



PROTEGE



# Étude des proxys potentiels pour la prédiction de l'évolution des fonds de bassins : amendements et réserve alcaline

## Rapport final

AEL

Avril 2022





Le projet régional océanien des territoires pour la gestion durable des écosystèmes, PROTEGE, est un projet intégré qui vise à réduire la vulnérabilité des écosystèmes face aux impacts du changement climatique en accroissant les capacités d'adaptation et la résilience. Il cible des activités de gestion, de conservation et d'utilisation durables de la diversité biologique et de ses éléments en y associant la ressource en eau. Il est financé par le 11<sup>ème</sup> Fonds européen de développement (FED) au bénéfice des territoires de la Nouvelle-Calédonie, de la Polynésie française, de Pitcairn et de Wallis et Futuna.

L'objectif général du projet est de construire un développement durable et résilient des économies des pays et territoires d'Outre-mer (PTOM) face au changement climatique en s'appuyant sur la biodiversité et les ressources naturelles renouvelables.

Le premier objectif spécifique vise à renforcer la durabilité, l'adaptation au changement climatique et l'autonomie des principales filières du secteur primaire. Il est décliné en deux thèmes :

- Thème 1 : la transition agro-écologique est opérée pour une agriculture, notamment biologique, adaptée au changement climatique et respectueuse de la biodiversité ; les ressources forestières sont gérées de manière intégrée et durable.
- Thème 2 : les ressources récifo-lagonaires et l'aquaculture sont gérées de manière durable, intégrée et adaptée aux économies insulaires et au changement climatique.

Le second objectif spécifique veut renforcer la sécurité des services écosystémiques en préservant la ressource en eau et la biodiversité. Il se décline également en 2 thèmes :

- Thème 3 : l'eau est gérée de manière intégrée et adaptée au changement climatique
- Thème 4 : les espèces exotiques envahissantes sont gérées pour renforcer la protection, la résilience et la restauration des services écosystémiques et de la biodiversité terrestre.

La gestion du projet a été confiée à la Communauté du Pacifique (CPS) pour les thèmes 1, 2 et 3 et au programme régional océanien pour l'environnement (PROE) pour le thème 4, par le biais d'une convention de délégation signée le 26 octobre 2018 entre l'Union européenne, la CPS et le PROE. La mise en œuvre du projet est prévue sur 4 ans.

Ce rapport est cité comme suit :

*Guillemot N (2022) Amélioration des bases de données provinciales en appui à la gestion de la pêche côtière professionnelle en Nouvelle-Calédonie : actualisation des indicateurs d'aide à la gestion fondés sur les CPUE en province Sud - Partie 1 (7 espèces). Note technique, Observatoire des pêches côtières de NC, 17 pages.*

*Cette publication a été produite avec le soutien financier de l'Union européenne. Son contenu relève de la seule responsabilité de <nom de l'auteur/du partenaire> et ne reflète pas nécessairement les opinions de l'Union européenne.*

CONTRAT DE CONSULTANCE AEL-LEA

## **ETUDE DES PROXYS POTENTIELS POUR LA PREDICTION DE L'ÉVOLUTION DES FONDS DE BASSINS**

- Comportement à une combinaison d'amendements
  - Evaluation simplifiée de la réserve alcaline

**Mars 2022**

Ighiouer S., Fernandez JM., Moreton B.

	Ref AEL	Ref Client	
<b>Identification</b>	D192	521-GFA-21_P_v1.0	
<b>Titre complet</b>	Étude des proxys potentiels pour la prédiction de l'évolution des fonds de bassins : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Comportement à une combinaison d'amendements ;</li> <li>- Evaluation simplifiée de la réserve alcaline.</li> </ul>		
<b>Auteurs</b>	Ighiouer S., Fernandez JM., Moreton B		
<b>Résumé</b>	<p>Aujourd'hui, 4 amendements sont utilisés sur le territoire pour lutter contre l'acidification des sols dans les bassins d'élevage. Il a été démontré que le produit carbonaté, Calcite récifale, peut être un produit utilisé pour diminuer l'acidification. Les études précédentes ont montré que ces cinq produits permettent d'augmenter le pH à une certaine limite.</p> <p>Dans cette nouvelle étude, l'objectif est de réaliser des « combinaisons d'amendements » qui permettraient d'augmenter le pH de façon plus importante en apportant un double traitement au sédiment avec de la chaux éteinte, voire avec un ajout de Calcite récifale.</p> <p>L'ajout de deux amendements permet au sédiment de mieux réagir lors d'une acidification du milieu. En effet, au contact de l'eau de mer, le sédiment 320b2 voit son pH augmenter de la même manière quelle que soit la combinaison d'amendement ajoutée. Cependant, lorsque le sédiment subit un épisode d'acidification, selon la combinaison d'amendement, le sédiment réagit de manière différenciée en fonction de la combinaison des amendements appliqués. En effet, pour l'échantillons 320b2, l'ajout de Calcite récifale permet de créer une réserve alcaline plus importante que lorsque le sédiment est amendé uniquement avec de la chaux éteinte. Un terme de comparaison avec une sédiment plus acide (320b) en matière de comportement est fournie.</p>		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Ighiouer S.	SI	25/03/2022
Vérificateur 1	Fernandez JM.	JMFA	31/03/2022
Vérificateur 2	Pousse C	CP	01/04/2022
Approbateur	Fernandez JM.	JMFA	01/04/2022
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
v1.0	Rapport final		01/04/2022
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Jean François Laplante Séverine Duval Cédric Grouhel	Adecal Technopole		

**Ce rapport est cité comme suit :** Ighiouer S., Fernandez JM, Moreton M., 2020. Étude des proxys potentiels pour la prédiction de l'évolution des fonds de bassins : (i) Comportement à une combinaison d'amendements ; (ii) Evaluation simplifiée de la réserve alcaline. Mars 2022. Contrat AEL/Adecal Technopole n°502-AD-21\_P\_v2.0/D21-0212, 21p.



