être amené à se développer. L'aménagement de la bétoire n'est pas systématiquement responsable de la réactivation ou de l'ouverture d'une bétoire à proximité.

La plupart du temps, la réactivation d'une bétoire est accentuée par des infiltrations superficielles. Quand le dispositif n'est pas prévu pour drainer ces infiltrations, il est probable que ces écoulements :

- participent à accentuer l'emprise de la bétaire et donc à réduire la portance du dispositif et à affaiblir l'ancrage (affouillement de dalle), pouvant entraîner la rupture de l'obturation (dalle de béton (Cas 1, Cas 8), coulis de béton (Cas 2) ;
- accentuent les départs des matériaux, ce qui entraîne une réouverture de l'effondrement par écoulement des matériaux (Cas 6).

Certains dispositifs sont conçus pour maintenir l'infiltration. Les défaillances associées sont le colmatage du dispositif drainant par la concentration des écoulements (Cas 7) ou des effondrements sur le parcours des eaux drainées (Cas 10).

Ainsi, la réactivation de la bétaire est souvent due à une mauvaise gestion des infiltrations superficielles. La cunette en béton (Cas 3) ou la canalisation (Cas 1) drainent les eaux superficielles dans une direction préférentielle et limitent ainsi l'infiltration verticale, mais ne tiennent pas compte des écoulements latéraux, qui peuvent atteindre la bétaire via un cheminement superficiel ou hypodermique. Ainsi, **une gestion globale des écoulements dans les circulations superficielles s'avère indispensable, notamment pour tenir compte d'éventuels paléo-chenal ou d'horizons stratigraphiques plus perméables.**

L'étendue de l'activité karstique est difficilement décelable avant les manifestations de surface. Dans le cas 4 et le cas 5, si la fonction hydraulique de l'endroit (bassin de lagunage, prairie permanente), semble avoir accéléré l'apparition de nouvelles bétaires, l'activité karstique était, dans tous les cas, étendue et déjà développée.

### **4.3. PRECONISATIONS TECHNIQUES DES TRAITEMENTS ENVISAGEABLES**

Les aménagements portant dans la quasi-totalité des cas sur les formations de recouvrement de la craie (formations meubles) qui sont hétérogènes à l'échelle de la Région (d'un point de vue géotechnique et hydrogéologique), chaque aménagement devra être dimensionné au vu des résultats de l'étude préalable présentée dans le chapitre 6.

Les éléments présentés ci-dessous sont donc des remarques générales concernant les techniques de traitement des bétaires, selon l'objectif visé : la stabilité, l'imperméabilisation de l'écoulement, l'infiltration des eaux avec ou non filtration.

#### **4.3.1. Géosynthétiques utilisés**

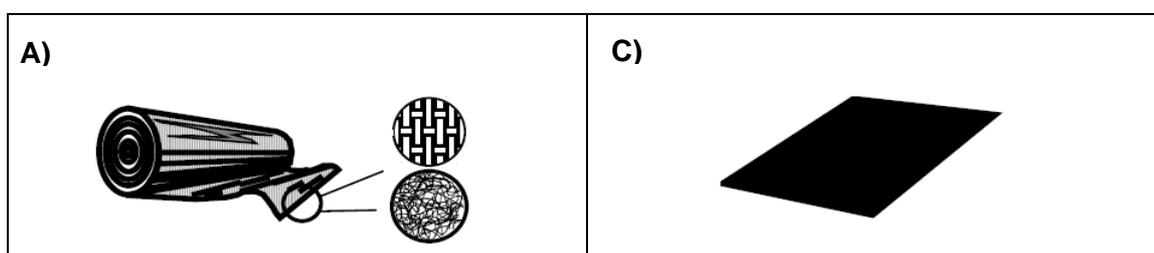
D'après les descriptions de l'existant (cf. § 4.1), les aménagements ont souvent recours à des géosynthétiques pour compléter le dispositif mis en place.

Les géosynthétiques sont des produits dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle. Ils peuvent être produits à partir de différents polymères, le polyester (PET) (faible allongement lié à une grande résistance à la traction), le

polyvinyle alcool (PVA) (allongement extrêmement bas et une excellente résistance chimique), le polypropylène (PP) (très bonne résistance chimique avec un allongement acceptable) ([www.geotextiles-geogrilles.fr](http://www.geotextiles-geogrilles.fr)).

Dans le cadre de l'aménagement d'une bétoire, différents types de géosynthétiques peuvent être utilisés selon les objectifs visés. La clarification terminologique présentée ci-dessous est issue de la classification établie par l'IGS<sup>3</sup> :

- pour éviter les mélanges des matériaux de granulométrie différente :
  - o des géotextiles : nappes continues de fibres ou filaments tissés, non tissés, tricotés ou thermo-soudés. Ces matériaux sont souples et perméables.
  
- pour assurer une étanchéité complémentaire à celle des argiles :
  - o des géomembranes : nappes souples continues fabriquées à partir d'un ou plusieurs matériaux synthétiques
  - o des géosynthétiques bentonitiques (GSB) : association d'une couche de bentonite incorporée entre deux géotextiles ou collée à une géomembrane.
  
- pour assurer un renforcement des sols :
  - o des géotextiles tissés
  - o des géogrilles : géosynthétique ressemblant à des grilles, constituées par un réseau ouvert et régulier d'éléments résistants à la traction et pouvant être assemblés par extrusion, collage ou entrelacement. La grandeur des mailles varie généralement de 1 et 10 cm pour permettre l'imbrication de ces constituants dans la géogrille.



<sup>3</sup> La Société Internationale des Géosynthétiques - International Geosynthetic Society (IGS), [www.geosyntheticssociety.org](http://www.geosyntheticssociety.org) – est une association à but non lucratif dédiée au développement scientifique et technique des géotextiles, géomembranes, produits apparentés et technologies associées.

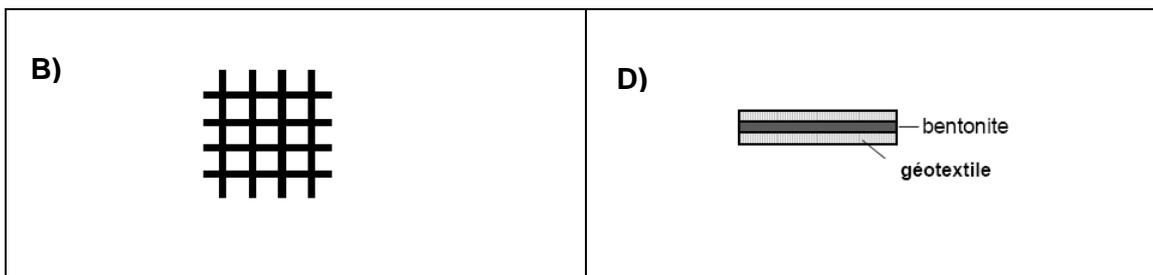


Illustration 30 : Géosynthétiques utilisés pour des aménagements de bétoires. A) géotextile. B) Géogrille, C) Géomembrane. D) Géosynthétiques bentonitiques. Source : Fiche IGS « classification des géosynthétiques », Bathurst R.J.

### 4.3.2. L’excavation (purge) de la bétoire

La stratégie de traitement de la bétoire nécessite la connaissance de sa morphologie et de son fonctionnement hydrologique (cf. résultat des études préalables : § 6).

Dans le cas général, afin de mettre en place un dispositif étanche ou filtrant, il faut envisager d’une part de décaisser les formations superficielles sur une extension et une profondeur suffisante et d’autre part, de curer le corps de la bétoire des matériaux de remplissage. L’idéal étant d’atteindre la craie saine, lors du curage (voire lors du décaissage, si elle n’est pas profonde).

Ainsi il conviendrait de :

- décaper au droit de la bétoire pour localiser précisément l’emprise de l’anomalie ;
- décaisser par paliers de diamètres décroissants pour permettre d’approfondir l’excavation en profondeur et d’assurer la stabilité de la fouille ;
- ajuster l’extension de la dernière fouille à la morphologie de la bétoire. Elle doit être largement supérieure à l’ouverture de la bétoire, notamment pour assurer la portance du massif ou du géosynthétique qui sera mis en place ;
- curer les formations décomprimées résiduelles dans le corps de la bétoire. La purge doit atteindre idéalement le niveau de la craie saine. Dans le cas où cette profondeur ne pourrait être atteinte (les épaisseurs de formations superficielles peuvent atteindre plus de 20 m), l’excavation devra permettre d’évacuer la zone d’argiles affectées par l’infiltration des eaux.

Un décaissage par palier permet d’augmenter la pérennité de l’aménagement, en superposant plusieurs massifs (ou géogrilles), ancrés indépendamment les uns des autres.

### **4.3.3. Le comblement du fond de la bétoire / la stabilisation de la bétoire**

**Ces dispositifs ont comme objectif, de stabiliser à moyen terme, l'évolution de la bétoire dans la craie.**

L'apparition d'une bétoire est un phénomène naturel qui est voué à se développer. L'aménagement sera donc difficilement pérenne, mais doit pouvoir résister à moyen terme.

Pour limiter l'accentuation du phénomène, il convient :

- de confiner la totalité du corps de la bétoire (la cimentation seule de type bouchon, au niveau du toit de la craie, ne semble pas une solution pérenne, puisque l'ancrage dans la craie est voué à rompre également) ;
- de veiller à ce que le comblement puisse résister à un écoulement souterrain ;
- de limiter les écoulements superficiels qui participent à déstabiliser l'aménagement et à dégrader le massif déjà altéré.

Le confinement sera ainsi à dimensionner en fonction de la morphologie de la bétoire.

Quand la section et la profondeur sont marquées et étendues, un comblement par éléments grossiers permet de répondre aux exigences de confinement de la bétoire tout en limitant l'écoulement dans le réseau karstique. Ceci correspond au « *massif autobloquant* » évoqué auparavant. A cet effet, il convient :

- de vérifier dans un premier temps, que la bétoire soit stabilisée ;
- de remblayer par des éléments les plus grossiers possibles. Les particules fines sont à proscrire ;
- de remblayer l'excavation a minima jusqu'au dessus du toit de la craie.

Pour une bétoire dont l'extension en profondeur est particulièrement limitée (notamment quand l'entaille se réduit fortement), il peut être envisagé en dernier recours de procéder à une injection de coulis. Le principe est de faire pénétrer un produit durcissant fluide dans un milieu vacuolaire ou décomprimé, par injection sous-pression. Les préconisations des coulis injectés et des conditions d'injection sont détaillées dans la partie « remplissage des vides par injection » du guide rédigé par l'INERIS (2007) concernant le traitement des cavités anthropiques. Notons cependant que l'injection dans du karst est toujours hasardeuse et risquée (modification des écoulements souterrains), notamment puisque les écoulements sont difficilement maîtrisables. L'injection de coulis en milieu karstique doit être employée avec précaution. Si le volume estimé est dépassé d'un facteur de 1,5 à l'injection, il est recommandé d'interrompre ce type de traitement.

#### 4.3.4. Les aménagements de type étanchéification

**Ces dispositifs ont comme objectif, d'empêcher l'engouffrement d'eaux de qualité dégradée vers les eaux souterraines.**

Tout dispositif de comblement est à concevoir au regard de la lithologie de l'encaissant déterminée par l'étude préalable (cf. § 6).

L'étanchéité peut être assurée par une géomembrane ou par des argiles.

Concernant un comblement par superposition de couches d'argiles compactées les conditions de mise en place des couches (épaisseur des couches élémentaires, intensité de compactage principalement) pourront s'inspirer de la Recommandation pour les Terrassements Routiers (RTR)<sup>4</sup>. Il faudra veiller notamment à plusieurs points :

- Il est important de prévoir une scarification entre les différentes couches (compactées par couches d'environ 20 cm) ou l'utilisation d'un compacteur à pied de mouton afin d'assurer une cohésion des différentes couches et d'éviter la circulation d'eau entre les couches d'argiles ;
- La perméabilité recherchée doit être fixée en fonction de la lithologie des formations superficielles encaissantes (cf. fiche colmatage en annexe 10) ou être comprise entre  $5 \times 10^{-8}$  à  $10^{-8}$  m/s ;
- En cas d'utilisation d'argile à silex, il importe que la fraction de silex reste suffisamment faible pour que la matrice argileuse présente une bonne continuité et une perméabilité minimale ;
- Compacter à la « bonne » teneur en eau. Pour connaître la teneur en eau optimale, il convient de réaliser des essais de perméabilité à chaque point de la courbe proctor ;
- Nous recommandons d'exécuter ces travaux de compactage en période sèche

En complément, l'utilisation de géomembrane ou de géosynthétique bentonitique (GSB) permet d'améliorer l'étanchéité du massif.

Concernant la mise en œuvre de la géomembrane (étanchéité mince), un soin est à apporter à la couche support pour éviter les poinçonnements. Il faut notamment veiller à l'absence de silex à moins de 30cm sous la géomembrane.

---

<sup>4</sup> Ministère de l'Équipement, SETRA, LCPC, Janvier 1976.

Concernant le GSB, il convient cependant de s'assurer que ce géosynthétique reste humide, car la bentonite est une argile gonflante, sujet aux cycles d'humidification / dessiccation (cas notamment des bassins connaissant des à-secs), pouvant conduire à l'apparition de fissures dans les argiles. Une couverture végétale au sommet de l'aménagement (compresse humide) permet, par exemple, de maintenir l'humidité. La mise en place du complexe bentonitique est envisageable soit au fond du massif argileux, soit au sommet du massif argileux, quand les écoulements de surface doivent être parfaitement maîtrisés, pour éviter un affouillement d'ouvrage hydraulique.

Pour dimensionner ces dispositifs d'étanchéité (caractéristiques mécaniques et hydrauliques), nous recommandons de se reporter aux prescriptions techniques des Fascicule n°10<sup>5</sup> et 12<sup>6</sup> édités à ce sujet par le Comité Français des Géosynthétiques<sup>7</sup>.

Pour le cas du colmatage d'une béttoire ouverte dans une zone de recouvrement alluvionnaire, un comblement par des matériaux de granulométrie décroissante avec une couche d'argile (ou membrane imperméable) au sommet peut être envisagée (cf. fiche colmatage en Annexe 10). Dans ce cas, des feutres non tissés peuvent être mis en place pour éviter le mélange des matériaux de granulométrie différente.

L'utilisation de béton fluide pour combler le fond de la béttoire, ne permet pas d'assurer l'imperméabilité à lui-seul et doit être complétée par un matériau étanche complémentaire.

Ces aménagements de type étanchéité n'assurent pas à eux seuls la stabilité mécanique. A la base du massif étanche proprement dit, il est possible d'intégrer une géogrille (complétée par une géomembrane). La mise en place d'un radier en béton est possible mais différents retours d'expérience semblent montrer la possibilité d'une cassure du radier lors du rejeu des terrains. Il est également possible d'intercaler une géogrille entre chaque couche d'argile pour améliorer la stabilité. Le dimensionnement du dispositif stabilisateur est traité au § 4.3.7.

#### **4.3.5. Les aménagements de type infiltration**

**Ces dispositifs ont comme objectif de maintenir le potentiel infiltrant de la béttoire vers les conduits karstiques.**

L'infiltration est un dispositif de dernier recours, dans le cas où la béttoire est le seul point de rejet ou d'infiltration possible d'un bassin versant et permet de soulager la

---

<sup>5</sup> - Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par Géomembranes, 1991, Fascicule n°10. CFGG

<sup>6</sup> - Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques, 1998, Fascicule n°12. CFGG

<sup>7</sup> Le Comité Français des Géosynthétiques représente tous les secteurs d'activité liés aux géotextiles, géomembranes et produits apparentés. <http://www.cfg.asso.fr/>

charge d’eaux pluviales du secteur (lutter contre le risque d’inondation par exemple). Ce choix doit donc être justifié globalement à partir du rôle de la bétoire dans le bassin-versant. L’absence de tout exutoire devra également être justifiée. Tous ces dispositifs infiltrants doivent notamment être accompagnés d’aménagements de versant en amont, ayant pour but d’améliorer la qualité de l’eau avant infiltration dans la bétoire (hydraulique douce, hydraulique de rétention,...). Aussi, une couronne enherbée de 10 m de largeur doit systématiquement être mise en place autour de la bétoire. Ces considérations globales seront abordées dans le chapitre 5.

Concernant l’aménagement de la bétoire stricto-sensu, il est préconisé, dans la plupart des cas, de combler la bétoire par un massif filtrant afin de 1) limiter le processus de suffosion de la bétoire, 2) de jouer un rôle de filtre pour améliorer la qualité des eaux d’infiltration, 3) de réguler le débit d’infiltration.

Le système de filtre est généralement un remplissage grano-classé, constitué de matériaux grossiers en fond de comblement surmontés de matériaux plus fins, perméables (drainant) vers la surface (« sable », « gravier calibré »). Dans tous les cas, les matériaux ne doivent pas comporter de branches ou racines de gros diamètre, favorables à l’apparition de phénomènes d’érosion interne. L’épaisseur et la classe du matériau filtrant doivent être fixées pour atteindre une perméabilité en accord avec le débit d’engouffrement. Il est impératif que l’intégralité du massif filtrant soit enveloppé dans un géotextile (« chaussette » ou « portefeuille ») pour limiter les colmatages du dispositif autant en provenance d’écoulements verticaux que latéraux, et optimiser ainsi la capacité filtrante et la longévité du massif. En effet, l’inconvénient d’un « massif filtrant » est le colmatage de la partie filtrante, la plus superficielle. L’entretien est souvent impossible et lorsque le dispositif est colmaté, celui-ci doit alors être remplacé. De nouveaux dispositifs sont testés avec la possibilité de changer la granulométrie la plus fine en surface, enveloppée dans un matelas de géotextile. Le but étant de pouvoir remplacer facilement le « filtre » supérieur colmaté.

Tout dispositif de comblement est à concevoir au regard de la lithologie de l’encaissant déterminée par l’étude préalable (cf. § 6).

A la base du massif filtrant proprement dit, intégrer une géogrille permet de maintenir la stabilité d’ensemble sans gêner l’infiltration. Le choix du dispositif stabilisateur est traité au § 4.3.7.

Concernant les débits d’engouffrement, il convient, dans la mesure du possible, de les limiter au maximum ce qui permet d’augmenter la longévité du filtre et de moins compromettre la stabilité de l’aménagement. Par exemple, un système complémentaire de merlon avec débit de fuite permet de contrôler ces débits d’infiltration. En fonction de la qualité des eaux d’engouffrement (cf. résultats de l’étude préalable § 6), un dispositif de traitement des eaux doit également être mis en place en amont de la bétoire afin de pouvoir évaluer son efficacité.

#### **4.3.6. Les aménagements de type détournement de flux**

**Ces dispositifs ont comme objectif, de détourner les eaux de ruissellement pour qu’elles ne puissent s’infiltrer dans la bétoire.**

Il s’agit de dimensionner ces dispositifs de drainage en fonction du débit de ruissellement attendu et d’assurer leur étanchéité. D’autre part, comme les dysfonctionnements l’ont mis en évidence, ces aménagements doivent être couplés à une gestion globale des eaux de ruissellement. Dans tous les cas, cet aménagement ne peut être préconisé que quand la qualité des eaux de ruissellement est suffisante, pour qu’en cas de défaillance du dispositif ou d’arrivée d’eau dépassant le volume prévu, l’infiltration soit sanitaires acceptable. La localisation du détournement doit être suffisamment éloignée de la bétoire pour ne pas se trouver dans la zone d’activité karstique associée.

Dans le cas où un dispositif de type détournement des flux est mis en place autour d’une bétoire, il est conseillé de combler la bétoire par un massif autobloquant afin de limiter l’évolution de la bétoire et de protéger l’aménagement de détournement des flux. Le contrôle des écoulements superficiels, aura tendance à limiter la réactivation de la bétoire.

#### **4.3.7. Les aménagements qui améliorent la stabilité du comblement**

Pour améliorer la stabilité de l’aménagement à moyen terme, il est possible :

- d’utiliser des géosynthétiques, couplés ou non à un radier en béton armé,
- de traiter le limon-argileux à la chaux-ciment ; notons que le traitement des limons à la chaux-ciment améliore l’étanchéité mais pas la résistance du matériaux à la traction.

Certains géosynthétiques ont la propriété de participer à renforcer mécaniquement le massif en :

- améliorant la résistance à la traction des sols ;
- augmentant la portance et diminuant ainsi les charges en les redistribuant uniformément sur l’ensemble de la nappe ;
- mobilisant le frottement à l’interface sol/géosynthétique.

Deux types de géosynthétiques peuvent être utilisés à cet effet :

- les géogrilles, plus adaptées au renforcement de sols peu cohérents avec un squelette de granulométrie élevée (et notamment bien triée), comme les sables ou les graviers. En effet, c’est l’imbrication grains/grille qui participe à améliorer la cohésion d’ensemble et le frottement sol-géogrille ;
- les géotextiles tissés, plus adaptés aux sols fins et homogènes (terres, argiles, loess). Leur résistance à la rupture peut être supérieure à celle des géogrilles et ils possèdent, de plus, une importante souplesse en flexion qui leur permet de s’adapter à la présence d’éléments grossiers dans le sol (Tacnet et Gotteland, 2000).

Cependant, les géosynthétiques en polyester (PET) ne doivent pas être utilisés avec des sols calcaires (ou traités à la chaux) (Tacnet et Gotteland, 2000). Or, les géotextiles tissés existent principalement en PET. Ainsi, les géogrilles polypropylène (PP) ou PEHD sont chimiquement plus compatibles avec le type de sol carbonaté.

Pour la conception et la mise en place de ces géosynthétiques, on pourra se reporter aux recommandations données par la CFGG<sup>8</sup>, notamment concernant les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des géosynthétiques et l’interaction sol-géotextile.

La réalisation d’une géogrille (ou radier renforcé par des nappes de géotextiles) ne réduit pas le risque de tassement (mouvement différentiel) en surface, mais permet d’éviter le risque de rupture brutale. L’objectif n’est souvent pas tant d’empêcher toute déformation que de prévenir, par l’apparition d’une déformation modérée. A l’aplomb d’un départ de matériaux, la présence d’une géogrille, sollicitée en traction, propagera les déformations de la surface sur une étendue plus large et empêchera, de ce fait, la formation de « marche d’escalier » préjudiciables, au droit de la rupture (Bourdeau and Billaux, 2006). Des techniques de géogrilles pré-instrumentées<sup>9</sup> donnent en plus, une surveillance des déformations (par fibres optiques par exemple) et donc la possibilité d’alerter dès l’apparition des premiers mouvements de terrain.

Une profondeur d’ancrage relativement importante des géogrilles est préconisée. Le poids des terrains permet de mobiliser des forces d’ancrage et de reprendre ainsi les efforts qui se développent dans le géotextile lors de l’effondrement (Perrier et Simon, 1988).

Le dimensionnement du géotextile repose sur l’optimisation de ces caractéristiques, pour limiter l’amplitude de la déformation en surface. La théorie des « membranes » consiste à décrire la déformation du géotextile comme une flexion de membrane. Grâce à l’effet d’arche qui caractérise l’éboulement des terrains au toit de la cavité, il est possible de relier analytiquement la déformée de la surface à celle du géotextile, pour une largeur de fontis donnée. Des abaques existent ensuite pour obtenir des valeurs de raideur en traction de la géogrille (Villard et al. 2000), (Villard et al., 2002). Briançon et Villard (2008) ont amélioré le dimensionnement de la géogrille en introduisant également la déformation de la nappe dans la partie ancrage, sachant que l’ancrage est assuré par le frottement sol / géosynthétique.

D’autre part, la superposition de lacs de nappes doit également être dimensionnée correctement, sachant qu’à la jonction, l’ancrage est moins efficace. Des abaques de dimensionnement sont donnés par Briançon et Villard (2008).

---

<sup>8</sup> Comité Français des Géosynthétiques - Recommandations pour l’emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre, 1990.

<sup>9</sup> Par exemple, la technologie GEODETECT, développée par la société BIDIM, par fibres optiques mesurerait des déformations de 0,01%

Cependant, ces méthodes ne sont compatibles qu'avec des désordres de dimensions limitées, typiquement des bétaires isolées et deviennent inadaptées dans une zone à forte activité karstique, par exemple. Haza et Khay (2005) limitent à 4 à 6 m le diamètre d'une cavité qui pourrait être contenue par un renforcement géosynthétique.

## **5. Choix d'aménagement d'une bétaire, tenant compte de sa situation au sein du bassin versant**

Au vu du bilan fait sur les pratiques actuelles, l'aménagement d'une bétaire apparaît comme une problématique complexe qui impose de ne pas la considérer comme un simple « point d'entrée » d'eau localisé, mais plutôt de :

- la replacer dans un contexte plus global de fonctionnement de l'hydrosystème karstique associé,
- à une échelle plus large de bassin versant incluant le contexte morphologique et structural ainsi que l'amont et l'aval hydraulique de l'hydrosystème,
- dans une démarche globale d'aménagement du territoire.

C'est donc le contexte et le fonctionnement global du bassin versant qui permettront de décider de l'aménagement final de la bétaire.

### **5.1. DESCRIPTION DES AMENAGEMENTS DE BETOIRE RECENSEES SELON LE CONTEXTE ET LES OBJECTIFS HYDROLOGIQUES (ETAT DE L'ART)**

L'inventaire des aménagements existants a mis en évidence l'importance du contexte global et notamment des écoulements dans le choix de l'aménagement d'une bétaire.

#### **5.1.1. Cadre des aménagements de bétaire recensés**

Les entretiens réalisés et les documents montrent que les aménagements de bétaires sont généralement entrepris dans le cadre :

- des aménagements hydrauliques de bassin versant pour lutter contre les inondations et le ruissellement. Les aménagements de bétaires sont alors des aménagements complémentaires aux aménagements de versant de type : prairie inondable, bassin de rétention,...Ils sont entrepris par les communautés de communes, d'agglomération ou les syndicats de bassin versant ;

- de l'entretien des routes effectué auparavant par la Direction Départementale de l'Équipement et aujourd'hui par la Direction Interrégionale des Routes ;
- de la protection de la ressource en eau par les collectivités à compétence « Eau potable » (communauté de communes, d'agglomération, syndicat d'eau potable, ...).

### 5.1.2. Choix techniques observés selon le contexte de la bétoire

Nous avons recensé les différents types d'aménagements rencontrés selon la situation de la bétoire. Le tableau ci-dessous présente les divers cas rencontrés :

Situation/contexte de la bétoire (lexique)	Aménagement bétoire stricto sensus (lexique)	Nombre de cas rencontrés
1. Bétoire située à l'intérieur d'un ouvrage de stockage (dans la zone de stockage)	Colmatage	10
	Merlon avec débit de fuite	1
	Dérivation de flux	1
2. Bétoire située sous ou à proximité immédiate d'un ouvrage hydraulique structurant (digue/barrage)	Colmatage	5
3. Bétoire située en aval de l'ouvrage structurant	Colmatage	2
	Massif filtrant	2
	Puits d'infiltration	1
	Dérivation de flux	4
4. Bétoires situées dans une zone sans aménagements hydrauliques structurants	Colmatage	11
	Massif filtrant	4
	Merlon avec débit de fuite	1
	Puits d'infiltration	1
	Dérivation de flux	15
5. Bétoire située sous ou à proximité immédiate d'une infrastructure (bâtiment/route)	Blocage	1
	Colmatage	5
	Dérivation de flux	5
6. Bétoire située dans un fossé	Blocage	1
	Colmatage	2
7. Bétoire située dans ou à proximité d'une rivière	Dérivation de flux	2
	Colmatage	1

Il en ressort que :

- les bétoires situées à l’intérieur de la zone de rétention/d’infiltration d’un ouvrage hydraulique sont principalement aménagées par colmatage étanche. Selon les cas rencontrés, la technique de colmatage varie (voir paragraphe 3.2.3 sur les dispositifs colmatants). Un cas d’aménagement par merlon avec débit de fuite a été proposé sur un plan projet (cas du bassin de lagunage de Criquetôt l’Esneval) ainsi que la mise en place d’un talus pour exclure la bétoire du bassin (dérivation de flux) (cas du bassin à Blacqueville) ;
- les bétoires ouvertes à proximité immédiate ou sous un ouvrage hydraulique structurant (digue/barrage) sont systématiquement colmatées. Là aussi les techniques de colmatage peuvent varier ;
- les techniques d’aménagement sont plus variées pour les bétoires situées en aval d’un rejet d’un ouvrage hydraulique. L’aménagement prépondérant est la dérivation de flux (contournement de la bétoire par merlon de ceinturage ou simple talus, détournement des écoulements par des noues et des fossés,...). Parfois la bétoire peut être utilisée comme exutoire de l’ouvrage avec un aménagement de type massif filtrant (cas de la bétoire « Fosse Cossex », plan projet) ou sous forme de puits d’infiltration (cas du bassin à Ethainus). Enfin il arrive que la bétoire soit colmatée (cas des bétoires à Ecrainville) ;
- les bétoires localisées dans une zone sans ouvrage hydraulique structurant présentent la plus grande variété d’aménagements rencontrés avec une majorité d’aménagements de type colmatage et dérivation de flux. Certaines sont aménagées en massifs filtrants (cas de la bétoire de la Haye, de la bétoire Le Noyer à Beaumont le Roger,...). L’aménagement de la bétoire par simple blocage (enrochements) est plus rare (cas de la bétoire à Cocusseville) de même que l’aménagement en puits d’infiltration (cas de la bétoire de Bosc Bénard Crescy) et l’aménagement par merlon avec débit de fuite vers la bétoire (bétoires à Goderville) ;
- les bétoires ouvertes à proximité d’une infrastructure (route, bâtiments) sont généralement colmatées par un coulis de ciment (bétoire empiétant la RN 13 dans le Calvados) ou les flux sont détournés (cas de la bétoire de la Croix Rouge). Il existe un cas où la bétoire a simplement été confinée par des palplanches (bétoire à Ecuquetot) ;
- les bétoires en fossés sont imperméabilisées par comblement et mise en place de cunettes en béton (bétoire de la Croix Blanche) ou de complexe bentonitique (bétoire à Saussay) (deux cas étudiés seulement) ;
- dans le cas des bétoires en rivière, le traitement a consisté en un détournement des flux arrivant vers la bétoire en canalisant le cours d’eau par des augets (cas de la bétoire à Boscherons sur l’Iton). Le but était ici de

maintenir un débit minimum au cours d’eau en période d’étiage. Dans le cas des bétoires situées sur les berges, celles-ci ont colmaté (cas de Sylvains les moulins), le but était ici une protection du captage AEP en lien avec la bétoire par un drain karstique.

Les principaux cas rencontrés sont présentés en Annexe 6, classés selon le contexte de la bétoire.

### 5.1.3. Exemple d’utilisation de bétoires comme exutoires

Des bétoires ont été aménagées comme exutoires d’ouvrages de rétention dans le cadre de la protection des captages AEP, de la lutte contre les inondations, ou enfin de la gestion des eaux usées.

Dans le cadre de la protection des captages AEP, des ouvrages de rétention des eaux de ruissellement (mare tampon, prairies inondables...) ont été créés en amont d’une bétoire utilisée comme exutoire. C’est le cas des ouvrages réalisés en amont de la bétoire n°10 ou de la bétoire n°21 (dans le cadre de la protection du captage des Varras) qui limitent le ruissellement et contrôlent le volume d’eau s’engouffrant dans la bétoire ainsi que sa qualité du fait de la décantation.

Dans le cadre de la lutte contre les inondations, les bétoires ont pu être utilisées comme exutoire des ouvrages hydrauliques de lutte contre les ruissellements et les inondations par les collectivités. L’AREAS, dans son étude sur les ouvrages hydrauliques de 2001, a en effet recensé 31 ouvrages rejetant leurs eaux vers une bétoire (Illustration 31).

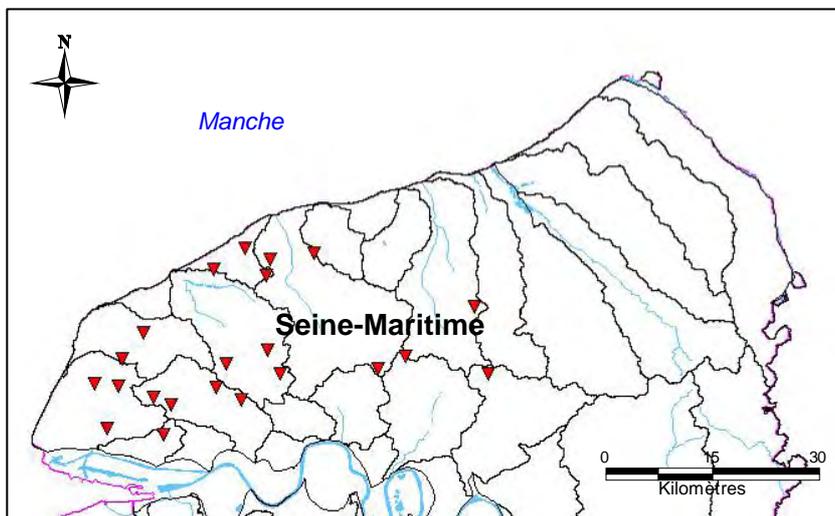


Illustration 31 : Cartographie des 31 ouvrages hydrauliques de la Seine-Maritime rejetant dans des bétoires - Source : recensement des ouvrages de lutttes contre les inondations en Seine Maritime – AREAS – Décembre 2001

Dans le cadre de la gestion des eaux usées, de la même façon, la faible densité du réseau hydrographique voire son absence a pu amener les acteurs locaux à utiliser les bétoires comme exutoires des eaux usées traitées. Ainsi en 2008, 3% des stations d’épuration de Seine-Maritime (soit 6 des 202 existantes) utilisaient les bétoires comme système d’infiltration (source : guide aire infiltration Seine Maritime DISE, novembre 2009). Ce chiffre ne comptabilise que les rejets délibérés en bétoire et ne prend pas en compte la présence accidentelle d’une bétoire qui court-circuite la filière d’épuration ou une aire d’infiltration aménagée.

Un exemple est la STEP de Sainte Marie des Champs, où après les deux lagunes de finition, l’eau se déverse dans une peupleraie qui ne semble pas avoir été aménagée spécialement pour cela et au niveau de laquelle les eaux traitées disparaissent rapidement par une multitude de petits trous (Illustration 32).

De même, à la station d’Hautot-Saint-Sulpice, le rejet de la station se fait dans un fossé qui parcourt un petit bois, mais l’eau ne chemine pas longtemps en surface, car une bétoire qui fait également office de dépotoir s’est ouverte (Illustration 33).



*Illustration 32 : Champs de bétoires après le rejet de la station de Sainte Marie des Champs – Source N. Topin, 2007*



*Illustration 33 : Bétoire à l’aval de la station d’Hautot-Saint-Sulpice – Source N. Topin, 2007*

#### **5.1.4. Dysfonctionnements hydrologiques observés à l'échelle du bassin versant, suite à un aménagement de bétoire**

**A Sassetot le Mauconduit (76)**, le comblement de la bétoire de La Fosse Taillefer (bétoire n°12147 de l'inventaire régional) par le propriétaire des terrains en septembre 2007, aurait provoqué, selon le propriétaire des terrains agricoles situés à l'aval, des inondations à répétition (procédure judiciaire en cours). Cet exemple montre qu'avant de combler une bétoire, il convient de vérifier l'impact de l'aménagement en termes d'augmentation des volumes des ruissellements à l'aval.

**A Grosley-sur-Risle au lieu-dit « Le Val Gallerand » (27)**, en août 2005, le colmatage de deux bétoires ouvertes dans le lit mineur de la Risle, aurait, selon les exploitants de la pisciculture située à l'aval, provoqué une baisse du débit des sources captées pour cette pisciculture. L'une des deux bétoires a donc été désobstruée pour maintenir les débits des sources avales.

**Au Tilleul-Lambert (27)**, le comblement d'une bétoire aurait entraîné la baisse de production du puits de Feugerolles (passant de 300m<sup>3</sup>/h avant comblement à 20-25m<sup>3</sup>/h après comblement d'après la plaquette du Pôle de compétence Sol et Eau Haute-Normandie). Ces deux derniers exemples montrent qu'avant de court-circuiter ou combler une bétoire, il convient de vérifier sa capacité d'engouffrement et son rôle par rapport à un captage.

Des exemples d'aménagements non réalisés dans les règles de l'art et amenant à des risques sanitaires (dégradation de la qualité de la ressource en eaux souterraines) sont également présentés en Annexe 2.

Tous ces exemples montrent combien il est important de vérifier l'impact des aménagements envisagés ainsi que les modifications qu'ils vont provoquer sur le fonctionnement hydrologique de la bétoire (cf. § 4 à 6).

#### **5.1.5. Evaluation de l'efficacité des aménagements**

La région Haute-Normandie compte un exemple d'une étude ayant évalué l'effet des aménagements de bétoires situées dans les périmètres de protection sur la qualité des eaux du captage (captage des Varras).

Suite à la Déclaration d'Utilité Publique (D.U.P.) visant à instaurer les périmètres de protection du captage des Varras dans l'Eure, plusieurs aménagements de bétoires ont été préconisés et réalisés en 1990 puis à partir 1997. Le but de ces aménagements est de retenir, décanter et tamponner l'eau de ruissellement par des ouvrages hydrauliques avec débit de fuite qui va ensuite généralement s'engouffrer au niveau d'une bétoire, en amont du captage. Six bétoires ont été aménagées entre 1997 et 2005 (caractéristiques détaillées dans l'illustration 34). Le Syndicat d'Eau du Roumois et du Plateau du Neubourg (SERPN), le CG27 et l'AESN ont commandé en 2008 une

étude à l’Université de Rouen visant à évaluer l’efficacité des aménagements de bassins versants mis en place (Fournier, 2008).

n° de bétoire	Localisation	Vulnérabilité du captage des Varras	Type de pollutions	Aménagements réalisés	Volume du bassin de rétention (m³)	Débit de fuite (L/s)	Aménagements prévus par l’arrêté non réalisés	Remarque
1	Fosse Cossex à Honguemare Guenouville	Traçage positif	Routiers (récupère eau de la RD 313) et agricoles	Bassin de rétention	14 000	20	Massif filtrant dans la bétoire (Photo 3- 1, page 32)	Selon l’arrêté, la bétoire ne se situe pas en périmètre satellite immédiat donc n’a pas été acquise
3	Honguemare Guenouville	Traçage négatif	Autoroutiers (A.13)	Bassin de rétention par SAPN	1 850	10	Bassin équipé d’un décanteur déshuileur	Non respect des recommandations (débit de fuite à 5 L/s)
5	Honguemare Guenouville	Relation suspectée	Routiers et agricoles	Bassin de rétention (Photo 3- 1, page 32)	10 000		Bassin équipé d’un décanteur déshuileur pour les eaux de voirie	Difficulté d’acquisition du terrain mitoyen (pour y faire le décanteur-déshuileur) appartenant au conseil général
10	Barneville Sur Seine	Traçage positif	Ruissellement	Digue et bassin de rétention				Aménagements présentés en page 34, Figure 3- 16
12 bis	Bosgouet	Relation suspectée	Autoroutiers	Existe déjà une mare tampon			Bassin de rétention pour le BV par le SERSAEP et un autre pour la A.13 par la SAPN	Elargissement de la bétoire existante et apparition de nouvelles bétoires dans 1 fossé en amont entre la mare et la bétoire
14	Bourg-Achard	Pas de relation avec le captage des Varras	Urbains, routiers et agricoles	Bassin de rétention en amont de la zone de stagnation	3 000		Aménagement de la zone de stagnation	Il s’agit d’une zone de stagnation des eaux qui déborde au cas de fortes pluies. Apparition d’un effondrement dans le bassin de rétention (photo 3-2)
15	Bosgouet (se trouve dans un même fossé)	Relation probable	Urbains, agricoles et domestiques	Etanchéité du fossé par bétonnage				Il existe 2 autres bétoires sur le même fossé mais hors du périmètre concerné qui ne sont pas aménagées. De plus, l’amont n’est pas aménagé
16								
21	Bosc-Bénard-Crécy	Relation probable	Urbains, agricoles et domestiques	Aménagement de la mare et de la bétoire (massif drainant non classé)				Effondrement progressif de la bétoire

*Illustration 34 : Tableau récapitulatif des aménagements réalisés et prévus par la DUP de 1997 sur les bétoires en périmètre immédiat satellite (sources : rapport Mathieu Désestres – SERSAEP(SERP) / Université Rouen)*

L’étude s’est appuyée sur :

- les données de pluie et de turbidité disponibles depuis 1995,
- les analyses du signal de la turbidité au captage faites sur deux périodes : avant et après aménagements (Comparaison des périodes 1995-1999 et 2001-2005).

