



Porter à connaissance

Valorisation agroécologique des sédiments issus des travaux de curage du canal de Nantes à Brest

Date
12/09/2023

Indice
V1

Rédacteurs
R. MAHE

Relecteurs
J. LAURETTE
T. HADEN

Table des matières

A.	Contexte actuel de la valorisation des sédiments	4
1.	Sédiments et construction de sol	4
2.	Contexte réglementaire	5
3.	Exemple d'expérimentation : cas de la Charente-Maritime	6
B.	Contexte de l'étude	7
1.	Contexte du projet	7
2.	La valorisation agroécologique mise en œuvre par Terra Innova	8
	Présentation de Terra Innova	8
	Expérience de Terra Innova en valorisation de sédiments	9
C.	Caractérisation des sédiments	12
1.	Etudes réalisées par l'ADEV – Inovalys (2019)	12
	Description de la procédure d'échantillonnage	12
	Description des analyses réalisées	14
	Résultats des analyses réalisées et interprétations	14
2.	Etudes réalisées par Terra Innova : diagnostic de pollution complémentaire des sédiments (2022)	19
	Description de la procédure d'échantillonnage	19
	Niveau de pollution attendu dans les biefs	20
3.	Caractérisation agronomique des sédiments par Terra Innova (2022)	35
	Par conséquent, et en accord avec plusieurs sources bibliographiques traitant de ce sujet, la mise en œuvre de ces sédiments sur parcelle(s) agricole(s) peut ne pas être considéré comme un épandage agricole mais plutôt comme un retour au champ de terre arable via une reconstitution de sol réalisée après ressuyage des sédiments (Anger, 2014 ; Fourvel, 2018).	38
4.	Description des analyses complémentaires réalisées par Terra Innova	41
	Evaluation et gestion de la réactivité chimique des sédiments	41
	Analyses agronomiques complémentaires à prévoir	44
	Essais de germination/croissance en chambre de culture	44
5.	Bilan de la caractérisation agronomique des sédiments	59
D.	Parcelles agricoles d'intérêt	60
1.	Caractéristiques générales des zones concernées par la valorisation des sédiments sur les 2 premières années	63

2.	Observations réalisées sur sites par Terra Innova	75
3.	Description de la procédure de mise en œuvre des sédiments sur les parcelles 86	
	Conclusions générales	87
E.	Annexes.....	89
1.	Annexe 1 : Rapport prélèvements et analyses de sédiments ADEV	89
2.	Annexe 2 : Rapport prélèvements et analyses pollution de sédiments TERRA INNOVA + H14	90
3.	Annexe 3 : Rapport prélèvements et analyses agronomiques de sédiments TERRA INNOVA	91
4.	Annexe 4 : Seuils fixés par la norme Support de Culture (NF U44-551)	92
5.	Annexe 5 : Seuils fixés par l'arrêté du 01/04/2020 relatif aux autorisations de mise sur le marché de matières fertilisantes et de supports de culture	93

A. Contexte actuel de la valorisation des sédiments

1. Sédiments et construction de sol

Les sédiments sont des matériaux détritiques dont la composition dépend de la géologie et des conditions pédoclimatiques du bassin versant d'origine (Fourvel, 2018). De manière générale, ils ont pour origines l'érosion des roches affleurantes en amont des bassins versants, l'érosion des sols naturels ou agricoles, l'érosion des berges (sols et/ou roches), ou encore l'accumulation de biomasse produite au sein de la masse d'eau (macrophyte, phytoplancton...) ou issue du développement de la végétation bordant la masse d'eau.

L'idée de construire des sols à partir de sédiments vient du fait que les sédiments fins ont globalement des propriétés agronomiques proches de celles des sols, notamment en ce qui concerne les teneurs en matière organique, en azote total et en carbonates de calcium (Fourvel, 2018)¹. Sols et sédiments sont des associations de phases minérales et organiques (argiles, limons, sables, matière organique) et peuvent avoir des contextes chimiques similaires (pH, CEC, CaCO₃, MO, N total, ...). La différence majeure se trouve au niveau de la structure : là où les sols ont en général une structure développée (agrégats stables, macroporosité) et une bonne fertilité physique, les sédiments ne présentent pas de structure (agrégats absents ou instables, très faible macroporosité) au moment de leur dragage. Etant donné la compatibilité évidente des sédiments avec le sol, certains auteurs estiment logique de remettre au sol ce que l'érosion a porté par ruissèlement dans les cours d'eau (Eisenlohr et Denot, 2019). Certains les considèrent même comme une ressource naturelle et renouvelable (Branche, 2019), disponible sur le chevelu de canaux et cours d'eau qui traversent une grande partie du territoire, principalement des territoires agricoles (Eisenlohr et Denot, 2019).

La construction de sols à partir de sédiments est envisageable pour les mêmes applications de génie pédologique que pour les sols construits à partir de terre végétale et/ou d'autres matériaux technogéniques (Fourvel, 2018). Dans un contexte politique et sociétal de plus en plus favorable à l'économie circulaire, des résultats issus de la littérature scientifique (expériences à petite échelle) ont en effet ouvert la voie à une valorisation agronomique des sédiments. Citons le programme de recherche SITERRE² (2011-2015), qui fait référence dans la construction de sols fertiles à partir de déchets. Même si les sédiments n'y sont pas explicitement abordés, il y est tout de même fait mention d'un cas d'étude en aménagement paysager (Bordeaux Métropole), où des sédiments de curage mélangés pour moitié à du compost ont servi de support de plantation à des arbres.

¹ Fourvel. 2018. Valorisation agronomique des sédiments fins de retenues hydroélectriques en construction d'Anthroposols fertiles. Thèse en Sciences de la Terre. Agrocampus Ouest.

² Créer des sols fertiles. Du déchet à la végétalisation urbaine. Editions Le Moniteur. ISBN 978-2-281-14096-5

2. Contexte réglementaire

Actuellement, bien que les règles de gestion en vigueur ne soient pas adaptées aux sédiments et malgré l'absence de doctrine nationale permettant de développer cette filière (Eisenlohr et Denot, 2019), les expérimentations sur le terrain se multiplient pour mieux comprendre le comportement des sédiments en usages « (re)construction de sol » depuis plus d'une dizaine d'années.



FIGURE 1 : COMPOSITION ET PRINCIPAUX OBJECTIFS DU « GT VALORISATION DES SEDIMENTS ».

Afin d'encadrer ces expérimentations et d'établir un guide méthodologique, un Groupe de Travail sur la Valorisation des sédiments de dragage en agriculture s'est constitué en 2019 (figure 1). Mené par le CEREMA, il comprend des acteurs institutionnels (Ministères de l'Agriculture, et de la Transition Ecologique et solidaire), les principaux « producteurs » de sédiments (VNF, EDF), des acteurs agricoles (Chambres d'Agriculture, FNSEA, Coop de France, Ania) et des partenaires académiques (Agrocampus Ouest, Université de Bordeaux, INERIS). Les acceptabilités sanitaires, environnementales, agro-pédologique et vis-à-vis des pratiques culturales ont été examinées.

Dans les faits, par défaut, la réglementation "plan d'épandage" du 8 janvier 1998 est appliquée : pour des sédiments fluviaux, cela consiste à apporter une épaisseur d'environ 1-2 cm sur le sol, ce qui n'apporte aucun bénéfice (Cantegrit et Eisenlohr, 2012)³. Les différents auteurs soulignent que ce référentiel des boues d'épuration est inadapté à la valorisation agricole. En effet, les matières constituant les sédiments sont essentiellement d'origines minérales (lessivages des sols essentiellement) alors que celles constituant les boues d'épuration sont organiques. Au niveau géochimique, les métaux et l'azote ont un comportement différent dans ces 2 matrices (minérales et organiques).

Les sédiments ont davantage des effets sur la structure et la texture du sol, plus qu'un effet fertilisant, même si ce dernier n'est pas nul. Ils peuvent améliorer le potentiel agronomique des sols en augmentant l'épaisseur de la couche arable notamment. Ils

³ Cantegrit et Eisenlohr. 2012. Valorisation agricole des sédiments de dragage de canaux en Saône et Loire (71)-Expérimentation en champ. Rapport du CETE de Lyon, Bron, Novembre 2012, 162 p.

contribuent aussi à la diminution du stress hydrique des plantes en augmentant la réserve en eau du sol. Ils permettent de retenir plus longtemps les éléments solubles dans l'eau du sol et ainsi réduire les éventuels risques de lessivage.

Au niveau national, les autorités locales compétentes (DDTM) ont autorisé au cas par cas cette voie de valorisation à plusieurs reprises (Ille et Vilaine, Charente Maritime, Aube, Lot, Hérault, ...) en dérogeant au cadre législatif de l'arrêté du 8 janvier 1998. Cette dérogation est rendue possible par recours au décret n° 2020-412 du 8 avril 2020 relatif au droit de dérogation reconnu au Préfet et qui permet aux Préfets de Région et de Département de déroger à des normes arrêtées par l'administration de l'Etat.

3. Exemple d'expérimentation : cas de la Charente-Maritime

La Charente-Maritime présente de grandes superficies agricoles composées de sols très superficiels (sols de groie). Les agriculteurs peuvent être confrontés aux problématiques liées à cette faible épaisseur de terre : des difficultés physiques pour le développement des plantes, un faible réservoir utile en eau, et donc un besoin d'irrigation, avec *in fine* un potentiel de rendement moins élevé. Un apport de sédiment peut constituer une solution pour améliorer les sols.



FIGURE 2 : THALASSOSOL POLDERISE AYANT REÇU 30 CM DE SEDIMENTS DU CANAL DE MARANS, OBSERVE SUR LE SECTEUR D'ANDILLY (17). D'APRES ARTOUS, 2018⁴.

⁴ Artous. 2018. Valorisation agronomique de sédiments de dragage. Stage Agrocampus Ouest.

Suite à de premiers essais en parcelles débutés 2010 avec des sédiments du Canal Marans/La Rochelle sur le secteur d'Andilly (figure 2), aux résultats très positifs, et constatant l'absence de méthodologie pour cette filière de valorisation (épaississement/reconstitution de sols), la CA 17 a lancé le projet VASC (Valorisation Agronomique des Sédiments de la Charente) en 2019. Le projet s'inscrit dans le cadre du Partenariat Européen pour l'Innovation pour la productivité et le développement durable de l'agriculture (PEI-AGRI). L'ambition du projet VASC est de lever les verrous majeurs sur la reconstitution et l'amélioration des sols agricoles par apports de sédiments fluviaux. Ce projet pourrait conduire au développement d'une nouvelle filière de valorisation (locale et d'économie circulaire) en reconstruction de sol. Il doit créer des références agronomiques et produire de la donnée technique pour faire évoluer le contexte réglementaire National.

Les retours d'expérience issus de ces essais en conditions réelles montrent clairement que les sédiments peuvent permettre de restructurer positivement un sol agricole, améliorer sa fertilité physique et chimique, diminuer le stress hydrique des cultures, faciliter le développement racinaire et *in fine* augmenter le rendement. D'un point de vue agronomique, toutes les études au champ concluent que les essais avec apport de sédiments améliorent la situation initiale et aboutissent à de meilleurs rendements. En fonction de la typologie sol/sédiment et des objectifs de l'agriculteur, l'épaisseur optimale d'apport est choisie, et un itinéraire technique adapté défini.

B. Contexte de l'étude

1. Contexte du projet

Le Département de Loire-Atlantique est propriétaire du domaine public fluvial départemental comprenant notamment le canal de Nantes à Brest. La délégation de Châteaubriant gère la partie qui s'étend de Saint-Nicolas-de-Redon (écluse de la Digue) à Nort-sur-Erdre (écluse de Quiheix), soit environ 70 km et 17 écluses. Cette infrastructure est soumise à un envasement progressif dû à son fonctionnement hydraulique.

Dans le but de restaurer le gabarit du canal, le Département a élaboré un dossier réglementaire relatif à un plan décennal de curage sur l'intégralité de ces 70 km (figure 3).

Un des objectifs de ce marché est de définir les modes de valorisation des sédiments issus du curage du canal dans le cadre de ce plan décennal de curage.

Les travaux démarreront au plus tôt courant 2024. Sur l'ensemble de ce tracé, le volume estimé de sédiments à évacuer est de l'ordre de 50 000m³, ce volume sera découpé en plusieurs opérations puisque les opérations doivent s'étaler sur 10 ans.

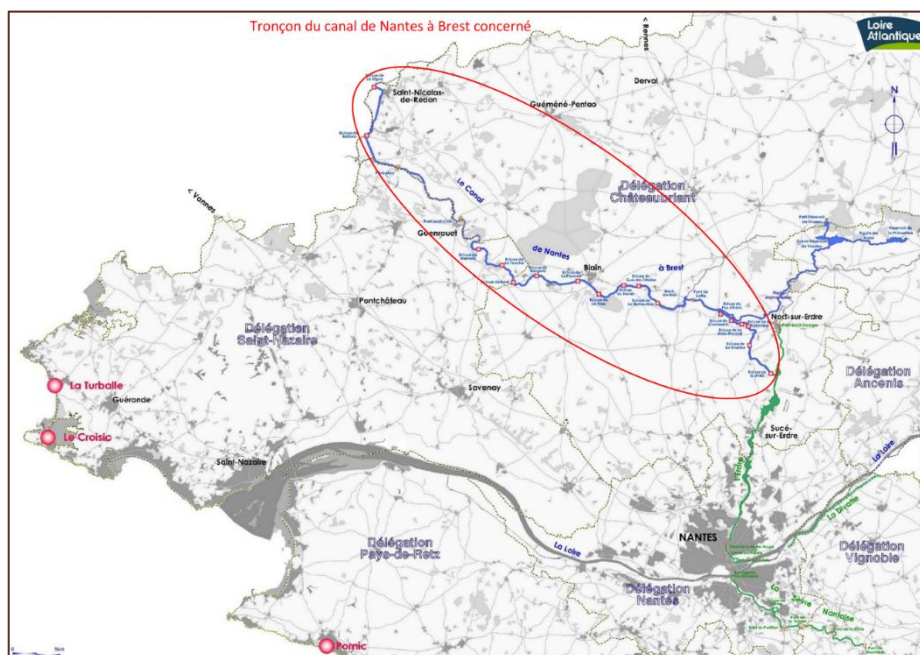


FIGURE 3 : PLAN DU TRACE DE LA SECTION CONCERNEE DU CANAL (SOURCE : DEPARTEMENT LOIRE ATLANTIQUE).

2. La valorisation agroécologique mise en œuvre par Terra Innova

Présentation de Terra Innova

Terra Innova est un bureau d'étude en ingénierie créé en 2018 et spécialisé dans la valorisation agronomique et environnementale des terres excavées et sédiments dragués. Initialement créée pour répondre aux problématiques de gestion des terres issues de chantiers de terrassements, l'entreprise a développé un panel de solutions permettant de rendre des matériaux aujourd'hui inexploités utiles à l'amélioration des agroécosystèmes, en favorisant au maximum la logique d'économie circulaire.

L'objectif premier de la valorisation est d'apporter une plus-value à l'exploitation agricole réceptrice des matériaux. Cette plus-value peut porter sur le confort de l'élevage, le rendement des cultures, la gestion de l'eau (stockage pour irrigation, création de sols « éponges » plus résilients face aux sécheresses, etc.), la fertilité intrinsèque du sol (pH, épaisseur cultivable, structure granulométrique, gestion de sols hydromorphes, etc.), l'apport de biodiversité favorable aux cultures (insectes auxiliaires, pollinisateurs, etc.), jusqu'à la création d'écosystèmes complets permettant de jouer sur plusieurs paramètres. Notre rôle est d'accompagner le développement urbain en diminuant son impact sur les zones agricoles, notamment en réutilisant au mieux les supports de culture existants et en les redistribuant aux agriculteurs locaux, mais également en amenant, grâce à chaque ouvrage créé, de la fertilité à l'exploitation agricole, au sol et/ou à l'écosystème. Cela constitue la part de valorisation agricole de nos solutions.



FIGURE 4 : LES APPORTS ENVIRONNEMENTAUX BENEFIQUES DES SOLUTIONS PROPOSEES PAR TERRA INNOVA.

Le second objectif est de donner à cette valorisation agricole un rôle environnemental (figure 4). Celui-ci réside en plusieurs aspects :

- Biodiversité : redonner de la vie à nos sols, un habitat aux abeilles, le gîte et le couvert aux oiseaux ;
- Dépollution : diminuer le recours aux pesticides, grâce aux insectes auxiliaires bénéfiques aux cultures, diminuer la pollution des sols, diminuer le CO₂ émis en limitant les distances de transports entre chantier émetteur et site(s) récepteur(s) et en stockant du carbone dans les sols, atténuer le réchauffement climatique, grâce non seulement au carbone stocké, mais également aux microclimats créés par les arbres ;
- Recréation du bocage : plantation d'arbres et de haies, notamment pour améliorer la santé et le bien-être des animaux d'élevage, la fertilité des sols et la qualité de nos cours d'eau.

Expérience de Terra Innova en valorisation de sédiments

Terra Innova possède déjà des références concernant la valorisation agroécologique des sédiments. Par exemple, Terra Innova a accompagné récemment la Région Bretagne en tant qu'AMO sur le projet du canal d'Ille et Rance (figure 5) à travers la recherche de solutions de valorisation et de l'établissement d'un plan de gestion des sédiments consistant aux étapes successives détaillées ci-dessous :

- Caractériser le gisement ;
- Définir les solutions techniques de valorisation agricole ;
- Les proposer au tissu agricole local ;
- Encadrer les aspects réglementaires et légaux ;
- Suivre la réalisation de l'opération ;
- Gérer aux côtés de l'agriculteur la redynamisation des sols.



FIGURE 5 : LOCALISATION DES SITES DE TRANSIT DES SEDIMENTS LE LONG DU CANAL D'ILLE ET RANCE.

Environ 2 mois après l'apport, notre suivi agronomique a permis de constater une bonne intégration du sédiment au sol en place avec un lit de semences de 7 à 8 cm d'épaisseur de très bonne qualité, et une structure grumeleuse homogène (figure 6). A la suite de l'apport, nous estimons que la réserve utile en eau du sol a été augmentée d'environ 15 mm (L/m²). Lors de notre passage début août 2022, de nettes différences ont été observées au niveau végétatif, au sein de la même parcelle et en comparaison avec une zone témoin (sans apport de sédiments) (figure 7). En effet, les pieds de maïs cultivés dans la zone d'apport de sédiments sont plus grands et plus robustes, de plus ils présentent un système racinaire mieux développé ainsi que des épis de meilleur gabarit. Un suivi à N+1 a également été réalisé en juillet 2023 avec Christophe DUCOMMUN, ingénieur d'études pédologue certifié, coordinateur du programme de cartographie des sols en Région Pays-de-la-Loire, et animateur du RMT sols et territoires. Les sédiments sont homogénéisés avec les sols des parcelles, il n'est presque plus possible de distinguer le sédiment du sol en place sans comparer à une zone témoin.



FIGURE 6 : INTEGRATION DES SEDIMENTS AU SOL EN PLACE.



FIGURE 7 : COMPARAISON DES PARTIES AERIENNES ET RACINAIRES DES PLANTS DE MAÏS CULTIVES AVEC (A GAUCHE SUR LES PHOTOS) OU SANS APPORT DE SEDIMENTS (A DROITE).

C. Caractérisation des sédiments

1. Etudes réalisées par l'ADEV – Inovalys (2019)

Description de la procédure d'échantillonnage

Dans le cadre du plan de gestion pluriannuel du canal de Nantes à Brest, le département de la Loire Atlantique (44) avait mandaté en septembre 2019 le bureau d'études ADEV afin de rédiger un dossier de demande d'Autorisation Environnementale.

L'ADEV avait sous-traité la réalisation des échantillonnages au laboratoire d'analyse Inovalys et avait comparé les résultats d'analyse aux seuils S1 de l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux.

L'ADEV avait divisé le canal en 18 tronçons tel que représenté sur la figure 8. Une analyse, au moins, avait été effectuée par tronçon, sans plus de précisions sur la procédure retenue pour réaliser ce nombre d'échantillons, ni sur la localisation des prélèvements.

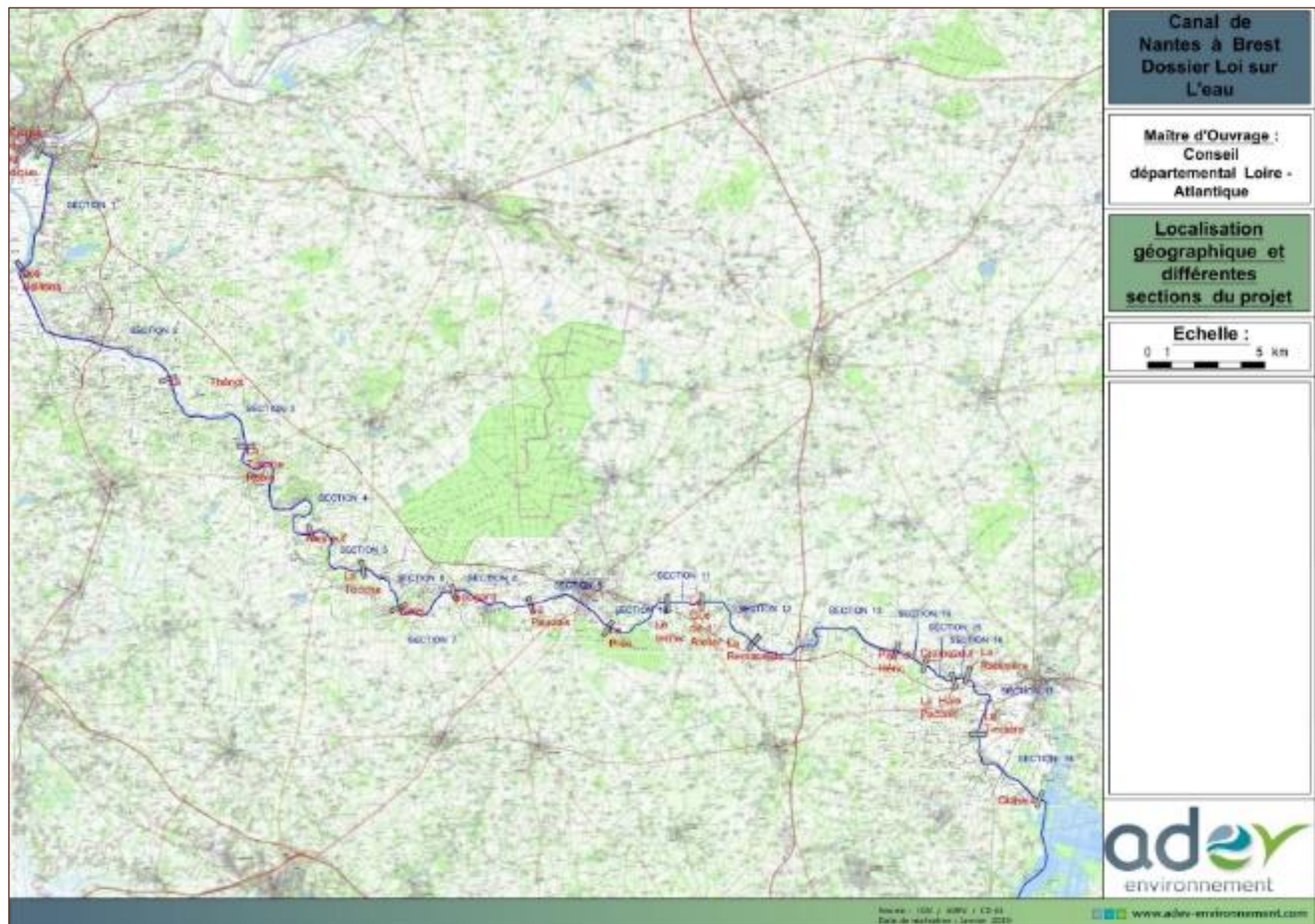


FIGURE 8 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET DIFFERENTES SECTIONS DU PROJET (SOURCE ADEV)

Description des analyses réalisées

Des analyses physico-chimiques avaient été réalisées sur les 18 échantillons prélevés. Le programme analytique portait sur la détermination des polluants sur matière brute : éléments traces métalliques (ETM), 7 PCB et 16 HAP. Ces analyses avaient été réalisées par le laboratoire Inovalys.

Les résultats des analyses réalisées avaient été comparés aux seuils du niveau réglementaire S1, présenté dans l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux (seuils rappelés dans la figure 9). Ces résultats sont présentés en détails dans les figures 10 à 25.