## TABLE DES MATIERES

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>A.</b>	<b>RAPPEL.....</b>	<b>6</b>
<b>B.</b>	<b>OBJECTIFS .....</b>	<b>6</b>
<b>II.</b>	<b>METHODOLOGIE .....</b>	<b>8</b>
<b>A.</b>	<b>TESTS SUR LES COMBINAISONS D'AMENDEMENTS .....</b>	<b>8</b>
<b>B.</b>	<b>TESTS D'EVALUATION SIMPLIFIEE DE LA RESERVE ALCALINE.....</b>	<b>9</b>
<b>III.</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>10</b>
<b>A.</b>	<b>TESTS DE COMBINAISON D'AMENDEMENT.....</b>	<b>10</b>
<b>B.</b>	<b>TESTS D'EVALUATION SIMPLIFIEE DE LA MISE EN PLACE D'UNE RESERVE ALCALINE.....</b>	<b>11</b>
<b>IV.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>14</b>



## I. INTRODUCTION

### A. RAPPEL

Depuis plusieurs années, la filière crevetticole de Nouvelle-Calédonie rencontre des difficultés se traduisant par une chute des rendements de production. Un des potentiels facteurs de cette baisse se trouve être le vieillissement des fonds de bassins qui peut s'expliquer par l'acidification des sols (Lemmonier H.2020).

Afin de limiter cette acidification, des amendements sont ajoutés aux sols avant la mise en eau des bassins par les éleveurs. Cependant, les ajouts sont aujourd'hui réalisés sans méthodologie particulière selon le sol à traiter ou la variation spatiale de ses caractéristiques.

AEL a d'ores et déjà réalisé deux études qui ont permis de rendre compte de l'hétérogénéité de l'acidité du sol présente dans un bassin (bassin F de la SODACAL) et de comparer les différents amendements utilisés sur le territoire calédonien.

Les amendements disponibles fournis par le GFA ont montré une efficacité similaire. De plus, un produit carbonaté supplémentaire a été testé, la calcite récifale, qui s'est révélée globalement être aussi efficace que les produits industriels vendus. De surcroît, ce produit semble être économiquement plus avantageux.

**Note :** Les premières études ont été réalisées en octobre 2020 sur un prélèvement de sol très acide (320b), provenant de la ferme SODACAL (bassin F). Ce site a de nouveau été visité en octobre 2021 (même point GPS) afin de réaliser un nouveau prélèvement pour une nouvelle étude. Cependant, une année séparant les deux prélèvements, un cycle élevage et un récurage de la zone identifiée comme la plus acide du bassin ont été réalisés. À la suite de ce décapage, le sédiment au point de prélèvement 320b s'est avéré présenter une acidité mesurée très inférieure à l'attendu, se différenciant ainsi notablement du prélèvement de 2020. Pour cette raison, le sédiment utilisé dans cette étude sera nommé : 320b2.

### B. OBJECTIFS

La première étape de cette Phase 2 du projet global est de tester des « combinaisons d'amendements » sur le sédiment 320b2 prélevé en octobre 2021. En effet, les tests réalisés lors de la Phase 1B ont semblé montrer que l'ajout d'un seul amendement carbonaté (exemple le Calcimer) n'était pas suffisant pour remonter le pH acide du sédiment 320b au-dessus de 6,5. Seule la chaux éteinte était en mesure de dépasser cette valeur mais il restait à déterminer la durabilité de cette alcalinisation.

A travers une série d'expérimentations, le but a donc été d'essayer de constituer une réserve alcaline



**PROTEGE**  
PROJET RÉGIONAL OcéANien DES TERRITOIRES  
POUR LA GESTION DURABLE DES ÉCOSYSTÈMES

au sédiment en combinant, a minima, l'ajout de deux amendements, dont la chaux éteinte serait le premier ajout à réaliser compte tenu de son pouvoir d'alcalinisation plus élevé que celui des carbonates.

L'étude présentée a donc eu pour objectifs de :

- Réaliser des tests de neutralisation (en mode batch) sur un type de sol (320b2), en eau de mer et avec ajout d'amendements sous la forme de de types de « combinaisons » ;
- Tester la réserve alcaline potentielle du sédiment après l'ajout d'un ou plusieurs amendements ;
- Mesurer les concentrations en métaux présents dans l'eau interstitielle des échantillons, comme conséquence de l'alcalinisation ;
- Mesurer la teneur en carbonate du sédiment avant et après l'ajout d'un ou plusieurs amendements pour apporter des précisions sur l'efficacité du protocole d'alcalinisation.





## II. METHODOLOGIE

**Rappel :** le décapage effectué au cours de l'année 2021 a eu pour conséquence de modifier les caractéristiques physico-chimiques à l'emplacement du point de prélèvement du sédiment 320b. De plus, l'échantillonnage semble avoir été réalisé en présence d'eau, pouvant ainsi diluer l'acidité contenue à l'interface du sol. De ce fait, le sédiment 320b2 a fait l'objet d'un séchage par exposition au rayonnement solaire (IR + UV) afin de simuler un processus « naturel » comme celui qui se produit dans les bassins des fermes et qui est probablement à l'origine de l'oxydation de la pyrite, et donc de l'acidité (Kalpage, 1974 ; Golez, 1995 ; Rayment & Lyons, 2011 ; Lemonnier, 2020).

Malgré cette étape de séchage, le pH du sédiment 320b2 s'est situé aux alentours de 5,80-6,00 ; pour mémoire, le sédiment 320b, avait atteint la valeur de pH=3.

Les tests ont tout de même été réalisés avec le sédiment 320b2, mais un reliquat de sédiment 320b a permis de réaliser un test complémentaire dont les résultats figurent dans ce document, pour information comparative.

L'échantillonnage du sédiment 320b2 du bassin F SODACAL a été réalisé le 15 octobre 2021 par l'ADECAL/CTA.

### A. TESTS SUR LES COMBINAISONS D'AMENDEMENTS

L'objectif de ces expérimentations est de contrecarrer l'acidification potentielle d'un sédiment. Deux séries de tests ont été mis en place :

- dans la première série, le but a été de neutraliser drastiquement l'acidité par un ajout de chaux éteinte dont le pouvoir d'alcalinisation est bien supérieur à celui des carbonates : **action curative**. Puis, après avoir recouvré un pH acceptable ( $\text{pH} \leq 6,50$ ), il devait s'agir de conserver ce niveau de pH en s'appuyant sur une réserve alcaline constituée par un ajout de calcite récifale, si nécessaire : **action préventive** ;
- dans la deuxième série, il a été recherché d'évaluer le comportement du sédiment en superposer les **actions curatives et préventives** afin de n'appliquer au sédiment qu'une seule étape d'amendement avec un mixte de chaux éteinte et de calcite récifale à la fois.

La quantité d'amendement ajoutée à l'échantillon 320b2 est basée sur le calcul de l'acidité nette (AN) résultant de l'acidité potentielle (AP) corrigée de la capacité de neutralisation (ANC), paramètres calculés au cours de l'étude de la Phase-1B pour l'échantillon 320b.

