

**ANNEXE 3 :
ETUDE D'IMPACT DE
L'APPROFONDISSEMENT DE LA
CARRIERE SUR LA STABILITE
(GEOLITHE, JUIN 2021)**

IMERYS CERAMICS
KAOLINS DE BRETAGNE
PLOEMEUR (56)
CARRIÈRE DE
KERGANTIC/LANVRIAN/LOPEHEUR
**IMPACT DE L'APPROFONDISSEMENT DE LA
CARRIÈRE SUR LA STABILITÉ**

À LA DEMANDE ET POUR LE COMPTE DE IMERYS CERAMICS

Dossier	21_391_I_1	
Indice	Modifications	Date
0	Document provisoire	20/05/2021
a	Document définitif	14/06/2021

Nombre de pages : 25



LIEU :	Carrière de Kergantic/Lanvrian/Lopeheur
COMMUNE :	PLOEMEUR (56)
OBJET :	Impact de l'approfondissement de la carrière sur la stabilité
TYPE DE MISSION :	Diagnostic géotechnique G5 DIAG
CLIENT :	IMERYS CERAMICS
DOSSIER SUIVI PAR :	M. LECHENAUULT

CHARGE D'AFFAIRE :	F. ROY
CHEF DE PROJET :	L. CHASTANET
INTERVENANTS :	L. CHASTANET S. DEFORTIS
NOMBRE DE PAGES :	25
REFERENCE DOCUMENT	21_391_IMERYS

Rédacteur : L. CHASTANET

Contrôle : R. LEROUX-MALLOUF

Visa :

Visa :

SOMMAIRE

1 - ANALYSE DE L'ETAT INITIAL	4
1.1 - contexte géologique du site	4
1.1.1 - Contexte réglementaire et risques naturels.....	4
1.1.2 - Gisement en place.....	6
1.1.3 - Contexte structural.....	6
1.1.4 - Etat de la stabilité du site actuel	7
1.1.5 - Contexte hydrogéologique	12
2 - EFFETS DU PROJET SUR LA STABILITE	13
2.1 - Approfondissement de la fosse	13
2.1.1 - Phasage projeté	13
2.1.2 - Usages ponctuels de tirs de mines.....	14
2.1.3 - Impact de l'approfondissement du secteur Lopeheur sur les habitations	14
2.2 - Poursuites de l'exploitation des lagunes avec les cycles remplissages/vidanges	16
2.2.1 - Lagune prairie.....	16
2.2.2 - St Jude	16
2.2.3 - Kérantonnel.....	17
2.2.4 - Lopeheur.....	17
3 - MESURES NECESSAIRES POUR EVITER/REDUIRE, COMPENSER LES EFFETS	18
3.1 - Mesures concernant la géométrie, gestion des lagunes.	18
3.1.1 - Reprise des matériaux lagunaires	18
3.2 - Mesures concernant la hauteur et la pente des fronts pour garantir pendant l'exploitation la stabilité et la sécurité	18
3.2.1 - Mesures de sécurité actuelles.....	18
3.2.2 - Stabilité des fronts	19
3.3 - Mesures à prendre pour garantir la stabilité du site (lagunes + fronts) dans le cadre de la remise en état.....	25
3.4 - Mesures à prendre pour garantir la stabilité du site (Verses et backfills) dans le cadre de la remise en état	26

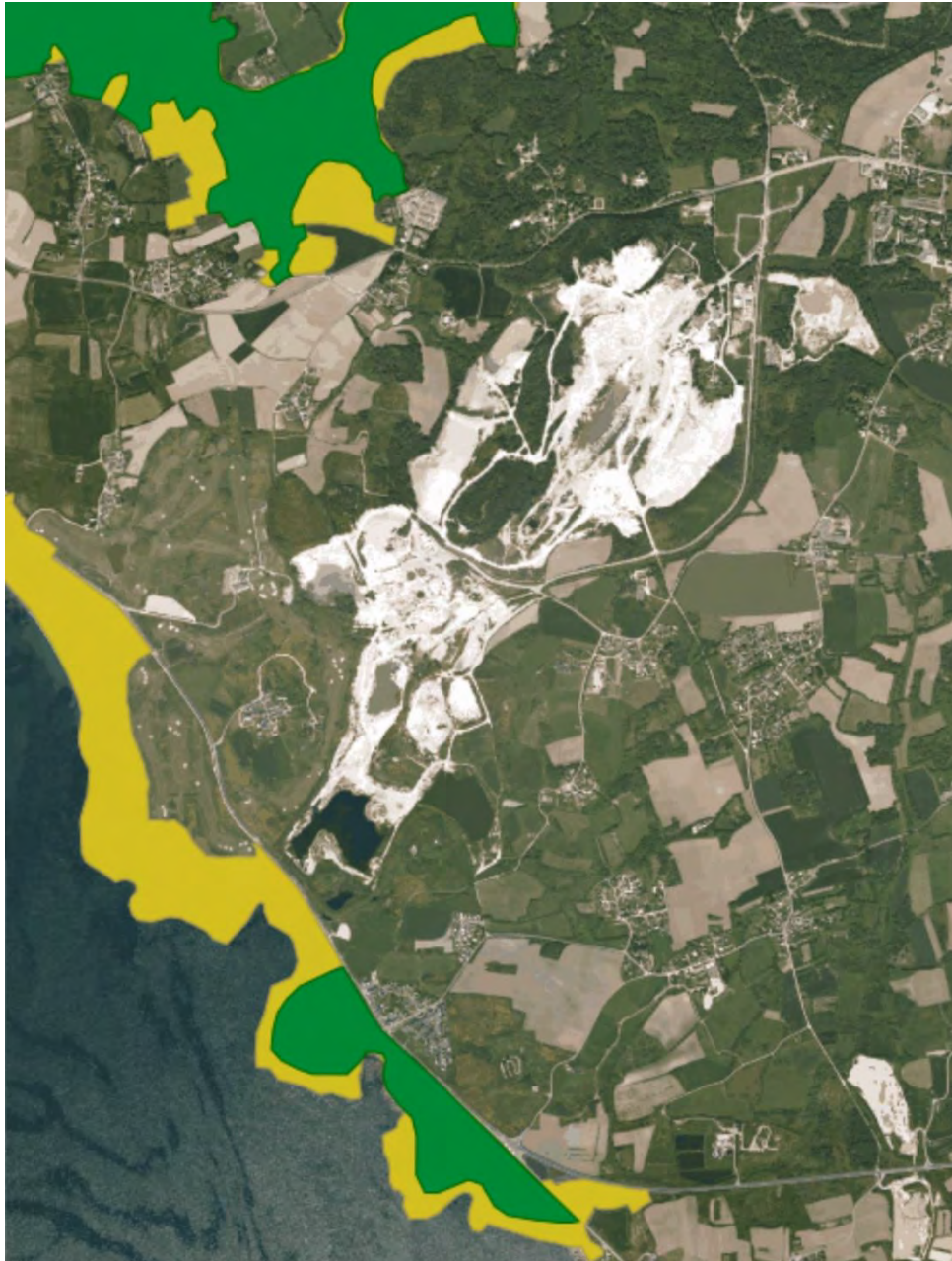
1 - ANALYSE DE L'ETAT INITIAL

1.1 - CONTEXTE GEOLOGIQUE DU SITE

1.1.1 - *Contexte réglementaire et risques naturels*

1.1.1.1 - *Espaces protégés*

La carrière est bordée à l'ouest et au sud par une zone Natura 2000 associée à une ZNIEFF de type 1 :



Espaces protégés (source Infoterre)

-  Zone Natura 2000 : FR5300059 - Rivière Laita, pointe du Talud, étangs du Loc'h et de Lannec
-  ZNIEFF type I : Le Couregan

1.1.1.2 - Plans de prévention

La commune de Ploemeur est soumise à un plan de prévention des risques naturels :
PPRn - Inondation par submersion marine - Marée de tempête
Anse du Stole – Prescrit le 13/12/2011

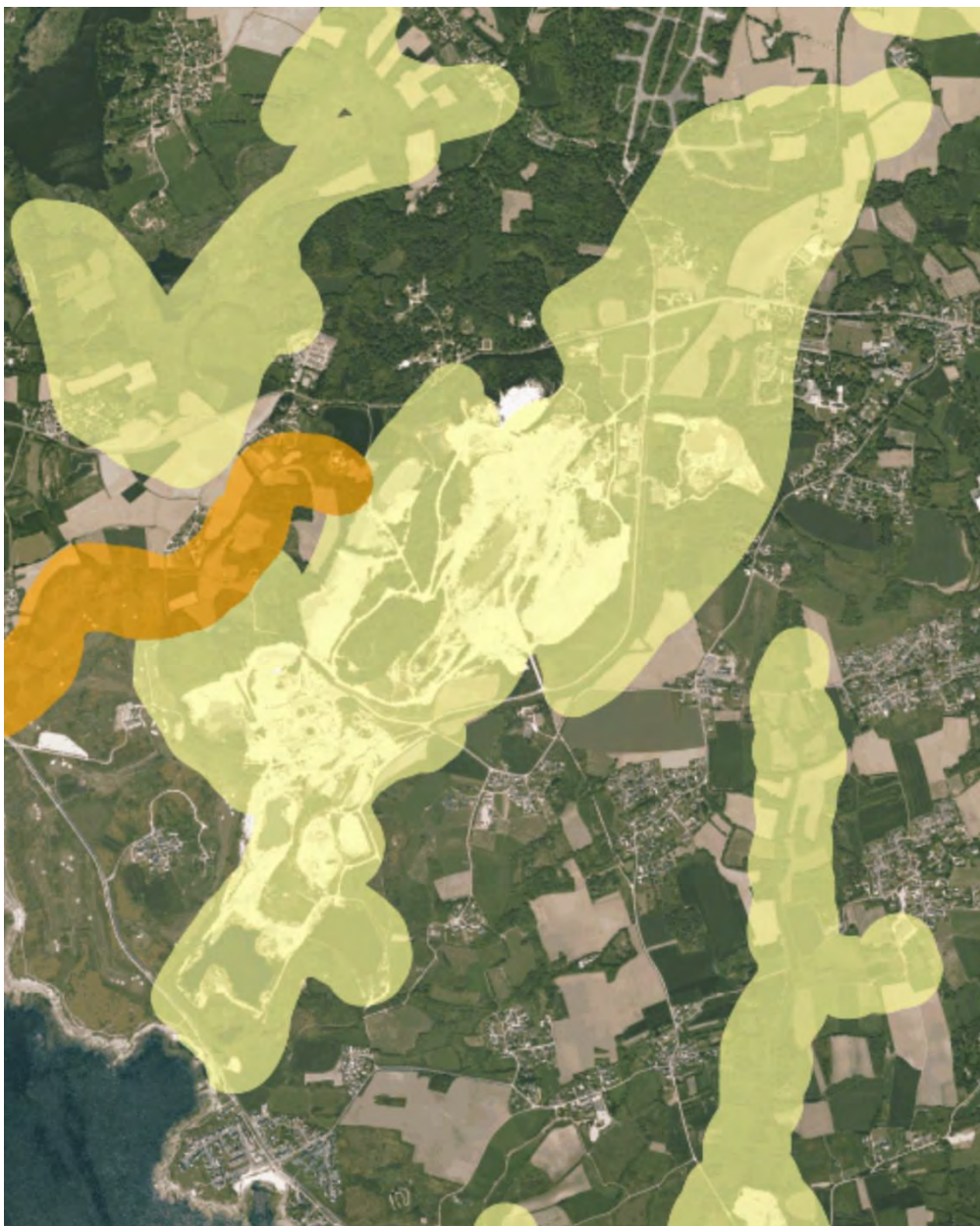
1.1.1.3 - Risques naturels

1.1.1.3.A - Sismicité

La commune de Ploemeur est classée en zone de sismicité 2-Faible.

1.1.1.3.B - Retrait/gonflement des argiles

La zone de la carrière **se situe dans un contexte d'exposition faible** au phénomène de retrait-gonflement des argiles.