PARAMETRES	NIVEAU s 1
Arsenic.....	30
Cadmium.....	2
Chrome.....	150
Cuivre.....	100
Mercure.....	1
Nickel.....	50
Plomb.....	100
Zinc.....	300
PCB totaux.....	0,680
HAP totaux.....	22,800

FIGURE 9 : NIVEAUX SEUIL S1

Résultats des analyses réalisées et interprétations

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	7,20	30	ok	20	5,76 – 8.64
Cadmium	<0,40	2	ok	30	0,28 – 0.52
Chrome	57,3	150	ok	-	-
Cuivre	34,5	100	ok	-	-
Mercure	0,05	1	ok	-	-
Nickel	38,5	50	ok	20	30,8 – 46.2
Plomb	33,0	100	ok	-	-
Zinc	103,6	300	ok	20	82,88 – 124.32
PCB totaux	<9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	1,209 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 10 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 18 (3EME BIEF). SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103661)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	9,40	30	ok	20	7,52 – 11.28
Cadmium	0,6	2	ok	30	0,42 – 0.78
Chrome	45,6	150	ok	-	-
Cuivre	27,8	100	ok	-	-
Mercure	0,11	1	ok	-	-
Nickel	40,6	50	ok	20	32,48 – 48.72
Plomb	28,6	100	ok	-	-
Zinc	131	300	ok	20	104,8 – 157.2
PCB totaux	<9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	2,602 µg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 11 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 17 (4EME BIEF).
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103659 section 16)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	10,00	30	ok	20	8 – 12
Cadmium	0,5	2	ok	30	0,35 – 0.65
Chrome	67,0	150	ok	-	-
Cuivre	31,6	100	ok	-	-
Mercure	0,102	1	ok	-	-
Nickel	55,8	50	non	20	44,64 – 66.96
Plomb	30,8	100	ok	-	-
Zinc	136,7	300	ok	20	109,36 – 164.04
PCB totaux	<9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	1,286 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 12 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 16 (5EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103671 section 15)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	10,00	30	ok	20	8 – 1.2
Cadmium	< 0,4	2	ok	30	0,28 – 0.52
Chrome	59,8	150	ok	-	-
Cuivre	27,6	100	ok	-	-
Mercure	0,085	1	ok	-	-
Nickel	49,2	50	ok	20	39,36 – 59.04
Plomb	26,4	100	ok	-	-
Zinc	121,5	300	ok	20	97,2 – 145.8
PCB totaux	< 10 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 1,008 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 13 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 15 (6EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103666 section 13)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	11,00	30	ok	20	8,8 – 13.2
Cadmium	0,4	2	ok	30	0,28 – 0.52
Chrome	89,5	150	ok	-	-
Cuivre	17,7	100	ok	-	-
Mercure	0,072	1	ok	-	-
Nickel	129,2	50	non	20	103,36 – 155.04
Plomb	21,1	100	ok	-	-
Zinc	131,2	300	ok	20	104,96 – 157.44
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 0,378 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 14 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 13 (8EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Porter à connaissance – Valorisation agricole des sédiments issus du curage du Canal Nantes à Brest – Septembre 2023

Echantillon E190103673 section 14)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	12,00	30	ok	20	9,6 – 14.4
Cadmium	0,4	2	ok	30	0,28 – 0.52
Chrome	37,2	150	ok	-	-
Cuivre	27,5	100	ok	-	-
Mercure	0,078	1	ok	-	-
Nickel	45,3	50	ok	20	36,24 – 54.36
Plomb	32,0	100	ok	-	-
Zinc	146,9	300	ok	20	117,52 – 176.28
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 2,085 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 15 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 14 (7EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103669 section 11)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	9,30	30	ok	20	7,44 – 11.16
Cadmium	0,6	2	ok	30	0,42 – 0.78
Chrome	52,4	150	ok	-	-
Cuivre	24,1	100	ok	-	-
Mercure	0,058	1	ok	-	-
Nickel	52,4	50	non	20	41,92 – 62.88
Plomb	23,8	100	ok	-	-
Zinc	157,0	300	ok	20	125,6 – 188.4
PCB totaux	< 18 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 1,826 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 17 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 11 (10EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103672 section 12)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	11,00	30	ok	20	8,8 – 13.2
Cadmium	0,8	2	ok	30	0,56 – 1.04
Chrome	86,3	150	ok	-	-
Cuivre	29,7	100	ok	-	-
Mercure	0,082	1	ok	-	-
Nickel	118,0	50	non	20	94,4 – 141.6
Plomb	29,4	100	ok	-	-
Zinc	239,4	300	ok	20	191,52 – 229.82
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 0,334 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 16 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 12 (9EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	13,00	30	ok	20	10,4 – 15.6
Cadmium	0,9	2	ok	30	0,63 – 1.17
Chrome	51,8	150	ok	-	-
Cuivre	31,9	100	ok	-	-
Mercure	0,093	1	ok	-	-
Nickel	52,2	50	non	20	41,76 – 62.64
Plomb	32,2	100	ok	-	-
Zinc	251,8	300	ok	20	201,44 – 302.16
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 1,097 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 18 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 8 (13EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103674 section 9)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	12,00	30	ok	20	9,6 – 14.4
Cadmium	0,9	2	ok	30	0,63 – 1.17
Chrome	38,6	150	ok	-	-
Cuivre	28,3	100	ok	-	-
Mercure	0,080	1	ok	-	-
Nickel	46,3	50	ok	20	37,04 – 55.56
Plomb	30,6	100	ok	-	-
Zinc	212,9	300	ok	20	170,32 – 255.48
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 3,096 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 19 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 9 (12EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103667 section 7)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	8,20	30	ok	20	6,56 – 9.84
Cadmium	0,5	2	ok	30	0,35 – 0.65
Chrome	42,1	150	ok	-	-
Cuivre	21,1	100	ok	-	-
Mercure	0,063	1	ok	-	-
Nickel	39,5	50	ok	20	31,6 – 47.4
Plomb	21,2	100	ok	-	-
Zinc	183,6	300	ok	20	146,88 – 220.32
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 0,612 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 20 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 7 (14EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103663

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	8,60	30	ok	20	6,88 – 10.32
Cadmium	0,6	2	ok	30	0,42 – 0.78
Chrome	51,6	150	ok	-	-
Cuivre	26,4	100	ok	-	-
Mercure	0,076	1	ok	-	-
Nickel	47,8	50	ok	20	38,24 – 57.36
Plomb	22,6	100	ok	-	-
Zinc	186,6	300	ok	20	149,28 – 223.92
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 1,206 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 11 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 6 (15EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103664 2)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	33,00	30	non	20	26,4 – 39.6
Cadmium	0,8	2	ok	30	0,56 – 1.04
Chrome	53,8	150	ok	-	-
Cuivre	22,5	100	ok	-	-
Mercure	0,046	1	ok	-	-
Nickel	41,2	50	ok	20	32,96 – 49.44
Plomb	43,6	100	ok	-	-
Zinc	209,4	300	ok	20	167,52 – 251.28
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 1,463 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 22 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 2 (17EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103662 5)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	12,00	30	ok	20	9,6 – 14.4
Cadmium	< 0,4	2	ok	30	0,28 – 5.2
Chrome	31,0	150	ok	-	-
Cuivre	< 15,0	100	ok	-	-
Mercure	0,013	1	ok	-	-
Nickel	29,0	50	ok	20	23,2 – 34.8
Plomb	13,5	100	ok	-	-
Zinc	109,1	300	ok	20	87,28 – 130.92
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 133 µg/kg	22 800	ok	-	-

FIGURE 23 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 5 (16EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	28,00	30	ok	20	22,4 – 33.6
Cadmium	2,6	2	non	30	1,82 – 3.38
Chrome	69,8	150	ok	-	-
Cuivre	56,7	100	ok	-	-
Mercure	0,255	1	ok	-	-
Nickel	125,2	50	non	20	100,16 – 150.24
Plomb	53,4	100	ok	-	-
Zinc	378,6	300	non	20	302,88 – 454.32
PCB totaux	< 9 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 1,512 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 24 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 3 (17EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Echantillon E190103670 Section 4)

Paramètres	Résultats d'analyse à sec (mg / kg)	Valeurs limites (S1)	Conformité	Incertitude (%)	Résultat avec prise en compte marge d'incertitude
Arsenic	17,00	30	ok	20	13,6 – 20.4
Cadmium	1,1	2	ok	30	0,77 – 1.43
Chrome	61,8	150	ok	-	-
Cuivre	37,3	100	ok	-	-
Mercure	0,114	1	ok	-	-
Nickel	98,9	50	non	20	79,12 – 118.68
Plomb	34,6	100	ok	-	-
Zinc	281,8	300	ok	20	225,44 – 338.16
PCB totaux	< 10 µg/kg	680	ok	-	-
HAP totaux	< 1,150 mg/kg	22,800	ok	-	-

FIGURE 25 : RESULTATS D'ANALYSE SUR LA SECTION 4 (17EME BIEF)
SOURCE : PROJET PLAN DE GESTION PLURIANNUEL DU CANAL DE NANTES A BREST, ADEV.

Au vu des résultats d'analyses de cette campagne, des dépassements du niveau S1 sont observés pour le nickel sur brut pour les sections 3, 4, 8, 11, 12, 13 et 16. Un dépassement du niveau de seuil S1 pour l'arsenic sur brut est observé sur la section 2. Un dépassement du niveau de seuil S1 pour le cadmium et le zinc sur brut est observé sur la section 3, un dépassement en arsenic sur la section 2.

Après application du taux d'incertitude de 20% relatif aux méthodes d'analyse, seules les sections suivantes conservent des dépassements du niveau du seuil S1:

- Section 3 (cadmium, nickel, zinc),
- Section 4 (nickel),
- Section 12 (nickel),
- Section 13 (nickel).

L'interprétation des résultats d'analyses selon les seuils de l'arrêté du 9 août 2006 indique donc que 4 échantillons présentent un dépassement vis-à-vis des valeurs limites données par cet arrêté.

Les conclusions de l'ADEV indiquent que la qualité des sédiments, en majorité inertes (conclusion reprise du rapport de l'ADEV, sans que des résultats d'essais de lixiviation ne soient présentés dans le rapport), permet d'envisager la mise en dépôt sur des terrains d'accueil (déshydratation par ressuyage des sédiments avant valorisation). Lorsqu'une analyse d'un échantillon de sédiments ne respecte pas au moins un des seuils S1, le volume de sédiment correspondant est destiné en première approche à une élimination en filière adaptée.

2. Etudes réalisées par Terra Innova : diagnostic de pollution complémentaire des sédiments (2022)

Description de la procédure d'échantillonnage

Terra Innova s'est basé sur le guide méthodologique édicté en 2014 par le CEREMA « Echantillonnage des sédiments marins et fluviaux – Du plan d'échantillonnage aux analyses de laboratoire – Synthèse documentaire et recommandations » ainsi que sur les résultats des analyses précédentes menées par l'ADEV pour réaliser le plan d'échantillonnage. Les sédiments à caractériser sont répartis entre les Biefs 3 et 17bis.

Le guide du CEREMA permet à partir de la qualification en zones plus ou moins susceptibles d'être impactées par une pollution, et de l'estimation du volume de sédiments, de définir le nombre d'échantillons à réaliser :

- Les cours d'eau classés en zone 1 sont localisés dans des territoires de montagne, en tête de bassin versant sans aucune activité anthropique actuelle ou ancienne identifiée. L'urbanisation est peu dense ou parsemée, et aucun accident pouvant entraîner une contamination des cours d'eau n'a été recensé (par exemple : industries, rejets, dépôts

de déchets, infrastructures de transport fréquentées). La qualité des sédiments retranscrit le fond géochimique du bassin versant.

- Les cours d'eau classés en zone 3 présentent des sédiments susceptibles d'être impactés par des rejets d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) identifiées dans la base de données RSDE ICPE, gérée par la DREAL.
- Les cours d'eau intermédiaires entre les zones 1 et 3 sont classés en zone 2. Les sédiments provenant de ces cours d'eau sont susceptibles d'être contaminés par des activités anthropiques. L'identification d'un site dans la base de données BASOL à moins de 500 mètres du cours d'eau ou d'une station d'épuration urbaine dans la base de données RSDE STEU, correspondant au rejet des eaux traitées, entraîne le classement du cours d'eau en zone 2 en aval.

Le zonage peut être ensuite affiné pour tenir compte de la pollution des sols et des rejets de STEP dans l'environnement du secteur à draguer.

Niveau de pollution attendu dans les biefs

En tout et pour tout, 9 sites sont répertoriés sur BASIAS à proximité du canal dont 6 sur la section 1.

- PAL 4401508 : CYCLES ROUSSEAU en activité (Section 1 de l'écluse de la Digue à Saint- Nicolas-de-Redon) Bief 18
- PAL 4400283 : JOSSO (Section 1 de l'écluse de la Digue à Saint- Nicolas-de-Redon) Bief 18
- PAL 4401492 : ROBIN Joseph, DLI, TRANSPORT ROUTIER en activité (Section 1 de l'écluse de la Digue à Saint- Nicolas-de-Redon)
- PAL 4401497 : AGRIBATI en activité (Section 1 de l'écluse de la Digue à Saint- Nicolas-de-Redon) Bief 18
- PAL 4400274 : ADAM.F Industrie du cuir (Section 1 de l'écluse de la Digue à Saint- Nicolas-de-Redon) Bief 18
- PAL 4401509 : CIE FRANCAISE DE RAFFINAGE TOTAL, STATION SERVICE (Section 1 de l'écluse de la Digue à Saint- Nicolas-de-Redon) Bief 18
- PAL 4400596 : LE BRUN Christian Station-service (Section 7 de Melneuf à Barel) Bief 14
- PAL 4400402 : MARSAC Pierre PETROLES JUPITER (Section 9 de La Paudais à La Prée) Bief 12
- PAL 4400067 : VEG'OIL Centrale laitière d'Héric en activité (Section 11 Renaudais à bout de bois) Bief 10

Au vu des nombreuses sources potentielles de pollution, la section 1 est à classer en zone 3 selon le guide du CEREMA.

Les sections 7, 9 et 11 sont quant à elles à classer en zone 2.

Le reste des sections est à classer en risque de niveau faible ou zone 1.

Le guide du Cerema précise que le zonage peut être adapté en fonction de la qualité mesurée des sédiments. Cette évaluation de la qualité passe par un calcul d'indice de contamination appelé QSm. Cet indice englobe l'ensemble des paramètres de l'arrêté du 9 août 2006 modifié. Cette méthode mise en place par VNF à partir de 2004, s'inspire des travaux réalisés dans le cadre d'une étude menée par le CETMEF (aujourd'hui Cerema Emf), l'ENTPE, le Cémagref (aujourd'hui Irsteda) et VNF. La formule de calcul du QSm est donnée ci-après :

$$QSm = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Ci}{Si}}{n}$$

Ci : concentration d'un élément i dans les sédiments
Si : valeur seuil de l'élément i selon l'arrêté modifié du 9 août 2006
n : nombre de substances mesurées

un QSm supérieur à 0,5 indique que les sédiments présentent un risque potentiel. Cet indice prend en compte les éléments i de l'arrêté du 9 août 2006, à savoir, les métaux et assimilés (arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb et zinc), les PCB indicateurs (congénères 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180) et les 16 hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Les échantillons dont la valeur de QSm est inférieure à 0.5 sont considérés comme sans risque potentiel de pollution. Les QSm des échantillons identifiés précédemment en zones 2 et 3 ont été calculés (tableau 1).

TABEAU 1 : CALCULS DES QSM DES ECHANTILLONS CATEGORISES INITIALEMENT EN ZONES 2 OU 3.

		Valeurs guide 9 août 2006	2019	2019	2019	2019
		Arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux	Gué de l'atelier bief 10 - Section 11	Prée Paudais bief 12 - Section 9	Barel bief 14 - Section 7	Bief 18 (Bief 17 Pont Miny) - Section 1
ETM						
Arsenic (As)	mg/kg MS	30	9,3	12	8,2	12
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	2	0,6	0,9	0,5	0,5
Chrome (Cr)	mg/kg MS	150	52,4	38,6	42,1	26,4
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	100	24,1	28,3	21,1	24,2
Mercure (Hg)	mg/kg MS	1	0,058	0,08	0,063	0,033
Nickel (Ni)	mg/kg MS	50	52,4	46,3	39,5	26
Plomb (Pb)	mg/kg MS	100	23,8	30,6	21,2	25,9
Zinc (Zn)	mg/kg MS	300	157	212,9	183,6	115,5
Organiques						
PCB	µg/kg MS	680	<18	<9	<9	<9
HAP	µg/kg MS	22 800	1 826	3 096	<612	2 105
QSm			0,32	0,36	0,27	0,24

Le calcul des QSm permet de reclasser l'ensemble des sections en zone 1 (tous les QSm des échantillons initialement catégorisés en zones 2 ou 3 sont inférieurs à 0.5), c'est-à-dire en zone à priori non polluée.

Après cette classification en zonage de pollution, le guide permet ensuite établir le nombre d'échantillons à effectuer (tableau 2) :

En zone a priori non polluée (zone 1): 1 échantillon tous les 10 000 m³

En zone intermédiaire (zone 2) : 1 échantillon tous les 10 000 m³ et 300 m

En zone à priori polluée (zone 3) : 1 échantillon tous les 5 000 m³ et 300 m

Sur la base de ce zonage et en exploitant la bathymétrie menée en 2019 par la société Mesuris, Terra Innova a obtenu le plan d'échantillonnage présenté tableau 2.

TABLEAU 2 : NOMBRE D'ECHANTILLONS A REALISER PAR SECTION. LES CHIFFRES ENTRE PARENTHESES CORRESPONDENT POUR INFORMATION AUX NOMBRES D'ECHANTILLONS AVANT CALCUL DU QSM.

Sections	Distance (ml)	Zonage	Volume m ³	Nombre d'échantillon
Section 1 (Bief 17bis)	6241	(A priori polluée). A priori non polluée avec QSm	8 338	(21)1
Sections 2 – 3 – 4 (Bief 17)	22719	A priori non polluée	1 554	1
Section 5 (Bief 16)	4060	A priori non polluée	472	1
Section 6 (Bief 15)	2384	A priori non polluée	606	1
Section 7 (Bief 14)	3250	(Intermédiaire) A priori non polluée avec QSm	67	(11) 1
Section 8 (Bief 13)	4703	A priori non polluée	1 272	1
Section 9 (Bief 12)	2872	(Intermédiaire) A priori non polluée avec QSm	1 254	(10) 1
Section 10 (Bief 11)	3246	A priori non polluée	1 534	1
Section 11 (Bief 10)	1622	(Intermédiaire) A priori non polluée avec QSm	996	(6) 1
Section 12 (Bief 9)	3133	A priori non polluée	1 953	1
Section 13 (Bief 8)	8360	A priori non polluée	12 850	2
Section 14 (Bief 7)	1390	A priori non polluée	1 152	1
Section 15 (Bief 6)	961	A priori non polluée	840	1
Section 16 (Bief 5)	1074	A priori non polluée	1 078	1
Section 17 (Bief 4)	2700	A priori non polluée	3 573	1
Section 18 (Bief 3)	4511	A priori non polluée	8 528	1

Au total, il y aura donc 17 échantillons à effectuer. Les échantillons envoyés en analyse seront des échantillons composites constitués de 3 prélèvements (homogénéisés et conditionnés pour constituer un 1 seul échantillon moyen) effectués le long du même transect (d'une rive à l'autre) à l'aide d'une tarière.

La localisation de ces échantillons est présentée dans le tableau 3 et la figure 26. La campagne de prélèvements a été réalisée le 20/10/22 et le 21/10/22 ; 4 à 5 kg de matière brute ont été prélevés par échantillon.

NE PAS DIFFUSER

TABEAU 3 : LOCALISATION DES PRELEVEMENTS

Organisme	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio
Rivière	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest
Code Station	OL263	OL264	OL265	OL266	OL267	OL268	OL279	OL269	OL270
Nom de la station	Canal de Nantes à Brest_Bief 3	Canal de Nantes à Brest_Bief 4	Canal de Nantes à Brest_Bief 5	Canal de Nantes à Brest_Bief 6	Canal de Nantes à Brest_Bief 7	Canal de Nantes à Brest_Bief 8	Canal de Nantes à Brest_Bief 8bis	Canal de Nantes à Brest_Bief 9	Canal de Nantes à Brest_Bief 10
Numéro d'essai	SED223-06884	SED223-06885	SED223-06886	SED223-06887	SED223-06888	SED223-06889	SED223-06900	SED223-06890	SED223-06891
Département	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Commune	NORT-SUR-ERDRE	NORT-SUR-ERDRE	NORT-SUR-ERDRE	NORT-SUR-ERDRE	NORT-SUR-ERDRE	NORT-SUR-ERDRE	HERIC	HERIC	BLAIN
Catégorie									
Type réseau	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne
Préleveur	Pierre CLARTE	Marie FRANCOIS	Pierre CLARTE	Pierre CLARTE	Pierre CLARTE	Pierre CLARTE	Pierre CLARTE	Marie FRANCOIS	Marie FRANCOIS
Semaine	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Date	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022
Heure	10:19	11:04	11:33	11:50	12:02	12:16	15:10	12:46	13:30
X	360231,9677	358388,081	357400,1521	356585,0349	355527,6929	354989,3548	348647,5024	346943,4587	346506,3317
Y	6709227,472	6712302,089	6714286,661	6714512,047	6715316,755	6715573,765	6716399,101	6718261,717	6718300,924
Organisme	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	Aquabio	
Rivière	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	Canal de Nantes à Brest	
Code Station	OL271	OL272	OL273	OL274	OL275	OL276	OL277	OL278	
Nom de la station	Canal de Nantes à Brest_Bief 11	Canal de Nantes à Brest_Bief 12	Canal de Nantes à Brest_Bief 13	Canal de Nantes à Brest_Bief 14	Canal de Nantes à Brest_Bief 15	Canal de Nantes à Brest_Bief 16	Canal de Nantes à Brest_Bief 17	Canal de Nantes à Brest_Bief 17bis	
Numéro d'essai	SED223-06892	SED223-06893	SED223-06894	SED223-06895	SED223-06896	SED223-06897	SED223-06898	SED223-06899	
Département	44	44	44	44	44	44	44	44	
Commune	BLAIN	BLAIN	BLAIN	GUENROUET	GUENROUET	FEGREAC	FEGREAC	FEGREAC	
Catégorie									
Type réseau	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	Réseaux interne	
Préleveur	Marie FRANCOIS	Marie FRANCOIS	Marie FRANCOIS	Pierre CLARTE	Pierre CLARTE	Pierre CLARTE	Marie FRANCOIS	Pierre CLARTE	
Semaine	42	42	42	42	42	42	42	42	
Date	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	20/10/2022	21/10/2022	21/10/2022	21/10/2022	21/10/2022	
Heure	14:39	14:15	17:11	17:45	11:00	12:10	14:04	14:45	
X	342408,4966	342217,1795	339990,3645	333306,6807	333259,7388	329676,6216	322738,8422	317863,5343	
Y	6717455,58	6717577,415	6718871,686	6718786,121	6718866,175	6722355,342	6730430,538	6734504,513	

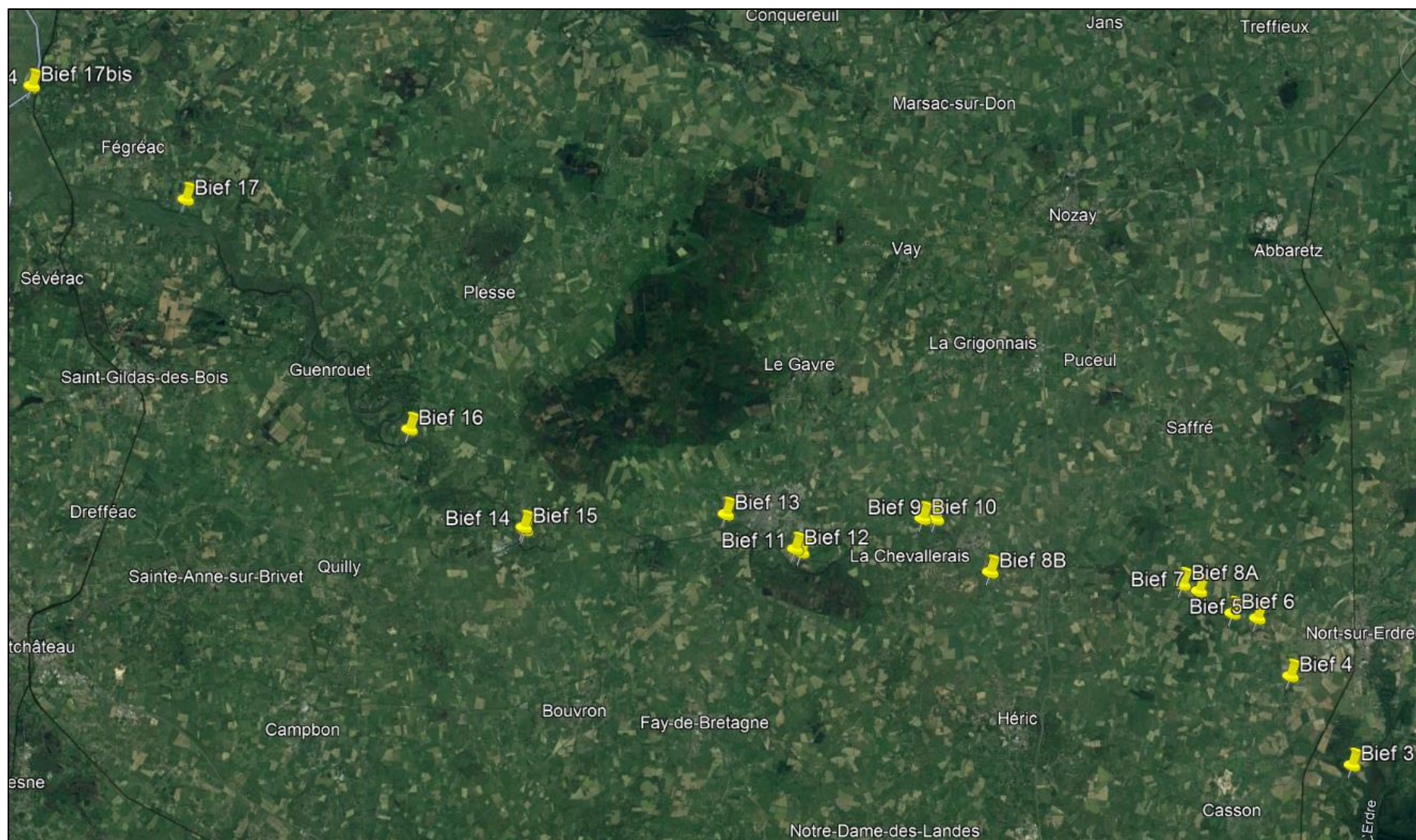


FIGURE 26 : LOCALISATION DES PRELEVEMENTS

DESCRIPTION DES ANALYSES REALISEES

Pour chaque échantillon, les paramètres sur brut et sur lixiviats ont été analysés (tableau 4). Ces analyses permettront de valider l'innocuité environnementale et sanitaire des sédiments à valoriser.

TABLEAU 4: DETAIL DES PARAMETRES DETERMINES DANS LES ANALYSES DE POLLUTION.

Pack ISDI	Carbone Organique Total	Pack 8 métaux toxiques	Arsenic
	pH		Cadmium
	Résidu sec à 105°C		Chrome
	Chlorures sur éluat		Cuivre
	Fluorures sur éluat		Mercure
	Sulfates sur éluat		Nickel
	Arsenic sur éluat		Plomb
	Baryum sur éluat		Zinc
	Cuivre sur éluat		
	Mercure sur éluat		
	Molybdène sur éluat		
	Nickel sur éluat		
	Plomb sur éluat		
	Antimoine sur éluat		
	Sélénium sur éluat		
	Zinc sur éluat		
	Hydrocarbures totaux C10-C40 (4 tranches)		
	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (16 HAP)		
	7 PCB		
	BTEX		
	Carbone Organique Total		

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire Eurofins Environnement France S.A.S, accrédité COFRAC.