Les conditions opératoires (quantités d'eau de mer et d'amendements) sont résumées dans le Tableau 1. Lestros tests ont été réalisés en triplicat.

**Tableau 1 : Quantité totale d'échantillon de sol 320b2, volume d'eau de mer et masse d'amendement ( $\phi < 100 \mu\text{m}$ ) pour les tests de neutralisation des sols.**

Echantillon	Quantité totale de sédiment	Volume d'eau de mer	Masse d'amendement
320b2 témoin	10 g	20 mL	-
320b2 combinaison 1	10 g	20 mL	290 mg chaux éteinte <b>ET PUIS</b> 290 mg calcite récifale



---

320b2 combinaison 2

10 g

20 mL

290 mg chaux éteinte **PLUS**  
290 mg calcite récifale

---

**Combinaison 1** : dans un tube de type Falcon, la chaux éteinte ( $\varnothing < 100\mu\text{m}$ ) est ajoutée au sédiment 320b2 préalablement séché et broyé. Le tout est ensuite mélangé manuellement à des fins d'homogénéisation avant que l'eau de mer ne soit ajoutée. La solution est alors placée sous agitation constante et les mesures de pH sont prises séquentiellement toutes les 24h. L'ajout du second amendement (calcite récifale) est alors conditionné à l'apparition d'un pH d'équilibre (valeur de plateau) de l'échantillon sédimentaire.

**Combinaison 2** : la chaux éteinte ( $\varnothing < 100\mu\text{m}$ ) et la calcite récifale ( $\varnothing < 100\mu\text{m}$ ) sont ajoutées au sédiment 320b2, préalablement séché et broyé. Pour des raisons d'homogénéisation, les trois phases solides sont placées dans des tubes de type Falcon puis mélangées manuellement avant que l'eau de mer ne soit ajoutée. Les tubes sont placés ensuite sous agitations constantes et les mesures de pH sont prises séquentiellement toutes les 24h.

**Note** : Les quantités d'amendements ajoutées sont basées sur les calculs de l'acidité nette (AN) déterminée pour le sédiment 320b prélevé lors de l'étude de Ighiouer et al, 2021, l'AN du 320b2 n'ayant pas été envoyé pour analyse en Australie.

En complément des mesures de pH, les concentrations de différents éléments (Cu, Co, Fe, Mn, Ni, Cr) dans la solution d'eau de mer de chaque échantillon. Les analyses ont été réalisées dans la fraction filtrée à  $0,45\ \mu\text{m}$ .

## B. TESTS D'ÉVALUATION SIMPLIFIÉE DE LA RÉSERVE ALCALINE

L'objectif de ce test avait pour but de mettre en évidence l'action qu'une réserve alcaline contenue dans le sédiment amendé aurait lorsqu'une acidification semble se produire à la suite d'un cycle d'élevage. Cette diminution du pH a été simulée en ajoutant une solution d'acide sulfurique.

Les conditions opératoires sont résumées dans le Tableau 2. Comme précédemment, les tests sont réalisés en triplicat.

**Tableau 2 : Quantité totale d'échantillon de sol, volume d'eau de mer et masse d'amendement ( $\varnothing < 100\ \mu\text{m}$ ) pour les tests d'évaluation simplifiée de la réserve alcaline.**

Echantillon	Quantité totale de sédiment	Volume d'eau de mer	Masse d'amendement	Quantité $\text{H}_2\text{SO}_4$
320b2 témoin	10 g	20 mL	-	0,003 mole
320b2 combinaison 1	10 g	20 mL	290 mg chaux éteinte <b>ET PUIS</b> si besoin 290 mg calcite récifale	0,003 mole
320b2 combinaison 2	10gg	20 mL	290 chaux éteinte <b>PLUS</b> 290 mg calcite récifale	0,003 mole

Les « combinaisons 1 et 2 » de sédiment et d'amendements sont préparées de manières identiques à celles décrites précédemment. Ensuite, les tubes sont également placés sous agitations constantes et les mesures de pH sont prises séquentiellement toutes les 24h.

Après stabilisation du pH, une quantité d'acide sulfurique est ajoutée à chacun des trois échantillons.



Cette quantité d'acide sulfurique a été calculée par rapport au nombre de mole de carbonate à neutraliser. En effet, pour 0,290 g de  $\text{CaCO}_3$  ( $M=100\text{g}$ ) ajouté, soit 0,003 mole, il faut une molarité équivalente de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pour neutraliser la calcite, soit une masse équivalente à 0,294 g d'acide. La densité de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $M=98\text{g}$ ) étant de  $1,83\text{ g/cm}^3$ , le volume d'acide concentré à 98% qu'il faut ajouter est donc d'environ 0,164 mL.

A la suite des mesures de pH, le pourcentage de teneur en carbonates (Ca-Mg) dans le sédiment est mesuré pour chacun des trois échantillons.



### III. RESULTATS

#### A. TESTS DE COMBINAISON D'AMENDEMENT

##### 1. Evolution du pH

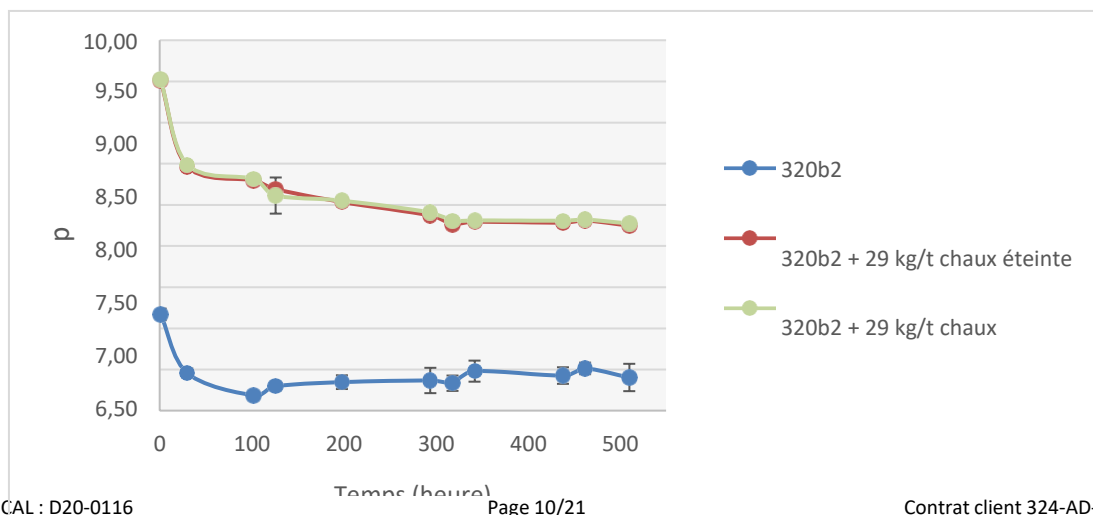
Les trois courbes montrent des allures comparables seulement différenciées par les valeurs de départ respectives (Figure 1) : le pH mesuré 1 heure après la mise en contact avec l'eau de mer décroît jusqu'à des valeurs d'équilibre.

