



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Adaptation des ouvrages aux défis du changement
climatique et du développement durable

Ouvrages hydrauliques en sols traités

ÉTUDE DU RÉEMPLOI DES MATÉRIAUX LOCAUX POUR
L'ÉTANCHÉITÉ DES BIEFS DU CANAL-SEINE-NORD-EUROPE





cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Étude du réemploi des matériaux locaux pour l'étanchéité des biefs du Canal-Seine-Nord-Europe

G. Potié (SCSNE)

A. Mehenni (Bouygues Construction)

ADAPTATION DES OUVRAGES AUX DÉFIS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DU
DÉVELOPPEMENT DURABLE
JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU CFMS
DU 9 DÉCEMBRE 2021

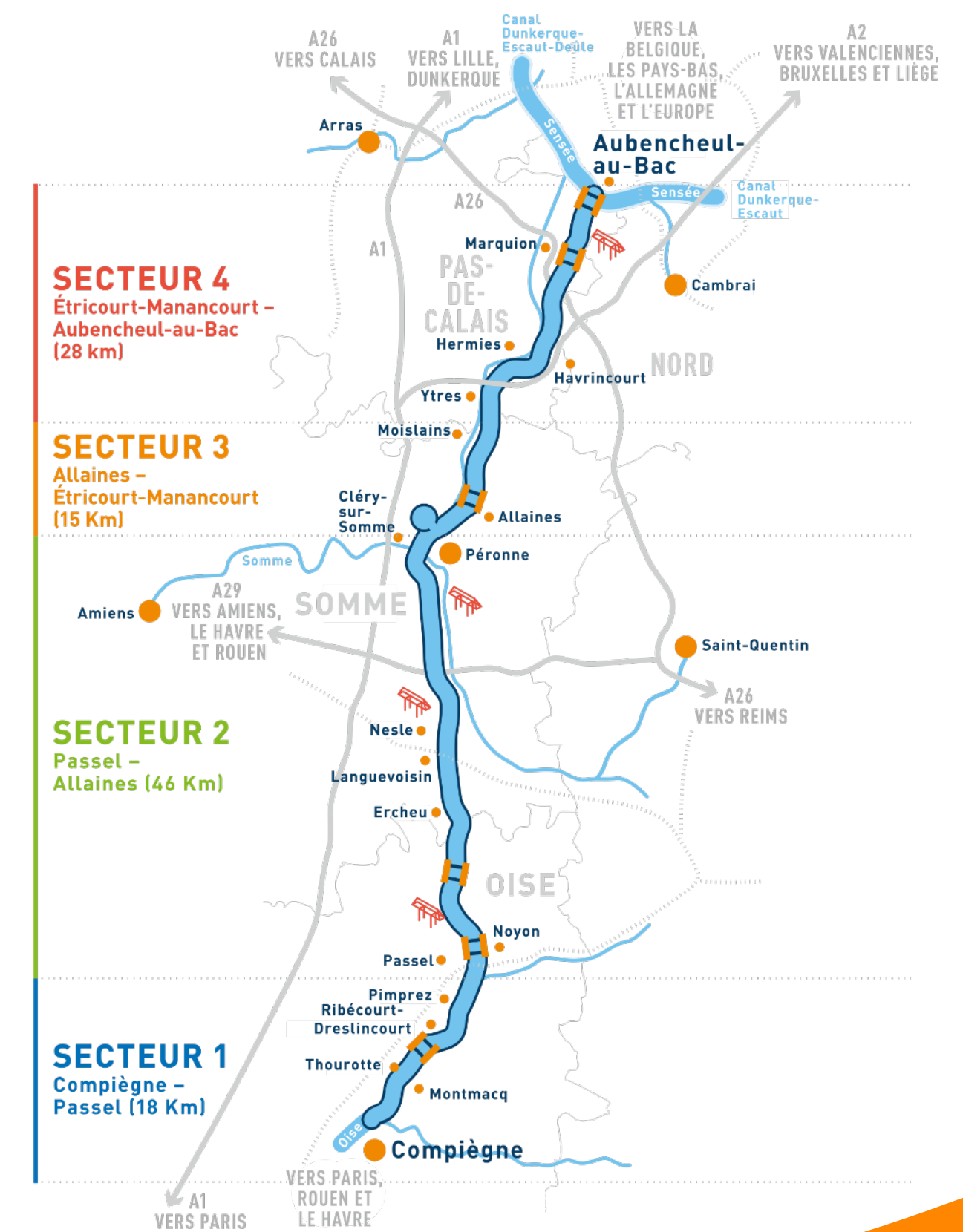
Introduction

Contexte général du projet



1,5 km dans le NORD
26,5 km dans le pas de calais
45 km dans la somme
34 km dans l'OISE

Un réseau de 1100 km réalisé par 4 partenaires



Introduction

Les missions et Principes de la Société du canal Seine-Nord Europe

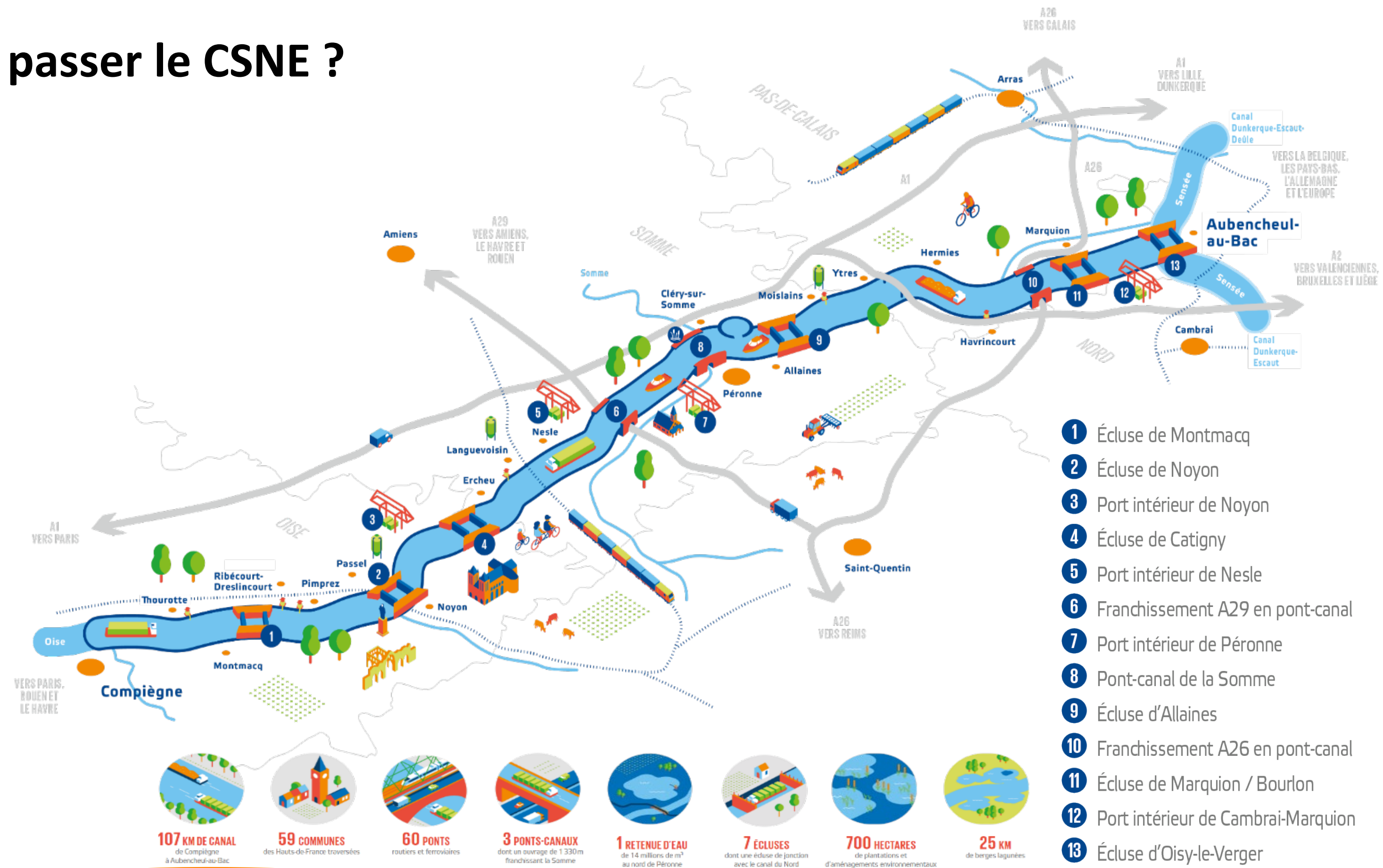
- **Piloter** les études et les concertations avec les parties prenantes
- **Piloter** la préparation des dossiers d'autorisation et la préparation des marchés qui permettront de choisir les entreprises qui réaliseront le canal
- **Encourager** le développement économique lié à cette nouvelle infrastructure
- **Construire** le Canal Seine-Nord Europe

Mais aussi :

- **La sécurité du chantier**
- **L'écoperformance** : performance économique et écologique
- **Le partenariat et la participation**
- **l'innovation**

Introduction

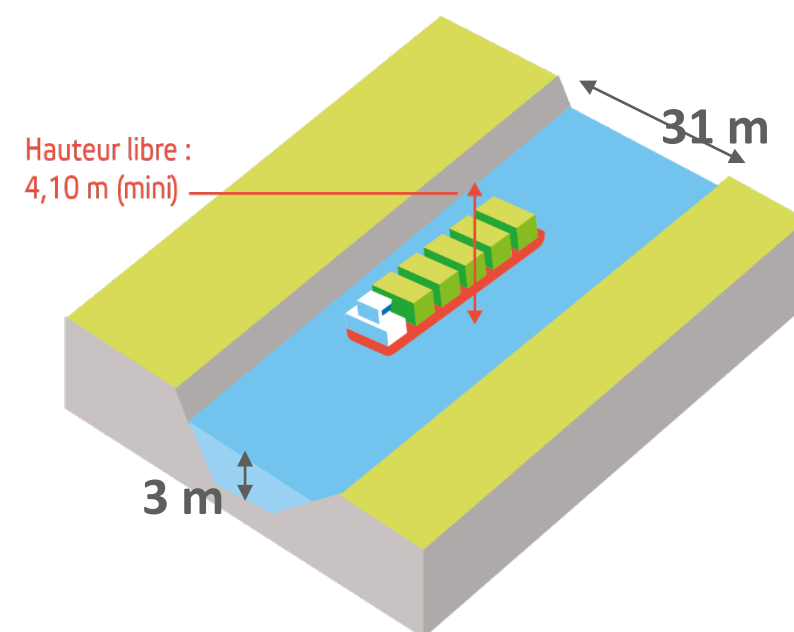
Par où va passer le CSNE ?



Introduction

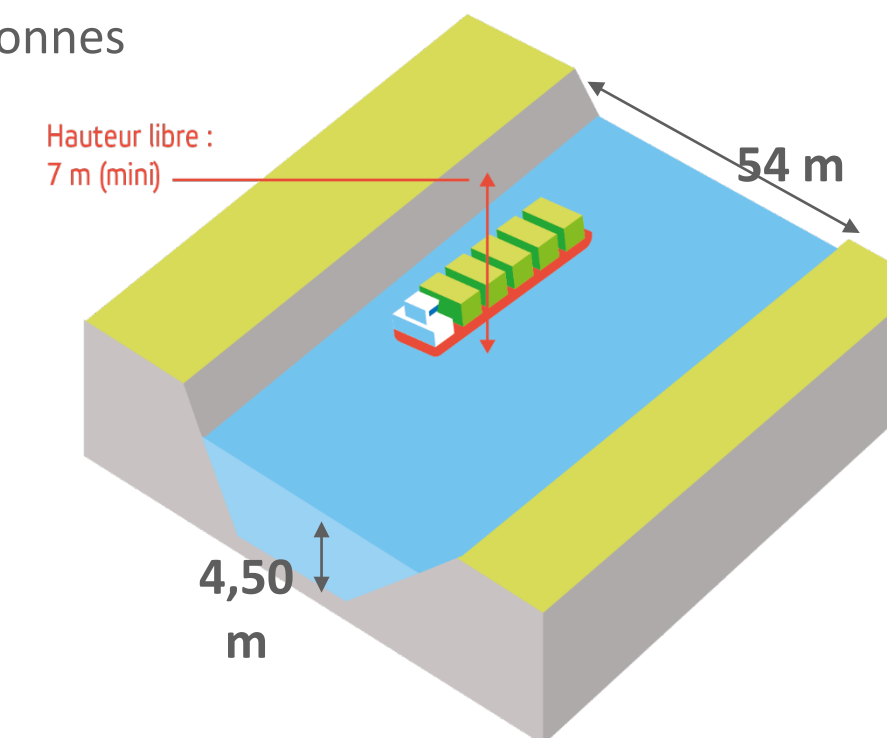
CANAL DU NORD ET CANAL SEINE-NORD EUROPE PROFILS COMPARÉS

Canal du Nord existant :
gabarit 750 tonnes



Gabarit des 19 écluses :
Longueur : 91,6 m
Largeur : 6 m
Hauteur de chute de 3,9 à 6,67 m

Canal Seine-Nord Europe projeté :
gabarit 4 400 tonnes



Gabarit des 6 écluses :
Longueur : 195 m
Largeur : 12,5 m
Hauteur de chute de 6,41 à 25,71 m

Introduction

Objectifs environnementaux

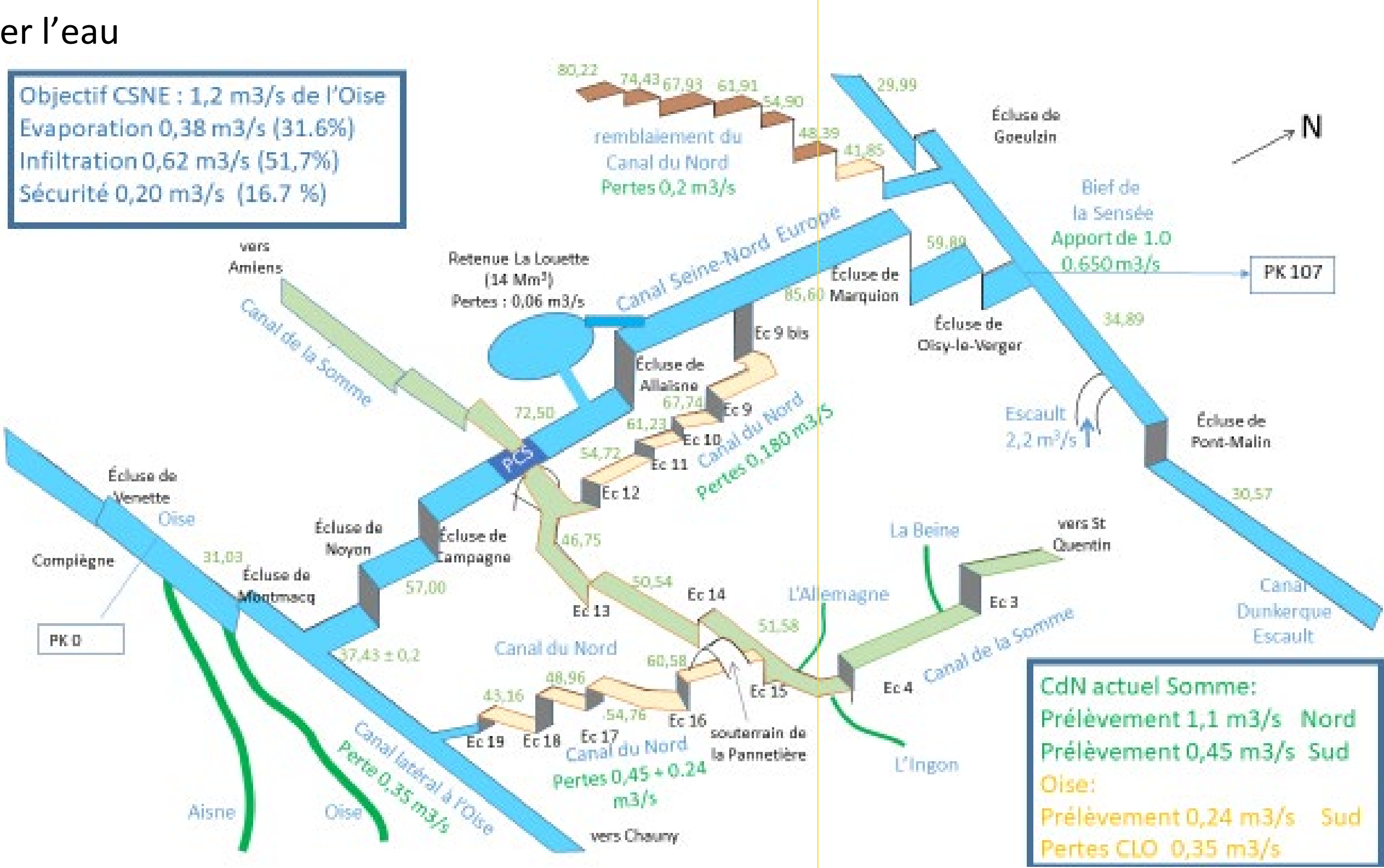
- Préservation de la ressource en eau
- Lutte contre les inondations (Ecrêtement des crues Oise et Somme)
- Création d'un canal vivant (voie douce, zones de compensations)
- Limitation de l'empreinte énergétique du projet (PV, bassins d'épargne,...)
- Contribution du projet à la limitation de l'empreinte carbone (fluvial 2 à 4 fois moins de carburant/ 3 fois moins de CO2 que la route)
- Réutilisation des déblais issus de l'excavation du canal (largement excédentaire 70Mm3 pour 40 Mm3)

Introduction

Objectifs environnementaux du projet

➔ Economiser l'eau

Objectif CSNE : 1,2 m³/s de l'Oise
 Evaporation 0,38 m³/s (31.6%)
 Infiltration 0,62 m³/s (51.7%)
 Sécurité 0,20 m³/s (16.7 %)



CdN actuel Somme:
 Prélèvement 1,1 m³/s Nord
 Prélèvement 0,45 m³/s Sud
 Oise:
 Prélèvement 0,24 m³/s Sud
 Pertes CLO 0,35 m³/s

Volume Canal 26,3 Mm³ Bassin 14 Mm³
 Total 40.3 Mm³
 Prélèvement annuel autorisé: 37,8 Mm³