Les résultats (après traitement des données pour s’affranchir de différents biais) montrent :

- une diminution de la sensibilité du système à la turbidité au captage,

- une efficacité moindre sur les transferts rapides (<5 jours), mais néanmoins diminution de leur part dans la période 2001-2005,
- une diminution de 36% des restitutions turbides au captage de Varras.

## **5.2. RAPPEL DES DIFFERENTES REGLEMENTATIONS ET DOCTRINES A PRENDRE EN COMPTE POUR LES AMENAGEMENTS DE VERSANT ET LES AMENAGEMENTS DE BETOIRE**

### **5.2.1. Doctrines existantes concernant la gestion de l'infiltration des eaux en Haute-Normandie**

Etant donné la faible densité du réseau hydrographique, la problématique de l'infiltration des eaux pluviales et eaux usées a fait l'objet de plusieurs guides à l'échelle départementale ou régionale. A noter les guides suivants :

- Aires d'infiltrations des stations d'épuration – guide de conception et de gestion – DISE (Délégation Interservice de l'eau) de Seine-Maritime - décembre 2009
- Guide pour la gestion des eaux pluviales urbaines en Seine-Maritime - 2007
- Infiltration des eaux – Document de synthèse Version 3 – Groupe de travail – DISE –Infiltration des eaux – Document de travail – 2002

Des extraits de ces guides concernant notre sujet sont présentés en Annexe 9.

#### **Bilan des doctrines existantes concernant la gestion de l'infiltration des eaux en Haute-Normandie :**

La maîtrise des ruissellements doit se concevoir à l'échelle des bassins versants (de façon globale avec une cohérence d'ensemble) :

- Il est fondamental d'agir au point de départ en favorisant par tout moyen l'infiltration afin de limiter fortement toute source de production de ruissellement dès l'origine ; les actions préventives et durables consistent à réduire toutes les sources de ruissellement pour limiter les transferts via le karst pouvant atteindre la ressource en eau potable,

- l'aménagement des bétoires dans le but d'infiltrer les eaux de surface constitue un dispositif d' « ultime recours » ; il convient alors de « justifier que les autres solutions d'infiltration ne sont pas possibles et de confirmer par une étude générale de hiérarchisation des bétoires : risques de pollution, volumes mis en jeu, bassin versant élémentaire de la bétoire, volume d'engouffrement, occurrence de fonctionnement ;

- la gestion des eaux pluviales ne se limite pas au seul aspect quantitatif, la prise en compte de l'aspect qualitatif est essentielle.

### 5.2.2. Rappel des objectifs de la Directive Cadre sur l’Eau (DCE)

Enfin, les solutions techniques retenues pour l’aménagement de bétaires doivent également concilier des enjeux de protection, de préservation et d’amélioration de la qualité des eaux souterraines pour satisfaire l’objectif de bon état de la Directive Cadre sur l’Eau (directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000) déclinée par le Schéma Directeur d’Aménagement et de Gestion des eaux et sa directive fille sur la protection des eaux souterraines.

Ce cadre a notamment pour vocation de :

- promouvoir une utilisation durable de l’eau, fondée sur la protection à long terme des ressources en eau disponibles ;
- assurer la réduction progressive de la pollution des eaux souterraines et prévenir l’aggravation de leur pollution ;
- viser à renforcer la protection de l’environnement aquatique, ainsi qu’à l’améliorer, notamment par des mesures spécifiques conçues pour réduire progressivement les rejets, émissions et pertes de substances prioritaires, et l’arrêt ou la suppression progressive des rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires ;
- prévenir toute dégradation supplémentaire, préserver et améliorer l’état des écosystèmes aquatiques ainsi que, en ce qui concerne leurs besoins en eau, des écosystèmes terrestres et des zones humides qui en dépendent directement,

### 5.3. PRECONISATION D’AMENAGEMENT A ENVISAGER SELON LA SITUATION DE LA BETOIRE

Si des pratiques telles que le remblaiement de la bétaire par du « tout-venant », des déchets divers, ou encore telles que l’apport de flux d’eaux usées, d’eaux de drainage,... sont évidemment à proscrire, la préconisation d’aménagement est délicate car chaque situation est particulière et nécessite une solution adaptée dont le choix découlera des conclusions de l’étude préalable préconisée au § 6.

Il peut cependant être rappelé **deux grands principes** à respecter pour l’aménagement d’une bétaire :

1. l’aménagement d’une bétaire est à concevoir dans une cohérence d’ensemble à l’échelle des bassins versants. **L’aménagement d’une bétaire est indissociable des aménagements de versant** (hydraulique douce et hydraulique de rétention) qui visent à :

- a. diminuer la production d'eaux de ruissellement,
  - b. ralentir les écoulements résiduels,
  - c. réduire la charge polluante des écoulements.
- Dans un premier temps, il convient de mettre en place les aménagements de versant nécessaires pour n'avoir à maîtriser que des faibles débits d'une eau de qualité compatible avec la protection du milieu récepteur.
  - Dans un second temps, se pose la question de l'exutoire final. Plutôt que d'avoir un seul exutoire final, il faut rechercher un épandage diffus et une infiltration lente (épandage dans un espace végétalisé, mise en place d'une aire d'infiltration,...). La bétairie n'est, quoi qu'il en soit, pas à considérer comme l'exutoire final ou le point unique de rejet ou d'infiltration.

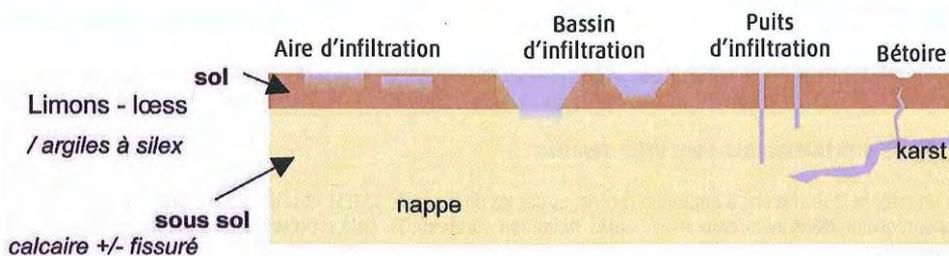


Illustration 35 : Schéma des différents types d'infiltration (document extrait du guide de conception et de gestion des aires d'infiltration des stations d'épuration DISE 76 –décembre 2009)

Dans le cas de zones à forte densité de bétaires, plutôt que de créer des aires d'infiltration, il peut néanmoins être intéressant d'étudier, d'aller rechercher un exutoire de type rivière malgré l'éloignement. En effet, même si l'investissement peut paraître conséquent initialement, il peut se révéler sur du long terme moins coûteux et plus satisfaisant (le traitement d'une bétairie présente dans une aire d'infiltration reste délicat et peut conduire en dernier recours à la réalisation de nouvelles surfaces d'infiltration nécessitant l'acquisition de parcelle, le réaménagement,...) (extrait du guide de conception des aires d'infiltration, DISE76, déc. 2009).

Les préconisations de ce présent rapport n'abordent pas le détail des différentes techniques d'aménagements de versant (hydraulique douce et hydraulique de rétention). Pour ces questions, nous renvoyons le lecteur vers :

- L'AREAS (Association Régionale pour l'Etude et l'Amélioration des Sols) dont le cœur d'activité est la réduction des ruissellements et ses conséquences (limitation de l'érosion des sols, des pollutions associées, des coulées de boues et des inondations) (<http://www.areas.asso.fr>);

- L’AREHN (Agence Régionale de l’Environnement de Haute-Normandie) (<http://www.arehn.asso.fr>) et vers ses différentes plaquettes thématiques :
  - Connaître pour agir - L’hydraulique douce : de nouvelles conceptions face aux inondations et à la pollution – Publication de l’Agence régionale de l’environnement de Haute-Normandie – Avril 2003
  - Connaître pour agir - Techniques d’hydraulique douce : maîtriser le ruissellement urbain à sa source - Publication de l’Agence régionale de l’environnement de Haute-Normandie – Mars 2003

Dans la suite de ce paragraphe de préconisations, nous évoquerons les aménagements de versant sans distinguer l’hydraulique douce de l’hydraulique de rétention.

2. Quelque soit le risque contre lequel l’aménagement est réalisé (hydraulique, hydrologique, géotechnique,...), il convient de s’assurer que l’aménagement retenu préserve la qualité de la ressource (respect de la Directive Cadre sur l’Eau).

Ces deux grands principes sont notamment repris des différentes réglementations et doctrines existantes et rappelées dans le paragraphe 5.2.

Ainsi concernant les bétaires localisées dans des zones sans aménagement structurant, deux cas sont à envisager :

- 1 - il existe un exutoire à l’aval (cours d’eau, prairie ou aire d’infiltration, bois...) ; la bétaire peut alors être colmatée de façon étanche ou contournée (merlon de ceinturage, talus, noue, fossé,...) ;
- 2 - dans le cas où l’absence d’exutoires à l’aval (aire ou bassin d’infiltration, cours d’eau, réseau d’eau pluviale,...) a été justifiée et que des risques d’inondation à l’aval ont été identifiés (par exemple zone PPRI orange ou rouge), la bétaire pourra être utilisée, **en dernier recours** pour infiltrer les eaux de ruissellement. La bétaire devra être comblée par des matériaux filtrants. Il est recommandé de placer une couronne enherbée de 10m de large autour de la bétaire aménagée en massif filtrant. Un procédé de traitement avant infiltration des eaux devra être mis en place et dimensionné en fonction de la qualité des eaux d’engouffrement.

Dans les deux cas, l’aménagement de la bétaire devra impérativement être accompagné d’aménagements de versant à l’amont et à l’aval visant à réduire la production de ruissellement, à améliorer la qualité des eaux de ruissellement ou à en réguler le débit (grille, filtre, bassin de rétention, hydraulique douce : bandes enherbées, fascines, noues, prairie...).

Afin de limiter le rejeu d'une bétoire colmatée, il faut empêcher tout ruissellement à proximité de la bétoire traitée.

Tout aménagement de bétoire n'est pas absolument stable dans le temps ; il est susceptible de rejouer. Une bétoire aménagée nécessite une surveillance périodique et, en cas de rejeu, une intervention.

Nous citons ci-après, des préconisations d'aménagements spécifiques aux 8 cas particuliers suivants :

- Cas des vallées sèches à forte activité karstique
- Cas des bétoires ouvertes sous ou à proximité immédiate d'infrastructures
- Cas des bétoires ouvertes dans les zones de rétention, prairies inondables, lagunes
- Cas des bétoires ouvertes dans les bassins ou aires d'infiltration
- Cas des bétoires situées à l'aval d'un ouvrage hydraulique
- Cas des bétoires en lien avec un captage d'eau potable (traçage positif)
- Cas des bétoires situées en fossés
- Cas des bétoires situées dans les rivières ou sur les berges.

### **5.3.1. Cas des vallées sèches à forte activité karstique**

Une vallée à forte activité karstique est un secteur où plusieurs événements karstiques proches sont observables en surface. Il est difficilement envisageable de proposer un aménagement pérenne d'une de ces bétoires sans tenir compte du contexte global. Quelque soit l'aménagement proposé, la modification des écoulements superficiels, quasi-inévitable, risque d'entraîner la formation de nouvelles bétoires à proximité.

Une possibilité est d'amener les eaux au-delà du secteur à forte activité karstique, via la mise en place des noues ou fossés avec fond imperméabilisé, vers un exutoire (cours d'eau ou secteur où pourra être mise en place une aire d'infiltration,...). Pour ce faire, il resterait nécessaire de chercher à localiser l'extension de la zone d'activité karstique (consultation de l'inventaire régional des bétoires, réalisation de géophysique ou à défaut, par une étude des écoulements).

Il est par ailleurs préconisé de réduire les ruissellements en amont de ces secteurs (aménagements de versant) et de maintenir ces vallées sèches enherbées.

### **5.3.2. Cas des bétoires ouvertes sous ou à proximité immédiate d’infrastructures**

Ce cas concerne les bétoires ouvertes à proximité d’une digue, d’un petit barrage, d’une route, ou encore d’un bâtiment.

L’ouverture d’une bétoire directement sous une infrastructure existante exige une étude géotechnique approfondie de l’ensemble de la structure (notamment si elles concernent un bâtiment ou un barrage). L’aménagement de la bétoire n’est plus à l’ordre du jour. S’il s’agit d’un nouveau projet, l’idéal consiste à déplacer l’infrastructure.

Pour les bétoires situées à proximité d’infrastructures existantes pour lesquels les mouvements différentiels peuvent rester admissibles (route, digue..), l’objectif est d’éviter une rupture franche en surface de type fontis. L’amplitude des tassements différentiels acceptable dépend du type d’infrastructure. Ainsi, la déformation admissible du sol ne doit pas dépasser 1 à 2 % pour les routes.

Le meilleur moyen de limiter les mouvements différentiels en surface est de mettre en place un géosynthétique adapté en fond de fouille de type géogrille ou géotextile tissé. On se reportera au paragraphe 4.3.7. Etant donné qu’aucun aménagement n’empêchera à long terme le développement d’une bétoire, l’objectif n’est pas tant d’empêcher la déformation que de la prévenir. Ainsi, outre le suivi des déformations de la surface, l’utilisation de géogrilles pré-instrumentées donnent la possibilité d’alerter dès l’apparition des premiers mouvements de terrain. Le poids des terrains de la structure routière ou de la digue permettra de mobiliser des forces d’ancrage et de reprendre ainsi les efforts qui se développent dans le géotextile lors de l’effondrement.

Parallèlement à l’utilisation d’une géogrille, la bétoire doit être rendue inactive afin d’éviter toute reprise des mouvements en surface. A cet effet, le comblement du corps de la bétoire dans la craie (cf. § 4.3.3) suivi du colmatage étanche de la bétoire sont préconisés (cf. § 4.3.4). Les caractéristiques du colmatage seront à adapter aux exigences de stabilité de chaque ouvrage. Par ailleurs, nous recommandons d’empêcher tout apport de ruissellement vers la bétoire afin de limiter le risque de réouverture de celle-ci. Un merlon de ceinturage ou un talus de contournement peuvent constituer des aménagements complémentaires répondant à cet objectif.

Dans le cas des zones à forte intensité karstique (vallées sèches où sont observés des alignements de bétoires), il sera préférable, par sécurité, de déplacer la digue ou le petit barrage vers une zone sans ou à plus faible activité karstique.

### **5.3.3. Cas des bétoires ouvertes dans les zones de rétention, prairies inondables, lagunes**

L’objectif d’un tel aménagement est l’étanchéification et de plus la stabilité du terrain, afin d’éviter une rupture de l’étanchéité par réouverture de la bétoire. Par contre, les mouvements différentiels ne sont pas préjudiciables ; la géogrille n’est pas indispensable.

La spécificité de ces ouvrages ou bassins est la mise en charge hydraulique.

#### *Bétoire ouverte à l'intérieur des bassins de stockage d'eaux pluviales*

Etant donné les dégradations que subissent les eaux lors des ruissellements, l'eau ainsi stockée ne doit pas s'infiltrer de façon rapide et sans épuration vers les eaux souterraines. **Les bétoires ouvertes dans ces bassins doivent être comblées de façon étanche.** Si la bétoire est située à proximité d'un talus du bassin, il peut être envisagé de la court-circuiter par un merlon (aménagement de type dérivation de flux) et de réaménager les limites du bassin pour exclure la bétoire de la zone de rétention. Toutefois, il faut prévoir un espace suffisant entre le merlon et la bétoire afin d'éviter tout affouillement ultérieur.

Etant donné le risque d'apparition de bétoires dans ces bassins du fait de leur mise en charge, il est primordial de rechercher la présence d'indices de bétoires dès la conception de ces ouvrages lors de la phase de décapage (recherche d'indices de zone d'écoulement rapide par un géologue ou un hydrogéologue) et éventuellement par une campagne géophysique.

#### *Bétoire ouverte à l'intérieur de lagunes, de bassins de stockage d'eaux usées*

Etant donné leur qualité dégradée, les eaux usées stockées ne doivent pas s'infiltrer de façon rapide et sans épuration vers les eaux souterraines. **Les bétoires ouvertes dans ces bassins doivent être comblées de façon étanche.**

Dans le cas où ces bassins sont situés dans des zones à forte activité karstique (vallées sèches avec de nombreuses bétoires recensées), **il sera préconisé d'étanchéifier si possible le fond des bassins concernés. Le déplacement de ces bassins à enjeux vis-à-vis de la qualité de la ressource souterraine, reste préférable.** Les dispositifs d'étanchéification des fonds de bassins sont divers (géomembrane, PEHD, complexe bentonitique,... cf. guides de conception de ces ouvrages).

Etant donné les exemples de réhabilitations infructueuses de bassins (cf. exemple du § 4.2.1), toute réhabilitation doit être précédée d'une étude de faisabilité (étude géotechnique et géophysique).

### **5.3.4. Cas des bétoires ouvertes dans les bassins ou aires d'infiltration**

L'objectif d'un tel aménagement est l'infiltration des eaux et donc, en cela également la stabilité du terrain, pour éviter qu'une réouverture de la bétoire n'altère l'infiltration. Par contre, les mouvements différentiels ne sont pas préjudiciables ; la géogrille n'est pas indispensable.

L'aire d'infiltration est un exutoire. Sa première fonction est de disperser l'effluent par infiltration lente et diffuse dans le sol. Sa deuxième fonction est l'assimilation des pollutions résiduelles par le milieu naturel grâce à la capacité d'autoépuration du sol.

Le bassin d'infiltration est différent d'une aire d'infiltration. Il s'agit d'un ouvrage d'art destiné à la fois au stockage des eaux et à son infiltration grâce à un fond et des parois perméables. Ce bassin correspond dans certains cas à la dernière lagune d'épuration.

Ces types d'aménagements sont utilisés pour la gestion des eaux pluviales et des eaux usées traitées.

Pour le cas de bétôires ouvertes à l'intérieur des aires et bassins d'infiltration d'eaux usées traitées, le traitement doit permettre de maintenir l'infiltration lente à travers les sols. L'aménagement doit donc empêcher toute infiltration rapide des eaux.

Les aménagements de bétôires répondant à cet objectif sont le colmatage étanche ou la dérivation des flux. Un aménagement de type massif filtrant peut également être envisagé en s'assurant que la perméabilité de la zone reconstituée et l'efficacité du filtre mis en place soient équivalents à ceux du sol de l'aire d'infiltration.

### 5.3.5. Cas des bétôires situées à l'aval d'un ouvrage hydraulique

#### *A l'aval d'ouvrages de rétention d'eaux pluviales*

Etant donné l'incertitude concernant la qualité des eaux stockées, il est préconisé de ne pas infiltrer les eaux du débit de fuite ou de la surverse de ces ouvrages dans les bétôires.

Les aménagements possibles sont le colmatage de la bétôire (rebouchage étanche) et/ou la dérivation des flux sortant du bassin (mise en place de talus de contournement pour éviter l'infiltration ou de noue pour orienter les écoulements sortant du bassin).

Dans le cas où l'absence d'exutoires à l'aval (aire ou bassin d'infiltration, cours d'eau, réseau d'eau pluviale,...) est avérée et que des risques d'inondation à l'aval sont identifiés, la bétôire pourra être utilisée, **en dernier recours**, pour infiltrer les eaux du bassin. La bétôire devra être comblée par des matériaux filtrants. Il est recommandé de placer une couronne enherbée de 10m de large autour de la bétôire aménagée en massif filtrant. Un procédé de traitement avant infiltration devra être mis en place et dimensionné en fonction de la qualité des eaux stockées.

#### *A l'aval des bassins d'infiltration*

Les bétôires ne doivent en aucun cas servir d'exutoire aux aires d'infiltration des stations d'épuration. L'infiltration rapide ne permet pas en effet de bénéficier des processus d'auto-épuration se déroulant lors d'une infiltration lente dans le sol.

**Les aménagements possibles sont le colmatage étanche de la bétoire et/ou la dérivation des flux sortant du bassin** (mise en place de talus de contournement pour éviter l'infiltration ou de noue pour orienter les écoulements sortant du bassin).

*Le guide de conception et de gestion des aires d'infiltration des stations d'épuration, fait par la DISE, précise que les cours d'eau semblent être le choix d'exutoire le plus intéressant. La région Haute-Normandie possédant un réseau hydrographique peu dense, le recours à l'infiltration est donc à envisager selon les cas. Cependant, en raison de la présence de bétoires, le recours à l'infiltration nécessite d'une part de justifier le choix entre un exutoire fluvial ou par infiltration, d'autre part de s'entourer des précautions nécessaires lors de la conception et de l'entretien (vérifier l'absence de bétoires existantes avant la réalisation de l'aire d'infiltration par décapage, réalisation de campagne de géophysique, sondages, etc....).*

*Le guide précise que l'exutoire le plus naturel, par défaut, reste le cours d'eau à condition que les effluents rejetés soient compatibles avec les caractéristiques hydrauliques et qualitatives du cours d'eau (conformément à la Directive Cadre sur l'Eau).*

### **5.3.6. Cas des bétoires en lien avec un captage d'eau potable (traçage positif)**

Ces bétoires ne doivent en aucun cas recevoir d'eaux superficielles de qualité dégradée.

Les aménagements possibles sont le **colmatage de la bétoire** (rebouchage étanche) **et/ou la dérivation des ruissellements de surface** (mise en place de talus de contournement pour éviter l'infiltration ou de noue pour orienter les ruissellements en dehors de la zone de bétoires).

Le choix final d'un aménagement doit, dans ce cas, être soumis à l'avis d'un hydrogéologue agréé qui jugera de la pertinence de l'aménagement retenu.

### **5.3.7. Cas des bétoires situées en fossés**

Les fossés sont des points bas recevant des eaux généralement dégradées (eaux de ruissellement agricoles, eaux routières, etc...) s'écoulant à des débits parfois importants. **Les bétoires ouvertes dans les fossés doivent être colmatées de manière étanche.**

Si la pose de cunettes en béton semble être insuffisante, des techniques d'étanchéification telles que les complexes bentonitiques sont à utiliser avec précautions. Il convient de s'assurer que ce géosynthétique restera humide (la

bentonite étant une argile gonflante, des cycles d’humidification/dessiccation peuvent provoquer l’apparition de fissures rendant le dispositif colmatant inefficace).

La canalisation/busage du fossé est également à envisager avec précaution. Il convient dans ce cas de s’assurer qu’il n’y aura pas d’apports de ruissellement autres que ceux du fossé (ruissellements venant des directions perpendiculaires au fossé par exemple) susceptibles de réactiver la bétaire (cas de la bétaire la « Croix Blanche » dans l’Eure). Des dispositifs anti-renards (collerettes) doivent par ailleurs être mis en place autour de ces canalisations.

Mieux vaut prévoir une large emprise du traitement pour éviter tout affouillement ultérieur.

### **5.3.8. Cas des bétaires situées dans les rivières ou sur les berges**

Le colmatage de bétaires en rivière est généralement réalisé dans le but de protéger la qualité d’une ressource AEP ou de préserver un débit minimum au cours d’eau à l’étiage.

#### Concernant la protection des captages AEP

Si les études préalables montrent que la part des débits apportée par la bétaire (capacité d’engouffrement) à la productivité de la source ou du forage capté pour l’AEP est négligeable, et qu’il n’existe pas d’autre source à l’aval captée pour d’autres usages (pisciculture, cressiculture,...), la bétaire peut être rebouchée de façon étanche ou contournée (pas de risque de perte de débit pour le captage).

Si en revanche, il existe un risque de perte de débit pour les sources ou forages exploités, la bétaire devra conserver son rôle d’infiltration. Un dispositif de traitement adapté devra être mis en place au niveau du captage AEP.

#### Concernant la préservation des débits d’étiage des cours d’eau

Si la bétaire ne provoque pas d’assèchement du cours d’eau (faible capacité d’engouffrement par rapport au débit d’étiage de la rivière). La bétaire pourra être laissée en l’état (vérifier cependant qu’elle ne soit pas située dans un BAC ou PPE avec un traçage positif vers le captage).

Dans le cas contraire pour maintenir un débit minimum de la rivière en étiage, un comblement de la bétaire ou un contournement peut être envisagé.



Cas		Aménagements préconisés	Aménagements de versant nécessaires	Remarque
cas général	si existence d'un exutoire aval et absence de risque hydrologique	- colmatage et/ou - dérivation de flux	hydraulique douce ou de rétention visant à réduire les débits des ruissellements et à améliorer leur qualité	- Tout aménagement n'est pas absolument stable dans le temps d'où la nécessité d'une surveillance périodique - Vérifier que la bétoire ne se soit pas dans un BAC ou un PPE avec traçage positif vers le captage
	si absence d'exutoire aval et risque d'inondation à l'aval	massif filtrant ( <b>solution de dernier recours</b> ) + couronne enherbée de 10m de large autour + fascine en amont pour la qualité de l'eau	hydraulique douce ou de rétention visant à réduire les débits des ruissellements et à améliorer leur qualité	
cas des vallées sèches à forte activité karstique		bétoire laissée en l'état	noues ou fossés imperméabilisés amenant les eaux au-delà du secteur à forte activité karstique vers un exutoire (cours d'eau ou aire d'infiltration)	Nécessité d'une surveillance périodique
cas des bétoires ouvertes sous ou à proximité immédiate d'infrastructures		colmatage (à adapter aux conditions de stabilité géotechnique de l'ouvrage) + par exemple : - ajout d'une géogrille "parachute" en fond de fouille pour renforcer le dispositif colmatant - merlon de ceinturage ou talus de contournement des eaux pour éviter tout apport de ruissellement vers la bétoire		Si la zone est à forte activité karstique, il est préférable de déplacer l'ouvrage
cas des bétoires ouvertes dans les zones de rétention de bassin, de prairies inondables, de lagunes,...	dans bassin de stockage des eaux pluviales	- colmatage et/ou - dérivation de flux si bétoire à proximité du talus de bassin, voire réaménagement des limites du bassin pour exclure la bétoire du périmètre du bassin		- Prévoir un espace suffisant entre le merlon et la bétoire pour éviter tout affouillement - Si la zone est à forte activité karstique, il est préconisé d'étanchéifier le bassin ou de le déplacer
	dans bassin de stockage des eaux usées	- colmatage		Si la zone est à forte activité karstique, il est préconisé d'étanchéifier le bassin ou de le déplacer
cas des bétoires ouvertes dans les bassins ou aires d'infiltration		- colmatage et/ou - dérivation de flux OU - massif filtrant si le filtre respecte le coefficient de perméabilité du bassin et les propriétés de filtration du sol du bassin		- Risque d'affouillement autour du colmatage puisque tout autour la zone est perméable - Si la zone est à forte activité karstique, il est préconisé de déplacer le bassin ou l'aire
cas des bétoires situées à l'aval d'un ouvrage hydraulique	à l'aval d'ouvrages de rétention d'eaux pluviales	- colmatage et/ou - dérivation de flux OU - massif filtrant si absence d'exutoire aval et risque d'inondation à l'aval ( <b>solution de dernier recours</b> ) + couronne enherbée de 10m de large autour + fascine en amont pour la qualité de l'eau		
	à l'aval des bassins d'infiltration	- colmatage et/ou - dérivation de flux (talus de contournement, noue pour dévier les écoulements)		
cas des bétoires en lien avec un captage d'eau potable (traçage positif)		- colmatage et/ou - dérivation de flux (talus de contournement, noue pour dévier les écoulements)		Le choix final de l'aménagement doit être soumis à l'avis d'un hydrogéologue agréé
cas des bétoires situées en fossé		- colmatage (les cunettes en béton sont insuffisantes, la canalisation/busage béton et le complexe bentonitique sont à envisager avec précaution)		Prévoir une large emprise du traitement bien au-delà de la zone effondrée pour éviter tout affouillement ultérieur
cas des bétoires situées dans les rivières ou sur les berges	concernant la protection des captages AEP	- colmatage si absence de risque de perte de débit au forage ou en aval - massif filtrant si risque de perte de débit + mettre en place un dispositif de traitement de l'eau adapté au niveau du captage AEP		
	concernant la préservation des débits d'étiage des cours d'eau	- laisser la bétoire en l'état si absence risque d'assèchement du corus d'eau - colmatage ou contournement si risque d'assèchement, pour maintenir un débit minimum		

Illustration 36 : Synthèse des préconisations de choix d'aménagement en fonction du contexte de la bétoire



## 6. Etude préalable à la conception d’un aménagement d’une bétoire

L’objectif de ce chapitre consiste à préconiser le contenu de l’étude préalable permettant de disposer de données nécessaires à la conception de l’aménagement en fonction des objectifs de protection et du contexte de la bétoire. Ce chapitre présente le contenu de base (§6.1) qui devra être complété selon les cas par des éléments d’études additionnels (§6.2).

Le contenu de l’étude préalable devra quoi qu’il en soit être validé par un hydrogéologue. Les résultats de cette étude permettront d’orienter vers différents types d’aménagements.

La variabilité spatiale du type d’argiles en présence (smectite, kaolinite,...) peut avoir des répercussions en terme de comportements géotechniques de ces matériaux. Par ailleurs la variabilité des formations superficielles (présence ou non de formations sableuses dans les RS par exemple), la présence d’éventuels paléo-chenal, crypto-bétoires et leur rôle dans le drainage des formations superficielles,... montrent l’importance d’une bonne connaissance de la géologie du site avant de concevoir tout aménagement.

### 6.1. CONTENU DE L’ETUDE PREALABLE

#### 6.1.1. Etude des enjeux et du contexte

A l’issue de l’étude préalable, il conviendra notamment de dresser le bilan des enjeux du secteur et les risques liés à la présence de la bétoire :

- Risque hydrologique (risque d’inondation dans le secteur d’études, participation de la bétoire dans l’engouffrement des eaux de ruissellement, participation du fonctionnement de la bétoire aux débits de sources captées à l’aval,...) : récupérer le plan de prévention des inondations pour recenser les zones d’habitations à risque d’inondation, déterminer la présence ou non d’habitations localisées en aval (carte géographique, PLU, Google Earth, observations terrain)...
- Risque géotechnique (infrastructure à proximité,...)
- Risque sanitaire (eaux dégradées s’engouffrant dans la bétoire, bétoire située dans un périmètre de protection, dans bassin d’alimentation de captage (BAC),...)

- Risque hydraulique (bétoire perturbant ou non le fonctionnement d’un ouvrage hydraulique)

Les différents éléments présentés ci-après permettront d’acquérir les données pour dresser ce bilan.

### **6.1.2. Etude du contexte hydrologique**

Une connaissance du fonctionnement hydrologique du secteur et le rôle de la bétoire dans cet hydrosystème est nécessaire. Pour cela il convient de :

- récupérer l’étude hydraulique de bassin versant si existante. Si aucune étude n’existe, faire le bilan sur les secteurs amont et aval de la bétoire :
  - o déterminer les axes de ruissellement (observations terrain en période pluvieuse hivernale et/ou détermination par SIG,...) en recensant les autres bétoires présentes dans le secteur et sur les axes de ruissellement,
  - o évaluer les phénomènes d’érosion en amont (remembrement, haies, mares, ...cf. Atlas Risque d’Erosion),
- déterminer la limite et la surface de l’impluvium de la bétoire, objet de l’aménagement,
- resituer le secteur étudié par rapport à la carte régionale de sensibilité à la battance (cf. Annexe 5), par rapport à la carte de l’Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) réalisée par le BRGM (couche SIG disponible gratuitement sur le site internet du sigessn),
- estimer les volumes infiltrés dans la bétoire (estimation sur le terrain via l’observation des engouffrements en période pluvieuse). Si réalisable, calcul théorique des débits ruisselants : surface bassin versant \* fraction ruisselante de la pluie à partir des valeurs caractéristiques des pluies efficaces au niveau de la région Haute-Normandie),
- déterminer l’occurrence de fonctionnement de la bétoire (observations terrains, enquêtes voisinage,...),
- récupérer les données de traçages existantes (Inventaire régional des traçages à récupérer auprès du BRGM<sup>10</sup>) afin de vérifier l’éventuel lien de cette bétoire avec un captage.

Pour concevoir un aménagement de bétoire, il convient de prendre en compte les différentes venues d’eaux : flux venant de la surface mais également les écoulements hypodermiques (cf. paragraphe suivant).

---

<sup>10</sup> A terme les données de l’Inventaire régionale des Bétoires, Traçages, Exutoires seront disponibles via un site internet public

### 6.1.3. Etude du contexte géologique

#### **Formations superficielles**

Connaitre les formations superficielles est indispensable, d'une part pour quantifier et localiser les écoulements superficiels et d'autre part pour dimensionner et définir le comblement.

Il est ainsi important de :

- déterminer la morphologie de surface : observations de terrain de préférence en période hivernale pluvieuse, décapage élargi de la bétaire (nécessité de la présence d'un géologue ou hydrogéologue au moment du décapage pour observer les éventuels indices de zones de circulations préférentiels des eaux dans les formations superficielles (traces d'hydromorphie)),
- déterminer idéalement la morphologie de sub-surface (méthodes géophysiques). Un point sur les différentes techniques géophysiques utilisables est présenté en Annexe 8,
- repérer l'existence d'éventuels écoulements hypodermiques à l'intérieur de la bétaire.

Des logs de sondages existants peuvent donner des indications précieuses sur la nature des terrains superficiels. La base de données publique Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr/>), librement accessible sur internet, rassemble une quantité significative d'informations de ce type qu'il reste judicieux de consulter.

Il reste nécessaire de reconstituer une coupe lithologique précise de ces formations superficielles, précisant notamment la lithologie, l'épaisseur, les venues d'eau de chaque horizon.

#### **Craie et réseau karstique**

Effectuer également une reconnaissance des réseaux karstiques : forages de reconnaissance géologique de type destructif de petit diamètre avec injection d'eau jusqu'à atteindre la craie. Tous les forages doivent faire l'objet d'un enregistrement des paramètres de foration à savoir :

- mesure de la pression sur l'outil
- mesure de la pression d'injection
- mesure de la pression de rotation
- mesure de la vitesse d'avancement

Le suivi des pertes d'injection sont déterminantes pour la mise en évidence d'un éventuel karst.

Tous les forages réalisés sont ensuite rebouchés.

Il reste *a minima* indispensable de préciser la profondeur du toit de la craie, dans laquelle se développe le réseau karstique.

Concernant la morphologie de la bétoire, il est noté que J. Rodet (Rodet, 1991) précise que : « *les dolines d'effondrement présentent un profil symétrique, le point bas étant situé au centre de la dépression, même si celle-ci est plus longue que large. La perte fossile offre en revanche un profil asymétrique dont le point bas se situe près du versant raide et s'oppose au versant atténué. Elle se présente préférentiellement le long du talweg des vallons qui incisent les plateaux.* »

*La distinction d'avec les dolines résultant d'effondrement souterrain n'est pas évidente. Il semble que des prélèvements par carottage peuvent apporter des indices par la présence, par exemple d'éléments roulés. Le lessivage des éléments non roulés ne semble pas un argument suffisant : il prouve le rôle de perte de la dépression, non pas sa genèse. »*

### **Qualifier l'activité karstique du secteur**

Il convient de vérifier ensuite s'il s'agit d'une bétoire isolée ou présente dans une zone à forte activité karstique. La présence d'anomalies ou d'indices d'effondrements à proximité est particulièrement significative du contexte karstique sous-jacent.

Pour cela :

- récupérer les données de l'inventaire régional des bétoires auprès du BRGM<sup>10</sup> ainsi que l'inventaire communal si existant,
- récupérer les données de l'inventaire national des Mouvements de Terrain ([www.bdmvt.net](http://www.bdmvt.net)), correspondant à des événements karstiques,
- éventuellement, rechercher les bétoires par observation de photos aériennes multitudes,
- vérifier et compléter ces inventaires par une inspection visuelle de terrain, sachant que dans le cas d'une bétoire située en vallée ou talweg, il convient de parcourir l'ensemble du talweg en suivant les écoulements de surface ; la meilleure période pour ces observations, est donc l'hiver après ou pendant des épisodes pluvieux importants.

Le contexte et l'importance de l'activité karstique du secteur conditionneront fortement le choix de l'aménagement retenu.

#### **6.1.4. Première évaluation de la qualité des eaux d'engouffrement**

La qualité des eaux d'engouffrement varie en fonction de l'occupation des sols de l'impluvium de la bétoire. L'illustration 37 présente les différents types de polluants en présence en fonction de l'occupation du sol.

Localisation géographique	Bord de route et zone urbaine	Près des systèmes d’assainissement collectifs ou individuels	Parcelle agricole avec système de drainage	Parcelle agricole (terre labourée)	Prairies permanentes
<b>Type de ruissellement</b>	Ruissellement de type routier, et eaux pluviales mal épurées	Ruissellement d’eaux domestiques usées ou vannes	Eaux de drainage et assainissement agricole	Ruissellement d’eau ayant raviné dans une zone labourée ou croûte de battance	Ruissellement d’eau non absorbée par les végétaux
<b>Type de polluant</b>	- hydrocarbures - huiles de synthèse - particules organiques sur chaussées sèches	- détergents - bactéries - particules organiques	- particules du sol - nitrates et pesticides en excès	- particules du sol	- particules du sol non retenues par les végétaux
<b>Période de fonctionnement</b>	Toute l’année après une précipitation	- l’été, en fonction du taux d’imperméabilisation de la surface en cause - fréquemment, de l’automne au printemps	- en permanence l’hiver - souvent, de l’automne au printemps en fonction du type de culture	Pendant la mise en labours l’hiver et suivant le type de culture	- gros orages d’été - hiver très humide
<b>Qualité des eaux engouffrées</b>	Très polluées	Très polluées	Turbides et polluées	Turbides	Parfois légèrement turbides
<b>Vulnérabilité de la nappe</b>	Très élevée	Très élevée	Elevée en hiver et en période de traitement du sol	Elevées lors d’un hiver très humide, pendant la mise à nu du sol	Faible, voire nulle

N.B. : En plus, il faudra tenir compte de : - la localisation topographique de la bétoire  
- la superficie de l’impluvium  
- la proximité des captages AEP.

(LE MENEZ 1999)

*Illustration 37 : Qualité des eaux d’engouffrement en fonction de la localisation géographique de la bétoire (tableau extrait de la plaquette « Les Bétoires en Haute Normandie, une démarche collective » du pôle de compétence SOL et EAU Haute Normandie)*

Ainsi il convient, à l’intérieur du bassin versant (impluvium) de la bétoire de déterminer :

- les sources potentielles de pollution (fermes, habitations et types d’assainissement, activités industrielles, dépôts,...),
- l’occupation des sols (données Corine Land Cover, PLU et terrain), (couverture végétale, type d’agriculture, différentes activités anthropiques, existence de drainages agricoles, etc...),
- la part de chaque occupation du sol (ce travail peut être automatisé par l’utilisation des logiciels SIG à partir des couches SIG de Corine Land Cover par exemple).