En effet, le pH de l'échantillon brut 320b2 sans amendement, dont la valeur après mise en contact avec l'eau est de 6,7, descend entre 5,80 et 6 au terme de seulement 30 heures, approximativement. Pour les deux autres échantillons, l'ajout d'amendement, quel que soit la combinaison (1 ou 2), provoque dans un premier temps une augmentation rapide du pH par rapport au 320b non-amendé : dès la première heure il montre à 9,5, puis décroît lentement pour enfin se stabiliser à un pH avoisinant 7,80 au terme de 300 heures approximativement.

Après 500 heures de test, le pH est toujours stable et on ne discerne toujours aucune différence, en termes d'alcalinisation, entre les effets de la chaux éteinte seule (**Combinaison 1**) et ceux résultant de ce même mélange renforcé avec de Calcite récifale (**Combinaison 2**). En effet, les courbes de pH des deux cycles de mesures (Figure 1) sont confondues du début jusqu'à la fin du test.

Les chutes de pH pour les échantillons amendés traduisent les cinétiques d'alcalinisation qui résultent de la mise en place des équilibres physico-chimiques entre l'eau de mer, le sédiment et les amendements. En effet, un laps de temps relativement long ( $t=300$  heures), a été nécessaire pour stabiliser le pH. Cette lente stabilisation du pH à environ 7,8 peut traduire le fait que la chaux éteinte gouverne le processus d'alcalinisation, à l'instar des observations réalisées au cours de la Phase-1B de l'étude (Ighiouer et al, 2021).

**Note :** le sédiment 320b2 ne présente pas d'acidité remarquable à l'équilibre ( $5,8 < \text{pH} < 6,0$ ), à la différence de l'échantillon 320b initial (Ighiouer et al, 2021) pour lequel l'acidité était clairement exprimée ( $\text{pH}=3,15 \pm 0,1$ ).





**Figure 1 : Suivi de l'évolution du pH de l'échantillon 320b2 en fonction des différents amendements ajoutés (fraction  $\emptyset < 100 \mu\text{m}$ ). Comparaison avec le comportement du sédiment brut non-amendé. Valeurs moyennes et écarts-types (n=3).**

Par ailleurs, avec les mêmes taux d'amendement (29 kg/t) pour les combinaisons 1 et 2, on peut conclure que le rôle des carbonates est tout à fait négligeable, à ces niveaux de pH supérieur à 6,50, comme constaté par Ighioueret al, 2021. Le pH ne pourrait diminuer que si des radicaux hydroxyle (OH<sup>-</sup>) venaient à être consommés.

## 2. Concentration en éléments dissous

L'analyse des solutions de chacun des 3 sédiments permet de constater que l'ajout d'amendement a un impact sur les concentrations en métaux dissous (Tableau 3). En effet, dans les échantillons d'eau prélevés à l'équilibre physico-chimique montrent que :

- pour le Co, Mn, Ni et Cr(VI), les quantités solubilisées ont diminué fortement pour les pH voisins de 7,5, quel que soit le type de combinaison (chaux éteinte complétée ou non par la calcite récifale). Ainsi par exemple, la concentration en Mn dans les eaux de mélange a été divisée par un facteur 68 et 48, puisqu'elle passe de 3.062 µg/L dans l'échantillon 320b2 non-amendé à 44,86 µg/L et 64,07 µg/L, pour les combinaisons 1 et 2, respectivement. Pour Ni, cette diminution est respectivement de 26 et 15 fois ;
- inversement, dans le cas du cuivre (Cu), la concentration augmente lorsque le ou les amendements sont ajoutés au sédiment et que le pH augmente vers les valeurs alcalines. En effet, les concentrations sont 2 à 3 fois plus élevées dans les eaux de mélange du sédiment 320b2 amendé ; ce comportement du cuivre avait déjà été observé lors de la Phase-1A du projet (Boulay et al, 2020). Les raisons de cette solubilisation restent, pour l'instant, à élucider.

**Tableau 3 : Concentrations en métaux (Co, Cu, Fe, Mn, Ni), en Cr(VI) et en Aluminium dans les eaux interstitielles (EDM). Analyses réalisées dans les fractions filtrées à 0,45 µm.**

Echantillon	Co (µg/L)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	Al (µg/L)	Cr(VI) (µg/L)
320b2	49,60	5,38	<0,059	3062	92,79	<10	0,540
320b2 + 29kg/t chaux éteinte ( <b>combinaison 1</b> )	<0,027	17,99	<0,059	44,86	3,45	<10	<0,05
320b2 + 29kg/t chaux éteinte + 29kg/t Calcite récifale ( <b>combinaison 2</b> )	<0,027	12,01	<0,059	64,07	6,23	<10	<0,05

## B. TESTS D'ÉVALUATION SIMPLIFIÉE DE LA MISE EN PLACE D'UNE RÉSERVE ALCALINE

### 1. Tests sur l'échantillon 320b2

**Rappel :** Le pH d'équilibre de l'échantillon 320b2 brut (sans amendement) se situe aux alentours de 6,00 ±0,10 (Figure 1 et Figure 2). Cette valeur augmente drastiquement lorsque des ajouts de chaux éteinte, voire de calcite dans les proportions correspondant aux combinaisons 1 et 2, sont réalisés. Comme précédemment, quel que soit la combinaison, le pH est identique pour les deux échantillons, c'est-à-dire stable à 7,75 ±0,10.

Au terme de t = 650 h environ, la quantité d'acide sulfurique (0,03 mole) précédemment calculée a été ajoutée dans chacun des trois échantillons. Il s'en est suivi une chute notable du pH pour tous les



*Evolution des fonds de bassins d'élevage et recherche de Proxys*  
échantillons amendés et celle est particulièrement drastique pour le 320b2 non-amendé. En effet, le pH du sédiment sans amendement a chuté à 1, celui de la « combinaison 1 » a atteint une valeur de 4,80, alors que le pH de l'échantillon de la



« combinaison 2 » n'est descendu qu'à une valeur de 6,02, perdant ainsi seulement que 1,8 unité de pH par rapport à la combinaison 1 (chaux éteinte). Cette diminution moindre du pH par rapport à la « combinaison 2 » montre que la quantité de carbonates fournis par l'ajout de calcite récifale a permis de renforcer le pouvoir neutralisant de l'amendement effectué avec la seule chaux éteinte face à une acidification momentanée du sédiment.