Introduction

Objectifs environnementaux du projet

- Economiser l'eau

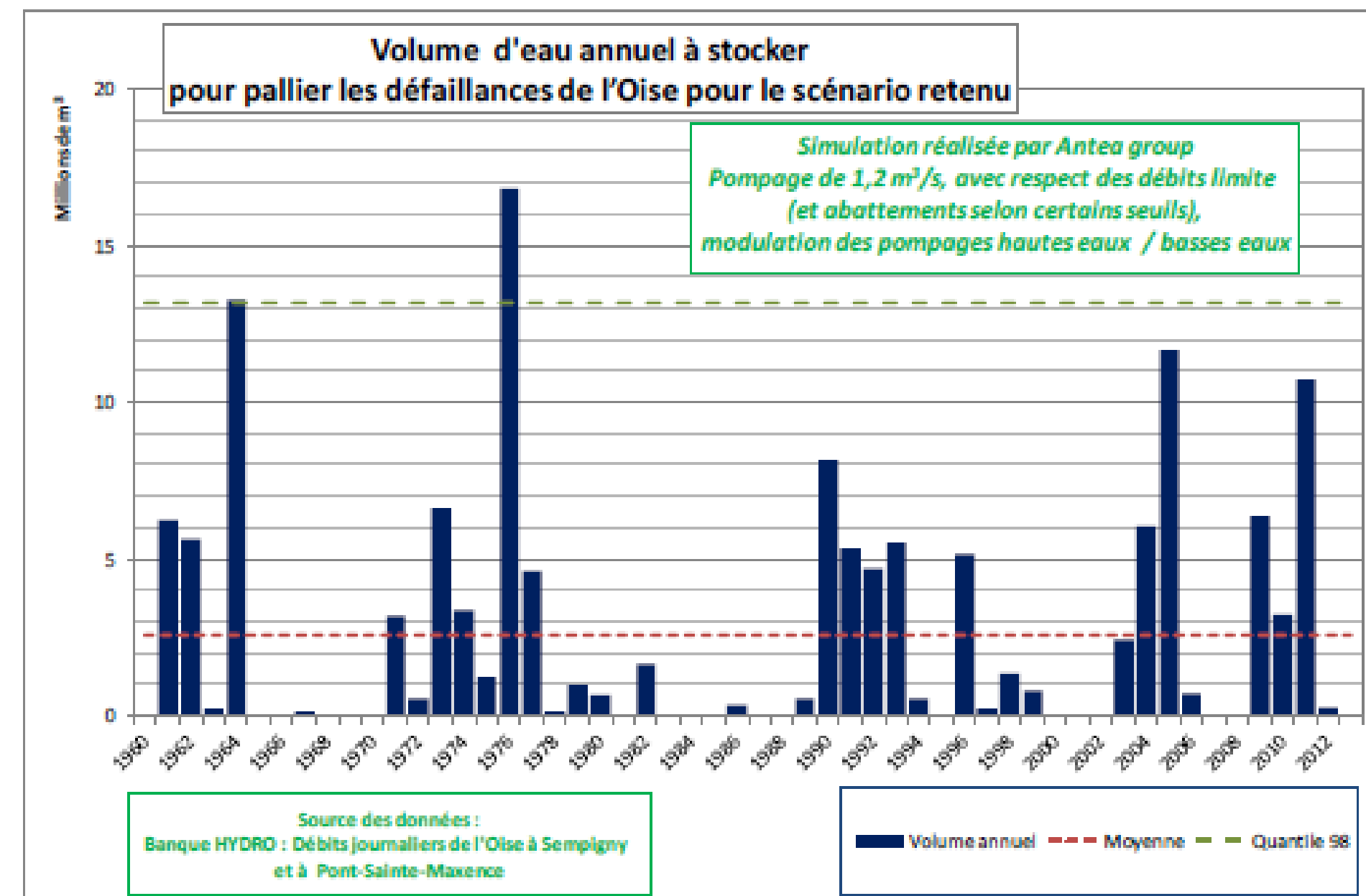


Illustration 9 : Dimensionnement de la retenue de Louette

(Source : Les scénarios de règlement d'eau, Antea Group, 2015)

Introduction

Objectifs du dispositif d'étanchéité

- Réutiliser les matériaux excavés sur le projet (limons A1 et A2) en étanchéité ou en protection (limons A1 et A2 et craie)
- Rechercher une perméabilité de 10-9m/s au niveau des essais (supérieure d'un ordre de 10 à l'objectif)
- Valider la tenue à l'érosion (jets d'hélice, batillage)
- Valider la tenue aux chocs (colis, chute et trainée d'ancres, étrave de péniche)

Marché des planches expérimentales d'étanchéité

Marché SCSNE : Études et essais de perméabilité sur des corrois d'étanchéité

➔ Groupement :



➔ Sous-traitants



MOA	SCSNE
AMO-COP	SETEC
CST	Comité scientifique et technique
CEREMA	Assistance MOA
MOE S2, 3 et 4	S2 et S4 : groupement ONE (pilote par EGIS) S3 : groupement piloté par ARCADIS
Groupement	BYTP (mandataire) / ISL / Razel BEC Sous-traitant : UNISOL/ Ramery TP

Marché des planches expérimentales d'étanchéité

Objectifs du marché des planches expérimentales :

Valorisation maximale des matériaux du site (Limon et craie) avec une potentielle réutilisation dans un dispositif d'étanchéité en sols traités :

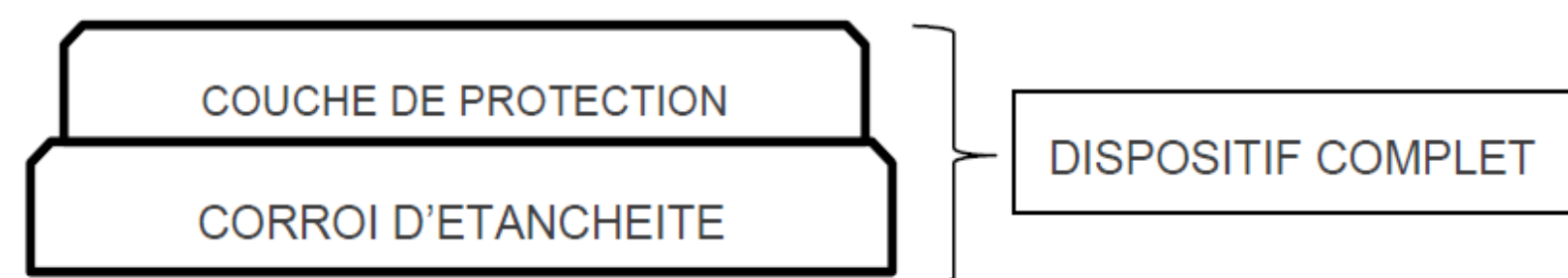
- Définir un dispositif d'étanchéité pour le futur canal
- Définir les modalités de traitement (limon et craie)
- Déterminer les conditions de mise en œuvre des matériaux
- Comparer les résultats des essais en laboratoire et des essais in situ
- Étude du durabilité du complexe d'étanchéité

Mais aussi :

- **Mise en place d'une instrumentation au niveau des planches expérimentales (Marché R&D CEREMA/UGE)**

Marché des planches expérimentales d'étanchéité

Critères du dimensionnement du complexe d'étanchéité



Matériaux	Valorisation possible
Limon	Couche d'étanchéité + couche de protection
Craie	Couche de protection

Matériaux	Valorisation possible	Type de traitement	Paramètre À suivre		
			Mécanique	Hydrique	Erosion
Limon A1	Couche de protection	Liant hydraulique	•••	•	•••
Limon A1	Couche d'étanchéité	Argiles	••	•••	•
Limon A2	Couche d'étanchéité	Argiles	••	•••	•
Craie	Couche de protection	Liant hydraulique	•••	•	•••

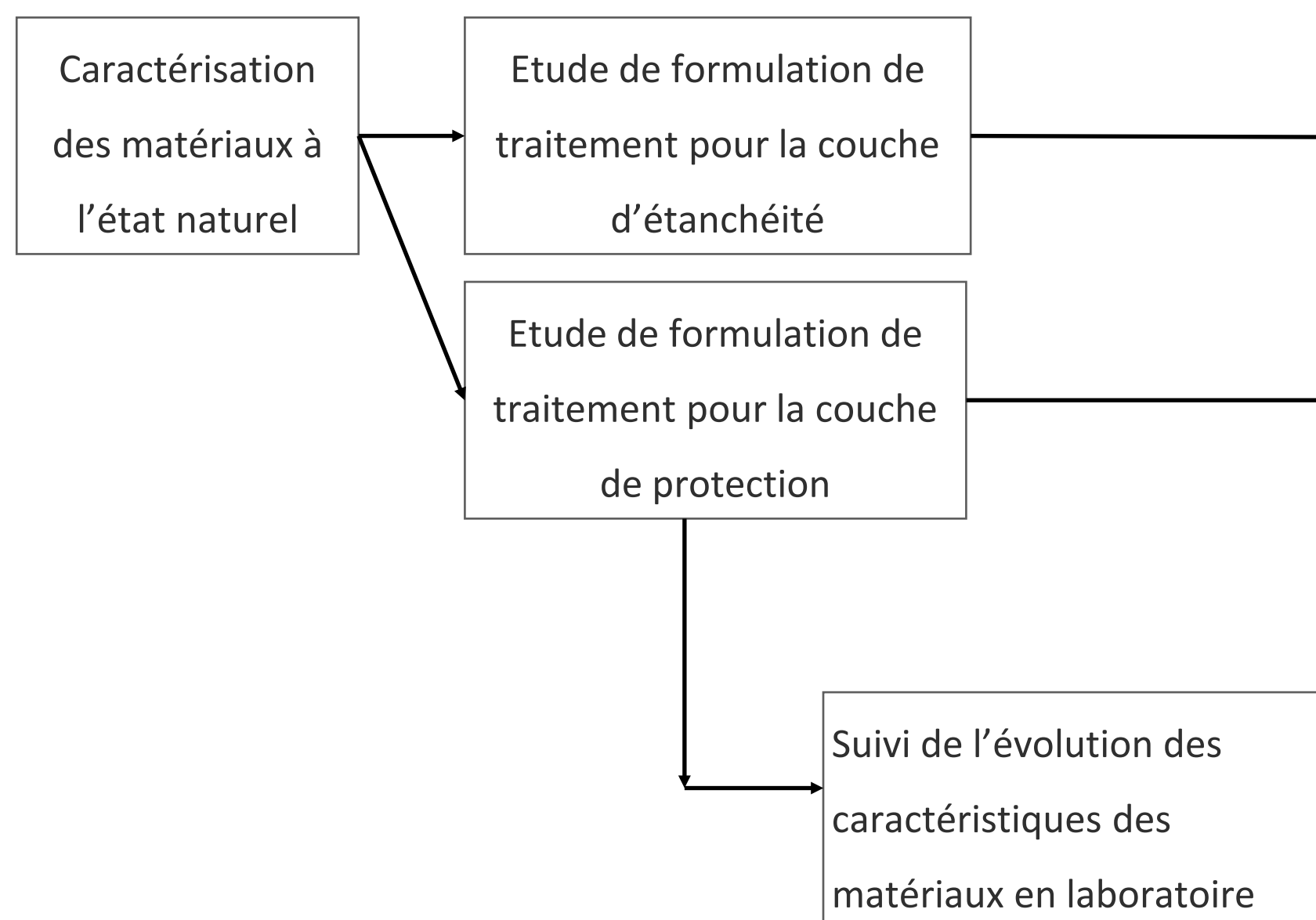
- indicateur non important
- Indicateur important
- indicateur dimensionnant

Méthodologie de l'étude

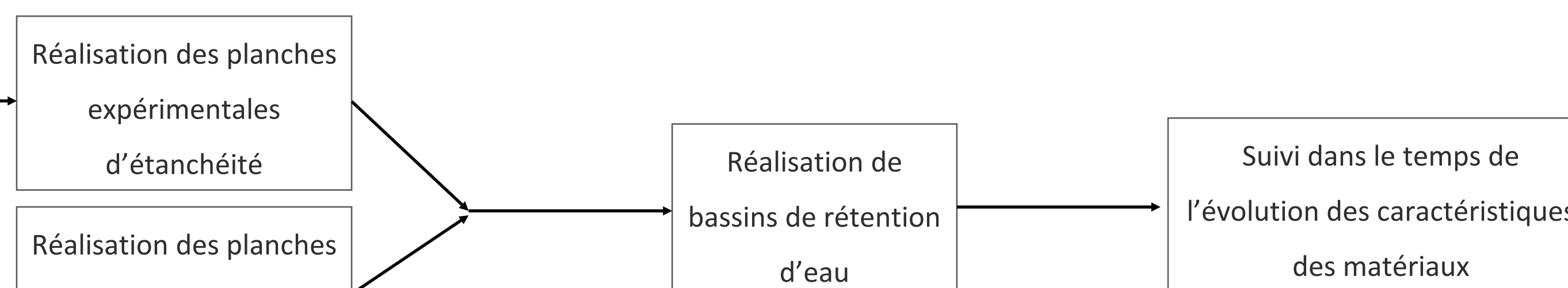
2019

2022

Etude en laboratoire



Etude in situ



Ressources du projet

Contexte géotechnique global

Limons

Le site s'inscrit dans les limons loessiques des plateaux (LP).

La proportion en argile mentionnée dans le recueil géologique est plus importante que celle mesurée sur site, alors que les proportions en limons grossiers et sables sont comparables. Il est possible que la campagne ait concerné des limons à granulométrie plus resserrée et un peu moins argileuse que la moyenne des LP.

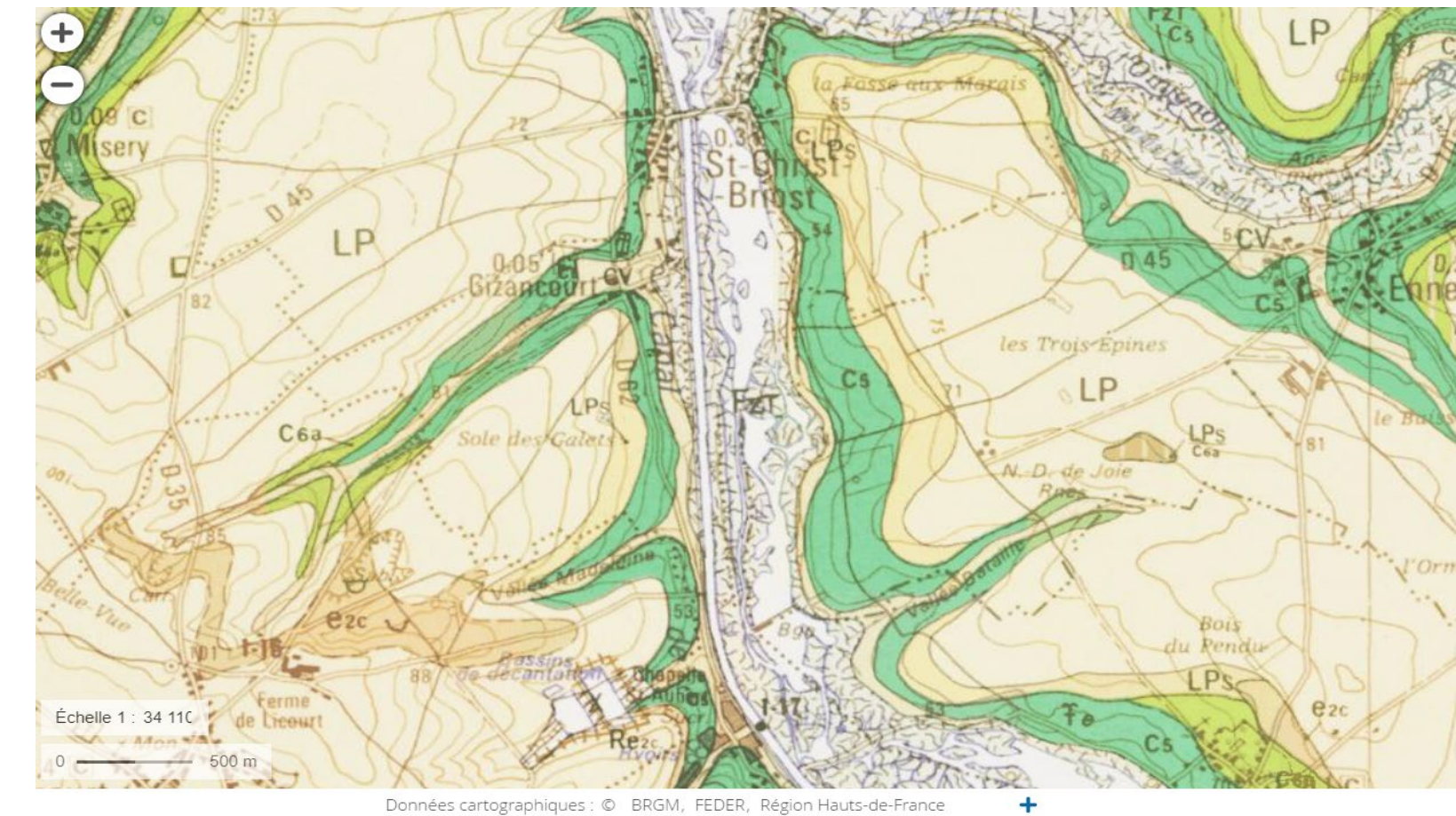


Tableau V. — Caractérisation des matériaux.