## **6.2. COMPLEMENTS D'ETUDE NECESSAIRES SELON LA LOCALISATION ET LE ROLE DE LA BETOIRE**

### **6.2.1. Cas d'une bétoire située dans un BAC ou dans un périmètre de protection (PP)**

D'ores et déjà, dans ces périmètres où l'infiltration des eaux doit être maîtrisée, un aménagement de bétoire de type modification des écoulements superficiels ou remblayage grossier est exclu. Il s'agit nécessairement de mettre en place un colmatage dont il faut préciser le type.

Vérifier auprès de l'Agence Régionale de Santé (ARS) ou du site Internet Carmen (code d'accès nécessaire pour le site Carmen) si la bétoire se situe à l'intérieur d'un Bassin d'Alimentation de Captage (BAC) ou d'un Périmètre de Protection (PP).

Lorsque la bétoire à traiter se situe dans un BAC ou dans un PP, il convient de vérifier et quantifier l'éventuelle liaison entre la bétoire et le captage AEP :

- Consulter l'inventaire régional des traçages pour connaître les traçages existants sur la bétoire ou dans le secteur (auprès du BRGM ou sur le site internet en construction) ;
- En l'absence de traçage existant, réaliser un traçage avec suivi des différents captages AEP du secteur. Ce traçage devra être quantitatif (réalisation d'une courbe de restitution pour chaque point de suivi, en cas de résultat positif), et devra en particulier permettre de calculer les vitesses de circulations, les taux de dilution ainsi que les taux de restitution. Il devra enfin être réalisé en période de Hautes Eaux. Les outils et méthodes d'analyses devront être constitués de mesures in-situ confirmées par des prélèvements d'échantillons analysés en laboratoire. Enfin le traçage devrait respecter les préconisations du guide méthodologique BRGM/RP-58237-FR (Guide : « Outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques »). Il s'agit particulièrement d'être vigilant sur la définition de la durée de suivi de la restitution du traceur. Pour ce faire, une caractérisation préalable de l'inertie du système karstique (au niveau de son exutoire, d'un forage), de sa réaction aux précipitations... est indispensable ;
- En cas de traçage positif, vérifier l'impact des volumes infiltrés dans la bétoire sur le captage en terme de volume et d'impact d'une contamination afin d'évaluer l'impact qu'aurait le comblement de cette bétoire sur la productivité. Le volume tracé (volume dit de Allen (Allen 1923 in Guizerix & Margrita, 1976) peut être évalué, et doit être comparé au volume d'eau écoulé à la source captée, ainsi qu'au volume infiltré au niveau de la bétoire. La section moyenne du système traçage (défini entre le point d'injection, la bétoire et l'exutoire, le captage AEP) peut en être déduit. (cf p. 125 Guide BRGM/RP-58237-FR). Le calcul du

volume écoulé au niveau du captage, nécessite de disposer d'un suivi des débits en fonction du temps (au mieux au cours de la période hydrologique concomitante des essais) ;

- Un suivi de la turbidité, ainsi que des paramètres physico-chimiques (T°C et Conductivité  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) au cours du temps au niveau de la bétoire et au niveau du captage sur plusieurs cycles hydrologiques, pourrait permettre d'appréhender les modalités de transfert au sein du système (existence de composantes rapides, composantes lentes). L'évolution de la turbidité au sein d'un captage étant complexe, au vu de l'existence de remobilisation selon une hystérésis au cours du temps et du débit, l'interprétation reste complexe. Ce type d'approche doit être complémentaire aux essais de traçage, pour des captages à enjeu. L'interprétation s'effectue en utilisant les méthodes de traitement du signal (BRGM RP-58237-FR).

### **6.2.2. Cas d'une bétoire située dans un cours d'eau**

- Vérifier si la bétoire est en connexion avec une source captée en aval (diverses utilisations possibles : AEP, pisciculture, cressiculture, irrigation,...) :
  - consulter l'inventaire régional des sources et des Traçages (informations à recueillir au près du BRGM<sup>10</sup>) ;
  - vérifier l'usage des différentes sources situées à l'aval ;
  - en cas de sources dont l'utilisation est à enjeu sanitaire ou économique, et en l'absence de traçage existant, réaliser un traçage pour vérifier la connexion de ces points. Ce traçage devra être quantitatif (réalisation d'une courbe de restitution pour chaque point de suivi, en cas de résultat positif), et devra en particulier permettre de calculer les vitesses de circulations, les taux de dilution ainsi que les taux de restitution. Il devra enfin être réalisé en période de Hautes Eaux. Les outils et méthodes d'analyses devront être constitués de mesures in-situ confirmées par des prélèvements d'échantillons analysés en laboratoire. Enfin le traçage devrait respecter les préconisations du guide méthodologique BRGM/RP-58237-FR (Guide : Outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques).
- Analyser les données de débits de cours d'eau (banque Hydro) afin de connaître les variations saisonnières et annuelles de débit, les périodes d'à sec...
- Réaliser une campagne de jaugeages différentiels (à l'aide d'un micromoulinet, saumon magnétique ou de jaugeages chimiques, en fonction

de la configuration du terrain et des ordres de grandeur des débits) en amont et aval des pertes dans le but de :

- connaître les débits infiltrés dans les béttoires,
- comparer ces débits aux débits de la rivière (Banque HYDRO).

### **6.2.3. Cas d'une béttoire ouverte dans un bassin de gestion des eaux usées (lagunes, aires d'infiltration...) ou un bassin de rétention ou infiltration (ouvrage de gestion/de lutte contre les ruissellements et inondations)**

- Récupérer les études de conception de l'ouvrage (AVP, PRO, dossiers de récolement...) et autres documents d'exécution afin de :
  - Vérifier le mode de fonctionnement du bassin (toujours en eau, période d'à sec),
  - Connaître en particulier la conception du fond de l'ouvrage (impermeabilisation par géomembrane, complexe bentonitique, matériaux en place, etc...),
  - Connaître la charge hydraulique au droit de la béttoire (hauteur d'eau maximum, moyenne dans les bassins) (pour le cas des lagunes et aires d'infiltration d'eaux usées),
  - Récupérer les analyses des eaux d'engouffrement si existantes ou réaliser des analyses sinon.

### **6.2.4. Cas d'une béttoire ouverte à proximité immédiate d'une infrastructure**

- Avis d'expert sur le risque d'instabilité, la sécurité et le fonctionnement de l'infrastructure, dans son ensemble,
- Récupérer l'étude géotechnique initiale réalisée dans le cadre des études préalables à la construction de l'infrastructure afin d'observer l'évolution des caractéristiques géotechniques des matériaux déjà en place,
- Récupérer les caractéristiques mécaniques et géométriques de la structure et notamment la nature, profondeur et dimension des fondations,
- Connaître la fonction de l'infrastructure notamment pour évaluer les déformations admissibles.

### **6.2.5. Analyse des caractéristiques géotechniques des matériaux en place**

La réutilisation des matériaux en place utilisables pour l’aménagement (infiltration ou colmatage) doit faire l’objet d’une étude spécifique.

Selon l’objectif de l’aménagement (colmatage ou infiltration), les données à acquérir seront différentes. Le tableau de l’Illustration 38 présente ces différentes données.

Données à acquérir	Moyens d'acquisition
Connaître la capacité des terrains en place à infiltrer ou à imperméabiliser	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesurer le coefficient de perméabilité</li> <li>- Test d'infiltration (Essais Nasberg/Terleskata, Porchet, Matsuo, Müntz,...)</li> </ul>
Evaluer la réutilisation des matériaux et les terrassements	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coupe des formations superficielles (sondages à la tarière, fouilles au tractopelle,...) et analyse des coupes</li> <li>- Faire des essais d'identification GTR en labo (teneur en eau, analyse granulométrique, limites d'Atterberg ou essai au bleu de méthylène)</li> <li>- Faire des essais Proctor avec mesures de l'indice CBR + réaliser un essai de perméabilité à chaque point proctor ;</li> <li>- Essais d'aptitude au traitement (chaux, liants hydrauliques)</li> </ul>

*Illustration 38 : Données à acquérir pour étudier la faisabilité de l'utilisation des matériaux en place pour le traitement de la béttoire*

Dans le cas où les matériaux en place sont réutilisés et traités à la chaux (pratique fréquente dans la région), il conviendra d'évaluer la perméabilité du matériau obtenue après traitement.

## **7. Recommandations concernant la réalisation de dossiers « loi sur l’eau » pour l’aménagement des bétoires**

### **7.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE : DECLARATION OU AUTORISATION ?**

Le bilan des pratiques régionales a montré que les aménagements de bétoires ne faisaient que très rarement l’objet de dossiers réglementaires spécifiques. Les dossiers de déclaration ou d’autorisation dans lesquels apparaissaient des aménagements de bétoires concernaient généralement des aménagements hydrauliques de versants dans le cadre de la lutte contre les ruissellements et les inondations.

Des nomenclatures de la loi sur l’eau sont applicables aux cas d’aménagement de bétoires permettant l’infiltration d’eaux de surface dans les bétoires.

#### **7.1.1. Cas de l’infiltration des eaux de surface dans les bétoires**

L’infiltration d’eaux dans les bétoires entre dans le champ d’application de la loi sur l’eau (article R214-1 du code de l’environnement).

##### Infiltration d’eaux pluviales

Dans la nomenclature annexée à ce décret, à la rubrique 2.1.5.0 sont réglementés les rejets d’eaux pluviales dans les eaux douces superficielles ou sur le sol ou dans le sous-sol, la surface du projet correspondant à la partie du bassin naturel dont les écoulements sont interceptés par le projet, étant :

- Inférieure à 20 Ha : procédure de déclaration,
- Supérieure ou égal à 20 Ha : procédure d’autorisation.

Ainsi, suivant la superficie de l’impluvium de la bétoire, l’infiltration d’eaux pluviales sera soumise à autorisation ou déclaration.

### 7.1.2. Cas du colmatage des bétoires

Si aucun aménagement de versant n'accompagne le comblement d'une bétoire, les volumes de ruissellement à l'aval seront augmentés. Or l'article 640 du Code civil indique que « le propriétaire des fonds supérieurs ne peut rien faire qui aggrave la servitude du fond inférieur ». La servitude dont il est question est définie dans le même article : « les fonds inférieurs sont assujettis envers ceux qui sont plus élevés à recevoir les eaux qui en découlent naturellement sans que la main de l'homme y ait contribué. »

L'article 641 du code civil, prévoit même des indemnités financières : « Si l'usage de ces eaux ou la direction qui leur est donnée aggrave la servitude naturelle d'écoulement établie par l'article 640, une indemnité est due au propriétaire du fond inférieur. »

En revanche, aucune rubrique de la nomenclature de l'article R214-1 du code de l'environnement, ne concerne le cas de comblement de bétoire.

**Etant donné l'impact qu'un aménagement de bétoire peut avoir en termes de changement du fonctionnement hydrologique du système hydrokarstique, en termes de risque d'inondation ou d'impact sur la qualité de la ressource en eau souterraine, des dossiers « loi sur l'eau » incluant une notice d'incidence semblent exigibles dans le cadre de tout aménagement de bétoire (infiltration ou colmatage).**

## 7.2. CONTENU DES DOSSIERS LOI SUR L'EAU POUR LES AMENAGEMENTS DE BETOIRES

Le dossier pourrait comporter :

1. **Une notice explicative** classique comprenant : la présentation du demandeur, l'objet de la demande (point réglementaire, nomenclatures concernées), les principales caractéristiques des aménagements (contexte et objectifs, descriptions techniques), plan général des travaux, emplacements des bétoires à aménager, appréciation sommaire des dépenses.
2. **Un état initial comprenant :**

### Etude hydrologique de la bétoire

- Zone du PPRI dans laquelle se situe la bétoire
- Habitations les plus proches à l'aval de la bétoire, nombre
- Carte du fonctionnement hydraulique du secteur
  - les axes de ruissellement
  - les zones d'infiltration, recensement des autres bétoires présentes dans le secteur et dans les axes de ruissellement,
- Carte de l'impluvium (bassin versant) de la bétoire

- Estimation des débits d’engouffrement moyens de la bétoire
- Capacité d’engouffrement maximale (résultats des tests d’infiltration)
- Détermination de l’occurrence de fonctionnement de la bétoire (observations terrains, enquêtes voisinage,...)
- Bétoire tracée ? en lien avec un captage ? avec une source ?

#### Géologie/hydrogéologie du site

##### Détermination de la morphologie et de la structure de la bétoire

- morphologie de surface : diamètre, profondeur
- morphologie de sub-surface (méthodes géophysiques) : écoulement en profondeur, en subsurface....
- Résultats de la recherche d’éventuels réseaux karstiques en profondeur (résultat de campagne géotechnique)

##### Présence d’anomalies, d’indices d’effondrements à proximité

- Carte présentant les autres bétoires du secteur

##### Première évaluation de la qualité des eaux d’engouffrement

Carte de l’impluvium de la bétoire présentant :

- les sources potentielles de pollution (fermes, habitations et types d’assainissement, activités industrielles, dépôts,...)
- l’occupation des sols (données Corine Land Cover, PLU et terrain),

Détermination de la part qu’occupe chaque occupation du sol dans le total de la surface de l’impluvium.

##### Eventuels résultats d’études géotechniques

- capacité des terrains en place à infiltrer ou à imperméabiliser (tests d’infiltration : Essais Nasberg/Terleskata, Porchet, Matsuo, Müntz,...)
- dans le cas où les matériaux en place sont réutilisés pour l’aménagement de la bétoire : l’étude de faisabilité comprenant :
  - Etude pédologique et coupe des formations superficielles
  - Essais d’identification GTR + essais Proctor (indice CBR)
  - Essais d’aptitude au traitement (chaux, liants hydrauliques)
  - Dans le cas où les matériaux en place sont réutilisés et traités à la chaux : perméabilité du matériau obtenu après traitement.

##### Pour les bétoires situées dans un PP ou un BAC

- Résultats des traçages réalisés entre la bétoire et le captage AEP

##### Pour les bétoires situées dans un cours d’eau

- Carte des sources avec lesquelles la bétoire est en connexion, et finalité des sources captées
- Présentation des éventuels résultats de traçage
- Comparaison de la capacité d’engouffrement de la bétoire (résultat campagne de jaugeage différentiel) et des débits de cours d’eau (banque hydro).

Pour les béttoires ouvertes dans un bassin de rétention/infiltration (ouvrage de gestion/de lutte contre les ruissellements et inondations) ou un bassin de gestion des eaux usées (lagunes, aires d'infiltration...)

- Présentation de la conception initiale de l'ouvrage : rôle exact (rétention/infiltration), imperméabilisation du fond de l'ouvrage ?
- Eléments de fonctionnement de l'ouvrage : charge hydraulique maximum et moyenne au droit de la béttoire, bassin toujours en eau, période d'à sec
  - Vitesse d'infiltration (cas des bassins d'infiltration)
  - Résultats de l'analyse de la qualité des eaux d'engouffrement

Pour les béttoires ouvertes à proximité immédiate d'une infrastructure

- Synthèse de l'étude géotechnique initiale réalisée dans le cadre des études préalables à la construction de l'infrastructure
- Avis d'expert sur le risque de stabilité, la sécurité et le fonctionnement de l'infrastructure.

**3. Une notice d'incidence des aménagements comprenant :**

Une comparaison pour chaque type de risques (géotechnique, hydraulique, sanitaire, hydrologique), de l'état initial et de l'état après aménagement (cf. exemple de l'illustration 39).

Dans le cas de comblement de béttoire, montrer de façon quantitative que la production de ruissellement et les risques d'inondation vers l'aval ne seront pas aggravés.

Dans le cas où un dispositif d'infiltration des eaux est retenu pour l'aménagement d'une béttoire, justifier que tous les autres exutoires (cours d'eau, dispositifs d'infiltration lente) n'étaient pas réalisables dans le cadre du projet.

Présenter également les éventuels impacts des aménagements sur le réseau hydrographique, sur les eaux souterraines.

	<b>Etat initial</b>	<b>Après aménagement</b>
<b>risque hydrologique</b>	des ruissellements importants engendrent des inondations dans la partie aval, au niveau des zones habitées (zone orange du PPRI)	- le traitement par colmatage va augmenter les volumes de ruissellements à l'aval (augmentation fonction de la capacité d'engouffrement de la bétoire) - problématique des ruissellements vers l'aval est prise en compte par la mise en place en amont et en aval d'ouvrages de rétention (prairie inondable) ainsi que de noue à redans permettant de limiter et maîtriser les flux ruisselant vers l'aval (contrôle du débit de fuite);
<b>risque sanitaire</b>	les eaux de ruissellement de qualité dégradée s'infiltrent de façon rapide vers les eaux souterraines vers la bétoire	- le comblement de la bétoire permet d'empêcher les eaux ruisselantes de s'infiltrer de façon rapide vers les eaux souterraines (répondant ainsi aux objectifs fixés par la DCE). - par ailleurs, les prairies inondables permettront une décantation des eaux améliorant ainsi la qualité des eaux rejetées vers l'aval
<b>risque géotechnique</b>	la bétoire se situe en contre bas de la route D28	- une fouille d'une emprise 10 fois supérieure au diamètre de la bétoire a été réalisée avec mise en place d'une géogrille en fond de fouille - étant donné la proximité vis-à-vis de l'axe du corps du petit barrage de la prairie inondable, la bétoire peut constituer un risque pour sa stabilité de ces petits barrages en cas de réouverture ultérieure.
<b>risque hydraulique</b>	Néant (pas d'ouvrage hydraulique à proximité)	le risque hydraulique est de 2 ordres : - disfonctionnement du « bassin » par rupture du corps du barrage du fait d'une déstabilisation des terrains par la réouverture de la bétoire aménagée - - disfonctionnement du « bassin » par apparition de bétoires dans la zone de rétention du fait la mise en charge de la prairie inondable. Une étude géophysique, complétée par des sondages ont été réalisées dans les études préalables de la prairie inondable. Par ailleurs des recherches d'indices de circulations préférentielles seront réalisées par un hydrogéologue au moment du décapage des terrains.

*Illustration 39 : Exemple de la comparaison pour chaque type de risques (géotechnique, hydraulique, sanitaire, hydrologique) de l'état initial et de l'état après aménagement. Cas d'une bétoire située en tête de vallée sèche comportant de nombreuses habitations. Aménagement retenu : colmatage de la bétoire, noues à redents et prairies inondables en amont de la bétoire*

#### **4. Surveillance et entretien des aménagements**

#### **5. Compatibilité avec les documents de référence et d'orientation (Directive cadre européenne 2000/60/CE, Nouveau SDAGE (2010-2015) – compatibilité vis-à-vis des 8 défis et de leurs différentes orientations)**

En annexe, présenter pour chaque aménagement de bétoire une fiche descriptive.



## 8. Autres recommandations

Lors de la conception d'un aménagement de bétaire, le maître d'ouvrage doit se rapprocher

- de la collectivité, du syndicat de bassin versant ou de la communauté de communes selon l'attribution des compétences afin d'obtenir des renseignements sur le fonctionnement hydrologique du site.
- des services de l'Etat afin de connaître les contraintes réglementaires afférentes au projet. Il doit communiquer au maître d'œuvre l'ensemble des éléments issus de la concertation pour concevoir un projet cohérent.

Préconisations :

- vérifier que la bétaire est bien recensée dans l'inventaire régionale, le renseigner sinon via le site : <https://tracages.brgm.fr/>
- renseigner également l'inventaire régional une fois l'aménagement de la bétaire réalisé (<https://tracages.brgm.fr/>).

Chaque aménagement de bétaire doit faire l'objet d'un dossier de récolement après travaux.

Un suivi régulier de l'aménagement d'une bétaire doit être assuré. Les inspections visuelles sont l'occasion de programmer les opérations d'entretien régulier nécessaires aux aménagements. Pour chaque aménagement de bétaire, un cahier d'entretien rappelant les caractéristiques de l'aménagement peut être tenu à jour. Il permet de noter les travaux effectués dans le temps et d'assurer une continuité dans le suivi et l'entretien.

Afin de constituer un retour d'expérience régional pour la Haute-Normandie, il est conseillé de mettre en place un échantillon d'aménagements de bétaires réalisés qui sera suivi à pas de temps régulier (tous les 2-5ans).



## 9. Autres documents de référence

- Aires d'infiltrations des stations d'épurations – guide de conception et de gestion – DISE (Délégation Interservice de l'eau) de Seine Maritime-décembre 2009. Ce document présente les différents types d'aire d'infiltration réalisable, met à disposition des fiches techniques pour leur dimensionnement
- Guide pour la gestion des eaux pluviales urbaines en Seine-Maritime - 2007
- Guide pour la gestion et la surveillance des petits barrages en Seine-Maritime – DISE (Délégation Interservice de l'eau) de Seine-Maritime-novembre 2009
- Petits barrages de ralentissement dynamique en Seine-Maritime – Principe de conception et de réalisation – expertise pour le compte de l'Agence de l'Eau Seine Normandie Cemagref – Juin 2010
- Infiltration des eaux – Document de synthèse Version 3 – Groupe de travail – DISE –Infiltration des eaux – Document de travail – 2002
- Inventaire régional Haute-Normandie des bétaires, traçages et des exutoires commanditée par l'AESN, la Région Haute-Normandie, le Département de l'Eure, le Département de la Seine Maritime et le BRGM
- L'AREAS (Association Régionale pour l'Eude et l'Amélioration des Sols) dont le cœur d'activité est la réduction des ruissellements et ses conséquences (limitation de l'érosion des sols, des pollutions associées, des coulées de boues et des inondations) (<http://www.areas.asso.fr>)
- L'AREHN (Agence Régionale de l'Environnement de Haute-Normandie) (<http://www.arehn.asso.fr>)



## 10. Bibliographie

AESN, AREAS, CG Seine maritime, DDAF, DRAF, Pole de Compétence Sol-Eau. (avril 2003) – *Recensement des ouvrages de lutte contre les inondations en Seine Maritime. Diaporama*. 39 diapos.

AESN, AREAS, CG Seine maritime, DDAF, DRAF, Pole de Compétence Sol-Eau. (décembre 2001) – *Recensement des ouvrages de lutte contre les inondations en Seine Maritime*. Rapport. 81p.

Agence de l’Eau Rhône Méditerranée et Corse. (juin 2006) – Bilan et analyse de la mise en œuvre de périmètres de protection des captages AEP en milieu karstique, Synthèse des préconisations en faveur de l’amélioration des démarches de protection. 28p.

ALLAIN G. (juillet 2008) – Avis préalable à la création d’aménagements hydrauliques de lutte contre les inondations pour le Syndicat Mixte du bassin Versant de l’Austreberthe et du Saffimbec. Rapport. 16p.

ALLAIN G. (février 2007) – Avis préalable à la création d’aménagements hydrauliques de lutte contre les inondations pour le Syndicat du bassin Versant de Clères Montville. Rapport. 20p.

ANTEA. (septembre 2002) – Aménagement hydraulique du sous bassin versant de Brametot, ouvrage 27, Etude géotechnique. Rapport. 16p.

ANTEA. (juin 2002) – Propositions technique et financière pour une étude géotechnique d’un ouvrage hydraulique sur le sous bassin versant de Canville les 2 Eglises.

ANTEA. (1999) – Extrait de l’étude environnementale et d’incidence des captages d’eau souterraine à St Agnan de Cernières. p 45.

ANTEA. (1995) – Définition et cout des travaux à prévoir sur les bétoires de la Croix Rouge, de la Croix Blanche et de st Victor de Chrétienville, Protection de la source des Bruyères, ville de Bernay. 23p.

AQUA-SOL. (juin 2000) – Extrait du dossier de déclaration de travaux au titre de la Loi sur l’Eau sur la commune des Loges pour la gestion des eaux superficielles. 7p.

AREAS (2001) – Recensement des ouvrages de lutttes contre les inondations en Seine Maritime – Décembre 2001.

ASSELIN I. (mars 2007) – Avis hydrologique sur l’aménagement de deux bétoires dans le cadre de la conception d’ouvrages de lutte contre le ruissellement et les inondations sur le SMBVAS. 8p.

BETURE CEREC. (1999) – Extrait de l’étude environnementale du captage de St Antoine La forêt. p 6.

BETURE Infrastructure. (novembre 2007) – Dossier de demande d’autorisation au titre du code de l’environnement, dossier d’enquête préalable à la déclaration d’utilité publique (DUP),

dossier d'enquête préalable à la déclaration d'intérêt général (DIG) pour l'aménagement hydraulique du sous bassin versant de Saint-Paer (tranche 2). 104p.

Bourdeau C and Billaux D. (2006). Etude de l'efficacité de géogrilles pour prévenir l'effondrement local d'une chaussée. Actes du 6<sup>ème</sup> colloque francophone : Rencontres géosynthétiques 2006. Montpellier, France, 12 – 14 juin 2006, pages 289 - 296

BRGM. – Hiérarchisation des bétôires. 3p.

BRGM. (septembre 2005) – Perte de la Risle, lieu-dit Le Val Gallerand, commune de Grosley-sur-Risle, Avis hydrogéologique. Rapport. 30p.

BRIANCON L., VILLARD P (2008). Design of geosynthetic-reinforced platforms spanning localized sinkholes. Geotextiles and Geomembranes 26 (2008) 416–428

BRIARD JL. (février 2001) – SMBVDV, Réalisation d'un bassin de retenue des eaux pluviales, étude géotechnique préalable, commune de la Chapelle sur Dun. Rapport SOLEN. 17p.

BURGEAP. (juillet 2006) – Rapport de phase 3 : extrait de l'étude hydraulique, schémas d'aménagement sur le bassin versant du Val St Martin, communauté de communes de Beaumont le Roger. 8p.

BURGEAP. (avril 1985) – Protection du captage de la ville de Bernay, solution à l'amont : aménagement réalisable sur me bassin d'alimentation. p15-32.

BUSSIERE M. (1996) – L'érosion des sols cultivés en France : manifestation, couts, remèdes. Mémoire DESS, Université de Picardie. 136p.

CEMAGREF. (2005) – Fiche d'analyse de retour d'expérience F02, Aménagements de ralentissement dynamique diffus sur le bassin versant de l'Austreberthe. 11p.

CETE Normandie Centre. (janvier 2002) – *Commune de Totes, Rn27, effondrement*. Rapport des investigations complémentaires. 5p.

CETE Normandie Centre. (septembre 2001) – *RN27, PR29+200 et 32+400, diagnostic sur effondrements*. Rapport. 5p.

CETE Normandie Centre. (mars 2001) –Gonneville-sur-Scie, suivi d'un sondage à la pelle sur un indice de cavité souterraine. Rapport. 3p.

CETE Normandie Centre. (janvier 2001) – RN27, Totes, avis et reconnaissance sur un effondrement. Rapport. 3p.

CHAIB J. (2000) – L'hydraulique douce, de nouvelles conceptions face aux inondations et à la pollution. Connaitre pour Agir n13. AREHN. 4p.

CHAIB J. (2000) – Techniques d'hydraulique douce, maitriser le ruissellement à sa source. Connaitre pour Agir n14. AREHN. 4p.

Chambre de l'Agriculture et des forêts (décembre 2006) – *Pour prévenir la pollution des eaux j'implante une bande enherbée*. Bois-Guillaume. Plaquette. 2p.

Comité Français des Géosynthétiques - Recommandations pour l’emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre, 1990.

Comité Français des Géosynthétiques - Recommandations générales pour la réalisation d’étanchéité par Géomembranes, 1991, Fascicule n°10.

Comité Français des Géosynthétiques - Recommandations générales pour la réalisation d’étanchéité par Géosynthétiques Bentonitiques, 1998, Fascicule n°12.

CORPEN. (2007) – Les fonctions environnementales des zones tampon, protection des eaux. Ch2 Les questions pratiques. p27-64.

DDE-DDAF. (mars 1998) – Rapport au conseil départemental d’hygiène concernant la création de trois bassins de retenues d’eaux pluviales sur le bassin versant de Grandcamp est dans le district de Lillebonne-Notre Dame de Gravenchon. 6p.

DE LA QUERIERE Ph. (février 2005) – Recherche d’indices de bétoires dans le cadre de la réalisation d’une prairie inondable à Anglesqueville Le Bras Long pour le SMBV Durdent, St Valery-Veulettes. 2p.

DE LA QUERIERE Ph. (mars 2002) – Utilisation de bétoire pour évacuer des eaux de surface, note technique. Mt St Aignan. 3p.

DE LA QUERIERE Ph. (septembre 2001) –SIAEPAEU de St Romain de Colbosc, DDE 76 Subdivision de Bolbec, Comblement de la bétoire du bassin n2 des Hauts de St Michel. Diagnostic hydrogéologique et modalités de réalisation. Mont Saint Aignan. 4p.

DE LA QUERIERE Ph. (mars 2000) – *Comblement de bétoire de la craie en Haute-Normandie*. Note technique. Mont Saint Aignan. 4p.

DE LA QUERIERE Ph. (1997) – Plans des aménagements de bétoires et cout estimatif lors de la définition des périmètres de protection du forage de la Forge Subtile.

DE REYNIES E. (mars 1999) – Définition des périmètres de protection du captage des fontaines à Brionne, avis provisoire de l’hydrogéologue agréé, additif au rapport du 02/02/1999. Rapport. 10p. DIREN. BRGM. (mai 2001) – Les remontées de nappe d’eau souterraine en Haute Normandie ; Que faire ? Plaquette de la DIREN Basse Normandie. 5p.

DISE. (décembre 2009) – Aires d’infiltration des stations d’épuration, Guide de conception et de gestion. 54p.

DISE. (novembre 2009) – Guide pour la gestion et surveillance des petits barrages en Seine Maritime. 71p.

DISE, V. FEENY () – Infiltration des eaux, documents de synthèse, version 3. Rapport. 24p.

DOUYER C. (2000-2001) – *Les bétoires en Haute-Normandie*. Plaquette du pôle de compétence SOL et EAU Haute-Normandie. 3p.

DOUYER C. (2000-2001) – *Les bétoires en Haute-Normandie, une démarche individuelle et citoyenne*. Plaquette du pôle de compétence SOL et EAU Haute-Normandie. 3p.

DOUYER C. (2000-2001) – *Les bétôires en Haute-Normandie, une démarche collective*. Plaquette du pôle de compétence SOL et EAU Haute-Normandie. 3p.

DRDAF. (décembre 1997) – Compte-rendu de la réunion du Groupe 'Recherche appliquée' pour le Pole de compétence Sol et Eau Haute Normandie. 13p.

EQS. (avril 1999) – Extrait du dossier de d'autorisation pour la création d'une retenue des eaux pluviales sur le territoire de la commune de Bretteville du Grand Caux, communauté de communes du canton de Goderville. p27-28.

FEENY V. (février 2007) – Guide pour la gestion des eaux pluviales urbaines en Seine maritime. 67p.

FERYN B. de l'ISARA de Lyon. (juillet-août 2003) – Moyens de lutte contre l'érosion et le ruissellement sur les sols cultivés. Diaporama. 8 diapos.

FOURNIER M. (juin 2008) – Fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère de Caumont et incidence des aménagements de bassin versant sur la qualité des eaux du forage des Varras. Rapport. 103p – Université de Rouen.

FOURNIER M., ROSSI A., MOUHRI A., SLIMANI S., MOTELAY A., MASSEI N., DUPONT JP. (mai 2008) – *Impact des aménagements des bétôires sur la turbidité des eaux : ex du captage des Varras (Eure)*. CFH colloque Hydrogéologie et karst au travers des travaux de Michel Lepiller. Rouen. p169-177.

FRANCK C., DE LA QUERRIERE Ph. (décembre 1993) – SIAEP de Thomer Corneuil ; Protection du captage d'alimentation en eau potable de Sylvains-les-Moulins, rechemisage de bétôires. BRGM. 39p.

GINGER Environnement. (janvier 2007) – Rapport de phase 3 analyse des risques et propositions d'actions, réalisation d'une étude de protection des captages de saint Marcel et saint Antoine La forêt, SIDEDA de Bolbec-Gruchet le Valasse. Rapport. 82p.

GRIERE O. (janvier 2010) – Avis hydrogéologique aménagement du bassin de rétention suite à un effondrement pour la communauté de communes de la région de Criquetot l'Esneval. Rapport. 8p.

GRIL JJ., DUVOUX B. () – Maitrise du ruissellement et de l'érosion. p47-49.

HAZA E. KHAY. M. (2005) - Zone de cavités souterraines : le renforcement par géosynthétique prévient le risque d'effondrement localisé, article issu du séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS – Réseau des LCPC, Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris, 11 mai 2005

HORIZONS. (janvier 2002) – Extrait de l'étude globale et intégrée des bassins versants de la Rançon et de la Fontenelle : propositions d'aménagements, SMBV de la Rançon et de la Fontenelle. 6p.

HORIZONS, cabinet CRAQUELIN. (septembre 2001) – Dossier de demande de subvention du Syndicat d'Etude et de Réalisation de l'Assainissement pluvial du bassin de la Lézarde, cahier des plans et estimations pour la lutte contre le ruissellement et les inondations du bassin versant de la Curande. Extrait du Rapport. 3p.

HORIZONS. (mars 1999) - notice d’incidences relative à la gestion des eaux pluviales dans le cadre du projet de construction d’un lotissement sur la commune d’Anquetierville. p24.

HORIZONS. (1997) – Extrait Etude environnementale du captage de Limésy pour le SIAEP de l’Austreberthe. p 34-36.

HORIZONS. (1996) – Extrait de l’étude préalable à la définition des périmètres de protection des captages de Cany-Barville et Ocqueville pour le SAEP d’Ocqueville. p 37-39.

HYDROEXPERT. (mai 2000) – Extrait de l’étude hydrogéologique en vallée de l’Iton, secteur de Damville, phase 1 : état des lieux, pour le conseil Général de l’Eure. p 32-33.

HYDROGEOLOGIE Nord et Ouest. (mars 2005) – Rapport d’étude géotechnique, diagnostic de cavité sur la Rn13 pour la DDE du Calvados. 22p.

IMS RN. (juillet 2009) – Réfection et agrandissement du bassin du bourg, sur la commune de Manéglise, étude géotechnique G0-G12 pour le compte de la CODAH. Rapport. 30p.

INERIS (2007). Evaluation et traitement du risque de fontis lié à l’exploitation minière. Rapport d’études DRS – 07 – 86090 – 05803A.

INERIS (2007). Mise en sécurité des cavités souterraines d’origine anthropiques : Surveillance – traitement. Guide technique. Tritsch J.J.Programme EAT- DRS-02/ Rapport d’études DRS – 07 – 86042 – 02484A. 15/02/2007

INGETEC. (octobre 2006) – effondrements survenus en fond de bassin sur les communes de Rolleville et Montivilliers, suivi des travaux et traitement des bétoires pour la CODAH. 9p.

INGETEC. (octobre 2006) – Rapport de phase 2 : extrait de l’étude de gestion des eaux superficielles sur le bassin versant du Bec, Communauté de communes du plateau du Neubourg. p 6-7, 55-58.

INGETEC. (aout 2005) – Commune de la Chapelle sur Dun, gestion des risques liés aux cavités souterraines, Assistance à maitre d’œuvre, organisation et suivi d’investigations permettant l’identification et le dimensionnement d’un indice de vide. Rapport. 3p.

INGETEC. (septembre 2004) – supervision hydrogéologique et suivi de traitement de deux bétoires, commune d’Autigny, ouvrage de la RD108. Rapport. 7p.

INGETEC. SMBVDV (septembre 2004) – Convention pour une mission complémentaire de suivi et de traitement de deux bétoires.

INGETEC. – supervision hydrogéologique. 1p.

INGETEC. (novembre 2003) – Syndicat mixte du Bassin Versant de l’Austreberthe et du Saffimbec, étude d’aménagement hydraulique du sous-bassin versant du Saussey, phase 3, propositions d’aménagements. Rapport. 9p.

INGETEC. (septembre 2003) – Com. Com. de Conches en Ouche, étude hydraulique sur les bassins versants de Gaudreville la Rivière et d’Emanville à Glisolles, phase 2, propositions d’aménagements. Rapport provisoire. 14p.

INGETEC. (mars 2003) – proposition suite au DCE du SMBVAS pour la lutte contre les inondations sur la commune de Roumare. 5p.

INGETEC. (février 2003) – Com. Com. de St Romain de Colbosc, étude globale phase 3, propositions d'aménagements sur le bassin versant de Saint Laurent. Rapport.107p.

INGETEC. (novembre 2001) – Etude globale phase 2 : Etude hydrologique quantification sur le bassin versant de Saint Laurent, Communauté de communes de St Romain de Colbosc. 14p.

INGETEC. (octobre 2001) – Etude globale, état initial sur le bassin versant de Saint Laurent, Communauté de communes de St Romain de Colbosc. 43p.

INGETEC. (octobre 2001) – Extrait du rapport de dimensionnement et d'estimation financière des prescriptions de l'hydrogéologue agréé pour la protection des points d'eau de Cany-Barville et du Syndicat de la région d'Ocqueville. p 13-19.

INGETEC. (février 2001) – SIAEP de la Vallée de la Saane, Protection du captage de Beauval-en-Caux, protection des bétoires du 'Bois de Terriers' et du 'Bois de Beaumont'. Rapport. 31p.

INGETEC. (2000) – Syndicat d'Eau Potable de l'Austreberthe, protection du captage de Limésy-Becquigny. Dimensionnement des ouvrages de lutte contre l'infiltration des eaux de ruissellement dans quatre bétoires. Rapport. 38p.

JARDANI A. (2007) – Nouvelles approches géophysiques pour l'identification des dolines et des cavités souterraines dans un contexte karstique – Thèse – Université de Rouen

LAIGNEL B. (1997) – Les altérites à silex de l'Ouest du bassin de Paris – Caractérisation lithologique, génèse et utilisation potentielle comme granulats – Documents du BRGM 264.

LAISNE P. (mars 2003) – *traçage à partir d'une bétoire située dans une prairie inondable*. Note méthodologique, prix forfaitaire SOLEN. 11p.

LAISNE P. (2003) – SMBVDV, ouvrage de lutte contre les inondations sur la commune d'Autigny, étude d'infiltration préalable à un traçage dans une bétoire. Rapport SOLEN. 11p.

LEBOULANGER Th. (juillet 1995) – Extrait de l'étude environnementale du captage des Godeliers pour le SAEP de la région de Beuzeville. p 59-60.

LEMENEZ F. (juin 1999) – Bilan des nouvelles techniques d'aménagements bétoire de Haute-Normandie – pôle de compétence SOL et EAU. Rapport de Maîtrise BEP. Université de Rouen.

LEMOINE Y. (2007) – Des moyens de préservation de la ressource haut-normande : les fiches POLLAC, les aménagements de bétoires. Université de Rouen, rapport M2. 70p.

Mairie de St Marie des Champs. (février 2001) – Prescriptions concernant les ouvrages de lutte contre les inondations pour un dossier d'enquête préalable à une DUP et à une demande d'autorisation à Loumare. 6p.

MANIER E. (aout 2003) – La Chapelle sur Dun, effondrement dans un bassin, diagnostic. Rapport CETE. 3p.

MATHON C., DE LA QUERIERE Ph. (septembre 1981) – Effondrement du bassin n°1 de stockage d'eau industrielle à Norville – Compte-rendu de visite – BRGM n°81HNO045.

MEYER R. (décembre 2001) – Commune de la Chapelle sur Dun, ouvrage de lutte contre les inondations. Rapport de l'hydrogéologue agréé. 4p

MIRKOVIC I. (février 2002) – Les vides souterrains : impacts sur les AEP (Adduction d'Eau Potable) et l'aménagement du territoire. Mémoire DESS environnement. Université de Rouen. 33p.