Aléa retrait/gonflement (source Infoterre)

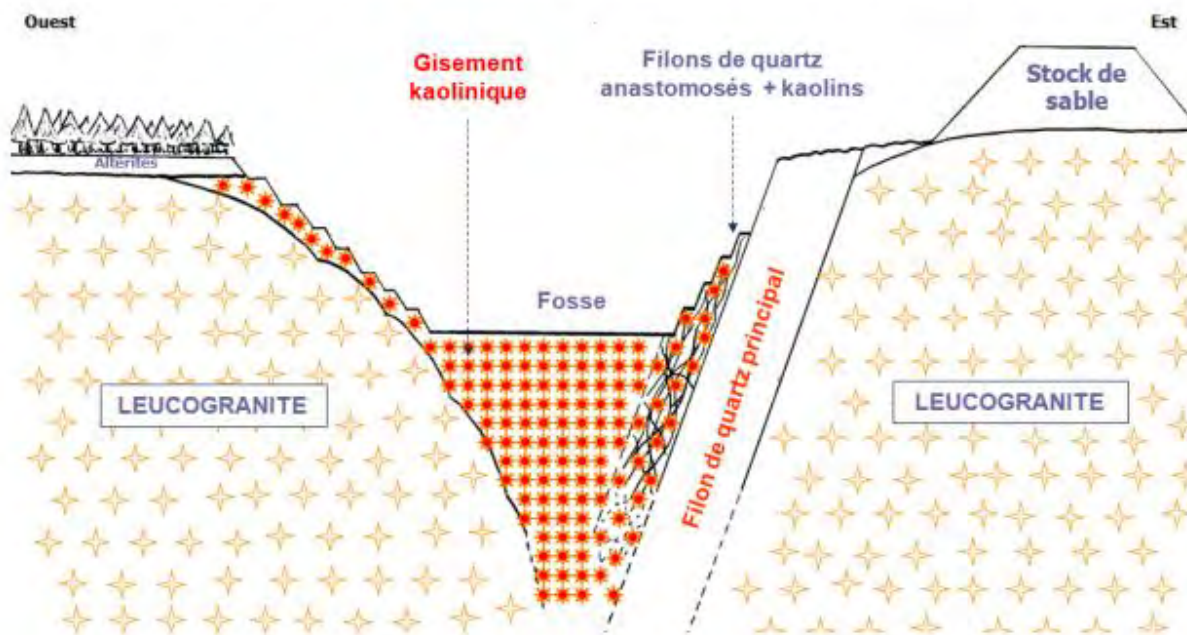
1.1.2 - Gisement en place

Le gisement exploité sur le site des Kaolins de Ploemeur résulte de l'altération hydrothermale et météorique du leucogranite (granite alumineux à biotite et muscovite) de Ploemeur d'âge carbonifère qui s'est opérée au bénéfice d'un accident tectonique :

- le kaolin provient de l'altération du granite. Il se traduit minéralogiquement par la transformation du feldspath en kaolinite,
- les éléments non altérés (quartz, micas) font partie intégrante de la matrice kaolinique.

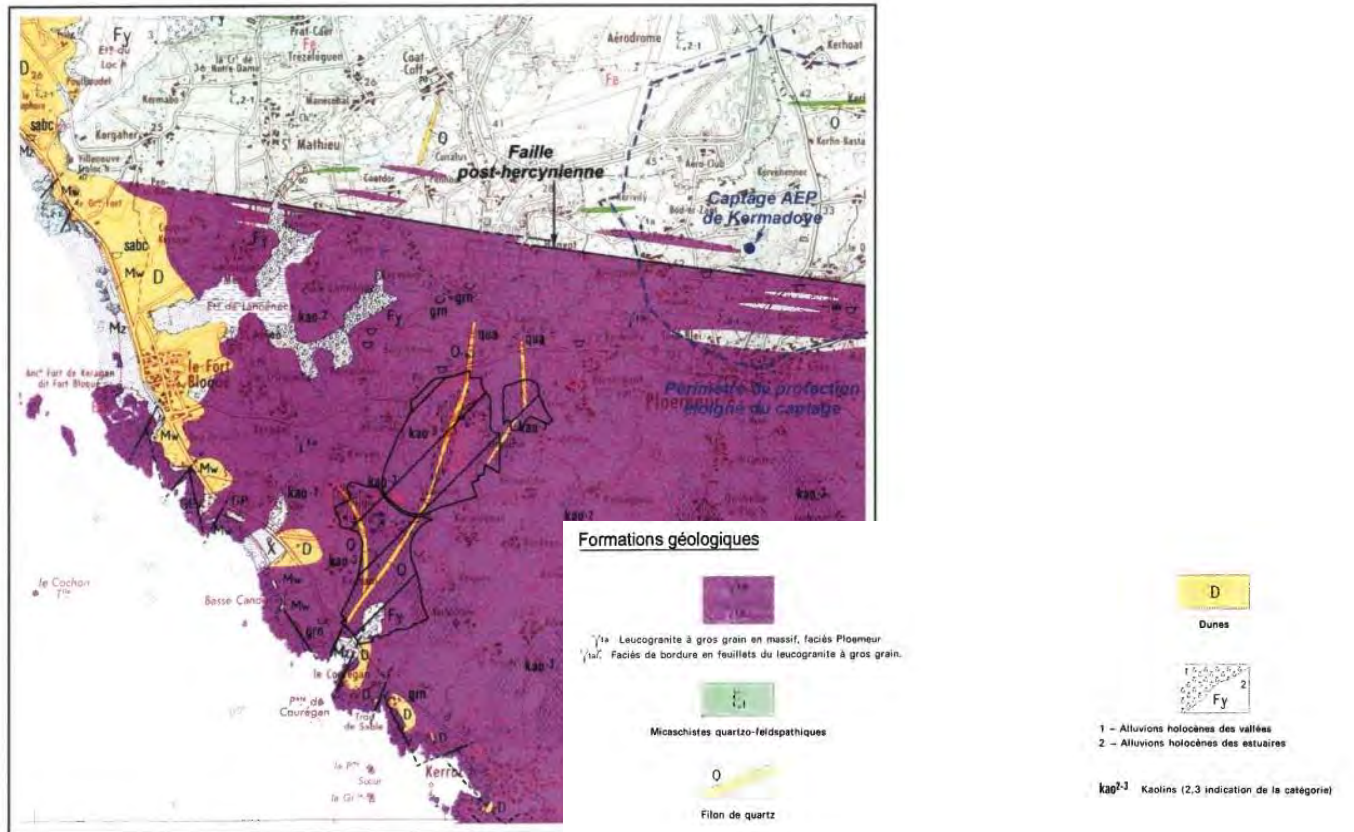
Le gisement de Kergantic s'étend sur environ 2,5 km selon une direction NNE – SSO et suit un filon de quartz d'origine hydrothermale puissant de 5 m à 15 m, avec un pendage très redressé (75-80°). Il s'agit d'un granite à grain moyen-grossier, riche en muscovite et à biotite.

Coupe Est-Ouest du gisement exploité sur la carrière de Kergantic (source : IMERYS)



1.1.3 - Contexte structural

La mise en place du gisement est liée directement au développement de la tectonique cisailante de l'orogénèse hercynienne. Les formations de kaolins et les filons de Quartz au sein du leucogranite résultent de phénomènes tectoniques hercyniens et de phénomènes d'altération de la roche mère. Ce substratum granitique est surmonté au nord par des micaschistes plus anciens. Une faille orientée E-O individualise ces 2 formations (leuco-granite et micaschiste). Elle est positionnée à environ 1 km au Nord du site des Kaolins.



1.1.4 - Etat de la stabilité du site actuel

L'état de stabilité actuel du site est présenté par type de matériaux constituant les fronts d'exploitation.

1.1.4.1 - Quartz

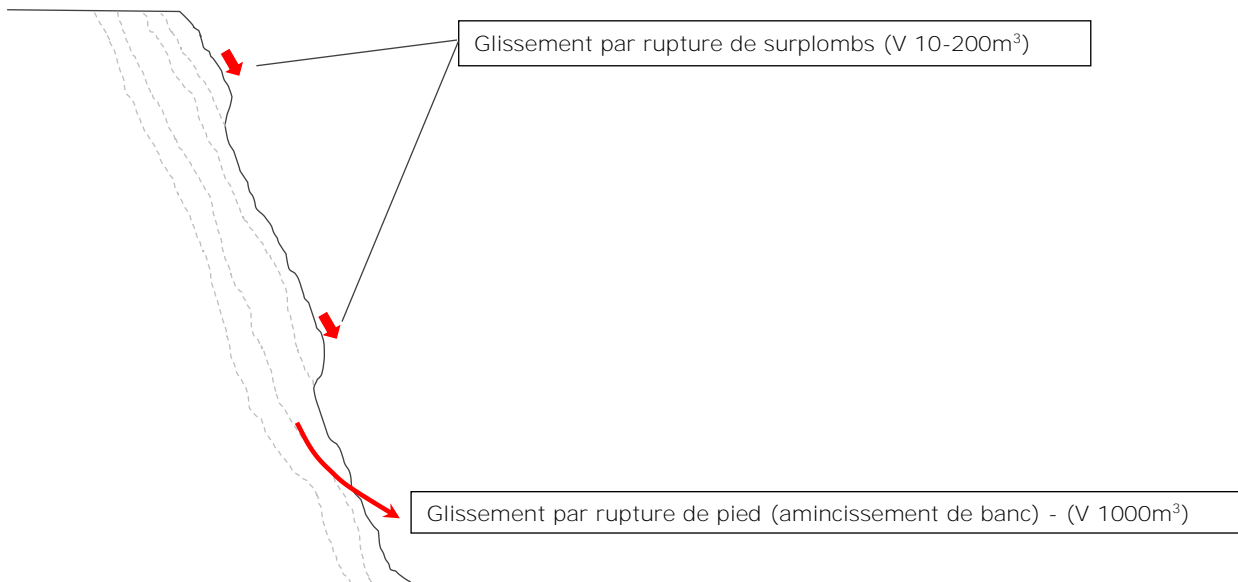
Le quartz montre une décompression active et une altération accentuée par les arrivées d'eau. Sa structure en plans ondulés permet le développement de glissements plans d'écaillés non butés de 10 m³ - 200 m³ (présents sur toute la surface), mais aussi de glissements plans d'un volume de 1000 m³ par rupture de pied intéressant toute la hauteur de talus.

La structure, la géométrie et l'état d'altération du quartz étant globalement comparables sur l'ensemble du linéaire, la reproduction d'évènements de grande ampleur est probable sur tout le front (hors faciès anastomosé car moins haut et moins structuré).



Illustration des plans ondulants et de l'amincissement des bancs

Figure 1-1: Schéma du mécanisme de glissement du filon de Quartz



1.1.4.2 - Kaolins

Les kaolins montrent une cohésion élevée sur les gradins récents avec une bonne stabilité à court terme.

A long terme, la géométrie des gradins ne permet pas de conserver le même niveau de stabilité en raison de la dégradation des caractéristiques mécaniques par le ravinement des eaux de surface. **On note la présence d'effondrements des anciens gradins pour des volumes allant jusqu'à 200 m³.**

1.1.4.3 - Lagunes

Les lagunes sont composées de matériaux fins peu compacts et sans cohésion. Le glissement de 10 000 m³ - 15 000 m³ est très certainement lié à une exploitation frontale sur une trop grande hauteur, ainsi qu'à une augmentation de la teneur en eau en base, ce qui a eu pour conséquence de modifier la consistance des matériaux.