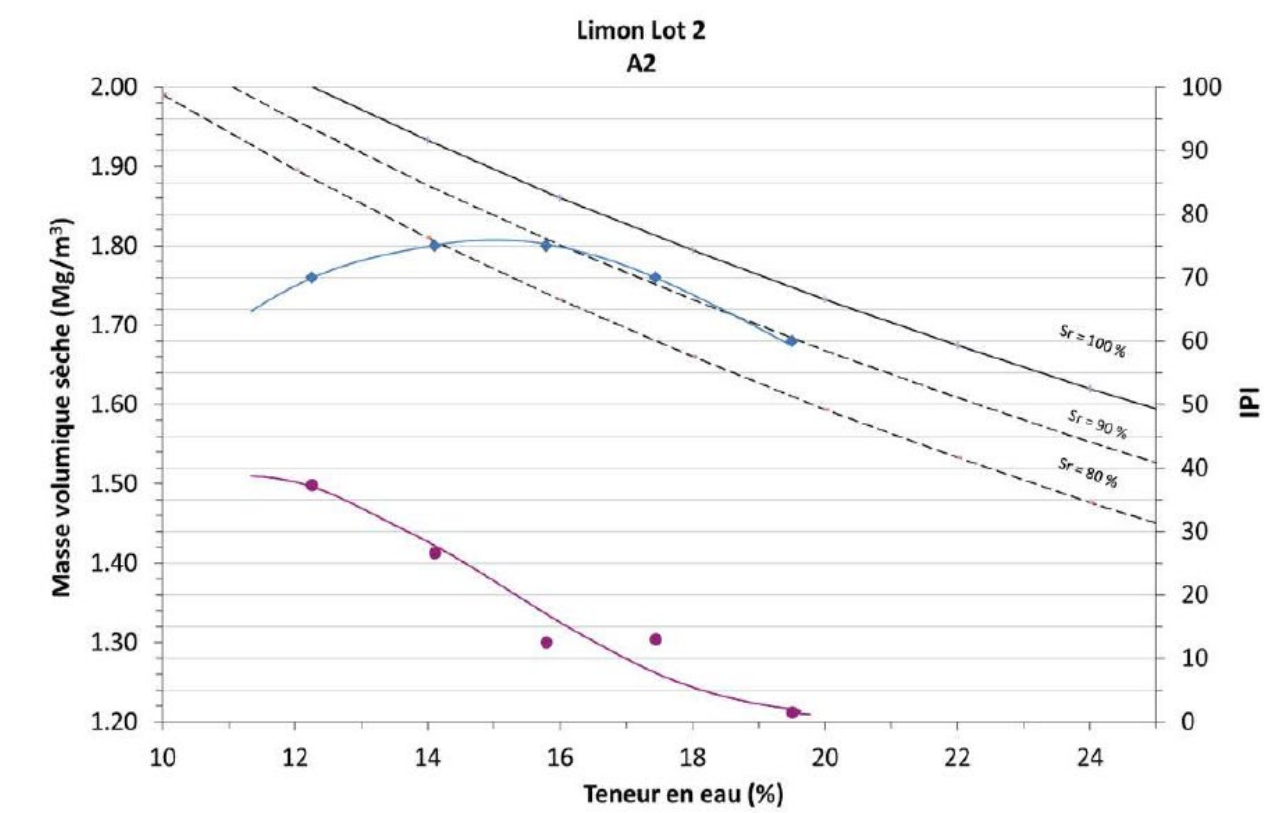
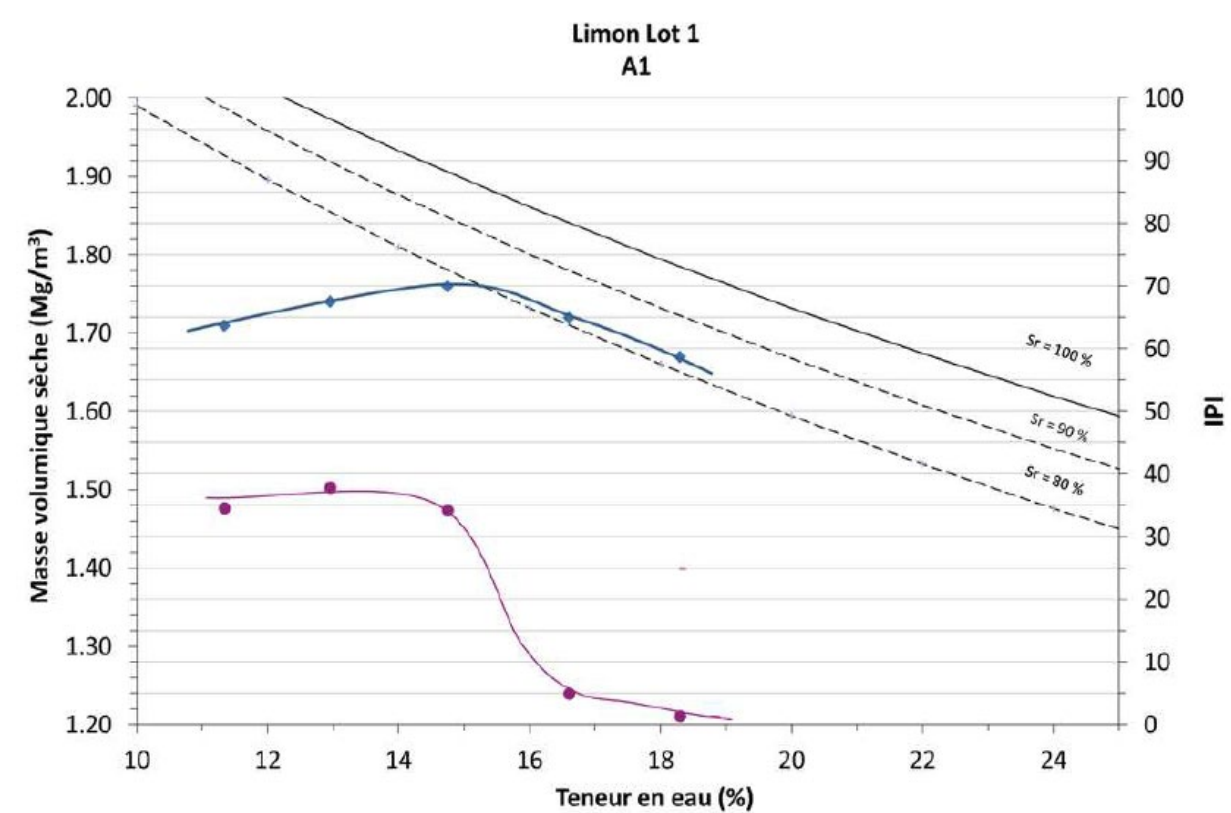
Formation	Faciès	Terre fine (≤ 2 mm)									
		Argiles %	Limons fins %	Limons grossiers %	Sables fins %	Sables grossiers %	Calcaire total %	Matière organique %	pH	Azote %	
LP	<i>Limon récent</i> — couche cultivée limono-argileuse	21,3	19,6	49,5	3,3	0,7	0,5	0,5 (apport)	1,9	8,0	—
	— couche enrichie en argile (B ₂ t)	28,7	18,1	48,0	3,5	0,4	0,3	—	—	8,1	—
	— loess décalcifié	18,9	19,0	55,0	2,4	0,1	0,1	—	—	8,0	—
	— ergeron calcaire (*)	13,2	19,7	49,4	2,8	0,1	0,1	12,3	—	8,4	—
	<i>Limon plus ancien</i> — sous-sol limoneux très argileux	29,6	20,7	43,2	3,9	1,5	0,8	—	—	8,2	—



Ressources du projet

Contexte géotechnique global

Limons



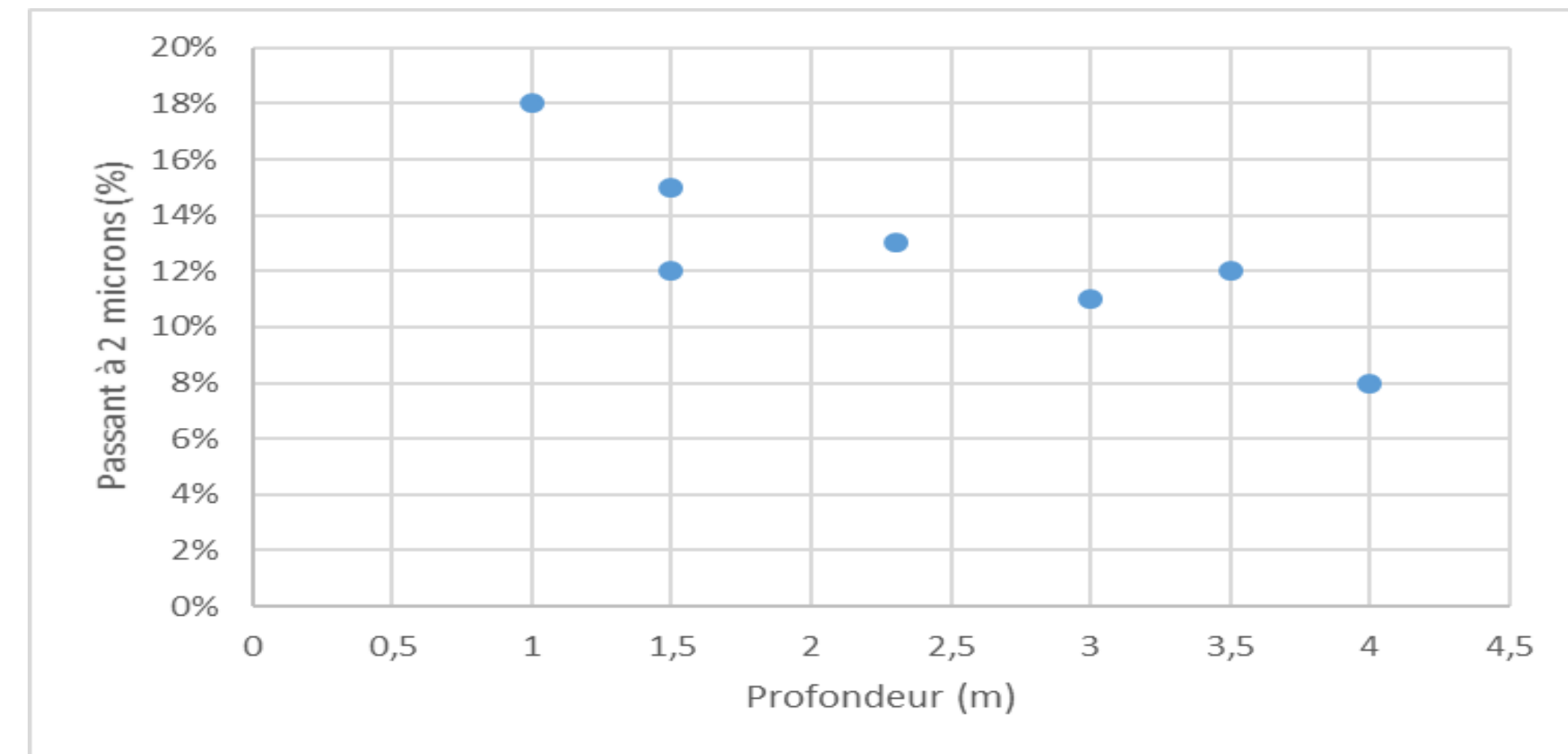
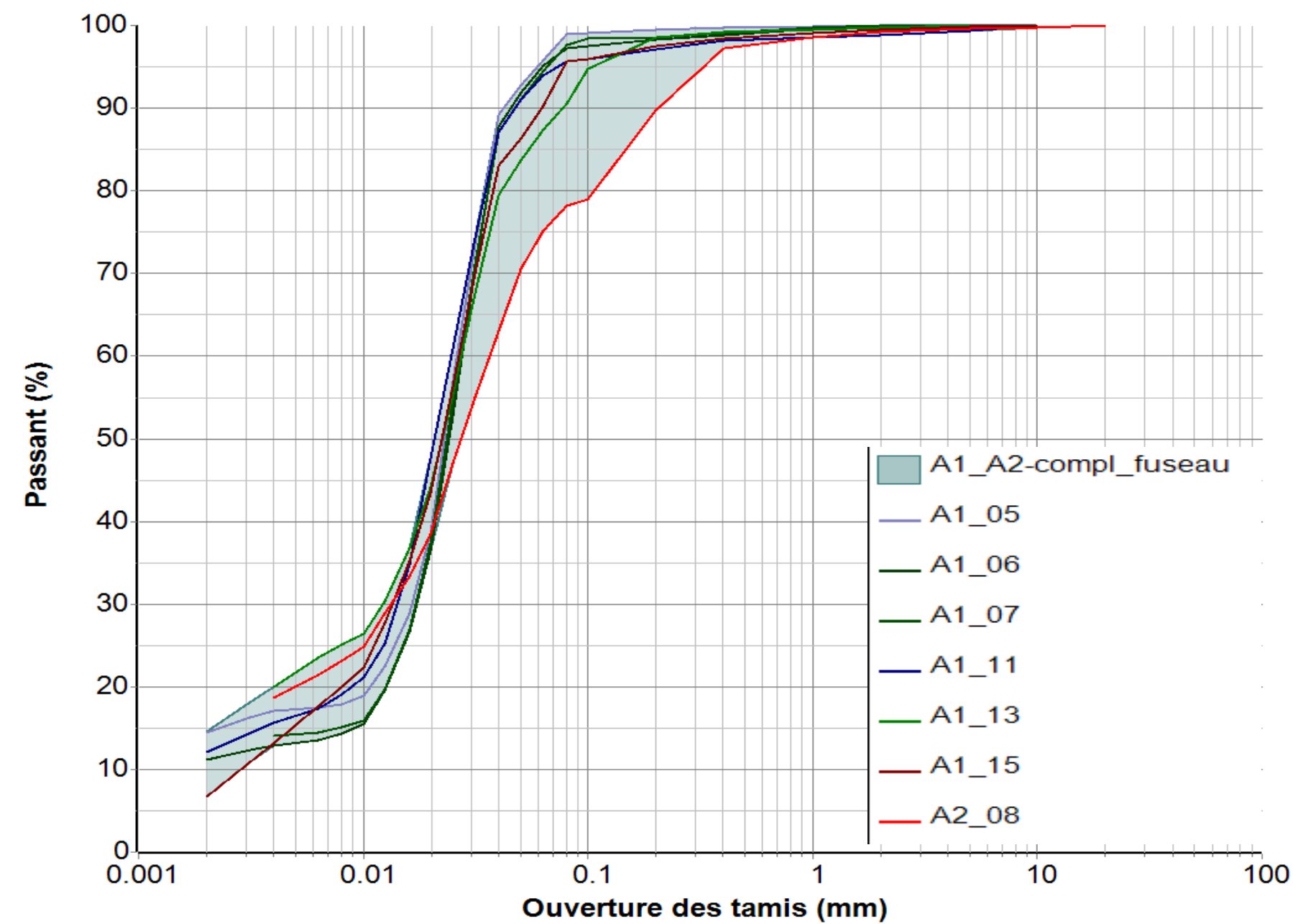
	Couleur	Dmax	< 80 mm	VBS	IP	W _{OPN}	g _{dOPN}
Limons silteux A1	beige	6 mm [2-19 mm]	96 %	1,6 g	Non mesurable	14,8 %	1,76 t/m ³

	Couleur	Dmax	< 80 mm	VBS	IP	W _{OPN}	g _{dOPN}
Limons argileux A2	brun	5 mm [3-9 mm]	93 %	3,2 g	9	15,1 %	1,81 t/m ³

Ressources du projet

Contexte géotechnique global

➤ Limons



- Un passant à 2 microns décroissant avec la profondeur, de 18% à 8%
- Un passant à 10 microns de l'ordre de 20% (+- 5%, sans influence de la profondeur)
- Un passant à 40 microns de l'ordre de 85% (+- 2,5%, sans incidence de la profondeur)
- Un passant à 80 microns de l'ordre de 95%.