OUVRY JF., CLEMENT D. (2007) – Guide pour la gestion des eaux pluviales urbaines en Seine Maritime. Note technique pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, méthodes et références. AREAS. Rouen. 19p.

PALASSE JR. (juillet 2005) – Recherche de vides, bassin d'infiltration, la Chapelle sur Dun, étude géotechnique. Rapport. 5p.

Perrier H., Simon A. - Lutte contre les effondrements karstiques : des parachutes en géosynthétiques.- Document du LRPC. 1988

Préfet de Seine maritime. (octobre 2000) – Extrait d'un arrêté d'autorisation pour la réalisation d'ouvrages de lutte contre les inondations et le ruissellement pour le SMBVAS. 2p.

Préfet de Seine Maritime. (2000) – Extrait de l'arrêté d'autorisation pour la création d'ouvrage de lutte contre les inondations sur les communes d'Epouville, Montivilliers, Notre Dame du Bec et Rolleville (SERAPBL).2p.

Préfet de Seine Maritime. () – Extrait de l'arrêté d'autorisation sur le bassin versant de la Ferme Paumier (SIVOM).p1, 4 et 5.

Préfet de Seine Maritime. () – Extrait de l'arrêté d'autorisation sur le bassin versant de Grandcamp Est dans le district de Lillebonne-Notre Dame de Gravenchon. p1, 4 et 5.

Préfet de Seine Maritime. (octobre 1998) – Prescriptions délivrées avec les récépissés de déclaration relative au rejet d'eau pluviale d'un lotissement situé à St Jean de Folleville. 2p.

QUESNEL F. (1997) – Cartographie numérique en géologie de surface ; Application aux altérites à silex de l'Ouest du bassin de Paris – Documents du BRGM 263.

RICO G. (1989) – Syndicat d'Adduction d'Eau Potable de la région de Boos, travaux de recherche sur les circulations karstiques dans le bassin du forage de Saint Aubin-Epinay et leur influence sur la turbidité des eaux. Université de Rouen. Rapport. p 51-63.

RODET J. (1991) – La craie et ses karsts – Centre Normand d'études du karst et des cavités du sous-sol et Groupe Seine.

SAFEGE. (janvier 2010) – DUP de protection du point d'eau de Cléville, complément de l'étude environnementale pour le SIAEPA de la région de Foucart-Alvimare. Rapport. 38p.

SAFEGE. (février 2009) – Communauté de l'Agglomération Havraise, aménagement hydraulique d'indices karstiques - Traitement de bétôires, sites de Goderville et d'Ecrainville-demande d'autorisation. Dossier réglementaire. 64p.

SAFEGE. (avril 2008) – Rapport final de phase 3, Etude hydrogéologique du bassin versant de la Lézarde, propositions d'aménagements. Rouen.23p.

SAFEGE. (mars 2008) – Rapport de phase 3, Etude hydrogéologique du bassin versant de la Lézarde, synthèse des opérations de traçages et propositions d'actions. Rouen.39p.

SAFEGE. (mai 2007) – Communauté de l'Agglomération Havraise, Rapport de phase 3 : Etude de la circulation karstique des eaux de ruissellement et propositions d'aménagement. 58p.

SAFEGE. (mai 2006) – Communauté de communes du canton de Beuzeville, Etude des bassins versants de la collectivité, rapport définitif de phase 3. Nanterre. Rapport. 81p.

SAFEGE. (octobre 2004) – Rapport de phase 2 : extrait de l'étude hydraulique des bassins versants de la collectivité de Beuzeville. p 68-69, 83-86.

SAFEGE. (2000) – Rapport de phase 4 : extrait de l'étude globale et intégrée des bassins versants du Fond St Nicolas et de la Rue Sauvage sur la commune d'Auffray. p 37-38.

SAUNIER & ASSOCIES. (février 2009) – Communauté d'Agglomération Havraise, Goderville et Ecrainville, traitement de bétoire. Rapport de projet. 33p.

SAUNIER & ASSOCIES. (septembre 2008) – Communauté d'Agglomération Havraise, Etainhus, traitement de bétoire. Rapport de projet. 28p.

SAUNIER & ASSOCIES. (avril 2008) – Communauté d'Agglomération Havraise, Etainhus, traitement de bétoire, réalisation du dossier d'autorisation en application des articles L.214-1 à L214-6 du Code de l'Environnement. Dossier d'autorisation version 1. 34p.

SCARWELL HJ., LAGANIER R. () – Risques d'inondation et aménagement durable du territoire.

SCE. (septembre 2004) – extrait de l'étude globale du bassin versant de la Croix blanche, communauté de communes Vièvre-Lieuvain. p76-77.

SEEN. (novembre 2003) – SIAEPA de la région de Criqueotot-L'Esneval, protection du captage de St Martin du Bec et lutte contre les inondations, Dossier d'enquête publique. Extrait du rapport. p60.

SEEN. (octobre 2008) – Syndicat de bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec, Aménagement hydraulique du sous bassin versant de saint Helier (tranche 2), dossier d'enquêtes publiques conjointes au titre des Codes de l'environnement et de l'Expropriation. Dossier Loi sur l'Eau. 91p.

SEEN. (octobre 2008) – Syndicat de bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec, Aménagement hydraulique du sous bassin versant de saint Paer (tranche 3), dossier d'enquêtes publiques conjointes au titre des Codes de l'environnement et de l'Expropriation. Dossier Loi sur l'Eau. 79p.

SEEN. (aout 2006) – Syndicat du bassin versant de Cleres-Montville, bassin versant du Cailly ; Lutte contre les inondations, protection de la ressource en eau et préservation des milieux aquatiques. Dossier loi sur l'Eau. 72p.

SEEN. (avril 2006) – Plans d'aménagement du bassin versant de l'Iton, extrait de l'étude hydraulique, dans le cadre de la gestion des eaux superficielles de la Communauté de communes du Plateau du Neubourg.

SODEREF Normandie. (juin 1999) – Extrait de l'étude d'impact : ouvrages de lutte contre les inondations à Notre Dame de Gravenchon. p 43-44 et 46.

SODEREF Normandie. (août 1998) – extrait de l'étude d'environnement du forage AEP de St Pierre Bénouville pour le SIAEPA de la région de Doudeville. p 9-10.

SODEREF Normandie. (1998) – Extrait de l'étude d'environnement du forage AEP de St Ouen sous Brachy pour le SAEPA de la région de Luneray. p 8.

SODEREF Normandie. (1998) – Extrait de la note d'incidences du dossier d'autorisation pour le bassin versant des Barettes, district de la région de Paluel dans le cadre d'ouvrages de lutte contre les inondations. p 10-15, 23, 32-33.

SODEREF Normandie. (1998) – Extrait du dossier d'autorisation pour la création d'ouvrages de lutte contre les inondations sur le bassin versant de la Ravine, dans le district de la région de Lillebonne-Notre Dame de Gravenchon. p 8-15.

SODEREF Normandie. (juin 1997) – Extrait de l'étude d'impact pour la création d'ouvrages de lutte contre les inondations sur le bassin versant de Notre Dame de Gravenchon. p 46.

SODEREF Normandie. (mars 1997) – Extrait de la synthèse des notes d'incidence pour la création d'ouvrages de lutte contre les inondations, district de Lillebonne-Notre Dame de Gravenchon. p 9.

SOGETI Ingénierie. (janvier 2003) – Extrait de la procédure de protection de captage pour l'alimentation en eau potable de Duclair, SIAEPA de la région de Saint Paer. p 3-4.

SOGETI Ingénierie. (2002) – Ville de Dieppe, Protection du captage de la fontaine du Gouffre, étude hydraulique pour l'aménagement de la bétoire d'Auppegard. Mémoire. 43p.

SOGETI. (septembre 2001) – Extrait du chiffrage de la protection du captage de Bouchevilliers, SIAEPA de la région de Bezancourt. p 8.

SOGETI. (juin 2001) – SAEP de la région de Bolbec, étude hydraulique des bétoires pour la protection du forage du Puits Maillé. Bois-Guillaume. Rapport. 52p.

SOGETI. (1997) – Extrait de l'étude d'environnement du captage AEP de la source du Doult Claireau, SAEP de la Vallée de la Risle. p31-35.

Syndicat des Bassins Versants Saane, Vienne et Scie. (décembre 2003) – *Notice d'incidence au titre de la loi sur l'eau, bassin de la Vienne amont*. Rapport. 117p.

Syndicat mixte du Bassin Versant de l'Austreberthe et du Saffimbec (mars 2003) – *Extrait du DQE dans le cadre d'une mission de supervision hydrogéologique à Roumare*. 7p.

TACNET J.M, GOTTELAND P. (2000), Ouvrage de protection contre les risques naturels et ouvrages en sites instables. Utilisation de matériaux grossiers – Renforcement par géosynthétiques – Ouvrages de référence. CEMAGREF, LIRIGM

TOPIN N. (juin 2007) – Problématique des béttoires en station d'épuration (département de Seine Maritime). Etude technique. 40p.

VANDEWIELE A. (1999) – Origines et traitements de la turbidité en Seine Maritime, étude environnementale appliquée à huit captages sensibles. Mémoire DESS, faculté d'Histoire-géographie. Amiens. 57p.

VILLARD P., GOURC J.P. et BLIVET J.C., 2002 : « Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines : une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires ». Revue française de géotechnique,, Volume 99, pp. 23 – 34.

### **Sites Internet :**

<http://www.areas.asso.fr> : liste des syndicats de bassin versant + plaquette

<http://www.univ.lehavre.fr> : prévention des inondations

<http://books.google.fr> : SCARWELL HJ., LAGANIER R., ROMI R. – *Risque d'inondation et aménagement durable du territoire.*

GRIL JJ., DUVOUX B. – *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion.*

<http://www.scienceaction.asso.fr> : vidéoconférence – *Aménagement des béttoires et des points noirs dans un karst.* Colloque 4-5 mai 2006.

<http://www.polytech.free.fr> : Impact des aménagements des béttoires sur la turbidité.

<http://www.ahren.asso.fr> : L'hydraulique douce

<http://champslibres.wordpress.com> : Béttoire en plein champs

<http://www.roumois.fr> : colloque 'Les phytosanitaires'

<http://www.haute-normandie.pref.gouv.fr> : Les risques naturels

<http://www.eau-seine-normandie.fr> : ZAR Haute Normandie

<http://www.u-picardie.fr> : BUSSIERE M. – *La lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols.*

<http://www.ecologie.gouv.fr> : Maîtrise collective par les agriculteurs

<http://draf.haute-normandie.agriculture.gouv.fr> : carte des aménagements hydrauliques dans le 76.

<http://www.cra-normandie.fr> : Solutions agronomiques

<http://haute-normandie.sante.gouv.fr> : protection qualitative de la ressource.

<http://www.smbvas.fr> : les ruissellements d'origine agricole

<http://www.geotextiles-geogrilles.fr/> : Géosynthétiques

**Plans :**

Travaux proposés : détail lieu-dit Les quatre Fermes

Travaux proposés : détail lieu-dit Hambuc

Travaux proposés : détail lieu-dit Les Rouelles



# **Annexe 1**

-

## **Typologie des bétaires**



**Pertes ponctuelles** : doline de faible profondeur et faible diamètre ou simple orifice pluri-centimétriques à la surface du sol



**Bétaire n°10129** : bétaire fraîchement ouverte – mottes d’herbes effondrées encore visibles dans la bétaire (observation BRGM du 26/11/2009)



2 bétaires nouvellement formées dans l’axe d’un talweg dans le secteur de Fontaine-le-Dun le lendemain de fortes précipitations (observation BRGM de janvier 2009)



Orifice d’une bétaire située dans le fossé creusé dans le fond d’un Talweg – vue sur une bouteille de soda se dirigeant vers l’orifice

*Bétaires observées le lendemain de fortes précipitations (Secteur Fontaine-le-Dun - janvier 2009)*

**Doline bétoire** : doline prononcée (diamètre et profondeur importants) faisant apparaître en son fond des orifices centimétriques engouffrant les eaux



**Doline Bétoire n°10079** : effondrement du 04/11/2009 au niveau d'une route à Saint Jouin de Bruneval – diamètre de l'ordre d'une dizaine de mètres (observation BRGM du 06/11/2009) – Bétoire recevant les eaux des talwegs inondés à l'amont



**Doline bétoire n°10867** : doline bétoire de grande dimension : profondeur 6m et diamètre 10m environ (observation BRGM du 27/11/2009)



**Doline bétoire n°8098** : observation de ravinements et de ruissellements s'engouffrant dans la bétoire (observation BRGM du 27/11/2009)



**Dolines coalescentes** : forme ovale dont la plus grande dimension est dans le sens du talweg



**Bétairie n°14257** : bétaires coalescentes dans un talweg de la commune d’Yport (observation BRGM du 28/04/2010)



## **Annexe 2**

-

### **Exemples d’aménagements de bétaires non réalisés dans les règles de l’art**





**Doline bétairie n°10038** – Bétairie recevant les eaux turbides de ruissellement du bourg (bétairie purgée par son propriétaire et comblée par des gravats afin de conserver son pouvoir infiltrant et éviter les inondations) (observation BRGM du 20/11/2009)



**Bétairie n°9991** – colmatée par du tout venant (observation BRGM du 02/12/2009)



**Bétairie** colmatée par divers déchets (pneus, plastiques,...)



**Bétairie** colmatée par divers déchets surmontés d'une carcasse de voiture (observation BRGM d'août 2008)



**Doline bétôire n°10867** : bétôire recevant des rejets de drains agricoles (observation BRGM du 27/11/2009)



Bétôire comblée par divers déchets



Bétôires recevant une canalisation de rejet d'eau usées

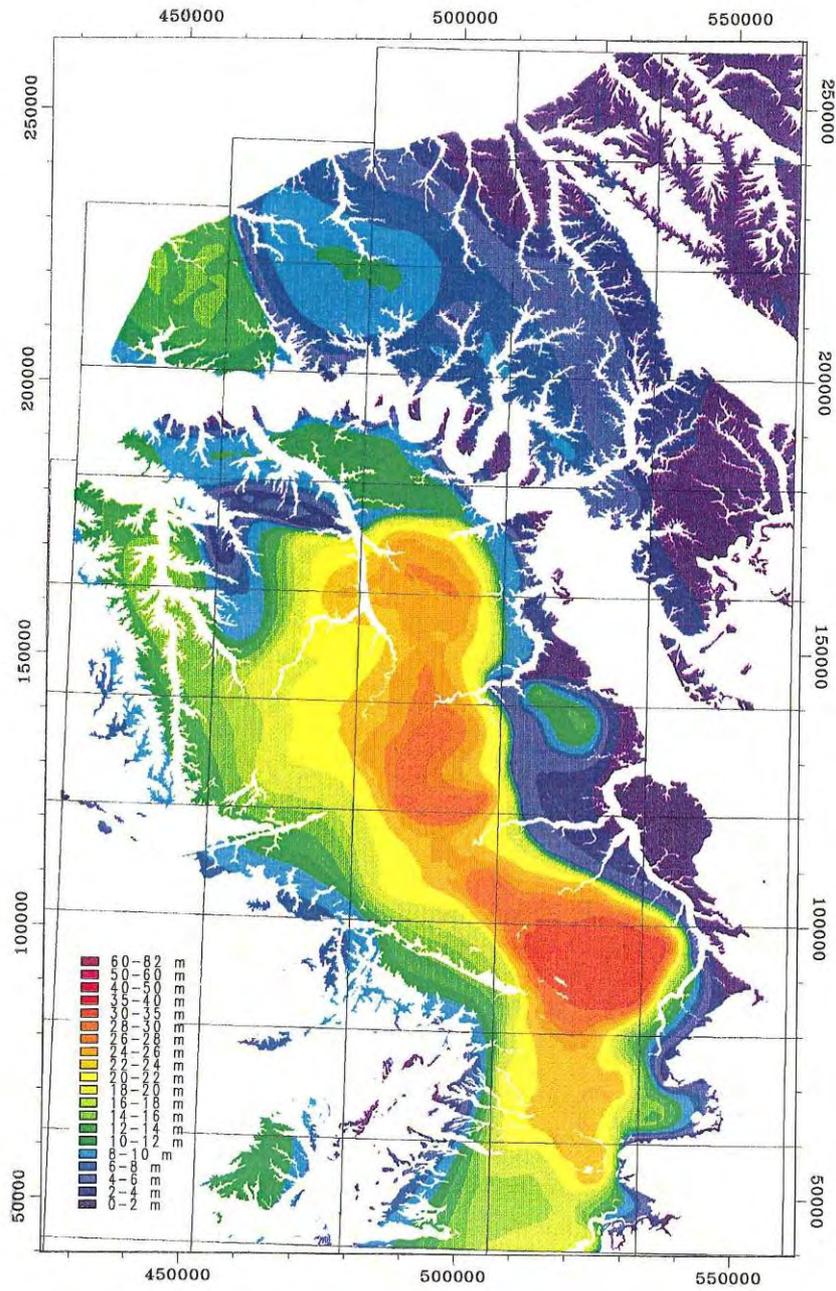
## **Annexe 3**

-

### **Carte des épaisseurs moyennnes régionales des RS (extrait de la Thèse de F. Quesnel, 1997)**



**Figure 5 :**  
**Epaisseurs moyennes régionales de RS (krigeage SynerGIS)**  
Echelle : 1/1 000 000 - projection Lambert I nord



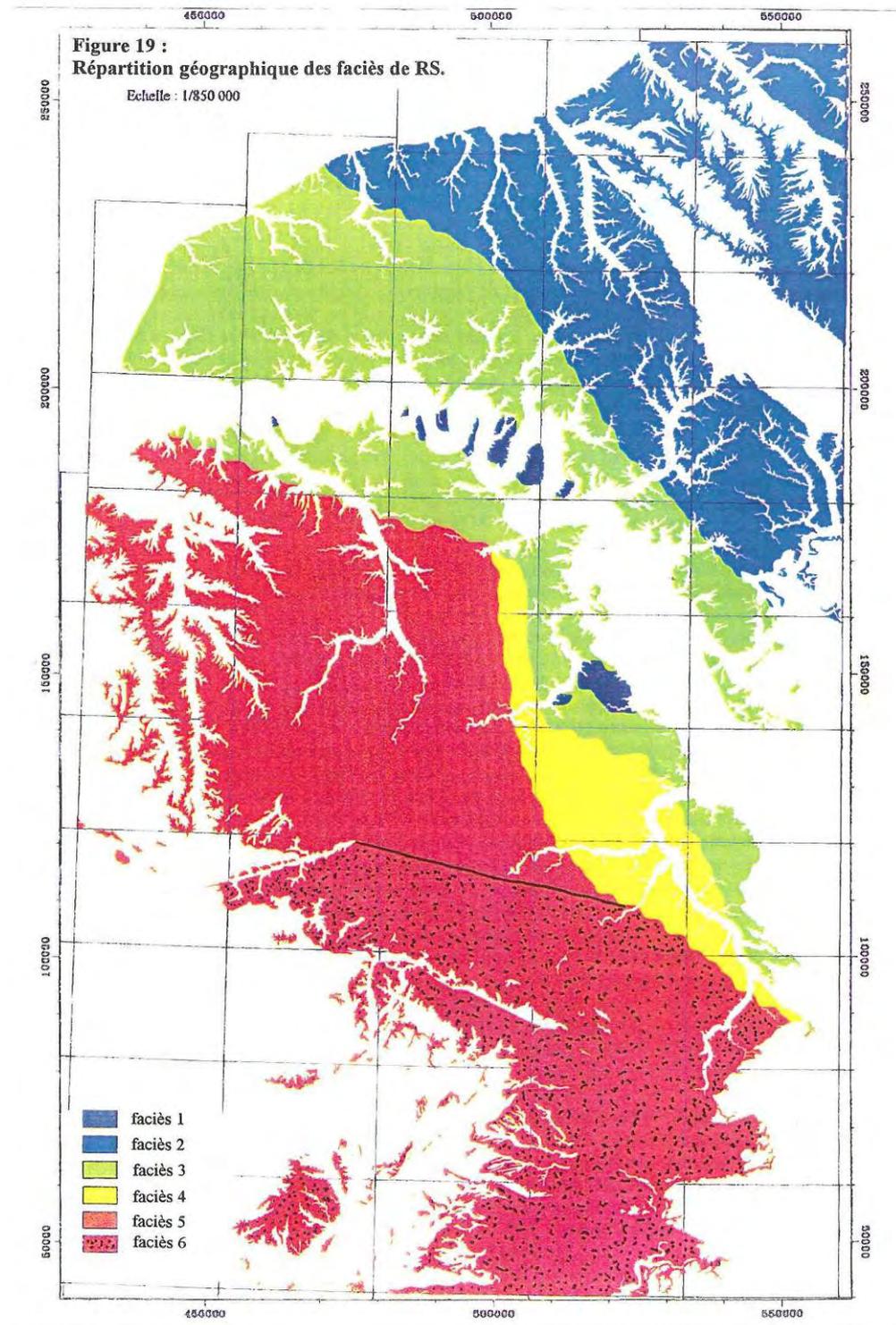


## **Annexe 4**

-

### **Répartition géographique des faciès de RS (extrait de la Thèse de B. Laignel, 1997)**







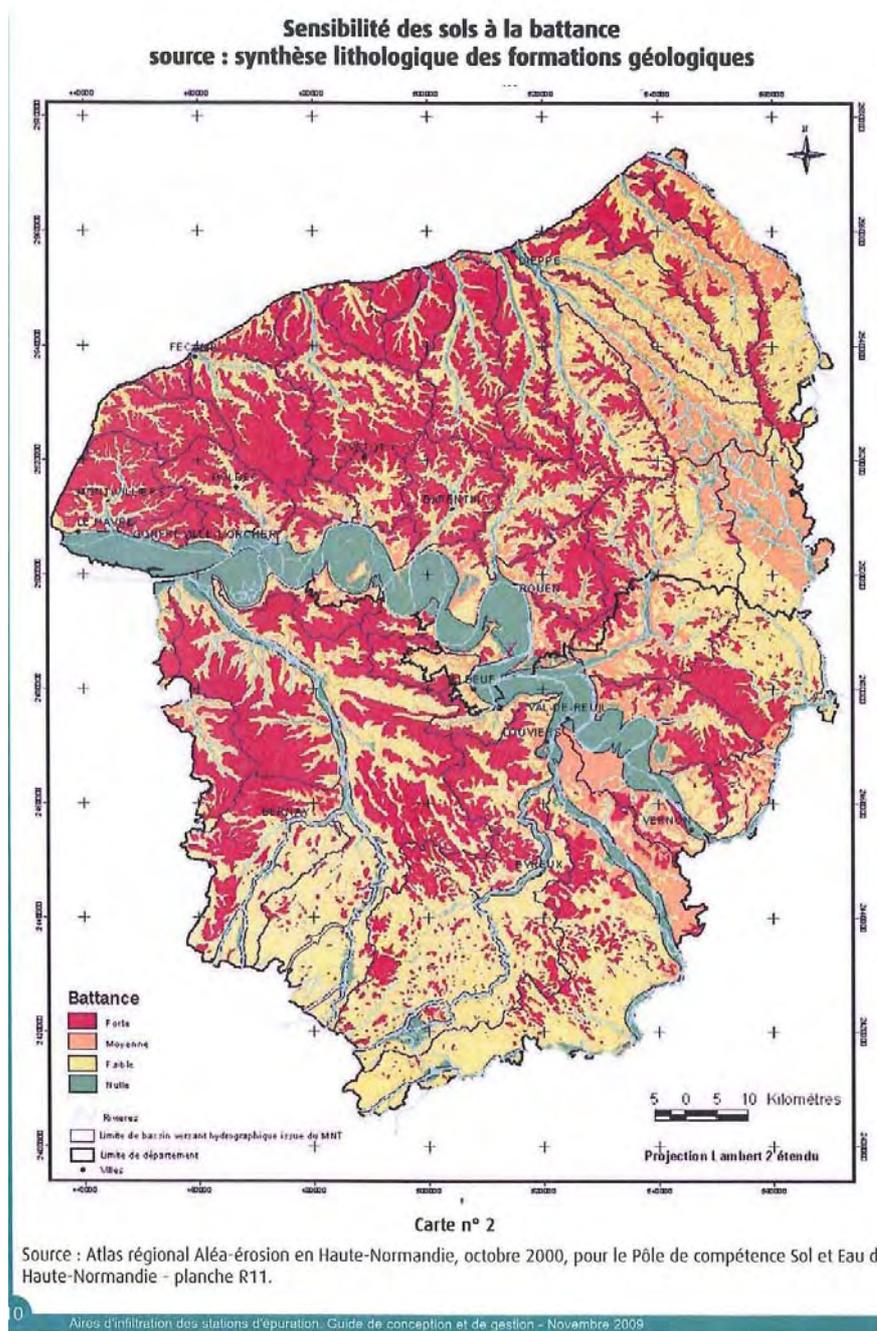
## **Annexe 5**

-

### **Carte de sensibilité des sols à la battance**

**(extrait du guide de conception et de gestion des  
aires d’infiltration des stations d’épuration de la  
DISE 76)**







## **Annexe 6**

-

### **Etat de l’art : types d’aménagements de béttoires rencontrés dans les 7 contextes identifiés**

1. Dans un ouvrage hydraulique
2. Sous ou à proximité immédiate d’un ouvrage hydraulique
3. En aval d’un ouvrage hydraulique
4. Dans une zone sans ouvrage structurant
5. Sous ou proche d’une infrastructure
6. Dans un fossé
7. Dans ou proche d’une rivière



# Aménagement des bétaires en Haute-Normandie

*Phase 1 : Etat des lieux des techniques  
d'aménagements de bétaire*



vendredi 10 septembre 2010

## Présentation des aménagements des bétaires

### > Localisation des bétaires

- 1. Dans un ouvrage hydraulique
- 2. Sous ou à proximité immédiate d'un ouvrage hydraulique structurant
- 3. En aval d'un ouvrage hydraulique
- 4. Dans une zone sans ouvrage structurant
- 5. Sous ou à proximité immédiate d'une infrastructure
- 6. Dans un fossé
- 7. Dans ou proche d'une rivière



SARIGGRCOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

> 2

## Présentation des aménagements

### 1. Dans un bassin hydraulique

#### > Types d'aménagement :

- Colmatage étanche :
  - bassin du bourg de Manéglise
  - bassin du Val des Francs
  - bassin de Thomer la Sogne
  - bassin du Saussay
  - bassin du Gourney
  - bassin de Bretteville en Caux
- Dérivation de flux partielle :
  - bassin de lagunage à Criquetot l'Esneval
- Dérivation de flux totale :
  - bassin de Blacqueville



SARIGRCOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

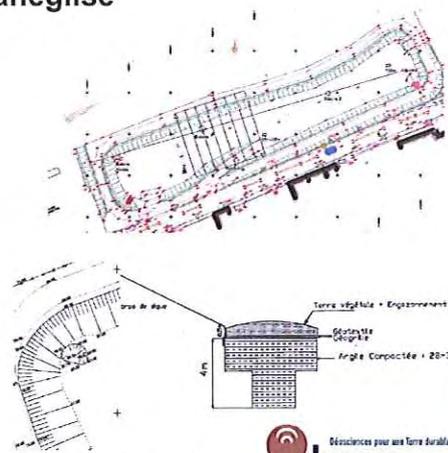
> 3

### 1. Dans un bassin hydraulique

#### Colmatage étanche

#### > Bassin du bourg de Manéglise

- Purge
- Compactage d'argile
- Géogrille
- Géotextile
- Glacis



Source : Saunier et Associés  
Maître d'ouvrage : CODAH



SARIGRCOISGR HNO

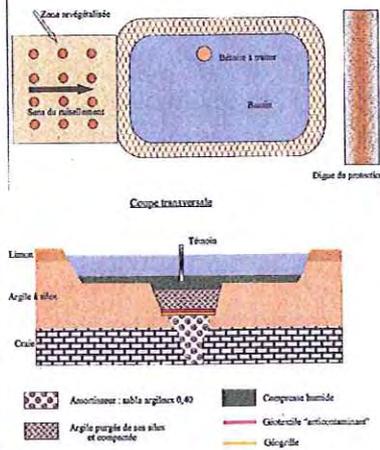
vendredi 10 septembre 2010

> 4

# 1. Dans un bassin hydraulique

Colmatage étanche

## > Bassin du Val des Francs



- creusement de la bêteoire sur 2 mètres
- pose d'un « amortisseur » : matériaux calibrés (sable argileux 0,40) remplissant entièrement la bêteoire
- pose d'une géogrille et d'un géotextile anti-contaminant
- pose d'argile compactée (argile extraite sur place et entièrement purgée de ses silex)
- pose d'une couche humidificatrice (= compresse humide), constituée de terre végétale, extraite sur place et recouvre entièrement l'ouvrage.
- pose d'un témoin sur la zone traitée afin de pouvoir localiser l'ouvrage et suivre son évolution.

Source : Y. LEMOINE



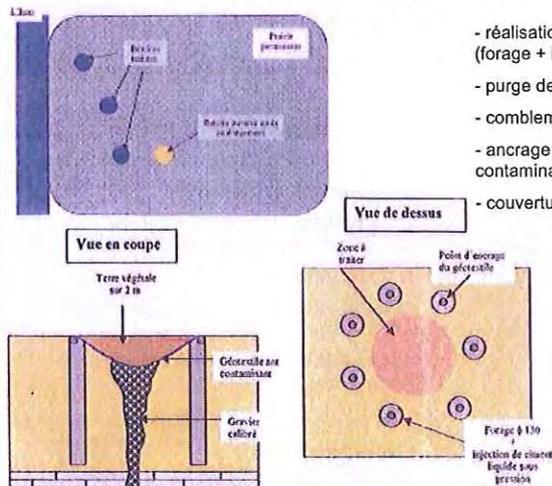
vendredi 10 septembre 2010

> 5

# 1. Dans un bassin hydraulique

Colmatage étanche

## > Bassin à Thomer la Sogne



- réalisation de pieux d'ancrage en ciment (forage + injection ciment liquide)
- purge de la bêteoire
- comblement par du gravier calibré
- ancrage des pieux du géotextile anti-contaminant
- couverture de 2 m de terre végétale

Source : N. TOPIN



vendredi 10 septembre 2010

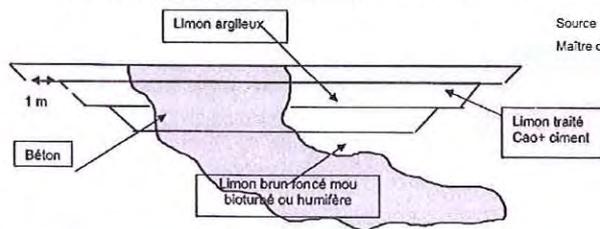
> 6

## 1. Dans un bassin hydraulique

Colmatage étanche

### > Bassin du Saussay

- purge : enlèvement des limons bruns foncés bioturbés inconsistants jusqu'à l'encaissement constitué de limons bruns silteux soit d'argile brun ocre à rougeâtre à silex
- massif de substitution :
  - 1 m minimum de béton dosé à 250 kg/m<sup>3</sup>
  - 1 m de matériau limon argileux traité à la chaux-ciment servant de dalle de répartition si réactivation de la bêteoire
  - 0.70 m de limons argileux A2m, à moins de 15% > 400 µm
  - 0.30 m de terre végétale en couverture contre la dessiccation



Source : Hydrogéotechnique Nord Ouest  
Maître d'ouvrage : SMBVAS



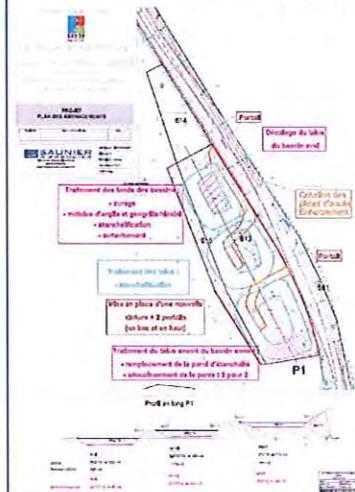
vendredi 10 septembre 2010

> 7

## 1. Dans un bassin hydraulique

Colmatage étanche

### > Bassin de la côte du Gourney



- Au nord de Gonfreville-l'Orcher et au sud du chemin de fer
- Ouverture de plusieurs bêteires dans les trois bassins en cascade
- Travaux prévus pour avril 2010 :
  - curage et évacuation des terres polluées,
  - pose de matelas d'argile,
  - PEHD retiré et remplacé par des géogrigilles bi axial (sur talus)
  - enherbement.
- Création d'une nouvelle rampe pour accéder au fond du bassin.
- Etanchéification du fond par un complexe bentonitique.

Source : Saunier et Associés  
Maître d'ouvrage : CODAH



vendredi 10 septembre 2010

> 8

## 1. Dans un bassin hydraulique

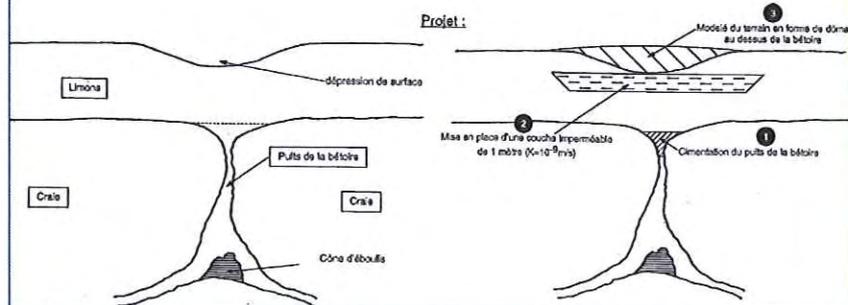
### Colmatage étanche

#### > Bêtoire à Bretteville du Grand Caux : colmatage

- bêtoire localisée dans la zone submersible du barrage en projet
- cimentation des fissures de la bêtoire
- mise en place d'une couche imperméable ( $k = 10^{-9}$  m/s) d'1 m d'épaisseur
- modeler le terrain en forme de dôme au dessus de la bêtoire pour éviter toute stagnation

Source : EQS

Maître d'ouvrage : Communauté de communes du canton de Goderville



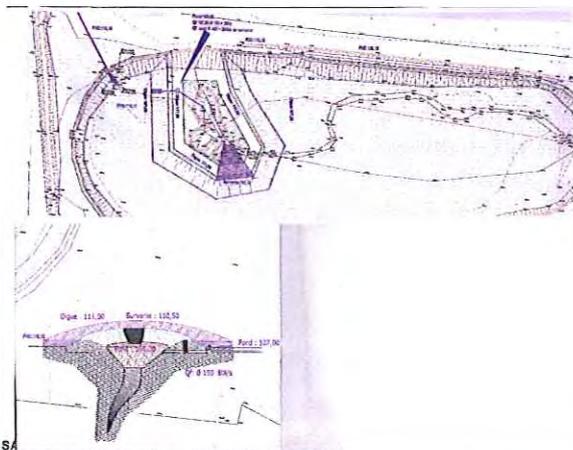
vendredi 10 septembre 2010

> 9

## 1. Dans un bassin hydraulique

### Dérivation partielle des flux

#### > Bassin de lagunage de Criquetôt l'Esneval



- purge de la bêtoire
- massif filtrant
- autour de la bêtoire :
  - merlon de ceinturage
  - débit de fuite
  - surverse

Source : DDAF

Maître d'ouvrage : Communauté de communes de Criquetôt l'Esneval



vendredi 10 septembre 2010

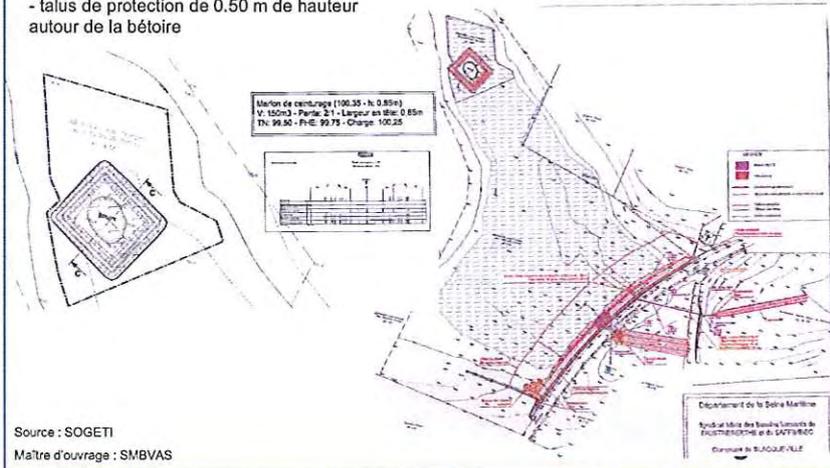
> 10

## 1. Dans un bassin hydraulique

Dérivation totale  
des flux

### > Béttoire dans bassin à Blacqueville

- talus de protection de 0.50 m de hauteur  
autour de la béttoire



## Présentation des aménagements

### 2. Sous ou proche d'un ouvrage hydraulique structurant

#### > Types d'aménagement :

- Colmatage étanche :
  - bassin de Blacqueville
  - bassin à Auffay
  - bassin des Hauts de Saint Michel
  - bassin à Ethainus

SARIGRCOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

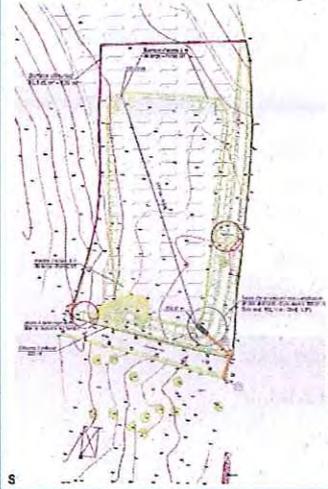
Désobstacles pour une Terre durable  
**brgm**

> 12

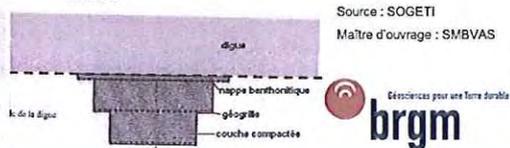
## 2. Sous ou proche d'un ouvrage hydraulique structurant

Colmatage étanche

### > Bassin de Blacqueville



- décapage du terrain naturel sur 3 ml en pourtour (épaisseur 30cm)
- déblai : sur 3 m en pourtour de la bêteoire avec 70 cm d'épaisseur, sur 1 m en retrait de la 2<sup>nd</sup> phase et sur une épaisseur de 2 m, sur 1 m en retrait de la 3<sup>ème</sup> phase et sur 2 m d'épaisseur,
- remblai méthodiquement compacté par couche de 20 cm jusqu'à 1 m sous le TN en matériaux traités revêtus de 3 géogrilles de 35 DaN
- pose d'une nappe benthonitique
- pose de l'ouvrage digue sur l'ancien indice de bêteoire



Source : SOGETI  
Maître d'ouvrage : SMBVAS



vendredi 10 septembre 2010

> 13

## 2. Sous ou proche d'un ouvrage hydraulique structurant

Colmatage étanche

### > Bassin d'Auffay

Bêteoire située à 10m en amont du corps de digue en construction :

- purge complète jusqu' à 1.50 m où l'orifice n'est plus visible
- remblaiement avec des limons traités
- pose d'une dalle en béton (5\*5m)
- couverture végétale avec un repère visuel

Solution alternative non retenue :