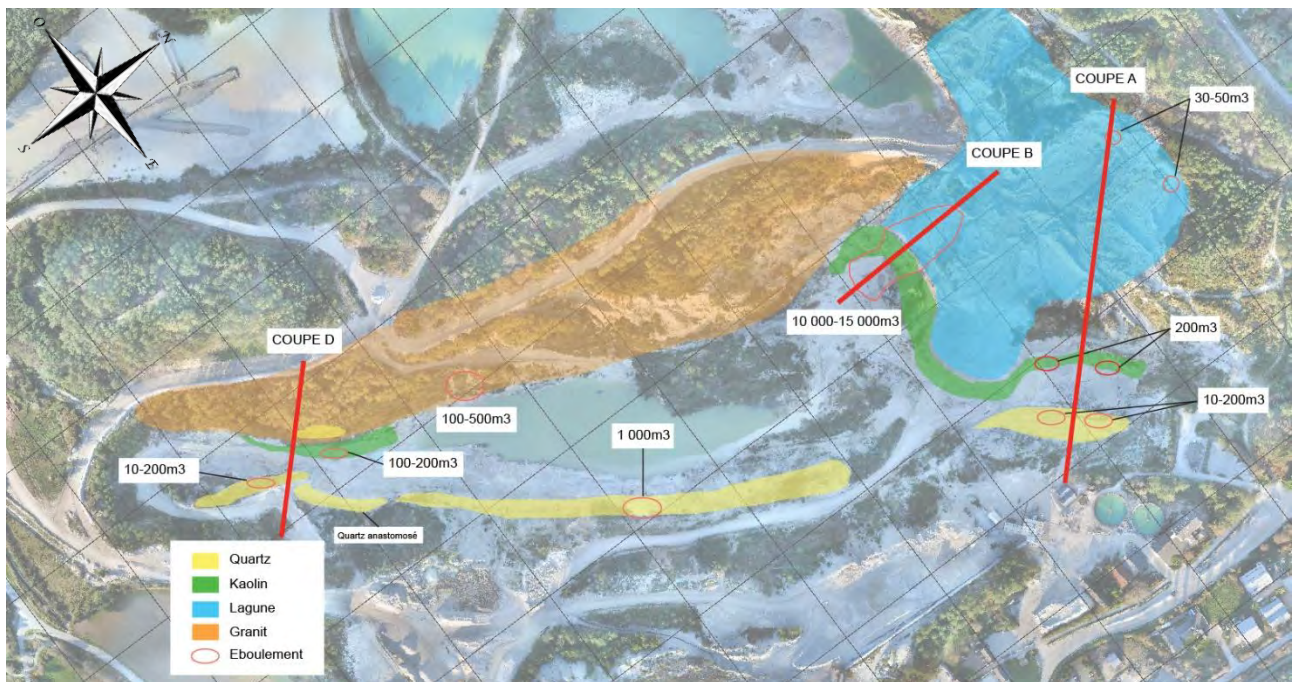
Compte tenu de la sensibilité des matériaux à l'état hydrique et de leurs caractéristiques mécaniques, une exploitation en fronts verticaux de grande hauteur ne permet pas d'assurer leur stabilité, même à court terme. La reproduction de glissements de grande envergure est possible, y compris pour les lagunes en partie haute.

1.1.4.4 - Granites

Les granites montrent une forte hétérogénéité d'altération ainsi que des caractéristiques mécaniques se dégradant dans le temps, lié notamment à la décompression et au lessivage des gradins anciens. Pour certaines parties, notamment au droit de la coupe D, le granite apparaît plutôt compétent sauf la partie haute qui apparaît altérée et décomprimée avec la présence d'un éboulement de quelques dizaines de m³. Vers le Nord, le granite est très altéré et instable, les gradins se déstructurant peu à peu par des glissements en grand avec une pente résiduelle de l'ordre de 45° - 50°.

1.1.4.5 - Gestion des eaux

La gestion des eaux de carrière et des eaux de pluie montre des aspects défavorables à la stabilité des talus. Nous pouvons retenir notamment les phénomènes de ravinement/infiltration et d'accumulation d'eau en pied de talus.



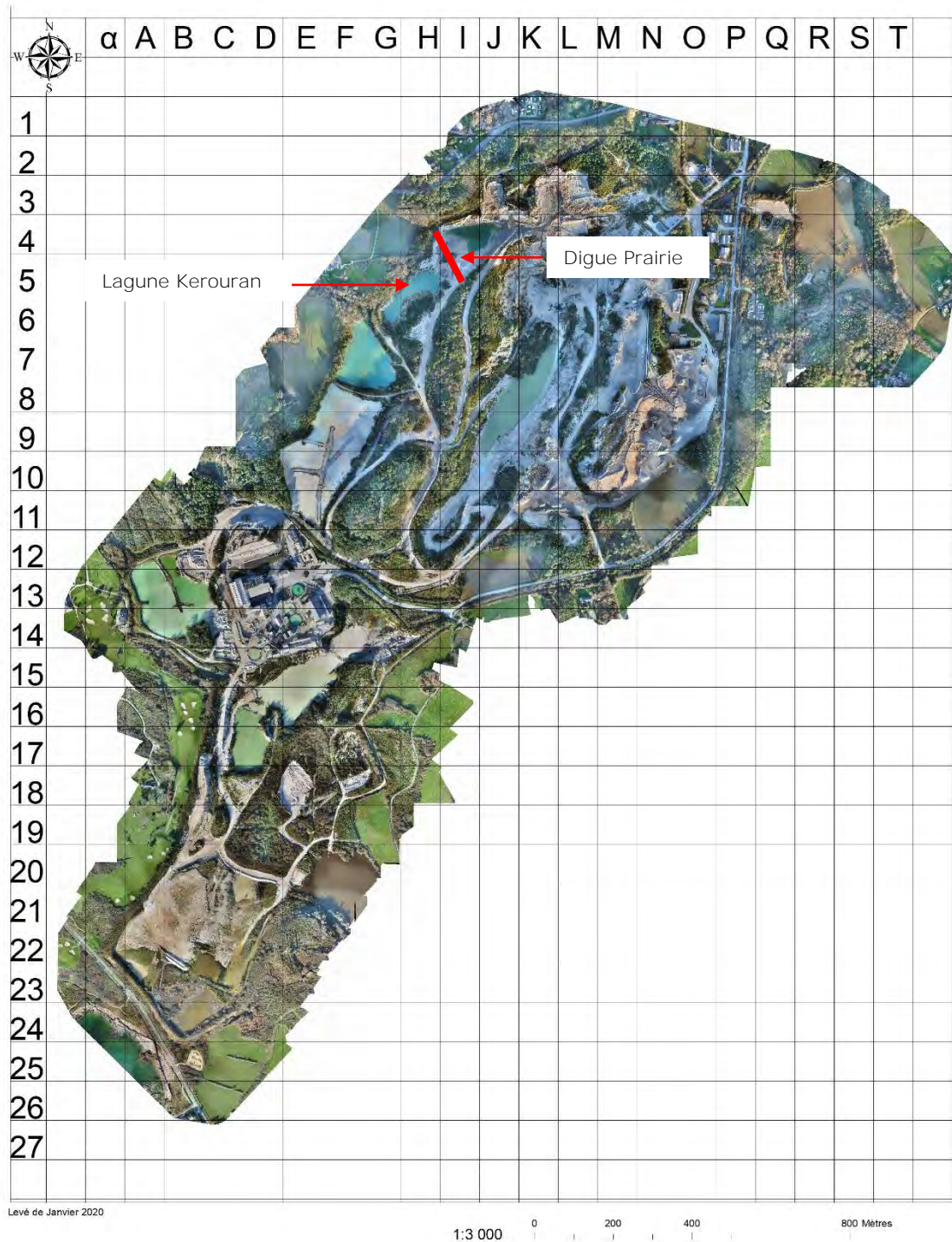
Localisation des principaux phénomènes et éboulements sur la fosse de Kergantic

1.1.4.7 - Digue Prairie

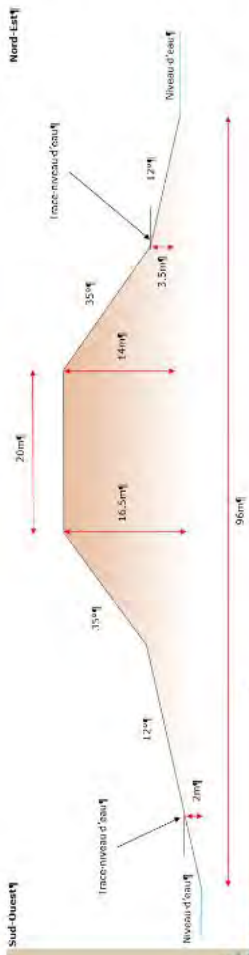
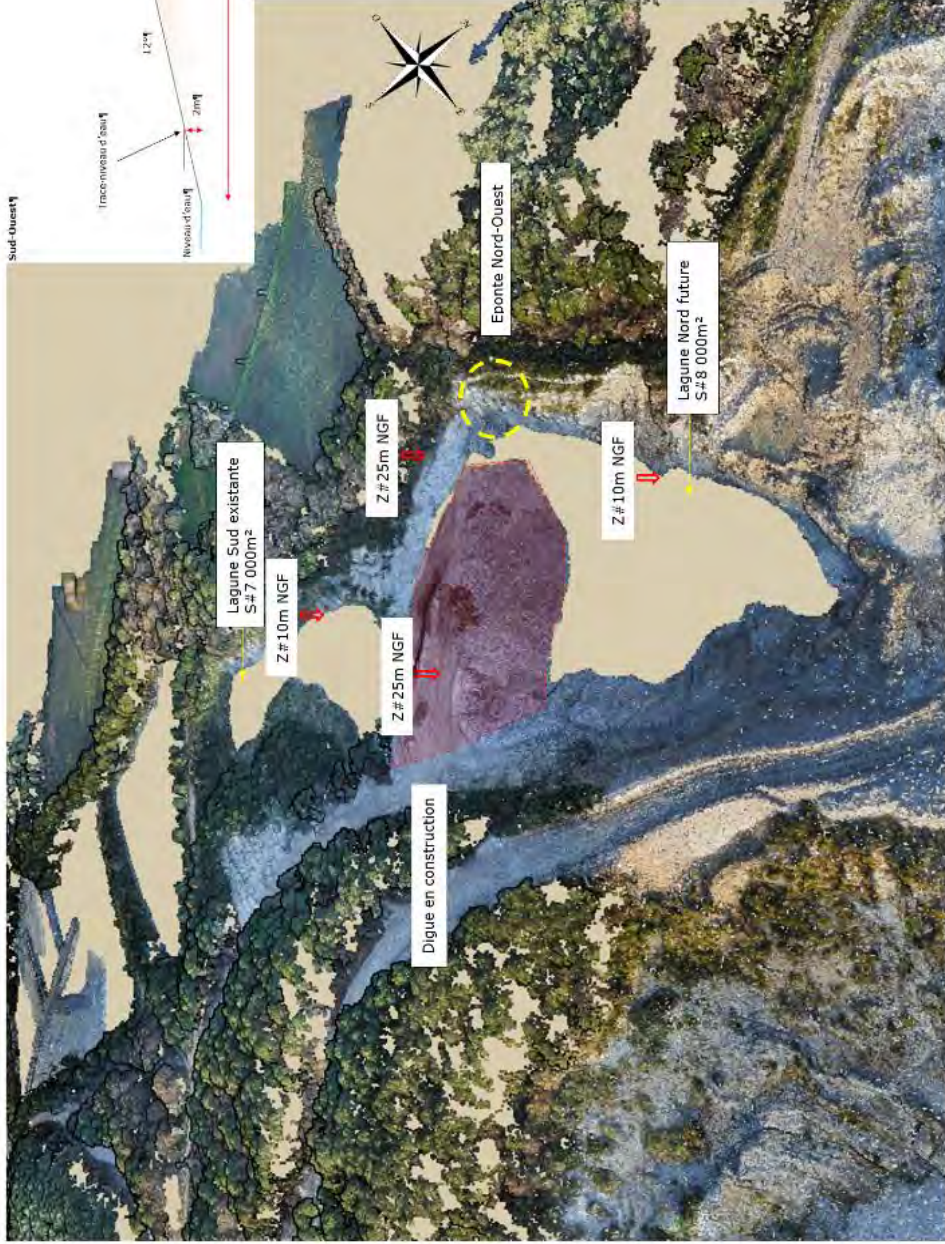
La digue Prairie consiste à créer une séparation entre 2 lagunes réalisées par excavation. La lagune Sud (Kerouran) est existante, la digue Prairie est terminée, la lagune doit être exploitée avant sa mise en eau.



Carrière de Kergantic-Lanvrian-Lopeheur



Localisation de la digue Prairie



La digue Nord est composée par des matériaux hétérogènes de type kaolins, granite, sables, matériaux de chantier et terre végétale (photo 22). La granulométrie moyenne est de 0-500mm. Ils sont mis en œuvre par poussées successives au fur et à mesure des arrivages. Ils ne sont pas compactés.

Leurs caractéristiques mécaniques estimées sont les suivantes :

- $C' : 0-0.5$
- $\phi' : 30^\circ$

La longueur totale de la digue est d'environ 130m. Il reste une dizaine de mètres à construire pour compléter le linéaire au Nord-Ouest.