Toutefois, dans les conditions opératoires et quel que soit l'échantillon, la chute du pH n'a pas conséquence durable. En effet, à peine 3 heures après l'ajout d'acide sulfurique, le pH montre une tendance à remonter. Ainsi, au terme de 200 heures de mise à l'équilibre, le pH de :

- l'échantillon 320b2 non-amendé est remonté à 2,30 de moyenne ;
- l'échantillon de la « combinaison 1 », c'est-à-dire avec la présence de chaux éteinte, a été mesuré à une valeur moyenne de 6,58 ;
- l'échantillon de la « combinaison 2 » alcalinisé avec l'ajout des deux amendements (chaux éteinte + calcite récifale) se situe environ à 7,00.

Ce test montre que contrairement à l'échantillon 320b2 non-amendé, l'amendement (combinaisons 1 et 2) permet une nette remontée du pH des sédiments au-dessus de 6. Cette observation signifie que ces deux derniers sédiments possèdent une potentielle réserve alcaline générée par la présence de la chaux éteinte et celle de la Calcite récifale. De plus, **l'ajout complémentaire de calcite récifale montre que la réponse du sédiment à l'acidification provoquée est meilleure** en atteignant un plateau d'équilibre supérieur de quasiment une demi-unité de pH. De plus grandes différences devrait pouvoir être observées avec des acidifications successives permettant de consommer les ions hydroxyles encore présents dans la solution.

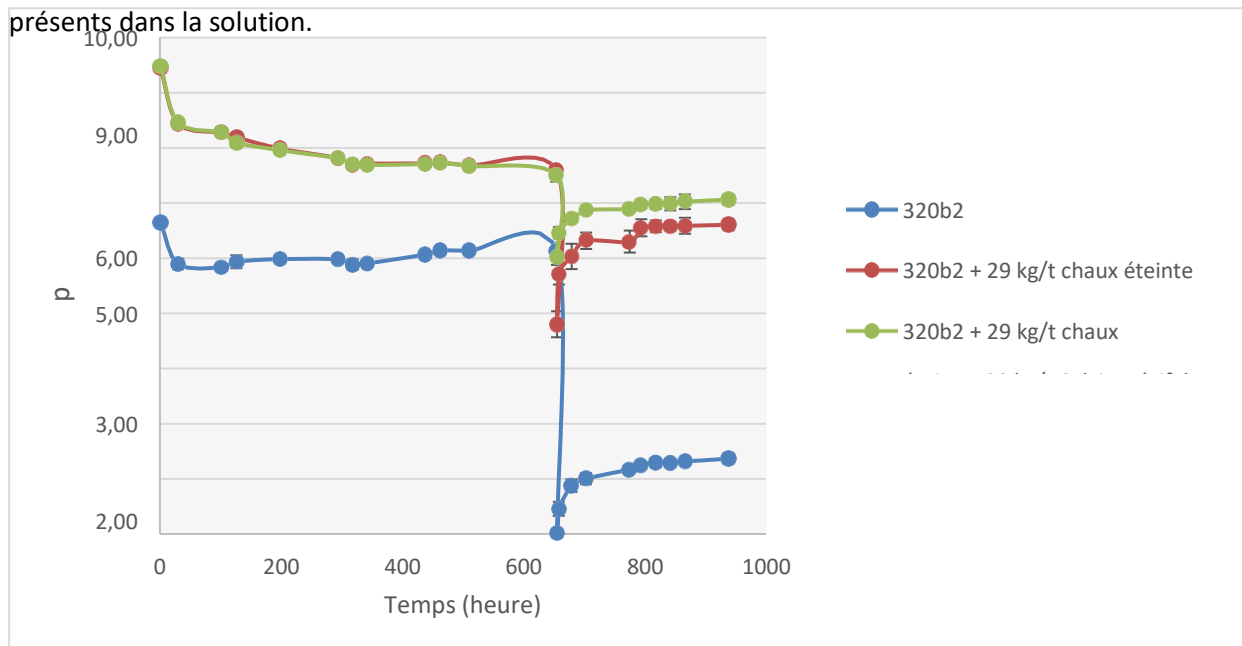


Figure 2 : Suivi de l'évolution du pH de l'échantillon 320b2 amendé avec de la chaux éteinte et de la calcite récifale et simulation d'une reconstitution de la charge acide (à t = 650h). Valeurs moyennes et écarts-types (n=3).

## 2. Test complémentaire sur l'échantillon 320b



A titre de comparaison et pour resituer les résultats dans leurs contextes respectifs, une expérimentation identique d'amendement avec de la chaux éteinte a été réalisée avec l'échantillon 320b prélevé en octobre 2020 dans le bassin SODACAL (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Pour rappel, ce sédiment montrait un pH très acide a voisinant la valeur de 3, avec une acidité nette (AN) mesurée à 392 moles H<sup>+</sup>/t.

Les résultats (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) montrent que :



- d'une part, le sédiment 320b amendé avec de la chaux éteinte remonte le pH à une valeur d'équilibre d'environ 6,90, valeur qui est plus faible que celle obtenue pour l'échantillon 320b2 amendé et mesurée à environ pH=7,8 ;
- d'autre part, l'ajout d'acide sulfurique provoque une chute immédiatement du pH à 1,30, valeur bien plus faible aussi que celle obtenue pour le sédiment 320b2 (4,8).
- Enfin et bien que le test n'ait pas été conduit au-delà des 50 heures après l'acidification, il est clair que le pH ne peut remonter qu'à des valeurs bien inférieures à celles de l'échantillon 320b2, en raison de sa plus forte acidité naturelle mesurée ( $3,15 \pm 0,15$ ). En effet, au terme de cette expérimentation complémentaire, le sédiment 320b montrait un pH encore très acide (pH = 2,35) tendant vers sa valeur naturelle, alors qu'il a atteint 6,32 pour l'échantillon 320b2, après 50 heures de mise à l'équilibre.