Concernant la partie agronomique, le détail des analyses réalisées est présenté dans le tableau 5 ci-dessous.

TABEAU 5 : DETAIL DES ANALYSES AGRONOMIQUES REALISEES.

Analyses	Normes
Granulométrie (5 fractions)	NFX 31 107 sans décarbonatation
pH H ₂ O	NF ISO 10 390
Carbonates totaux	NF ISO 10 693
Azote total	NF ISO 13 878
Carbone organique total	NF ISO 14235
Capacité d'échange cationique Metson (CEC)	NFX 31 130
P ₂ O ₅ (Olsen)	NF ISO 11263
CaO échangeable	NFX 31 108 dosage ICP AES
K ₂ O échangeable	NFX 31 108 dosage ICP AES
MgO échangeable	NFX 31 108 dosage ICP AES
Na ₂ O échangeable	NFX 31 108 dosage ICP AES

Ces analyses agronomiques ont été réalisées par le laboratoire SADEF, accrédité COFRAC.

RESULTATS DES ANALYSES ET INTERPRETATIONS

Les différentes analyses réalisées ont pour but de s'assurer de l'innocuité des sédiments qui seront dragués, et peuvent être regroupées en 3 grandes catégories :

- Analyses des 8 métaux sur brut (pour contrôler le niveau de contamination des matrices solides). Les résultats sont comparés aux seuils S1, issus de l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux, ainsi qu'aux seuils fixés par la norme Support de Culture (NF U44-551) et l'arrêté du 01/04/2020 relatif aux autorisations de mise sur le marché (AMM) de matières fertilisantes et de supports de culture.

- Analyse des polluants organiques sur brut (niveau de contamination des matrices solides). Les résultats sont comparés aux seuils S1, issus de l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits de cours d'eau ou canaux et aux seuils fixés par l'arrêté du 01/04/2020 relatif aux AMM de matières fertilisantes et de supports de culture.

- Analyses des polluants sur éluât (pour prévenir la pollution des nappes et cours d'eau par lixiviation). Les analyses sont comparées aux seuils édictés par l'arrêté du 12 décembre 2014 qui sont les seuils d'acceptation en Installation de Stockage de Déchets Inertes. Les résultats de ces mesures sur éluât permettront de statuer sur le caractère inerte ou non des sédiments.

Les résultats de cette campagne d'analyses sont présentés dans les tableaux 6, 7, 8 et 9. Les valeurs dépassant les seuils de référence sont indiquées en couleur rouge et en gras, toutes les autres en noir. Sont surlignées en jaune les valeurs en polluants sur brut pour lesquels l'incertitude analytique de 20% permet d'abaisser la valeur sous le seuil de référence. Les valeurs restant toujours au-dessus des seuils de référence après cet abattement de 20 % sont surlignées en rouge clair.

NE PAS DIFFUSER

TABEAU 6 : RESULTATS DES ANALYSES DE POLLUTION ETM SUR BRUT

Polluant (sur brut)	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Unité	mg/kg sur MS							
Bief 3	7,96	<0.40	32,4	18,8	25,9	18,9	69,2	<0.10
Bief 4	10,9	<0.40	26,6	27,1	29,7	35,8	95,3	<0.10
Bief 5	10,6	<0.40	34	25,1	35,2	28,7	93,5	<0.10
Bief 6	12,4	<0.40	42,6	30,3	38,5	28	103	<0.10
Bief 7	13,4	<0.40	25,9	26,8	40	31,8	131	<0.10
Bief 8A	11,1	<0.40	22,2	23,1	27,3	23,1	111	<0.10
Bief 8B	13,7	<0.40	55,5	28,5	67,6	36,4	124	<0.10
Bief 9	8,47	0,41	30,6	57,5	31,9	17,9	90,8	<0.10
Bief 10	9,64	0,57	35,6	25,4	42,2	25,8	132	<0.10
Bief 11	14,2	0,77	34,3	25,4	39,4	38,2	168	0,12
Bief 12	16,8	0,84	32,2	37,2	43,9	37,6	207	<0.10
Bief 13	14,4	0,94	33,4	48,7	43,2	60,1	271	0,11
Bief 14	10,1	<0.40	41,9	19,9	50,2	21	132	<0.10
Bief 15	14,4	0,62	52	36,9	56,3	31,7	220	<0.10
Bief 16	17,4	0,97	38,3	30	48	36,8	208	0,17
Bief 17	20,1	0,47	26,9	26,1	32,8	34,8	138	<0.10
Bief 17bis	29,5	0,74	39,9	29,9	37,4	51,1	240	<0.10
Seuil NFU 44-551		2	150	100	50	100	300	1
Seuil AMM support culture	40	1	150	200	50	120	500	1
Seuil S1	30	2	150	100	50	100	300	1

TABLEAU 7 : RESULTATS DES ANALYSES DE POLLUTION ORGANIQUE SUR BRUT

Polluant (sur brut)	HCT C10-C40	16 HAPs	7 PCB	Somme TEX	COT
Unité	mg/kg sur MS				
Bief 3	81,2	1	0,536	0,3	16900
Bief 4	93,4	3,9	0,02	0,3	30400
Bief 5	148	15	0,015	0,3	25300
Bief 6	201	3	0,024	0,3	35500
Bief 7	116	5,1	0,019	0,3	25500
Bief 8A	117	1,2	0,007	0,3	24800
Bief 8B	97,9	3,2	0,054	0,3	30100
Bief 9	66,5	3,3	0,005	0,3	25300
Bief 10	178	6	0,004	0,3	40700
Bief 11	97,2	2,9	0,005	0,3	38700
Bief 12	236	6,5	0,017	0,3	51500
Bief 13	455	13	0,026	0,3	50100
Bief 14	105	1,8	0,01	0,3	27000
Bief 15	441	5,2	0,017	0,3	53700
Bief 16	164	4,3	0,007	0,3	40900
Bief 17	214	2,8	0,024	0,3	44500
Bief 17bis	132	3,8	0,018	0,3	35500
Seuil AMM support culture	-	6	-	-	-
Seuil S1	-	22,8	0,68	-	-

Concernant les métaux sur brut, seul le bief 8B présente un dépassement en nickel, après prise en compte de l'incertitude analytique. Rappelons que le guide méthodologique du CEREMA propose de mesurer le QSm, un indice de contamination, pour interpréter le risque associé à ce dépassement. Le calcul du QSm pour ce bief donne une valeur de 0.44, ce qui classe le sédiment sans risque (valeur < 0.5). Terra Innova a également mené une étude bibliographique complémentaire afin de préciser les risques écotoxicologiques associés au nickel (voir partie suivante).

Pour les polluants organiques, les biefs 5, 12 et 13 présentent des dépassements en HAP du seuil d'AMM de supports de culture, mais les valeurs restent inférieures aux seuils S1.

TABEAU 8 : RESULTATS DES ANALYSES DE POLLUTION ETM SUR ELUAT

Polluants sur lixiviat	As	Ba	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Zn	Hg	Sb	Cd	Se
Unité	mg/kg MS dans lixiviat											
Bief 3	<0.100	0,352	<0.10	<0.100	0,014	<0.100	<0.100	0,946	<0.001	0,027	<0.002	<0.01
Bief 4	<0.100	0,278	<0.10	<0.100	0,016	<0.100	<0.100	<0.100	<0.001	0,029	<0.002	<0.01
Bief 5	<0.100	0,346	<0.10	<0.100	0,037	<0.100	<0.100	0,172	<0.001	0,018	<0.002	<0.01
Bief 6	<0.100	0,73	<0.10	<0.100	<0.01	<0.100	<0.100	0,184	<0.001	0,034	<0.002	<0.01
Bief 7	<0.100	0,453	<0.10	<0.100	0,01	<0.100	<0.100	0,142	<0.001	0,01	<0.002	<0.01
Bief 8A	<0.100	0,276	<0.10	<0.100	0,015	<0.100	<0.100	<0.100	<0.001	0,025	<0.002	<0.01
Bief 8B	<0.100	0,443	<0.10	<0.100	0,033	<0.100	<0.100	<0.100	<0.001	0,018	<0.002	<0.01
Bief 9	<0.100	0,445	<0.10	<0.100	0,018	<0.100	<0.100	<0.101	<0.001	0,019	<0.002	<0.01
Bief 10	<0.100	0,339	<0.10	<0.100	0,011	<0.100	<0.100	0,253	<0.001	0,021	<0.002	<0.01
Bief 11	<0.100	0,532	<0.10	<0.100	0,046	<0.100	<0.100	<0.100	<0.001	0,024	<0.002	<0.01
Bief 12	<0.100	0,146	<0.10	<0.100	0,024	<0.100	<0.100	0,143	<0.001	0,03	<0.002	<0.01
Bief 13	<0.100	0,327	<0.10	<0.100	0,042	<0.100	<0.100	0,364	<0.001	0,05	<0.002	<0.01
Bief 14	<0.100	0,55	<0.10	<0.100	0,041	0,202	<0.100	0,159	<0.001	0,019	<0.002	<0.01
Bief 15	<0.100	0,837	<0.10	<0.100	0,016	<0.100	<0.100	0,518	<0.001	0,025	<0.002	<0.01
Bief 16	<0.100	0,569	<0.10	<0.100	0,032	<0.100	<0.100	0,183	<0.001	0,03	<0.002	<0.01
Bief 17	<0.100	0,212	<0.10	<0.100	0,011	<0.100	<0.100	0,193	<0.001	0,028	<0.002	<0.01
Bief 17bis	<0.100	0,34	<0.10	<0.100	0,04	<0.100	<0.100	<0.100	<0.001	0,017	<0.002	<0.01
Seuil ISDI	0,5	20	0,5	2	0,5	0,4	0,5	4	0,01	0,06	0,04	0,01

TABEAU 9 : RESULTATS DES ANALYSES DE POLLUTION SUR ELUAT

Polluant dans lixiviat	COT	Chlorures	Fluorures	Sulfates	Fraction soluble
Unité	mg/kg MS dans lixiviat				
Bief 3	<50	62,1	<5.00	516	2710
Bief 4	140	82,3	<5.00	458	<2000
Bief 5	130	223	<5.00	146	3560
Bief 6	120	124	<5.00	313	<2000
Bief 7	110	167	<5.00	512	2580
Bief 8A	140	176	<5.00	352	<2000
Bief 8B	81	193	<5.00	440	2610
Bief 9	120	73,3	<5.00	650	<2000
Bief 10	220	99,6	<5.00	546	<2000
Bief 11	250	132	<5.00	382	3710
Bief 12	220	123	<5.00	298	<2000
Bief 13	230	294	<5.00	889	3190
Bief 14	87	229	<5.00	464	<2000
Bief 15	180	424	<5.00	1430	3970
Bief 16	160	468	<5.00	426	<2000
Bief 17	170	174	<5.00	384	<2000
Bief 17bis	210	296	<5.00	406	<2000
Seuil ISDI	500	800	10	1000	4000

Pour 16 des 17 biefs, aucun dépassement des critères sur lixiviat n'est à constater, ce qui classe l'ensemble des sédiments comme inertes. Pour le bief 15, la teneur en sulfates (1 430 mg/kg) dépasse la limite de 1 000 mg/kg, mais la fraction soluble étant inférieure à 4 000 mg/kg le sédiment peut tout de même être considéré comme inerte, comme le précise l'arrêté du 12 décembre 2014.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE COMPLEMENTAIRE SUR LA POTENTIELLE ECOTOXICITE DU NICKEL

Le nickel est un élément trace présent dans les milieux eaux, sols, sédiments, air et organismes vivants. Il provient naturellement de la dégradation des roches mères dont les sols sont issus, mais également d'apports anthropiques diffus (le nickel est largement utilisé dans les aciers et autres alliages, batteries, etc.). Le nickel est un oligo-élément essentiel aux plantes, aux micro-organismes et aux autres êtres vivants y compris l'Homme. Toutefois lorsqu'il est présent en trop grande quantité, le nickel peut présenter un risque écotoxique et un risque pour la santé humaine.

Dans un sol ou un sédiment, la teneur totale en nickel est une mesure facilement accessible, mais est peu représentative de son écotoxicité. En effet, le nickel est le plus toxique quand il est sous forme ionique libre (Ni^{2+}). Le pH et la CEC sont les 2 principaux paramètres du sol déterminant la spéciation, i.e. les formes chimiques prises par le nickel.

Une publication récente de Buxton et al., 2019 a réalisé la synthèse des différents seuils d'écotoxicité publiés dans 42 études réalisées sur différents organismes du sol : plantes, invertébrés, micro-organismes, etc. Le graphe ci-dessous (figure 3) montre la distribution des EC10 (concentration à laquelle le nickel impacte de 10 % le paramètre étudié par rapport au témoin ; par exemple si le paramètre étudié est la biomasse végétale, l'EC10 sera la concentration en Ni à laquelle on observera une réduction de 10% de la biomasse par rapport au témoin sans nickel) dans les sols en fonction de leur CEC (figure 27).

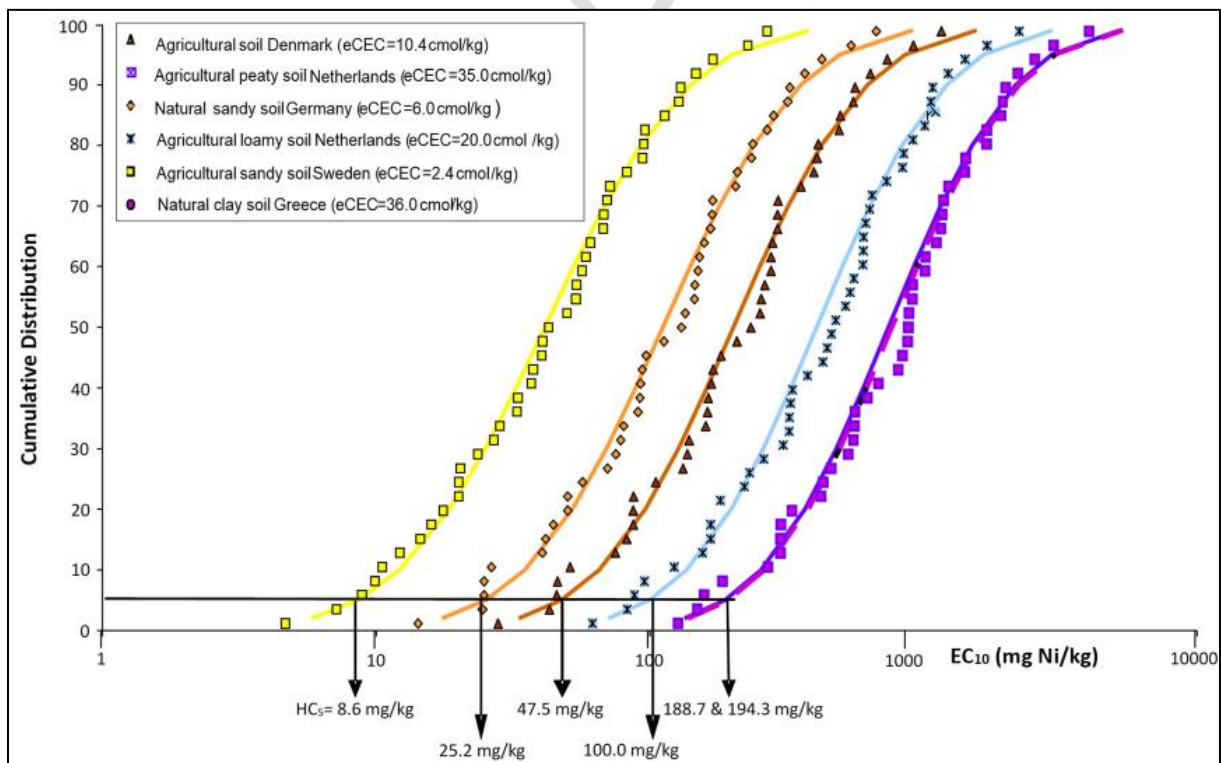


FIGURE 27 : EFFET DE LA CONCENTRATION EN NICKEL SUR LA BIOMASSE D'APRES BUXTON ET AL., 2019.

On constate que pour une CEC donnée, la variabilité des EC10 est très grande : par exemple pour une CEC de 10.4 cmol/kg, les EC10 vont d'environ 30 à 1 000 mg/kg de Ni total selon les études.

Face à cette grande variabilité, la solution est de retenir une valeur conservative HC5 en deçà de laquelle se situent 95 % des EC10 observées, et donc en deçà de laquelle un risque écotoxique lié au nickel est écarté à 95 %.

Pour une CEC de 10.4 cmol/kg, cette HC5 est de 47.5 mg/kg ; pour une CEC de 20.0 cmol/kg, elle est de 100 mg/kg.

L'échantillon de sédiment (bief 8B) présentant un dépassement en nickel (67.6 mg/kg) affiche une CEC de 15.7 cmol/kg (voir tableau 6). Une rapide règle de 3 permet d'estimer une HC5 pour cet échantillon à 76.5 mg/kg. D'après cette étude, pour cet échantillon et à ce niveau de nickel, le risque écotoxique pour le sol est donc écarté à 95 %.

CONCLUSIONS DES RESULTATS D'ANALYSES DE TERRA INNOVA

Pour les métaux sur brut, après prise en compte de l'incertitude analytique, on observe 1 unique dépassement en nickel (bief 8B). Le calcul de l'indice de contamination (QSm) et une étude bibliographique sur les risques écotoxicologiques associés au nickel (avec prise en compte de ces caractéristiques agronomiques) permettent très raisonnablement de penser que ce dépassement ne présente pas de risque pour les personnes et pour l'environnement dans le cas d'une gestion à terre des sédiments.

La réalisation d'une analyse supplémentaire sur le critère H14 (tests d'écotoxicité sur des organismes aquatiques et terrestres, d'après le protocole établi par le guide du BRGM) permettra de lever toute ambiguïté selon la préconisation dudit guide. Pour rappel le bief 8, présente un volume de sédiments de 12 850 m³.

Pour les polluants organiques sur brut, un dépassement en HAP est observé pour les biefs 5, 12 et 13 par rapport au seuil Support de culture (plus restrictif que le seuil S1). Le calcul des QSm respectifs classe ces sédiments comme non dangereux. Ces teneurs en HAP excédant le seuil n'avaient pas été constatées lors des précédentes campagnes d'analyses.

A terre, les HAP ne sont pas stables et sont susceptibles d'être dégradés (minéralisés) chimiquement ou biologiquement par les micro-organismes. Des analyses de contrôle seront nécessaires une fois les sédiments ressuyés pour statuer de la possibilité de valoriser ces matériaux présentant un dépassement initial en HAP.

Enfin, au vu des résultats d'analyses sur les lixiviats, l'ensemble des sédiments est considéré comme inerte.

Les sédiments de l'ensemble des biefs 3 à 17bis, y compris le bief 8 sont donc potentiellement valorisables.

3. Caractérisation agronomique des sédiments par Terra Innova (2022)

ANALYSES AGRONOMIQUES DES SEDIMENTS

En parallèle de la campagne de prélèvements, Terra Innova a profité de la mise en assec de quelques biefs (Quiheix à La Haie Pacoret) pour aller observer la composition et prélever des sédiments en vue des futurs essais en laboratoire.

L'observation a été faite à l'aide d'un louchet, qui a permis d'avoir accès à la lithologie des sédiments sur une quarantaine de cm (figure 28). En bordure de rives (jusqu'à 1m), les sédiments ont un aspect grossier sablo-graveleux sur les 20 premiers cm puis limoneux de 20 à 40 cm. Au-delà de 1 m des rives et jusqu'au niveau du fil d'eau au centre du canal, les sédiments sont homogènes, d'aspect limoneux et grisâtres. Les sédiments sont inodores.

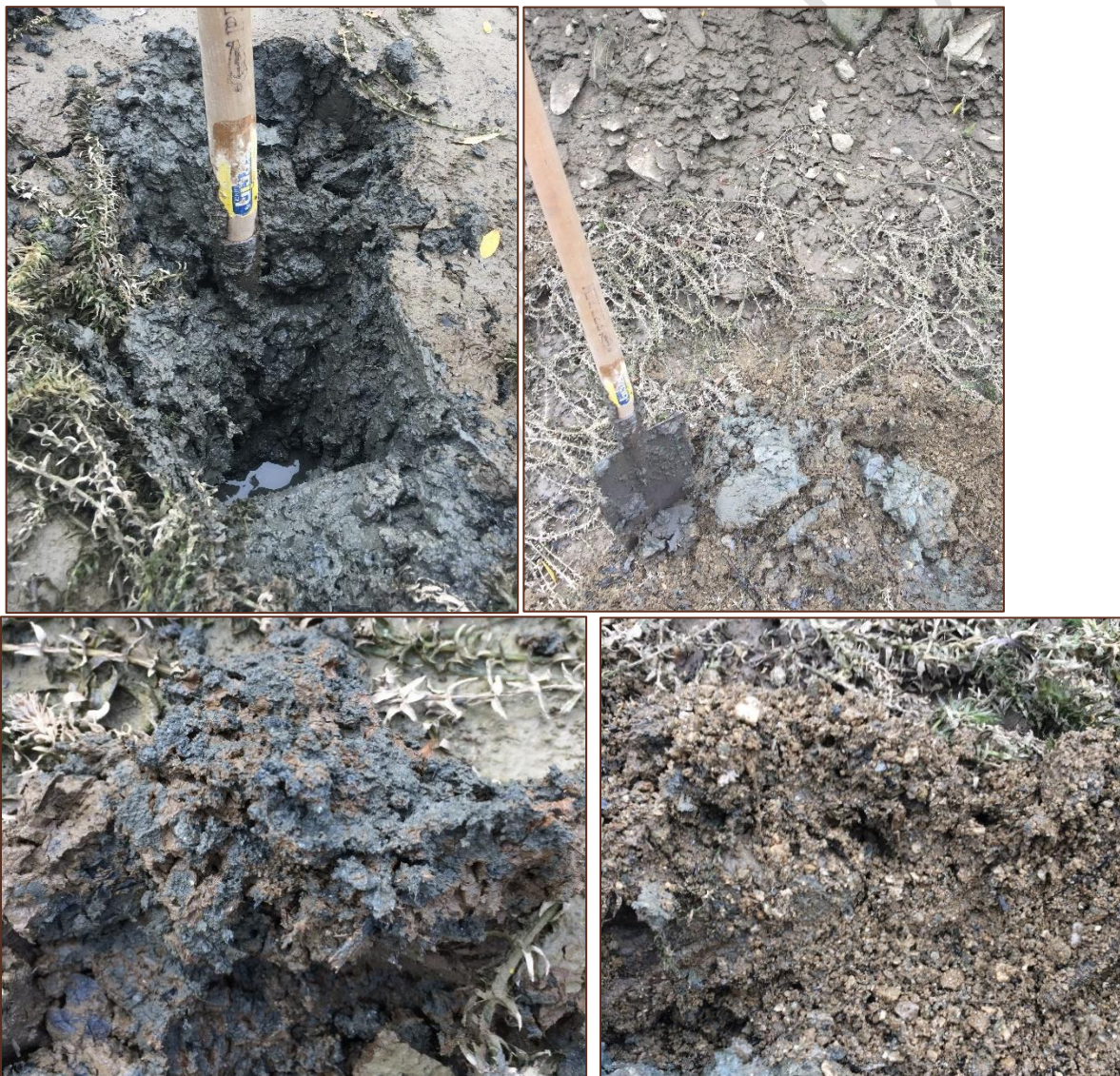


FIGURE 28 : ASPECT GENERAL DES SEDIMENTS AU CENTRE DU CANAL (GAUCHE) ET EN BORDURE DE RIVE (DROITE)

Les résultats des analyses agronomiques sont présentés dans le tableau 10. Les bulletins d'analyses complets sont disponibles en annexes 3.

TABEAU 10 : CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES DES ECHANTILLONS DE SEDIMENTS

Libellé de la détermination	Humidité résiduelle	Carbonates totaux	Azote total	CEC Metson	pH eau	P2O5 Olsen	C/N	Carb. Organique	Matière organique	CaO échangeable	K2O échangeable	Na2O échangeable	MgO échangeable
Unité	%	%	o/oo	me/Kg	-	o/oo		%	%	o/oo	o/oo	o/oo	o/oo
Bief 3	1.12	<0.5	1.26	77	6.3	0.025	11.6	1.47	2.55	1.25	0.13	0.042	0.31
Bief 4	1.12	<0.5	1.76	71	6.5	0.022	12.9	2.27	3.92	1.72	0.18	0.042	0.30
Bief 5	1.79	0.8	2.31	116	7.1	0.044	12.2	2.81	4.85	5.80	0.25	0.053	0.47
Bief 6	3.83	<0.5	3.30	161	6.0	0.053	11.5	3.81	6.59	2.18	0.24	0.077	0.66
Bief 7	2.02	<0.5	2.80	148	6.0	0.048	13.2	3.7	6.4	2.02	0.24	0.097	0.59
Bief 8A	2.09	<0.5	3.06	146	6.4	0.066	13.2	4.03	6.97	1.89	0.21	0.059	0.46
Bief 8B	2.31	<0.5	2.74	157	6.3	0.025	11.3	3.09	5.34	3.02	0.38	0.084	0.67
Bief 9	1.27	<0.5	1.44	85	5.7	0.033	14.9	2.15	3.72	1.39	0.16	0.045	0.34
Bief 10	2.97	<0.5	2.88	143	6.0	0.079	12.7	3.67	6.34	1.99	0.20	0.080	0.48
Bief 11	3.77	<0.5	3.14	172	6.6	0.089	12.1	3.81	6.59	2.84	0.33	0.092	0.67
Bief 12	3.17	<0.5	3.99	218	6.2	0.10	14.4	5.76	9.96	2.93	0.29	0.11	0.76
Bief 13	3.56	<0.5	4.86	220	6.3	0.13	15.3	7.43	12.8	3.76	0.25	0.59	0.54
Bief 14	4.92	<0.5	3.49	158	6.8	0.14	12.3	4.3	7.44	3.40	0.47	0.22	0.50
Bief 15	2.32	<0.5	3.89	158	6.0	0.12	13.8	5.37	9.29	2.67	0.34	0.23	0.50
Bief 16	2.43	<0.5	3.05	169	6.5	0.095	13.7	4.17	7.22	2.44	0.56	0.26	0.49
Bief 17	3.30	<0.5	3.80	196	6.0	0.086	15.0	5.71	9.87	2.80	0.27	0.14	0.44
Bief 17bis	3.42	<0.5	3.24	195	6.8	0.080	13.0	4.19	7.25	3.49	0.50	0.17	0.92
Valeurs indicatives		10-25		120-200	6-8	0.06-0.08	8-12	>1.15	2.1	<5	0.1-0.2	<0.08	0.1-0.15

Avec des proportions en sables, en limons et en argiles présentant une moyenne respective de 43%, 36% et 21%, 13 échantillons (sur 17) appartiennent à la classe granulométrique limons argilo-sableux. Deux échantillons (Bief 8B et 17bis) présentent des proportions en argile plus élevées que les autres et se rapprochent d'une argile limoneuse, enfin les deux derniers s'apparentent à des argiles limoneuses (Bief 4 et 9) (figure 29).