La digue, de par la **qualité de ses matériaux et leur mode de mise en œuvre, est en limite de stabilité**. En effet, la mise en charge et retrait de l'eau a provoqué le glissement des talus, couchés à 12°. Ceci va se reproduire suivant la montée du niveau d'eau et pourra générer des glissements atteignant la crête de l'ouvrage.

Par ailleurs, une mise en charge d'un côté ou de l'autre avec une différence de hauteur d'eau importante générera un gradient hydraulique et déstabilisera à coup sûr l'ouvrage avec un glissement en grand du talus provoquant sa ruine.

1.1.5 - Contexte hydrogéologique

La carrière se situe sur des formations de socles, caractérisées par deux grands types d'aquifères.

Le premier type est **d'aquifère** superficiel contenus **dans les altérites**. **Les aires d'alimentations de ce type d'aquifère n'excèdent pas quelques hectares**. Cette ressource en eau souterraine alimente des sources et peut être captée par des puits de faibles profondeurs et des fontaines. De tels usages sont **nombreux sur le secteur de l'étude**, mais permettent uniquement de couvrir des besoins privés (<10 m de profondeur).

Le deuxième type est d'aquifère profond, avec des roches moins altérées. Ils se trouvent dans un contexte de roches indurées fracturées constituant un réseau de fissures pour la circulation **des eaux**. **Sur le secteur d'étude, ce type d'aquifère est formé au niveau du contact entre le leuco-granite et les micaschistes, au niveau de la faille post-hercynienne (environ 1 km au Nord du site des kaolins)**.

Sur le secteur de Ploemeur, un captage exploite ce type d'aquifère pour la production d'eau potable. (4 forages d'environ 100 m de profondeur). Il est situé au Nord de l'agglomération ploemeuroise.

Ce captage **fait l'objet de protection**. Cependant le site des kaolins ne se situe pas dans le périmètre de protection du captage.

Les seules circulations d'eau souterraines au niveau de la formation exploitée s'établissent le long de l'accident principal Nord/Sud de Lanvrian et Kergantic. La présence de l'océan au Sud a pour conséquence une eau recueillie en fond de fosse qui peut être légèrement salée. Les eaux d'exhaure depuis ces fosses sont difficilement utilisables pour les activités transformatrices, et sont donc renvoyées directement vers l'océan.

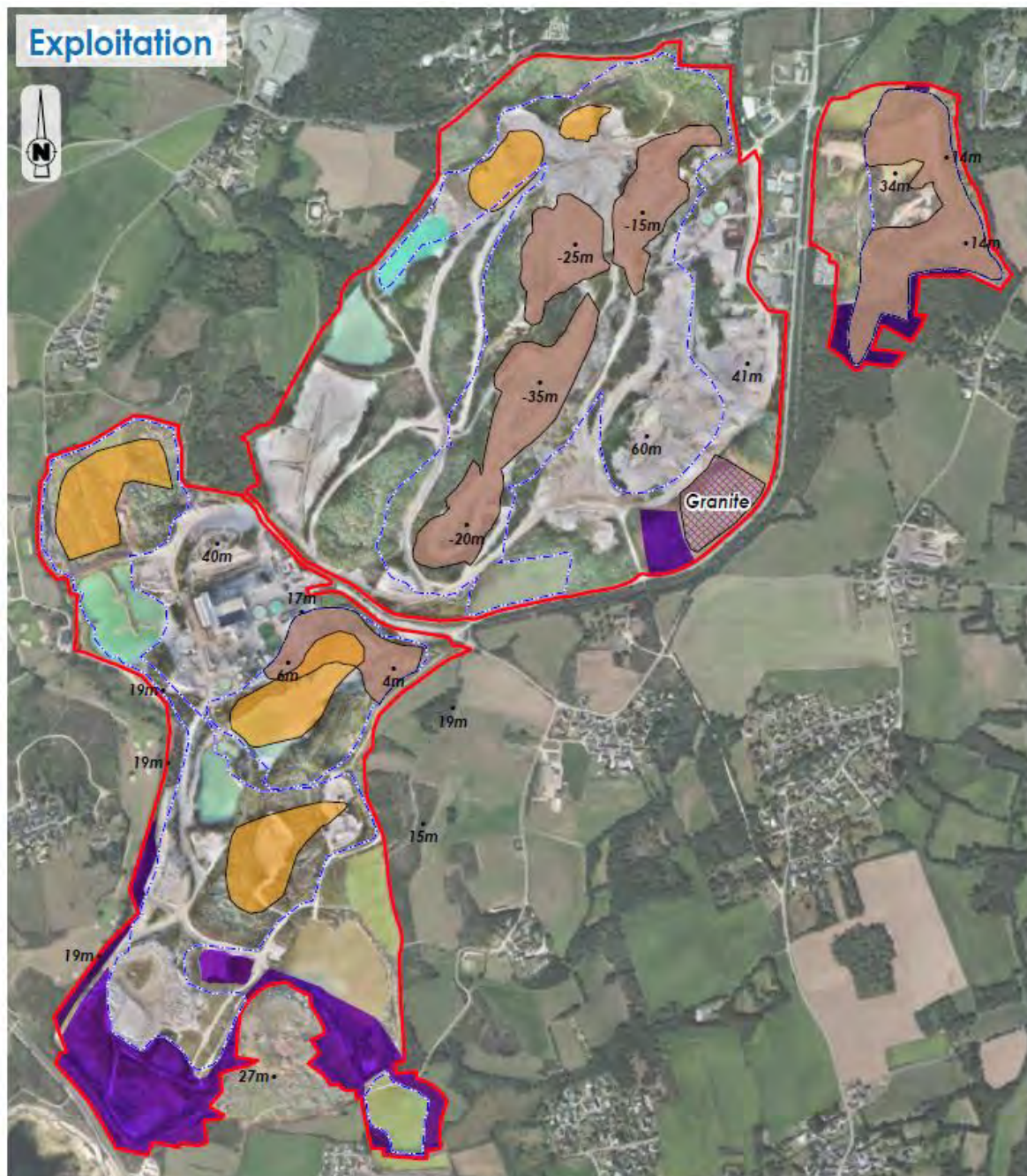
2 - EFFETS DU PROJET SUR LA STABILITE

2.1 - APPROFONDISSEMENT DE LA FOSSE

2.1.1 - Phasage projeté

Les problématiques de stabilité observées sont essentiellement liées à l'altération et la décompression des anciens fronts sauf pour le glissement survenu dans les lagunes.

Le phasage envisagé prévoit la reprise de l'essentiel des fronts comportant des instabilités dès la période 2023-2028 :



Extrait du plan de phasage – Phase 2023-2028

Les fronts seront ainsi purgés des instabilités et les pentes seront dressées selon le design étudié d'après les études géotechniques.

2.1.2 - Usages ponctuels de tirs de mines

Dans le cadre du projet d'approfondissement de la carrière, il sera fait usage des techniques de minage, notamment pour les matériaux granitiques et le quartz.

Compte tenu de la fragilité des matériaux, leur déstabilisation ponctuelle par les tirs de mines n'est pas exclue.

2.1.3 - Impact de l'approfondissement du secteur Lopeheur sur les habitations

Conformément à l'arrêté ministériel du 22/09/1994, l'exploitation se tiendra à minimum 10 m des limites cadastrales du projet.

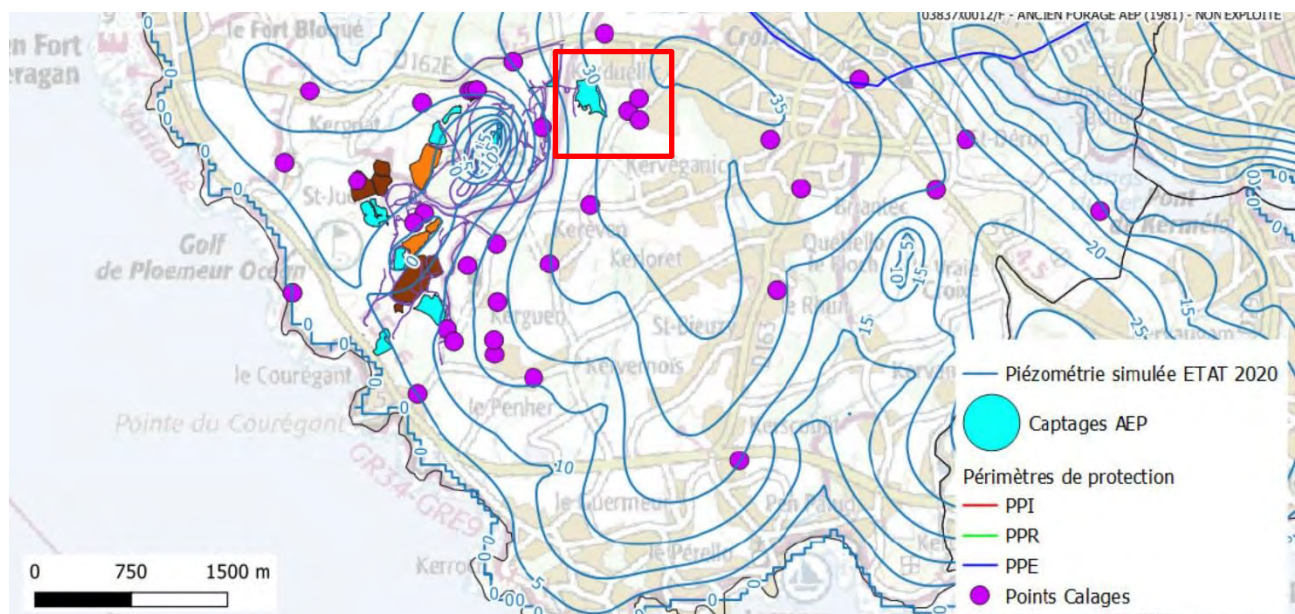
La zone exploitée se trouvera à une distance minimum de 170 m des habitations.

L'étude hydrogéologique réalisée par ANTEA indique la présence de forages à proximité des habitations avec un niveau d'eau proche de 30 m NGF. Le granite est localisé très proche de la surface (0.5 m pour le forage BSS001BEVR). Les habitations les plus proches se situent à un niveau proche de 40 m NGF. Le niveau du fond de fosse prévu est de -1 m NGF.

Dans ces conditions, la stabilité des talus n'aura pas d'impact sur les habitations.

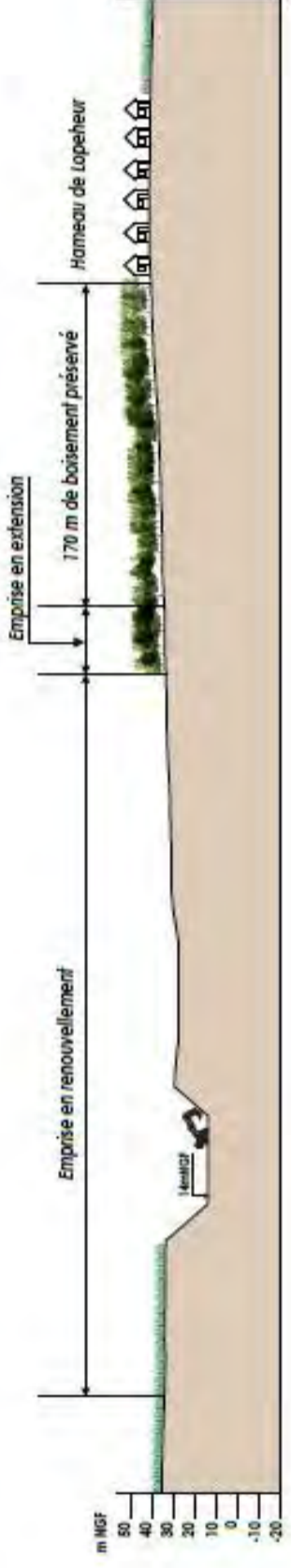
Concernant le rabattement de la nappe, le risque serait le retrait des formations argileuses au niveau des fondations, mais reste très peu probable au regard de :

- La distance projet/habitations
- La faible épaisseur de formations superficielles
- La faible sensibilité des kaolins au retrait/gonflement