- Matelas alternant géomembranes et argiles

SARIGGRCOISGR HNO

Source : L. TOPIN, SBV Saane, Vienne, Scie



vendredi 10 septembre 2010

> 14

## 2. Sous ou proche d'un ouvrage hydraulique structurant

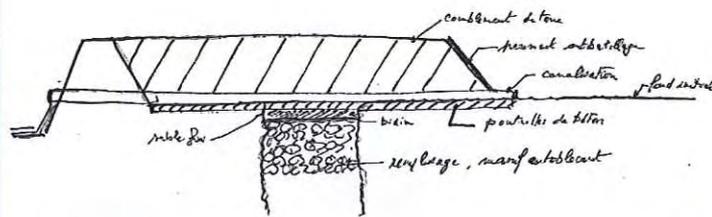
Colmatage étanche

### > Bassin des Hauts de Saint Michel

- Succession de bassins en fond thalweg au sud de Saint Romain de Colbosc

Source : Ph. DE LA QUERIERE

Maître d'ouvrage : SIAEP de Saint Romain de Colbosc



ciences pour une Terre durable  
**gm**

vendredi 10 septembre 2010

> 15

## 2. Sous ou proche d'un ouvrage hydraulique structurant

Colmatage étanche

### > Bassin à Ethainus

- Purge sur 4 m en pourtour et sur 1 m de profondeur
- Purge concentrique à la 1<sup>ère</sup> et d'un diamètre < de 3 m par rapport à la 1<sup>ère</sup>
- Purge concentrique à la 2<sup>ème</sup> et d'un diamètre < de 2 m par rapport à la 1<sup>ère</sup>

-Fouille 3 comblée avec un sol calibré 0/40, compacté avec un godet (amortisseur)

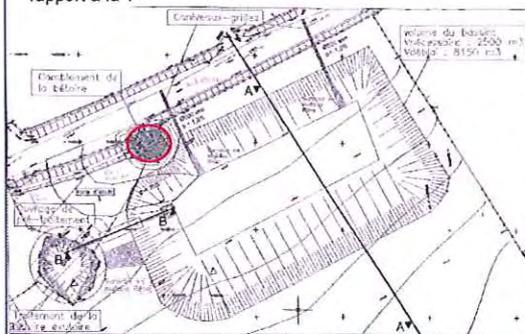
- Pose d'une géogridde sur toute la surface de l'excavation de la 2<sup>nde</sup> purge (à - 3m/TN) et de la 1<sup>ère</sup> purge

- Remplissage des excavations 1 et 2 par de l'argile purgée, de faible perméabilité (coeff < 10-6m/s), compactée par couche de 20-30 cm

- témoin posé à l'aplomb de la bête pour contrôler l'évolution

Source : Saunier et Associés

Maître d'ouvrage : CODAH



ciences pour une Terre durable  
**brgm**

vendredi 10 septembre 2010

> 16

## Présentation des aménagements

### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

#### > Types d'aménagement :

- Colmatage étanche :
  - Ecrainville
- Dérivation totale des flux :
  - Saint Helier
  - Saussay
  - Saint Paër (2 exemples)
- Aménagement en puits d'infiltration
  - Ethainus
- Comblement par massif filtrant
  - Fosse Cossex



SARIGRCSOISGR HNO

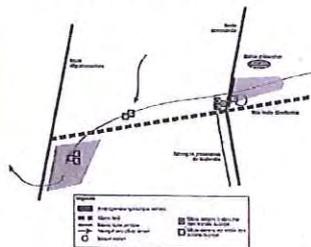
vendredi 10 septembre 2010

> 17

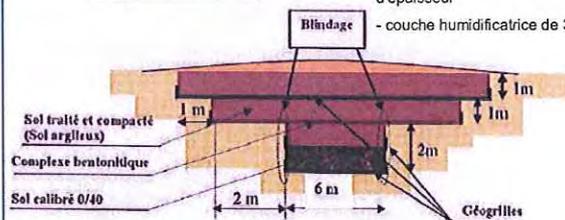
### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

#### Colmatage étanche

#### > Ecrainville



- Purge sur 2 m en pourtour et 1 m de profondeur
- 2<sup>ème</sup> purge concentrique à la 1<sup>ère</sup> d'un diamètre <math>< 1\text{ m}</math> à la première et 2 m de profondeur
- 3<sup>ème</sup> purge concentrique à la 2<sup>nd</sup>, d'un diamètre <math>< 2\text{ m}</math> à la première sur 2 m de profondeur.
- pose d'une géo grille (type Huesker Fornit 20/20) de maintien sur le fond des fouilles 1 et 3 ainsi qu'à 3 m de profondeur (sur la grave 0/40mm)
- pose d'un complexe bentonitique sur le fond de fouille 2 pour améliorer l'imperméabilité de l'aménagement
- comblement des excavations par du sol argileux de faible perméabilité (coeff <math>< 10^{-6}\text{ m/s}</math>) compacté par couche de 20-30 cm d'épaisseur
- couche humidificatrice de 30 cm d'épaisseur en forme de dôme



Source : Saunier et Associés  
Maître d'ouvrage : CODAH



vendredi 10 septembre 2010

> 18

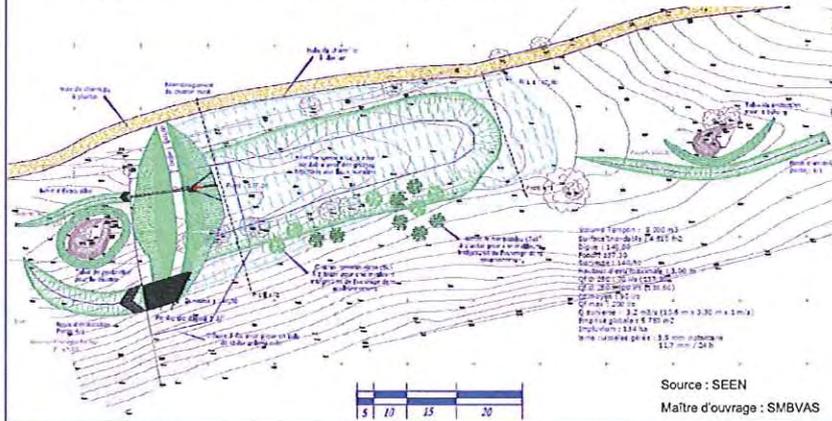
### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

Dérivation totale des flux

#### > Saint Helier

Maîtrise des ruissellement et protection de la ressource

- 2 bétoires en amont et à l'aval de la digue et de la prairie inondable
- Talus de protection pour éviter l'infiltration + noue pour orienter les écoulements



vendredi 10 septembre 2010

> 19

### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

Dérivation totale des flux

#### > Saussay



- Ouverture de bétoire à l'aval d'un barrage imperméabilisé
- shuntage de la bétoire par la mise en place d'une noue qui oriente le ruissellement vers le fossé

SARIGRCCOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

Source : SOGETI

Maître d'ouvrage : SMBVAS



> 20

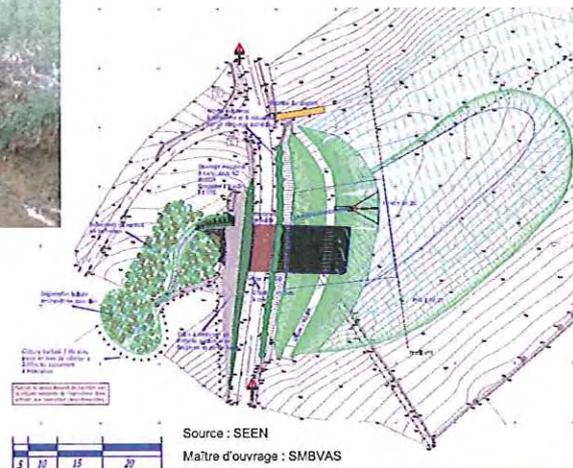
### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

Dérivation totale des flux

#### > Saint Paër



- Noe en aval du barrage pour contourner la béttoire située dans la zone boisée



SARIGR03VGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

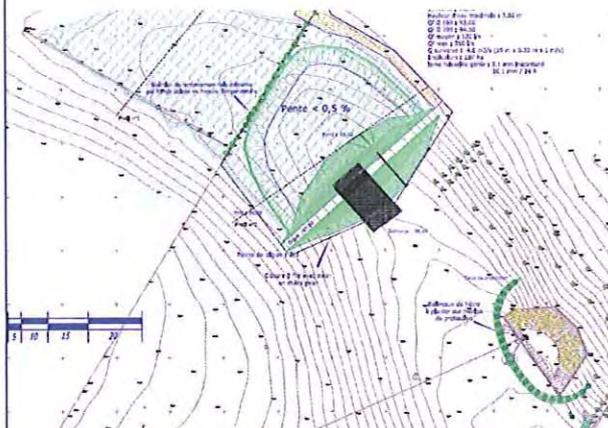
> 21

### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

Dérivation totale des flux

#### > Saint Paër

- Talus de protection planté d'arbres pour dévier les eaux issues de l'ouvrage hydraulique amont



Source : SEEN

Maître d'ouvrage : SMBVAS



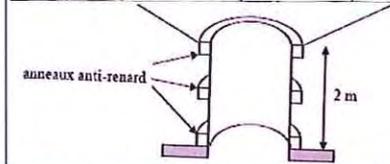
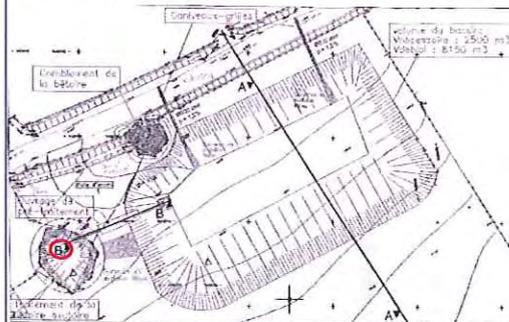
vendredi 10 septembre 2010

> 22

### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

#### Aménagement en puits d'infiltration

#### > Bassin à Ethainus



- purge des parois de l'effondrement
- adoucissement des parois pour augmenter la stabilité
- destruction des parois existantes du puits, remplacées par un cuvelage en béton
- cuvelage : conduite avec anneaux anti-renard, ancrée à 2 m en dessous du niveau bas de l'exutoire sur une dalle béton trouée au centre
- dalle coulée sur place, ferrillée et l'orifice central est renforcée par ferrillage
- remplissage du puits par des matériaux grossiers d'un diamètre supérieur à 200 mm
- remplissage des surfaces de l'aménagement par un matelas de gabions ou des enrochements. Matelas continu de la surverse à l'exutoire.
- des enrochements reposeront sur le cuvelage pour limiter les infiltrations entre ce dernier et le sol

Source : Saunier et Associés  
Maître d'ouvrage : CODAH



vendredi 10 septembre 2010

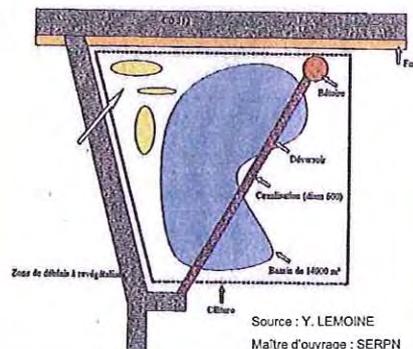
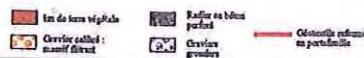
> 23

### 3. En aval d'un ouvrage hydraulique

#### Comblement par massif filtrant

#### > Bétoire Fosse Cossex

- création d'un bassin de rétention béton décapée
- mise en place d'un massif filtrant composé :
  - de graviers grossiers dans lesquels la canalisation d'eau débouche
  - d'un radier en béton perforé
  - de gravier calibré entouré d'une géogrille
  - couverture d'1 m de terre végétale



Source : Y. LEMOINE  
Maître d'ouvrage : SERPN

vendredi 10 septembre 2010

> 24

## Présentation des aménagements

### 4. Zone sans ouvrage structurant

#### > Types d'aménagement :

- Bétoire laissée en l'état :
  - Bois de Beaumont et Bois des Terriers
- Remblaiement grossier
- Comblement par massif filtrant :
  - La Haye et Le Noyer
- Colmatage étanche :
  - Goderville et Le Petit Moulin
- Dérivation partielle des flux :
  - Goderville
- Dérivation totale des flux :
  - Saint Helier et Saint Paër
- Aménagement en puits d'infiltration (2 exemples)



SARIGRCSOISGR HNO

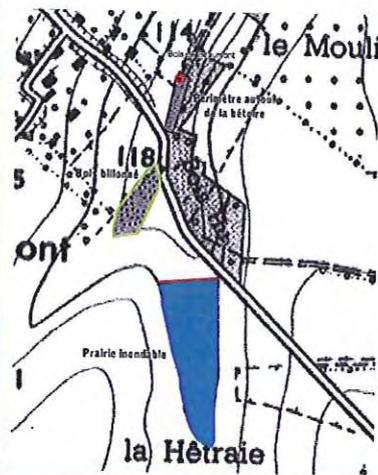
vendredi 10 septembre 2010

> 25

### 4. Zone sans ouvrage structurant

Bétoire laissée en l'état

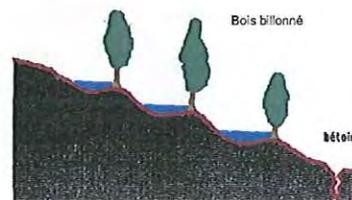
#### > Bétoire du Bois de Beaumont



- mise en place d'une digue avec prairie inondable (stockage de 4 à 5 000 m<sup>3</sup>) pour le 1<sup>er</sup> sous bassin versant
- mise en place d'un bois billonné dans l'angle de la prairie pour le 2<sup>ème</sup> sous bassin versant

Source : INGETEC

Maître d'ouvrage : SIAEPA de la Vallée de la Saane



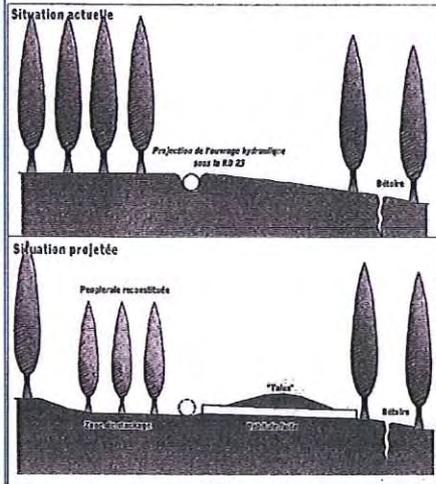
vendredi 10 septembre 2010

> 26

## 4. Zone sans ouvrage structurant

Bétoire laissée en l'état

### > Bétoire du Bois des Terriers



- création d'un stockage tampon (5 à 7 000 m<sup>3</sup>) à la place d'une partie de la peupleraie afin de diminuer la turbidité au captage de Beauval en Caux

Source : INGETEC

Maître d'ouvrage : SIAEPA de la Vallée de la Saane



Écociences pour une Terre durable  
**brgm**

vendredi 10 septembre 2010

> 27

## 4. Zone sans ouvrage structurant

Remblaiement grossier

### > Bétoire de Cocusseville

Figure 4-5 : Configuration actuelle du site de Cocusseville

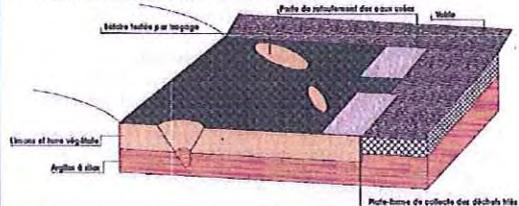
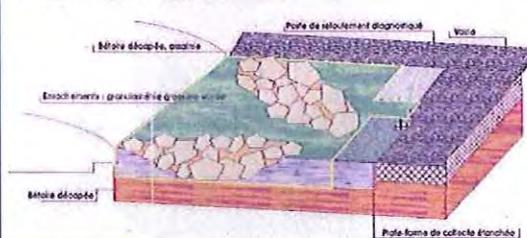


Figure 4-6 : Aménagement du site de Cocusseville



- à proximité d'un poste de refoulement d'eaux usées et d'une plate forme contenant 3 bacs de collecte de déchets

- décapage de la bétoire

- mise en place d'un dispositif filtrant grossier voire d'un enrochement au droit de la bétoire tracée

- création d'une nouvelle plateforme lisse et bétonnée munie d'une grille pour les écoulements

Source : SAFEGE

Maître d'ouvrage : SMBV pointe de Caux

Écociences pour une Terre durable  
**brgm**

vendredi 10 septembre 2010

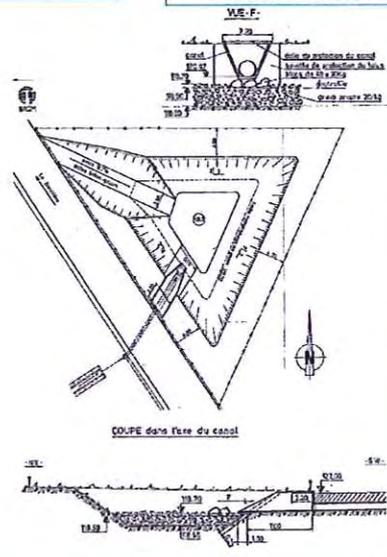
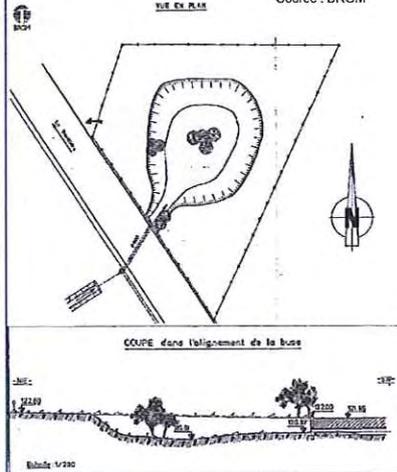
> 28

#### 4. Zone sans ouvrage structurant

Comblement par massif filtrant

##### > Béttoire de la Haye

Source : BRGM



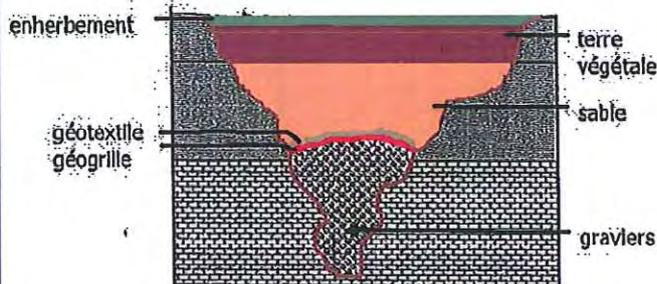
vendredi 10 septembre 2010

> 29

#### 4. Zone sans ouvrage structurant

Comblement par massif filtrant

##### > Béttoire Le Noyer à Beaumont Le Roger



Aménagement de la béttoire située en zone boisée

- purge
- gravier grossier puis géogrille et géotextile
- sable pour filtrer
- couverture de terre végétale et enherbement

Source : BURGEAP  
Maître d'ouvrage : Communauté de communes de Beaumont le Roger



SARVGGRCOISGR HNO

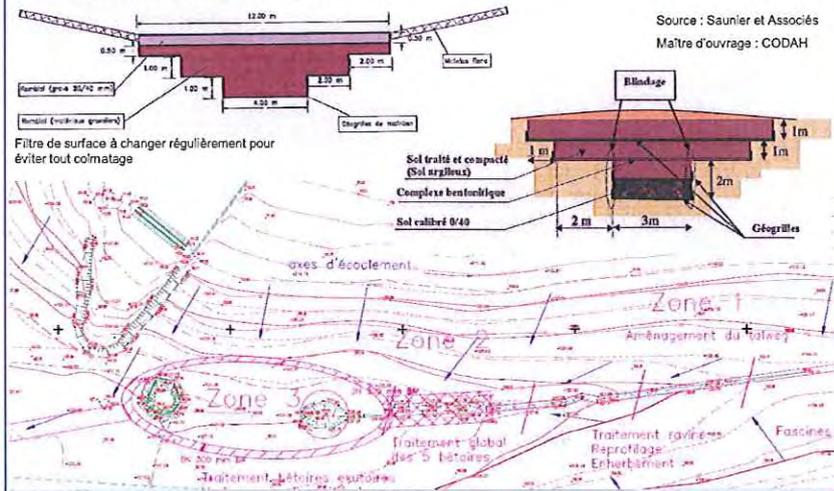
vendredi 10 septembre 2010

> 30

#### 4. Zone sans ouvrage structurant

Colmatage étanche + dérivation partielle des flux

##### > Bétaires à Goderville



vendredi 10 septembre 2010

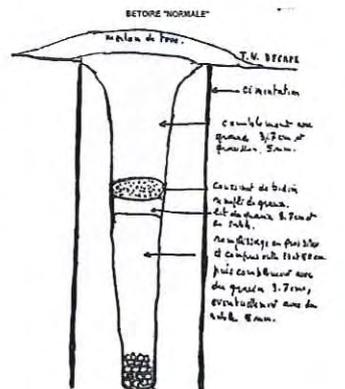
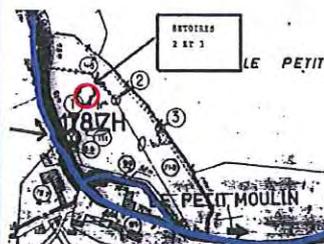
> 31

#### 4. Zone sans ouvrage structurant

Colmatage étanche

##### > Bétaire 2 et 3 du Petit moulin

- repérage de la zone d'infiltration
- consolidation du terrain tout autour de la bétaire par des injections de ciment à faible pression
- ouverture de la bétaire à la bête et la vider sur 10 m
- comblement de l'excavation par des gros silex sur 5m puis par un massif de gravier filtrant avec à l'intérieur du massif un coussinet de gravier fin protégé par un géotextile non tissé
- couverture par un lit imperméable de limons ou d'argile



Source : Ph. DE LA QUERIERE, BRGM  
Maître d'ouvrage : SIAEP de Thomer Corneuil

Désinfectez pour une Terre durable  
**brgm**

vendredi 10 septembre 2010

> 32

## 4. Zone sans ouvrage structurant

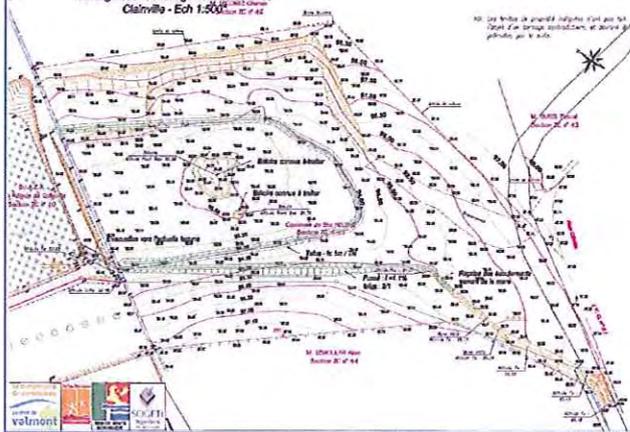
Dérivation totale des flux

### > Bétoire de Valmont

Source : SOGETI

Maître d'ouvrage : communauté de Communes du Canton de Valmont

Ouvrage 135 - Aménagement de Mécires  
Clainville - Ech 1:5000



- série de lagunes de STEP dans l'axe du thalweg : stagnation d'eau en amont du bassin : ouverture d'une bétoire
- STEP en fin d'exploitation
- lagune transformée en mare
- bétoire shuntée par un merlon de ceinturage et un fossé qui dévie les eaux vers la mare

Déplacements pour une terre durable  
**brgm**

vendredi 10 septembre 2010

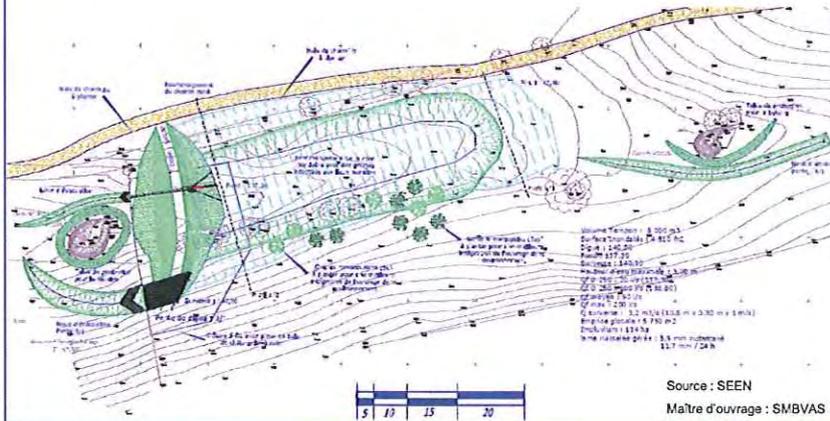
> 33

## 4. Zone sans ouvrage structurant

Dérivation totale des flux

### > Bétoire en amont du bassin de Saint Helier

- Talus de protection pour éviter l'infiltration + noue pour orienter les écoulements



Source : SEEN

Maître d'ouvrage : SMBVAS

vendredi 10 septembre 2010

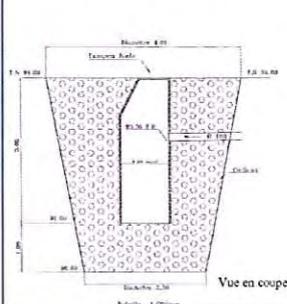
> 34

## 4. Zone sans ouvrage structurant

Aménagement en puits d'infiltration

### > Bétoire 21 à Bosc Bénard Crescy

- décapage et curage de la bétoire
- mise en place d'un massif filtrant et autobloquant composé de gros cailloux
- mise en place au milieu de la bétoire d'un regard en fonte de 3 m de profondeur crépiné pour permettre l'infiltration et comprenant l'arrivée du trop plein de la mare
- curage de la mare
- mise en place d'un trop plein avec une canalisation souterraine amenant le surplus de la mare dans la bétoire aménagée



Source : DDAF  
Maître d'ouvrage : SERPN



vendredi 10 septembre 2010

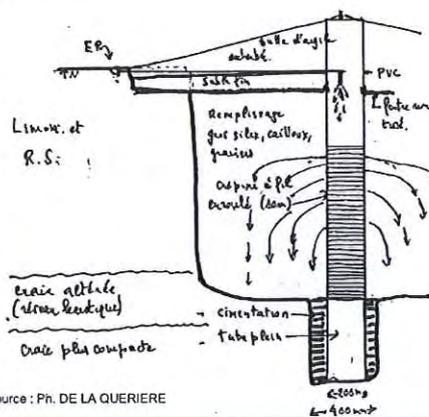
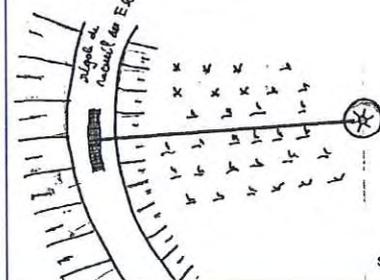
> 35

## 4. Zone sans ouvrage structurant

Aménagement en puits d'infiltration

### > Note technique d'évacuation des eaux par infiltration dans la bétoire

- au centre de la bétoire : crépine à fil enroulé, terminée à la base par un culot de décantation, complétée au sommet par un tube plein
- crépine englobée dans le massif autobloquant
- amenée d'eau en surface par un système de collecte périphérique au pied de la butte et une canalisation terminée en coude de déversement



Source : Ph. DE LA QUERIERE

vendredi 10 septembre 2010

> 36

#### 4. Zone sans ouvrage structurant

Colmatage  
étanche +  
Dérivation totale  
des flux

- > Bétoire de St Victor de Chrétienville
- > Bétoire de Neufmesnil
- > Bétoire de Château
- > Bétoire de Limésy



SARIGRCSOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

> 37

#### Présentation des aménagements

##### 5. Sous ou proche d'une infrastructure

##### > Types d'aménagement :

- Colmatage étanche :
  - Hôtellerie RN13
- Colmatage étanche + dérivation totale des flux :
  - Bétoire de la Croix Rouge
- Blocage de la suffosion (sans remblaiement) :
  - Ecuquetot



SARIGRCSOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

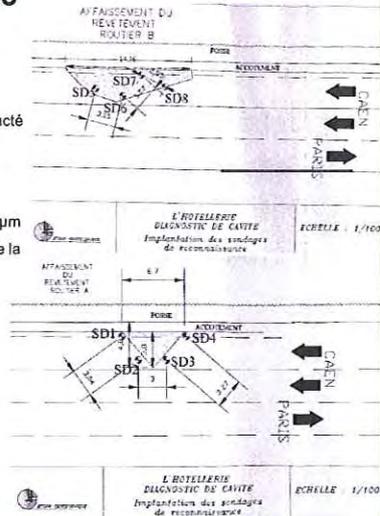
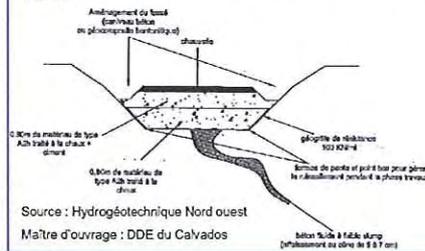
> 38

## 5. Sous ou proche d'une infrastructure

Colmatage étanche

### > Bétoire de l'Hôtellerie, RN 13

- purge sur 2 m de profondeur, sur les 2 voies montantes
- combler par un béton fluide à faible slump (5 à 7 cm d'affaissement au cône) la ou les anomalies
- réaliser un massif de substitution :
  - 0.80 m de limons argileux (type A2h) traité à la chaux, compacté à 95% de l'OPN et comportant moins de 15% > 400 µm, mis en œuvre dans une géogridde de résistance 100 KN dans les 2 directions.
  - 0.80 m de limons argileux traité à la chaux et au ciment compacté à 98.6% de l'OPN et comportant moins de 15% > 400 µm
- réaliser une nouvelle structure de chaussée adaptée au trafic de la RN 13



vendredi 10 septembre 2010

> 39

## 5. Sous ou proche d'une infrastructure

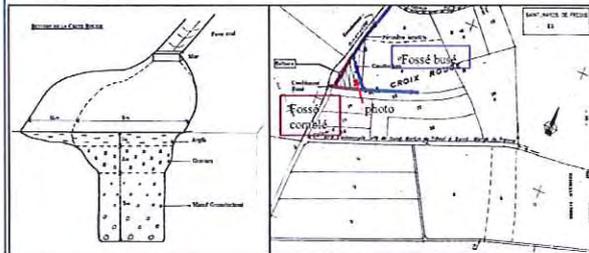
Colmatage étanche + dérivation totale des flux

### > Bétoire de la Croix Rouge

- bétoire débroussaillée
- ôter les débris divers et la terre du site constitués d'un cylindre de 30 m<sup>3</sup> dans l'axe de la bétoire, un tronc de cône de 45 m<sup>3</sup> qui le coiffe et un ellipsoïde de 350 m<sup>3</sup> en surface.
- dans l'axe de la bétoire puis au-dessus mise en place : du gravier granulo-classé : gros blocs, 40-60 mm, 5-15 mm, et 0-5mm.
- couverture par un feutre non tissé et 2 m d'argile de façon à former une butte qui s'élèvera au-dessus de la route

Source : ANTEA

Maître d'ouvrage : Ville de Bernay



- détournement du fossé qui passait à l'emplacement de la bétoire par busage partiel.
- la canalisation débouche dans le fossé à l'aval et sa partie amont est bouchée par un massif de ciment pour empêcher le retour des eaux vers la bétoire.
- comblement du fossé le long de la parcelle
- ensemble clôturé

Géosciences pour une Terre durable  
**brgm**

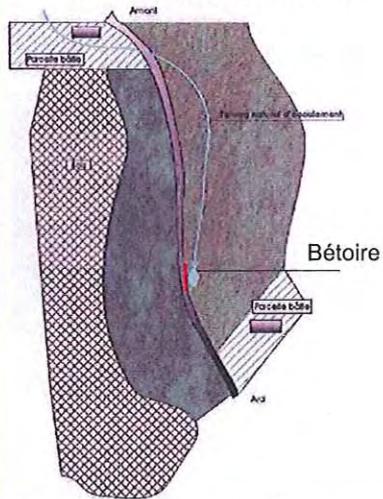
vendredi 10 septembre 2010

> 40

## 5. Sous ou proche d'une infrastructure

Blocage de  
la suffosion

### > Bétoire à Ecuquetot



- vallon de forte pente voué au pâturage
- effondrement au bord de la route descendant vers Notre Dame du Bec
- enjeux à l'aval faibles
- consolidation de la route au niveau de la béttoire et
- mise en place d'un rideau de palplanches
- protection de la béttoire par la pose d'une clôture

Source : SAFEGE

Maître d'ouvrage : SMV Pointe de Caux



vendredi 10 septembre 2010

> 41

## Présentation des aménagements

### 6. Dans un fossé

#### > Colmatage étanche :

- Bétoire à Criquetot l'Esneval
- Bétoire de la Croix blanche
- Bétoire à Saussay



SARVGRCOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

> 42

## 6. Dans un fossé

## Colmatage étanche

### > Béttoire à Criquetôt l'Esneval

- Busage béton (forme trapézoïde) du fossé sur les zones de perte
- Avec le temps, buses déstructurées dans le fossé; réouverture de béttoires



Affouillements



Axe du fossé



Source : photos BRGM

vendredi 10 septembre 2010

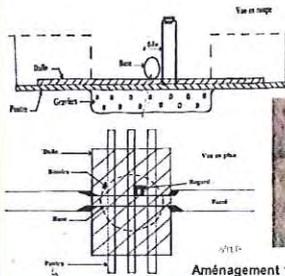
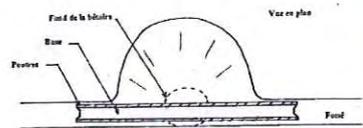
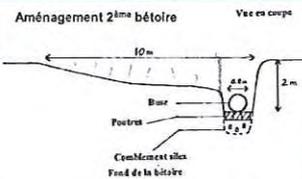
> 43

## 6. Dans un fossé

## Colmatage étanche

### > Béttoire de la Croix Blanche

- nettoyage des deux béttoires et du fossé
- comblement par des graviers (environ 40 m<sup>3</sup>)
- pose d'une dalle de béton et de poutrelles de béton pour soutenir la canalisation
- Aménagements périphériques : mise en place d'une canalisation de 800 mm de diamètre appuyée sur les poutrelles, pour assurer la propagation du flux en aval



Source : ANTEA  
Maître d'ouvrage : Ville de Bernay



Affouillements marqués



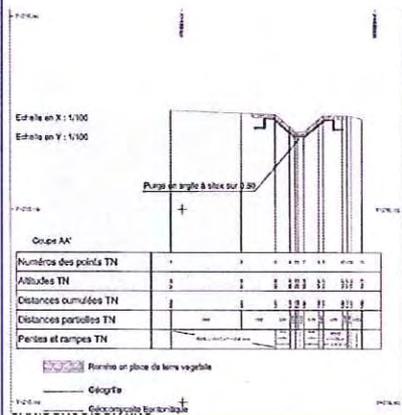
vendredi 10 septembre 2010

> 44

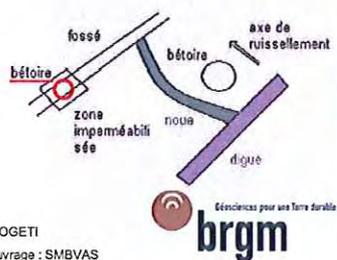
## 6. Dans un fossé

### Colmatage étanche

#### > Bétoire à Saussay



- purge
- pose d'une géogridde avec ancrage pour éviter le phénomène de renardage
- pose d'un géocomposite bentonitique
- remise en place de terre végétale dans le fossé



vendredi 10 septembre 2010

> 45

## Présentation des aménagements

### 7. Dans ou proche d'un cours d'eau

#### > Colmatage étanche

- Bétoire à Boscherons
- Bétoire 1 au Petit Moulin
- Bétoire à Coulonges

SARIGRÇOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

Éléments pour une Terre durable  
**brgm**

> 46

## 7. Dans ou proche d'un cours d'eau

### Colmatage étanche

#### > Bétoire à Boscherons



Section de l'Ilon aménagée par un auget : prise de vue sur l'entrée de l'Ilon dans l'auget



Section de l'Ilon aménagée par un auget : prise de vue sur la sortie de l'auget

- ouverture de bétoire dans le lit de l'Ilon
- contournement de la bétoire par un auget
- colmatage de la bétoire?