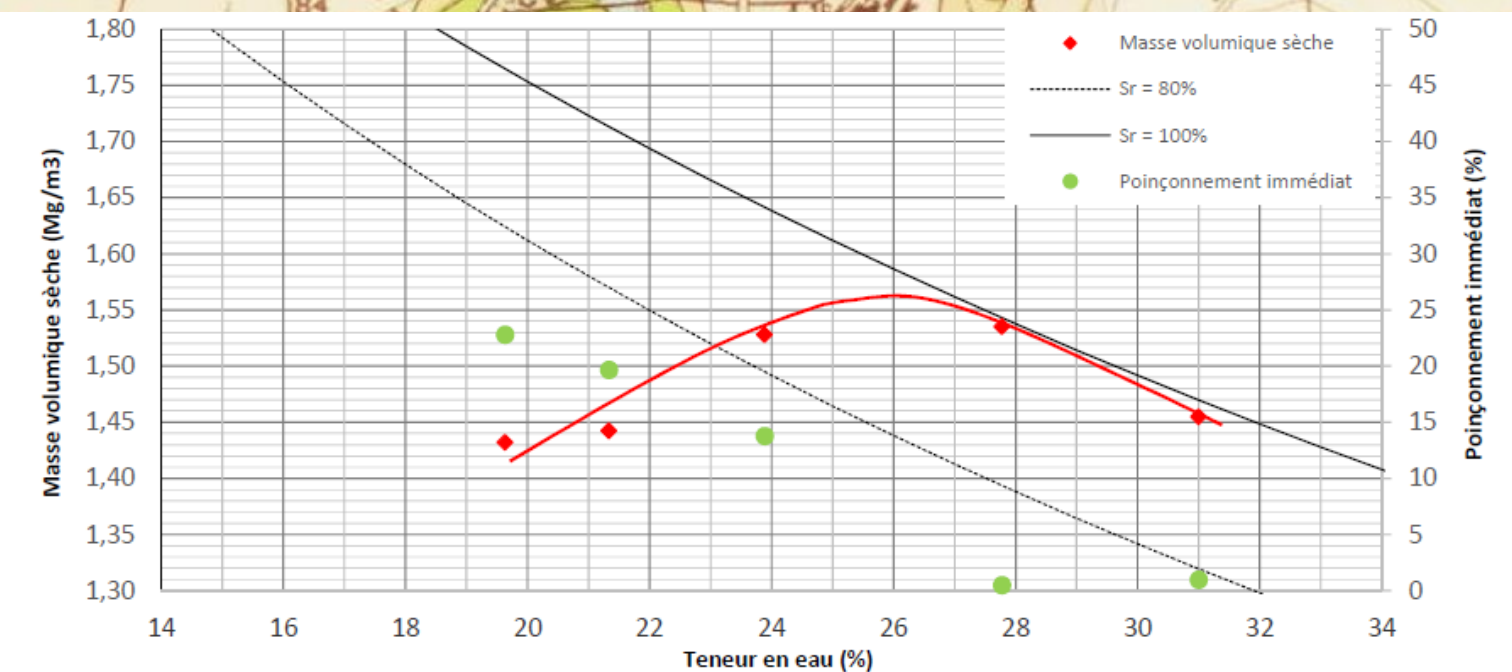
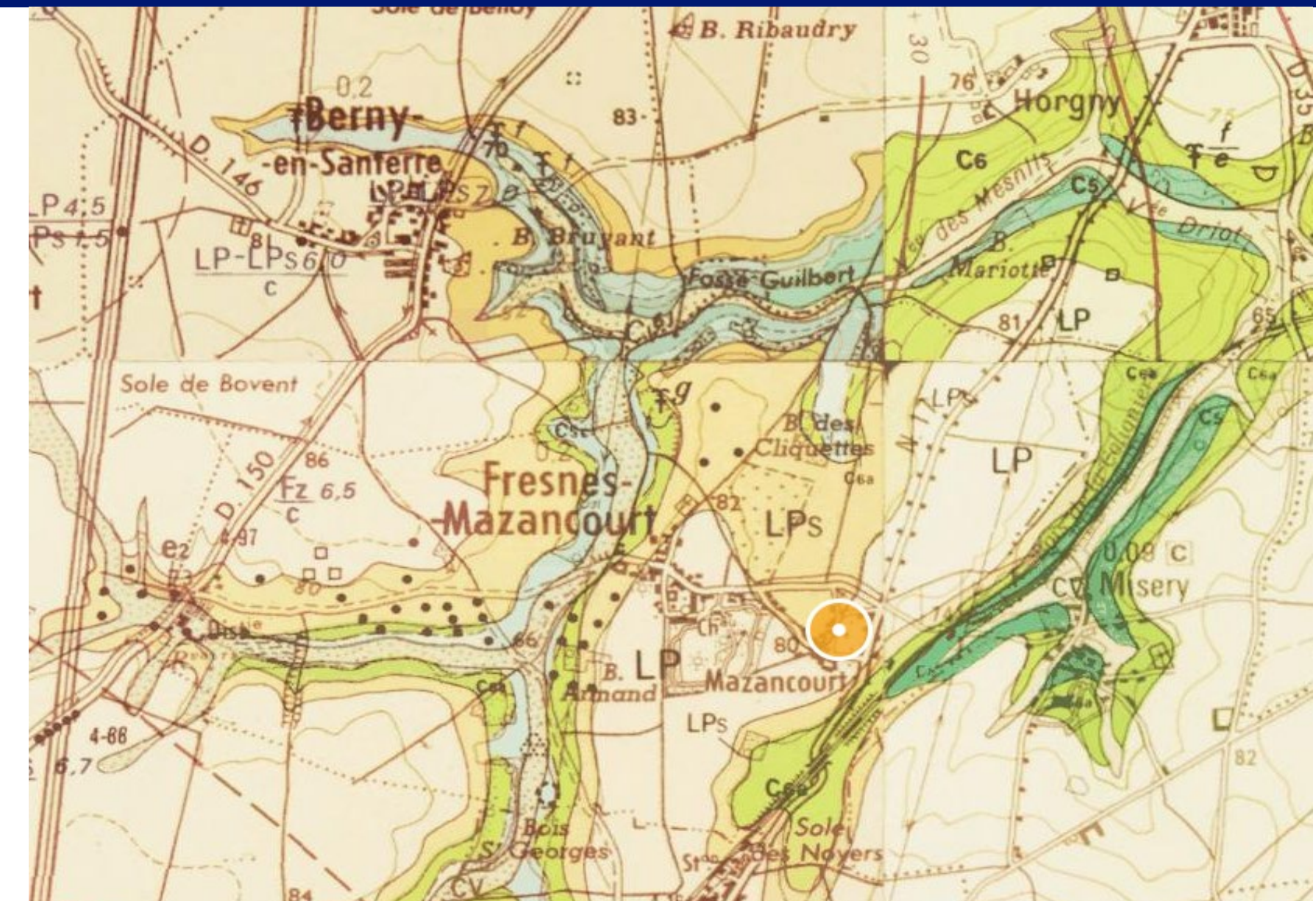
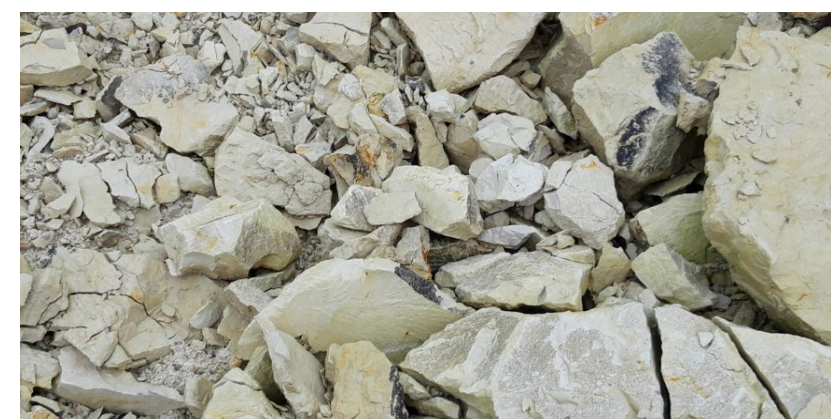
Ressources du projet

Contexte géotechnique global

► Craie

La craie employée pour la réalisation de la planche d'essai de protection provient du gisement de Mazancourt, à proximité du tracé du projet du CSNE et du site expérimental de Cizancourt.

C'est une craie d'âge campanien, très pure (88 à 95 % de CaCO_3).



Résultats à l'optimum

Teneur en eau	w	(%)	26,0	Masse volumique sèche	ρ_d	(Mg/m^3)	1,56
Teneur en eau corrigée	w'	(%)	N.C.	Masse volumique sèche corrigée	ρ'_d	(Mg/m^3)	N.C.

Etude en laboratoire

Etude de formulation de la couche d'étanchéité

➤ Limons avec traitement aux produits argileux

	Traitement	Taux de compactage	Masse volumique sèche	Teneur en eau	Conductivité hydraulique
		(%)	(Mg.m ⁻³)	(%)	(m.s ⁻¹)
Limon brun	NON	95	1,76	W _{OPN +1} = 15,8%	4,4.10 ⁻⁹
	NON	95	1,76	W _{OPN +1} = 15,8%	1,8.10 ⁻⁹
	2% Bentonite	95	1,68	W _{OPN +1} = 16,7%	2,4.10 ⁻⁹
	2% Kaolinite	95	1,77	W _{OPN +1} = 15,5%	9,2.10 ⁻¹⁰
Limon beige	2% Bentonite	95	1,68	W _{OPN +1} = 16,3%	9,4.10 ⁻¹⁰
	4% Bentonite	95	1,68	W _{OPN +1} = 16,3%	4,1.10 ⁻¹⁰
	4% Bentonite	98	1,73	W _{OPN +1} = 16,3%	3,0.10 ⁻¹⁰
	2% Kaolinite	95	1,74	W _{OPN +1} = 15,8%	1,4.10 ⁻⁸

✓ Perméabilité obtenue en laboratoire (compactage dynamique) < 1 x 10⁻⁸ m/s

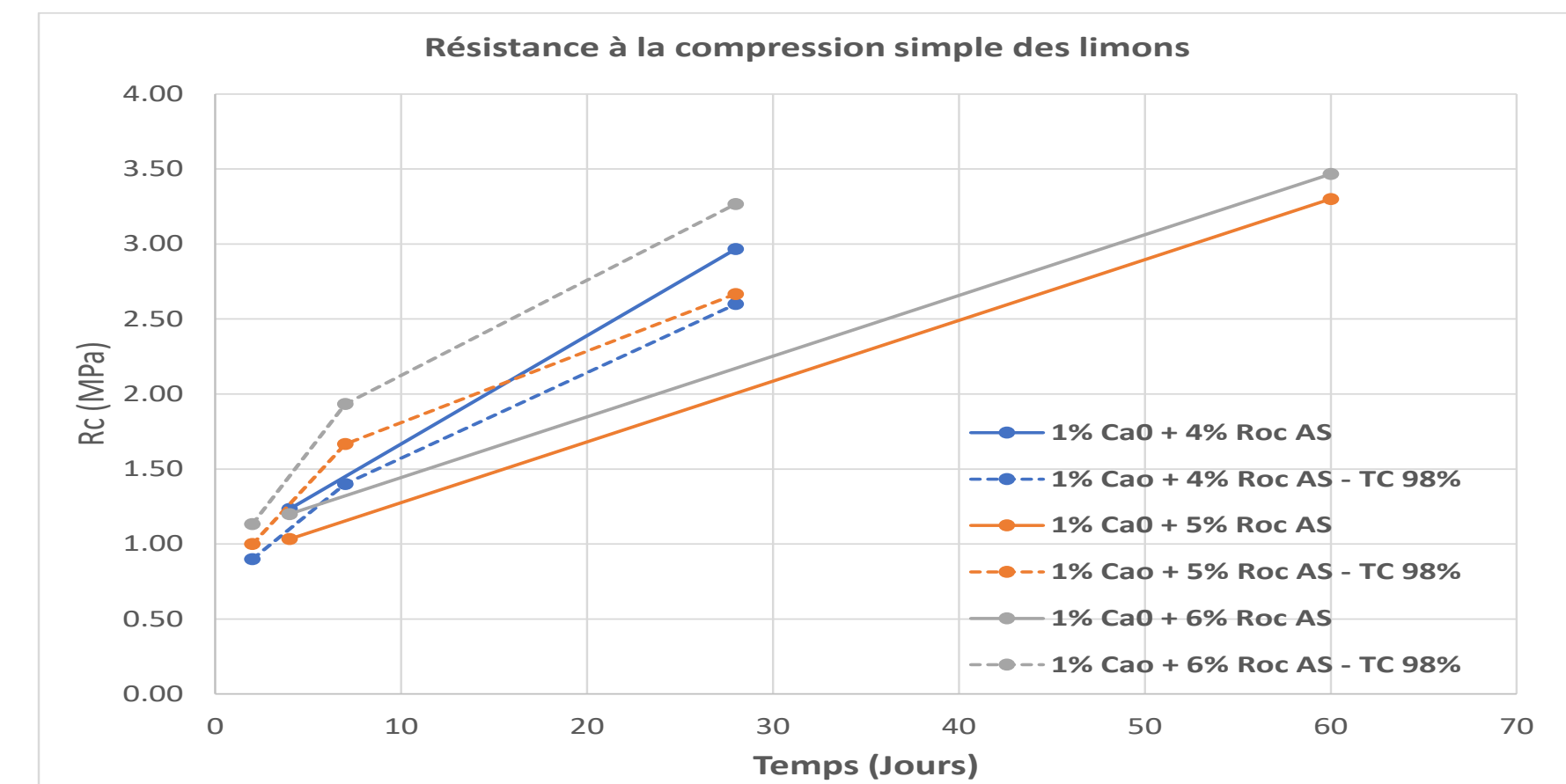
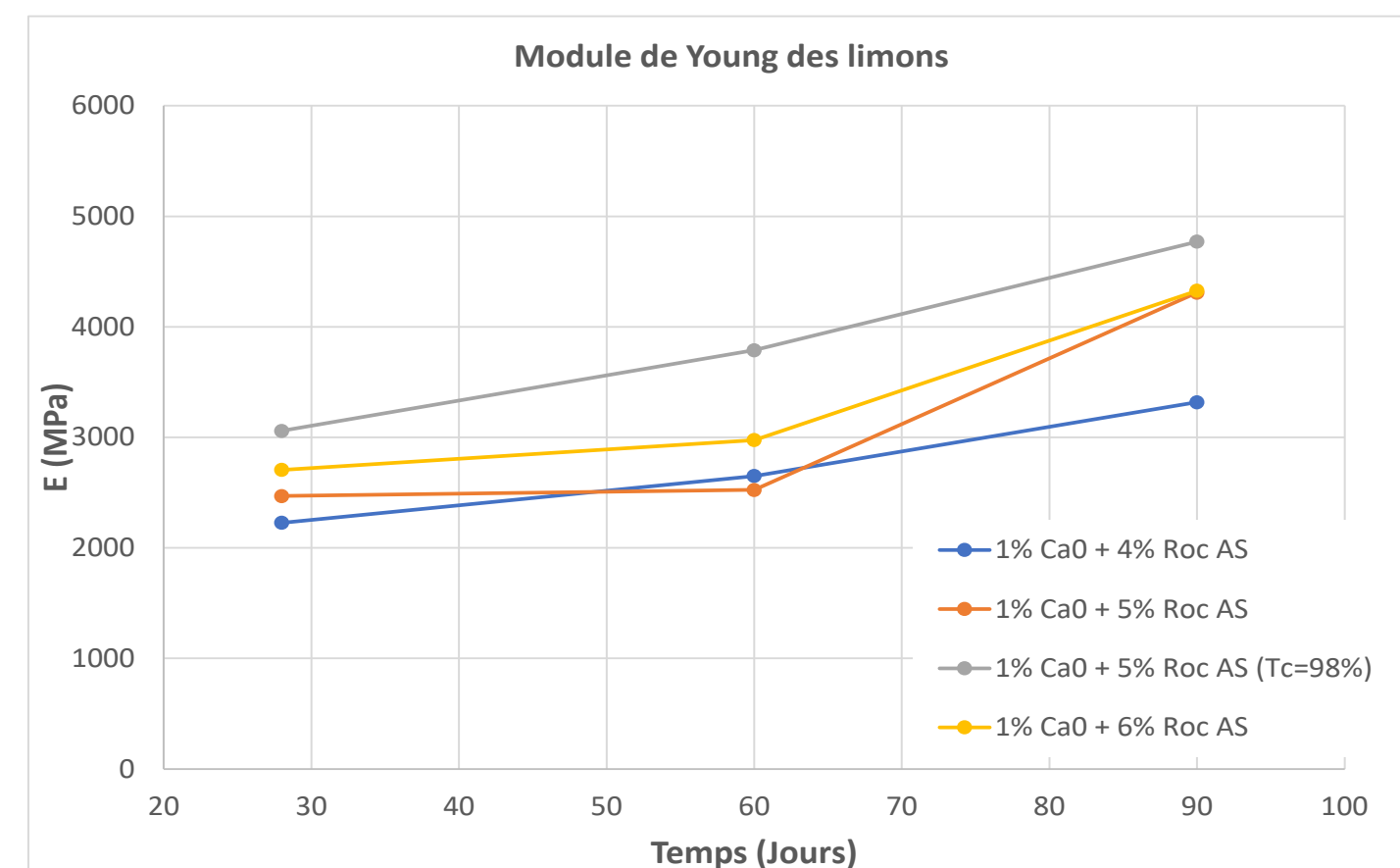
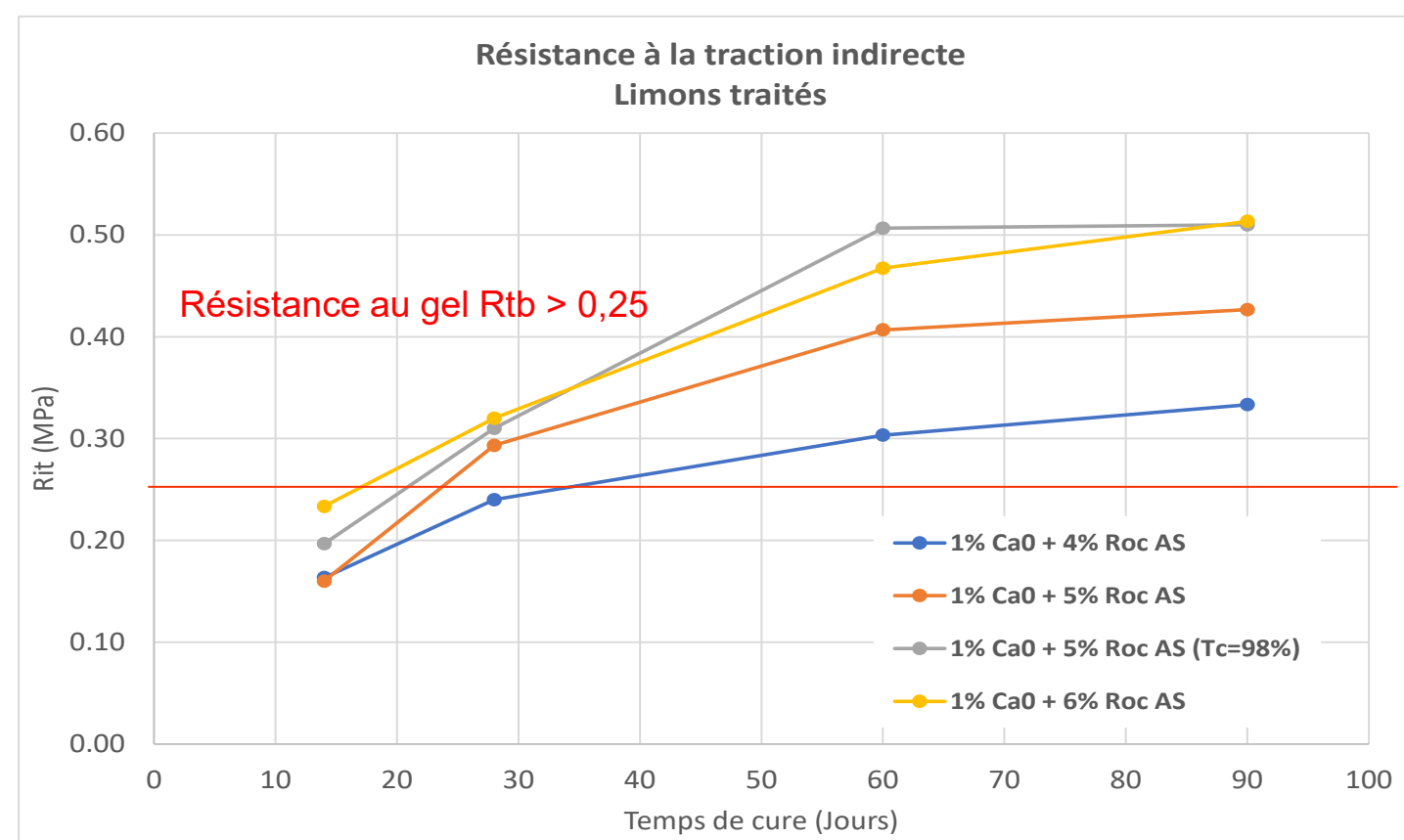
+ impact du mode de compactage (statique et dynamique)