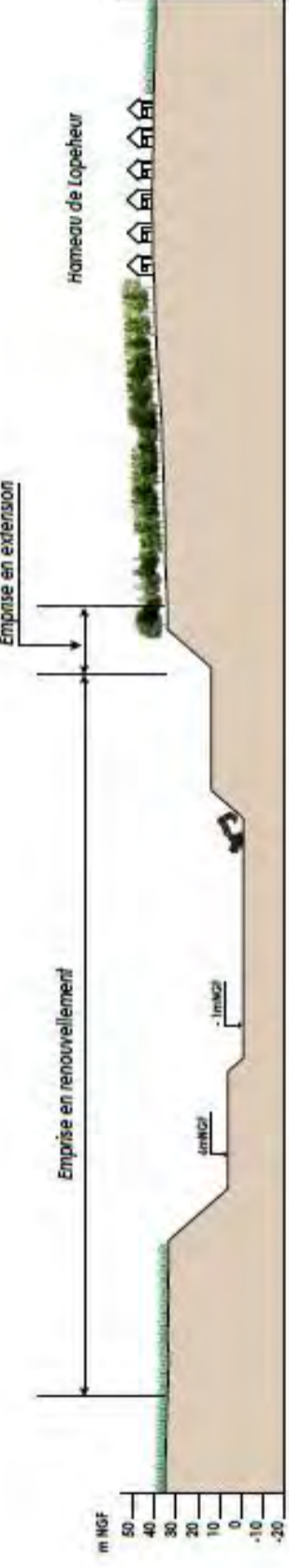


Extrait de l'étude ANTEA – Localisation des forages et niveau d'eau

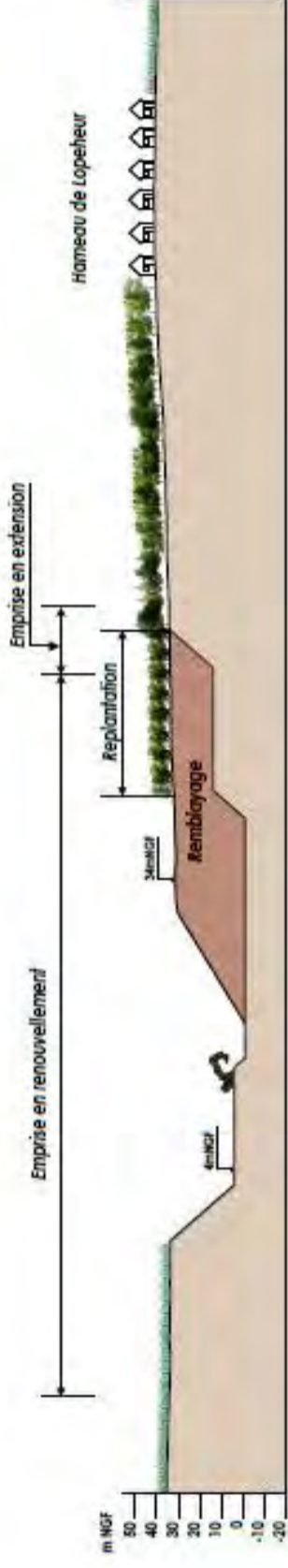
Phase 2023 - 2028



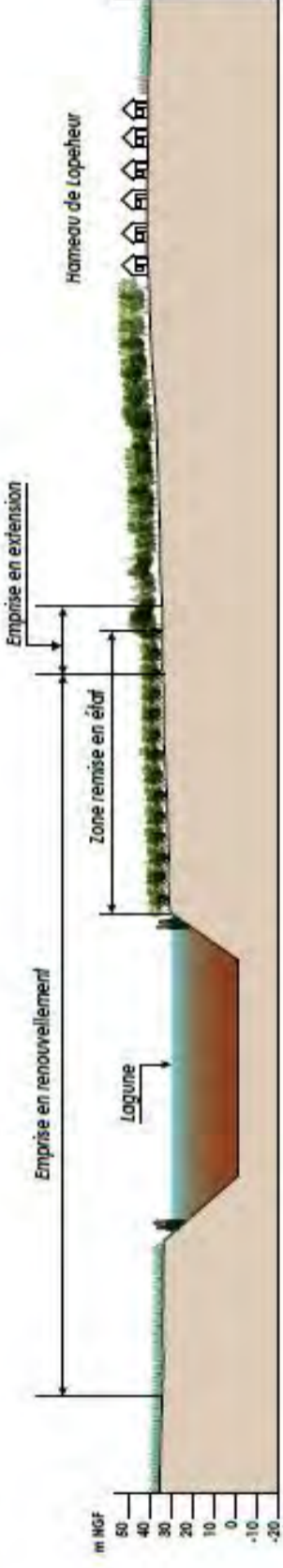
Phase 2028 - 2033



Phase 2033 - 2038



Phase 2038 - 2053



Echelle des coupes : 1/3 000

Phasage du projet au droit de Lopeheur

2.2 - POURSUITES DE L'EXPLOITATION DES LAGUNES AVEC LES CYCLES REMPLISSAGES/VIDANGES

2.2.1 - Lagune prairie

Il est envisagé l'approfondissement de la lagune sur Prairie en maintenant la lagune de Kerouran.



La digue, de par la qualité de ses matériaux et leur mode de mise en œuvre, est en limite de stabilité. En effet, la mise en charge et retrait de l'eau a provoqué le glissement des talus, couchés à 12°. Ceci va se reproduire suivant la montée du niveau d'eau et pourra générer des glissements atteignant la crête de l'ouvrage.

Par ailleurs, une mise en charge d'un côté ou de l'autre avec une différence de hauteur d'eau importante pourra générer un gradient hydraulique défavorable à la stabilité du talus Nord.

Il est également envisagé la reprise des anciens matériaux lagunaires constituant une butte. Leur reprise fait l'objet d'une étude géotechnique particulière permettant d'assurer l'exploitation en toute sécurité.

2.2.2 - St Jude

Il s'agit d'une ancienne lagune réalisée en bassin. Les matériaux restent très humides. Une reprise des matériaux par terrassement au-delà de 5 m de front n'est pas envisageable pour des raisons de sécurité évidentes.

Il est envisagé une reprise des matériaux par voie humide. Ceci n'aura pas d'impact sur la stabilité.



2.2.3 - Kérantonnel

Les matériaux sont similaires aux lagunes anciennes décrites (cf. St Jude). Selon la morphologie de la lagune, les matériaux pourront être humides en profondeur et nécessiter des précautions particulières en termes de design pour assurer leur stabilité.

2.2.4 - Lopeheur

Il s'agira de reprendre l'exploitation de kaolins et potentiellement d'une ancienne lagune au centre de la zone.

La reprise des lagunes humides par terrassement sera à considérer avec précaution en raison de leur consistance. La traficabilité en sera **réduite voire impossible. L'exploitation frontale sera** à étudier en fonction des caractéristiques des matériaux qui seront particulièrement instables en conditions humides.

3 - MESURES NECESSAIRES POUR EVITER/REDUIRE, COMPENSER LES EFFETS

3.1 - MESURES CONCERNANT LA GEOMETRIE, GESTION DES LAGUNES.

3.1.1 - *Reprise des matériaux lagunaires*

Dans le cas d'une lagune en bassin avec des matériaux humides et une profondeur supérieure à 5 m, une technique d'exploitation par voie humide sera la plus adaptée.

Dans le cas d'une lagune en butte ou en bassin inférieure à 5 m de profondeur, les dispositions suivantes seront à respecter :

- Séchage des lagunes
- Etude géotechnique spécifique pour déterminer le phasage et le design
- **Exploitation frontale ou par couche selon les résultats de l'étude et les conditions de traficabilité**
- Suivi géotechnique pour adaptation

Concernant la digue Prairie, afin **d'assurer la stabilité de l'ouvrage nous recommandons** de le considérer uniquement comme un ouvrage séparatif en prévoyant :

Phase approfondissement de Prairie :

- **Le rabaissment du niveau d'eau de Kerouran au maximum ;**
- **La mise en place d'un piézomètre dans la digue ;**
- **L'étude et le suivi géotechnique de la digue pour assurer les conditions de sécurité de l'exploitation.**

Phase Lagunage :

- **Un remplissage concomitant des 2 lagunes en limitant les différences de hauteurs d'eau afin de ne pas générer de gradient hydraulique ;**
- **Une profondeur d'eau limitée au minimum (maximum 1 m) pour éviter le glissement du talus en eau libre ;**
- **L'accumulation des matériaux de lagunage en pied d'ouvrage pour stabiliser plus rapidement les pentes ;**
- **La limitation des variations de hauteur d'eau dans les lagunes (gestion des eaux) ;**
- La reprise des arrivées d'eau afin d'éviter le ravinement des talus ;
- Un suivi **géotechnique de l'ouvrage permettant** de prévoir un traitement rapide si nécessaire.

3.2 - MESURES CONCERNANT LA HAUTEUR ET LA PENTE DES FRONTS POUR GARANTIR PENDANT L'EXPLOITATION LA STABILITE ET LA SECURITE

3.2.1 - *Mesures de sécurité actuelles*

En l'état actuel, les zones posant un problème de stabilité sont traitées par :

- **Une interdiction d'accès**

OU

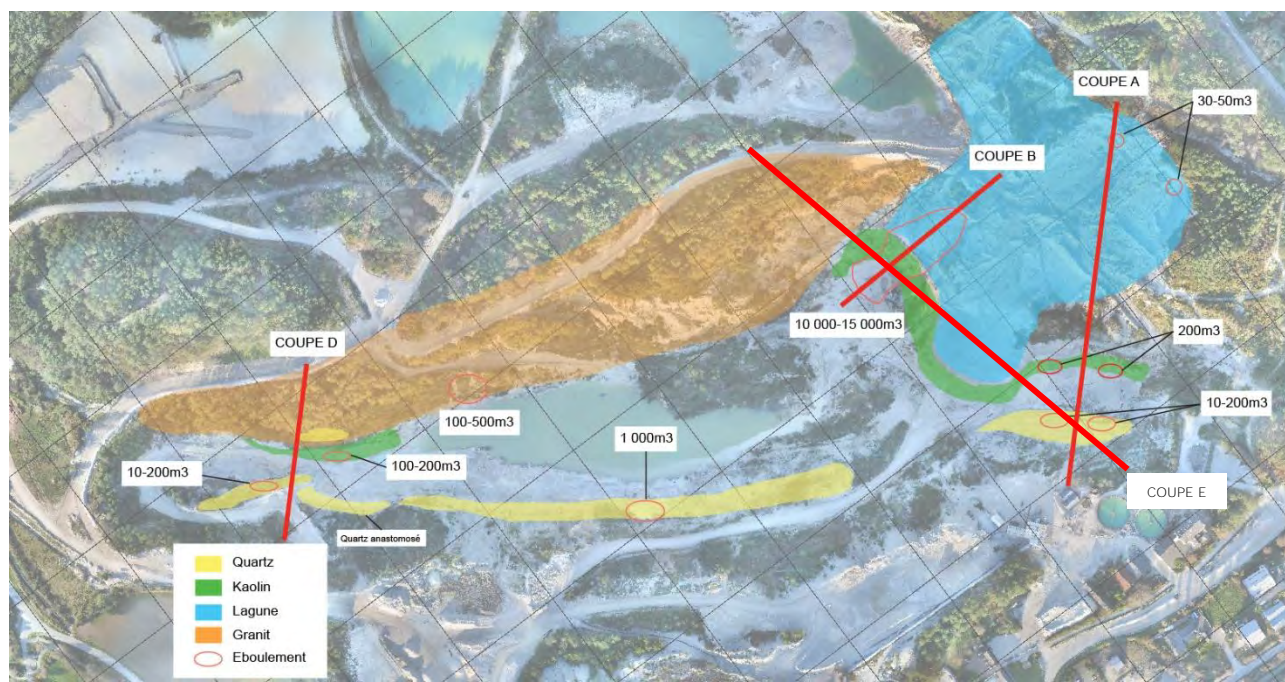
- Un monitoring (surveillance topographique, piézomètres, suivi géotechnique) + ouvrage de mise en sécurité provisoire - cas de la zone Prairie/lagunes

3.2.2 - Stabilité des fronts

Quatre coupes de stabilité ont été étudiées sur la fosse de Kergantic et sont implantées sur la figure ci-dessous. Elles sont représentatives de chaque secteur géotechnique de la fosse.