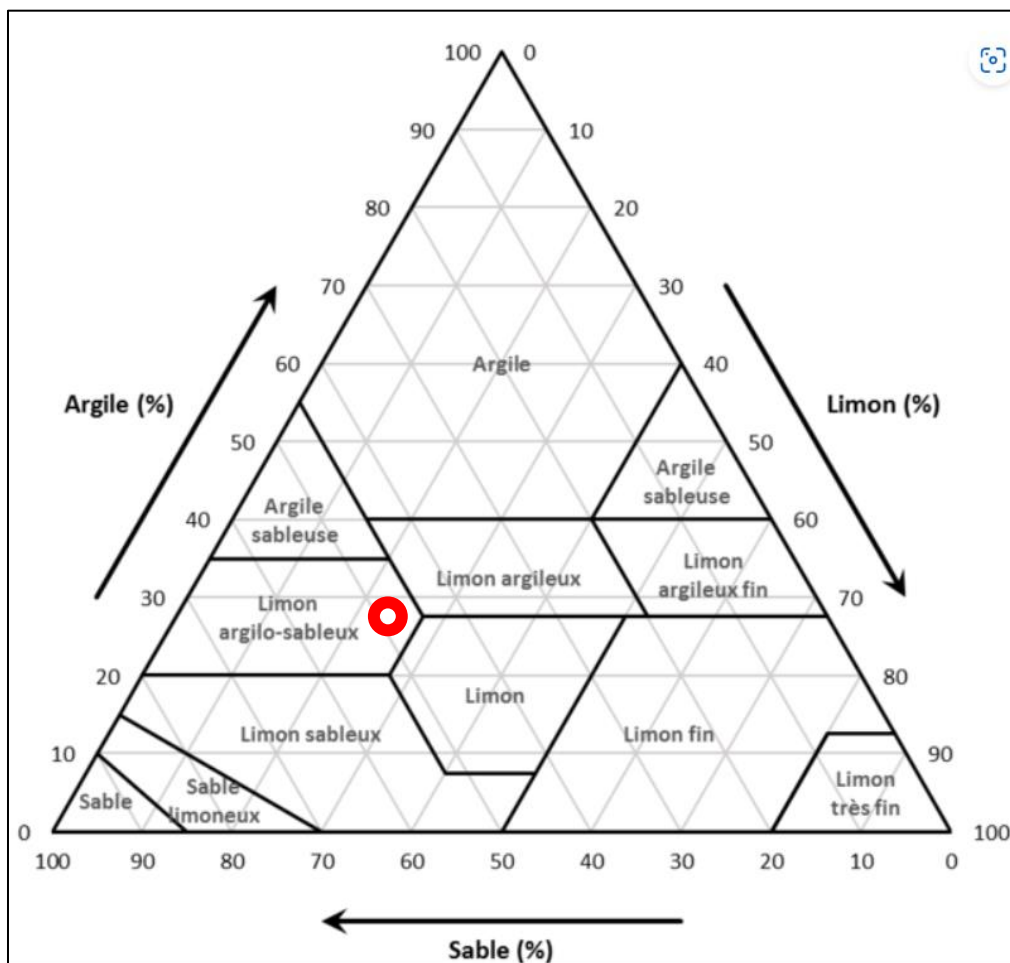


FIGURE 29 : TEXTURE DES ECHANTILLONS DE SEDIMENTS

Les résultats des analyses agronomiques menées concluent au fort potentiel de valorisation agricole de l'ensemble des 17 échantillons prélevés. Tout d'abord les sédiments présentent une texture de type limons argilo-sableux pour 13 des 17 échantillons, argilo-sableux et argilo-limoneux pour les 4 autres. Ces textures sont idéales pour le travail du sol et la mise en culture. De plus, le pH compris entre 6 et 8 est favorable pour les cultures agricoles ; la teneur en matière organique est supérieure à 2 % pour l'ensemble des échantillons et traduit le caractère fertile des sédiments. Le rapport C/N (entre 11 et 15) montre un bon potentiel de minéralisation de l'azote, permettant une bonne décomposition de la matière carbonée, sans perte d'azote. Enfin les teneurs en éléments minéraux nutritifs (P, K, Ca, Mg) sont relativement élevées et favorables pour l'implantation de cultures.

INTERPRETATION REGLEMENTAIRE DU STATUT DES SEDIMENTS

Comme évoqué précédemment dans les éléments de contexte (partie A), l'absence de réglementation spécifique à la valorisation agronomique des sédiments amène généralement à se reporter par défaut à la législation fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues de stations d'épuration (STEP) sur les sols agricoles (arrêté du 8 janvier 1998). Cependant, les sédiments qui seront dragués dans le cadre de l'opération de curage du canal de Nantes à Brest n'ont pas les mêmes propriétés que les boues de STEP et peuvent ainsi être décrits différemment de ces dernières (Tableau 10 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 11). En effet, les sédiments possèdent une composition bien différente avec des teneurs en matière organique et en éléments fertilisants nettement moins importantes que les boues de STEP.

Par conséquent, et en accord avec plusieurs sources bibliographiques traitant de ce sujet, la mise en œuvre de ces sédiments sur parcelle(s) agricole(s) peut ne pas être considéré comme un épandage agricole mais plutôt comme un retour au champ de terre arable via une reconstitution de sol réalisée après ressuyage des sédiments (Anger, 2014⁵ ; Fourvel, 2018).

Dans le cadre de cette filière de valorisation, sur laquelle un groupe de travail (porté par le CEREMA et les Ministères de l'Agriculture et de la Transition écologique et solidaire) travaille à l'établissement d'un guide qui devrait être publié prochainement, il est possible de déroger à l'arrêté du 8 janvier 1998 via le recours au décret n° 2020-412 du 8 avril 2020 relatif au droit de dérogation reconnu au Préfet et qui permet aux Préfets de Région et de Département de déroger à des normes arrêtées par l'administration de l'Etat.

⁵ Anger, 2014. Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière. Géotechnique. Université de Caen Basse-Normandie.

TABLEAU 11 : GAMME DE TENEURS EN ELEMENTS FERTILISANTS RETROUVES DANS LES CINQ GRANDS TYPES DE BOUES DE STEP (SOURCE : ADEME).

Eléments fertilisants	Boue liquide	Boue pâteuse	Boue sèche	Boue chaulée	Boue compostée
Teneur en Matière Sèche (M.S.) (% du Produit Brut (P.B.))	2 - 7	16 - 22	90 - 95	25 - 40	40 - 60
Teneur en Matière Organique (% de la M.S.)	65 - 70	50 - 70	50 - 70	30 - 50	80 - 90
pH	6,5 - 7	7 - 8	6 - 8	9 - 12	6 - 7
Rapport Carbone/Azote (C/N)	4 - 5	5 - 6	4 - 6	8 - 11	15 - 25
Azote total (kg N/t brute)	2 - 4	8 - 12	30 - 50	6 - 9	5 - 9
Phosphore total(kg P2O5/t P.B.)	2 - 3	6 - 9	50 - 70	6 - 10	6 - 8
Oxyde de Potassium (kg K2O/t P.B.)	0,9	0,8	5	1 - 2	1 - 2
Oxyde de Calcium (kg CaO/t P.B.)	1 - 3	5 - 15	40 - 60	60 - 90	10 - 30
Oxyde de Magnésium (kg MgO/t P.B.)	0,5	1 - 2	5	1 - 2	1 - 2

La valorisation des sédiments au travers d'une reconstitution de sol constitue ainsi une pratique de génie pédologique présentant des bénéfices multiples pour l'écosystème (Chambre d'Agriculture Charente-Maritime, 2017⁶) :

- Amélioration et accroissement du potentiel d'habitat et de la diversité de la vie microbienne du sol lui offrant une capacité épuratrice ;
- Amélioration du système racinaire des plantes : épaisseur de l'horizon de développement plus importante ;
- Amélioration des propriétés de rétention hydrique et augmentations des teneurs en éléments nutritifs du sol : diminution du stress hydrique des cultures.

Les propriétés des sédiments issus des travaux de curage du canal de Nantes à Brest peuvent donc être rapprochées de celles d'une terre végétale (Tableau 12). Cette caractéristique oriente les modalités de valorisation envisagées vers des apports de plusieurs centimètres d'épaisseur. Les retours d'expérience du projet VASC (voir partie A) ont conclu que dans le cas général une épaisseur de 15 cm était optimale (comparé à 5 ou 25 cm). Il est alors pertinent de s'appuyer sur les textes encadrant la valorisation de terres en zone agricole.

TABLEAU 12 : SPECIFICATIONS RELATIVES A LA TERRE VEGETALE DEFINIES PAR LA NORME SUPPORT DE CULTURE NF U44-551 (SOURCE : AFNOR).

1.2	Terre végétale	Terre issue d'horizons de surface humifères ou d'horizons profonds pouvant être mélangée avec des matières organiques d'origine végétale, des amendements organiques et/ou des matières minérales	Matière Organique en % de la Matière Sèche mini : 3 ; maxi : 15 Fraction fine (≤ 2 mm) : supérieure à 50 % en masse (NF X 31-107)
-----	-----------------------	---	---

⁶ Chambre d'Agriculture Charente-Maritime. 2017. Argumentaire technique pour la valorisation des sédiments du Fleuve Charente. David Jullien.

**TABLEAU 13 : TENEURS LIMITES EN ETM (MG/KG) ADMISSIBLES DANS LES SUPPORTS DE CULTURE
(NORME NF U44-551)**

ETM	Teneurs limites
	Tous supports de culture (hors laines minérales ^{a)} , roches volcaniques, perlite, vermiculite et argile expansée)
Cd	2
Cr	150
Cu	100
Hg	1
Ni	50
Pb	100
Zn	300

La norme Support de Culture (NF U44-551) et l'arrêté du 01/04/2020 (AGRG2008998A), relatif aux autorisations de mise sur le marché de matières fertilisantes et de supports de culture fixent les spécifications des supports de culture et notamment les seuils en ETM à ne pas dépasser (tableau 13).

Rappelons que suite aux analyses de pollution réalisées par Terra Innova, l'ensemble des teneurs en ETM retrouvées dans les échantillons de sédiments prélevés sont inférieures aux seuils fixés par la norme Support de Culture (NF U44-551) et l'arrêté du 01/04/2020 relatif aux autorisations de mise sur le marché de matières fertilisantes et de supports de culture (cf., Annexes 5 et 6), excepté pour le Bief 8B, pour lequel une analyse complémentaire a permis de conclure au caractère non écotoxique des sédiments(évaluation de l'écotoxicité, propriété H14)

Seul 1 des 17 échantillons prélevés présente un dépassement des seuils S1 (métaux et organiques) fixés par l'arrêté du 30 juin 2020 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface ou de sédiments marins, estuariens ou extraits d'un cours d'eau ou canaux. Le calcul de l'indice de contamination (QSm) et une étude bibliographique sur les risques écotoxicologiques associés au nickel permettent de conclure que ce dépassement ne présente pas de risque pour les personnes et pour l'environnement dans le cas d'une gestion à terre des sédiments). La réalisation d'une analyse supplémentaire sur le critère H14 (tests d'écotoxicité sur des organismes aquatiques et terrestres, d'après le protocole établi

par le guide du BRGM⁷) a permis de lever toute ambiguïté selon la préconisation dudit guide, le rapport d'analyse est consultable en annexe 2. Pour rappel le bief 8, présente un volume de sédiments de 12 850 m³.

Un point de vigilance (analyses de contrôle à réaliser après ressuyage) sur les teneurs en HAP des biefs 5, 12 et 13 restera à observer (dépassement du seuil fixé par l'AMM des supports de culture).

L'arrêté du 12 décembre 2014 fixe les critères d'admissibilité en ISDI. Les seuils édictés par cet arrêté permettent de définir la qualité inerte d'un déchet. Un déchet qualifié d'inerte n'a pas d'interaction chimique significative avec l'environnement.

Comme précisé précédemment, les résultats des analyses concluent au caractère inerte de l'ensemble des échantillons analysés en 2019 et en 2022. Ces échantillons sont donc à considérer comme déchet inerte et non dangereux au sens de l'arrêté du 12/12/14. Terra Innova aura la charge d'accompagner la valorisation agroécologique des volumes de sédiments inertes, représentant ainsi environ 50 000 m³ selon les informations fournies par le Département 44 à ce jour.

4. Description des analyses complémentaires réalisées par Terra Innova

Suite à l'obtention de l'ensemble des résultats relatifs aux analyses effectuées et aux interprétations réalisées sur ces derniers, Terra Innova a identifié l'intérêt de la mise en œuvre d'analyses complémentaires sur les échantillons de sédiments, dans le but de valider définitivement leur valorisation agronomique sur parcelles agricoles.

Ce plan d'analyses complémentaires a été défini selon les différents protocoles mis en œuvre par Terra Innova sur des projets similaires et traitant de la valorisation de sédiments sur parcelles agricoles.

Evaluation et gestion de la réactivité chimique des sédiments

Les analyses déjà réalisées n'ont montré aucun dépassement des seuils au regard de critères concernant les teneurs en métaux sur brut, excepté pour le bief 8B, ce dépassement ne présente toutefois pas de risque pour les personnes et pour l'environnement dans le cas d'une gestion à terre des sédiments.

La réactivité chimique du sédiment se manifeste lors du *ripening*, i.e. les premières étapes (physique, chimique et biologique) de pédogénèse des sédiments menant à la formation de sols structurés et aérés utilisables pour les activités agricoles. Ces

⁷ Mouvet C. (2013) – Test du protocole d'écotoxicologie (critère H14) pour l'évaluation du caractère dangereux de sédiments destinés à une gestion à terre. Rapport final. BRGM/RP-61420-FR

processus naturels sont conditionnés principalement par la déshydratation lors du dépôt et à l'oxydation du matériau. D'un point de vue chimique, la sortie des sédiments de l'eau induit progressivement :

- le passage d'un milieu réducteur et saturé en eau à un milieu oxydant et désaturé en eau
- divers changements des propriétés chimiques du sédiment (pH, spéciation et solubilité métaux, etc.)

Comment se manifeste cette réactivité chimique ? Brièvement, les sulfures formés durant la diagenèse (à cause de la dégradation de la matière organique) subissent en présence d'oxygène une dissolution oxydative, qui provoque la production de sulfates et une acidification, ainsi qu'à la solubilisation de métaux.

Terra Innova a volontairement développé une méthodologie interne pour évaluer et gérer ce risque de réactivité chimique (qui n'est encadré dans aucun guide ou réglementation), qui consiste en 3 grandes étapes :

- des analyses spécifiques avant ou au moment du dragage pour évaluer le risque de réactivité chimique
- un ressuyage efficace du sédiment en casier/plateforme (pas directement sur parcelle agricole)
- des contrôles réguliers (visuels et analytique) des sédiments en cours de ressuyage

Evaluation et gestion du risque de réactivité chimique

Il est possible de juger du risque de réactivité chimique (acidification, relargage de métaux lors du ressuyage du sédiment) en amont par une analyse spécifique de type « risque pyrite ». Terra Innova et le laboratoire Eurofins ont développé un protocole spécifique adapté aux sédiments.

Les biefs comportant le plus de volume de sédiments ont été retenus pour étudier la réactivité des sédiments du canal de Nantes à Brest. Ainsi, 5 échantillons sur les 17 prélevés pour les analyses pollution et agronomique ont fait l'objet d'une analyse risque pyrite. Les résultats sont présentés dans le tableau 14 ci-dessous.

TABEAU 14: RESULTATS D'ANALYSE DE REACTIVITE

Tests	Unités	Bief 3	Bief 4	Bief 8	Bief 17	Bief 17bis
Carbone total (CT) par combustion sèche	mg/kg M.S.	16600	28700	35100	49700	31700
COT (Sols. Solides divers) par combustion sèche	mg/kg M.S.	15400	27700	34300	45100	29300
Soufre (S)	mg/kg M.S.	3010	2880	1230	1980	2070
Carbonates	mg C/kg M.S.	1180	945	795	4640	2380
Sulfates à l'acide contexte pyrite	mg/kg M.S.	1650	1900	1170	1510	1390
Sulfures contexte pyrite	%	0.246	0.225	0.084	0.198	0.161
AP: Potentiel de génération d'acide	moles H+/kg	0.15	0.14	-	0.12	0.1
NP: Potentiel de neutralisation	moles H+/kg	0.32	0.07	-	0.07	0.36
NNP : Potentiel de neutralisation net	moles H+/kg	0.2	-0.1	-	-0.1	0.3
NPR : Rapport de potentiel de neutralisation		2.1	0.5	-	0.6	3.6

Le potentiel de génération d'acide (AP) et le potentiel de neutralisation (NP) sont calculés et exprimés en teneurs en H⁺ (mol/kg). Le rapport de potentiel de neutralisation (NPR) (potentiel de neutralisation des eaux de drainage acides) est évalué à l'aide du rapport suivant :

$$NPR = \frac{NP}{AP}$$

Le potentiel de neutralisation net (NNP) est calculé à partir de AP et NP en utilisant la formule de l'Équation suivante :

$$NNP = NP - AP$$

Pour jauger du risque de réactivité des sédiments, il convient de regarder des 2 indicateurs, le NNP et le NPR :

- si le NNP est négatif, il y aura acidification des sédiments
- si le NPR est < 1, il y aura acidification des sédiments. On considère que si le NPR est > 2, le risque d'acidification est écarté.

Après lecture des résultats d'analyse, les échantillons des biefs 4 et 17 présentent un risque d'acidification. Les biefs 3 et 17 bis ne présentent pas de risque. L'échantillon du bief 8 ne présente pas de valeur de potentiel d'acidification et de neutralisation car le taux de sulfures est inférieur à 0,1% en MS. Nous considérons qu'il ne présente pas de risque d'acidification.

Conclusion

Sur 5 échantillons analysés, 2 présentent un risque de réactivité chimique. Par sécurité, Terra Innova considère que ce risque doit être étendu à l'ensemble des sédiments (biefs 3 à 17bis). Afin de contrer cette réactivité chimique, nous préconisons un chaulage du sédiment lors de sa mise en casier de ressuyage, pour augmenter sa capacité tampon : un chaulage maintiendra le pH à son niveau initial et évitera

l'acidification ainsi que la solubilisation des métaux. Les sulfates produits seront absorbés par la végétation (spontanée ou implantée) lors du ressuyage du sédiment.

Analyses agronomiques complémentaires à prévoir

Comme déjà discuté plus haut, les caractéristiques physico-chimiques et agronomiques des sédiments sont bien plus proches de celles d'une terre végétale que de boues de STEP.

Des analyses agronomiques complémentaires seront ainsi mises en œuvre par Terra Innova sur sédiments ressuyés et donc avant la mise en œuvre de ces derniers sur la parcelle. Elles comprendront notamment la détermination des teneurs en éléments fertilisants et la caractérisation de la spéciation de l'azote sur sédiments ressuyés, ainsi que l'étude des cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote organique des sédiments seuls et/ou incorporés au sol du site récepteur.

Il est important de noter que les premiers apports de sédiments sur les parcelles seront probablement réalisés à la sortie de l'été 2024, juste avant l'implantation d'une nouvelle culture par l'exploitant, ce qui permettra la maximisation du prélèvement d'azote par les plantes. Le rapport C/N des sédiments est équilibré, ce qui permet la consommation simultanée de carbone et d'azote réduisant ainsi le risque de lessivage de l'azote. L'apport de matière organique par le sédiment permet également une amélioration de la structuration du sol par floculation, ce qui protège le sol des phénomènes d'érosion, de battance et de lessivage. L'exploitant n'apportera donc pas d'amendement organique avant l'apport des sédiments afin de ne pas enrichir inutilement les parcelles en éléments fertilisants.

La mission de Terra Innova inclura le suivi de la parcelle avant et après valorisation des matériaux et donc l'accompagnement et le conseil de l'exploitant vis-à-vis des pratiques culturales et itinéraires techniques à mettre en œuvre dans le cadre de cet apport. Un bilan azoté sera également réalisé suite à l'apport des sédiments pour permettre de raisonner fertilisation de la culture qui sera implanté par l'exploitant.

Essais de germination/croissance en chambre de culture

Matériels et méthodes

Un test de germination/croissance (norme NF ISO 11269-2) a été réalisé sur des échantillons de sédiments prélevés en eaux (voir paragraphe C-1) afin de détecter une éventuelle phytotoxicité du matériau. Les échantillons de sédiments frais, riches en eau, ont été séchés à 40 °C à l'étuve durant quelques jours, avant d'être émiettés et tamisés à 5 mm pour les besoins de l'essai. Pour ces essais de phytotoxicité, les échantillons unitaires par bief ont été regroupés pour constituer des échantillons composites (voir tableau 15).

**TABLEAU 15 : ECHANTILLONS COMPOSITES CONSTITUES POUR LES ESSAIS DE PHYTOTOXICITE, AVEC
VOLUMES ESTIMES CORRESPONDANTS**

Abréviations	Biefs	Volumes (m3)
Sed A	3-4-5	13 179
Sed B	6-7-8	14 842
Sed C	9-10	2 949
Sed D	11-12	2 788
Sed E	13-14-15	1 945
Sed F	16-17-18	10 364

Les sédiments seront comparés à une terre végétale issue d'un horizon de culture aux caractéristiques proches (texture limono-argileuse, pH = 5.8, matière organique = 8.5 %). Les sédiments ont été mis en godets 70*70*75 mm, semés avec cresson (*Lepidium sativum*, 10 graines) ou blé (*Triticum aestivum*, 6 graines), et placés en chambre de culture (16 h photopériode, 22 °C, 60 % HR). Cresson (dicotylédone, Brassicacée) et blé (monocotylédone, Poacée) sont des espèces sensibles aux conditions de milieu classiquement utilisées en écotoxicologie.

Résultats

Taux de germination

Les taux de germination ont été mesurés 6 Jours Après Semis (JAS). Pour le cresson (tableau 16), ces taux de germinations sont élevés (supérieurs à 90 %) pour la terre végétale de référence (TV ref) ainsi que pour les sédiments B et C ; ils sont moyens et hétérogènes pour les sédiments D et E (environ 50 %) et faibles et hétérogènes pour les sédiments A et F (environ 20 %).

TABLEAU 16 : TAUX DE GERMINATION DU CRESSON A 6 JAS

	TV ref	Sed A	Sed B	Sed C	Sed D	Sed E	Sed F
	90	10	100	100	70	10	10
	100	40	90	100	60	60	30
	90	20	100	90	50	60	20
		0	90	80	40	60	20
moy.	93	18	95	93	55	48	20
e.t.	6	17	6	10	13	25	8

Chez le blé (tableau 17), les taux de germination sont globalement plus élevés, dans toutes les conditions. Ils atteignent 100 % pour la terre végétale et le sédiment D ; autrement ils s'étalent de 92 à 75 % pour les sédiments E, A, C, F et B (respectivement et par ordre décroissant).

TABLEAU 17 : TAUX DE GERMINATION DU BLE A 6 JAS

	TV ref	Sed A	Sed B	Sed C	Sed D	Sed E	Sed F
	100	66	83	83	100	83	83
	100	83	33	66	100	100	83
	100	83	83	83	100	100	66
	100	100	100	100		83	83
moy.	100	83	75	83	100	92	79
e.t.	0	14	29	14	0	10	9

Nous avons noté une légère odeur de putréfaction provenant des sédiments D, E et F.

Suivi de la croissance

La croissance du blé lors de la première semaine a pu être estimée quantitativement en mesurant la longueur de la 1^{ère} feuille, ie la hauteur du plant à 6 JAS (figure 30).

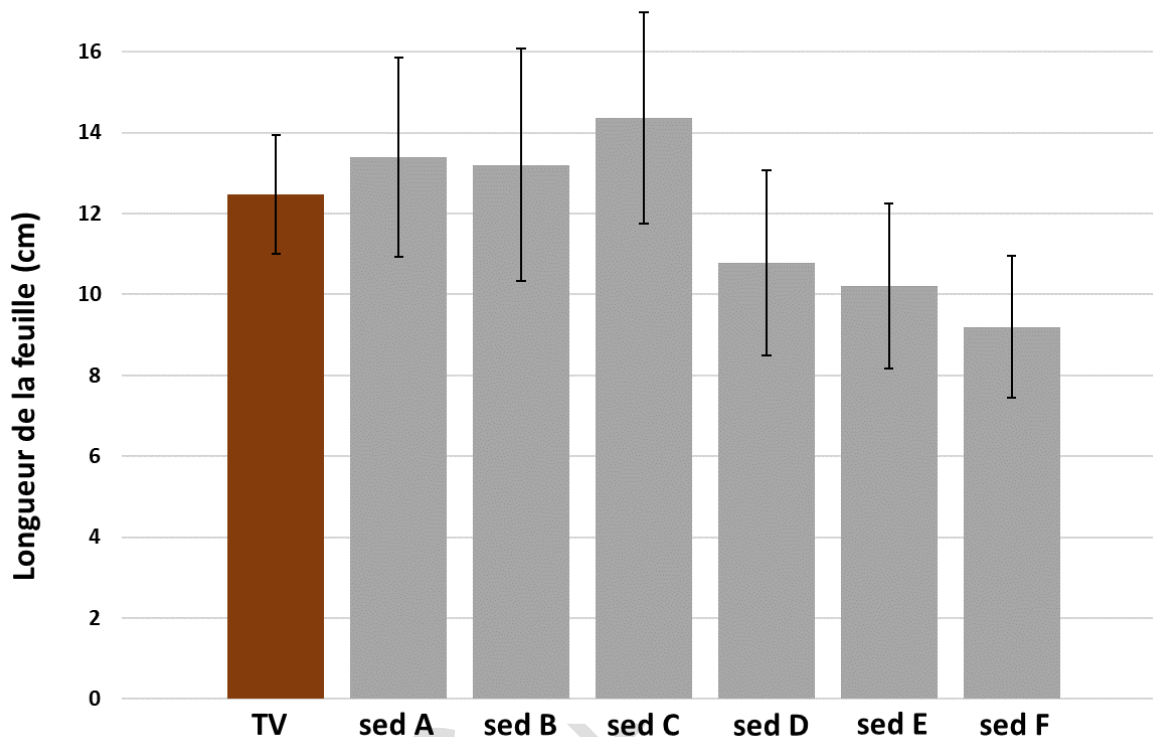


FIGURE 30 : MESURE DE LA HAUTEUR DES PLANTULES (LONGUEUR 1^{ERE} FEUILLE) DE BLE A 6 JAS

La longueur moyenne de la feuille dans la terre végétale de référence était de 12.5 cm environ. Cette longueur s'est révélée supérieure pour les sédiments A, B et C (de 13.2 à 14.4 cm) et inférieure dans le cas des sédiments D, E et F (9.2 à 10.8 cm).