+ impact du prétraitement à la chaux

Etude en laboratoire

Etude de formulation de la couche de protection

➡ Limons avec traitement aux liants hydrauliques



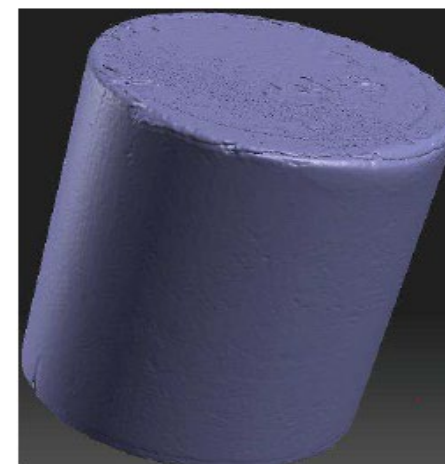
Etude en laboratoire

Etude de formulation de la couche de protection

➔ Limons avec traitement aux liants hydrauliques



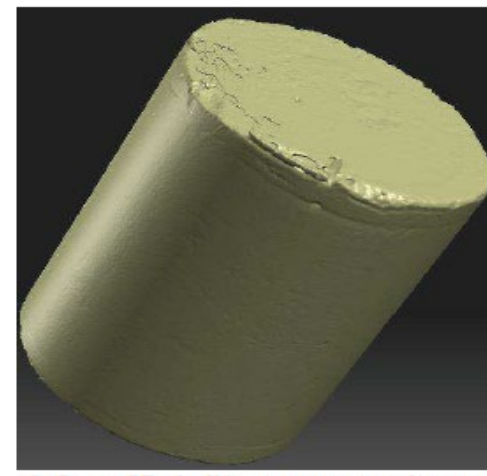
1. Eprouvette avant essai



2. Scan 3D de l'éprouvette avant essai



3. Eprouvette après essai



4. Scan 3D de l'éprouvette après essai

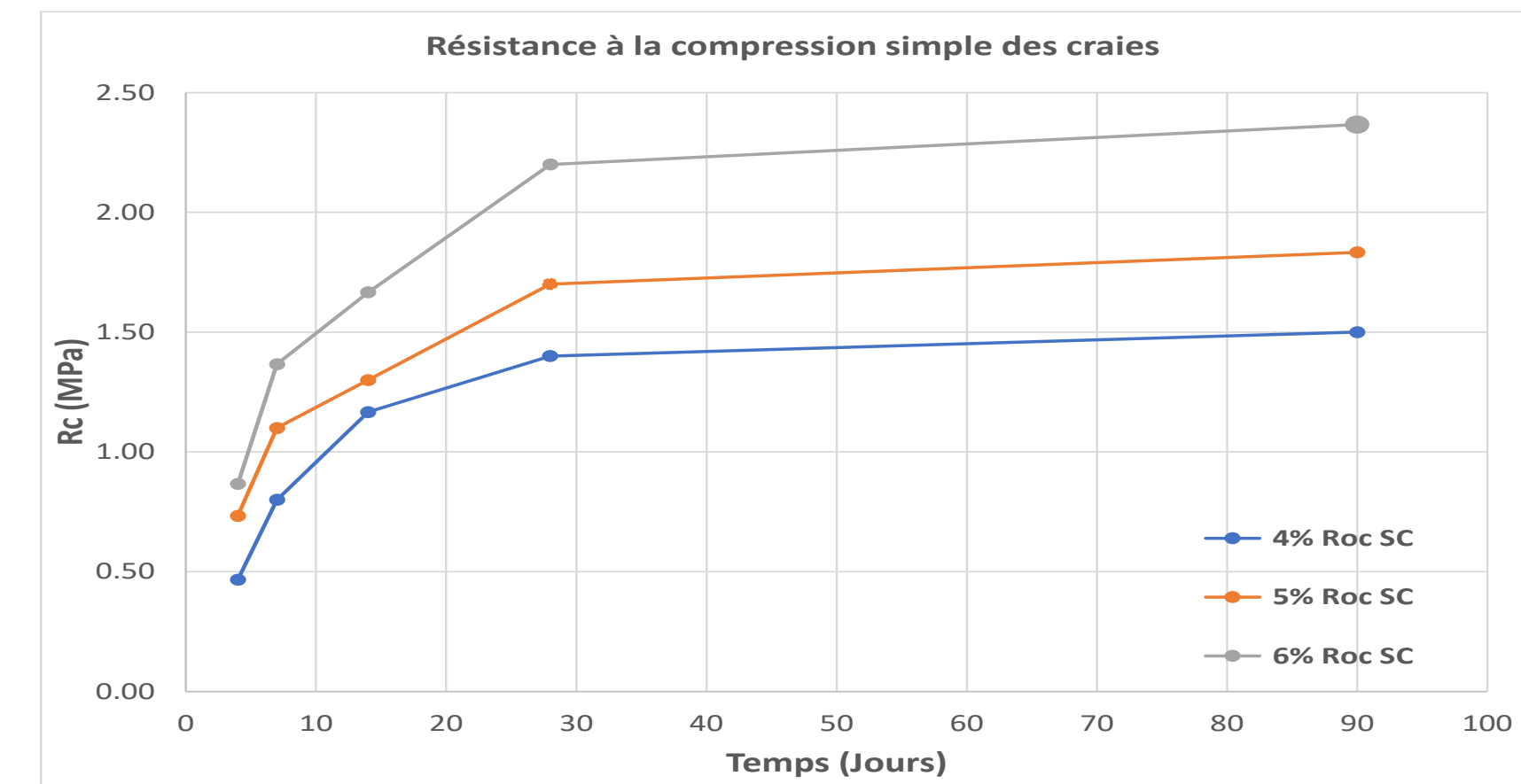
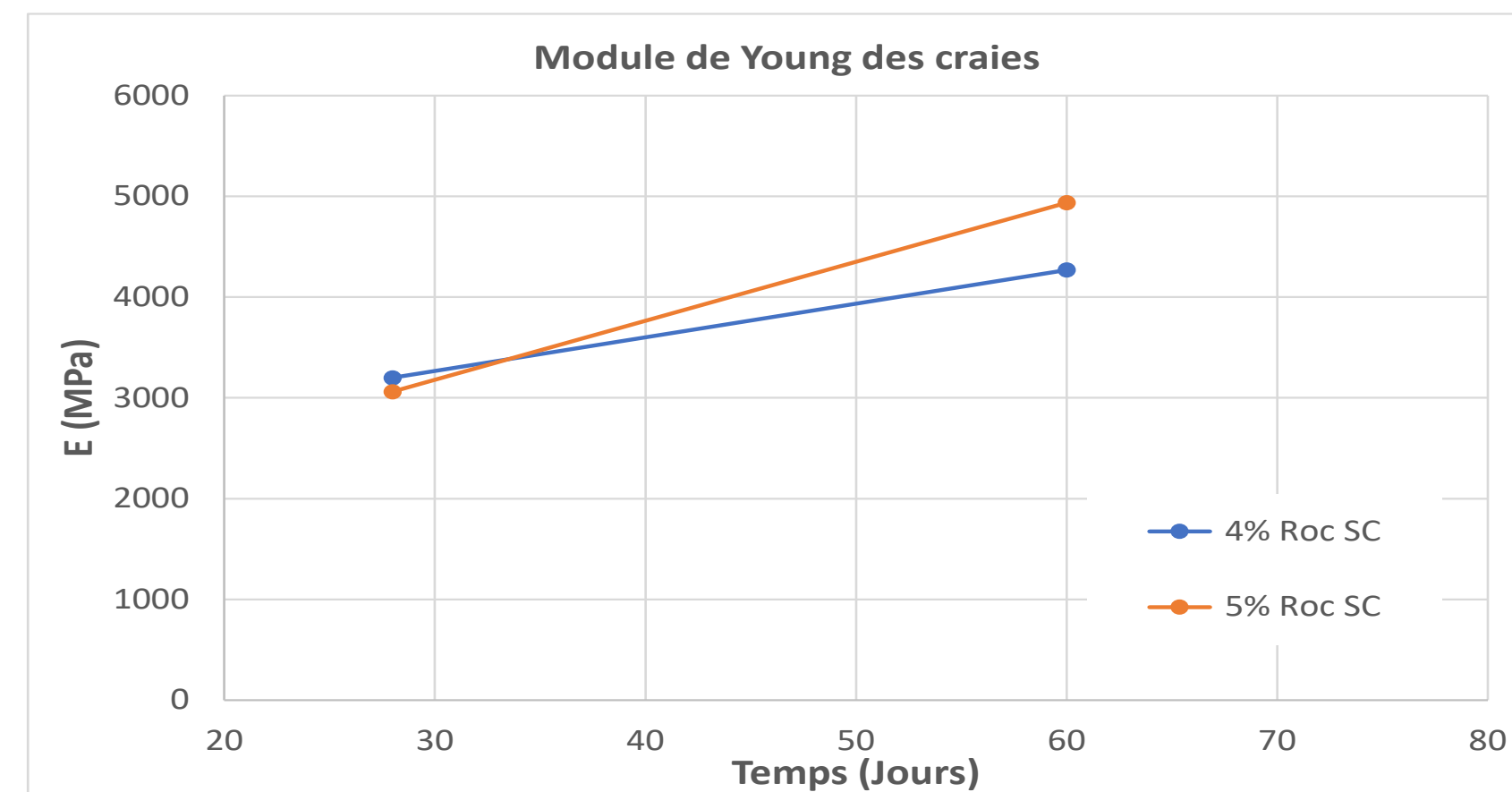
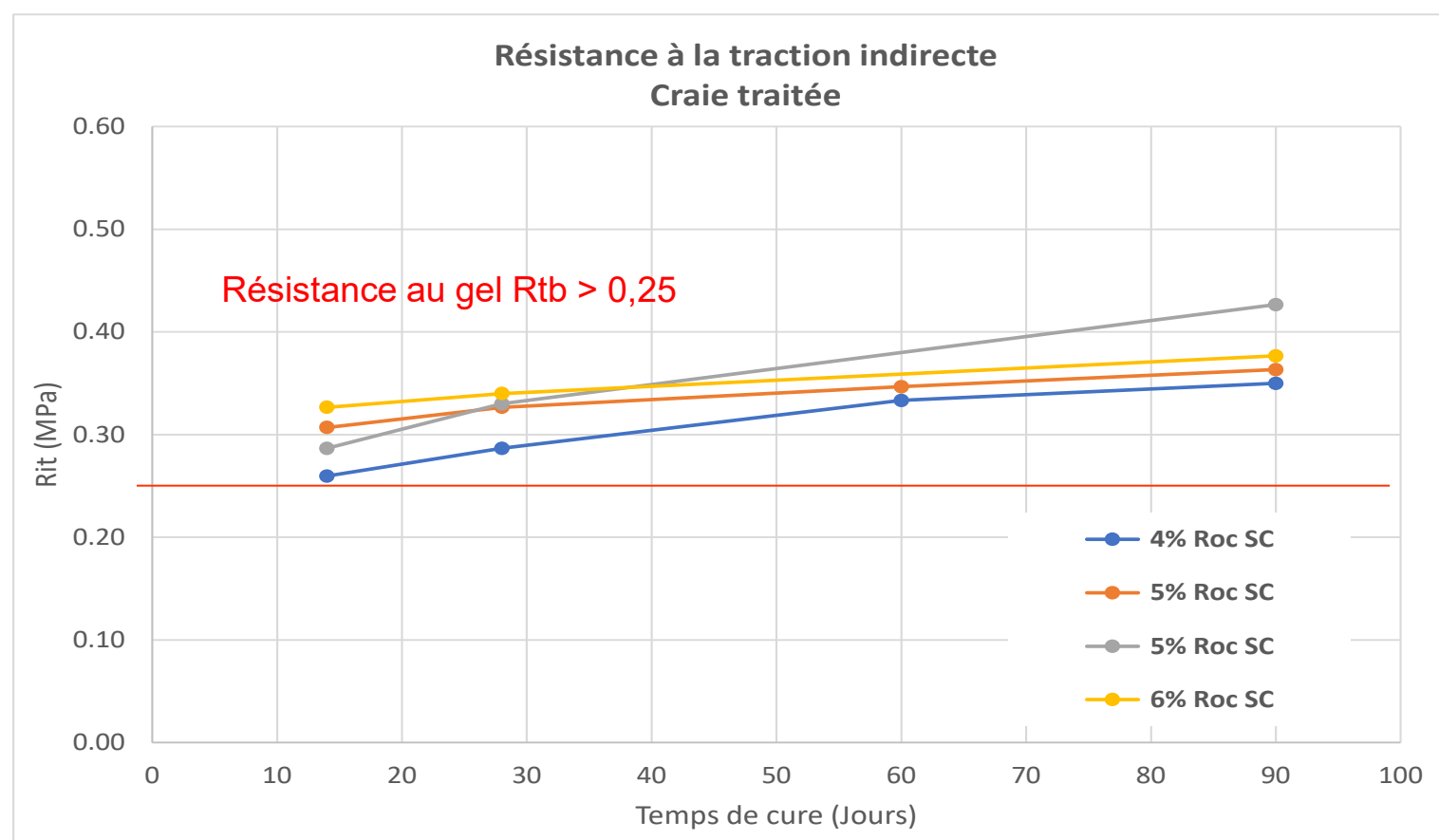
Echantillon	Formule**	Cure (j)	Teneur en eau de confection w (%) *	Masse volumique sèche ρ_d (t/m ³) *	Contrainte critique minimum τ_{cmin} (Pa)	Coefficient d'érosion de Hanson k_d (cm ³ /(s.N))	Teneur en eau après essai w (%)
1	Limon, 1% CaO + 4% Roc As, Tc=95%	28	17,23	1,61	1293	Non mesurable	22,1
2	Limon, 1% CaO + 5% Roc As, Tc=95%	28	18,33	1,60	1245	Non mesurable	20,8
3	Limon, 1% CaO + 5% Roc As, Tc=98%	28	17,15	1,70	1116	Non mesurable	17,6
4	Limon, 1% CaO + 6% Roc As, Tc=95%	28	16,98	1,63	1115	Non mesurable	18,8

- ✓ Résistance au gel vérifiée
- ✓ Excellentes caractéristiques mécaniques (E/Rtb/Rc)
- ✓ Excellente résistance à l'érosion externe (pas d'érosion avec l'essais JET)

Etude en laboratoire

Etude de formulation de la couche de protection

➡ Craie avec traitement aux liants hydrauliques



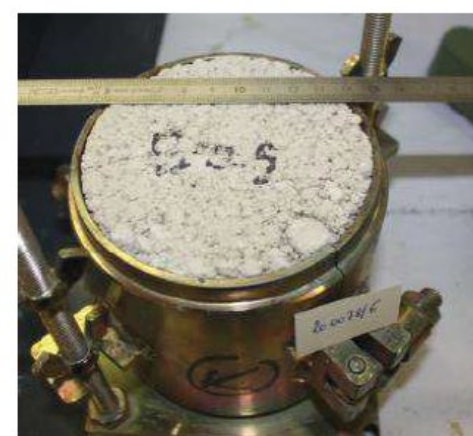
Etude en laboratoire

Etude de formulation de la couche de protection

➔ Craie avec traitement aux liants hydrauliques



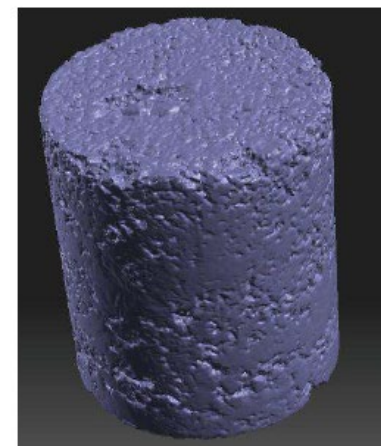
1. Eprouvette avant essai



2. Eprouvette avant essai



3. Eprouvette après essai



4. Scan 3D de l'éprouvette après essai

Echantillon	Formule**	Cure (j)	Teneur en eau de confection w (%) *	Masse volumique sèche ρ_d (t/m ³) *	Contrainte critique minimum τ_{cmin} (Pa)	Coefficient d'érosion de Hanson k_d (cm ³ /(s.N))	Teneur en eau après essai w (%)
5	Craie, 4% Roc SC, Tc=98%	28	23,29	1,56	1131	Non mesurable	23,0
6	Craie, 5% Roc SC, Tc=98%	28	23,44	1,52	1119	Non mesurable	23,5
7	Craie, 5% Roc SC, Tc=100%	28	22,09	1,59	1154	Non mesurable	21,9
8	Craie, 6% Roc SC, Tc=98%	28	22,50	1,51	1099	Non mesurable	24,3





* information fournie par le demandeur

** Tc = taux de compactage

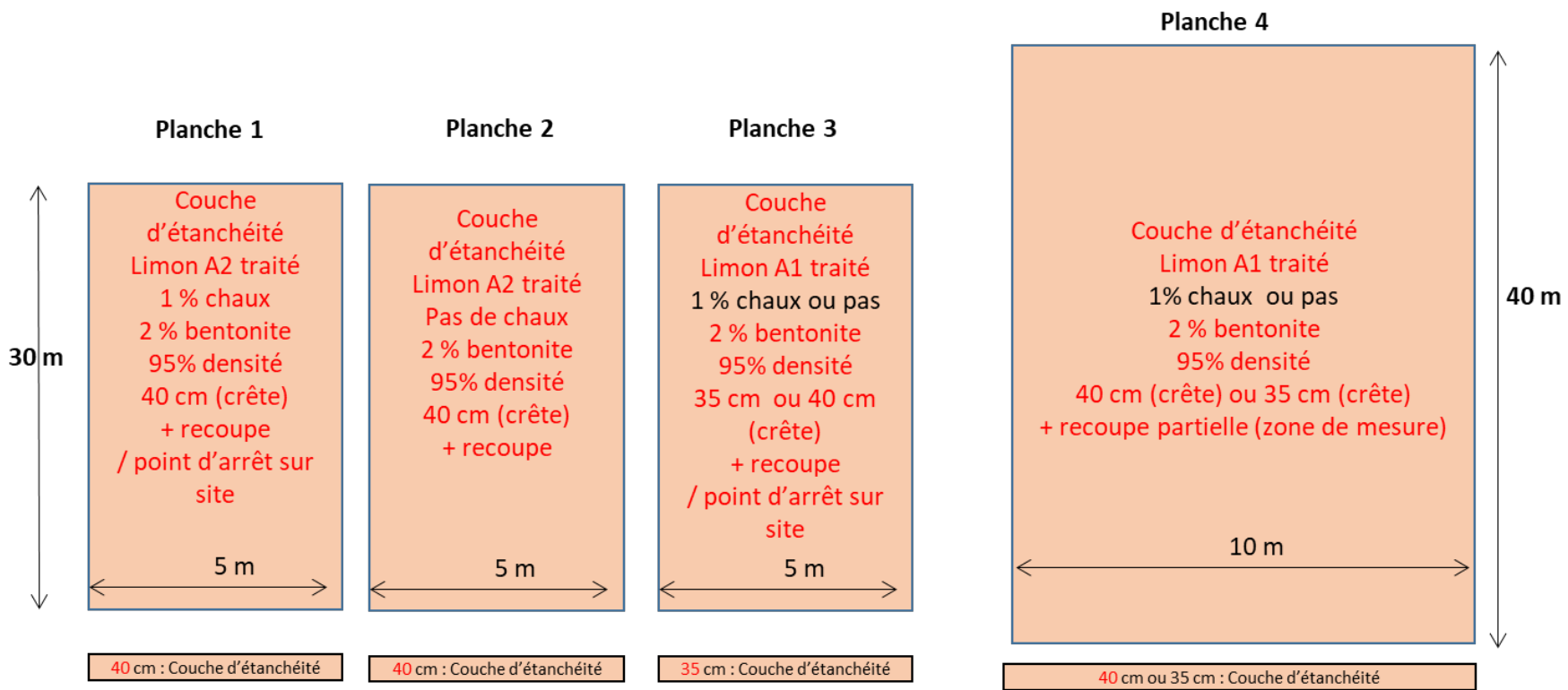
- ✓ Résistance au gel vérifiée
- ✓ Excellentes caractéristiques mécaniques (E/Rtb/Rc)
- ✓ Excellente résistance à l'érosion externe (pas d'érosion avec l'essais JET)