Ces coupes ont été implantées en croisant les informations suivantes :

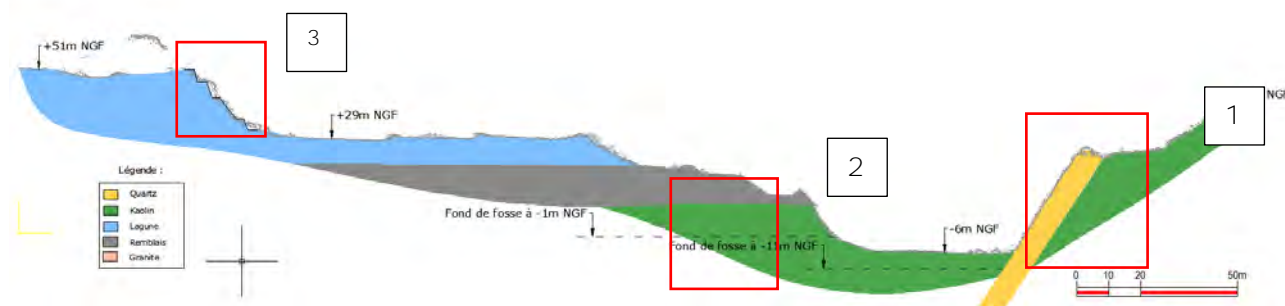
- Les caractéristiques géologiques ;
- La configuration morphologique ;
- Les caractéristiques géomécaniques ;
- **Les singularités (contraste d'altération, hydrogéologie, projet ...).**



Implantation des 4 coupes de stabilité A, B, D et E sur le site de Kergantic avec représentation des principales unités géologiques.

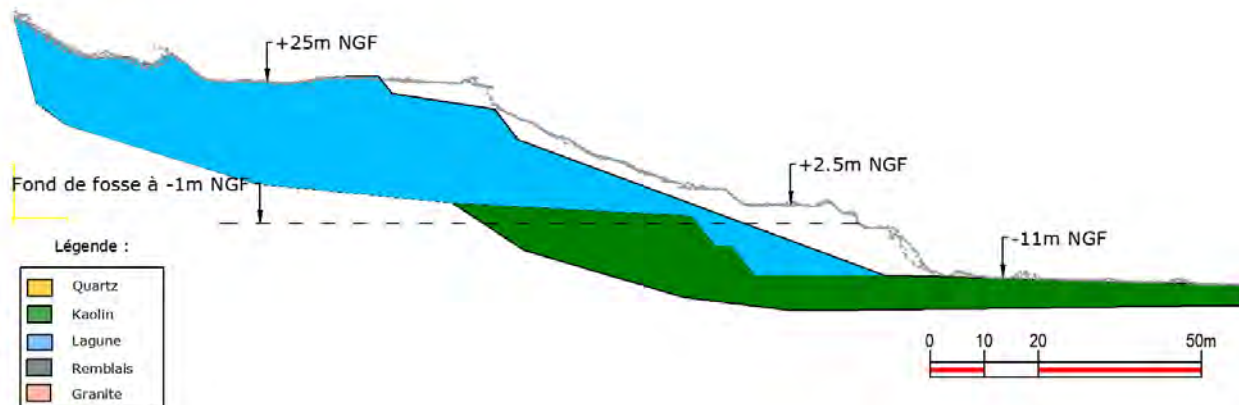
La coupe A est représentative du Nord de la carrière. Un filon de quartzites altérés et très fracturés inclus dans un encaissant de kaolins constitue le front Est de la zone (1). Il présente un **pendage de 50° vers l'Ouest sur une hauteur de 35 m. Son incision par des écoulements d'eau importants en provenance de la laverie témoignent de sa sensibilité à l'érosion hydrique.** Le front Ouest (2) est subvertical sur une hauteur de 16 m environ. Il est constitué de kaolins coiffés par des remblais ou par des matériaux lagunaires. Ces deux formations sont très sensibles **à l'érosion hydrique. Le fond de fosse actuel est à -6 m^{NGF}, le projet prévoit un abaissement à -11 m^{NGF}.**

L'Ouest de la coupe (3) est représentatif des matériaux lagunaires exploités par gradins de 6 m à 7 m sur une hauteur totale de 21 m selon une pente intégratrice à 50°.



Coupe de stabilité A.

La coupe B est représentative du Nord-Ouest du site et d'une hauteur importante (20 m à 25 m) de matériaux lagunaires en exploitation recouvrant l'ancien front de kaolins. Au droit de la coupe, un important glissement a affecté les matériaux lagunaires sur toute leur hauteur (volume de l'ordre de 10 000 m³ à 15 000 m³). Les matériaux glissés se sont stabilisés selon une pente à 20°. Le projet prévoit une exploitation des lagunes jusqu'à la cote -1 m^{NGF}.

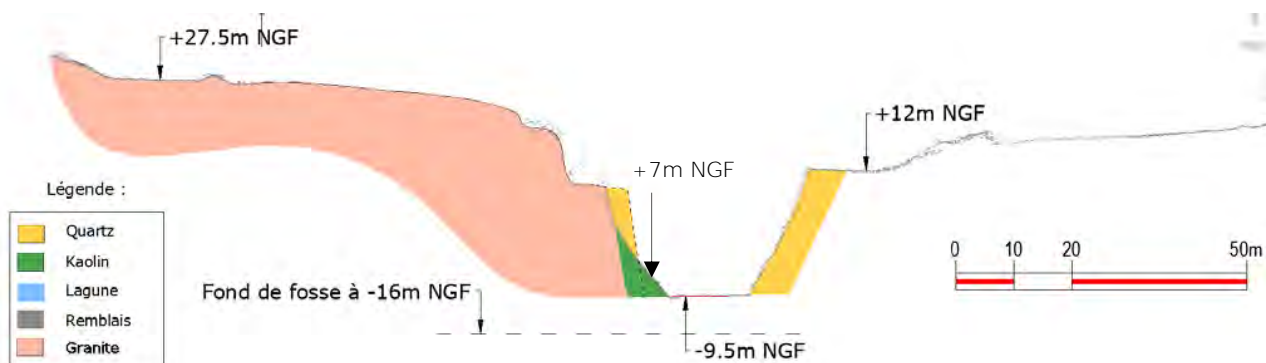


Coupe de stabilité B.

La coupe D est caractéristique du Sud et du centre de la fosse où le front Ouest présente une hauteur de 37 m profilé selon une pente intégratrice à 50°. Localement un filon de quartz d'une puissance de 6 m environ et incliné à 65° sépare les granites altérés des kaolins présents dans la fosse. Ces kaolins forment le pied du front sur une hauteur de 7 m, incliné à 50°.

Le front Est se profile sur une hauteur de 21,5 m avec une pente à 50° formé par un filon de quartzite dans l'encaissant de kaolins.

Le projet prévoit d'abaisser le fond de fosse actuel de -9,5 m^{NGF} à -16 m^{NGF}.

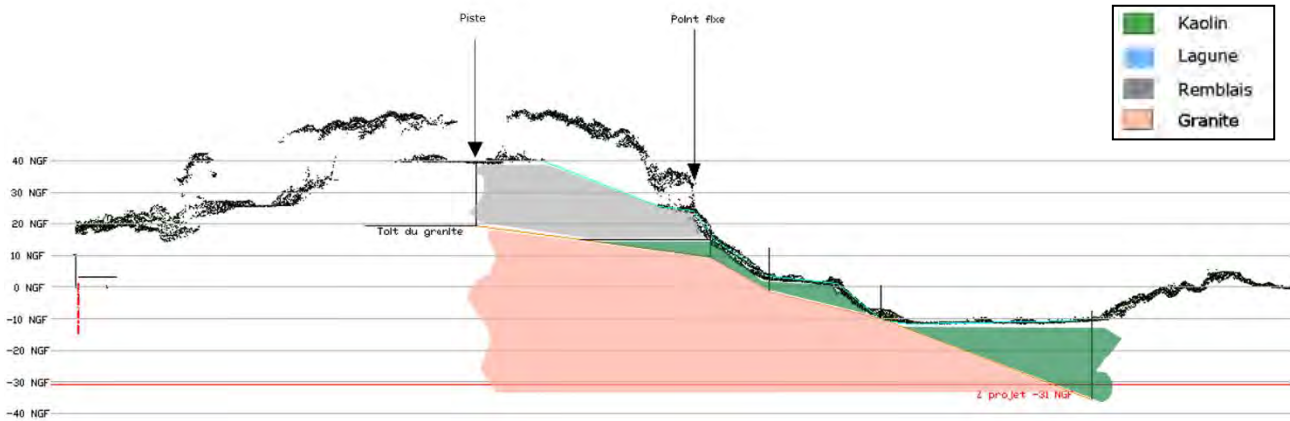


Coupe de stabilité D.

La coupe E se situe au Nord du site où les kaolins reposent directement sur l'encaissant granitique où celui-ci est parfois subaffleurant. Le sommet du site est constitué d'une vingtaine de mètres d'épaisseur de remblais.

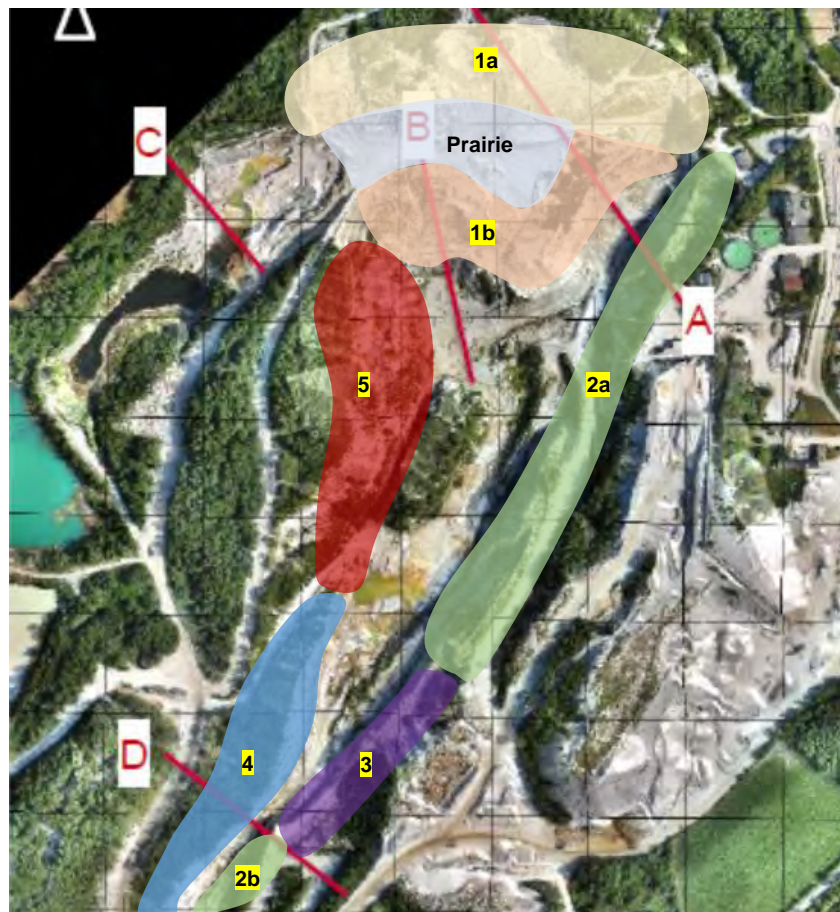
Le projet prévoit d'excaver le fond de fosse actuel de -11 m^{NGF} à -31 m^{NGF}.