Visuellement entre 14 et 21 JAS, on remarque une croissance du cresson laborieuse dans les sédiments A, D, E et F. De même dans le sédiment F, le blé apparaît significativement moins haut que dans les autres conditions.

Biomasses fraîches

La récolte a été effectuée à 28 JAS. Les biomasses fraîches ont été pesées, par pot pour le cresson et individuellement pour le blé. On note avant toute mesure quantitative de nettes différences de développement entre les différentes conditions, en particulier chez le cresson (figure 31).



FIGURE 31 : ALLURE DES PLANTULES DE BLE ET DE CRESSON AU MOMENT DE LA RECOLTE. EXEMPLES DU SEDIMENT B (BON DEVELOPPEMENT VEGETATIF) ET DU SEDIMENT A (FAIBLE DEVELOPPEMENT VEGETATIF)

Les plantules de cresson cultivées dans la terre végétale sont bien développées et atteignent une biomasse fraîche d'environ 1 g (figure 32). Par ordre décroissant, les biomasses du sédiment B dépassent celles de la terre végétale (en moyenne 1.12 g) ; les biomasses du sédiment C sont comparables mais inférieures (0.8 g) ; les biomasses des sédiments D (0.30 g), E (0.27 g), A (0.14 g) sont très nettement inférieures. Enfin la biomasse du sédiment F est quasi inexistante (0.02 g).

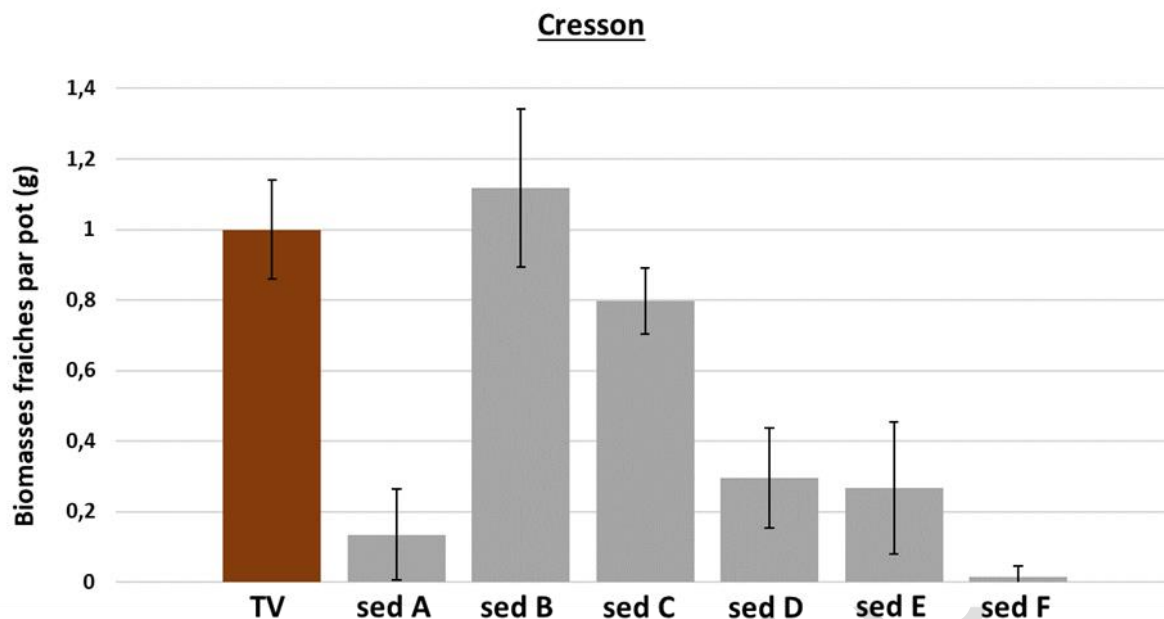


FIGURE 32 : BIOMASSES FRAICHES PAR POT DU CRESSON A LA RECOLTE (28 JAS)

Concernant le blé, les plantules sont correctement développées dans toutes les conditions (figure 33). Aucune chlorose ou nécrose n'a été constatée. Les biomasses fraîches individuelles sont en moyenne de 0.31 g pour la terre végétale de références. Les biomasses des sédiments F et A sont légèrement inférieures (0.24 g et 0.29 g respectivement). Les biomasses des sédiments B, C, D et E sont supérieures à celles de la terre végétale (de 0.31 à 0.42 g).

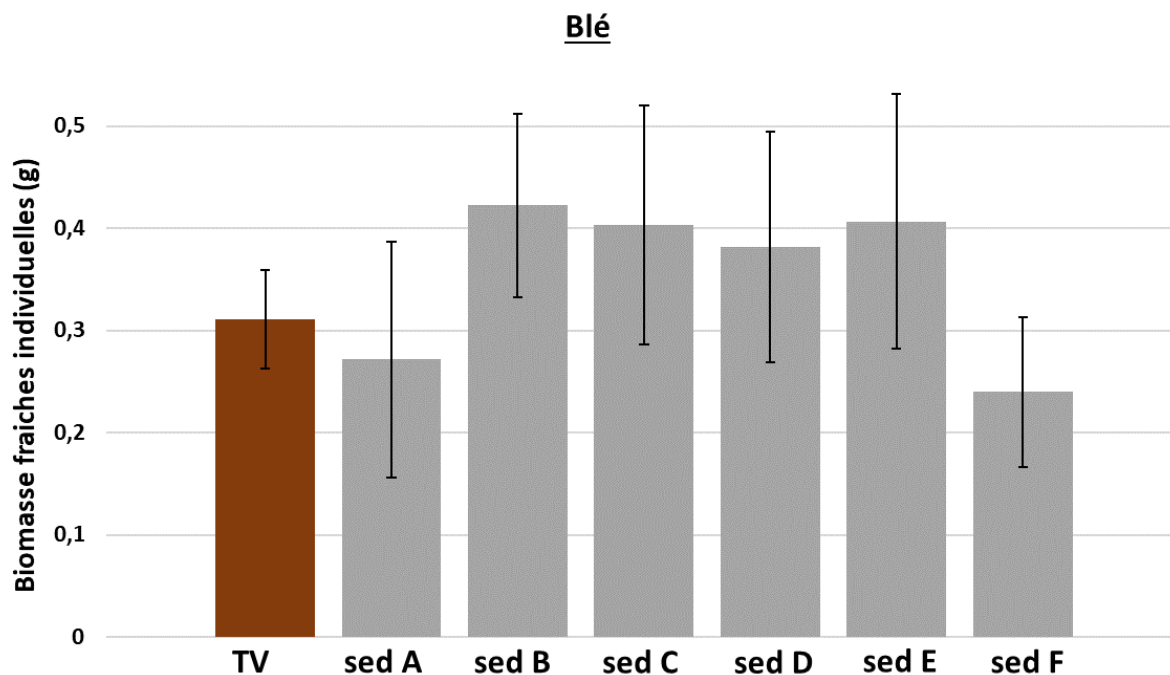


FIGURE 33 : BIOMASSES FRAICHES INDIVIDUELLES DU BLE A LA RECOLTE (28 JAS)

Pour l'échantillon de sédiment C (biefs 9 et 10), nous avons noté la germination de 2 plantules de robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*). Aucune autre adventice n'a été observée dans les autres échantillons.

Conclusions de l'essai de germination/croissance

Cette première série d'essais effectuée sur des sédiments fraîchement dragués a mis en évidence une phytotoxicité partielle. En effet, nous avons constaté une croissance satisfaisante du blé, comparable à celle obtenue dans une terre végétale de référence. En revanche, un taux de germination et une croissance médiocres à très médiocres du cresson dans 4 des 6 échantillons de sédiments (satisfaisantes pour 2 des 6 échantillons, comparables ou supérieures à celle de la terre végétale) ont été observés.

Nous pouvons faire l'hypothèse d'un début de réactivité chimique du sédiment et plus généralement d'un contexte physico-chimique peu favorable à la germination et la croissance. Des analyses complémentaires (pH et teneurs en soufre) ont été lancées suite à cet essai pour tenter d'expliquer les différences dans les résultats obtenus.

Rappelons que la phytotoxicité partielle à l'instant t (sédiments à peine sortis de l'eau, non évolués), ne présage en rien sa qualité future après une période de ressuyage et d'évolution à terre en casiers de stockage de quelques mois. De nouveaux essais de phytotoxicité pourront être réalisés après ressuyage et évolution du sédiment.

Notre retour d'expérience sur la valorisation des sédiments du canal d'Ille et Rance (sédiments de nature comparable à ceux étudiés dans cette étude) va dans ce sens. Nous avons constaté une légère phytotoxicité pour l'un des sites de transit sur un sédiment non ressuyé, phytotoxicité qui n'était plus observée une fois le sédiment évolué (ressuyé et correctement oxygéné). De plus, nous avons constaté que les sites de transit sont rapidement et abondamment colonisés par une végétation spontanée, ce qui témoigne de sa bonne qualité en tant que support de culture.

Test d'évitement des vers de terre

Principe du test

L'essai aigu d'évitement des « vers de terre » est réalisé selon la norme ISO/DIS 17512-1. Il consiste à évaluer la réaction d'évitement (tendance d'un organisme à éviter le sol ou sédiment soumis à essai en faveur du sol témoin) des vers après quelques jours d'exposition. C'est une méthode rapide qui reflète la qualité d'un substrat naturel. Brièvement, des boîtes plastiques de dimension 25 x 15 cm sont remplies pour moitié de sédiments et pour moitié de sol témoin (la même terre de référence utilisée pour les essais de germination/croissance) sur une épaisseur de 5 cm environ (figure 34).

Des lots d'une vingtaine de vers (*Dendrobaena venata*) sont déposés au centre de chaque boîte, à la limite sol témoin/sédiment. Les boîtes ont ensuite été placées à l'obscurité à une température de 20 degrés durant 72 h.



FIGURE 34 : DISPOSITIF UTILISÉ POUR LE TEST D'ÉVITEMENT DES VERS DE TERRE

Résultats

Après 72 h d'incubation, le nombre de vers dans chacun des compartiments est compté. Visuellement (figure 35), on remarque que les vers ont bien exploré le sédiment et la terre végétale de façon homogène et équivalente (nombreuses galeries dans toute la boîte).



FIGURE 35 : EVOLUTION DU DISPOSITIF DE TEST D'EVITEMENT A T = 0 ET T = 72H.

Les résultats de ces essais d'évitement sont les suivants (tableau 18).

TABLEAU 18: POURCENTAGES DE VERS DANS CHACUN DES COMPARTIMENTS A LA FIN DU TEST D'EVITEMENT

%	TV	sédiment	TV/sed
Sed A	14	77	9
Sed B	13	78	9
Sed C	32	68	0
Sed D	40	60	0
Sed E	19	76	5
Sed F	20	75	5

Pour tous les échantillons de sédiments, les vers sont retrouvés très majoritairement dans le sédiment (de 60 à 78 %) contre 13 à 40 % dans la terre végétale. Notons que quelques vers sont retrouvés à cheval entre les 2 compartiments terre végétale/sédiment.

Il n'y a donc pas de réaction d'évitement du sédiment par les vers, au contraire ces derniers s'y retrouvent en nombre, témoignant ainsi de sa bonne qualité en tant qu'habitat.

Essai carbonate

Terra Innova a réalisé des essais « carbonates » en laboratoire afin de préciser les modalités de chaulage (type d'amendement calcaire, dose, méthode d'apport).

Les essais ont été réalisés sur les sédiments présentant les biomasses les plus faibles lors des tests de germination. Deux lots ont été constitués pour cet essai. Les sédiments A et D ont été assemblés pour créer le lot G, les sédiments E et F pour créer le lot H.

Les modalités étudiées sont un apport de 2,5 g/kg MB, de 5 g/kg MB et de 10 g/kg MB et un témoin sans apport.

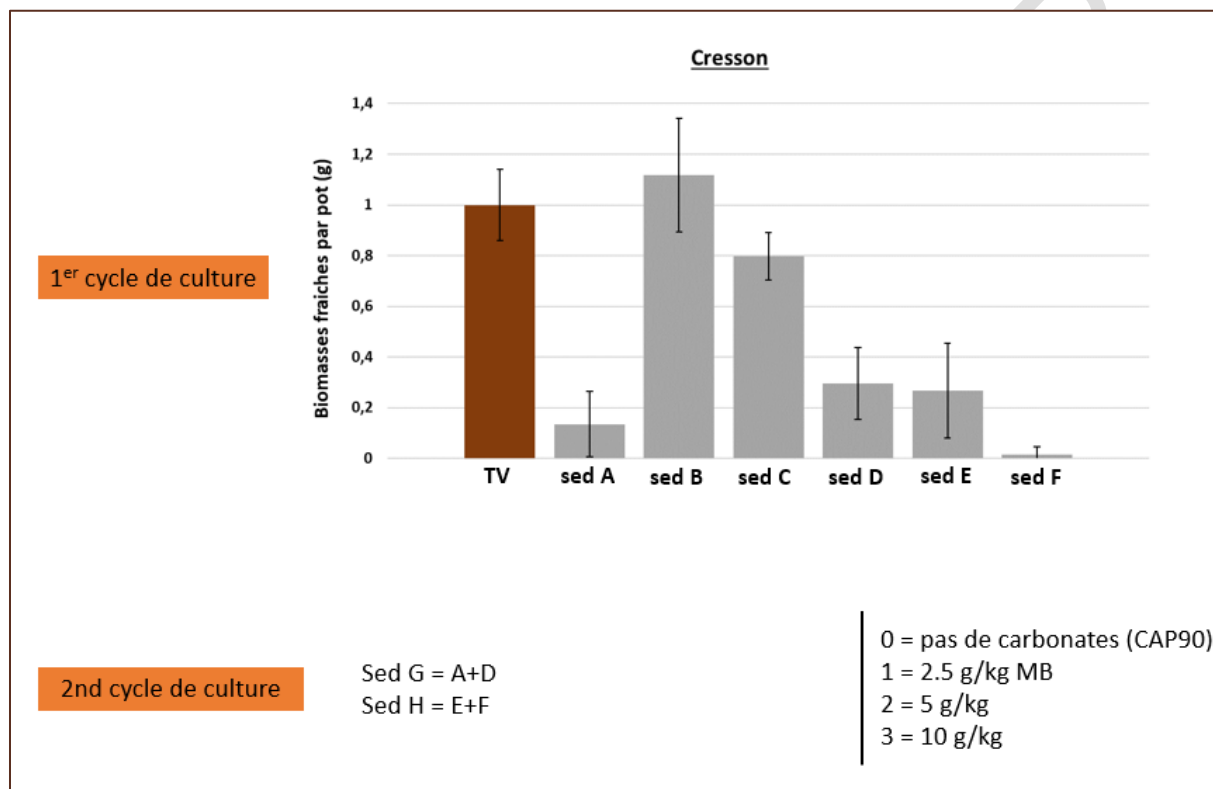


FIGURE 32 : MODALITES DE L'ESSAI CARBONATE

L'efficacité du chaulage s'apprécie par la biomasse de matière végétale produite par pot de culture, la variété retenue est le cresson pour sa sensibilité reconnue. Les résultats sont présentés sur les figures 37 à 41.



FIGURE 33 : PHOTOGRAPHIE DE LA BIOMASSE EN FONCTION DU CHAULAGE LOT G

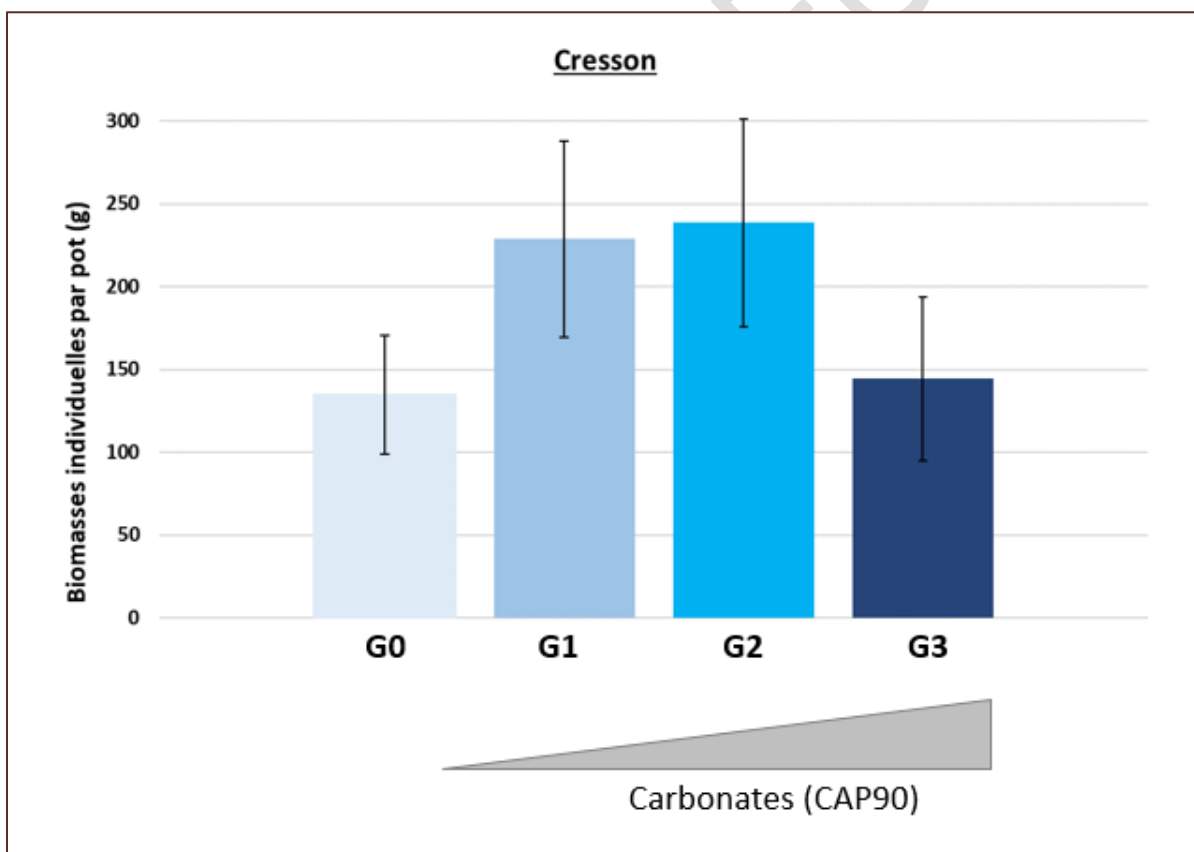


FIGURE 34 : ESSAI DE CROISSANCE EN FONCTION DU CHAULAGE LOT G



FIGURE 35 : PHOTOGRAPHIE DE LA BIOMASSE EN FONCTION DU CHAULAGE LOT H

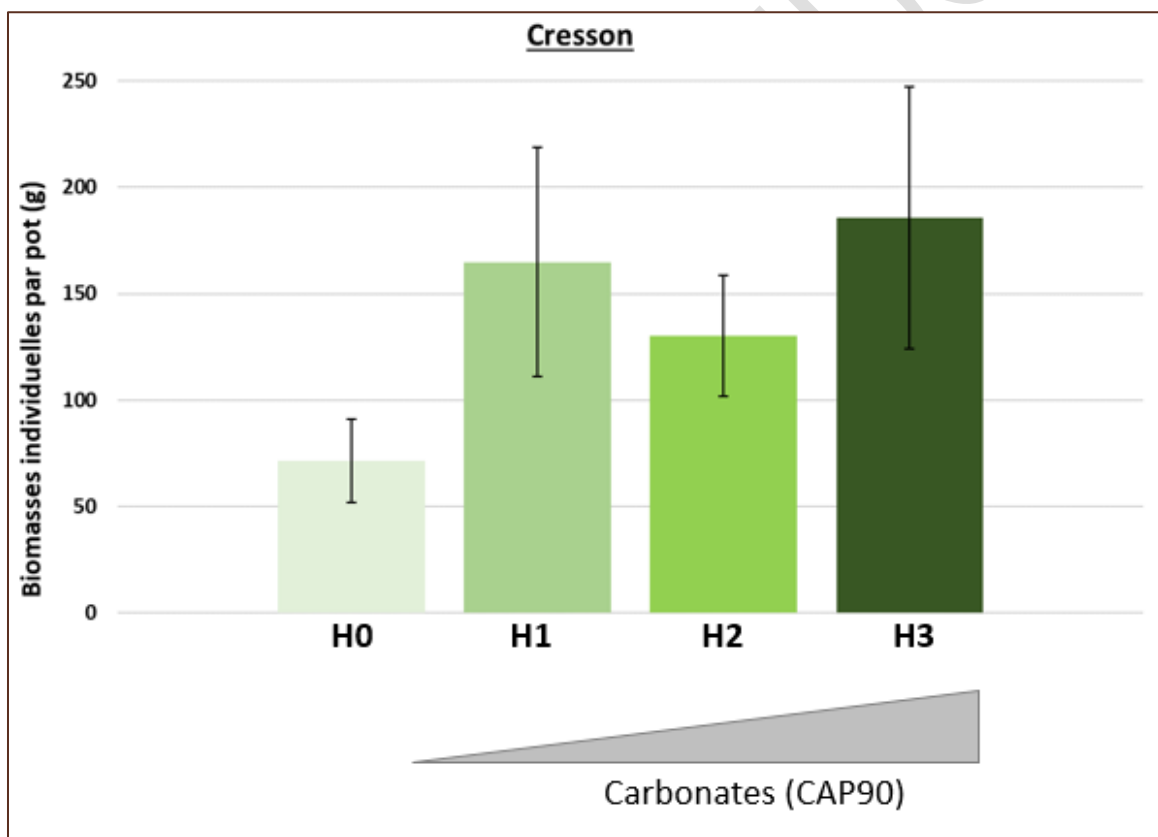


FIGURE 40 : ESSAI DE CROISSANCE EN FONCTION DU CHAULAGE LOT H

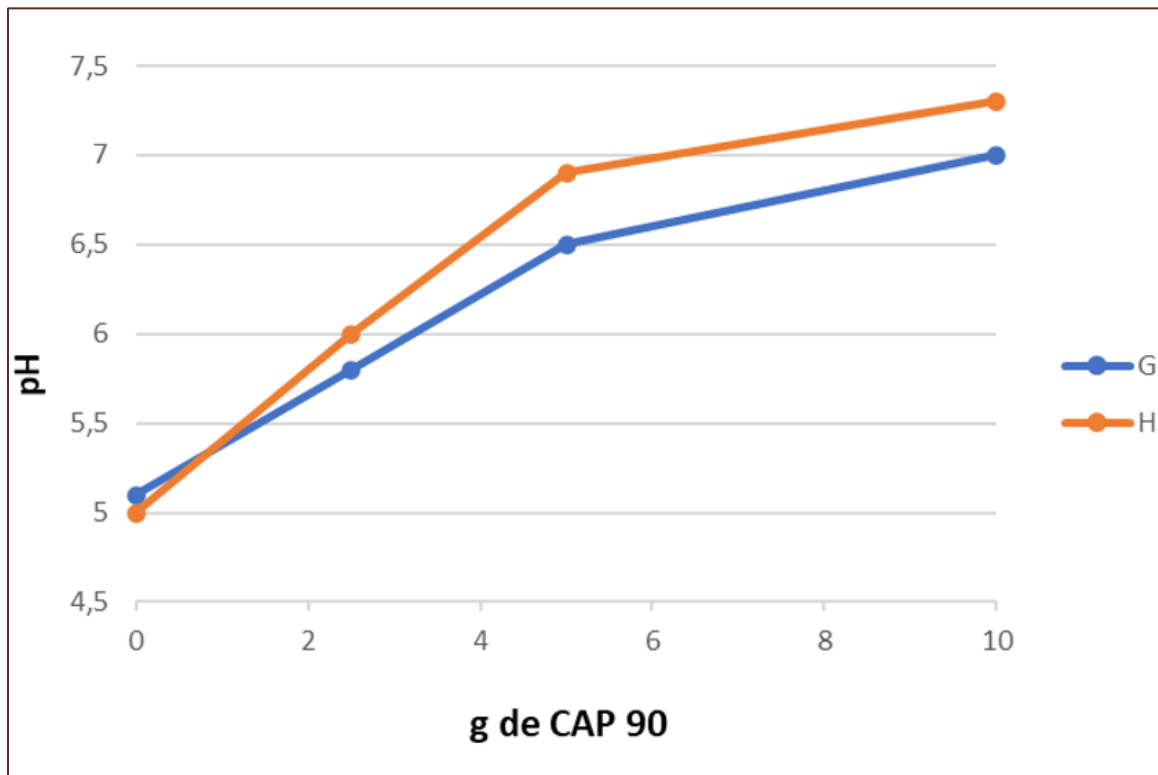


FIGURE 41 : CORRECTION DU pH EN FONCTION DES MODALITES

Dès la première modalité d'apport (2,5 g/kg MB), on observe un effet positif sur la croissance du cresson et la biomasse avec une biomasse jusqu'à 2 fois plus importante par rapport au témoin. Au-delà de 5 g/kg MB, l'effet peut s'avérer neutre.