Etude in situ

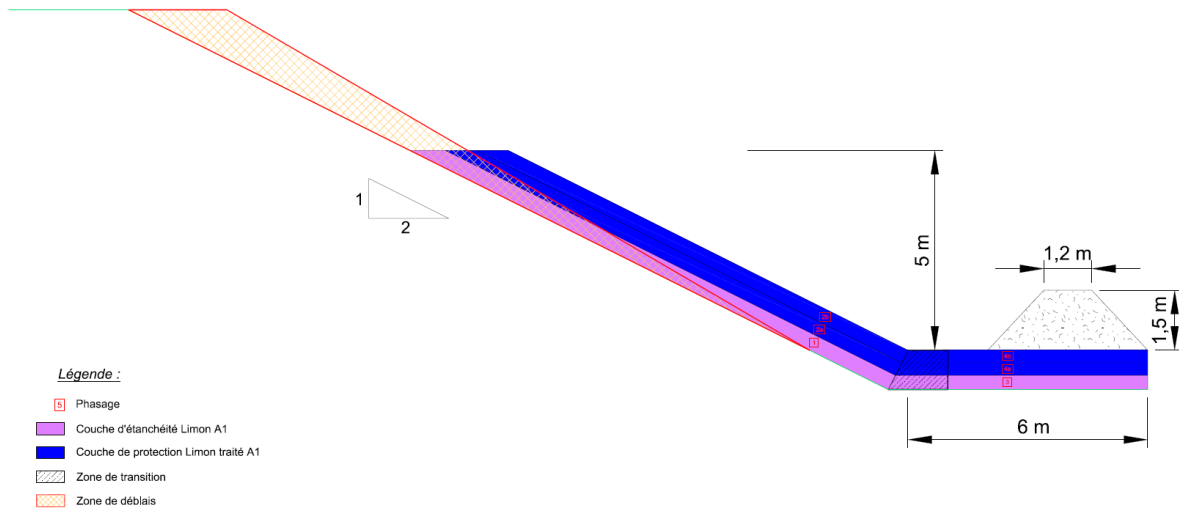
Illustration des planches réalisées

-  Couches d'étanchéité
-  Couches de protection
-  Couches avec compactage en talus
-  Bassins

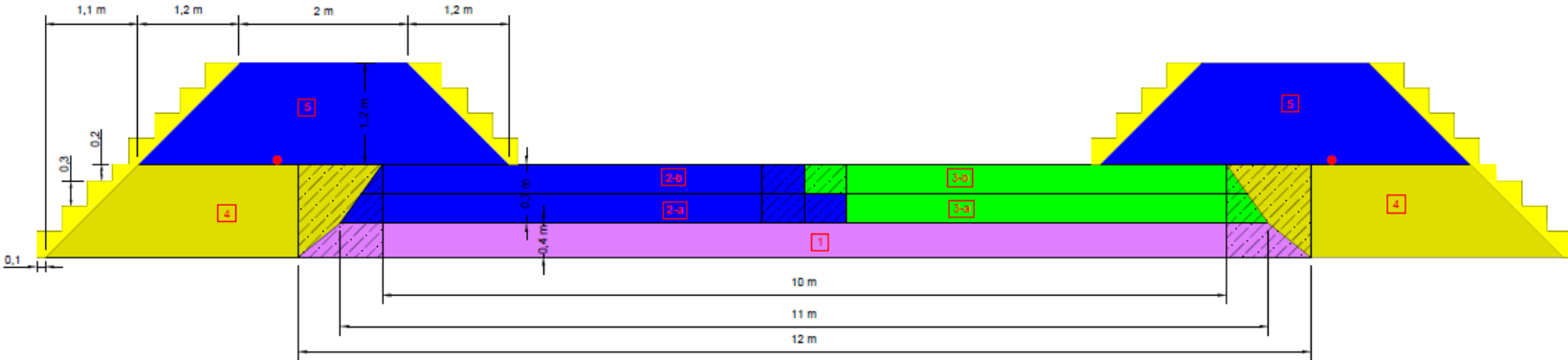
Planches horizontales










Planches inclinées

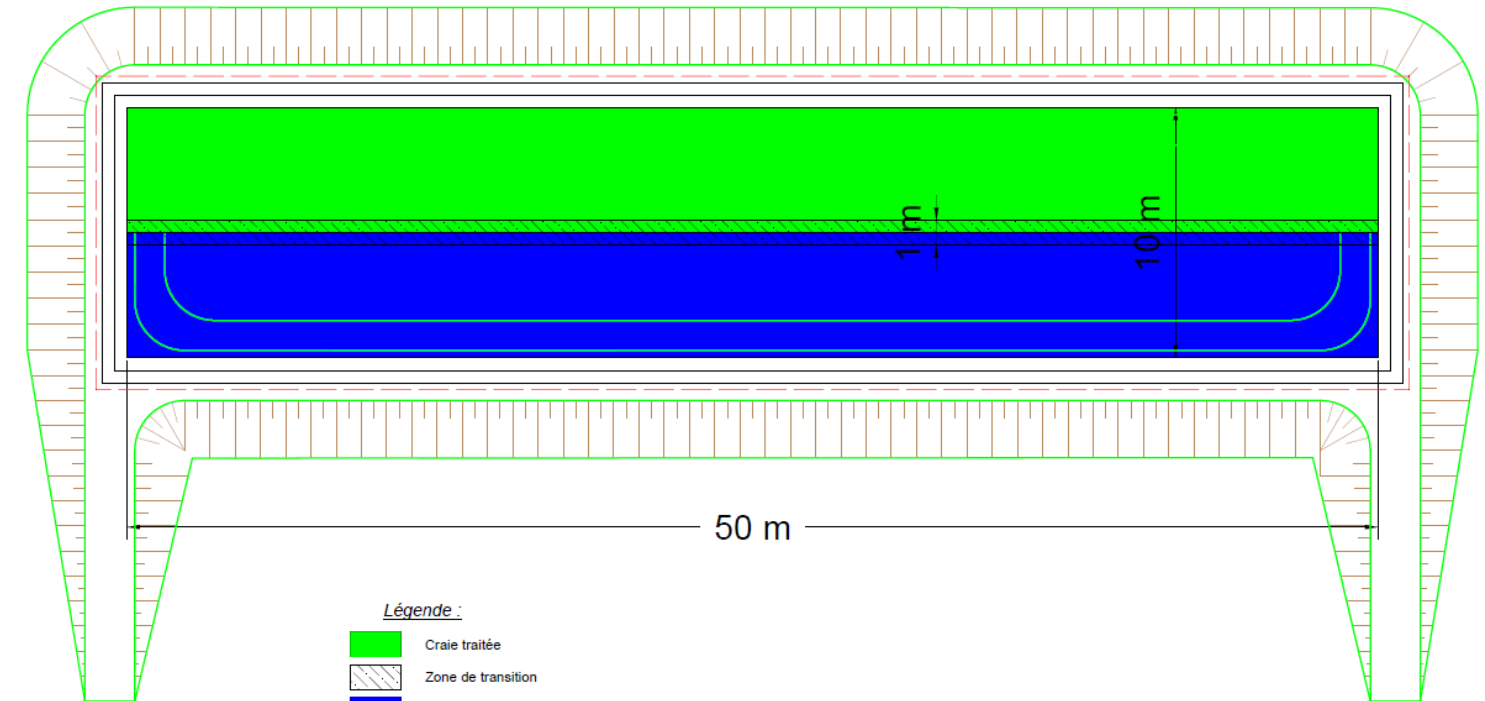


Bassins



Légende :

-  Phasage
-  Couche d'étanchéité Limon A1
-  Couche de protection Limon traité A1
-  Couche de protection Craie traitée
-  Limon A2
-  Zone de transition
-  Limon scalpé



Etude in situ

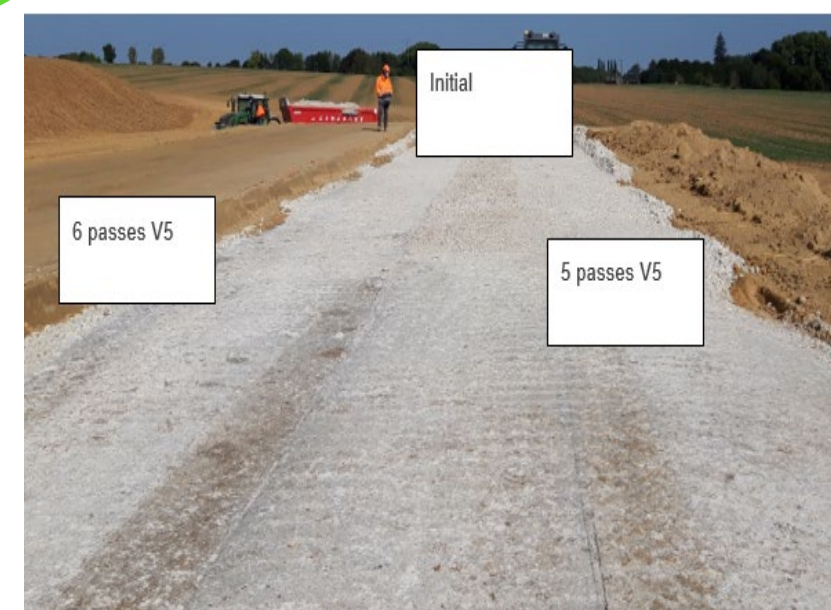
Réalisation des planches



Processus de traitement

Processus de mise en œuvre

Processus de contrôle



Etude in situ

Réalisation des planches



Etude in situ

Quelques résultats : couches d'étanchéité

		Epaisseur moyenne atteinte	Densité moyenne obtenue	Ecart-type sur densités
Planche 1		35 cm après recoupe	99,0 %	1,4 %
Planche 2	Partie supérieure	42 cm après recoupe	96,8 %	1,6 %
	Fond de couche		95,9 %	1,6 %
Planche 3	Partie supérieure	36 cm après recoupe	101,6 %	1,3 %
	Fond de couche		101,1 %	1,9 %
Planche 4	Partie supérieure	37 cm	100,9 %	2,1 %
	Fond de couche		99,1 %	0,3 %
Planche 7 Etanchéité	Partie supérieure	35 à 40 cm	100,6 %	1,4 %
	Fond de couche		99,7 %	1,2 %
Planche 5 protection	Protection 1/2	32 cm	98,9 %	1,4 %
	Protection 2/2	26 cm (épaisseur totale 58 cm)	95,4 %	2,6 %
Planche 6 protection en craie	Protection 1/2	25 cm	101,4 %	2,0 %
	Protection 2/2	36 cm	102,9 %	2,0 %
Planche 7 protection	Protection 1/2	30 cm	96,7 %	1,8 %
	Protection 2/2	30 cm (épaisseur totale 60 cm)	98,7 %	1,2 %

A2 – chaux + bentonite

Perméabilité - planche P1

Essais initiaux		Essais complémentaires (09-10/11/2020)	
P1-1*	3.91E-09 m/s	Inf1	4.20E-09 m/s
P1-2	2.28E-09 m/s	Inf2	9.50E-10 m/s
P1-4	1.04E-09 m/s		
moyenne	2.41E-09 m/s	moyenne	2.58E-09 m/s

A2 – bentonite

Perméabilité - planche P2

Essais initiaux		Essais complémentaires (09-10/11/2020)	
P2-1*	1.05E-08 m/s	Inf3	8.80E-11 m/s
P2-3	4.31E-10 m/s	Inf4	5.60E-10 m/s
P2-4	2.00E-09 m/s		
moyenne	4.31E-09 m/s	moyenne	3.24E-10 m/s

A1 – chaux + bentonite

Perméabilité - planche P3

Essais initiaux		Essais complémentaires (09-10/11/2020)	
P3-1	9.07E-08 m/s	Inf5	5.90E-09 m/s
P3-2	2.40E-10 m/s	Inf6	1.10E-08 m/s
P3-3*	7.89E-09 m/s		
moyenne	3.29E-08 m/s	moyenne	8.45E-09 m/s

A1 – bentonite

Perméabilité - planche P4

P4-2	7.22E-10 m/s
P4-3	9.14E-10 m/s
P4-4	3.49E-10 m/s
moyenne	6.62E-10 m/s

Etude in situ

Quelques résultats : couches de protection

		Epaisseur moyenne atteinte	Densité moyenne obtenue	Ecart-type sur densités
Planche 1		35 cm après recoupe	99,0 %	1,4 %
Planche 2	Partie supérieure	42 cm après recoupe	96,8 %	1,6 %
	Fond de couche		95,9 %	1,6 %
Planche 3	Partie supérieure	36 cm après recoupe	101,6 %	1,3 %
	Fond de couche		101,1 %	1,9 %
Planche 4	Partie supérieure	37 cm	100,9 %	2,1 %
	Fond de couche		99,1 %	0,3 %
Planche 7 Etanchéité	Partie supérieure	35 à 40 cm	100,6 %	1,4 %
	Fond de couche		99,7 %	1,2 %
Planche 5 protection	Protection 1/2	32 cm	98,9 %	1,4 %
	Protection 2/2	26 cm (épaisseur totale 58 cm)	95,4 %	2,6 %
Planche 6 protection en craie	Protection 1/2	25 cm	101,4 %	2,0 %
	Protection 2/2	36 cm	102,9 %	2,0 %
Planche 7 protection	Protection 1/2	30 cm	96,7 %	1,8 %
	Protection 2/2	30 cm (épaisseur totale 60 cm)	98,7 %	1,2 %

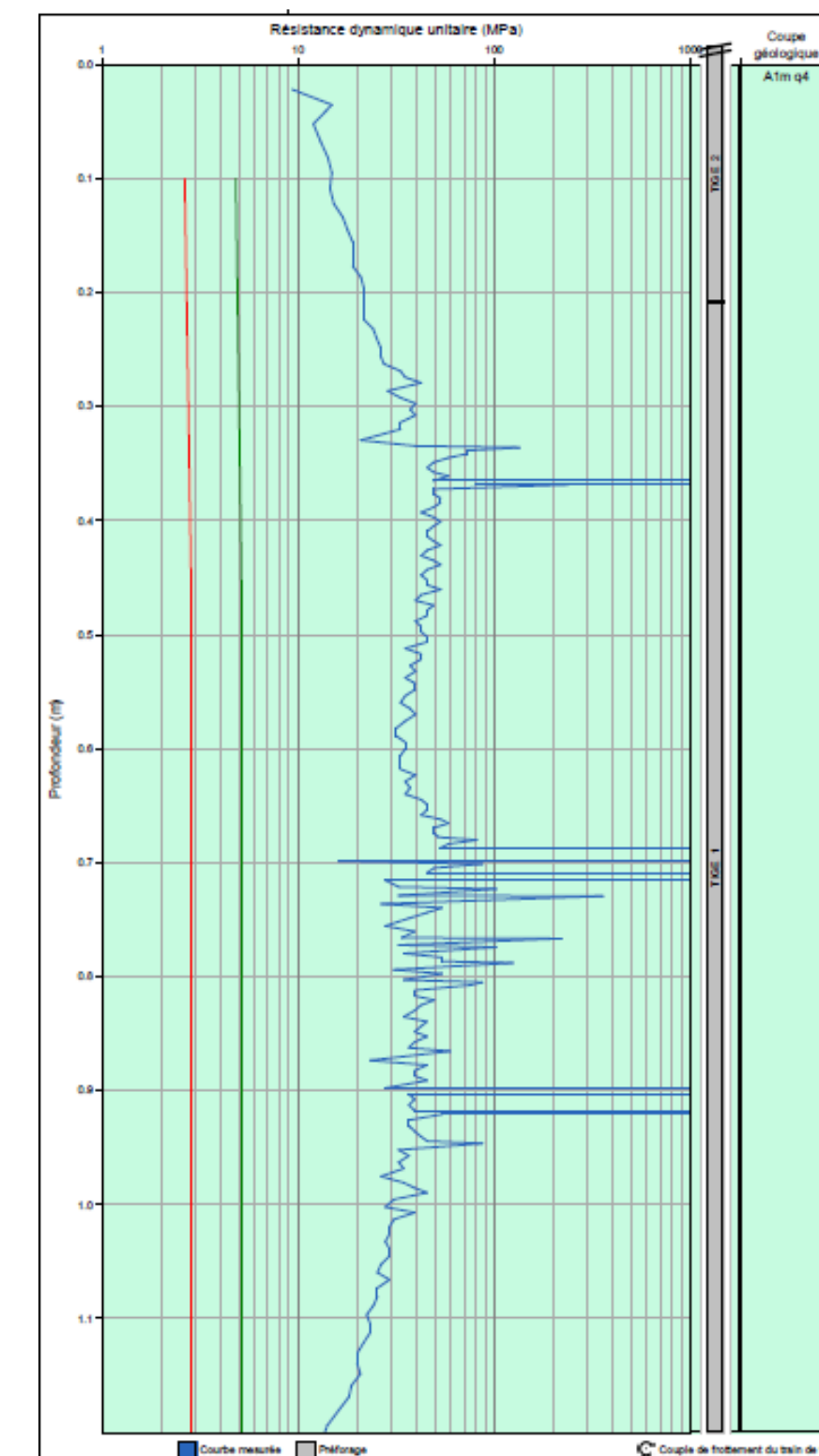
Déflexion (couches de protection horizontale)

	Modalités de traitement	Déflexion moyenne in situ
Planche P5	A1 – 5% liant (Roc AS) – 1% chaux (CaO)	1,08 mm (J+7)
Planche P6	Craie – 5% liant (Roc AS)	0,27 mm (J+7)

Perméabilité (couches de protection horizontale)

	Modalités de traitement	In situ	
		Densité moyenne	Perméabilité ($\cdot 10^{-8}$ m/s)
Planche P5 (couche 2/2)	A1 – 5% Roc AS + CaO	95,4 %	2 à 3
Planche P6 (couche 2/2)	R12 + 5% Roc SC	102,9 %	0,1 à 0,2