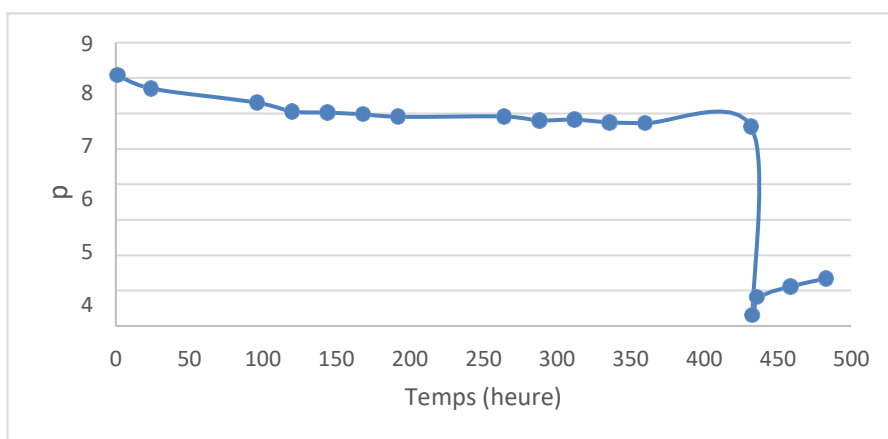


Figure 3 : Suivi de l'évolution du pH de l'échantillon 320b amendé avec un ajout de 290 mg de chaux éteinte et acidifié avec 0,003 mole d'acide sulfurique. Simulation d'une reconstitution de la charge acide temporaire à t=423h.

### 3. Composition en carbonates

Les pourcentages en carbonate mesurés dans les échantillons diffèrent uniquement lorsque la calcite récifale est présente dans le sédiment. En effet, le sédiment ayant subi le traitement « combinaison 2 » atteint 2,9% de teneur en carbonate tandis que les deux autres échantillons ont un pourcentage voisin de 1. Ces mesures ont été effectuées après l'ajout d'acide sulfurique.

Le pourcentage de carbonate dans l'échantillon 320b2 avant acidification du sédiment est de 2,1%, cette valeur est cependant quelque peu surprenante. Toutefois, bien que naturellement beaucoup plus acide, l'échantillon 320b bien n'était composé que de 0,5% massique, soit 2,5% de  $\text{CaCO}_3$ , si l'on considère que la totalité du Ca mesuré vient des carbonates de calcium.

Tableau 4 : Teneur en carbonate dans les échantillons de sédiment 320b2 après l'ajout de 0,003 mole d'acide sulfurique. Comparaison avec la valeur du sédiment naturel non acidifié (n=1).

Echantillon	Carbonates (Ca-Mg, %)
320b2 avant acidification	2,1
320b2	1,2
320b2 + 29kg/t chaux éteinte (1)	1,1



---

320b2 + 29kg/t chaux éteinte + 29 kg/t Calcite récifale (2)

---

2,9



## IV. CONCLUSION

Cette Phase-2 de l'étude a été conduite avec un sédiment (320b2) dont l'acidité mesurée était moins prononcée que celle du 320b, respectivement pH=5,8 et pH=3,0. Malgré cette notable différence, les résultats montrent que (Figure 4) :

- A l'ajout des amendements alcalins, le sédiment réagit par une augmentation du pH de manière conséquente de pH de 5,8 à 7,6 (valeurs d'équilibre), quel que soit la « combinaison 1 ou 2 ». Le comportement identique pour les deux combinaisons d'amendement et la valeur élevée de pH momentanément atteinte (pH=9,5) tendent à prouver que la chaux gouverne l'alcalinisation du sédiment, la dissolution des carbonates n'intervenant de manière très notable que pour les pH inférieurs à 5,5 ;
- L'acidification provoquée avec l'ajout de 0,003 mole de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fait redescendre le pH à des valeurs plus acides (pH=4,8), mais retrouve rapidement une nouvelle valeur d'équilibre à pH=6,6. Ce retour à la valeur initiale du sédiment fait penser que la quantité de chaux éteinte (0,003 mole) a été consommée dans sa totalité ;
- L'ajout de 0,003 mole de carbonates de calcium (calcite récifale) conduit à une légère remontée du pH au-dessus de 7. Cette sensible augmentation permet de conclure à la présence d'une potentielle réserve alcaline, c'est-à-dire d'une importante proportion de carbonates non consommés, comme le suggérait déjà le test conduit avec la « combinaison 2 » (chaux éteinte + calcite récifale) dont le pH d'équilibre est tout à fait similaire (Figure 2). Cette observation tend à montrer que quelle que soit la « combinaison 1 ou 2 », le niveau de la réserve semble très comparable. Une nouvelle acidification pourrait indiquer de quelle manière cette réserve agira ;
- L'ajout d'amendements et l'augmentation inhérente du pH autour de 9,50, a pour conséquence une diminution des concentrations de certains métaux dissous dans les eaux de mélange (Co, Fe, Mn et Ni). A contrario, le Cu montre une certaine tendance avérée à l'augmentation. Malgré qu'aucune analyse n'ait été réalisée après l'acidification, la re-solubilisation des métaux est le mécanisme qui a dû se mettre en place indubitablement, car maintes fois décrit dans la littérature scientifique.

Le test complémentaire avec le reliquat d'échantillon 320b, dont l'acidité nette (AN) était importante, a été conduit pour apporter un complément de réponse à la mise en place d'un cycle « alcalinisation-acidification- alcalinisation » (Figure 4). En résumé, il a mis en évidence très clairement que le seul ajout de chaux éteinte n'est pas une solution suffisante pour constituer une réserve alcaline. En effet :

- L'ajout de chaux éteinte a bien permis de monter, de manière remarquable, le pH acide du 320b d'environ 3,00 à un moins de 7,00 (plateau d'équilibre). Cette augmentation de quasiment 4 unités de pH est 2 fois plus importante que celle observée avec le sédiment 320b2, mais son pH d'équilibre est inférieur de 1 unité de pH ;  
L'acidification du sédiment a pour conséquences de faire décroître drastiquement le pH à une valeur d'équilibre d'environ 2,4, valeur très proche de celle mesurée sur le sédiment non-amendé. Cette diminution de 4 unités de pH, signifie que, non seulement la totalité des ions hydroxydes (OH<sup>-</sup>) a été neutralisée mais que l'acidification a été quelque peu accentuée ;
- L'ajout de calcite récifale a permis de neutraliser très rapidement une bonne partie de l'acidité ajoutée et le pH remonte à une valeur supérieure à celle de départ : il y a donc bien l'amorce d'une réserve alcaline.

Un deuxième test supplémentaire amendé avec de la chaux éteinte additionnée de calcite récifale (combinaison 2) n'a pu être conduit par manque de matière en sédiment 320b.