Une dose de 5 g/kg de MB permet de rehausser de 1 point le pH du sédiment et de se retrouver dans la gamme de pH favorable aux cultures (6-7,5).

Notre équipe restera attentive à cette réactivité chimique par des contrôles visuels et analytiques (pH) au cours du ressuyage du sédiment.

Cinétique de minéralisation de l'azote organique

La cinétique de minéralisation de l'azote s'effectue sur un matériau placé en incubation et maintenu à sa capacité au champ à 28°C pendant 28 jours.

L'azote minéralisé sous forme de nitrate et d'ammonium est régulièrement extrait et mesuré.

D'après les abaques construits à partir d'un travail de l'INRA de Laon, on peut considérer que les phénomènes de minéralisation observés dans ces conditions de température (28°C) et d'humidité (équivalente à celle à pF 3) sont en moyenne 5 fois plus rapides que ce qu'on pourrait observer au champ (température moyenne de 14-15°C). Ce calcul facile permet d'avoir une idée (ordre de grandeur) de ce qui peut se passer au champ. Les résultats sont présentés dans la figure 42 et les tableaux 19 et 20.

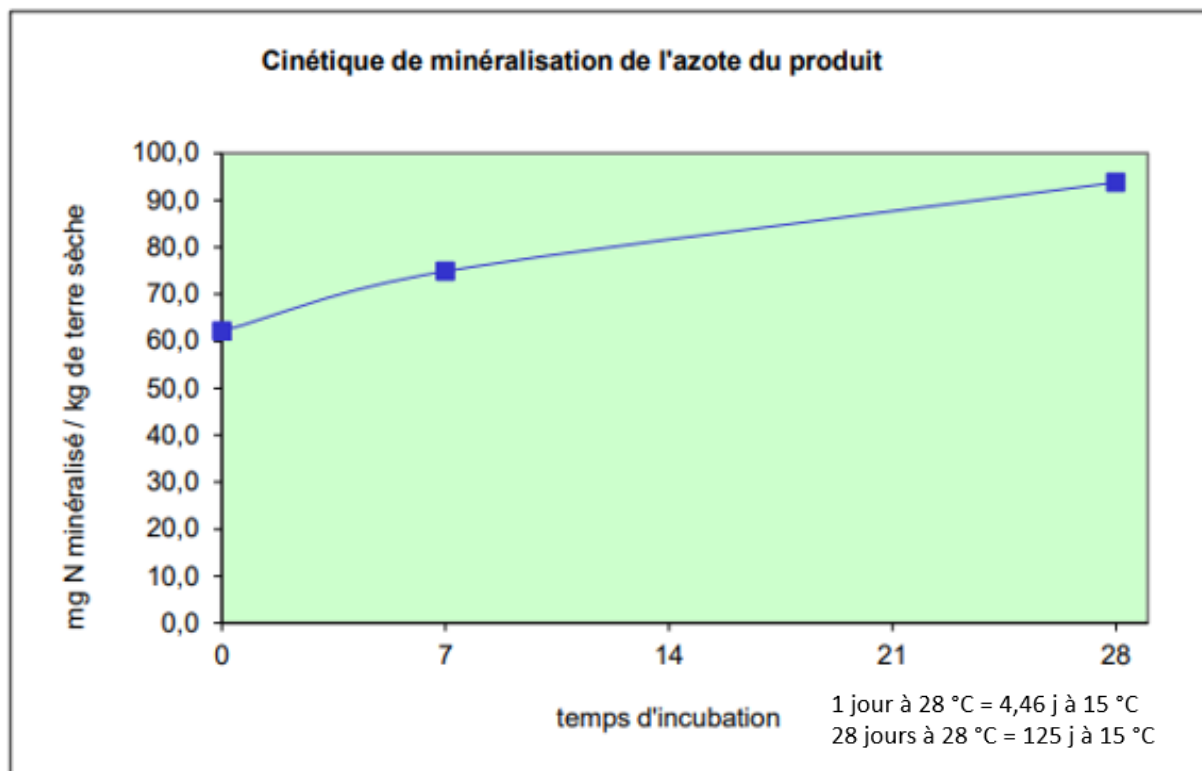


FIGURE 42 : CINETIQUE DE MINERALISATION DE L'AZOTE PRODUIT PAR LES SEDIMENTS

TABLEAU 19 : RESULTATS ANALYTIQUES BRUTS (MG D'AZOTE MINERAL PAR KG DE SOL SEC)

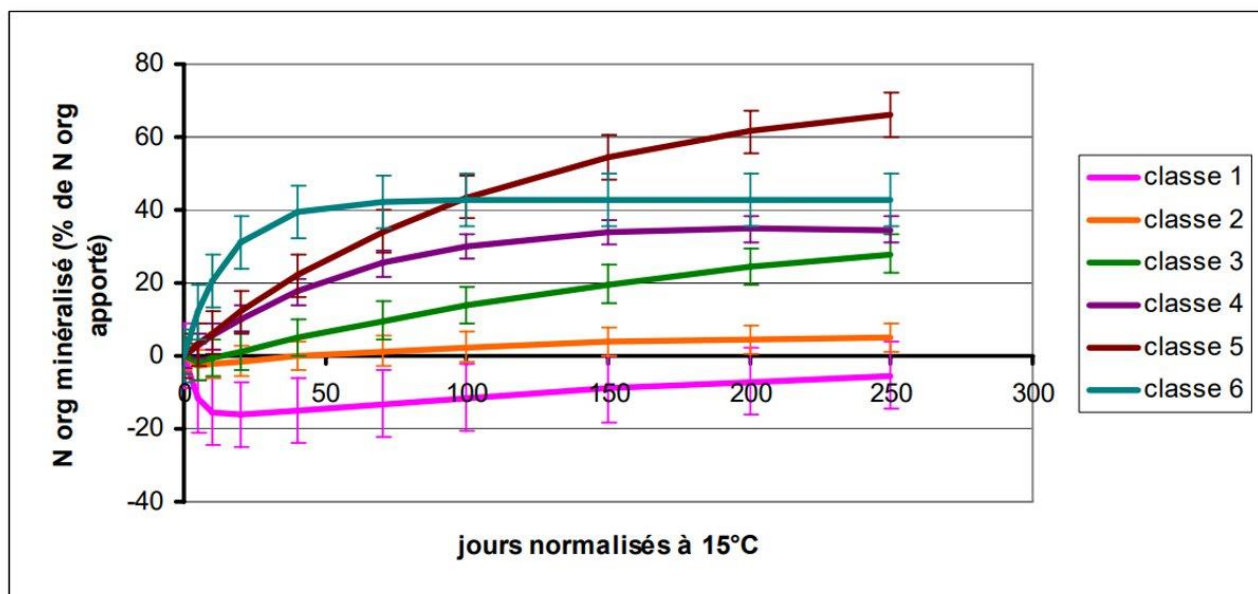
	mg N / kg terre sèche		
Jour :	0	7	28
NO3	0,66	0,91	1,26
écart type	0,09	0,11	0,19
NH4	61,51	73,99	92,54
écart type	0,95	4,71	21,02
N minéral	62,18	74,90	93,80
écart type	0,95	4,71	21,02

TABLEAU 20 : RESULTATS ANALYTIQUES BRUTS (EN % DE L'AZOTE ORGANIQUE DU SOL)

	en % du N total du produit		
Jour :	0	7	28
NO3	0,03	0,05	0,07
écart type	0,00	0,01	0,01
NH4	3,23	3,89	4,86
écart type	0,05	0,25	1,10
N minéral	3,27	3,94	4,93
écart type	0,05	0,25	1,10

1,26mg d'azote est minéralisé sur 28 jours soit 0,0214 mg N / kg de sol sel /j. Au final c'est moins de 5% de l'azote organique qui est minéralisé.

Ces résultats peuvent être mis en perspective avec le graphique ci-dessous qui présente les % de minéralisation de l'azote organique de différentes matières premières.



classe 1 = PRO organisant de l'azote après leur épandage; composts de fumiers, compost de DV

classe 2 = PRO sans effet azote à court terme; composts de fumier bovins, composts de DV, eaux terreuses de sucrerie

classe 3 = PRO avec minéralisation progressive de l'azote organique (20 à 40 %); fumier de bovins

classe 4 = PRO qui minéralisent 30 à 40 % de leur azote organique dans l'année qui suit l'épandage et pour lesquels, la moitié de cette minéralisation se réalise dans les 50 premiers jours normalisés suivant l'épandage; fumiers de volailles, boues urbaines déshydratées

classe 5 = PRO qui minéralisent progressivement de 40 à 80 % de l'azote organique appliqué, dont la moitié au cours des 50 premiers jours normalisés suivant l'épandage; vinasses

classe 6 = PRO qui minéralisent entre 40 et 80 % de leur azote organique et pour lesquels l'essentiel de la minéralisation se passe dans les 50 premiers jours normalisés suivant l'épandage; fientes de volailles, effluents de féculerie et de distillerie, boues urbaines pâteuses

FIGURE 43 : % D'AZOTE ORGANIQUE MINERALISE PAR CLASSE DE MATERIAUX

Les sédiments se rapprochent des matériaux de la classe 2 qui se minéralisent très lentement : seul 5 à 10 % de leur azote organique est libéré au cours de la première année. Ces produits sont principalement utilisés pour entretenir le stock de carbone organique du sol et non comme fertilisants azotés

5. Bilan de la caractérisation agronomique des sédiments

Les analyses agronomiques et le test d'évitement des vers de terre présentent des résultats prometteurs pour envisager une valorisation des sédiments sur des parcelles agricoles. Les tests de germination et de croissance en laboratoire, dont les premiers résultats sont mitigés, devront être reconduits après une période de ressuyage et évolution des sédiments, pour en tirer des résultats définitifs.

La valorisation agronomique de l'ensemble des sédiments issus des travaux de dragage à venir sur le canal de Nantes à Brest est donc encouragée par les conclusions de ce rapport, avec des points de vigilance liés à la réactivité des matériaux qui seront surveillés. Ces sédiments présentent des propriétés agronomiques qui les rapprochent d'une terre végétale, c'est pourquoi Terra Innova (qui s'appuie également sur les nombreux retours d'expérience de la littérature et du terrain) propose de déroger à l'arrêté du 8 janvier 1998 qui restreint la valorisation des sédiments à l'épandage agricole de boues de STEP.

Il est important de noter que les apports de sédiments sur les parcelles seront probablement réalisés à la sortie de l'été 2024, juste avant l'implantation par l'exploitant d'une nouvelle culture ou d'une culture intermédiaire, ce qui permettra la maximisation du prélèvement des nutriments (N, P) par les plantes. Le rapport C/N des sédiments est équilibré, ce qui permet la consommation simultanée de carbone et d'azote réduisant ainsi le risque de lessivage de l'azote. L'apport de matière organique par le sédiment permet également une amélioration de la structuration du sol par floculation, ce qui protégera le sol des phénomènes d'érosion, de battance et de lessivage. L'exploitant n'apportera donc pas d'amendement organique avant l'apport des sédiments afin de ne pas enrichir inutilement les parcelles en éléments fertilisants.

D. Parcelles agricoles d'intérêt

Dans le cadre de recherches de parcelles agricoles présentant un intérêt agronomique à un apport de sédiments, Terra Innova a réalisé une prospection agricole sur le terrain. Celle-ci a permis de rencontrer de nombreux exploitants de parcelles situées à proximité de la future opération, d'identifier les problématiques rencontrées sur leurs sols et d'évaluer l'intérêt agronomique d'apports de sédiments sur les parcelles à plus faible potentiel.

Plusieurs parcelles agricoles d'intérêts pour la valorisation des sédiments ont ainsi été identifiées à proximité du futur chantier. Ces parcelles possèdent des sols relativement hétérogènes présentant un caractère superficiel et caillouteux, engendrant (i) une faible rétention hydrique et en éléments minéraux nutritifs pour les cultures ; (ii) une usure prématurée des engins et outils de travail du sol des exploitants. La figure 44 présente l'ensemble des parcelles d'intérêt le long du tracé de Nort sur Erdre à Saint Nicolas de Redon.

L'apport des sédiments de classe granulométrique limono-argilo sableuse et argilo-sableuse ou argilo-limoneuse sur ces parcelles présente donc un réel intérêt agronomique pour l'amélioration des propriétés texturales et structurales des sols en place et le confort des travaux agricoles des exploitants.

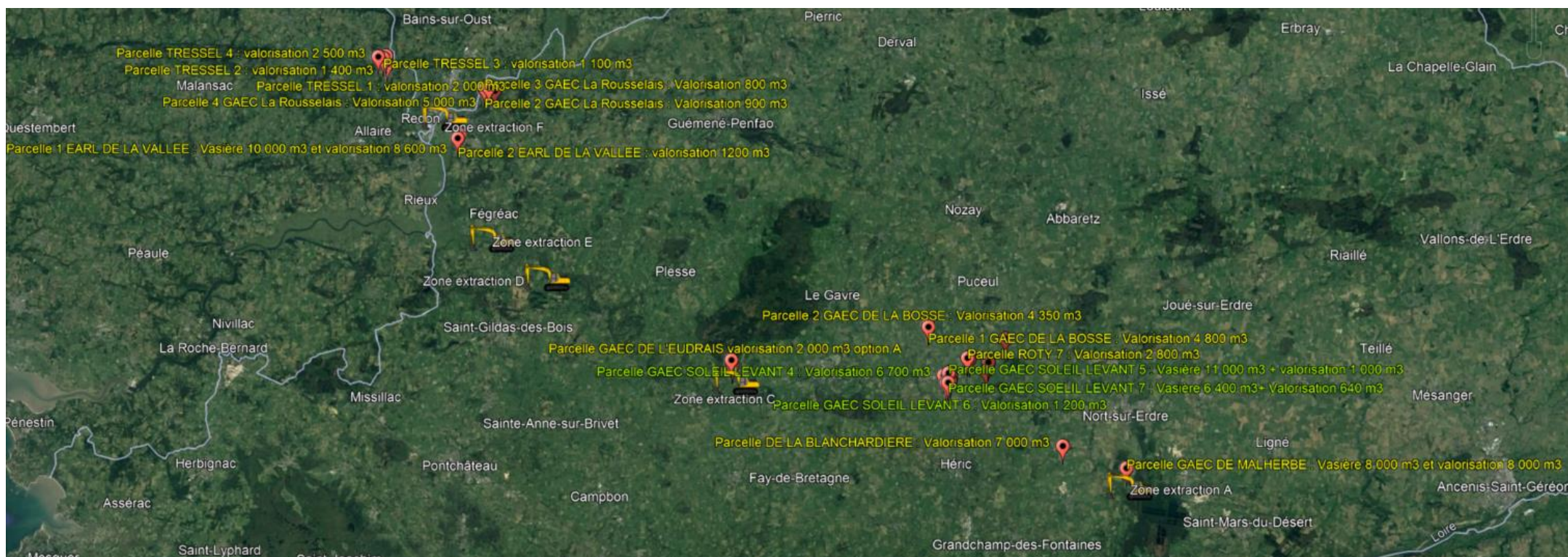


FIGURE 44 : PARCELLES AGRICOLES (ROUGE) IDENTIFIEES A MOINS DE 10 KM DU CANAL ET PRESENTANT UN INTERET POUR LA VALORISATION AGRONOMIQUE DES SEDIMENTS

Ce PAC détaille en particulier les solutions de valorisation pour les deux premières années du plan de gestion relatif à l'opération de curage du canal.

Deux parcelles ont été identifiées pour servir de site de ressuyage. Elles sont situées à moins de 1 km du canal (figure 45) sur la commune de Saffré avec une capacité de stockage estimée à 17 400m³ par an. Elles pourront desservir plusieurs parcelles de valorisation définitive à proximité, réparties sur les communes de Saffré, de La Chevallerais et de Héric pour une surface cumulée de 50ha soit 50 000m³.

Ces parcelles seraient en mesure d'absorber les volumes des biefs 3 à 12 (33 758 m³) soit plus de 70% du volume total de l'opération. Une solution de vasière et de valorisation existe pour le bief 3 en bordure de canal à Sucé sur Erdre. Les volumes du bief 3 (8 528m³) ont donc été retranchées, les vasières de Saffré accueilleront les sédiments des biefs 4 à 12 soit 25 230m³ (55% du volume total).

Si l'on considère une capacité de curage d'un peu plus de 10 000m³ par an alors ces sites pourront permettre de valoriser ce volume de 25 230m³ sur les deux premières années.

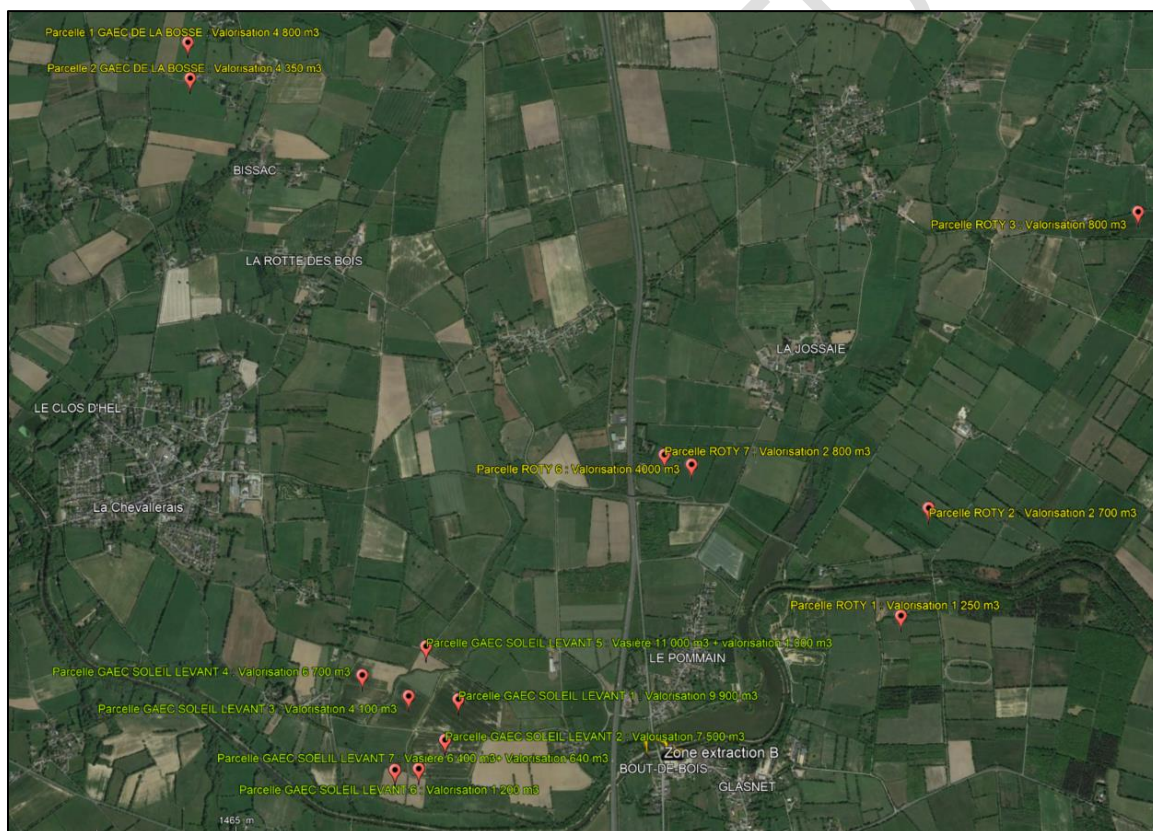


FIGURE 45 : ZONES DE VALORISATIONS DES 2 PREMIERES ANNEES

Ces parcelles sont également très proches du canal et permettent donc de limiter le transport routier de sédiments, favorisant au maximum l'économie circulaire de la valorisation et limitant l'empreinte carbone du chantier.

1. Caractéristiques générales des zones concernées par la valorisation des sédiments sur les 2 premières années

i. GAEC DU SOLEIL LEVANT

L'exploitant des parcelles au sein desquelles les sédiments pourraient être ressuyés et valorisés à hauteur de 31 040m³ est M. LEROUX (GAEC SOLEIL LEVANT). Ces parcelles sont situées en zone agricole sur la commune de Saffré et de La Chevallerai. La surface disponible pour l'apport est d'environ 30 ha (figure 46). Elles sont à dominante sableuse, les sols sont de faibles épaisseurs sur un horizon sous-jacent très caillouteux. Les parcelles sont donc séchantes et de faible potentiel agronomique.



FIGURE 46 : LOCALISATION DE LA SURFACE DISPONIBLE POUR L'APPORT DE SEDIMENTS SUR LES PARCELLES EN CONTOUR BLEU ET LES ZONES DE STOCKAGE EN BLEU (SOURCE : GEOPORTAIL).

La pédologie locale est composée majoritairement de sols de type luvisol, ce sont des sols de plateaux et de pentes faibles développés dans des limons des plateaux, en bocage peu dense, limon sableux, épais, lessivés, hydromorphes et naturellement acides (Figure).

Le Luvisol compose les sols des futures parcelles réceptrices (figure 47), qui sont donc à faible potentiel agronomique au vu de leur caractère sableux et peu évolué.

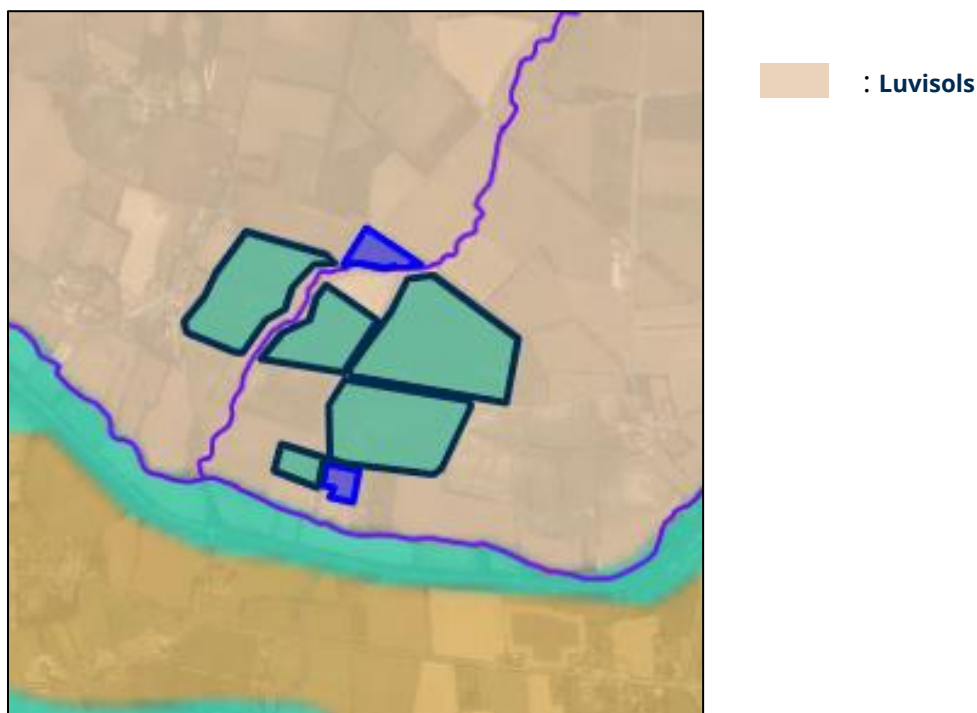


FIGURE 47 : CARTE DES SOLS SUR LA COMMUNE DE SAFFRE ET DE LA CHEVALLERAI SUR LES PARCELLES RECEPTRICES (SOURCE : GEOPORTAIL).

Les sondages réalisés à la tarière manuelle (figures 58 à 63) ont confirmé la texture sableuse attendue des sols en place sur ces parcelles. L'apport de sédiments de texture limono-argilo-sableuse et riche en matière organique est particulièrement intéressant pour venir corriger la CEC et augmenter la capacité de rétention en eau et éléments nutritifs des sols. Cette épaisseur de 10cm supplémentaire permettra d'améliorer la capacité de filtration des eaux et limitera le lessivage des sols.

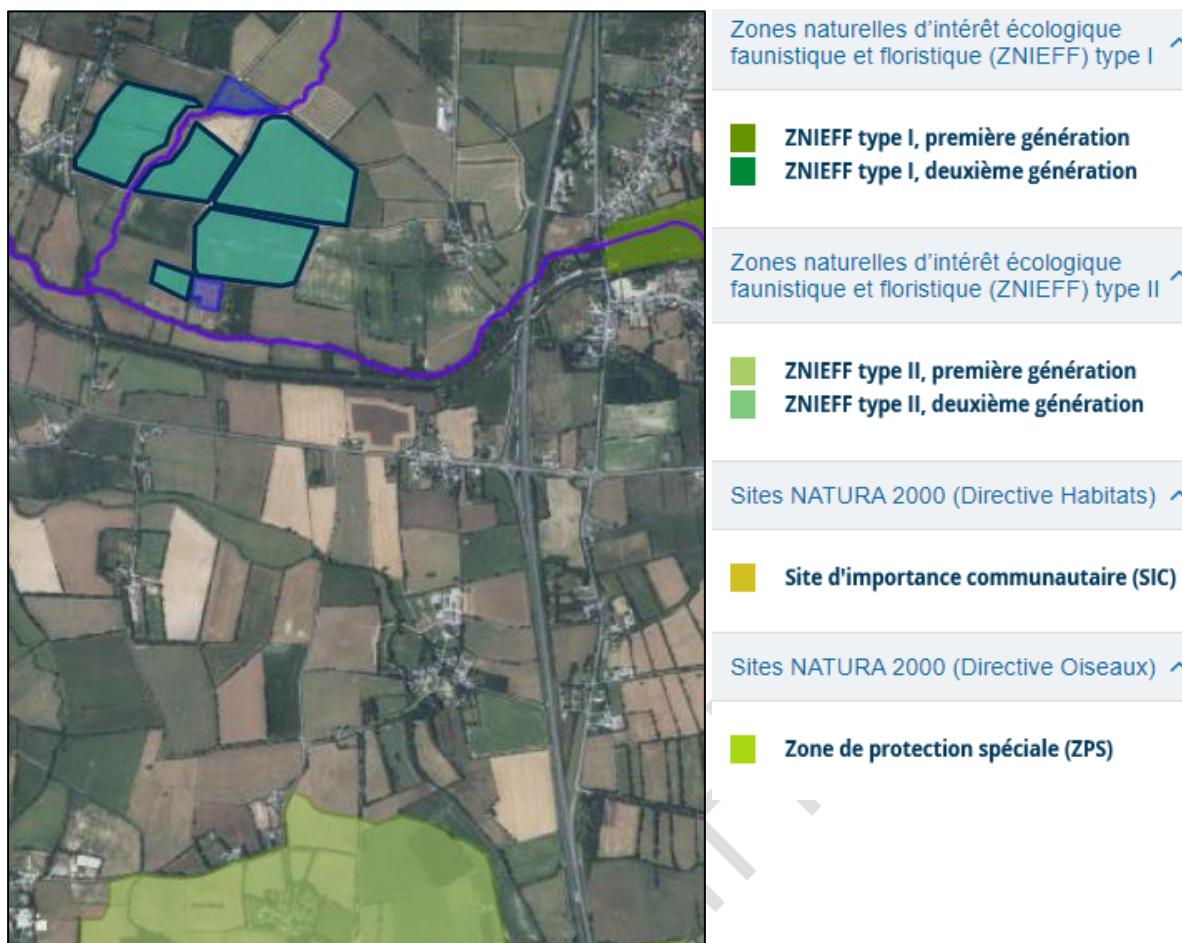


FIGURE 48 : ZONES NATURELLES PROTEGEES (ZNIEFF I ET II, NATURA 2000 DIRECTIVE OISEAUX ET DIRECTIVE HABITATS) IDENTIFIEES A PROXIMITE DES PARCELLES (SOURCE : GEOPORTAIL).