Pénétrromètre



Essais JET in situ Pas d'érosion



Etude in situ

Réalisation d'un bassin



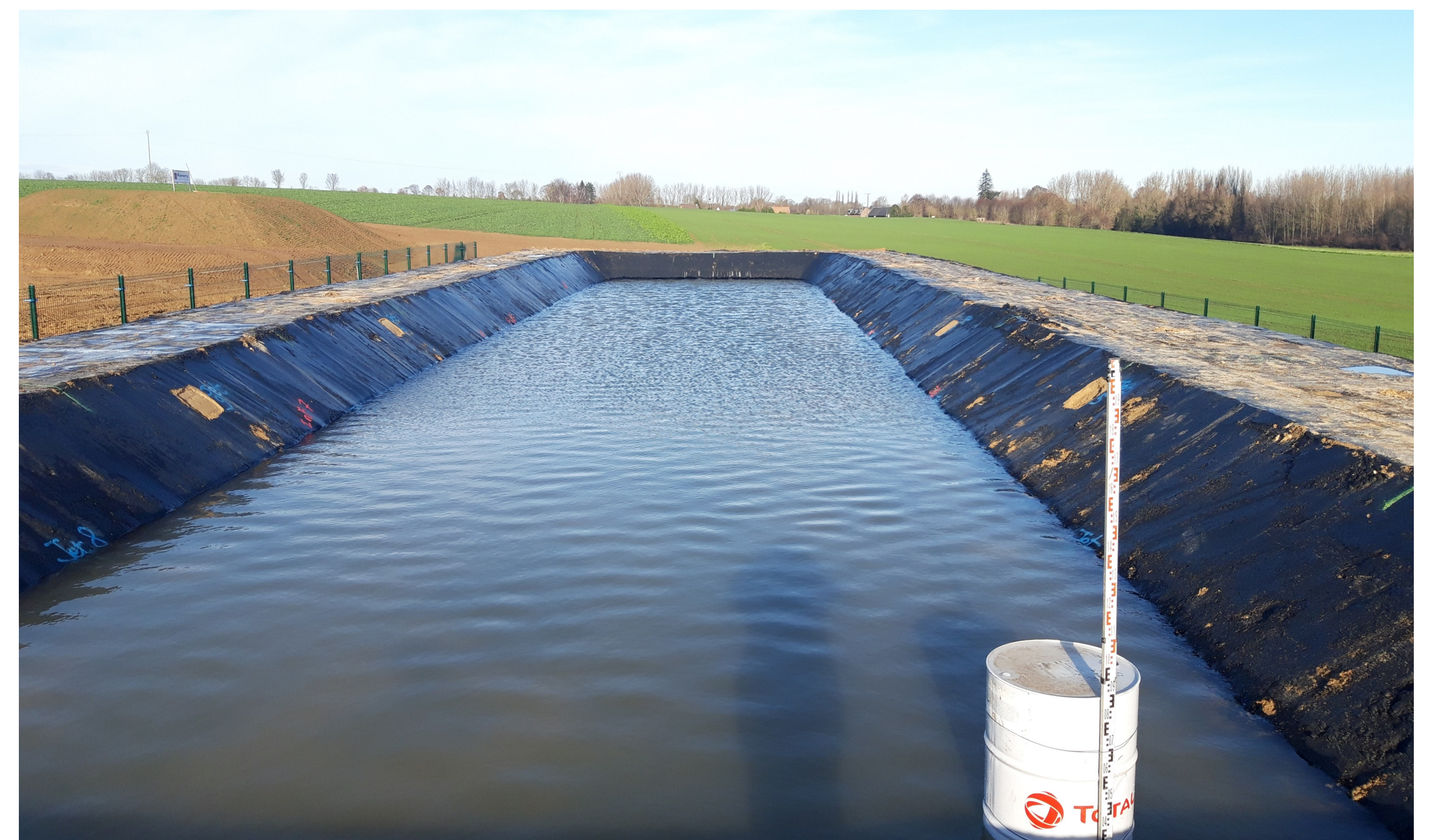
Etude in situ

Réalisation d'un bassin



Etude in situ

Réalisation d'un bassin



Comparaison résultats labo Vs in situ

Couches d'étanchéité

	Modalités de traitement	Perméabilité labo ($\cdot 10^{-8}$ m/s) (densité 95 %)		In situ	
		Confection classique	Confection dynamique	Densité moyenne	Perméabilité ($\cdot 10^{-8}$ m/s)
Planche P1	A2 – 2% bentonite – 1% chaux	2,5	Non testé	99 % (1)	0,08 à 0,4 [0,4]
Planche P2	A2 – 2% bentonite	0,7	0,24	96,3 % (2)	0,01 à 1 [0,1]
Planche P3	A1 – 2% bentonite – 1% chaux	4	Non testé	101,3 % (2)	0,01 à 1 [0,5]
Planche P4	A1 – 2% bentonite	5,5	0,09	100,5 % (1/2)	0,06 à 0,1

Comparaison résultats labo Vs in situ

Couches de protection

	Modalités de traitement	Résistance à la traction indirecte au labo (compactage 98%) –R _{IT}	Déflexion moyenne in situ
Planche P5	A1 – 5% liant (Roc AS) – 1% chaux (CaO)	0,16 MPa (J+14)	1,08 mm (J+7)
		0,24 MPa (J+28)	
		0,41 MPa (J+60)	
		0,43 MPa (J+90)	
Planche P6	Craie – 5% liant (Roc AS)	0,31 MPa (J+20) 0,33 MPa (J+28)	0,27 mm (J+7)

	Modalités de traitement	Essais JET laboratoire (compactage 98 %)	Essais JET in situ
Planche P5	A1 – 5% liant (Roc AS) – 1% chaux (CaO)	Contrainte critique T _c > 1,25 kPa (limite appareil)	Contrainte critique T _c > 200 Pa (limite appareil)
		Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)	Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)
Planche P6	Craie – 5% liant (Roc AS)	Contrainte critique T _c > 1,12 kPa (limite appareil) Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)	Contrainte critique T _c > 200 Pa (limite appareil) Coefficient d'érosion : non mesurable (pas d'érosion)

Evolution de l'état du bassin

Bassin mis en eau (1 an) et campagne d'essais 2021

- Suivi du niveau d'eau et remplissage au besoin (2020/2021)
- Vidange du bassin (11/2021)
- Relevé de l'état général du bassin
- Réalisation de fouilles en gradin
- Réalisation d'essai :
 - JET
 - Perméabilité
 - Pénétrromètre dynamique



Evolution de l'état du bassin

État du bassin après 1 an de mise en eau

- Dépôts superficiels seulement (matériaux issus des talus) et l'enduit de protection est toujours en place
- Aucune dégradation dans l'état de surface (craie ou limon)



Evolution de l'état du bassin

État du bassin après 1 an de mise en eau

- Très grandes difficultés pour réaliser les fouilles (matériaux très durs)



Evolution de l'état du bassin



Evolution de l'état du bassin

État du bassin après 1 an de mise en eau

- Décollement du matériau dans certaines zones dans le talus (zones décomprimées par le talutage initial)



Evolution de l'état du bassin

Résultats des essais sur la couche d'étanchéité

➤ Excellentes performances hydriques
Perméabilité < à 5,2 E-09 m/s

Essais	Position	Traitement	Période	Perméabilité
1	Fond de fouille	Limon A1 + 2 % Bentonite	Après 1 an	< à 9,89E-09 m/s
2	Fond de fouille	Limon A1 + 2 % Bentonite	Après 1 an	< à 8,24E-09 m/s
3	Fond de fouille	Limon A1 + 2 % Bentonite	Après 1 an	< à 1,07E-09 m/s
4	Fond de fouille	Limon A1 + 2 % Bentonite	Après 1 an	< à 1,98E-09 m/s
			Valeur moyenne	< à 5,2 E-09 m/s



Evolution de l'état du bassin

Résultats des essais sur la couche de protection

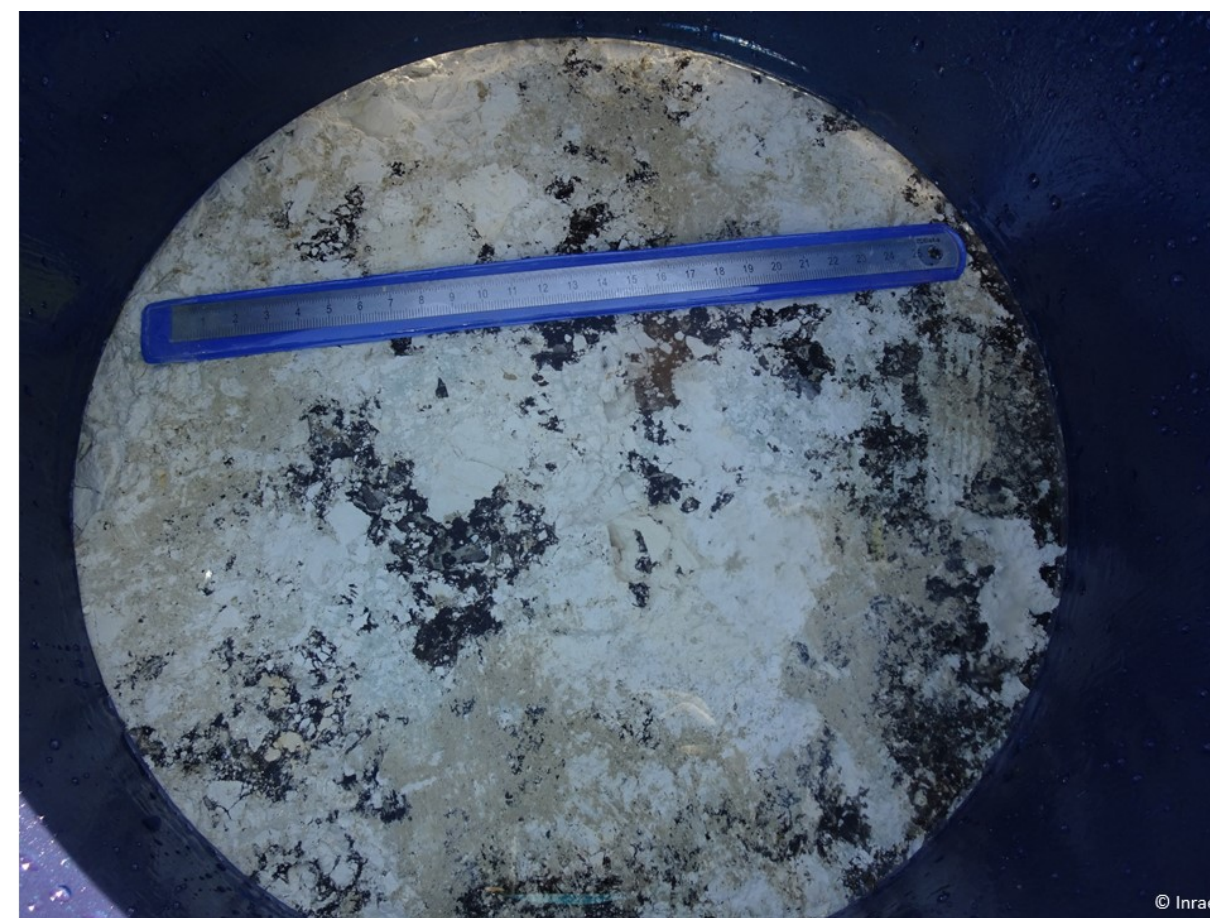
➤ Excellentes performances mécaniques

Pas d'érosion au JET : (avec un nouveau dispositif optimisé de l'INREA)

Contrainte critique minimale estimée : 1400 à 2000 Pa (en surface et en profondeur)



Etat de surface après érosion (Limon)



Etat de surface après érosion (craie)



Evolution de l'état du bassin

Résultats des essais sur la couche de protection

▶ Performances hydriques

Perméabilité du limon : < à 1,5 E-08 m/s

Perméabilité de la craie : < à 5,5 E-10 m/s

Essais	Position	Traitement	Période	Perméabilité
1	- 30 cm/surface	Limon A1 + 1 Cao + 5 % liant	Après 1 an	< à 4,61E-08 m/s
2	Surface	Limon A1 + 1 Cao + 5 % liant	Après 1 an	< à 1,04E-08 m/s
3	- 30 cm/surface	Limon A1 + 1 Cao + 5 % liant	Après 1 an	< à 1,08E-08 m/s
4	Surface	Limon A1 + 1 Cao + 5 % liant	Après 1 an	< à 6,28E-10 m/s
			Valeur moyenne	< à 1,5E-08 m/s

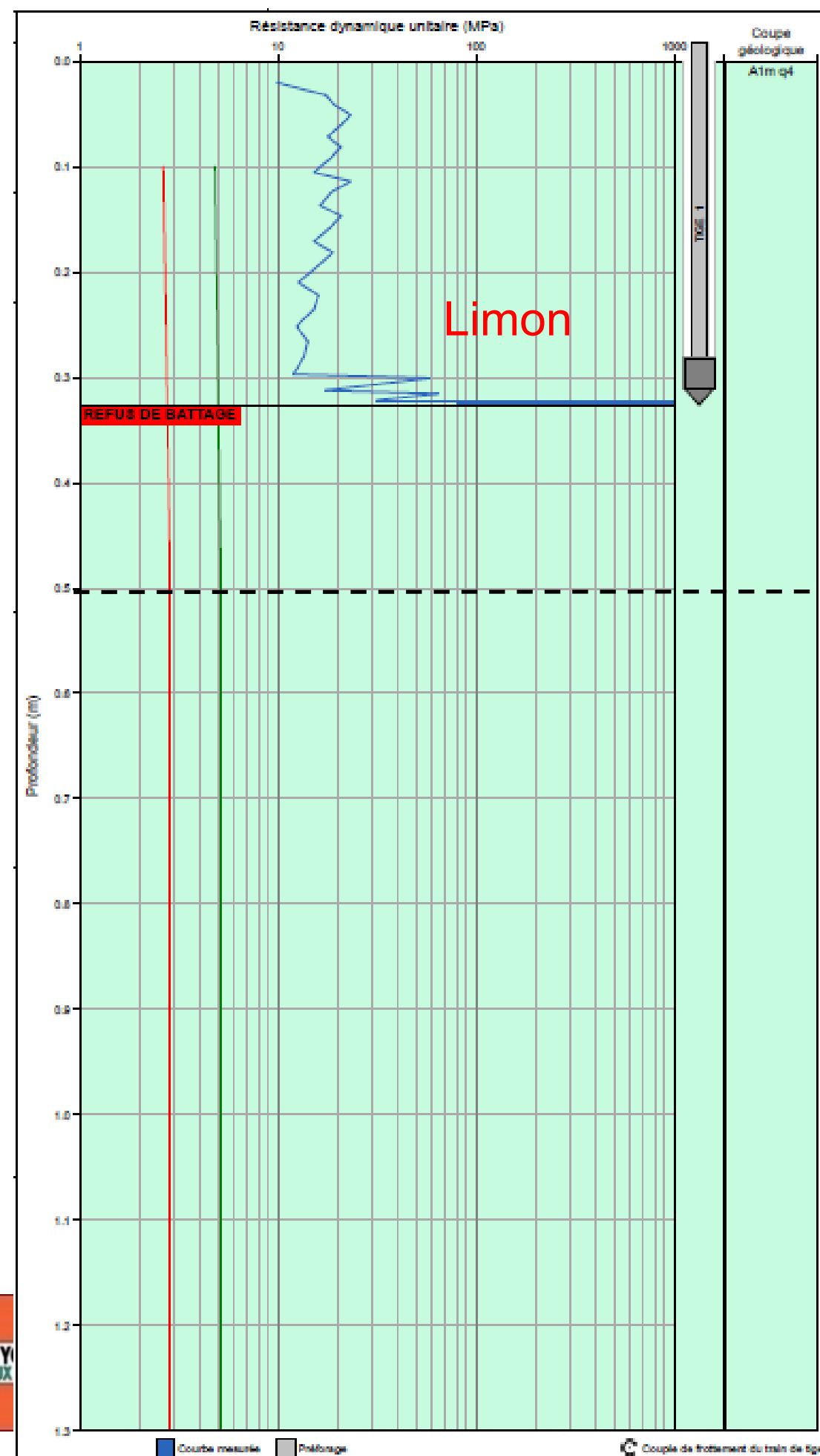
Essais	Position	Traitement	Période	Perméabilité
1	- 30 cm/surface	Craie + 5 % liant	Après 1 an	< à 3,32E-10 m/s
2	Surface	Craie + 5 % liant	Après 1 an	< à 7,66E-10 m/s
			Valeur moyenne	< à 5,5E-10 m/s