En conclusion :

- La neutralisation contrôlée du sédiment est démontrée, dès lors la constitution d'une réserve alcaline est tout à fait envisageable ;
- La nature composite, c'est-à-dire de type « combinaison 2 », aura des effets identiques à des amendements ajoutés successivement, comme le cas de la « combinaison 1 ». L'amendement unique sera préféré pour sa meilleure applicabilité sur le terrain ;
- Le traitement doit pouvoir inclure une action dite « curative » et à cet effet, il sera choisi la chaux éteinte capable de remonter très fortement le pH. L'étape préventive sera constituée de carbonates de calcium, la calcite récifale pouvant jouer ce rôle ;
- Les proportions de chacun de ces deux amendements doivent être calculées pour différents types de sédiments et niveaux d'acidité ; il n'est pas encore clair si le traitement curatif doit être surdosé ou l'inverse, des tests faisant varier les quantités calculées à partir des acidités nette (AN) déterminées analytiquement sera nécessaire ;
- A ce stade, les expérimentations en macrocosmes ne semblent plus indispensables en raison notamment des temps de contact longs (t>500 heures/étape) déployés lors de cas tests.

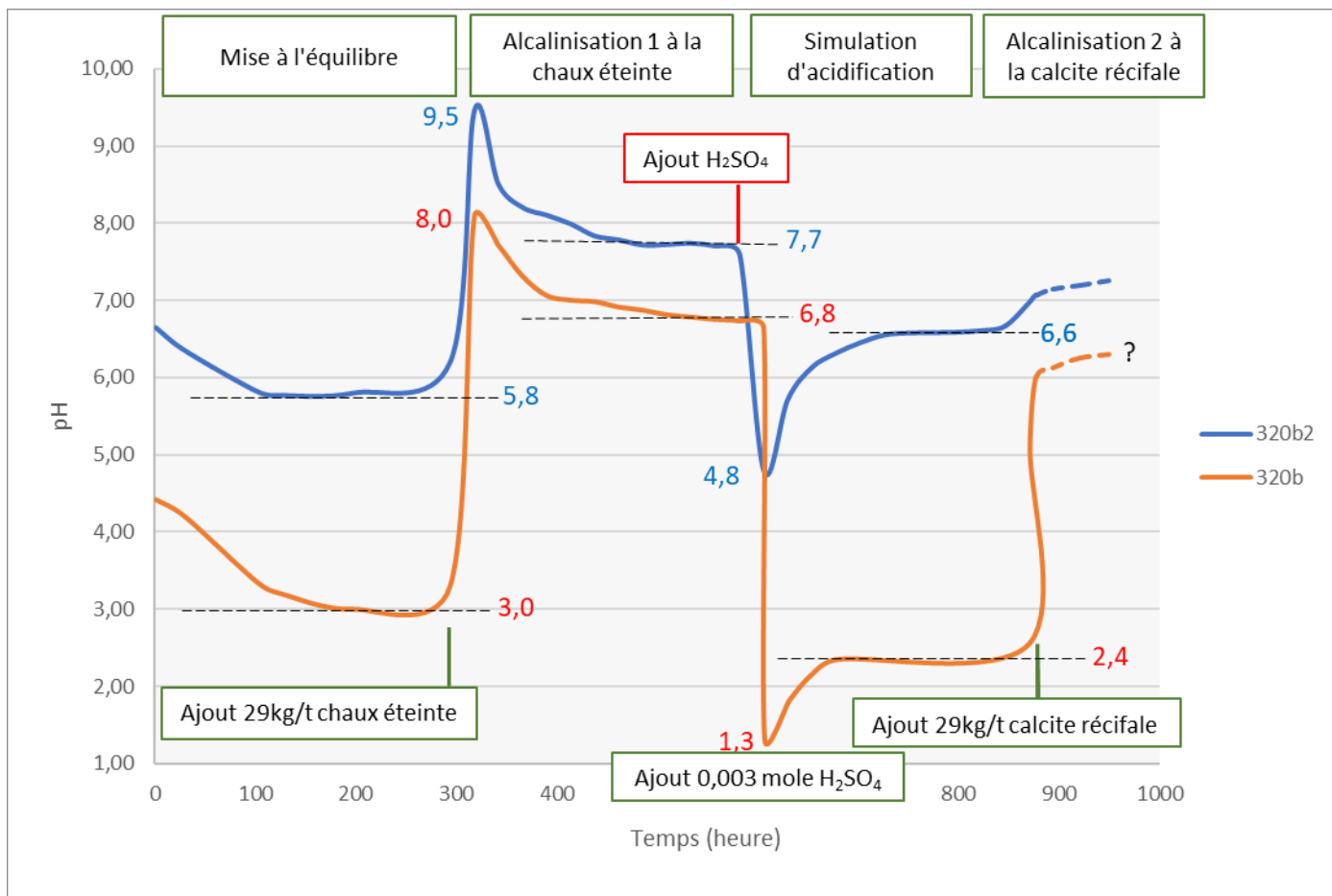


Figure 4 : Reconstitution de la phénoménologie des cycles d'alcalinisation-acidification sur des sédiments d'acidité forte (320b) et faible (320b2).

## REFERENCES

- Boulai E., Fernandez JM, Moreton M., 2020. Étude des proxys potentiels pour la prédiction de l'évolution des fonds de bassins. Étude bibliographique et étude de préfaisabilité. Décembre 2020. Contrat AEL/Adecap Technopole n° D136 / 364-AD-20-P\_V2.1, 49p.
- Golez, N. V. (1995). Formation of acid sulfate soil and its implications to brackishwater ponds. *Aquacultural Engineering*, 14(4), 297-316
- Ighiouer S., Fernandez JM, Moreton M., 2021. Étude des proxys potentiels pour la prédiction de l'évolution des fonds de bassins. Développement méthodologique pour le remédiation des sols acides par alcalinisation. Septembre 2021. Contrat AEL/Adecap Technopole n° D166 / 467-AD-21-P\_V1.0, 34p
- Kalpage, F. S. (1974). Tropical soils; classification, fertility and management. Tropical soils; classification, fertility and management.
- Lemonnier H. 2020. Caractérisation des sédiments des fonds de bassin des différentes fermes aquacoles de Nouvelle-Calédonie. Compilation des fiches techniques publiées de 1998 à 2000. Comptes rendus de campagnes, Ifremer LEAD, 251p.
- Rayment, G. E., & Lyons, D. J. (2011). *Soil chemical methods: Australasia* (Vol. 3). CSIRO publishing.

## LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SUIVI DE L'ÉVOLUTION DU PH DE L'ÉCHANTILLON 320B2 EN FONCTION DES DIFFERENTS AMENDEMENTS AJOUTES (FRACTION  $\phi < 100 \mu\text{m}$ ).

COMPARAISON AVEC LE COMPORTEMENT DU SEDIMENT BRUT NON-AMENDE. VALEURS MOYENNES ET ECARTS-TYPES (N=3)..... 10

FIGURE 2 : SUIVI DE L'ÉVOLUTION DU PH DE L'ÉCHANTILLON 320B2 AMENDE AVEC DE LA CHAUX ÉTEINTE ET DE LA CALCITE RECIFALE ET SIMULATION D'UNE RECONSTITUTION DE LA CHARGE ACIDE (A T = 650H). VALEURS MOYENNES ET ECARTS-TYPES (N=3) ..... 12

FIGURE 3 : SUIVI DE L'ÉVOLUTION DU PH DE L'ÉCHANTILLON 320B AMENDE AVEC UN AJOUT DE 290 MG DE CHAUX ÉTEINTE ET ACIDIFIÉ AVEC 0,003 MOLE D'ACIDE SULFURIQUE. SIMULATION D'UNE RECONSTITUTION DE LA CHARGE ACIDE TEMPORAIRE A T=423H .....13

FIGURE 4 : RECONSTITUTION DE LA PHÉNOMÉNOLOGIE DES CYCLES D'ALCALINISATION-ACIDIFICATION SUR DES SEDIMENT D'ACIDITÉ FORTE (320B) ET FAIBLE (320B2)..... 15





## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : QUANTITE TOTALE D'ÉCHANTILLON DE SOL 320B2, VOLUME D'EAU DE MER ET MASSE D'AMENDMENT ( $\phi < 100 \mu\text{m}$ ) POUR LES TESTS DE NEUTRALISATION DES SOLS.....	8
TABLEAU 2 : QUANTITE TOTALE D'ÉCHANTILLON DE SOL, VOLUME D'EAU DE MER ET MASSE D'AMENDMENT ( $\phi < 100 \mu\text{m}$ ) POUR LES TESTS D'ÉVALUATION SIMPLIFIÉE DE LA RÉSERVE ALCALINE.....	9
TABLEAU 3 : CONCENTRATIONS EN MÉTAUX (Co, Cu, Fe, Mn, Ni), EN Cr(VI) ET EN ALUMINIUM DANS LES EAUX INTERSTITIELLES (EDM). ANALYSES RÉALISÉES DANS LES FRACTIONS FILTRÉES À 0,45 $\mu\text{m}$ .....	11
TABLEAU 4 : TENEUR EN CARBONATE DANS LES ÉCHANTILLONS DE SEDIMENT 320B2 APRES L'AJOUT DE 0,003 MOLE D'ACIDE SULFURIQUE. COMPARAISON AVEC LA VALEUR DU SEDIMENT NATUREL NON ACIDIFIÉ (N=1) .....	13



## ANNEXES

ANNEXE 1.....	20
ANNEXE 2.....	21

Annexe 1

Tableau 5 : Moyennes et écart-types des mesures de pH du test de combinaison d'amendement

Echantillon	320b2 (moyenne)	Ecart type 320b2	320b2 + 29 kg/t chaux éteinte (moyenne)	Ecart type (320b2 + 29 kg/t chaux éteinte)	320b2 + 29 kg/t chaux éteinte+29 kg/t Calcite récifale (moyenne)	Ecart type (320b2 + 29 kg/t chaux éteinte+29 kg/t Calcite récifale)
Temps (h)						
1	6,67	0,07	9,51	0,02	9,52	0,05
30	5,96	0,06	8,46	0,02	8,49	0,02
102	5,69	0,04	8,30	0,02	8,31	0,01
126	5,80	0,05	8,19	0,04	8,11	0,22
198	5,85	0,08	8,03	0,02	8,05	0,04
294	5,87	0,15	7,87	0,01	7,91	0,01
318	5,83	0,09	7,76	0,01	7,80	0,03
342	5,98	0,13	7,79	0,02	7,81	0,03
438	5,93	0,10	7,78	0,02	7,81	0,03
462	6,01	0,07	7,81	0,01	7,82	0,03
510	5,90	0,17	7,75	0,01	7,77	0,02

## Annexe 2

**Tableau 6 : Moyennes et écart-types des mesures de pH du test d'évaluation simplifiée de la réserve alcaline**

Echantillon	320b2 (moyenne)	Ecart type 320b2	320b2 + 29 kg/t chaux éteinte (moyenne)	Ecart type (320b2 + 29 kg/t chaux éteinte)	320b2 + 29 kg/t chaux éteinte+29 kg/t Calcite récifale (moyenne)	Ecart type (320b2 + 29 kg/t chaux éteinte+29 kg/t Calcite récifale)
Temps (h)						
1	6,65	0,06	9,45	0,02	9,48	0,02
30	5,89	0,10	8,44	0,00	8,46	0,04
102	5,84	0,06	8,28	0,02	8,28	0,05
126	5,94	0,12	8,19	0,02	8,09	0,08
198	5,98	0,03	7,99	0,02	7,96	0,05
294	5,98	0,02	7,82	0,03	7,81	0,01
318	5,88	0,10	7,69	0,03	7,70	0,03
342	5,91	0,02	7,71	0,04	7,69	0,03
438	6,07	0,06	7,72	0,02	7,71	0,03
462	6,14	0,05	7,74	0,02	7,73	0,03
510	6,14	0,05	7,68	0,02	7,67	0,03
654	6,13	0,05	7,60	0,05	7,51	0,12
<b>AJOUT ACIDE H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>						
655	1,02	0,06	4,80	0,24	6,02	0,14
658	1,46	0,13	5,72	0,20	6,46	0,10
679	1,88	0,12	6,03	0,23	6,72	0,06
703	2,00	0,10	6,32	0,15	6,87	0,03
775	2,17	0,07	6,30	0,20	6,89	0,05
794	2,24	0,06	6,55	0,15	6,97	0,07
818	2,29	0,08	6,58	0,11	6,98	0,08
842	2,29	0,07	6,58	0,08	6,99	0,12
866	2,31	0,05	6,59	0,14	7,02	0,13
938	2,37	0,09	6,61	0,10	7,06	0,09
962	2,38	0,04	6,66	0,10	7,07	0,08
1274	3,05	0,04	6,97	0,04	7,50	0,05