La commune de Safré est concernée par une ZNIEFF de type I L'Etang de Bout de Bois. Cette zone est située à plus de 2km.

Les zones naturelles sont éloignées des parcelles d'apport des sédiments qui seront issus des travaux de dragage sur les communes de Safré et de La Chevallerai (figure 48).

Bien que non répertoriée comme zone humide avérée, les données du Réseau Zone Humide indique que la probabilité de présence de zones humides sur les parcelles concernées par l'apport est assez forte voir très forte pour les deux parcelles les plus au sud (figure 49). En application des articles L. 211-1-1 et R214-1 du Code de l'Environnement, la valorisation de terres sur ces zones nécessite l'établissement d'un dossier Loi sur l'Eau et est proscrite sans compensation. Un diagnostic zone humide a donc été réalisé par Terra Innova sur le site selon les critères imposés par l'article R211-108 du Code de l'Environnement. Le diagnostic s'est révélé négatif, les parcelles ne sont donc pas classées en zone humide.

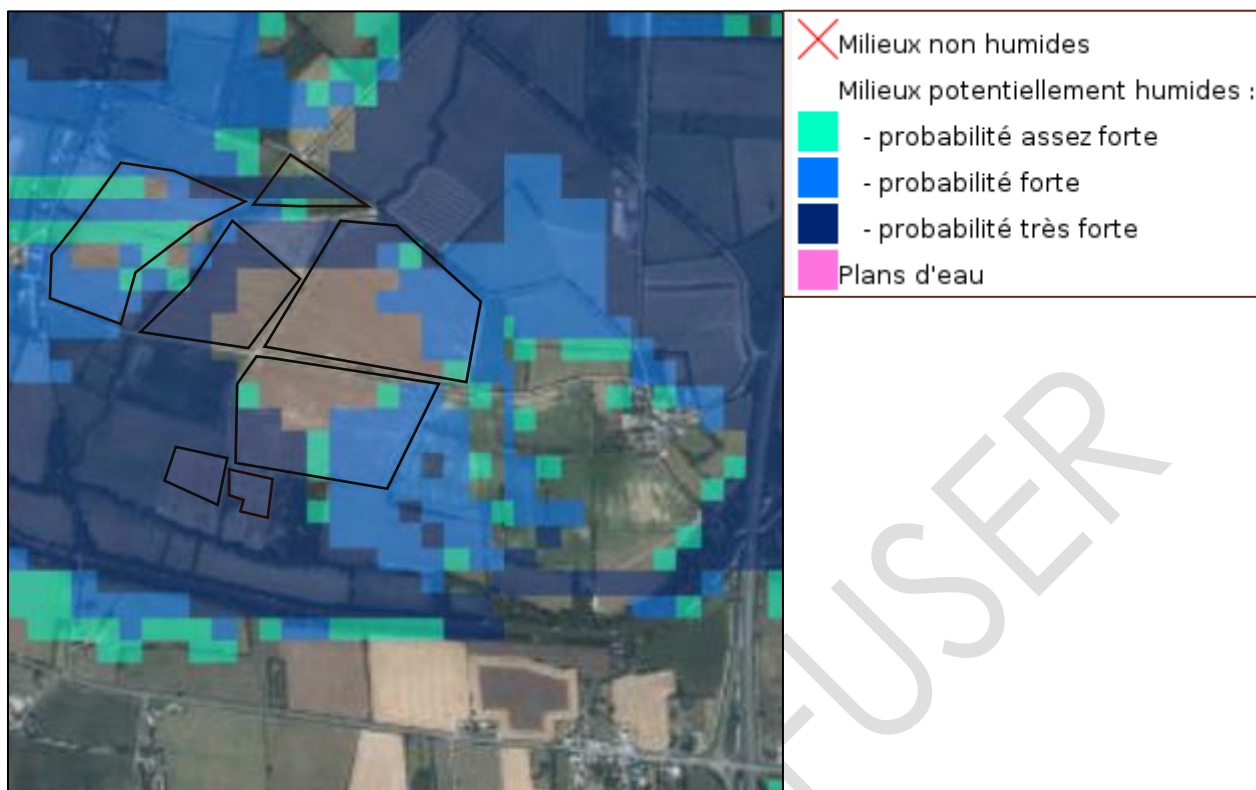


FIGURE 49 : MILIEUX POTENTIELLEMENT HUMIDES IDENTIFIES SUR LA ZONE D'APPORT DES SEDIMENTS (SOURCE : RESEAU ZONES HUMIDES).

L'article R421-23 du Code de l'Urbanisme prévoit que tout affouillement ou exhaussement qui n'entre pas dans le cadre d'un permis de construire doit être soumis à déclaration préalable si, cumulativement :

- La hauteur de l'exhaussement ou la profondeur de l'affouillement excède 2 mètres ;
- L'exhaussement ou l'affouillement porte sur une superficie supérieure ou égale à 100 m².

Le Code de l'Urbanisme est complété à l'échelle communal par les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

Le règlement en vigueur sur la commune de Saffré est caduc car un futur PLUi est en cours de rédaction. Sollicitée, la mairie a confirmé que les parcelles sélectionnées se situeront bien en zone agricole dans le futur PLUi. En zone agricole (zone A), les affouillements et exhaussements du sol liés et nécessaires à l'activité de la zone seront admis.

Le règlement du futur PLUi sur la commune de Saffré ouvre la voie à une valorisation agricole des sédiments issus de l'opération à venir. Idem pour la commune de La Chevallerai. Le projet d'apport a été présenté auprès du service d'urbanisme de la commune de Saffré.

ii. GAEC DU ROTY

L'exploitant des parcelles au sein desquelles les sédiments pourraient être valorisés à hauteur de 11 550m³ est M. CHAUVEL (GAEC DU ROTY). Ces parcelles sont situées en zone agricole sur la commune de Saffré et de Héric. La surface disponible pour l'apport est d'environ 11 ha (figure 50). Les zones de parcelles ciblées sont en déficit de fertilité ou bien séchantes du fait d'une proportion élevée en sable.

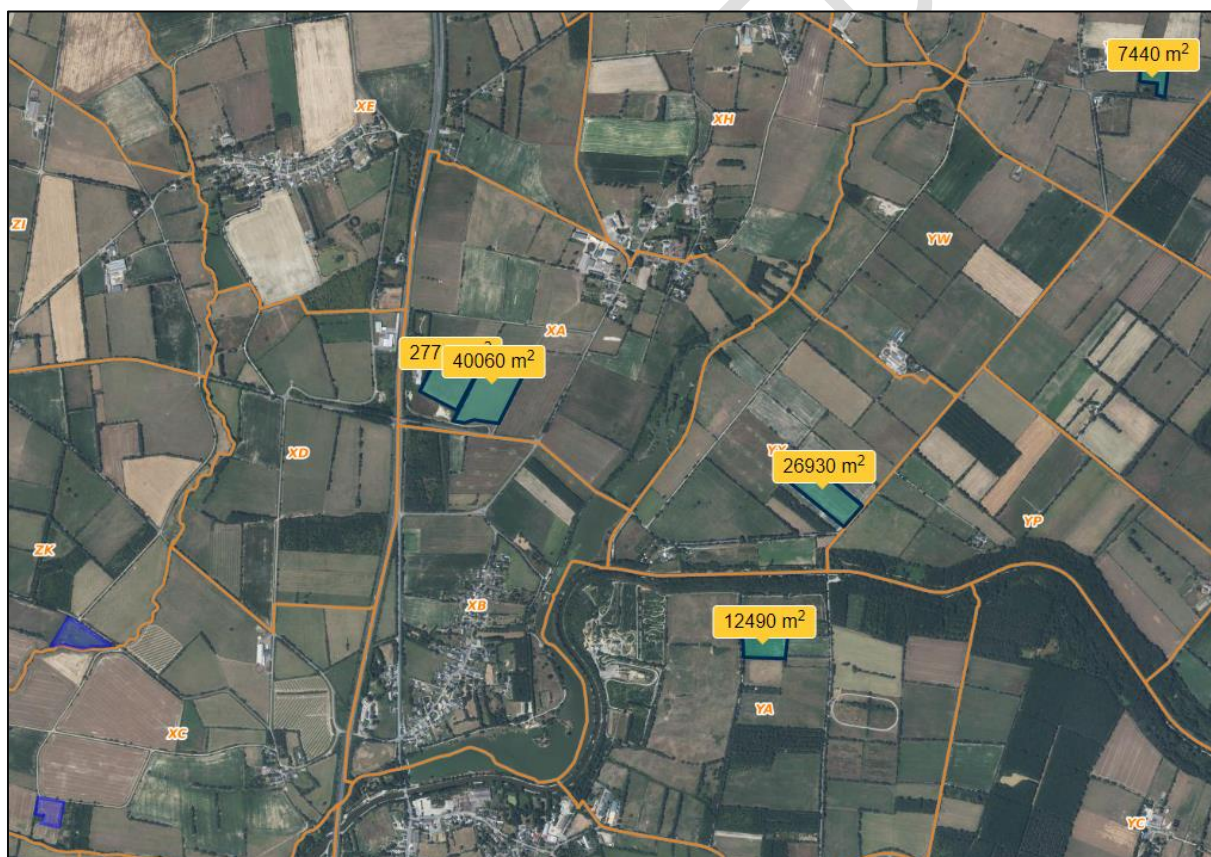


FIGURE 50 : LOCALISATION DE LA SURFACE DISPONIBLE POUR L'APPORT DE SEDIMENTS SUR LES PARCELLES EN CONTOUR BLEU (SOURCE : GEOPORTAIL).

La pédologie locale est majoritairement composée majoritairement de sols de type luvisol, ce sont des sols de plateaux et de pentes faibles développés dans des limons des plateaux, en bocage peu dense, limon sableux, épais, lessivés, hydromorphes et naturellement acides (51). La parcelle située à Héric est de type luvisol-réductiso, sols des plateaux suspendus du sillon de Bretagne, limono-sableux progressivement plus argileux en profondeur.

Le Luvisol compose les sols des futures parcelles réceptrices (figure 51), qui sont donc à faible potentiel agronomique au vu de leur caractère sableux et peu évolué.

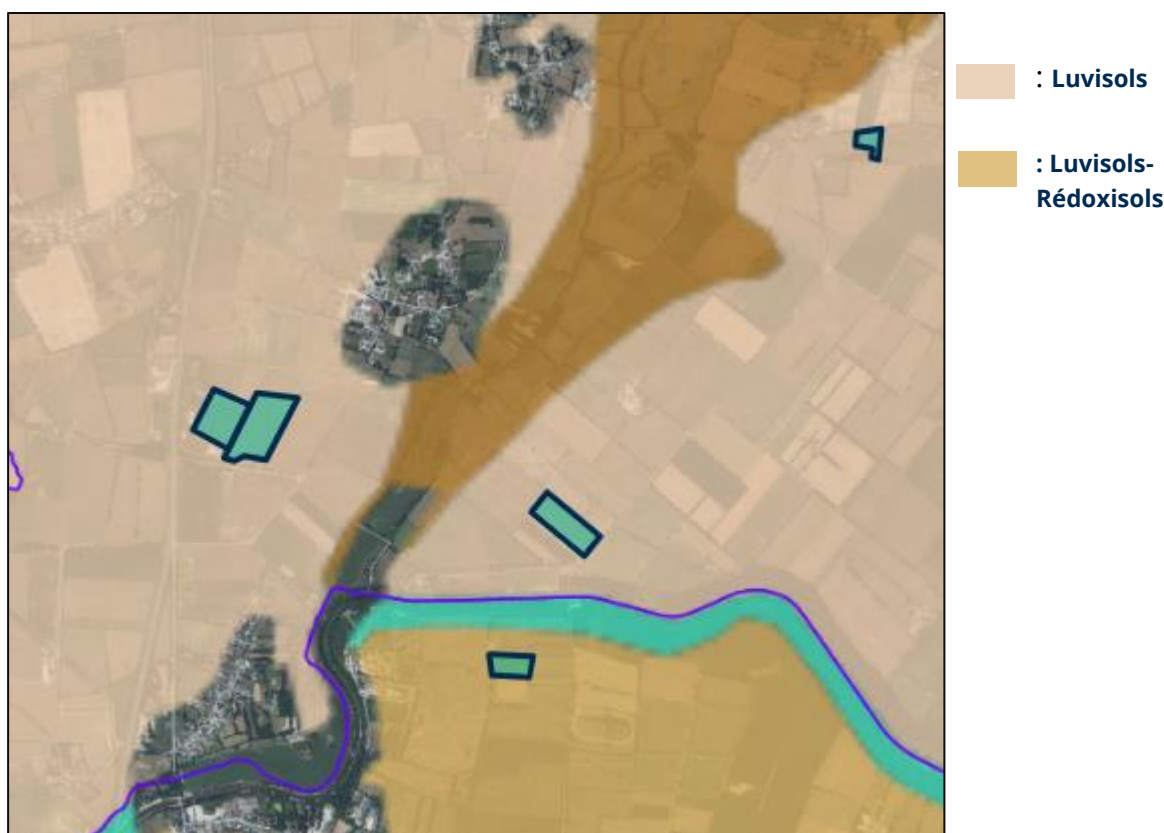


FIGURE 51 : CARTE DES SOLS SUR LA COMMUNE DE SAFFRE ET DE HÉRIC SUR LES PARCELLES RECEPTRICES (SOURCE : GEOPORTAIL).

Les sondages réalisés à la tarière manuelle (figures 64 à 68) ont confirmé la texture sableuse attendue des sols en place sur ces parcelles. L'apport de sédiments de texture limono-argilo-sableuse et riche en matière organique est particulièrement intéressant pour venir corriger la CEC et augmenter la capacité de rétention en eau et éléments nutritifs des sols. Cette épaisseur de 10cm supplémentaire permettra d'améliorer la capacité de filtration des eaux et limitera le lessivage des sols.

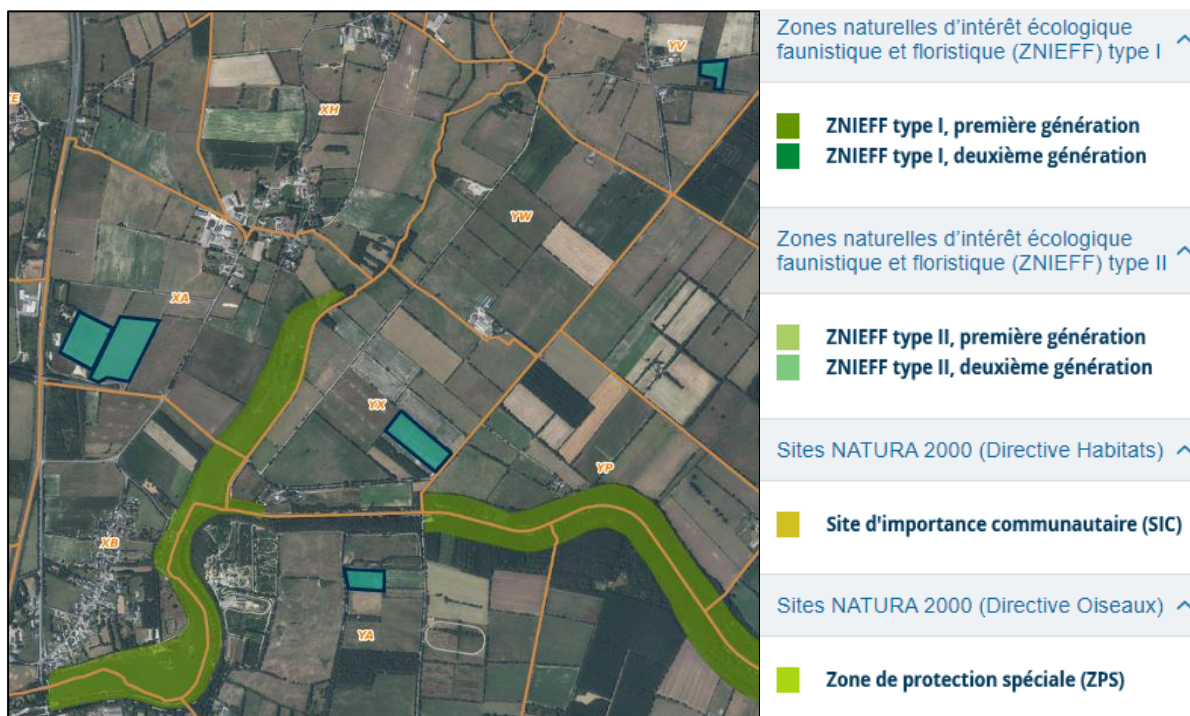


FIGURE 52 : ZONES NATURELLES PROTEGEES (ZNIEFF I ET II, NATURA 2000 DIRECTIVE OISEAUX ET DIRECTIVE HABITATS) IDENTIFIEES A PROXIMITE DES PARCELLES (SOURCE : GEOPORTAIL).

La commune de Saffré et celle de Héric sont concernées par deux ZNIEFF DE TYPE 1, L'Etang de bout de Bois et Les zones voisines du canal de Nantes à Brest à l'ouest du pas d'Héric, les parcelles ne sont pas incluses dans les ZNIEFF.

Les zones naturelles n'englobent pas les parcelles d'apport des sédiments qui seront issus des travaux de dragage sur les communes de Saffré et de Héric (figure 52).

Bien que non répertoriée comme zone humide avérée, les données du Réseau Zone Humide indique que la probabilité de présence de zones humides sur les parcelles concernées par l'apport est assez forte à très (figure 53). En application des articles L. 211-1-1 et R214-1 du Code de l'Environnement, la valorisation de terres sur ces zones nécessite l'établissement d'un dossier Loi sur l'Eau et est proscrite sans compensation. Un diagnostic zone humide a donc été réalisé par Terra Innova sur le site selon les critères imposés par l'article R211-108 du Code de l'Environnement. Le diagnostic s'est révélé négatif, les parcelles ne sont donc pas classées en zone humide.

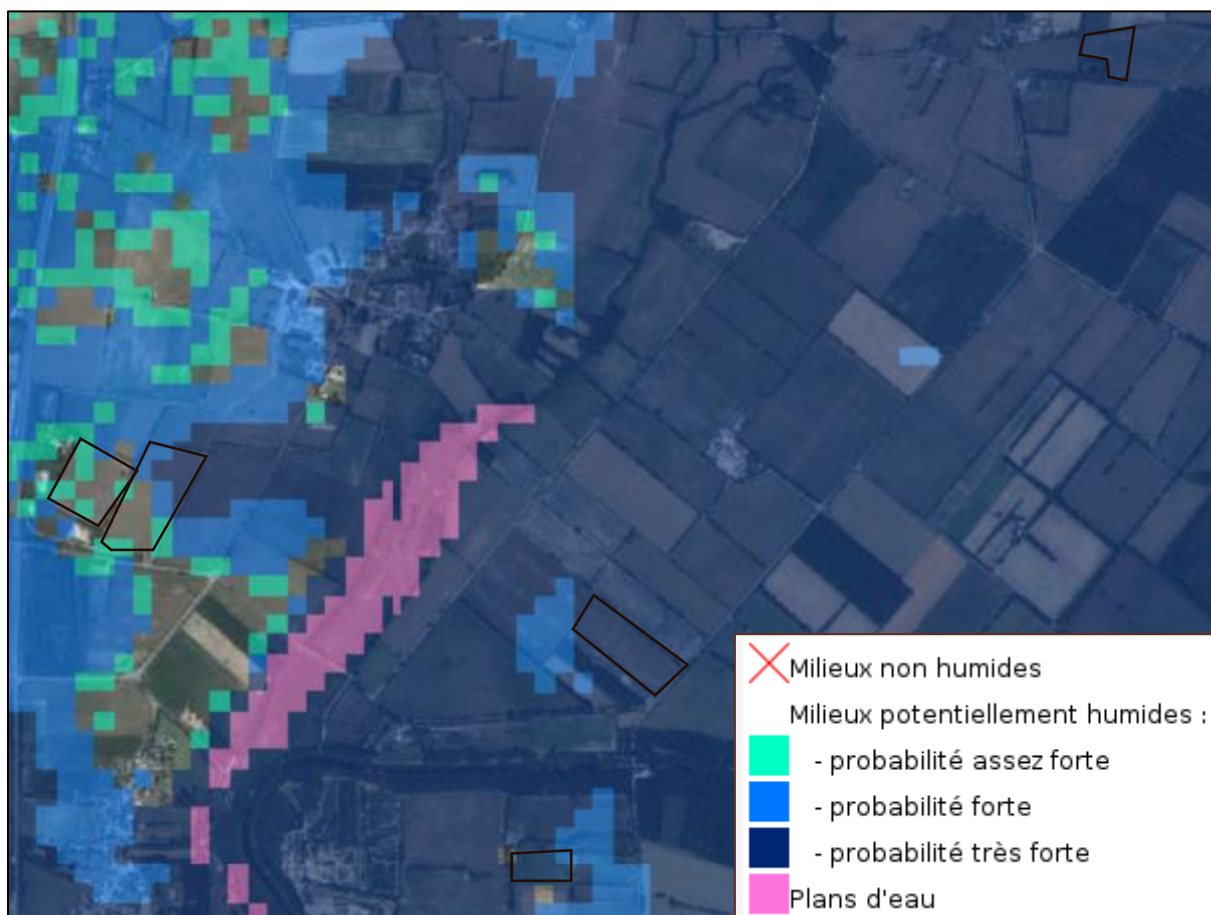


FIGURE 53 : MILIEUX POTENTIELLEMENT HUMIDES IDENTIFIES SUR LA ZONE D'APPORT DES SEDIMENTS (SOURCE : RESEAU ZONES HUMIDES).

L'article R421-23 du Code de l'Urbanisme prévoit que tout affouillement ou exhaussement qui n'entre pas dans le cadre d'un permis de construire doit être soumis à déclaration préalable si, cumulativement :

- La hauteur de l'exhaussement ou la profondeur de l'affouillement excède 2 mètres ;
- L'exhaussement ou l'affouillement porte sur une superficie supérieure ou égale à 100 m².

Le Code de l'Urbanisme est complété à l'échelle communal par les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

Le règlement en vigueur sur la commune de Saffré est caduc car un futur PLUi est en cours de rédaction. Sollicitée, la mairie a confirmé que les parcelles sélectionnées se situeront bien en zone agricole dans le futur PLUi. En zone agricole (zone A), les affouillements et exhaussements du sol liés et nécessaires à l'activité de la zone seront admis. Le règlement en vigueur sur la commune de Héric est le PLUi de Communauté de Communes Erdre et Gesvre, en zone agricole (zone A), les affouillements et exhaussements du sols liés et nécessaires à l'activité de la zone sont autorisés (voir figure 54).

Les affouillements et exhaussements de sol	V*	V*	V*	V*	V*	V*	V*
<p>V*Conditions :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Être liés et nécessaires, soit à l'activité de la zone, soit aux travaux de constructions autorisés, soit aux travaux nécessaires pour la recherche archéologique, ou dans le cas de restauration et création de zones humides. 							

FIGURE 54 : EXTRAIT DU PLUI DE COMMUNAUTE DE COMMUNES ERDRE ET GESVRE EN ZONE AGRICOLE

Le règlement du futur PLUi sur la commune de Saffré et du PLUi de Communauté de Communes Erdre et Gesvre ouvrent la voie à une valorisation agricole des sédiments issus de l'opération à venir. Le projet d'apport a été présenté auprès du service d'urbanisme de la commune de Saffré.

iii. GAEC DE LA BOSSE

L'exploitant des parcelles au sein desquelles les sédiments pourraient être valorisés à hauteur de 9 150m³ est M. LEMAITRE (GAEC DE LA BOSSE). Ces parcelles sont situées en zone agricole sur la commune de La Chevallerais. La surface disponible pour l'apport est d'environ 9 ha (figure 55).