Légende :

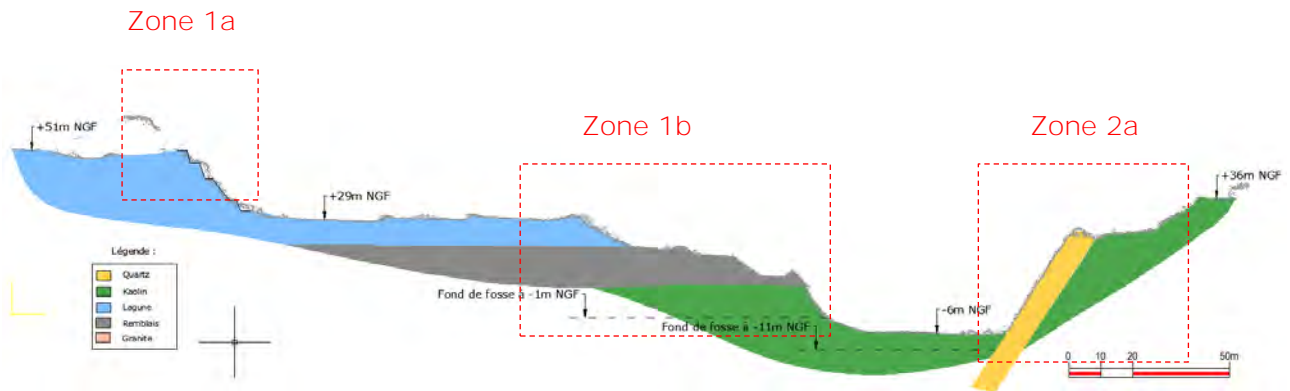


Coupe de stabilité E.

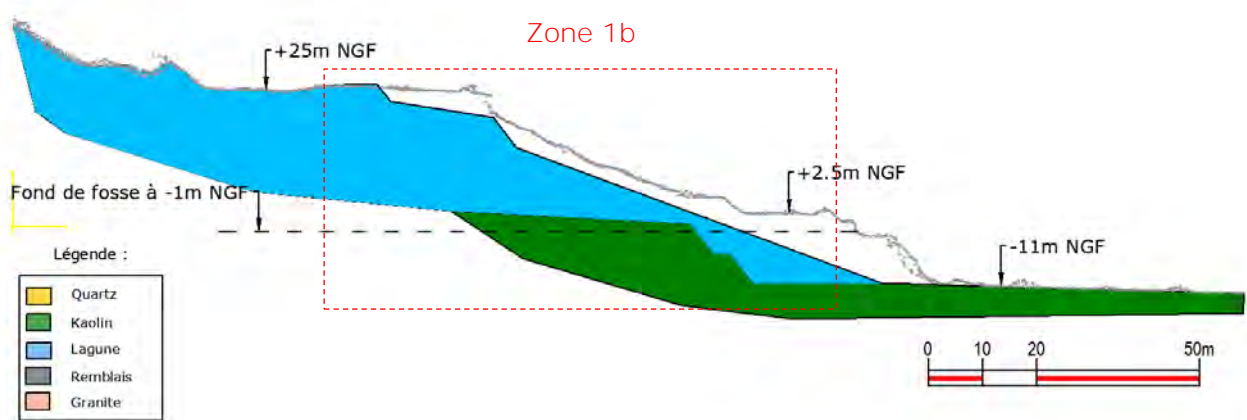
Les coupes d'étude ont été sous-divisées en zones géotechniques définies selon la nature des matériaux et les problématiques de stabilité similaires. Elles sont définies comme suit en plan et sur les coupes de stabilité :



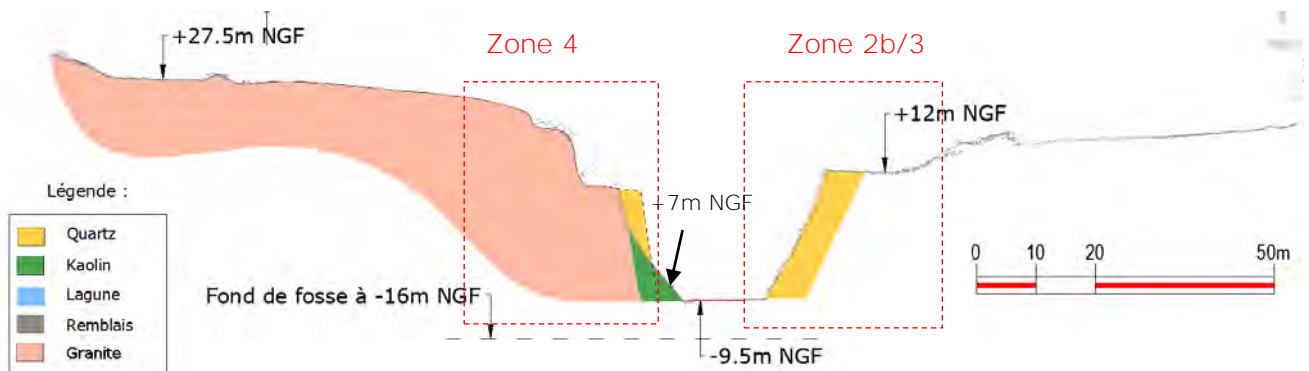
Définition du zonage géotechnique (nomenclature en jaune) de la fosse selon les coupes de stabilité étudiées



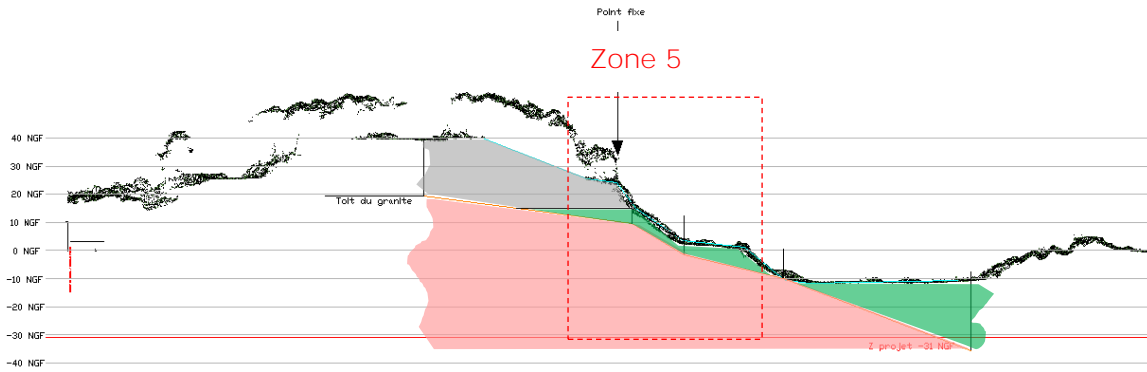
Zonage géotechnique 1a, 1b et 2a de la coupe A.



Zonage géotechnique 1b de la coupe B.



Zonage géotechnique 2b, 3 et 4 de la coupe C.



Zonage géotechnique 5.

Les résultats de calculs sont synthétisés ci-dessous pour chacune des coupes et des zones géotechniques aux différentes échelles de ruptures analysées. Les calculs ont été menés selon le design (pente de gradins, largeur de gradins et pentes intégratrices) définis par l'exploitant. Conformément à la demande de l'exploitant et de manière sécuritaire, la stabilité est assurée pour un facteur de sécurité de 1,3.

Coupe	Zone	Hauteur fosse (m)	Matériaux	Hauteur gradin (m)	Pente gradin (°)	Largeur gradin (m)	Pente intégratrice (°)	FSmin Overall	FSmin Inter-ramp	FSmin Bench
A	1a	22	Lagunes	5	30	2	25	1,33	1,30	1,21
A	1b	40	Kaolins	5	45	2	36	1,41	1,37	2,06
			Remblais	5	30	2	25		1,60	2,35
			Lagunes	5	30	2	25		1,36	1,21
A	2a	47	Quartzite	5	51	2	40	1,24	1,36	1,91
			Kaolins	5	45	2	36		1,39	2,06
B	1b	26	Lagunes	5	30	2	25	1,29	1,30	1,21
D	2b	28	Quartzite	5	51	2	40	1,52	1,67	1,91
D	3	28	Quartzite Anast.	5	51	2	40	1,32	1,48	1,93
D	4	43,5	Granite sain	10	51	2	45	3,9	> 4	> 6
E	5	71 remblais + fosse	Remblais	5	30	2	25	1,31	1,35	-
E	5		Kaolins / Gr. altéré	5	45	2	36	4,6	1,69	2,06
E	5	33 fosse	Granite sain	10	51	2	45		2,83	>6

Tableau de synthèse des résultats des calculs de stabilité (facteurs de sécurité) selon les différentes échelles d'analyse (overall : front, inter-ramp : inter-banquettes et bench : banquette).

Les calculs de stabilité menés constituent une première approche sur la base des données récoltées et transmises.

Les incertitudes majeures concernant les calculs de stabilité sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Incertitudes relatives à la stabilité	Aléas géotechniques	Préconisations pour la stabilité
Modèle géologique Des écarts ont été identifiés entre le modèle géologique fourni pour réaliser les coupes géotechniques et la réalité observée sur site (exemple : position du filon de quartz au niveau de la coupe D).	Impact sur le plan d'exploitation (design fosse) et la stabilité	Affiner les connaissances géologiques : 1- Mise à jour de la carte géologique de la carrière pour contraindre le modèle 3D. 2- Contraindre le modèle en profondeur par réalisation de nouveaux sondages réalisés à l'avancement de l'exploitation des matériaux (sondages carottés, diagraphie OPTV, sondages destructifs, ...).

Modèle géomécanique	Paramètres mécaniques des matériaux	Impact sur les résultats des calculs de stabilité pouvant être soit favorable (optimisation des pentes) soit défavorable (aléa de glissement/d'effondrement non pris en compte dans les calculs du présent rapport)	<p>Améliorer les connaissances géomécaniques :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Améliorer la connaissance des matériaux à l'avancement en réalisant des essais mécaniques répartis sur le site et en nombre suffisant pour encadrer leur hétérogénéité. <ul style="list-style-type: none"> - Pour les granites sains : essais de résistance à la compression ; - Pour les granites altérés et la quartzite : essais Franklin et/ou scléromètre ; - Pour les kaolins, les remblais et lagunes : essais triaxiaux ou à la boîte de cisaillement sur des échantillons intacts. 2- Adapter la méthode de calculs à l'hétérogénéité des matériaux, selon les résultats d'essais. Réalisation de calcul par analyse de probabilité (variations des paramètres et introduction de la notion de pourcentage de rupture PF). 3- Adopter la méthode observationnelle dans les premières phases de terrassement (phase de validation du présent modèle)
	Appréciation de l'hétérogénéité des paramètres mécaniques des matériaux		
Modèle hydrogéologique	Impact des paramètres hydrogéologiques sur la stabilité	A ce stade, aucune hypothèse hydrogéologique n'a été prise en compte dans les calculs ce qui peut générer un impact non négligeable sur la stabilité (prise en compte des paramètres hydrogéologiques pouvant être très défavorables)	<p>Réalisation d'étude(s) hydrogéologique(s) visant à :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Réaliser un état des lieux des données hydrogéologiques en lien avec la stabilité du site (observations de terrain, rapports antérieurs, instrumentation actuelle du site, ...) ; 2- Définir les moyens d'étudier les variations de niveau d'eau et le potentiel de mise en charge des massifs rocheux - exemple : piézomètres, essais de perméabilité, traçages, ... ; 3- Déterminer les moyens d'étudier le potentiel de mise en charge des matériaux de lagunage et de remblais par augmentation de leur pression interstitielle (eaux contenues dans des matériaux qui sont compactés) - exemple : mise en place de capteurs de pressions interstitielles et/ou de piézomètres dans les remblais ; 4- Déterminer les cas de charge à prendre en compte dans les calculs.

Principales incertitudes concernant le modèle géologique, géomécanique et hydrogéologique du site ayant un impact sur les calculs de stabilité

En s'appuyant sur ces résultats de calculs réalisés et en tenant compte des hypothèses géotechniques employées et des incertitudes géologiques, géomécaniques et hydrogéologiques associées, nous recommandons de respecter les pentes de stabilité suivante :

Coupe	Zone géotech.	Analyse des résultats et observations
A	1a	A l'échelle du front et de l'inter-banquette, le design dans les lagunes est en limite de stabilité. A l'échelle de la banquette des instabilités sont calculées. Une réduction de la pente des gradins à 2H/1V (26/27°) permet d'approcher la stabilité des lagunes selon le modèle de calcul.
	1b	Le design peut être considéré comme stable avec peu de marge de sécurité (FS=1,4 sur la hauteur totale). Dans les lagunes, les mêmes instabilités sont observées que pour la zone 1a.
	2a	Le design est en limite de stabilité (FS=1,24). Nous préconisons de réduire la pente des gradins des kaolins à 2.5H/2V (38/39°) pour assurer la stabilité de l'ensemble du front selon le modèle de calcul.
B	1b	Le design dans les lagunes est en limite de stabilité voire instable à toutes les échelles étudiées (cf. préconisations zone 1a).