Vue sur la bétoire contournée



Source : photos BRGM

SARIGRCCOISGR HNO

vendredi 10 septembre 2010

> 47

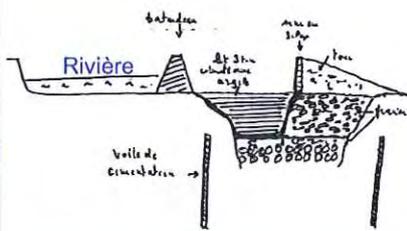
## 7. Dans ou proche d'un cours d'eau

### Colmatage étanche

#### > Bétoire 1 au Petit Moulin



- repérage de la zone d'infiltration
- consolidation du terrain autour de la bétoire par des injections de ciment à faible pression
- isolement du cours d'eau par un batardeau
- ouverture de la bétoire à la bécote et la vider sur 10 m
- comblement par des gros silex sur 5m puis par un massif de gravier filtrant (5-15 mm) et de la terre côté berge et par un lit d'argile côté rivière
- couverture par un lit imperméable de limons ou d'argile
- démontage du batardeau
- aménagements périphériques :
- réfection du mur en béton de la berge pour éviter toute infiltration



Source : BRGM  
Maître d'ouvrage : SIAEP de  
Thomer Comeuil



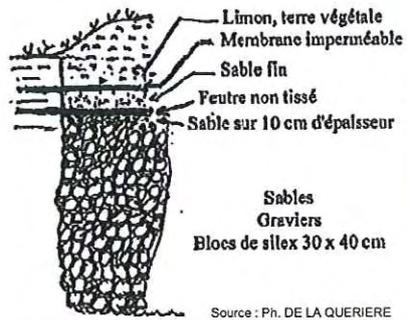
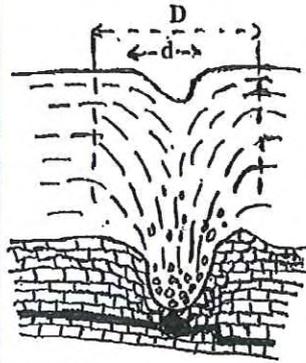
vendredi 10 septembre 2010

> 48

> **Bétoire à Coulonges dans la vallée du Sec Iton**

Emprise des travaux  
 $D = 3 \text{ à } 5 \times d$

Comblement



Source : Ph. DE LA QUERIERE



## **Annexe 7**

-

### **Fiches terrain d’évaluation du vieillissement d’un échantillon d’aménagements de bétaires**



Bétoire	Commune	Situation de la bétoire	Aménagement bétoire stricto sensus	Commentaires	Aménagement périphérique (Lexique)	Age de l'aménagement	Observations terrain
2589	Limésy	3	Colmatage Dérivation de flux	colmatage (argile/geotextile)	Prairie inondable amont	7-8 ans	pas de réouverture observée
2586	Limésy	4	Colmatage Dérivation de flux	colmatage (argile/geotextile)	Prairie inondable amont	7-8 ans	pas de réouverture observée
2626	Limésy	4	Colmatage Dérivation de flux	colmatage (argile/geotextile)	Fossé étanche	7-8 ans	pas de réouverture observée
5530	Autigny	1	Colmatage	colmatage (argile/bentonite)	-	5 ans	pas de réouverture observée
	Autigny	3	Colmatage	colmatage (argile/bentonite)	-	5 ans	pas de réouverture observée
5460	Bosc Bénard Crescy	4	Massif autobloquant Puits d'infiltration	la bétoire reçoit le trop plein des eaux d'une mare		15 ans	aménagement stable excepté une dépression de 80cm de diamètre en périphérie du massif autobloquant
1529 1535	Plainville	6	Colmatage Dérivation de flux	colmatage gravier + dalle béton + busage fossé		14 ans	affouillement observable autour des canalisations busant le fossé
6075	Manthelon	7	Colmatage	colmatage avec matériaux de granulométrie décroissante + argile au sommet + injection périphérique de ciment pour consolidation du terrain avant excavation	Mur entre l'aménagement et le lit de la rivière	17 ans	pas de réouverture observée
6076 6077	Manthelon	7	Colmatage	colmatage avec matériaux de granulométrie décroissante + argile au sommet + injection périphérique de ciment pour consolidation du terrain avant excavation		17 ans	pas de réouverture observée
7406	La Fresnaye	1	Colmatage	colmatage avec amortisseur + geogille + geotextile + argile compactée + compresse humide	Zone revégétalisée en amont du bassin	10 ans?	bétoire non retrouvée pas de réouverture observée
1542	Saint Mards de Fresne	5	Colmatage	colmatage avec matériaux de granulométrie décroissante + feutre non tissé + 2m d'argile au sommet	Fossé busé et dévié de la zone à bétoire	14 ans?	bétoire non visible pas de réouverture observée
5409	Saint Victor de Chrétainville	4	Colmatage Dérivation de flux	détail du colmatage non précise + busage fossé passant au dessus de la bétoire	-	14 ans?	bétoire non visible pas de réouverture observée
5823	Saint Romain de Colbosc	1	Colmatage	remplissage massif autobloquant + bidim + poutrelles béton + busage au dessus + Comblement de terre		9 ans	Il semble qu'un effondrement se soit produit à proximité



# COLMATAGE

## Aménagement des bétoires à Autigny

<b>IDENTIFICATION</b>	<b>Commune :</b> Autigny, ouvrage de la RD108
	<b>Lieu-dit :</b>
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant bétoire :</b> bétoire « Canville 31 »
	<b>Maître d'ouvrage :</b> SMBV Dun Veules
<b>Bureau d'étude :</b> INGETEC	

### DESCRIPTION

Objectif de protection : Risque sanitaire et hydrologique  
Protéger le captage d'Autigny et maîtriser les ruissellements

Situation bétoire : Code 3 et 4 : une bétoire située à l'aval d'un ouvrage de stockage et une autre bétoire situé en amont de l'ouvrage hydraulique dans une zone sans aménagement structurant

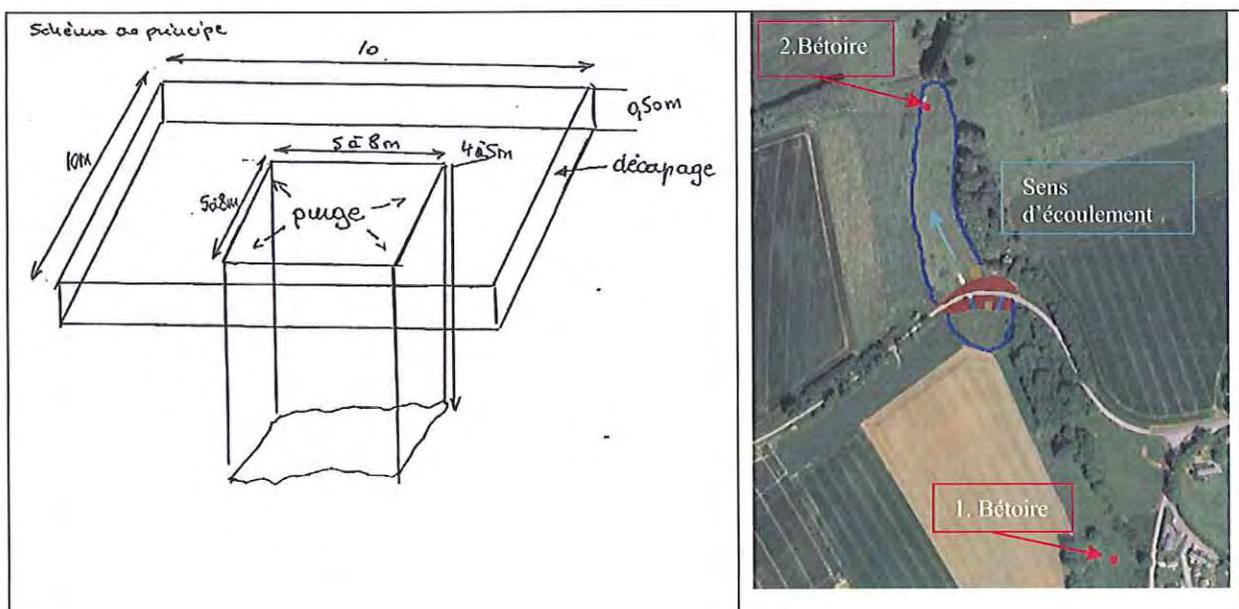
Type d'eau d'engouffrement : eaux de ruissellement agricole et routier

### DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT

- décapage au droit et en périphérie de l'aménagement pour localiser précisément l'emprise de l'anomalie et permettre l'ancrage ultérieur du complexe bentonitique
- curage des formations décomprimées sur 4-5m de profondeur, fouille de 5m de côté suivant l'importance des formations instables
- remplissage par des apports progressifs de formations argileuses purgées et compactées. Le compactage final peut être fait par un compacteur. Des limons traités peuvent être utilisés en cas d'impossibilité de procurer des argiles à proximité du site
- pose du complexe bentonitique
- apport de terre végétale dépourvue de pierres

Aménagements périphériques : aucun

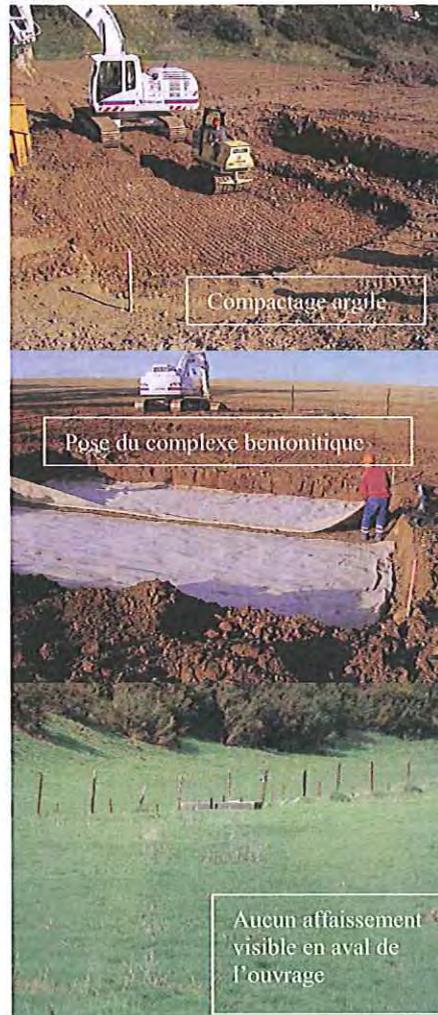
Contraintes techniques, difficultés rencontrées : Non précisée



Bétoire n°1



Bétoire n°2



#### ENTRETIEN

Non précisé

#### ETUDE PREALABLE

Supervision hydrogéologique

#### CONSTAT DE TERRAIN D'AVRIL 2010

Aucun affaissement n'est visible

Source bibliographique : INGETEC (octobre 2004) – Supervision hydrogéologique et suivi de traitement de deux bétoires sur la commune d'Autigny, ouvrage de la RD108 pour le SMBV Dun Veules. Rapport. 7p.



## Aménagement de la béttoire de la Croix rouge

IDENTIFICATION	<b>Commune :</b> Saint Mards de Fresne (27)
	<b>Lieu-dit :</b> La Croix Rouge
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant béttoire :</b> 1 542 - Béttoire de la croix Rouge
	<b>Maître d'ouvrage :</b> Ville de Bernay
	<b>Bureau d'étude :</b> ANTEA

Date de réalisation des travaux : 1996-1997 ?

## DESCRIPTION

**Objectif de protection :** Risque sanitaire et géotechnique

Protéger la source des Bruyères contre le déversement d'un polluant non traitable par la station, supprimer l'apport de MO et réduire la turbidité ET éviter que la route ne s'effondre davantage

**Situation béttoire :** Code 5 : « Béttoire située sous ou à proximité immédiate d'une infrastructure »  
Béttoire dans un fossé qui longe une parcelle agricole et une route communale

**Type d'eau d'engouffrement :** Elle reçoit l'écoulement d'un fossé qui apporte les eaux issues du hameau de la Bouchonnière et les eaux du drainage agricole de la parcelle située de l'autre côté de la route. Ces eaux sont chargées en MES et en MO provenant des eaux usées, fumier et lisier non enfouis)

## DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT (d'après le rapport projet)

« La béttoire sera débroussaillée, les arbres et les racines seront conservés pour empêcher les bords de se désagréger. Oter les débris divers et la terre du site constitués d'un cylindre de 30 m<sup>3</sup> dans l'axe de la béttoire, un tronc de cône de 45 m<sup>3</sup> qui le coiffe et un ellipsoïde de 350 m<sup>3</sup> en surface. La terre peut être réutilisée si sa qualité le permet. Dans l'axe de la béttoire puis au-dessus mise en place : du gravier granulo-classé : gros blocs, 40-60 mm, 5-15 mm, et 0-5mm.

L'ensemble sera recouvert d'un feutre non tissé, puis de 2 m d'argile de façon à former une butte qui s'élèvera au-dessus de la route. »

**Aménagements périphériques :** Détournement du fossé qui passait à l'emplacement de la béttoire.

- contournement par busage partiel. La canalisation débouche dans le fossé à l'aval et sa partie amont est bouchée par un massif de ciment pour empêcher le retour des eaux vers la béttoire.
- comblement du fossé le long de la parcelle
- ensemble clôturé

**Contraintes techniques, difficultés rencontrées :**

- achat du terrain où se situe la béttoire

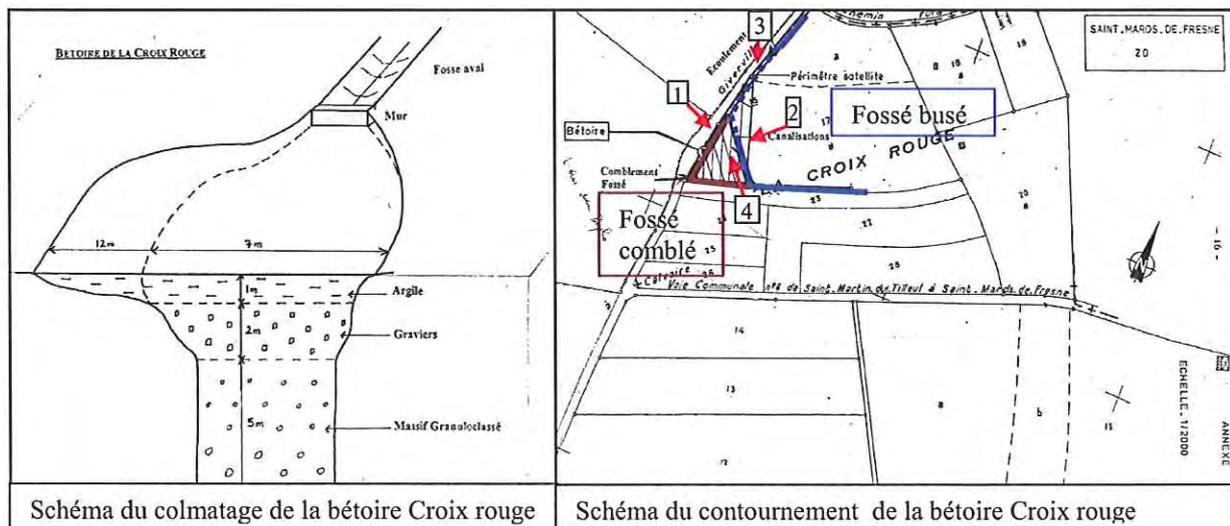
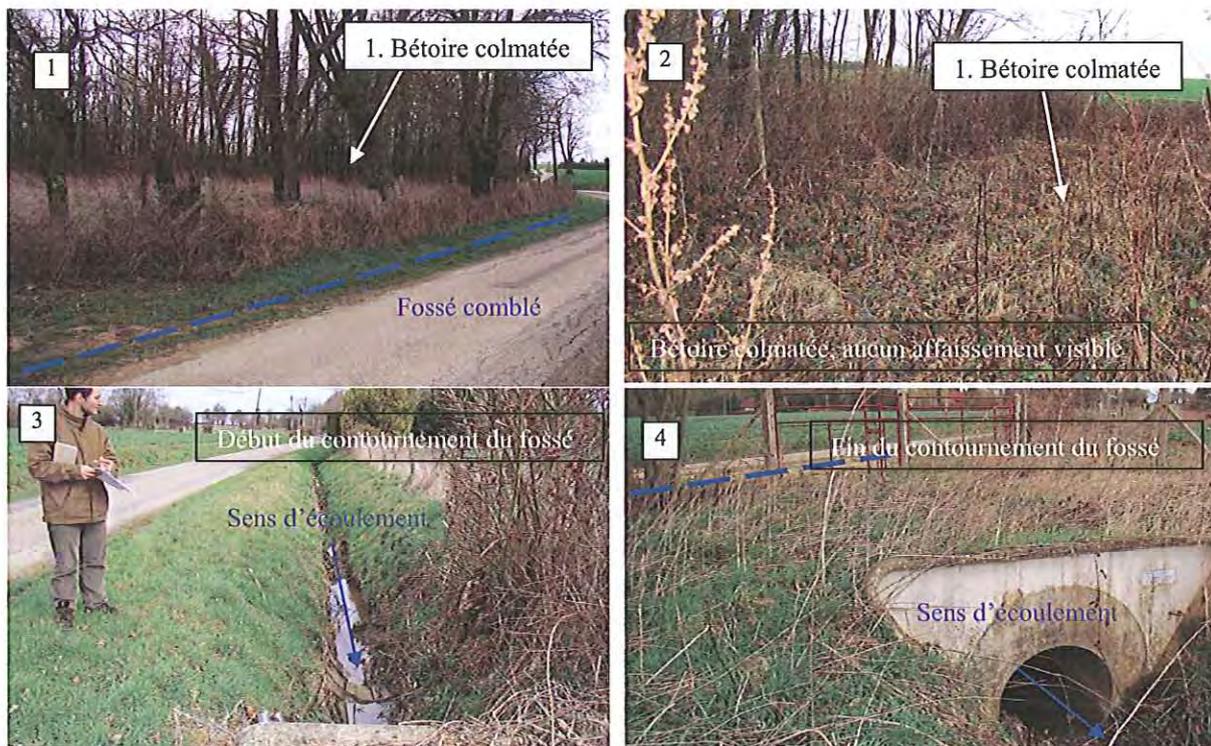


Schéma du colmatage de la béttoire Croix rouge

Schéma du contournement de la béttoire Croix rouge



Photos de terrain du 26/03/10

#### ENTRETIEN PRECONISE PAR ANTEA

- réalisé par le Service des eaux
- visite plus nombreuses lors d'évènements pluvieux intenses
- vérifier et consolider les installations par temps secs
- la fauche à l'herbe de ces terres peut être donnée à des agriculteurs intéressés

#### ETUDE PREALABLE

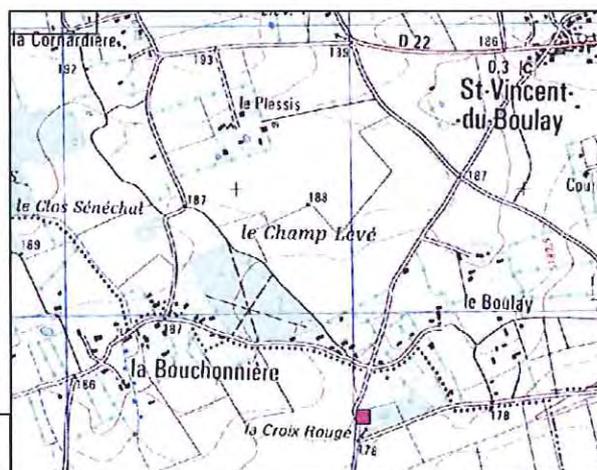
Non précisée

#### CONSTAT TERRAIN DU 26/03/10

- le contournement de la bétoire par la pose d'une buse béton fonctionne toujours
- le colmatage de la bétoire semble avoir tenu, aucun effondrement, dépression n'est visible, cependant la butte préconisée n'est pas visible.
- le nouveau fossé semble entretenu

Source bibliographique : ANTEA. (1995) – *Définition et coût des travaux à prévoir sur les bétoires de la Croix Rouge, de la Croix Blanche et de saint Victor de Chrétienville, Protection de la source des Bruyères, ville de Bernay. Rapport projet. 23p.*

Localisation de la bétoire de la Croix rouge



## Aménagement des bétaires de la Croix blanche

IDENTIFICATION	<b>Commune :</b> Plainville (27)
	<b>Lieu-dit :</b> La Croix Blanche
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant bétaire :</b> 1 529 et 1535 - Bétaires de la croix blanche
	<b>Maître d'ouvrage :</b> Ville de Bernay
	<b>Bureau d'étude :</b> ANTEA

Date de réalisation des travaux : 1996-1997 ?

## DESCRIPTION

Objectif de protection : Risque sanitaire

Protéger la source des Bruyères contre le déversement d'un polluant non traitable par la station, supprimer l'apport de MO et réduire la turbidité.

Situation bétaire : Code 6 : Bétaires situées dans un fossé. Les deux bétaires se situent à 50m l'une de l'autre dans le fossé. La deuxième bétaire est légèrement décentrée du fossé

Type d'eau d'engouffrement : Ces eaux absorbent de l'eau « agricole », ou de ruissellement

## DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT (d'après le rapport projet)

- nettoyage des deux bétaires et du fossé
- comblement par des graviers (environ 40 m3)
- pose d'une dalle de béton et de poutrelles de béton pour soutenir la canalisation

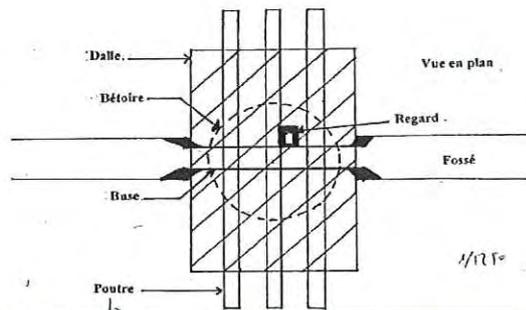
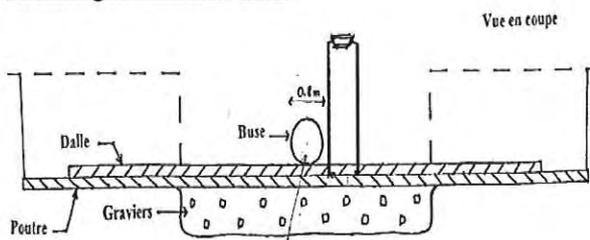
Aménagements périphériques :

- mise en place d'une canalisation de 800 mm de diamètre appuyée sur les poutrelles, pour assurer la propagation du flux en aval

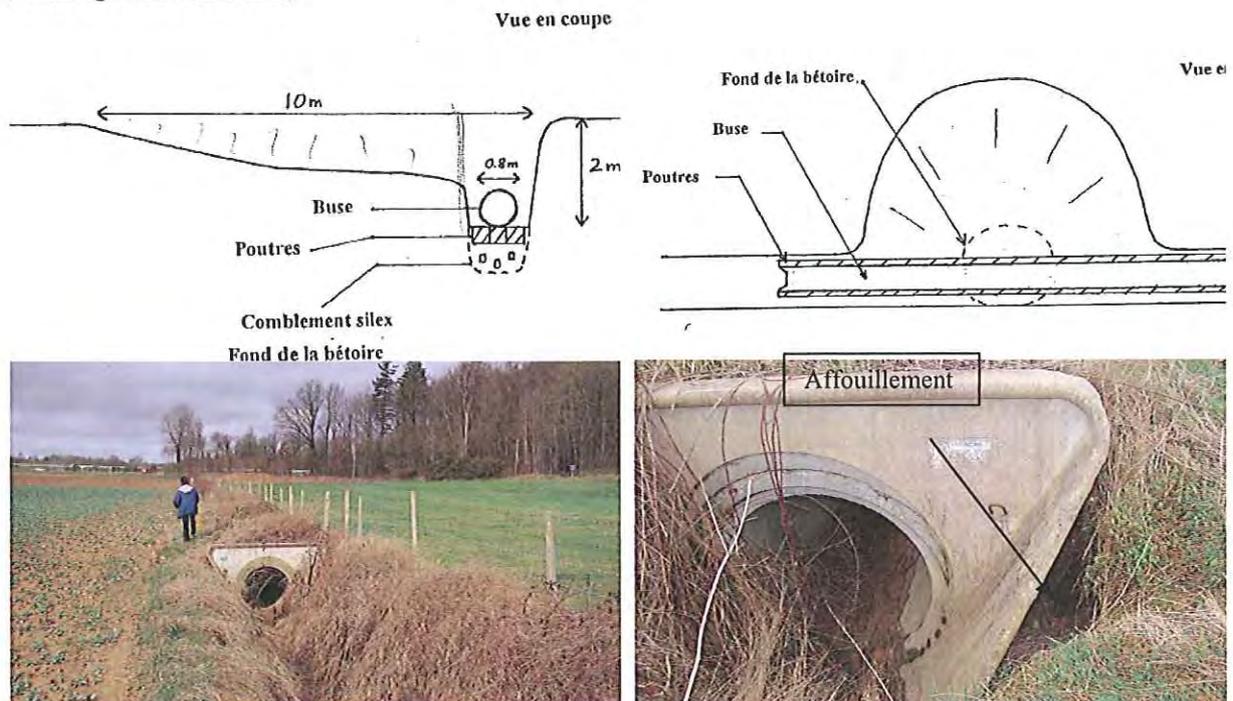
Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

- débit de pointe du flux inconnu d'où la préconisation d'une protection en aval de la canalisation

## Aménagement bétaire 1



## Aménagement béttoire 2



### ENTRETIEN

- réalisé par le Service des eaux
- visite plus nombreuses lors d'évènements pluvieux intenses
- vérifier et consolider les installations par temps secs
- la fauche à l'herbe de ces terres peut être donnée à des agriculteurs intéressés

### ETUDE PREALABLE

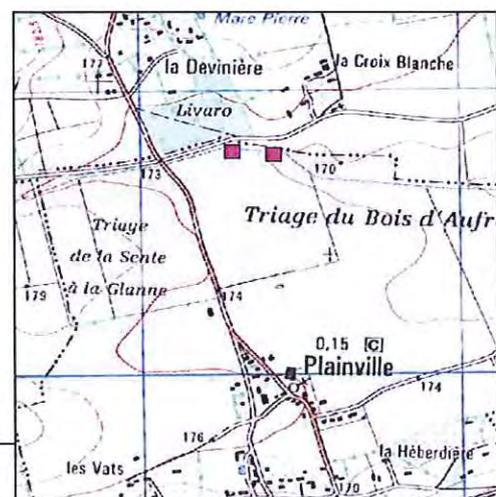
Non précisée

### CONSTAT TERRAIN DU 26/03/10

- Béttoire 1 : le regard (composé de 3 anneaux de 30 cm et d'un grand d'1m) est effondré et laisse apparaître au fond un treillis en fer, affouillements visibles
- Béttoire 2 : le regard est en place, affouillements visibles, petites galeries visibles à proximité immédiate de la canalisation, béttoire invisible en surface
- Entre les deux canalisations, arrivée d'un drain avec de part et d'autre des trous (terrier, béttoire ?)
- Absence d'entretien, regard caché sous la mousse, fossé envahit par les ronces

Source bibliographique : ANTEA. (1995) – *Définition et coût des travaux à prévoir sur les béttoires de la Croix Rouge, de la Croix Blanche et de saint Victor de Chrétienville, Protection de la source des Bruyères, ville de Bernay*. Rapport projet. 23p.

Localisation des béttoires de la Croix Blanche



Aménagement de la bétoire n°1 du Petit Moulin

<b>IDENTIFICATION</b>	<b>Commune :</b> Sylvains les Moulins
	<b>Lieu-dit :</b> Le Petit Moulin
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant bétoire :</b> 6075
	<b>Maître d'ouvrage :</b> SIAEP de Thomer Corneuil
	<b>Bureau d'étude :</b> BRGM

Date de réalisation des travaux : sept. 1992 à avril 1993

**DESCRIPTION**

Objectif de protection : Risque sanitaire

Protections des forages AEP de Sylvains les Moulins et de Coulonges contre la turbidité

Situation bétoire : Code 7 : La bétoire large est située à cheval sur la rivière et la berge, le mur est à moitié démol

Type d'eau d'engouffrement : elle recueille les infiltrations d'eaux provenant de la rivière

**DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT**

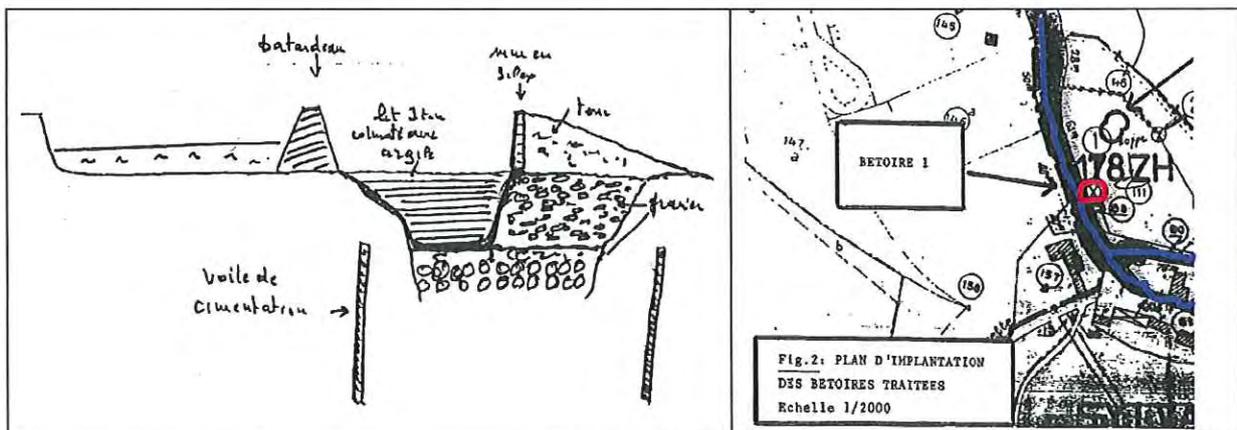
- repérage de la zone d'infiltration où les fentes entre les blocs de silex sont suffisantes pour absorber de l'eau chargée en limons
- consolidation du terrain tout autour de la bétoire par des injections de ciment à faible pression
- isolement du cours d'eau par un batardeau
- ouverture de la bétoire à la bécote et la vider sur 10 m
- comblement de l'excavation par des gros silex sur 5m puis par un massif de gravier filtrant (5-15 mm) et de la terre côté berge et par un lit d'argile côté rivière
- couverture par un lit imperméable de limons ou d'argile
- démontage du batardeau

Aménagements périphériques :

- réfection du mur en béton de la berge pour éviter toute infiltration

Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

- la nature argileuse du sol n'a pas facilité le déplacement des engins
- arrêt des travaux suite aux intempéries (débordements de l'Iton)
- lors de l'injection, du ciment est remonté vers le lit de l'Iton





Berge de l'Iton avec le mur en béton

#### ENTRETIEN PRECONISE

- en cas de rejeu éventuel, la béttoire sera recombée avec du matériau (gravier puis argile) pour reconstituer le chapeau de protection
- les lits d'argile doivent être régulièrement inspectés

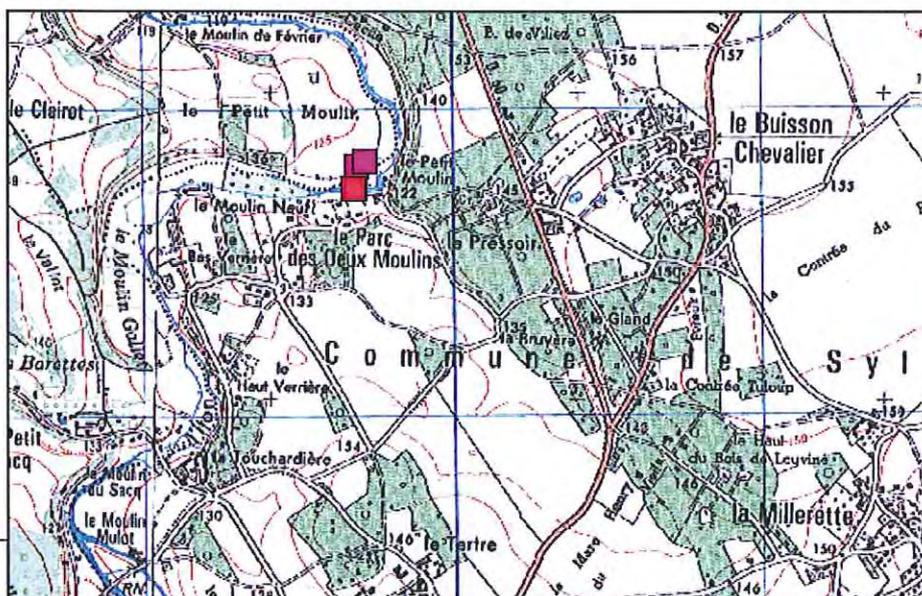
#### ETUDE PREALABLE

Non précisée

#### CONSTAT DE TERRAIN DU 26/03/10

- le mur de la berge est en bon état
- absence d'effondrement visible

Source bibliographique : FRANCK C., DE LA QUERRIERE Ph. (décembre 1993) – SIAEP de Thomer Corneuil ; Protection du captage d'alimentation en eau potable de Sylvains-les-Moulins, rechemisage de béttoires. Compte rendu des travaux, BRGM. 39p.



Localisation de la béttoire n°1

Aménagement des bétoires 2 et 3 du Petit Moulin

<b>IDENTIFICATION</b>	<b>Commune :</b> Manthelon
	<b>Lieu-dit :</b> Le Petit Moulin
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant bétoire :</b> 6076 et 6077
	<b>Maître d'ouvrage :</b> SIAEP de Thomer Corneuil
	<b>Bureau d'étude :</b> BRGM

Date de réalisation des travaux : sept. 1992 à avril 1993

**DESCRIPTION**

Objectif de protection : Risque sanitaire  
Protection des forages AEP de Sylvains les moulins et de Coulonges contre la turbidité

Situation bétoire : Code 7 : les deux bétoires situées sur la rive gauche de l'Iton en fond de vallée, sont contiguës et à une vingtaine de mètres du cours.

Type d'eau d'engouffrement : Elles ne reçoivent que les surverses du cours d'eau en crue

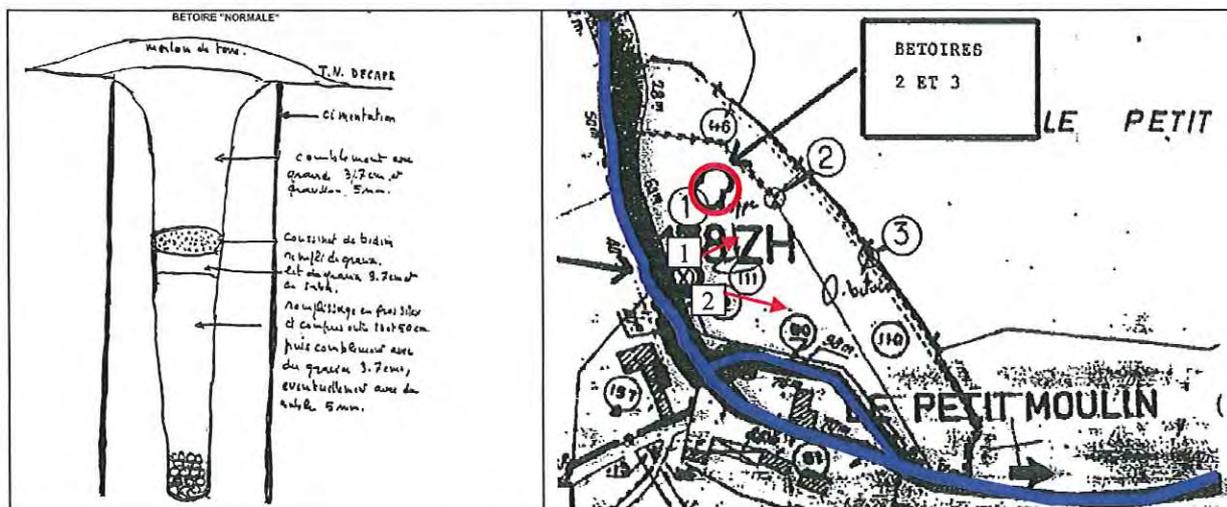
**DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT**

- repérage de la zone d'infiltration où les fentes entre les blocs de silex sont suffisantes pour absorber de l'eau chargée en limons
- consolidation du terrain tout autour de la bétoire par des injections de ciment à faible pression
- ouverture de la bétoire à la bécote et la vider sur 10 m
- comblement de l'excavation par des gros silex sur 5m puis par un massif de gravier filtrant avec à l'intérieur du massif un coussinet de gravier fin protégé par un géotextile non tissé
- couverture par un lit imperméable de limons ou d'argile

Aménagements périphériques : aucun

Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

- la nature argileuse du sol n'a pas facilité le déplacement des engins
- arrêt des travaux suite aux intempéries (débordements de l'Iton)





Prairie à 20 m de l'Iton

### ENTRETIEN

- en cas de rejeu éventuel, la bétouire sera recombée avec du matériau (gravier puis argile) pour reconstituer le chapeau de protection
- les lits d'argile doivent être régulièrement inspectés

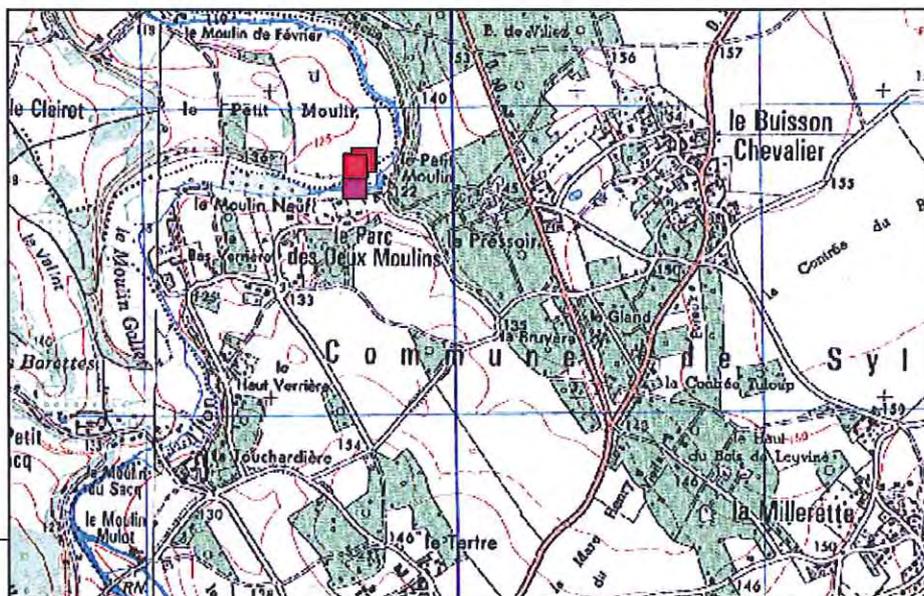
### ETUDE PREALABLE

Non précisée

### CONSTAT DE TERRAIN DU 26/03/10

- aucun effondrement n'est visible

Source bibliographique : FRANCK C., DE LA QUERRIERE Ph. (décembre 1993) – SIAEP de Thomer Corneuil ; Protection du captage d'alimentation en eau potable de Sylvains-les-Moulins, rechemisage de bétouires. Compte rendu des travaux, BRGM. 39p.



Localisation des bétouires 2 et 3

## Aménagement de la bétoire de Saint Victor de Chrétienville

IDENTIFICATION	Commune : Saint Victor de Chrétienville
	Lieu-dit :
	Bassin hydrologique :
	Identifiant bétoire : 5409
	Maître d'ouvrage : ville de Bernay
	Bureau d'étude : ANTEA

Date de réalisation des Travaux : 1996-1997 ?

## DESCRIPTION

Objectif de protection : Risque sanitaire

Protéger la source des Bruyères contre le déversement d'un polluant non traitable par la station, supprimer l'apport de MO et réduire la turbidité

Situation bétoire : Code 4 : Bétoires situées dans une zone sans aménagements hydrauliques structurants. La bétoire initiale se situe dans un fossé peu marqué au milieu d'une prairie. Il semble qu'elle soit plus ou moins comblée et que l'eau disparaisse dans une autre, située 40 m plus à l'aval

Type d'eau d'engouffrement : Ce fossé draine les eaux du bourg de st Victor de Chrétienville et l'eau est à priori riche en MO.

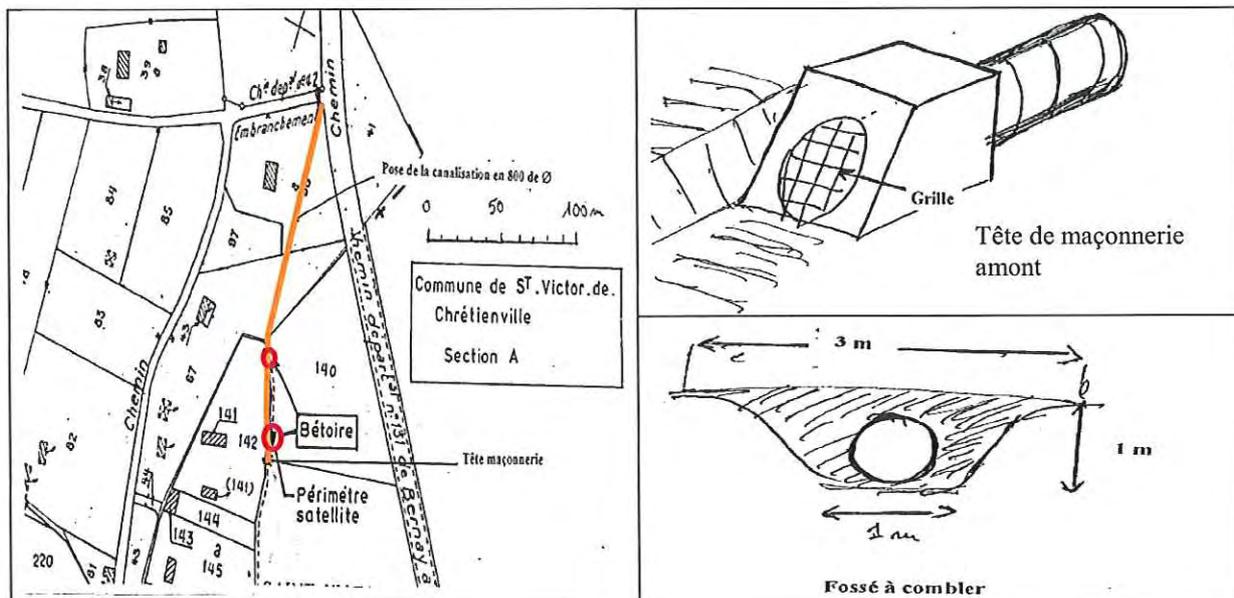
## DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT (d'après le rapport projet)

- non précisée dans le rapport

Aménagements périphériques :

- installation d'une canalisation de 800 mm munie d'une tête réceptrice à l'amont et qui viendra s'emboîter par un cône de réduction sur la buse 600 mm qui passe sous le CD 42.
- le thalweg sera recalibré par ces travaux
- l'ensemble sera recouvert de terre pour ne pas couper le verger en deux

Contraintes techniques, difficultés rencontrées :





1. Canalisation sous l'herbe jaune,  
Photos du 26/03/10



2. Tête amont de la canalisation sans grille

#### ENTRETIEN

- réalisé par le Service des eaux
  - visite plus nombreuses lors d'évènements pluvieux intenses
  - vérifier et consolider les installations par temps secs
- la fauche à l'herbe de ces terres peut être donnée à des agriculteurs intéressés

#### ETUDE PREALABLE

Non précisée

#### CONSTAT DE TERRAIN DU 26/03/10

- la canalisation est bien en place
- à l'entrée de la canalisation, la grille est détachée
- la bétroire est invisible en surface, pas d'effondrement

Source bibliographique : ANTEA. (1995)  
– *Définition et coût des travaux à prévoir sur les bétroires de la Croix Rouge, de la Croix Blanche et de saint Victor de Chrétienville, Protection de la source des Bruyères, ville de Bernay. Rapport projet. 23p.*



## COLMATAGE

### Aménagement de la bétoire du bassin n°2 des Hauts de Saint Michel

IDENTIFICATION	Commune : Saint-Romain de Colbosc
	Lieu-dit : Les Hauts de Saint Michel
	Bassin hydrologique : Lézarde
	Identifiant bétoire : 5823
	Maître d'ouvrage : SIAEPAEU de St Romain de Colbosc
	Hydrogéologue Agréé : Ph De La Quèrière

#### DESCRIPTION

Objectif de protection : Risque sanitaire - Protections des forages AEP

Situation bétoire : Code 1 : Bétoire située à l'intérieur d'un ouvrage de stockage (dans la zone de stockage). Bétoire située dans la partie aval du bassin n°2, affectant partiellement son fond et sa berge latérale SE (5 bassins au total)

Type d'eau d'engouffrement : Elle reçoit les eaux des bassins (eaux pluviales + eaux usées traitées)

#### DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT (d'après le rapport projet)

Vidange de la zone effondrée et évacuation des terrains meubles et éventuellement si possible, de la craie altérée jusqu'à la craie saine.