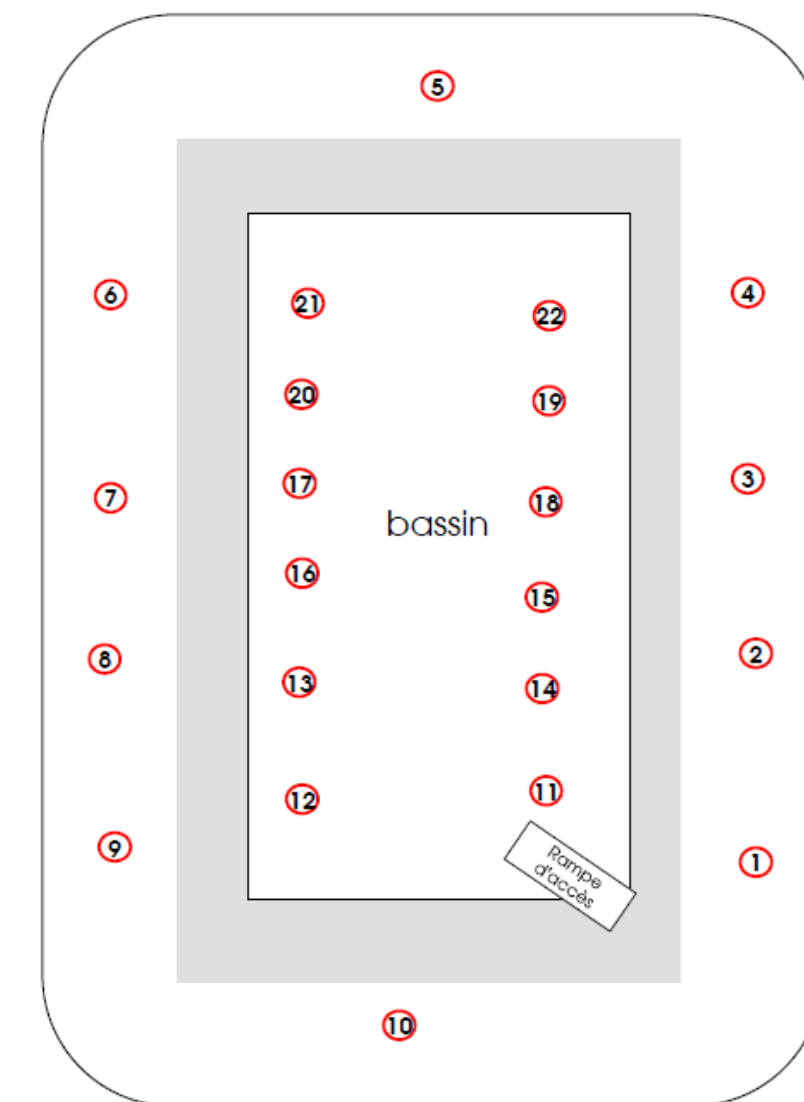
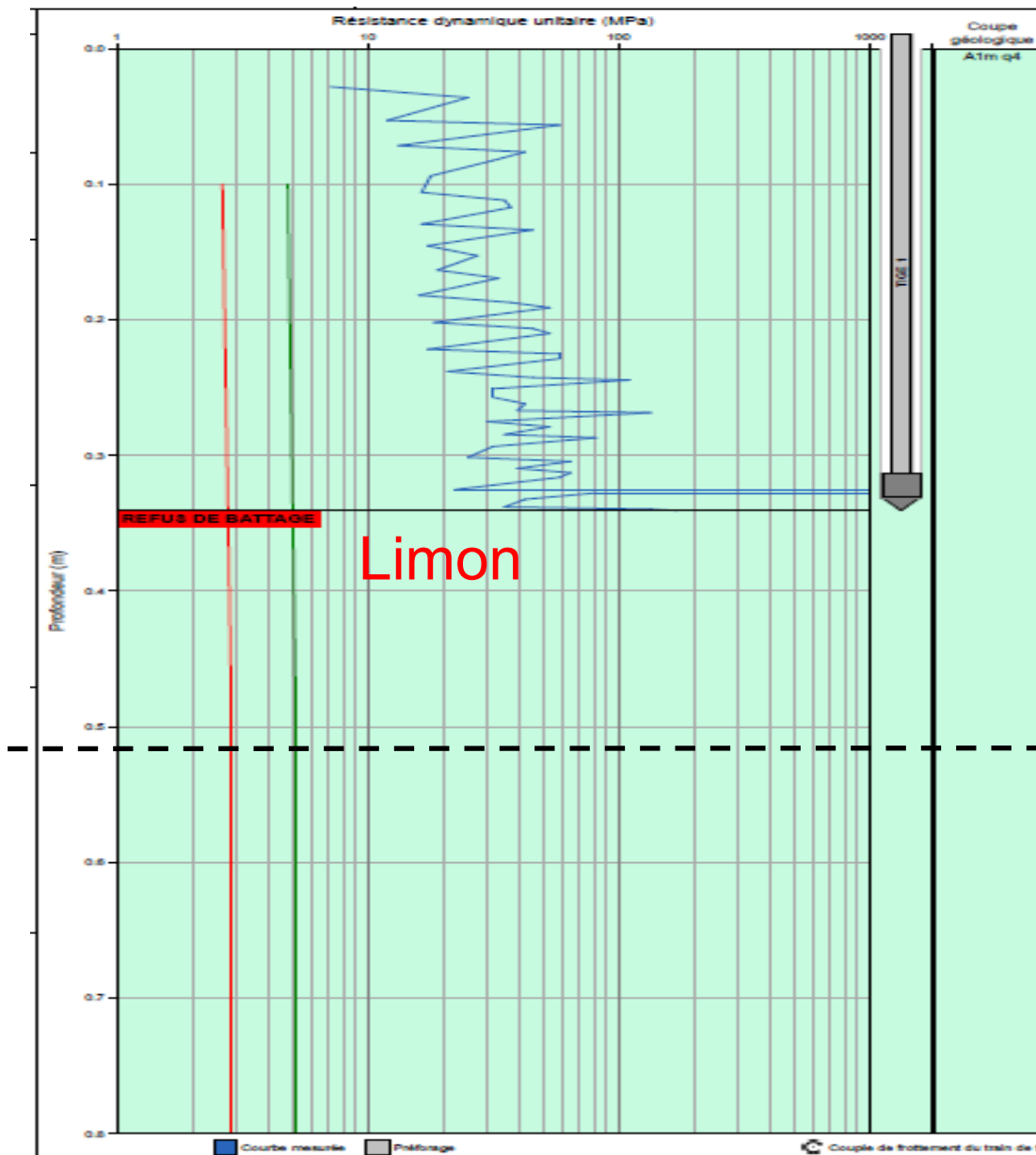
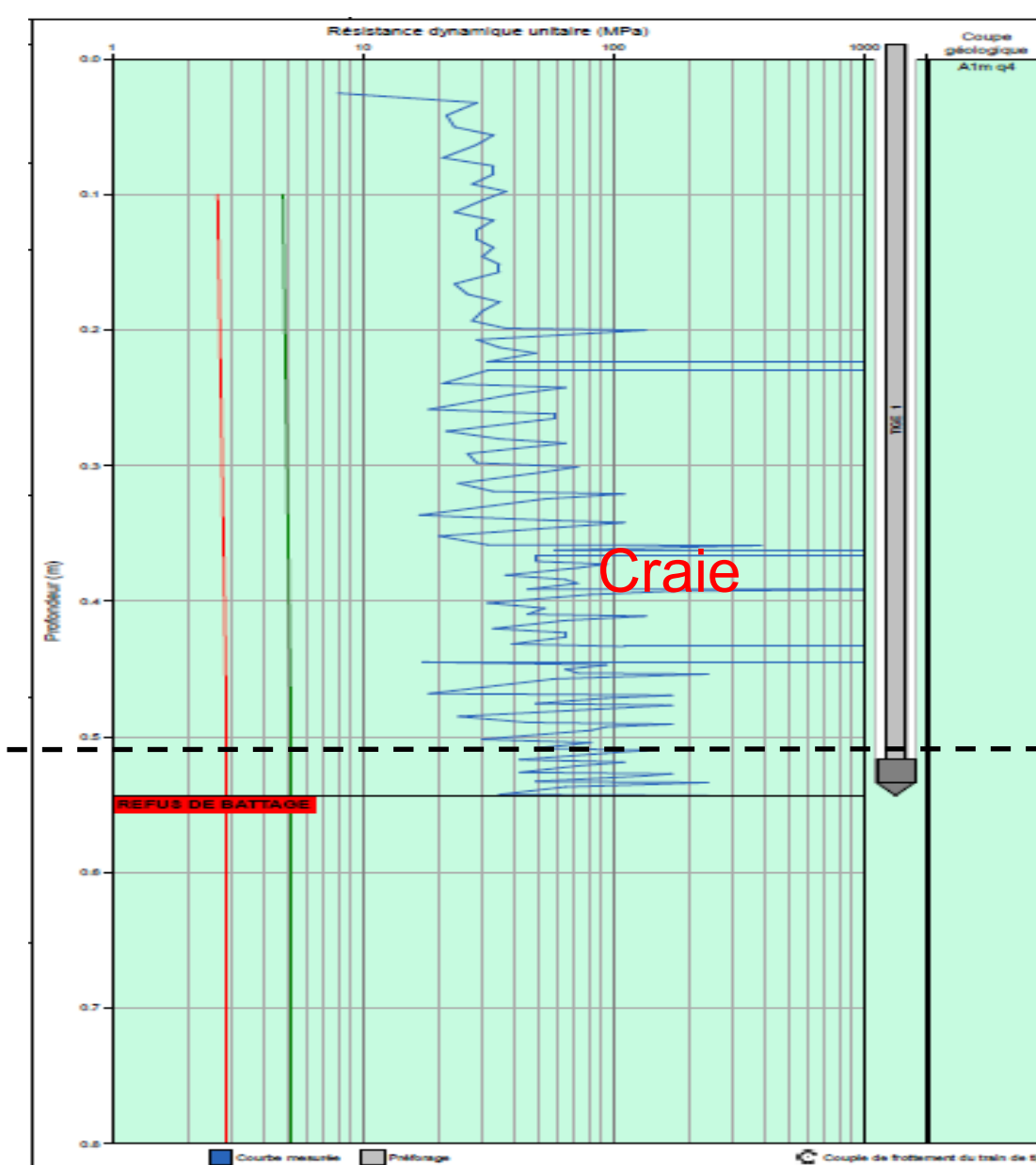
Evolution de l'état du bassin

Résultats des essais sur la couche de protection

Au niveau de la digue



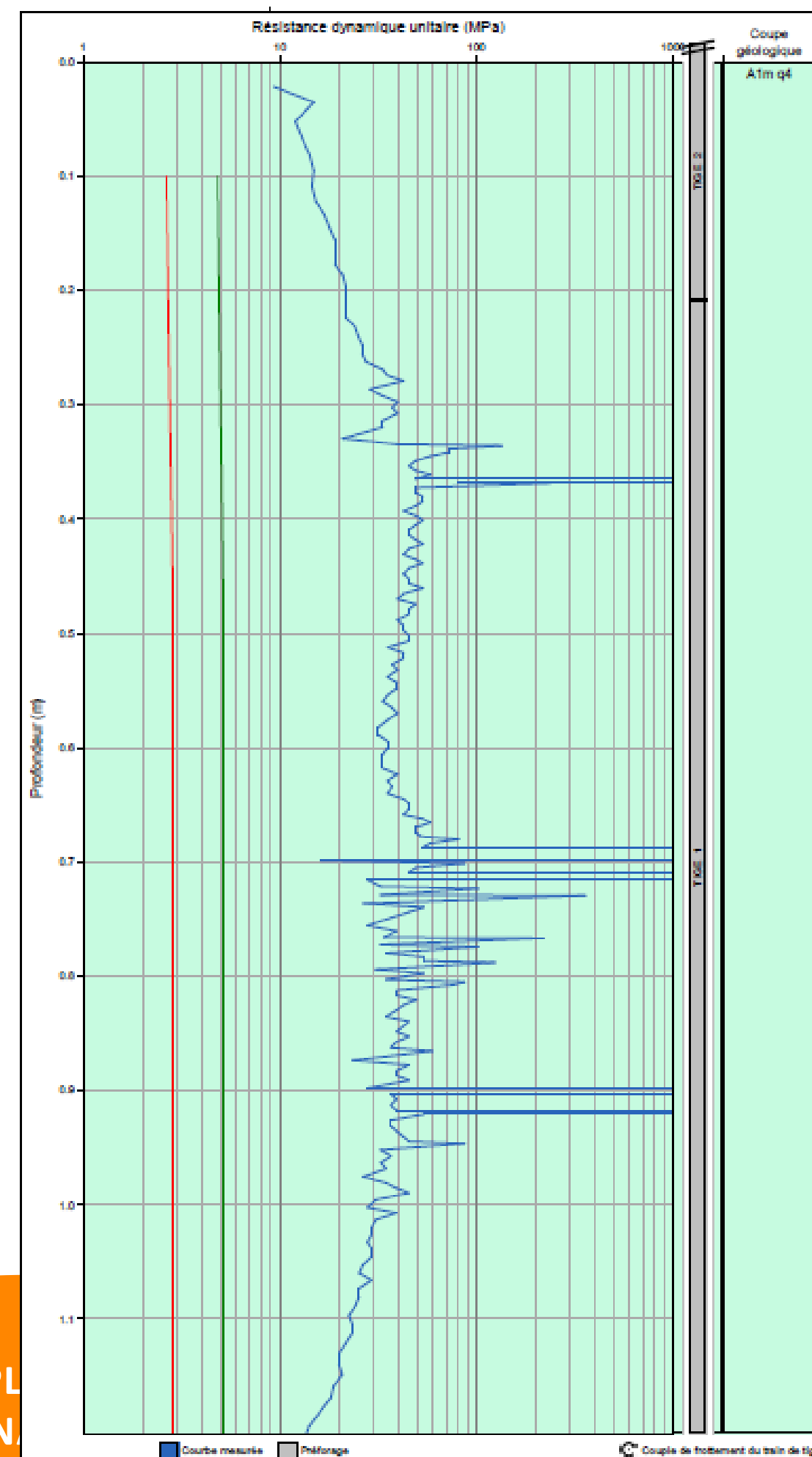
Au niveau du fond du bassin



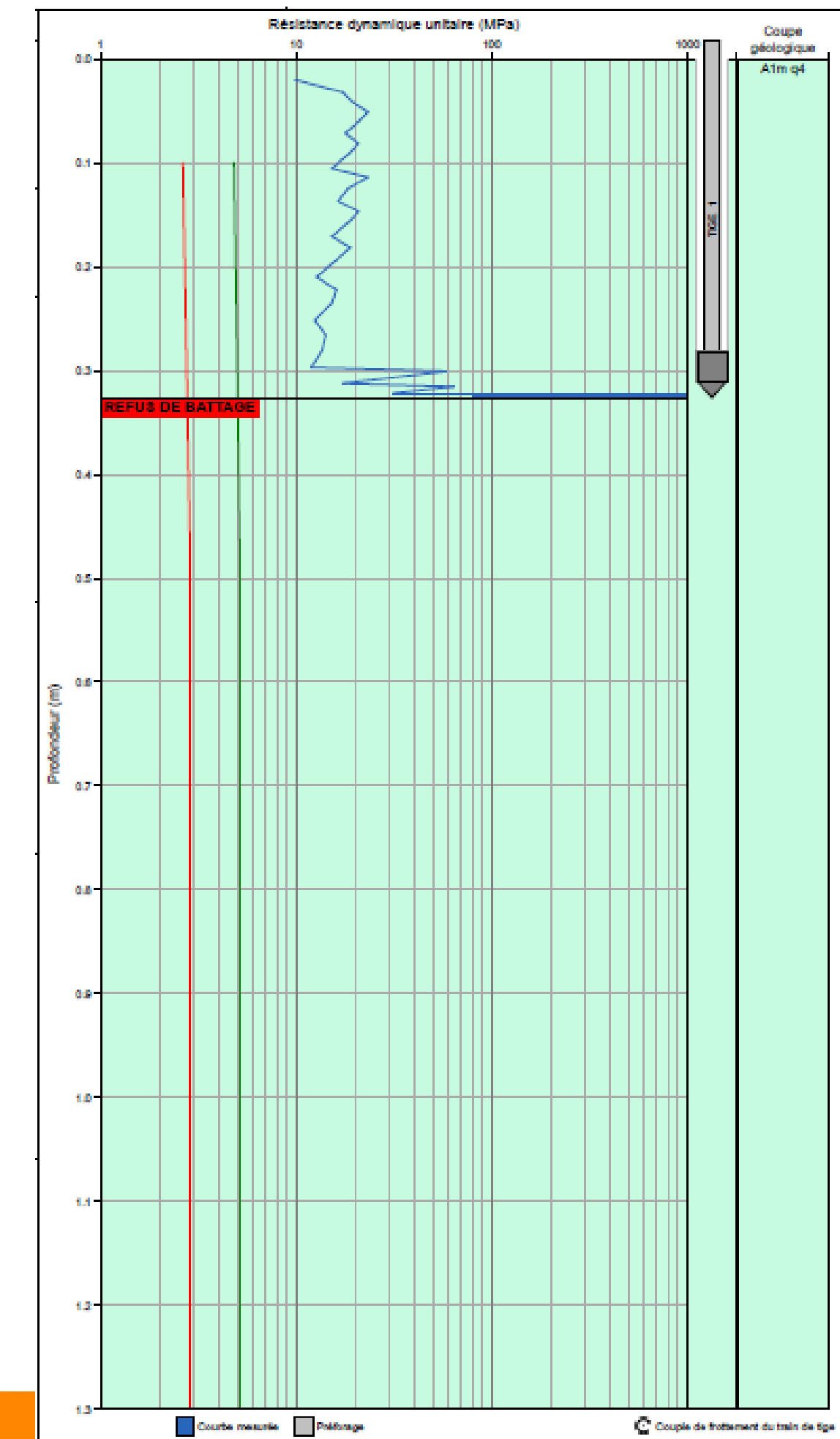
Comparaison avant mise en eau Vs 1 an après mise en eau

Couche de protection : quelques résultats

Au niveau de la digue
Après 1 mois de cure



Au niveau de la digue
Après 12 mois d'immersion



Comparaison avant mise en eau Vs 1 an après mise en eau

Comparaison avant mise en eau Vs 1 an après mise en eau

➤ Couche de protection : quelques résultats

Au niveau du bassin
Après 1 mois de cure

ESSAI	Essai avec érosion				Essai sans érosion
	Contrainte critique τ_c (Pa)		Coefficient d'érosion de Hanson k_d (cm ³ /(s.N))		Contrainte critique minimum τ_{cmin} (Pa)
	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 1	Modèle 2	
Fond de bassin, craie traitée					
2					130
4					138
10					185
Fond de bassin, limons traités					
1					138
7					212
8					195

Au niveau du bassin
Après 12 mois d'immersion

Essai	Craie traitée ou limons traités	Position de l'essai	τ_{cmin} (Pa)	Vitesse d'impact maximum (m.s ⁻¹)
1	Craie traitée	Surface fond bassin	1419	18.5
2	Craie traitée	Fouille -25cm/fond bassin	1642	19.9
3	Craie traitée	Surface fond bassin	1646	19.9
4	Limons traités	Fouille -32cm/fond bassin	1669	20
5	Limons traités	Surface fond bassin	1784	20.7
6	Limons traités	Fouille -35cm/fond bassin	1875	21.2
7	Limons traités	Fouille -18cm/fond bassin	1911	21.4
8	Limons traités	Surface fond bassin	1839	21

Comparaison avant mise en eau Vs 1 an après mise en eau

Evolution des paramètres de sols (limon et craie) après 1 an d'immersion

- Perméabilité : valeurs stables
- Résistance mécanique : résistances mécaniques plus élevées (aucune dégradation en surface et gain de résistance en profondeur)
- Erosion : résistances à l'érosion stables à plus élevées

Tendance confirmée en laboratoire après 1 an d'immersion (comportement mécanique)

Conclusion

- **Le marché des planches expérimentales a permis de montrer que le dispositif d'étanchéité est viable (même en conditions météo extrême et avec un matériau assez défavorable (silts moins argileux))**
- **Le suivi de l'état des planches sera poursuivi avec une mise en eau du bassin et des essais de jet d'ancre**
- **Le suivi et l'analyse des données de l'instrumentation sont actuellement en cours**

Merci de votre attention