D	2b	Le design projeté est stable en l'état des hypothèses de calcul.
	3	Le design projeté est stable en l'état des hypothèses de calcul.
	4	Le design projeté est stable en l'état des hypothèses de calcul.
E	5	Le design projeté dans les kaolins et les granites est stable. Néanmoins il peut être optimisé pour augmenter la ratio terrassement/extraction tout en réduisant les pentes projetées. Un point particulier doit être accordé à la couverture de remblais surplombant la fosse qui sont en limite de stabilité (FS=1,31). De plus, les remblais sont en interaction avec la fosse projetée (notamment les banquettes supérieures de kaolins et de granites altérés) en étant proche de la limite de stabilité (FS=1,35).

Ces pentes de stabilité devront être recalculées au fur et à mesure de l'évolution du site et des levées d'incertitudes et de validation des hypothèses géotechniques.

3.3 - MESURES A PRENDRE POUR GARANTIR LA STABILITE DU SITE (LAGUNES + FRONTS) DANS LE CADRE DE LA REMISE EN ETAT

Pour valider et affiner le design de la fosse préconisé, les deux phases suivantes devront être réalisées :

Phase 1 : Amélioration des connaissances du site – levée des incertitudes identifiées au stade diagnostic

Réalisation à court terme – 1/2 ans (à adapter en fonction de l'évolution morphologique du site relatif à l'exploitation).

- Amélioration des connaissances géologiques et structurales du site – précision du modèle géologique
*Mise à jour de la carte géologique du site ;
Campagne de sondages de reconnaissances à l'avancement ;
Mise à jour du modèle géologique du site.*
- Suivi du terrassement du site pour application de la méthode observationnelle.
Les paramètres mécaniques des formations géologiques de la carrière sont très hétérogènes. Pour cela, nous recommandons en premier lieu qu'un géologue spécialiste de la stabilité réalise le suivi des premières phases de terrassement pour vérifier la validité du présent modèle et la sectorisation du site définie dans ce diagnostic. L'objectif est d'observer la stabilité à court terme des talus et de valider le modèle géologique du site à l'avancement de l'extraction. Ce suivi peut être réalisé à fréquence trimestrielle la première année.
- Acquisition de données géomécaniques – validation des hypothèses géotechniques
*Nous recommandons d'améliorer la connaissance des paramètres mécaniques des matériaux en vue de préciser le modèle géotechnique, notamment vis-à-vis de la variabilité des paramètres géomécaniques des matériaux (hétérogénéité).
A minima, nous recommandons le programme d'essais mécaniques suivants sur les différentes formations géologiques du site :*

	Essais triaxiaux*	Essais à la boîte de cisaillement*	Classification GTR**	Essais Franklin***	Essais au scléromètre***	Essais de résistance à la compression***
Lagunes	3	3	3	-	-	-
Remblais	3	3	3	-	-	-
Kaolins	6	-	-	-	-	-
Granites altérés/ arènes	6					

Granites sains	-	-	-	-	-	3
Quartzites	-	-	-	3	3	-
Quartzites anastomosées	-	-	-	3	3	-

* : Ces essais visent à déterminer la cohésion et l'angle de frottement des matériaux, paramètres d'entrée nécessaires au modèle géotechnique de stabilité.

** : La classification GTR a pour objectif de classer les matériaux selon la classification des sols selon la granulométrie, l'argilosité et le comportement mécanique, dans notre cas en remblais.

*** : Ces essais permettent d'obtenir ou d'approcher des valeurs de résistance à la compression de la matrice intacte du matériau, paramètre d'entrée nécessaire au modèle géotechnique.

- NB : Les essais seront répartis sur l'ensemble du site pour apprécier la variabilité des paramètres géomécaniques des matériaux.

- NB2 : Les essais à réaliser sur les formations non remaniées devront être réalisés sur des échantillons intacts.

- NB3 : Ce programme d'essais est prévisionnel et à adapter en fonction de la complexité de réalisation de l'échantillonnage et des observations réalisées sur site.

- Etude hydrogéologique
 - o Formations en remblais (lagunes et backfills) : étude de la pression interstitielle notamment liée à la compaction des matériaux et des conditions de drainage ;
 - o Formations géologiques en place : mise en place de piézomètres, localisation de venues d'eau, première évaluation de la mise en charge du massif.

Phase 2 : Validation/Précision du présent modèle géotechnique.

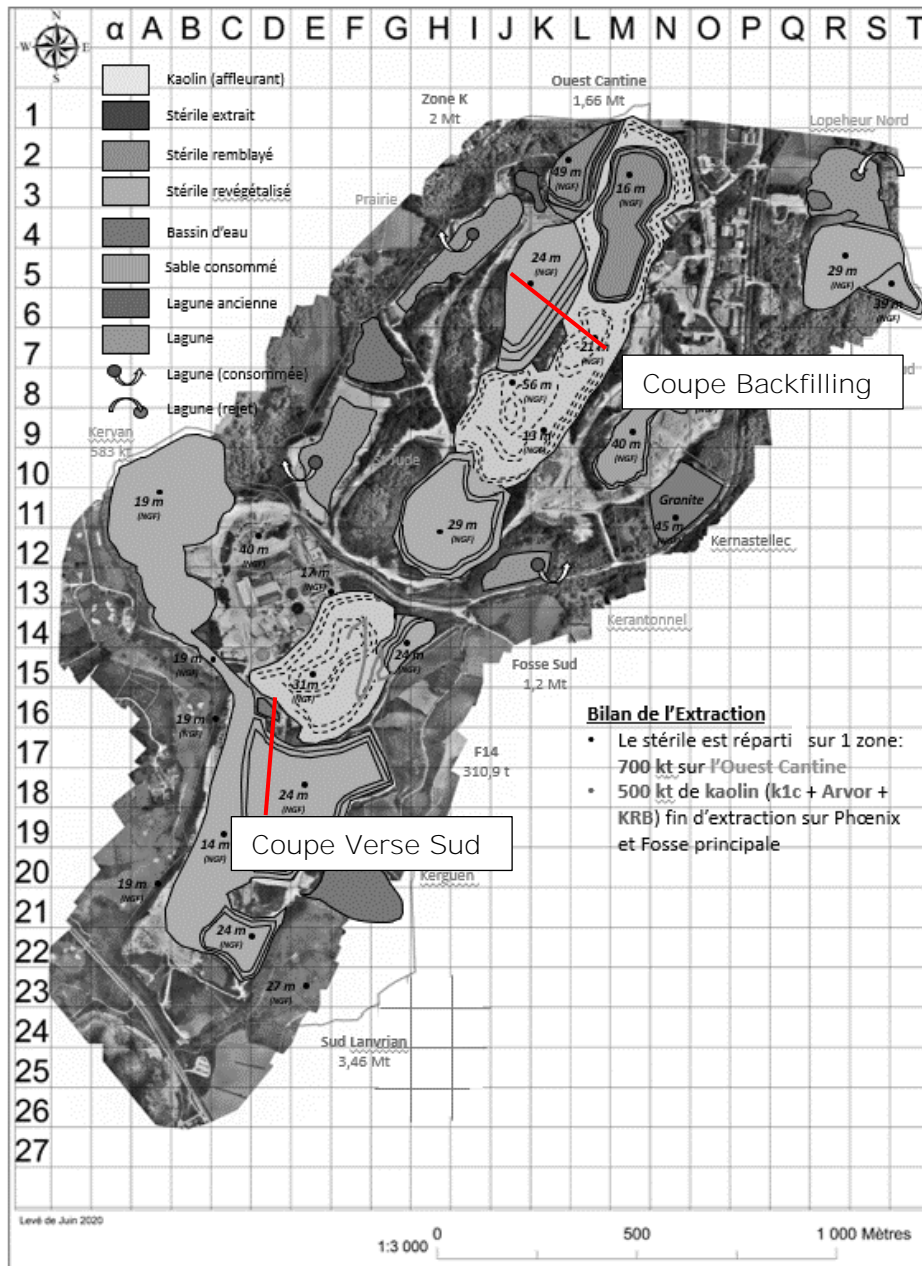
- Introduction des données géomécaniques acquises en phase 1 dans les modèles ;
- Introduction des premières conclusions hydrogéologiques dans les modèles (pression de pores à prendre en compte, mise en charge à prendre en compte, ...) ;
- Définition des coupes critiques de stabilité à étudier en fonction du phasage projeté ;
- **Réalisation de calculs de stabilité avec analyse de probabilité permettant d'introduire la notion de variabilité de paramètres mécaniques. Ces calculs permettent d'obtenir un facteur de sécurité FS associé à un pourcentage de rupture PF visant une approche plus réaliste de la stabilité et pouvant conduire à une optimisation du design de la fosse ;**
- Confrontation des résultats des calculs au suivi de la stabilité du site et des résultats de la méthode observationnelle ;
- Adaptation de phasage ou du design ;
- **Définition des dispositifs à mettre en œuvre pour réaliser le suivi des déformations du site.**

3.4 - MESURES A PRENDRE POUR GARANTIR LA STABILITE DU SITE (VERSES ET BACKFILLS) DANS LE CADRE DE LA REMISE EN ETAT

2 coupes de stabilité représentant les profils les plus hauts localisées sur la verse Sud et une zone de backfilling ont été étudiées. A ce stade, seule la stabilité interne des ouvrages en remblais est étudiée.

Y25

Phasage Life of Mine – 2043 à 2048



Coupes étudiées

Nous avons considéré que les verses à stériles et zones de backfilling seraient composées de matériaux hétérogènes de type sables, granites, kaolins.

Les caractéristiques mécaniques considérées sont les suivantes :

Nature de matériaux	Caractéristiques mécaniques		
	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ_d (kN/m ³)
Stériles et remblais	0	30	18

Pour obtenir une stabilité satisfaisante avec un facteur de sécurité FS général supérieur ou égal à 1,5, il sera nécessaire :

- **D'abaisser la pente intégratrice entre 22° et 25° ;**
- De réaliser, à minima, un gradin à mi-hauteur.

Les recommandations constructives pour la réalisation des verses et zones de backfilling sont les suivantes :

- Terrassement/remblaiement :
 - o Vidange des lagunes et purge des matériaux lagunaires en fondation pour limiter les glissements et poinçonnements
 - o Dans le cas où la vidange et la purge des lagunes ne seraient pas possible, il est envisageable de mettre en place un dispositif de drainage vertical et matelas drainant pour maîtriser le compactage des lagunes lors de leur remblaiement. Ce dispositif nécessitera un phasage particulier de chargement des lagunes avec suivi géotechnique spécifique.
 - o **Mise en œuvre** des remblais par couche pour favoriser le compactage des **matériaux à l'avancement. Ceci permettra de renforcer les conditions de stabilité.**
- Drainage :
 - o Montage des remblais selon un profil bombé pour évacuer les eaux de ruissellement sur les extérieures.
 - o Récupération et évacuation des eaux de ruissellement par fossés périphériques.
 - o Drainage en fondation et sous chaque gradin par nappe géosynthétique associée à une tranchée drainante dans le cas de montée en charge possible.
 - o Comblement des lagunes purgées en fondation par matériaux drainants type blocs pour limiter les pressions interstitielles liées aux infiltrations et remontées de nappes potentielles.
- **Végétalisation intégrale permettant de limiter l'érosion surfacique**
- Surveillance et suivi :
 - o Les verses et backfills créés nécessiteront un suivi particulier permettant de **s'assurer de leur stabilité sur le long terme. Celui-ci** devra être défini par un cahier des charges en prenant en compte la particularité de chaque ouvrage.

A minima le dispositif comportera les éléments suivants :

- o Mise en place de piézomètres dans les verses pour évaluer leur mise en charge par infiltration ou remontée de nappes.
- o **Mise en place d'un suivi géotechnique pour la réalisation des verses** avec notamment une méthode observationnelle **permettant d'adapter en continu la géométrie des remblais. Ce suivi permettra d'optimiser à l'avancement les volumes stockés.**
- o **Mise en place d'un suivi topographique des verses pour évaluer les mouvements résiduels** dans le temps.
- o **Mise en place d'un suivi visuel** visant à recenser les désordres éventuels et apprécier le comportement des verses.