Réalisation d'un massif autobloquant en remplissant le vide de silex ou de blocs de nature différente, de grande taille de l'ordre de 30 cm puis remplissage des vides intergranulaires par des matériaux de plus en plus petits. Ce comblement pourra être recouvert d'un géotextile.

#### Aménagements périphériques :

« On condamnera la partie du bassin où se situe la bétoire. L'écoulement entre les 2 bassins sera assuré par une conduite étanche qui reposera sur des poutrelles de béton dont les extrémités reposeront sur les parties saines des 2 bassins. Le reste de l'espace sera comblé par une digue de terre dont les flancs seront protégés contre l'érosion (membrane, enherbement, plaques de béton, massif empierre) »

Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

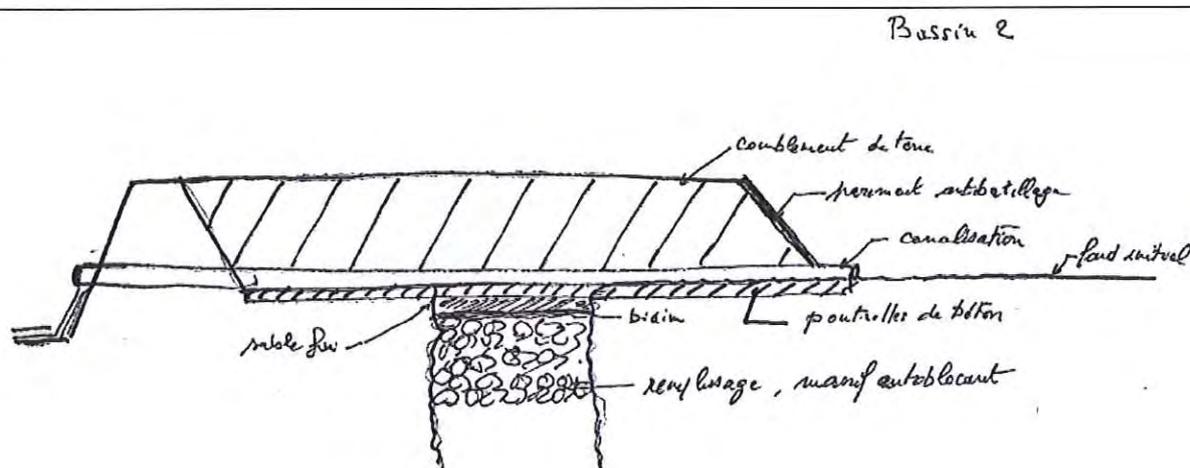


Schéma du colmatage de la bétoire



Photo terrain 29/06/2001



Photo terrain 26/11/2001



Vue aérienne Google Earth

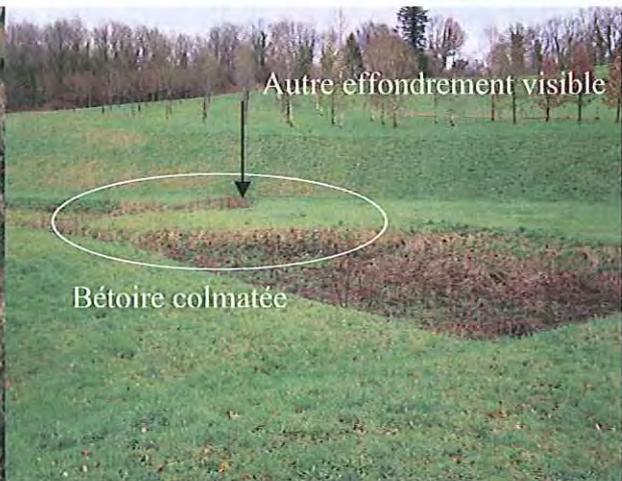


Photo terrain 02/04/2010

#### ENTRETIEN

Visites pour vérifier l'état de l'aménagement

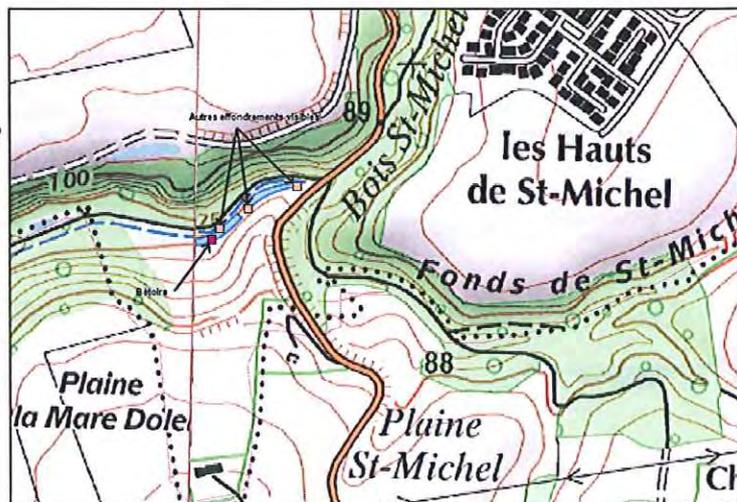
#### ETUDE PREALABLE

4 sondages pour définir la nature et l'épaisseur des couches superficielles et la qualité de la craie

#### CONSTAT DE TERRAIN DU 02/04/2010

Un autre effondrement semble se former au droit de l'aménagement  
De nombreux autres effondrements visibles dans et hors des 5 bassins

Source bibliographique :  
DE LA QUERRIERE Ph. (Sept. 2001)  
SIAEP de St Romain de Colbosc ;  
Comblement de la bétoire du bassin n°2  
des Hauts de St Michel,  
Diagnostic hydrogéologique  
et modalités de réalisation. 6 p.



Aménagement de la bêteoire du bassin du Val des Francs

<b>IDENTIFICATION</b>	<b>Commune :</b> LA FRENAYE
	<b>Lieu-dit :</b> Val des Francs
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant bêteoire :</b> 7406
	<b>Maître d'ouvrage :</b>
	<b>Bureau d'étude :</b> SODEREF

Date de réalisation des travaux : 1999 ?

**DESCRIPTION**

Objectif de protection : Sanitaire

Situation bêteoire : Code 1 : « bêteoire située à l'intérieur d'un ouvrage de stockage »  
Bêteoire ouverte dans un petit bassin de rétention

Type d'eau d'engouffrement : eaux de voirie, eau de ruissellement

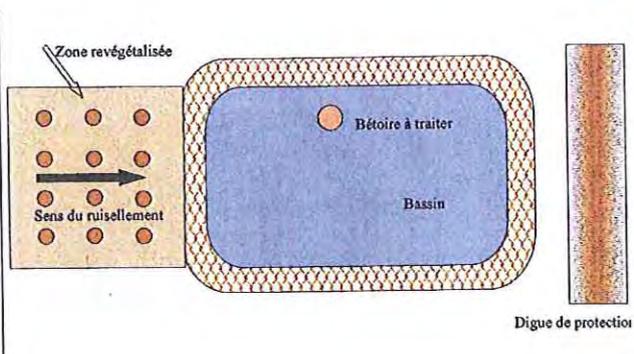
**DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT (dossier projet)**

Traitement de la bêteoire stricto sensus : colmatage suivant le protocole suivant :

- creusement de la bêteoire sur 2 mètres ;
- pose d'un « amortisseur » dont le rôle est d'amortir toutes les déformations liées aux contraintes mécaniques lors de la pose des couches supérieures et de garantir la pérennité de l'ouvrage). Il sera composé de matériaux calibrés (sable argileux 0,40) remplissant entièrement la bêteoire, le tout recouvert d'une géogrille et d'un géotextile anti-contaminant ;
- pose d'argile compactée (argile extraite sur place et entièrement purgée de ses silex) placée au dessus l'amortisseur ; le compactage doit permettre d'atteindre une perméabilité < à  $10^{-6}$  m/s ;
- pose d'une couche humidificatrice (= « compresse humide) afin d'éviter la destruction de l'argile compactée par séchage. Elle est constituée de terre végétale, extraite sur place et recouvre entièrement l'ouvrage.
- Pose d'un témoin sur la zone traitée afin de pouvoir localiser l'ouvrage et suivre son évolution.

Aménagements périphériques :

- Revégétalisation de la zone amont du bassin



Situation de la bêteoire dans le bassin

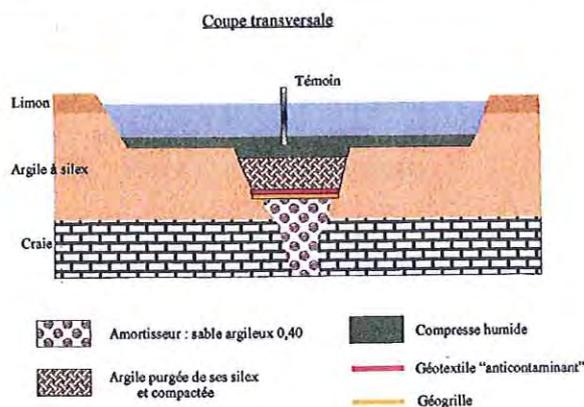


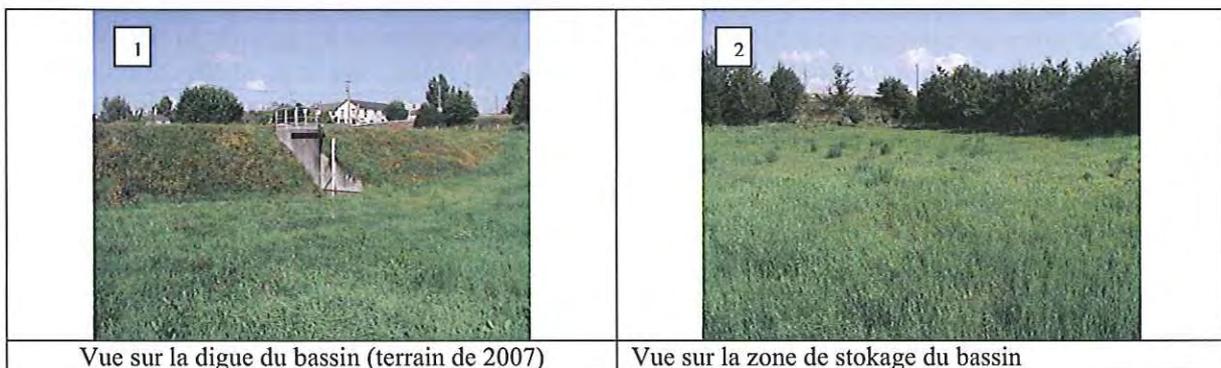
Schéma type du colmatage de la bêteoire

## ENTRETIEN

Non précisé

## CONSTAT DE TERRAIN DE 2007 et 2010

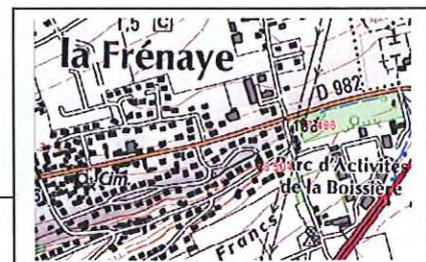
- la digue, la prairie inondable et la zone revégétalisée ont bien été réalisés ;
- Aucune zone d'effondrement ne semblait visible, aucune trace non plus d'un témoin de la zone traitée (terrain en 2007 et 2010)



### Source bibliographique :

- SODEREF – Th. Leboulanger
- Vandewiele Anthony – Origine et traitements de l'attribution en Seine-Maritime-Pôle de compétence Sol et eau Haute Normandie- Octobre 1999

Localisation de la bétouire du bassin du Val des Francs



## Aménagement de la béttoire de Neufmesnil

<b>IDENTIFICATION</b>	<b>Commune :</b> Limesy
	<b>Lieu-dit :</b> Neufmesnil
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant béttoire :</b> 2589
	<b>Maître d'ouvrage :</b> Syndicat d'Eau potable de l'Austreberthe
	<b>Bureau d'étude :</b> INGETEC

Date de réalisation des travaux :  
2002- 2005 ?

### DESCRIPTION

Objectif de protection : Sanitaire – Lutte contre l'infiltration des eaux de ruissellement : protection du captage de Limesy-Bequigny

Situation béttoire : Code 3 : « béttoire située à l'aval d'un ouvrage hydraulique structurant »  
Béttoire située au point de convergence de deux vallées sèches.

Type d'eau d'engouffrement : béttoire très active.

### DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT PROPOSE

Traitement de la béttoire stricto sensu : colmatage (d'après le rapport SETEGUE 2000) + dériver les flux arrivant sur la béttoire pour éviter tout engouffrement. Détail du colmatage (SETEGUE, 2000) :

- décaissement au delà du point de source de la béttoire : purge sur toute la hauteur de la béttoire + 1 m supplémentaire en engravure (cf. schéma type),
- traitement à la chaux des matériaux issus de la béttoire puis remblayage par couches successibles de 20 à 25 cm ,
- mise en œuvre d'un géotextile
- pose d'une nappe de terre végétale

#### Aménagements périphériques :

- Réalisation d'un fossé étanche à proximité de la béttoire type caniveau ouvert béton pour fossé étanche (passant à proximité de la béttoire)
- Réalisation d'une prairie inondable de 5000m<sup>3</sup> en amont dans le talweg Est
- Réalisation d'un bassin de stockage de 15000m<sup>3</sup> ou d'une prairie inondable de 4000 ou 10000m<sup>3</sup> en amont dans le talweg Ouest
- Mise en place d'un filtre à sable à la sortie des bassins

#### Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

- conflit avec l'aménagement proposé par le Syndicat des Rivières de l'Austreberthe et de la Saffimbec (cf. encadré ci-dessous)
- l'HA préconise un débit de fuite des ouvrages de 20 l/s ; INGETEC met en doute cette préconisation de débit constant et propose plutôt des dispositifs de fuite progressifs (3 orifices superposés au lieu d'un seul)

### TYPE D'AMENAGEMENT ABANDONNE

Dans le cadre de la lutte contre les inondations, le Syndicat des Rivières de l'Austreberthe et de la Saffimbec avait proposé un autre projet pour cette zone de convergence des 2 talwegs : 1 zone de stockage de 20 000m<sup>3</sup>. Cet aménagement a été jugé par INGETEC incompatible car « la béttoire se situerait alors dans une situation de « bonde de vidange » ; un tel aménagement dynamiserait le fonctionnement de la béttoire, en augmentant le risque d'apparition de pathologie karstique sur le captage (augmentation de la turbidité et des pollutions associées) ».

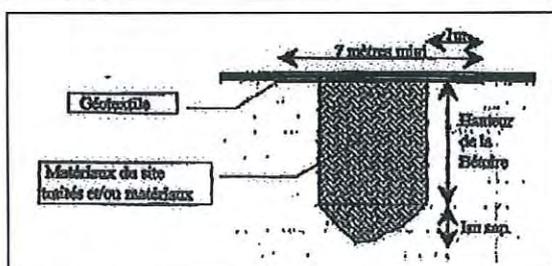
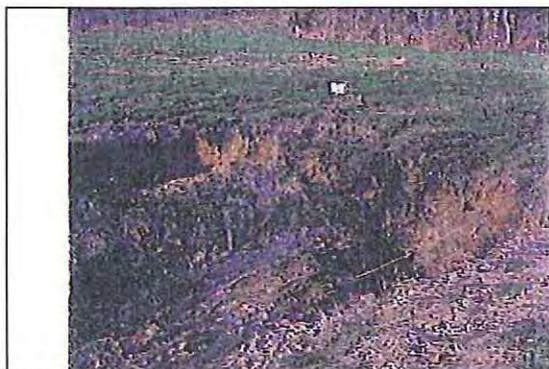


Schéma de principe du colmatage de la béttoire (dossier projet SETEGUE 2000)

		<p>Principe du filtre à sable en pied d'ouvrage</p>
<p><u>Plan d'aménagement</u> : fossé étanche à réaliser à court terme pour détourner les flux de la béttoire-INGETEC</p>	<p><u>Plan d'aménagement</u> : Réalisation d'une prairie inondable (5000m3) dans le talweg Est -INGETEC</p>	<p><u>Plan d'aménagement</u> : Mise en place d'un filtre à sable avant rejet des eaux de la prairie inondable</p>

### CONSTAT DE TERRAIN D'AOUT 2008

- la digue et la prairie inondable ont bien été réalisés dans le talweg Est ;
- le talweg a été reprofilé au niveau de la convergence des talwegs mais aucune buse béton (étanche) n'est observée ;
- au niveau de la convergence des 2 talwegs présence d'un matelas de gabion = sommet de la béttoire aménagée ? ou le reprofilage du talweg a permis d'éviter la béttoire ?



Béttoire de Neufmesnil avant aménagement en 2000



Béttoire de Neufmesnil après aménagement en 2008



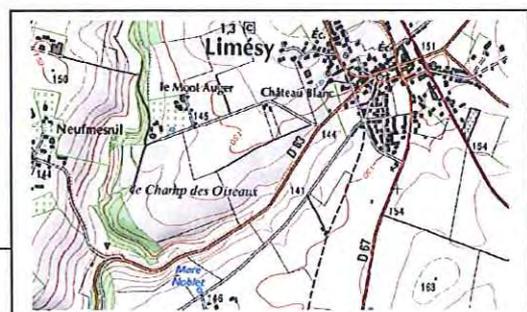
Aménagements périphériques : digue réalisée dans le talweg Est (2007)



Aménagements périphériques : convergence des 2 talwegs après aménagement (août 2008)

Source bibliographique : INGETEC (2000) – Dimensionnement d'ouvrages de lutte contre l'infiltration des eaux de ruissellement dans 4 béttoires – Syndicat d'Eau potable de l'Austreberthe

Localisation de la béttoire de Neufmesnil



## Aménagement de la béttoire du CD142

IDENTIFICATION	<b>Commune :</b> Limesy
	<b>Lieu-dit :</b> Neufmesnil
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant béttoire :</b> 2586
	<b>Maître d'ouvrage :</b> Syndicat d'Eau potable de l'Austreberthe
	<b>Bureau d'étude :</b> INGETEC

Date de réalisation des travaux :  
2001- 2004 ?

## DESCRIPTION

Objectif de protection : Sanitaire – Lutte contre l'infiltration des eaux de ruissellement : protection du captage de Limesy-Bequigny

Situation béttoire : Code 4 : « béttoire située dans une zone sans aménagement hydraulique structurant »- Béttoire située en contrebas de la route départementale 142 environ 2km au Sud-Est du bourg de Limésy.

Type d'eau d'engouffrement : recueille les eaux d'un bassin versant majoritairement occupé par des labours ainsi que les eaux de la chaussée du CD142 pour une surface de d'environ 1 hectare. Risque de pollution accidentelles et chroniques induites par la circulation sur le CD142 et aux risque de pollution chronique induits par la présences des vastes espaces labourés.

## DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT PROPOSE

Traitement de la béttoire stricto sensus : colmatage (d'après le rapport SETEGUE 2000) + dériver les flux arrivant sur la béttoire pour éviter tout engouffrement. Détail du colmatage (SETEGUE, 2000) :

- décaissement au delà du point de source de la béttoire : purge sur toute la hauteur de la béttoire + 1 m supplémentaire en engravure (cf. schéma type),
- traitement à la chaux des matériaux issus de la béttoire puis remblayage par couches successibles de 20 à 25 cm ,
- mise en œuvre d'un géotextile
- pose d'une nappe de terre végétale

Aménagements périphériques : Ingetec préconise une protection de la béttoire par la réalisation :

- En amont d'une prairie inondable délimitée par une digue (stockage 2600m3) ; digue parallèle à la route en travers du talweg équipée d'un ouvrage de fuite préfabriqué (débit de fuite fixe 20l/s + déshuilage physique (tube plongeur)) et une surverse en cas de débordement de l'ouvrage.
- Réalisation d'un fossé étanche à proximité de la béttoire type caniveau étanche pour diriger les eaux en aval de la béttoire,
- Création de 2 fossés en crête de talus pour permettre de diriger les eaux de ruissellement de la chaussée nord du CD142 vers le bassin afin de subir un déshuilage

Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

- Se coordonner avec le Syndicat des Rivières de l'Austreberthe et de la Saffimbec



Plan d'aménagement : prairie inondable en amont + dérivation des flux de la béttoire-INGETEC



Photo du site avant travaux (avril 2000 – Ingetec)

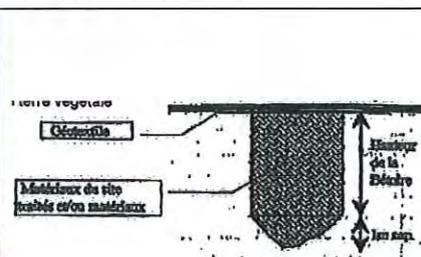


Schéma type du colmatage de la béttoire (plan projet, SETEGUE 2000)



**CONSTAT DE TERRAIN D'AOUT 2008**

- la prairie inondable et la digue ont bien été réalisée ; digue équipée d'une surverse en gabion
- le fossé étanche engazonné pour contourner la bêteoire et diriger les eaux en aval de celle-ci, est réalisé,
- observation de 2 bêteoires ouvertes dans la partie amont de l'aire de stockage
- la bêteoire du CD142 est difficilement localisable, un léger effondrement dans la zone boisée semble observable.



Bêteoire du CD142 – un petit orifice semble être visible mais pas d'effondrement notable (aout 2008)



Surverse en gabion de la digue et départ du fossé étanche (aout 2008)

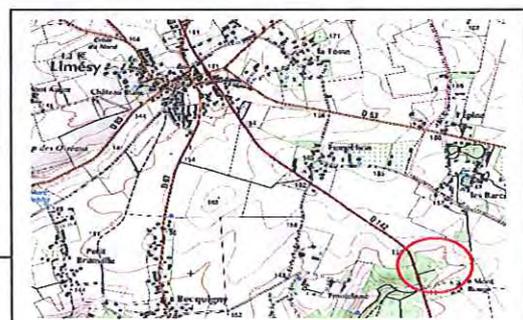


Bêteoire 7355 située dans la zone amont de l'aire inondable (aout 2008)



Bêteoire 7370 située dans la zone amont de l'aire inondable (aout 2008)

Source bibliographique : INGETEC (2000) – Dimensionnement d'ouvrages de lutte contre l'infiltration des eaux de ruissellement dans 4 bêteoires – Syndicat d'Eau potable de l'Austreberthe



Localisation de la bêteoire du CD 142

## Aménagement de la bétoire 21 de Bosc Bénard Crescy

<b>IDENTIFICATION</b>	<b>Commune :</b> Bosc Bénard Crescy
	<b>Lieu-dit :</b>
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant bétoire :</b> 5460, bétoire 21 à la Ferme du Manoir
	<b>Maître d'ouvrage :</b> SERSAEP
	<b>Bureau d'étude :</b> BRGM

Date de réalisation des travaux  
1994-1995

**DESCRIPTION**

Objectif de protection : Risque sanitaire  
Protection du captage des Varras

Situation bétoire : Code 4 : Bétoires situées dans une zone sans aménagements hydrauliques structurants. La bétoire est située dans une prairie, à environ 50 m d'une mare.

Type d'eau d'engouffrement : elle reçoit les eaux d'origine agricole et urbaine

**DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT**

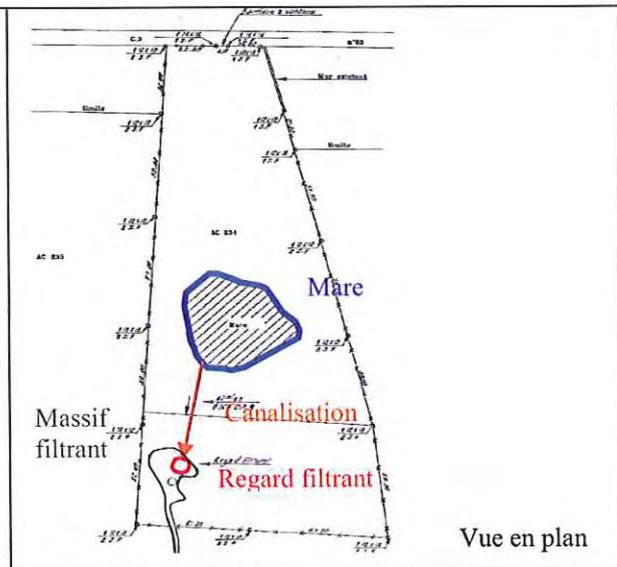
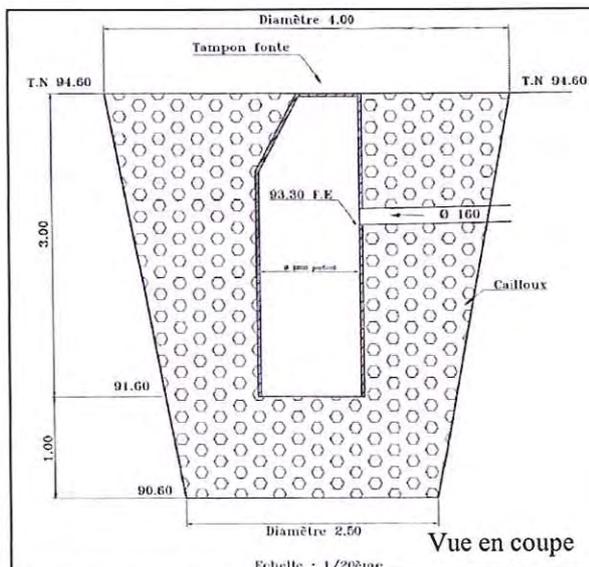
- décapage de la bétoire
- curage de la bétoire
- mise en place d'un massif filtrant et autobloquant composé de gros cailloux
- mise en place au milieu de la bétoire d'un regard en fonte de 3 m de profondeur crépiné pour permettre l'infiltration et comprenant l'arrivée du trop plein de la mare

Aménagements périphériques :

- curage de la mare
- mise en place d'un trop plein avec une canalisation souterraine amenant le surplus de la mare dans la bétoire aménagée

Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

- achat des terrains





**ENTRETIEN**

Non précisée

**ETUDE PRELABLE**

Traçage

**CONSTAT DE TERRAIN DU 26/03/10**

- a priori pas de déshuileur déboureur observé
- dépôt de sédiments sur le massif autobloquant au fond du regard
- pas d'affaissement particulier dans le regard
- en périphérie du massif filtrant, une dépression de 80 cm de diamètre et de 50 cm de profondeur
- le site est entretenu et clôturé

Source bibliographique : DE LA QUERRIERE & AL. (1994) – SERSAEP, *Etude des possibilités de protection du point d'eau des Varras*. Rapport BRGM. 26p.



Aménagement de la béttoire de Bois Maréchal

IDENTIFICATION	<b>Commune :</b> Limesy
	<b>Lieu-dit :</b> Bois-Maréchal (ou les Terres de Cideville)
	<b>Bassin hydrologique :</b>
	<b>Identifiant béttoire :</b> 289
	<b>Maître d'ouvrage :</b> Syndicat d'Eau potable de l'Austreberthe
	<b>Bureau d'étude :</b> INGETEC

Date de réalisation des travaux :  
2002-2005 ??

**DESCRIPTION**

Objectif de protection : Sanitaire – Lutte contre l'infiltration des eaux de ruissellement : protection du captage de Limesy-Becquigny

Situation béttoire : Code 4 « béttoire située dans une zone sans aménagement »  
Béttoire située dans un thalweg occupé par une prairie en bordure du CD263

Type d'eau d'engouffrement : eaux issues de vastes espaces labourés

**DETAIL TECHNIQUE DE L'AMENAGEMENT**

- Traitement de la béttoire stricto sensu : non précisé. L'idée est de dériver les flux arrivant sur la béttoire pour éviter tout engouffrement.

Aménagements périphériques :

- Réalisation d'une digue en travers du thalweg créant une zone inondable (stockage 2700 m3), équipée d'ouvrage de fuite (fixe de 20l/s) et d'une surverse ;
- Remise en prairie de la parcelle noyée ainsi que des fonds de thalwegs en amont afin d'assurer un piégeage des particules fines et éviter le comblement rapide de l'ouvrage ;
- Création de bandes enherbées d'une largeur d'une quinzaine de mètres au niveau du thalweg principal et du thalweg adjacent ;

Contraintes techniques, difficultés rencontrées :

- Le syndicat doit se porter acquéreur des parcelles concernées par les aménagements

**ENTRETIEN**

- Ingetec préconise une surveillance de la béttoire afin de ne plus observer des travaux de comblement « sauvages » réalisés en utilisant des matériaux non adaptés aux impératifs liés à l'alimentation en eau potable. En particulier sont à bannir tous les déversements de matières organiques et matériaux de granulométrie fine, non cohésifs.



Plan d'aménagement (rapport projet) :  
Création d'une digue-prairie inondable +  
bandes enherbées en fond de thalweg  
INGETEC, 2000

### CONSTAT DE TERRAIN D'AOUT 2008

- la digue et la prairie inondable ont bien été réalisés dans le thalweg ;
- les différents thalwegs ont bien été enherbés ;
- la bétairie n'a pas été retrouvée sur le terrain ; elle se situerait à proximité de la zone actuelle de convergence des thalwegs d'après ses coordonnées.



Bétairie de Bois Maréchal avant aménagement en mars 2000 (INGETEC)



Bétairie après aménagement en avril 2008 (présence de matériaux tout venants)

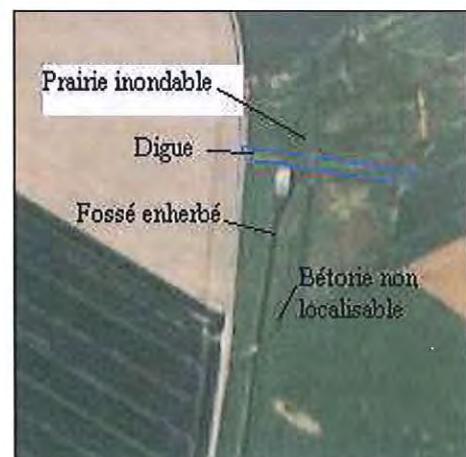
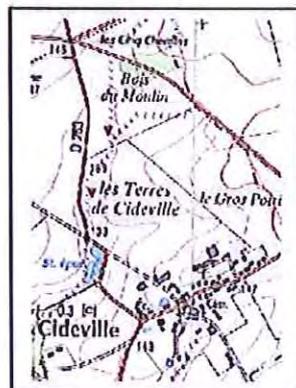


Aménagements périphériques : digue réalisée en amont dans le thalweg (2008)



Zone de convergence des différents thalwegs après aménagement ('août 2008) - présence d'eau stagnante

Source bibliographique :  
 INGETEC (2000) –  
 Dimensionnement d'ouvrages  
 de lutte contre l'infiltration des  
 eaux de ruissellements dans 4  
 bétaires – Syndicat d'Eau  
 potable de l'Austreberthe.



**Annexe 8**  
-  
**Méthodes géophysiques applicables au contexte  
haut-normand**



## La géophysique

*Ce paragraphe est en grande partie extrait de la note de synthèse BRGM intitulée « Proposition d’application de méthodes géophysiques dans le cadre du projet REGOLITHE : note de synthèse. Cas d’étude sur les sources du Robec (Hte-Normandie) » réalisée par N. Coppo, JF Girard, A. Bitri, G. Pajot dans le cadre du Projet Interdisciplinaire dédié à l’étude intégrée des Transferts de flux dans la zone non saturée.*

L’application de la géophysique dans ce contexte a pour but de comprendre l’origine et le fonctionnement de la bétoire.

Les cavités naturelles (conduits karstiques) creusées dans les calcaires ou dans la craie sont particulièrement difficiles à détecter du fait de la complexité morphologique et de la variabilité lithologique. Seule une connaissance préalable du site (intégration de données culturelles, géologiques, spéléologiques,...) et/ou la combinaison de méthodes géophysiques permettent d’établir avec certitude la présence de vides francs.

Le contexte géologique de la région peut-être schématisé comme une superposition de trois horizons :

- un horizon superficiel constitué de loess (sables éoliens). Cet horizon est considéré comme homogène en termes de résistivité électrique (environ 50-100  $\Omega$ m) et de perméabilité de l’ordre de 10<sup>-5</sup> m/s.
- un horizon saprolitique d’argiles et limons à silex résultant de la décarbonatation de la craie sous-jacente. Sa résistivité pourrait être variable en fonction du contenu en silex mais relativement faible (de 20-30  $\Omega$ m) avec une perméabilité de l’ordre de 10<sup>-10</sup> m/s. De part leurs propriétés physiques, il semble que les argiles à silex contrôlent principalement le transfert des eaux d’infiltration vers la zone vadose.
- le massif de la craie présente une résistivité électrique à peu près homogène d’environ 150  $\Omega$ m.

L’épikarst est appréhendé comme un système régulateur qui stocke, sépare en différentes composantes et temporairement distribue les infiltrations (recharge) à la zone vadose. L’organisation des perméabilités dans l’épikarst se développe dynamiquement pour faciliter la convergence des eaux d’infiltration vers des structures collectrices plus profondes, telles que de larges fissures drainant la zone épikarstique. Cela se manifeste en surface par une somme de zones ponctuelles adaptées à la structure de perméabilité à la base de l’épikarst.

Dans une approche géophysique du problème des bétoires, la question d’échelle liée à la cible recherchée est primordiale car elle conditionne le choix des méthodes géophysiques applicables. Les bétoires peuvent être mises en évidence de deux manières :

- à grande échelle, par la détermination des axes structuraux majeurs sur lesquels s’organisent généralement les systèmes karstiques. Ces résultats permettent de définir qualitativement les secteurs probables de développement des bétoires
- à petite échelle, ponctuellement, par des dispositifs géophysiques adéquates.

Dans tous les cas une caractérisation haute-résolution de l'épikarst ne pourra être étendue à de vastes territoires qu'avec des coûts faramineux. De même, des investigations à trop grande échelle n'aboutiront à aucun résultat intéressant. Il convient de choisir une méthode intermédiaire permettant de définir les secteurs relatifs aux transferts vers la zone saturée.

Il existe différentes méthodes géophysiques :

La microgravimétrie est la méthode de détection directe des cavités la plus opérationnelle dans l'état actuel des expérimentations, l'emploi des méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques restant à développer dans ce contexte. Les études de gravimétrie ont généralement été utilisées dans un objectif de détection de cavités et de zones décomprimées, à titre préventif et dans le cadre d'aménagement urbain et routier.

Toutefois la faible superficie des zones investiguées rend parfois délicat, voir impossible, la séparation des effets gravimétriques régionaux des effets locaux recherchés. Ces phénomènes peuvent engendrer de grandes incertitudes sur la détection des anomalies recherchées. En effet, plus profondes sont les cibles, plus étendues seront les anomalies en surface et donc la superficie à couvrir en surface, avec des répercussions immédiates sur les coûts.

Les multiples investigations ont révélé des anomalies ayant des amplitudes de l'ordre de 15 à 50  $\mu$ Gal et des dimensions réduites avec des largeurs inférieurs à 20m. L'interprétation proposée est souvent celles de chenaux au toit du calcaire ou de zones décomprimées.

Les sondages sont recommandés pour préciser la nature et l'interprétation des anomalies observées.

Le radar géologique (GPR – Ground Penetrating Radar) est peu utilisé dans la détection des cavités. Toutefois, leur mise en évidence est indirectement révélée par des réflexions intenses et ponctuelles de forme hyperboliques sur les cavités.

La méthode VLF-résistivité a également été appliquée à la détection de cheminées karstiques colmatées d'argiles et des systèmes karstiques superficiels susceptible de se manifester par des anomalies conductrices.

La Résonance Magnétique Protonique (RMP) a récemment été appliquée à la détection de conduits karstiques. Il est possible d'imager un conduit de section bien inférieur à la taille du dispositif de mesure (boucle émettrice-réceptrice coïncidente) en effectuant un profil RMP avec des pas de mesures resserrés.

L'utilisation de l'électromagnétisme dans la localisation de conduit nécessite une connaissance du réseau karstique puisqu'il faut disposer un émetteur (dipôle magnétique oscillant basse fréquence) dans le réseau et de le localiser par profilage du champ magnétique alternatif en surface. Cette méthode a permis notamment la détection d'une cavité naturelle de 17 m de profondeur avec une précision de 1 à 2%.

Les études multi-méthodes : deux cas sont rapportés, correspondant à deux sites différents, dont le réseau karstique était connu au préalable par exploration

spéléologique. Des anomalies gravimétriques négatives ont été mesurées à l’aplomb des conduits karstiques. Toutefois l’amplitude de ces anomalies, supérieure à l’amplitude résultant de modélisations de conduit karstique de taille semblable suggère une superposition de sources, due à la fracturation et aux décompactions associées à l’épikarst. Des panneaux électriques effectués conjointement n’ont pu mettre en évidence ces conduits. En revanche, la microgravimétrie et l’analyse multicanaux des ondes de surface (MASW) ont montré des concordances précises sur la localisation de vides karstiques.

Il en ressort que la majeure partie des mesures géophysiques entreprises dans le but de mettre en évidence des cavités souterraines, n’ont pu aboutir qu’avec une connaissance préalable du site (intégration de données culturelles, géologiques, spéléologiques,...) et/ou par la combinaison de méthodes géophysiques ; sans ces pré-requis et à de très rares exceptions près où la cavité recherchée est de dimension considérable, il est presque impossible avec une seule méthode géophysique de déterminer précisément l’emplacement d’une cavité pour des raisons physiques (limitations des méthodes, profondeur d’investigation, résolution, sensibilité, interprétation des signatures géophysiques, impact des bruits instrumentaux, géologiques et environnementaux).