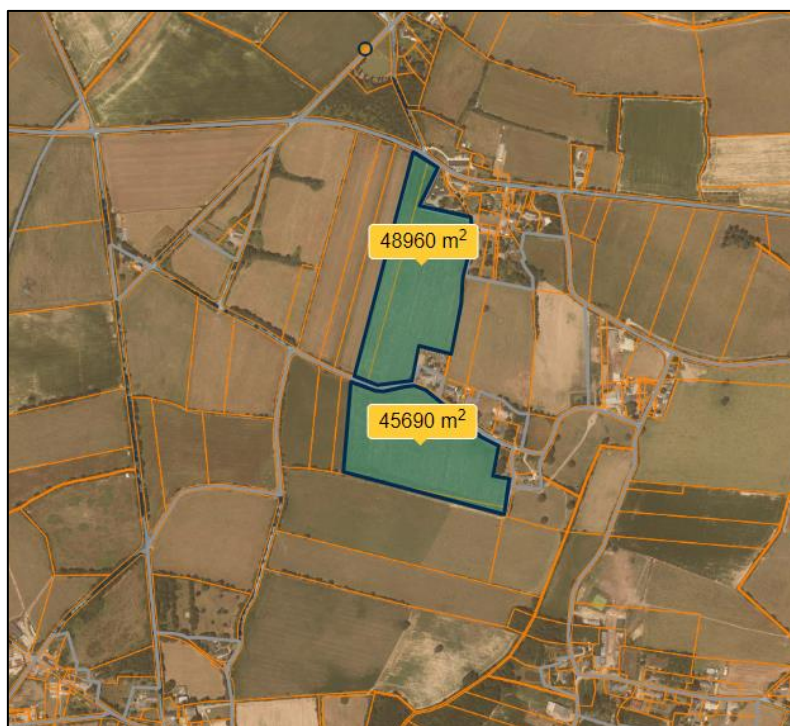


FIGURE 55 : LOCALISATION DE LA SURFACE DISPONIBLE POUR L'APPORT DE SEDIMENTS SUR LES PARCELLES EN CONTOUR BLEU (SOURCE : GEOPORTAIL).

La pédologie locale est majoritairement composée majoritairement de sols de type luvisol, ce sont des sols de plateaux et de pentes faibles développés dans des limons des plateaux, en bocage peu dense, limon sableux, épais, lessivés, hydromorphes et naturellement acides (56). Les sols sont aussi en partie de type brunisol, sols des buttes, plateaux et légères dépressions, issus de placages sablo-argileux du pliocène, cultivés, très épais, sableux, souvent lessivés et hydromorphes.

Le Luvisol compose les sols des futures parcelles réceptrices (figure 56), qui sont donc à faible potentiel agronomique au vu de leur caractère sableux et peu évolué.

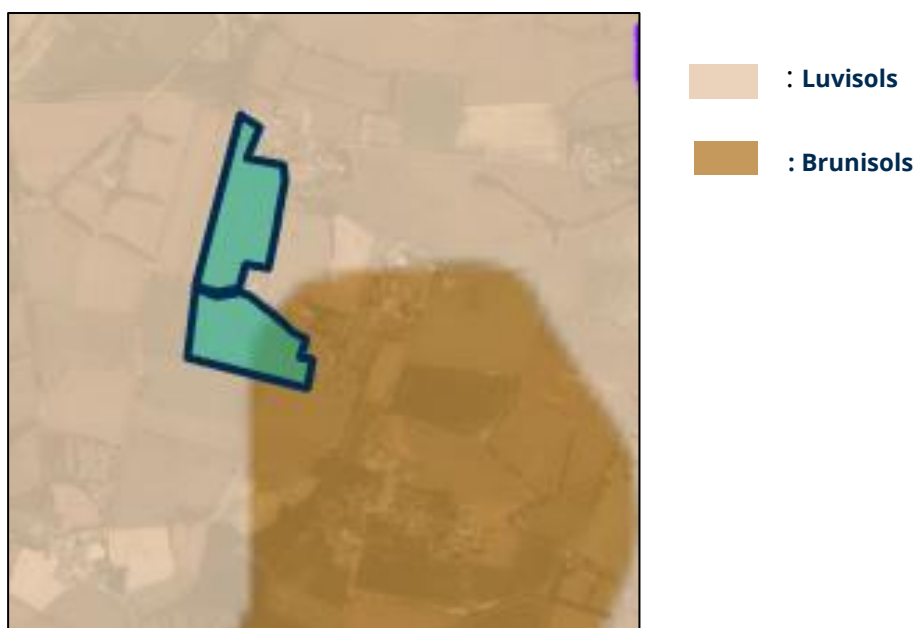


FIGURE 56 : CARTE DES SOLS SUR LA COMMUNE DE LA CHEVALLERAI SUR LES PARCELLES RECEPTRICES (SOURCE : GEOPORTAIL).

Les sondages réalisés à la tarière manuelle (figures 69 et 70) ont confirmé la texture sableuse attendue des sols en place sur ces parcelles. L'apport de sédiments de texture limono-argilo-sableuse et riche en matière organique est particulièrement intéressant pour venir corriger la CEC et augmenter la capacité de rétention en eau et éléments nutritifs des sols. Cette épaisseur de 10cm supplémentaire permettra d'améliorer la capacité de filtration des eaux et limitera le lessivage des sols.

La commune de La Chevallerais n'est pas concernée par des zones naturelles protégées : Zones Naturelles d'Intérêt Faunistique et Floristique (ZNIEFF) de type I et II, zones Natura 2000 selon les Directives Oiseaux et Habitats.

*Les zones naturelles sont éloignées des parcelles d'apport des
sédiments qui seront issus des travaux de dragage sur les
communes de La Chevallerais.*

Bien que non répertoriée comme zone humide avérée, les données du Réseau Zone Humide indique que la probabilité de présence de zones humides sur les parcelles concernées par l'apport est assez forte à forte pour la parcelle au nord et nulle à assez forte pour la parcelle au sud (figure 57). En application des articles L. 211-1-1 et R214-1 du Code de l'Environnement, la valorisation de terres sur ces zones nécessite l'établissement d'un dossier Loi sur l'Eau et est proscrite sans compensation. Un diagnostic zone humide a donc été réalisé par Terra Innova sur le site selon les critères imposés par l'article R211-108 du Code de l'Environnement. Le diagnostic s'est révélé négatif, les parcelles ne sont donc pas classées en zone humide.

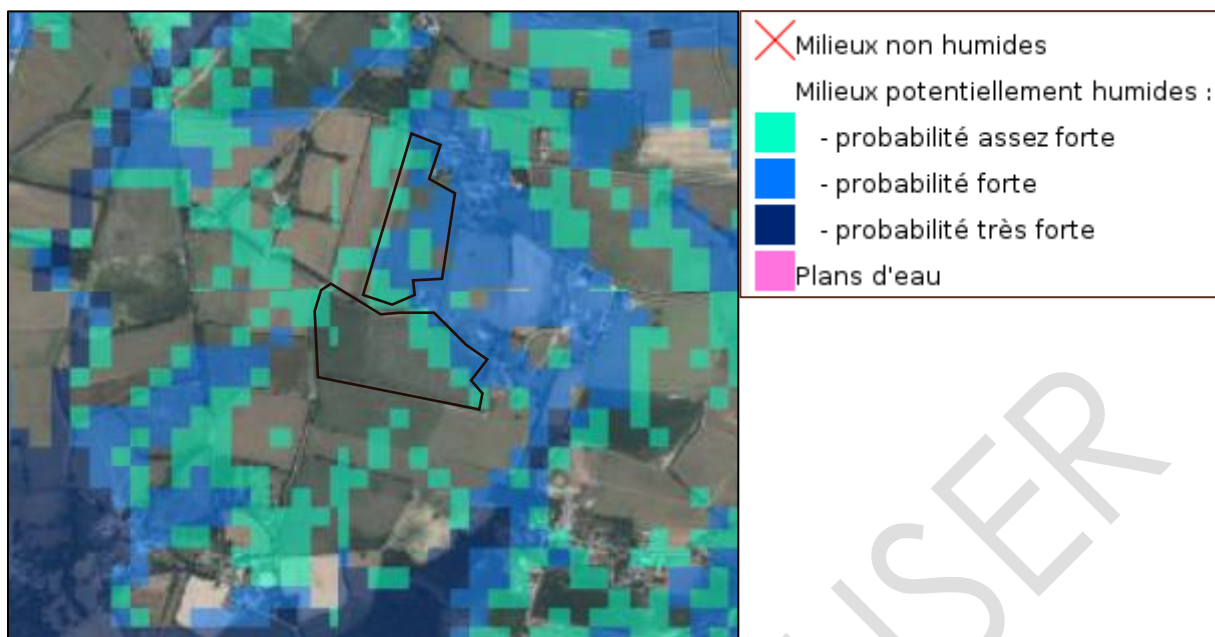


FIGURE 57 : MILIEUX POTENTIELLEMENT HUMIDES IDENTIFIES SUR LA ZONE D'APPORT DES SEDIMENTS (SOURCE : RESEAU ZONES HUMIDES).

L'article R421-23 du Code de l'Urbanisme prévoit que tout affouillement ou exhaussement qui n'entre pas dans le cadre d'un permis de construire doit être soumis à déclaration préalable si, cumulativement :

- La hauteur de l'exhaussement ou la profondeur de l'affouillement excède 2 mètres ;
- L'exhaussement ou l'affouillement porte sur une superficie supérieure ou égale à 100 m².

Le Code de l'Urbanisme est complété à l'échelle communal par les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU).

Le règlement en vigueur sur la commune de La Chevallerai est le PLU de La Chevallerai. En zone agricole les affouillements et exhaussements du sol ne sont pas interdits.

*Le règlement du PLU sur la commune de La Chevallerai ouvre la
voie à une valorisation agricole des sédiments issus de l'opération à
venir.*

2. Observations réalisées sur sites par Terra Innova

Dans le cadre de la valorisation des sédiments sur la parcelle identifiée, des caractérisations ont été réalisées directement sur sites par Rémi MAHE, ingénieur agronome de Terra Innova, formé à la détection des zones humides.

i. Sondages GAEC DU SOLEIL LEVANT

Quatre sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 1 du GAEC DU SOLEIL LEVANT (figure 58).



**FIGURE 58 : SONDAGES REALISES PARCELLE 1 GAEC SOLEIL LEVANT, XC0018 A XC0020
SAFFRE.**

Cinq sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 2 du GAEC DU SOLEIL LEVANT (figure 59).



**FIGURE 59 : SONDAGES REALISES PARCELLE 2 GAEC SOLEIL LEVANT, XC0021 A XC0025
SAFFRE.**

Trois sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 3 du GAEC DU SOLEIL LEVANT (figure 60).



FIGURE 60 : SONDAGES REALISES PARCELLE 3 GAEC SOLEIL LEVANT, XC0005 ET XC0006 SAFFRE.

Cinq sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 4 du GAEC DU SOLEIL LEVANT (figure 61).





FIGURE 61 : SONDAGES REALISES PARCELLE 4 GAEC SOLEIL LEVANT, ZK0087, ZK0088 ET ZK0055 LA CHEVALLERAI.

Trois sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 5 du GAEC DU SOLEIL LEVANT (figure 62).



FIGURE 62 : SONDAGES REALISES PARCELLE 5 GAEC SOLEIL LEVANT, ZK0053 ET ZK0054 LA CHEVALLERAI.

Deux sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 6 et un sur la parcelle 7 du GAEC DU SOLEIL LEVANT (figure 63).



FIGURE 63 : SONDAGES REALISES PARCELLE 6 ET 7 GAEC SOLEIL LEVANT XC0016, XC0026 ET XC0027 SAFFRE.

ii. Sondages GAEC DU ROTY

Deux sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 1 du GAEC DU ROTY (figure 64).





FIGURE 64 : SONDAGES REALISES PARCELLE 1 GAEC DU ROTY YA0039 ET YA0040 HERIC.

Deux sondages ont été réalisés sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 2 du GAEC DU ROTY (figure 65).



FIGURE 65 : SONDAGES REALISES PARCELLE 2 GAEC DU ROTY YX0037 SAFFRE.

Un sondage a été réalisé sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 3 du GAEC DU ROTY (figure 66).



FIGURE 66 : SONDAGE REALISE PARCELLE 3 GAEC DU ROTY YV0058 SAFFRE.

Un sondage a été réalisé sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 6 du GAEC DU ROTY dans la zone à probabilité très forte de présence de zone humide (figure 67).

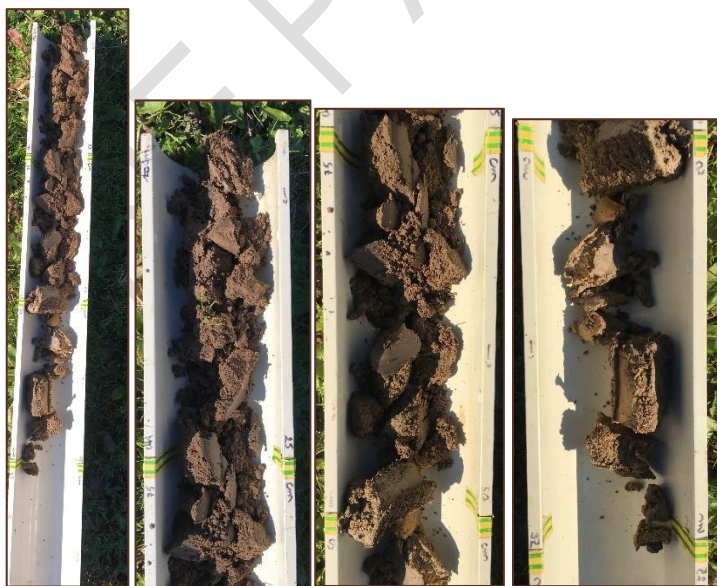


FIGURE 67 : SONDAGE REALISE PARCELLE 6 GAEC DU ROTY XA0077 SAFFRE.

Un sondage a été réalisé sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 7 du GAEC DU ROTY dans la zone à probabilité assez forte de présence de zone humide (figure 68).



FIGURE 68 : SONDAGE REALISE PARCELLE 7 GAEC DU ROTY XA0080 SAFFRE.

iii. Sondages GAEC DE LA BOSSE

Un sondage a été réalisé sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 1 du GAEC DE LA BOSSE dans la zone à probabilité forte de présence de zone humide (figure 69).



FIGURE 69 : SONDAGE REALISE PARCELLE 1 GAEC DDE LA BOSSE ZB0008 ET ZB0038 LA CHEVALLERAI

Un sondage a été réalisé sur l'emprise de la superficie relative à la future zone d'apport de la Parcelle 2 du GAEC DE LA BOSSE dans la zone à probabilité assez forte de présence de zone humide (figure 70).



FIGURE 70 : SONDAGE REALISE PARCELLE 2 GAEC DDE LA BOSSE ZE0010 LA CHEVALLERAI.

L'arrêté interministériel du 24 juin 2008 modifié par l'arrêté du 1^{er} octobre 2009, dans son article 1^{er}, précise les critères de définition et de délimitation des zones humides, en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du Code de l'Environnement. La note technique du 26 juin 2017 du ministère de la transition énergétique et solidaire, précise la notion de "végétation" inscrite à l'article L.211-1 du Code de l'Environnement, à la suite de la lecture des critères de caractérisation des zones humides faite par le Conseil d'État dans sa décision du 22 février 2017.

Ainsi, deux cas peuvent se présenter :

Cas 1 : En présence d'une végétation spontanée, une zone humide est caractérisée, conformément aux dispositions législative et réglementaire interprétées par l'arrêt précité du Conseil d'État, à la fois si les sols présentent

- les caractéristiques de telles zones (habituellement inondés ou gorgés d'eau), et si sont présentes, pendant au moins une partie de l'année, des plantes hygrophiles. Il convient, pour vérifier si ce double critère est rempli, de se référer aux caractères et méthodes réglementaires mentionnés aux annexes I et II de l'arrêté du 24 juin 2008 ;
- Cas 2 : En l'absence de végétation, liée à des conditions naturelles (certaines vasières, etc.) ou anthropiques (parcelles labourées, etc.), ou en présence d'une végétation dite "non spontanée", une zone humide est caractérisée par

le seul critère pédologique, selon les caractères et méthodes réglementaires mentionnés à l'annexe I de l'arrêté du 24 juin 2008.

*Les sites d'études étant des parcelles cultivées en grande culture
ou en prairie de fauche, la végétation ne peut s'exprimer
naturellement et est donc considérée comme non spontanée.
Ainsi, seul le critère pédologique a été pris en compte pour la
détermination des zones humides.*

L'examen des sols doit ainsi porter prioritairement sur des points dont le nombre, la répartition et la localisation précise dépendent de la taille et de l'hétérogénéité du site, avec un point (un sondage) par secteur homogène du point de vue des conditions mésologiques. Chaque sondage pédologique sur ces points doit être d'une profondeur de l'ordre de 1.20 m dans la mesure du possible

L'hydromorphie des sols est appréciée en référence aux classes du tableau GEPPA (Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée), présenté en Figure 71. L'examen du sondage pédologique vise à vérifier la présence :

- D'horizons histiques (ou tourbeux) débutant à moins de 50 centimètres de la surface du sol et d'une épaisseur d'au moins 50 centimètres ;
- Ou de traits réductiques débutant à moins de 50 centimètres de la surface du sol ;
- Ou de traits rédoxiques débutant à moins de 25 centimètres de la surface du sol et se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur ;
- Ou de traits rédoxiques débutant à moins de 50 centimètres de la surface du sol, se prolongeant ou s'intensifiant en profondeur, et de traits réductiques apparaissant entre 80 et 120 centimètres de profondeur.

Dans les horizons rédoxiques (Horizon g) ou pseudo-gleys, on distingue à la fois des traits d'oxydation du fer (couleur rouille) et des traits de déferriification (grises). Ces horizons caractérisent des sols temporairement engorgés par l'eau. Dans les horizons réductiques (Horizon G) ou gley, à dominante grise, le fer est réparti de manière homogène et est en quasi-permanence sous forme réduite. Ces horizons, très rares, sont caractéristiques d'un engorgement permanent ou quasi-permanent par l'eau.

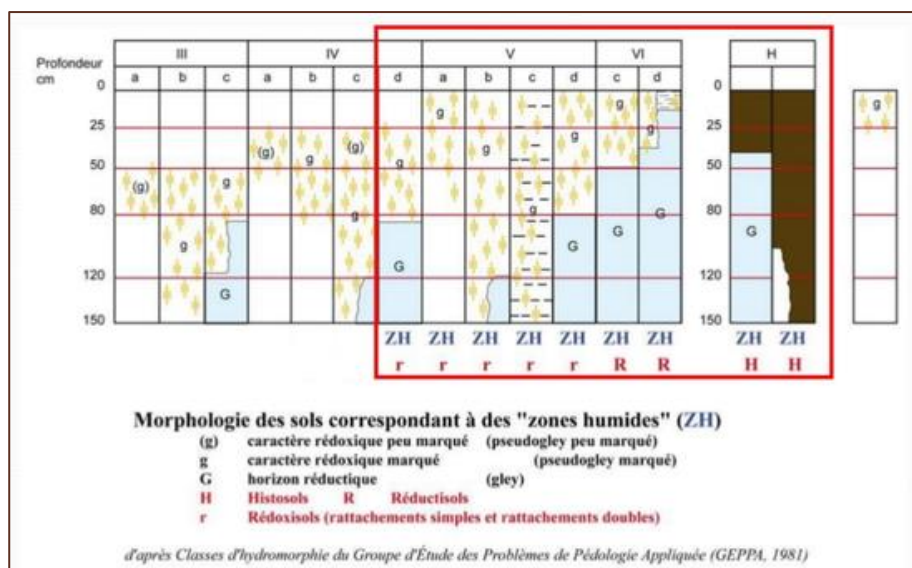


FIGURE 71 : CLASSES D'HYDROMORPHIE D'UN SOL ET MORPHOLOGIE CORRESPONDANT A DES ZONES HUMIDES (SOURCE : GEPPA, 1981)

Suite aux observations réalisées sur le terrain et visibles sur les Figures 58 à 70, aucune trace d'horizon réductique ni de caractère rédoxique sur les 25 premiers cm n'ont été constatés au droit des sondages réalisés.

Les parcelles ayant présentées des sols à caractère rédoxique dès les 25 premiers cm (classe Vb) ont été retirées du projet de valorisation. C'est le cas des parcelles 4, 4bis, 5 et 8 du GAEC DU ROTY, idem pour le bas des parcelles 6 et 7 du GAEC DU SOLEIL LEVANT, situées en zone humide à proximité du canal.

Par conséquent, en accord avec les critères imposés par l'article R211-108 du Code de l'Environnement, les zones d'apport retenues pour la valorisation des sédiments issus des travaux de curage du Canal de Nantes à Brest ne sont pas situées en zone humide.

3. Description de la procédure de mise en œuvre des sédiments sur les parcelles

La procédure de mise en œuvre des sédiments sur les parcelles pourrait être réalisée comme suit :

- Analyses complémentaires menées sur sédiments au cours du ressuyage (évaluation réactivité chimique, analyses pollutions et agronomiques complémentaires, essais de germination/croissance au laboratoire, etc.) et sur les eaux de ressuyage (ETM, CTO, NPK des eaux de ressuyage après filtration des MES).

Dispositifs mis en place pour limiter le lessivage par le ressuyage :

- ETM : maîtrise du pH par chaulage = diminution du risque de solubilisation des métaux
 - N, P : possibilité d'envisager un procédé de phyto-épuration avant rejet dans le canal et végétalisation des bassins de ressuyages avec cultures de type CIPAN (à l'étude).
-
- Valorisation des volumes de sédiments inertes et non pollués (25 230 m³) sur les 2 premières années (2nd semestre 2024 - 1^{er} semestre 2026). Suite aux discussions avec les exploitants des parcelles et à notre retour d'expérience sur la valorisation des sédiments du canal d'Ille et Rance, une première proposition concernant la mise en œuvre des sédiments réessuyés consisterait en un régallage d'une dizaine de cm d'épaisseur sur une surface d'apport d'environ 25 Ha. Un apport de cette épaisseur permettrait l'amélioration des propriétés structurales et texturales du sol, et participerait en particulier à l'augmentation de la réserve utile en eau du sol. La mise en œuvre serait réalisée à l'aide d'engins de type pelle / trax / bulldozer aux étés 2025 et 2026.

Les conventions entre les exploitants (et les différents propriétaires) des parcelles et Terra Innova concernant le projet de valorisation de sédiments sont données en Annexe 3.

Conclusions générales

Ce porter à connaissance a pour objet la justification de l'intérêt agroécologique de la valorisation des sédiments issus des travaux à venir du curage du canal de Nantes à Brest (44).

De nombreuses analyses (physico-chimiques, agronomiques, etc.) ont déjà été réalisées par le bureau d'étude ADEV ainsi que TERRA INNOVA sur des échantillons de sédiments prélevés en 2019 et en 2022. Les conclusions des rapports soulignent le caractère inerte et non-dangereux des échantillons analysés, ce qui représente globalement 50 000 m³ de matériaux potentiellement valorisables. La valorisation agronomique de ces échantillons inertes est également fortement encouragée par les conclusions de l'étude.

Les sédiments inertes sont principalement de classe granulométrique limons argilo sableux fins et possèdent des propriétés éloignées des boues de STEP (teneurs en matière organique, en éléments fertilisants, etc.) et qui se rapprochent d'une terre végétale, selon les spécifications données par la norme Support de Culture NF U44-551. Les teneurs en ETM retrouvées dans les sédiments inertes sont en outre inférieures aux seuils fixés par la norme NF U44-551 et l'arrêté du 01/04/2020 (AGRG2008998A), relatif aux autorisations de mise sur le marché de matières fertilisantes et de supports de culture.

La mise en œuvre de ces sédiments sur parcelle(s) agricole(s) n'est donc pas considérée comme un épandage agricole mais plutôt comme un retour au champ de terre arable au travers d'une reconstitution de sol qui sera mise en œuvre après ressuyage des sédiments durant plusieurs (9 à 12) mois. Un programme d'analyses complémentaires comprenant l'évaluation de la réactivité chimique, des analyses agronomiques et essais en chambre de culture a été réalisé sur les sédiments par Terra Innova. Basé sur les travaux déjà réalisés dans ce domaine, ainsi que des discussions avec le groupe de travail relatif à la valorisation des sédiments en milieu agricole porté par le CEREMA et le BRGM, il a permis de vérifier l'absence d'impact de la valorisation des sédiments sur les sols, les cultures et la nappe phréatique.

Des observations réalisées sur les parcelles ciblées pour l'apport ont permis de valider l'intérêt agronomique de la valorisation au travers de l'amélioration des propriétés texturales et structurales des sols en place et du confort de la mise en place des travaux agricoles par l'exploitant. Ces parcelles présentent en effet des sols de type luvisols ou brunisols qui présentent un faible potentiel agronomique au vu de leur caractère sableux. Les parcelles disposent également d'une surface suffisante pouvant être mises à disposition (17 400 m² annuellement soit plus de 30 000m² sur 2 ans) pour permettre le ressuyage des sédiments inertes en leur sein et sont proches du futur chantier ce qui permettrait de limiter le transport routier de sédiments, favorisant au maximum l'économie circulaire de la valorisation et limitant l'empreinte carbone du chantier. Les parcelles localisées sur les communes de Saffré, de La Chevallerais et de Héric ne sont de plus pas situées au sein d'une zone naturelle protégée, ni en zone humide selon les critères donnés par l'article R211-108 du Code de l'Environnement. Les règlements écrits du futur PLUi de Communauté de Communes de Nozay (mairie

de Saffré), du PLUi Communauté de Commune Erdre et Gesvres et du PLU de La Chevallerais, ouvrent également la voie à une valorisation agricole des sédiments issus de l'opération à venir.

Au vu des problématiques identifiées sur sites, une première proposition de mise en œuvre serait d'apporter les sédiments sur 10 cm d'épaisseur sur des surfaces cumulées d'environ 25 Ha soit l'équivalent nécessaires pour valoriser les sédiments issus des biefs 4 à 12. Ces surfaces sont à choisir parmi 3 exploitants à proximité des vasières envisagées sur la commune de Saffré. Le protocole de mise en œuvre sera définitivement validé suite à l'obtention de l'ensemble des résultats des analyses complémentaires après ressuyage qui seront menées par Terra Innova. Les parcelles seront suivies avant l'apport et durant au moins 3 ans après l'apport des sédiments : l'une des missions principales de Terra Innova est l'accompagnement et le conseil des exploitants vis-à-vis des pratiques culturales et itinéraires techniques à mettre en œuvre suite à la valorisation.

E. Annexes

1. Annexe 1 : Rapport prélèvements et analyses de sédiments ADEV

2. Annexe 2 : Rapport prélèvements et analyses pollution de sédiments TERRA INNOVA + H14

3. Annexe 3 : Rapport prélèvements et analyses agronomiques de sédiments TERRA INNOVA

4. Annexe 4 : Seuils fixés par la norme Support de Culture (NF U44-551)

5. Annexe 5 : Seuils fixés par l'arrêté du 01/04/2020 relatif aux autorisations de mise sur le marché de matières fertilisantes et de supports de culture