Hormis les méthodes géophysiques appliquées directement à la détection de cavités en milieu karstique, d’autres approches se focalisent sur la délimitation des zones conductrices, souvent associés aux zones fracturées sur lesquelles s’organisent les réseaux karstiques.

La méthode radar est largement utilisée pour la reconnaissance des structures de faibles profondeurs, efficace pour l’imagerie de la subsurface.

La méthode VLF-EM est une méthode électromagnétique employée dans l’hydrogéologie pour la détection des zones fracturées du milieu karstique. Celles-ci sont ensuite corrélées avec des zones de plus forte vulnérabilité ou pour la désignation d’injection de traceurs artificiels.

Cette méthode utilise les composantes de champs électromagnétiques générés par de puissants émetteurs destinés à la radio-télécommunications. La propagation de ces champs EM dans les sols génère un champ EM secondaire au passage dans des milieux aux résistivités différentes. Le rapport entre les composantes horizontale et verticale du champ magnétique permet la localisation d’anomalie.

La méthode VLF-Grad, variante de la précédente, consiste à mesurer le gradient vertical de la composante horizontale du champ magnétique local, émise par des radio-émetteurs basses fréquences. Cette méthode est efficace pour détecter les zones fracturées présentant d’importants contrastes de résistivité. Elle permet une couverture et une cartographie rapides des zones de plus haute perméabilité sur un secteur d’investigation, à l’instar d’autres méthodes EM.

La tomographie ou panneau électrique ne permet pas, à de rares exceptions où les vides sont conséquents, de détecter les conduits karstiques. Les inhomogénéités de subsurface rendent extrêmement complexe la résolution d’anomalies de faible longueur d’onde. Si, en surface, il semble possible d’obtenir de bons résultats, en

revanche, en profondeur, cette méthode ne peut non plus résoudre des anomalies telles que de petits conduits karstiques. Son application pourrait permettre en revanche de définir les zones d'intérêt à moyenne échelle.

Les méthodes sismiques sont efficaces à la détermination des zones fracturées à toute profondeur. En sismique réflexion haute résolution, des perturbations des réflecteurs géologiques ont été observés sur plusieurs sites à l'aplomb de marnières abandonnées. En regard de la problématique épikarstique, cette méthode géophysique ne semble toutefois pas à même de résoudre, pour le moins à elle-seule et à moyenne échelle, la complexité de ce milieu.

La méthode SP (Self-potentiel), a fait l'objet de recherches pour comprendre plus en détail les mécanismes générateurs de potentiel électrique dans le sol, tel que les mouvements d'eau (électrofiltration). Couplé à la tomographie électrique ou à l'EM34, elle permet de mettre clairement en évidence les anomalies de potentiel et de résistivité liées à la présence de bétaires.

La mise en évidence des zones d'infiltration préférentielle a été et sera la plus fructueuse en couplant résistivité ou EM et PS.

## **Annexe 9**

-

### **Extrait des doctrines et guides existants concernant la gestion de l’infiltration des eaux en Haute-Normandie**



Etant donné la faible densité du réseau hydrographique, la problématique de l’infiltration des eaux pluviales et eaux usées a fait l’objet de plusieurs guides à l’échelle départementale ou régionale. A noter les guides suivants :

- Aires d’infiltrations des stations d’épurations – guide de conception et de gestion – DISE (Délégation Interservice de l’eau) de Seine Maritime-décembre 2009. Ce document présente les différents types d’aire d’infiltration réalisable, met à disposition des fiches techniques pour leur dimensionnement. Il précise par ailleurs que :
  - *« Il faut dans ce contexte traiter et infiltrer le plus en amont possible les rejets d’eaux usées des stations d’épurations situées sur les plateaux »*,
  - *Concernant la protection de la ressources en eau potable, « les actions préventives et durables consistent à réduire toutes les sources de ruissellement pour limiter les transferts via le karst pouvant atteindre la ressource en au potable »*,
  - *Fiche n°1 : choix du type d’exutoire à l’aval d’une station d’épuration – contexte réglementaire*
  - *Fiche n°2 : choix du type d’exutoire à l’aval d’une station d’épuration – cahier des charges pour une étude de choix de l’exutoire*
  - *« Les cours d’eau présentent un potentiel des plus intéressants pour constituer l’exutoire ». En l’absence de cours d’eau, il est « nécessaire d’envisager le recours à l’infiltration » via des aires d’infiltrations;*
- Guide pour la gestion des eaux pluviales urbaines en Seine Maritime - 2007. Face à l’évolution des activités humaines, aux besoins accrus en surfaces imperméabilisés et aux modifications des pratiques culturelles, le **guide pour la gestion des eaux pluviales urbaine en Seine-Maritime** préconise de limiter fortement toute source de production de ruissellement dès l’origine, en infiltrant sur place, en collectant le ruissellement produit et en le régulant selon des rejets limités en aval, et ce quelle que soit la nature des projets. Ce guide évoque plusieurs principes pour améliorer de la situation :
  - *La « Maîtrise des ruissellements doit se concevoir à l’échelle des bassins versants (de façon globale avec une cohérence d’ensemble) »*
  - *« Il est indispensable de marier des mesures préventives aux mesures curatives ; »*
  - *« Il est fondamental d’agir au point de départ en favorisant par tout moyen l’infiltration et la non aggravation des ruissellements. »*
  - *« un objectif majeur dans la gestion des eaux pluviales est de privilégier l’infiltration [diffuse] d’une partie des eaux, dès que la perméabilité du sol le*

*permet. Ceci permet de gérer les pluies courantes sans rejet vers le milieu aval ».*

- *Concernant le traitement des eaux pluviales collectées (dans bassin de rétention) : « La gestion des eaux pluviales ne se limite pas au seul aspect quantitatif, la prise en compte de l'aspect qualitatif est essentiel. [...]. Les dispositifs doivent être adaptés selon les risques de pollution des eaux pluviales de la zone et de la vulnérabilité du milieu récepteur » (exemple pour des eaux de ruissellement « classiques » : bassin de rétention (décantation) + massif filtrant) ;*
- **Infiltration des eaux – Document de synthèse Version 3 – Groupe de travail – DISE –Infiltration des eaux – Document de travail – 2002 :**
  - L'infiltration des eaux concerne :
    - *toutes les eaux usées traitées (pas de rejet brute) ou pluviales ayant subi un aménagement ou une épuration avant d'être rejetées dans le milieu naturel ;*
    - *toutes les eaux pour lesquelles, il n'existe pas d'exutoires naturels superficiels ;*
    - *tous les procédés visant à infiltrer ou à répartir les eaux soit sur le sol, soit dans le sol afin de disperser les eaux ;*
  - *ce document précise que l'aménagement des béttoires dans le but d'infiltrer les eaux de surface constitue un dispositif d'« ultime recours » ; il convient alors de « justifier que les autres solutions d'infiltration ne sont pas possibles et de confirmer par une étude générale de hiérarchisation des béttoires : risques de pollution, volumes mis en jeu, bassin versant élémentaire de la béttoire, volume d'engouffrement ; occurrence »*

**Annexe 10**  
-  
**Fiches de principe des aménagements**



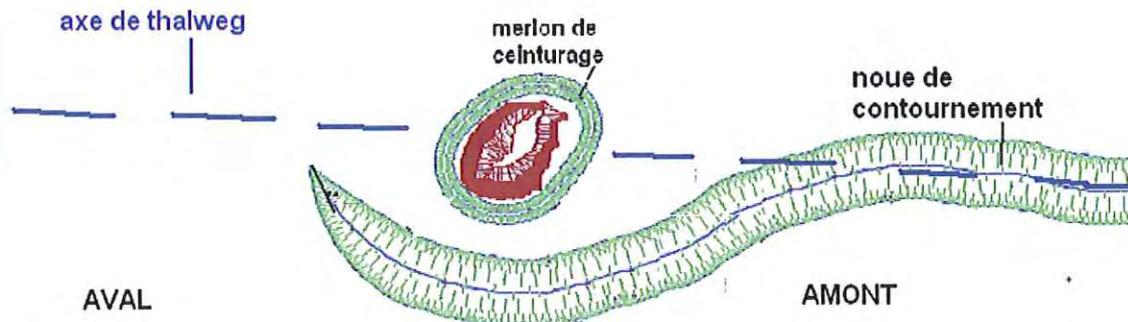
**Type d'aménagement : DERIVATION DE FLUX (merlon de ceinturage / noue de contournement)**

**Risques :** sanitaire, hydraulique, hydrologique

**Dans quel cas l'appliquer :**

- dans une zone sans aménagement
- en aval d'un ouvrage hydraulique

**Schéma :**



**Description de l'aménagement :**

- merlon étanche de ceinturage (talus étanche) autour de la béttoire pour empêcher tout écoulement d'eau vers la béttoire
- béttoire laissée en l'état ou de préférence comblée (à minima pour bloquer la suffosion ; de façon étanche si le budget le permet)
- des noues enherbées peuvent être mises en place pour dévier les eaux de ruissellement et prolonger la longévité du merlon

**Avantages :**

- réactivation de la béttoire limitée par le détournement des eaux

**Inconvénients :**

- aucun contrôle de la qualité des eaux en cas de défaillance du talus ou d'arrivée d'eau massive si la béttoire n'est pas comblée de façon étanche

**Remarques, recommandations :**

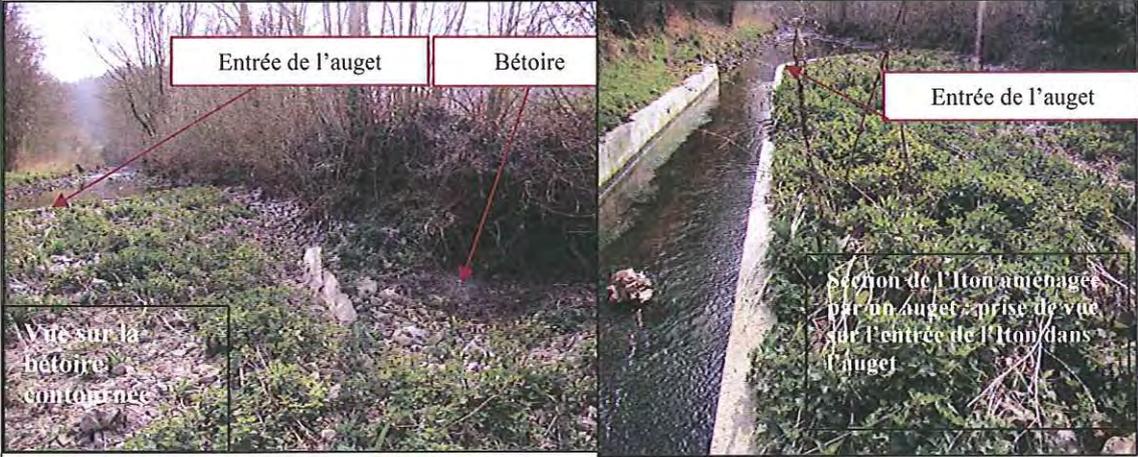
- Les aménagements de béttoire ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.

**Type d'aménagement : DERIVATION DE FLUX (en lit mineur de cours d'eau)**

**Risques :** hydrologique

**Dans quel cas l'appliquer :**  
- Au niveau d'un cours d'eau

**Schéma :**



**Description de l'aménagement :**  
Cet aménagement est mis en place pour préserver un débit minimum du cours d'eau à l'étiage :  
- Contournement de la bétoire par un auget en béton  
- Bétoire laissée en l'état

**Avantages :**  
- permet de préserver un débit minimum au cours d'eau à l'étiage

**Inconvénients :**  
- aménagement fonctionnel à l'étiage uniquement : en période de hautes eaux (niveau du cours d'eau au dessus de l'auget), la bétoire est de nouveau submergée

**Remarques, recommandations :**  
Les aménagements de bétoire ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.

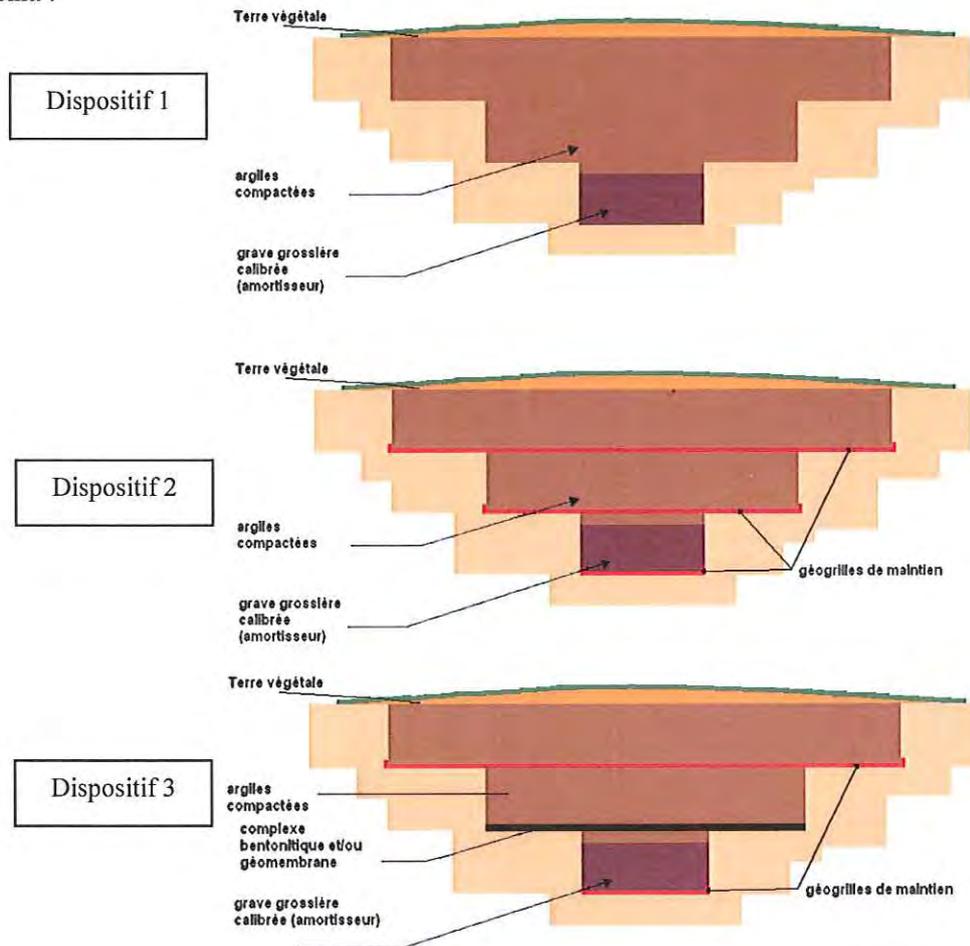
## Type d'aménagement : COLMATAGE par couche d'argiles compactées

Risques : sanitaire, hydrologique, hydraulique, géotechnique

Dans quel cas l'appliquer :

- Pour empêcher l'infiltration d'eau de surface de qualité dégradée vers les eaux souterraines et pour maintenir la stabilité de la surface

Schéma :



Description de l'aménagement :

- Purge : dimension et géométrie de l'excavation à adapter en fonction de la morphologie de la bêteoire ; profondeur atteignant idéalement le contact argile à silex/craie. L'emprise de l'excavation doit être très supérieure au diamètre de la bêteoire
- comblement du fond de fouille par de la grave grossière jouant le rôle d'amortisseur
- comblement des excavations par des argiles (perméabilité  $< 10^{-8} m/s$ ) compactées par couche
- pose d'une couche humidificatrice (terre végétale enherbée) en forme de dôme pour maintenir la teneur en eau et éviter le retrait des argiles
- pose d'un témoin sur la zone traitée afin de pouvoir localiser l'ouvrage et suivre son évolution.

Remarques :

- En cas de risque géotechnique, il est possible d'intégrer des géogrilles dans le dispositif au niveau du fond de fouille et/ou de chaque palier afin de renforcer le maintien de l'aménagement (dispositif n°2).
- Pour améliorer l'imperméabilité, il est possible d'ajouter dans le dispositif un complexe bentonitique ou une géomembrane imperméable au milieu de l'excavation (dispositif n°3). La mise en place d'un complexe bentonitique en surface est risquée (assèchement possible du complexe pouvant modifier ses caractéristiques mécaniques).
- Entre deux couches de granulométrie différente, il est recommandé de mettre en place un géotextile pour éviter toute déstabilisation de l'aménagement liée à la migration d'éléments fins dans les éléments plus grossiers..

Avantages :

- Stabilité à moyen terme par la multiplicité des géogrilles due à l'excavation par palier augmentant la portance et l'ancrage des géogrilles
- Imperméabilité liée aux couches d'argiles et au complexe bentonitique
- Témoin

Inconvénients :

- Le complexe bentonitique devient inefficace s'il n'est plus humide
- Risque de lessivage des particules argileuses : prévoir une géomembrane
- Risque d'écoulements latéraux : prévoir une géomembrane en chaussette
- Les écoulements en fond de fouilles sont toujours possibles

**Remarques, recommandations :**

- Il est recommandé d'avoir une emprise de purge bien supérieure à l'emprise de la bétairie
- Le sol limoneux du site peut être utilisé après traitement et être purgé des éventuels silex trouvés en profondeur (la présence des silex augmente la perméabilité). La réutilisation des matériaux en place pour le colmatage, doit faire l'objet d'une étude de faisabilité spécifique
- Nous recommandons d'exécuter ces travaux en période sèche
- Les aménagements de bétairie ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.

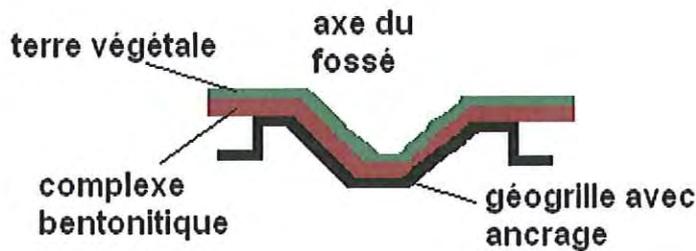
**Type d'aménagement : COLMATAGE de bétaires en fossé**

**Risques :** sanitaire, hydraulique, hydrologique, géotechnique

**Dans quel cas l'appliquer :**

- Dans un fossé

**Schéma :**



**Description de l'aménagement :**

- Purge : dimension et géométrie de l'excavation à adapter en fonction de la morphologie de la bétairie ; profondeur atteignant idéalement le contact formations superficielles/craie. L'emprise de l'excavation doit être très supérieure au diamètre de la bétairie.
- Comblement de la bétairie selon les modalités indiquées dans la fiche « COLMATAGE par couche d'argiles compactées »
- pose d'une géogrille avec ancrage pour éviter le phénomène de renardage ;
- pose d'un géocomposite bentonitique
- remise en place de terre végétale

**Avantages :**

- l'imperméabilisation d'une longue section d'un fossé bien au-delà de la bétairie traitée permet de limiter l'ouverture de bétaires à proximité.

**Inconvénients :**

- Le complexe bentonitique devient inefficace s'il n'est plus humide

**Remarques, recommandations :**

- Il est recommandé d'avoir une emprise de purge bien supérieure à l'emprise de la bétairie
- le fossé doit être imperméabilisé bien en amont et en aval de la bétairie.
- Les aménagements de bétairie ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.

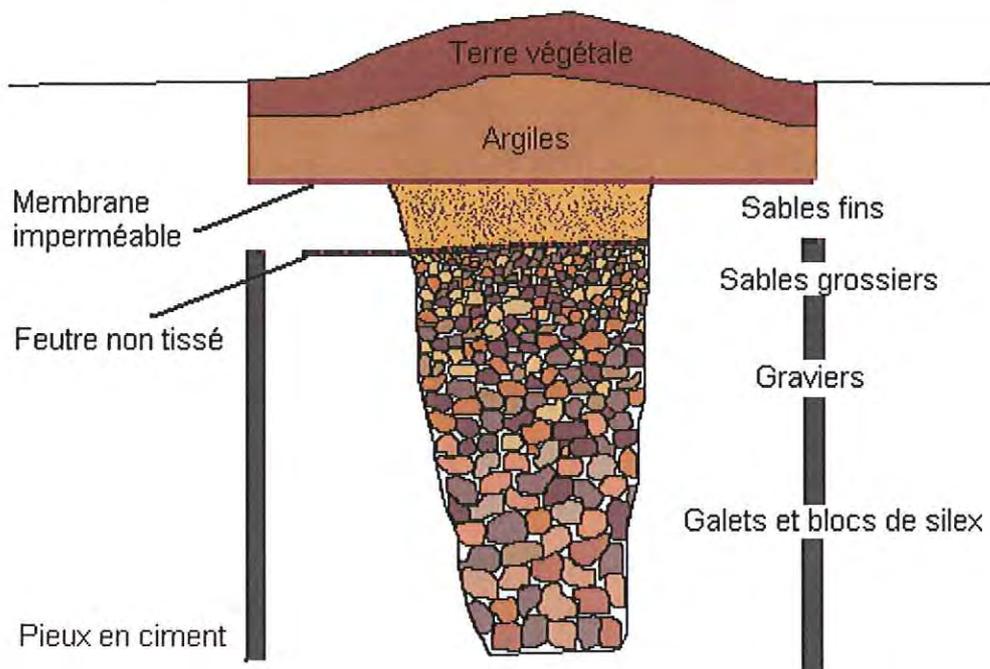
## Type d'aménagement : COLMATAGE granulo-classé

Risques : sanitaire, hydrologique

Dans quel cas l'appliquer :

- dans le cas de terrains à granulométrie importante (bêtoires ouvertes dans lit majeur ou mineur d'un cours d'eau par exemple)
- dans une zone sans ouvrage structurant

Schéma :



Description de l'aménagement :

- Purge : dimension et géométrie de l'excavation à adapter en fonction de la morphologie de la bêtoire ; profondeur atteignant idéalement le contact formations superficielles/craie. L'emprise de l'excavation doit être très supérieure au diamètre de la bêtoire.
- comblement par des matériaux de granulométrie décroissante : blocs de silex puis graviers, sables
- remblai de sables fins (pose de géotextile entre les matériaux de granulométrie différente)
- pose d'une membrane imperméable
- couverture d'argiles puis de terre végétale

Avantages :

- Stabilité à court terme (confinement de la cavité)
- Les pieux en ciment stabilisent les terrains alluvionnaires et peuvent limiter les écoulements latéraux tout en drainant les flux verticaux

Inconvénients :

- Mouvement différentiel
- Ecoulement du remblayage du fond de bêtoire
- L'absence de géogrille limite la stabilité + écoulement superficiel

Remarques, recommandations :

- il est possible pour maintenir les parois de l'excavation (dans le cas de terrains bouillants) au moment du chantier par des pieux en béton (injection de ciment à faible pression avant excavation). L'injection de ciment est toutefois à employer avec précaution dans les terrains karstiques !
- Si la granulométrie des terrains est très différente de celle des matériaux de comblement, prévoir alors un géotextile en chaussette
- en cas de rejeu éventuel, la bêtoire sera recombée avec du matériau (gravier puis argile) pour reconstituer le chapeau de protection
- Les aménagements de bêtoire ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.

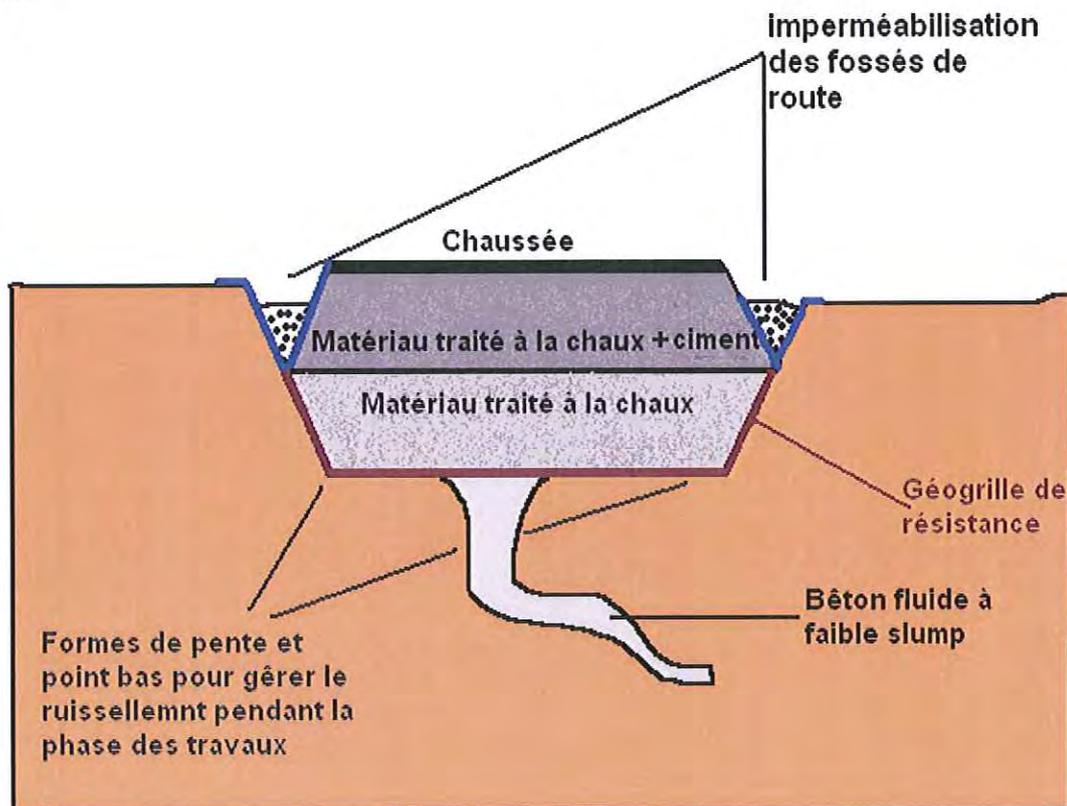
**Type d'aménagement : COLMATAGE injection de ciment**

**Risques :** géotechnique

**Dans quel cas l'appliquer :**

- Sous ou proche d'une infrastructure

**Schéma :**



**Description de l'aménagement :**

- Purgé : dimension et géométrie de l'excavation à adapter en fonction de la morphologie de la bêteoire ; profondeur atteignant idéalement le contact argile à silex/craie. L'emprise de l'excavation doit être très supérieure au diamètre de la bêteoire.
- Comblement par un béton fluide à faible slump
- Comblement : limons argileux traités à la chaux et compactés, mis en œuvre dans une géogridde puis limons argileux traités à la chaux et au ciment compactés, mis en œuvre dans une géogridde
- Réaliser une nouvelle structure de chaussée adaptée au trafic (dans le cas d'une route) ;

**Avantages :**

- Pérennisation de l'évolution de la bêteoire par confinement
- Stabilité optimum

**Inconvénients :**

- Limitée à des tailles de bêteoire petites
- Injection de ciment dans du karst est toujours hasardeuse et risquée (modification des écoulements souterrains)

**Remarques, recommandations :**

- L'injection de béton dans le karst est à utiliser en ultime recours dans le cas où l'infrastructure ne peut être déplacée ; préférer un colmatage par des argiles compactées sinon.
- Il convient d'imperméabiliser impérativement les fossés situés bien en amont et en aval de la zone effondrée (cf. fiche «COLMATAGE de bêteoires en fossé») ;
- Les aménagements de bêteoire ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.

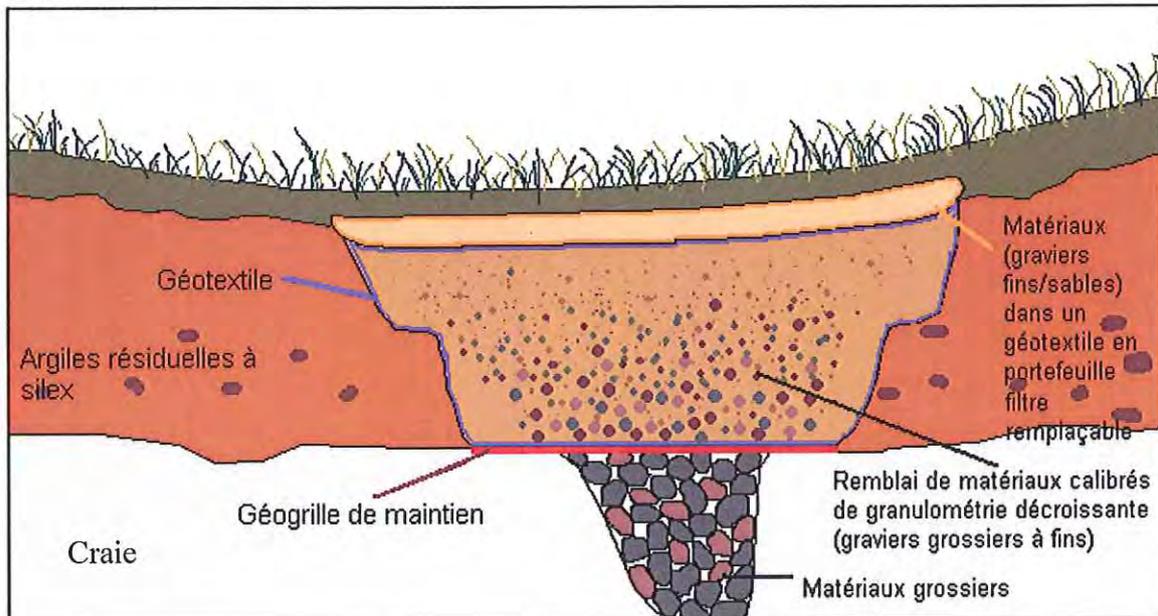


## Type d'aménagement : INFILTRATION par massif filtrant

Risques : hydrologique

- Dans quel cas l'appliquer : en ultime recours ! Le caractère infiltrant d'une béttoire est conservé dans le cas où elle représente le seul exutoire ou elle permet de soulager la charge d'eaux pluviales du secteur. Ce choix doit être accompagné de la justification de l'impossibilité de tout autre exutoire pour les eaux de ruissellement. Un traitement adapté des eaux superficielles doit être mis en place avant infiltration.
- Dans quel cas ne pas l'appliquer : risque sanitaire, géotechnique

Schéma :



Description de l'aménagement :

- Purge : dimension et géométrie de l'excavation à adapter en fonction de la morphologie de la béttoire ; profondeur atteignant idéalement le contact argile à silex/craie. L'emprise de l'excavation doit être très supérieure au diamètre de la béttoire
- Comblement du fond par des matériaux grossiers (gros silex, enrochement...) (partie située dans la craie)
- Pose d'une géogrille (à l'interface craie / argile à silex) afin de renforcer le maintien de l'aménagement
- Mise en place d'un géotextile en cuvette contenant des matériaux de granulométrie décroissante
- Mise en place de matériaux plus fins enfermés dans un géotextile, jouant le rôle de filtre. Le fait de mettre ce filtre dans un géotextile en portefeuille permet le remplacement de cet horizon lorsqu'il sera colmaté
- Couverture de terre végétale et enherbement
- Pose d'un témoin
- Mise en place d'une couronne enherbée de 10m de large autour de la béttoire

Variante : il est possible de coupler cet aménagement avec :

- un merlon traversé par une canalisation (débit de fuite) mis en place autour de la béttoire ; ce dispositif permet de contrôler le débit s'infiltrant dans la béttoire et de limiter le colmatage du massif filtrant
- une demi-couronne de fascine positionnée à l'amont immédiat de la béttoire pour améliorer la qualité des eaux d'engouffrement
- des bandes enherbées dans les axes d'écoulement amont de la béttoire.

Avantages :

- la couronne enherbée et les fascines mises en place sur la parcelle de la béttoire permettent d'abattre la charge polluante des eaux de ruissellement
- possibilité de changer le dispositif filtrant superficiel (matériaux filtrant mis en place dans un géotextile en portefeuille)
- la géogrille mise en place au contact argile/craie permet de limiter le risque d'évolution et/ou rejeu de la béttoire dans le temps

Inconvénients :

- absence de moyen de contrôle ni de visualisation en cas de dysfonctionnement qualitatif des eaux d'engouffrement
- risques de pollution des eaux souterraines selon la qualité des eaux d'engouffrement

**Remarques, recommandations :**

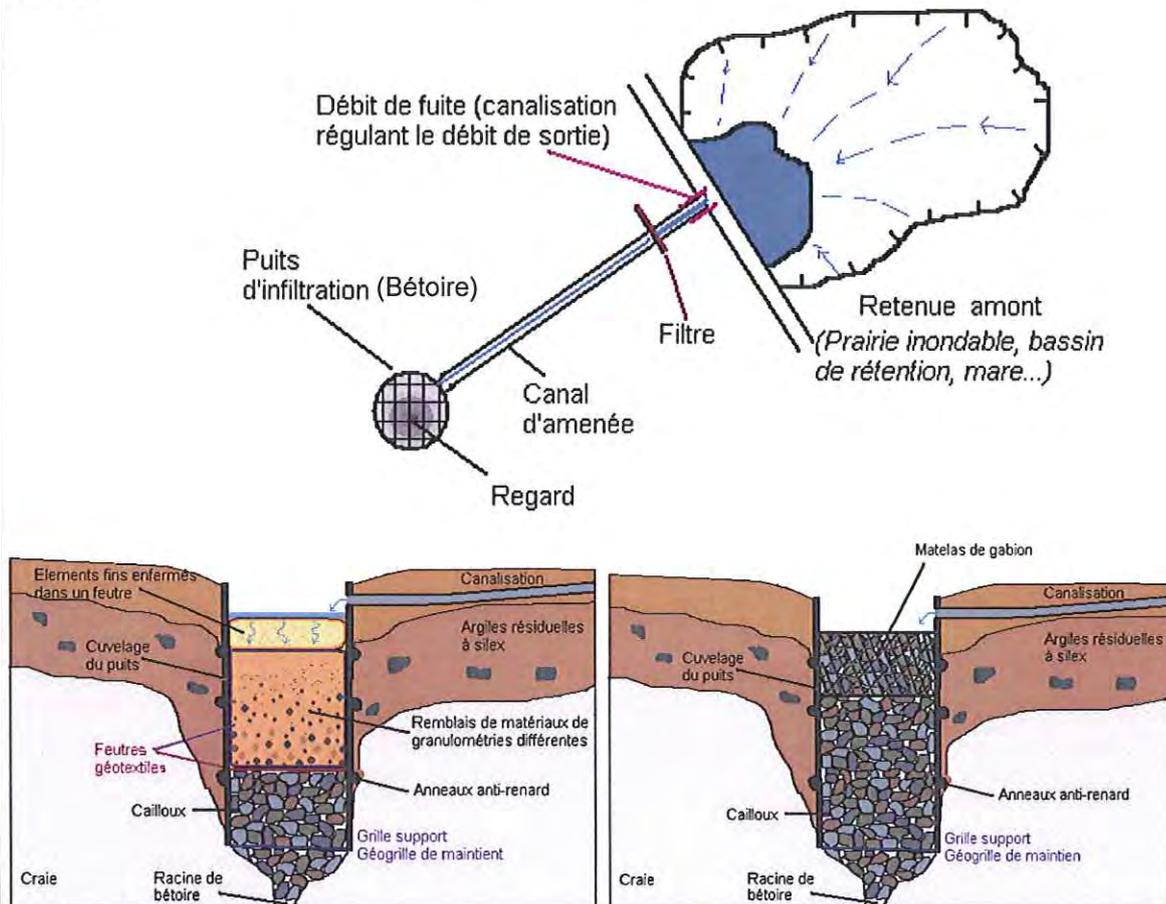
- L'infiltration est un dispositif aléatoire de dernier recours (le caractère infiltrant d'une béttoire est conservé dans le cas où elle représente le seul exutoire ou elle permet de soulager la charge d'eaux pluviales du secteur). Ce choix doit être accompagné de la justification de l'impossibilité de tout autre exutoire pour les eaux de ruissellement
  
- Cet aménagement de béttoire, strico-sensu doit nécessairement être accompagné d'aménagement de versant (hydraulique douce et hydraulique de rétention) permettant de diminuer la production d'eaux de ruissellement, de ralentir les écoulements résiduels et de réduire la charge polluante des écoulements.
  
- Les aménagements de béttoire ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.

## Type d'aménagement : INFILTRATION : béttoire aménagée en puits d'infiltration

Risques : hydrologique

- Dans quel cas l'appliquer : en ultime recours et en aval d'un ouvrage de décantation ! Le caractère infiltrant d'une béttoire est conservé dans le cas où elle représente le seul exutoire ou elle permet de soulager la charge d'eaux pluviales du secteur. Ce choix doit être accompagné de la justification de l'impossibilité de tout autre exutoire pour les eaux de ruissellement. Un traitement adapté des eaux superficielles doit être mis en place avant infiltration.
- Dans quel cas ne pas l'appliquer : risque sanitaire, géotechnique

Schéma :



### Description de l'aménagement :

- purge : dimension et géométrie de l'excavation à adapter en fonction de la morphologie de la béttoire ; profondeur atteignant idéalement le contact argile à silex/craie. L'emprise de l'excavation doit être très supérieure au diamètre de la béttoire
- pose d'un cuvelage béton muni d'anneaux anti-renard
- deux dispositifs de remplissage possibles :
  - dispositif filtrant : constitué de matériaux de granulométrie décroissante séparés de géotextiles et surmonté d'un filtre superficiel (gravier/sable dans un géotextile en portefeuille)
  - dispositif autobloquant : constitué d'un massif autobloquant (diamètres des blocs > 20cm) surmonté d'un matelas de gabions pour dissiper l'énergie de l'arrivée d'eau. Le dispositif autobloquant permet uniquement une stabilisation
- La canalisation d'amenée des eaux doit être munie d'un filtre ou décanteur permettant une gestion minimum de la qualité des eaux engouffrées
- Si les débits d'arrivée d'eau sont faibles, la canalisation peut être remplacée par une noue d'amenée, un fossé enherbé, ou des matelas de gabions pour limiter l'érosion superficielle (attention au risque d'ouverture de béttoire dans le fossé ; imperméabilisation nécessaire ?)

<b>Avantages :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪</li> </ul>	<b>Inconvénients :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- absence de moyen de contrôle ni de visualisation en cas de dysfonctionnement qualitatif des eaux d'engouffrement,</li> <li>- risques de pollution des eaux souterraines selon la qualité des eaux d'engouffrement,</li> <li>- Risque d'évolution et/ou rejeu de la bêteoire dans le temps</li> <li>- Risque de déchaussement du cuvelage par les infiltrations entre cuvelage et parois de la bêteoire ;</li> <li>- Ancrage du cuvelage non pérenne</li> <li>- Possibilité de colmatage partiel de l'empierrement</li> </ul>
<b>Remarques, recommandations :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'infiltration est un dispositif aléatoire de dernier recours (le caractère infiltrant d'une bêteoire est conservé dans le cas où elle représente le seul exutoire ou elle permet de soulager la charge d'eaux pluviales du secteur). Ce choix doit être accompagné de la justification de l'impossibilité de tout autre exutoire pour les eaux de ruissellement</li> <li>- Il est important de noter que le risque de rejeu est envisageable. Les dispositifs avec éléments de béton sont en général peu compatibles avec des contextes de mouvements de terrain (ruine ou déstabilisation du cuvelage). Lorsqu'un dispositif d'infiltration des eaux dans une bêteoire est nécessaire, il est préférable de retenir un dispositif plus simple tel que décrit dans la fiche « INFILTRATION par massif filtrant »</li> <li>- Les aménagements de bêteoire ne sont pas absolument stables dans le temps. Il convient donc de prévoir des visites régulières sur le site afin de vérifier son évolution. Un budget de suivi, d'entretien et d'éventuelles interventions curatives doit être prévu.</li> </ul>	



**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional Haute-Normandie**  
Parc de la Vatine  
10 rue A. Sakharov  
76130 – Mont Saint Aignan - France  
Tél. : 02 35 60 12 00