



PROTEGE



Étude des proxys potentiels pour la prédiction de l'évolution des fonds de bassins : bibliographie et préfaissabilité

Rapport final

AEL

Décembre 2020



Photos de couverture AEL : Bassin F de la ferme Sodacal (Nouvelle-Calédonie).

CONTRAT DE CONSULTANCE

AEL-LEA

Contrat n° 364-AD-20-P_V2.1

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

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETUDE DE PREFAISABILITÉ

Décembre 2020

Boulay E., Fernandez JM., Moreton B.

	Ref AEL	Ref Client	
Identification	D136	364-AD-20-P_V2.1	
Titre complet	Étude des proxys potentiels pour la prédiction de l'évolution des fonds de bassins. Étude bibliographique et étude de préfaisabilité. Décembre 2020		
Auteurs	Boulai.E., Fernandez JM., Moreton B		
Résumé	<p>Le programme de travail présenté ici fait suite à une demande de la filière aquacole de Nouvelle-Calédonie, celle-ci observant des chutes de rendements de production de crevettes dans les bassins d'élevage. Une recherche de proxys pour la prédiction de l'évolution géochimique des fonds de bassins, perçue comme potentielle hypothèse de ce déclin, a été proposée. Au vu de l'ampleur des coûts engendrés par l'étude de chacune des 19 fermes aquacoles, la stratégie retenue a été de chercher à sélectionner des fermes « modèles » sur lesquelles conduire les expérimentations. Les bassins étudiés serviront ensuite de démonstrateurs et les protocoles pourront être ensuite étendus à l'ensemble de la filière. Dans ce but, une première étude de faisabilité a semblé nécessaire à des fins de dimensionnement des futures expériences. Ainsi, cette première phase du projet, développée dans ce document, est composée (1) d'une étude bibliographique et de traitements statistiques (ACP et CAH) sur les travaux acquis en 2011 par Boyd afin de chercher à sélectionner les fermes « modèles » et (2) de tests de faisabilité (tests de lixiviation en mode batch) afin de mettre en évidence les potentiels phénomènes de solubilisation des métaux contenus dans les sols.</p> <p>Les traitements statistiques ont permis de conclure sur : la distribution des fermes selon 3 groupes et la sélection du bassin F de la ferme Sodacal pour effectuer les tests de faisabilité.</p> <p>Deux tests en mode batch comportant respectivement deux lixiviations de 96h chacun (séparées par une élimination du surnageant et un séchage de la matière sèche) ont été réalisés, (1) sans étape d'alcalinisation préalable (Test 1) et (2) avec un amendement en carbonates (Test 2). Des mesures de pH et de conductivité ont été réalisées en continu pendant les 192 heures d'expérimentation. À l'issue de chacune des 2 lixiviations, les lixiviats ont été analysés en éléments majeurs et en métaux par ICP-OES. Les résultats du Test 2 montrent que l'ajout de CaCO₃ conduit à une augmentation du pH du sol (effet tampon) et à une réduction des phénomènes de désorption des métaux. La Lixiviation 2 du Test 1 montre qu'une fraction majoritaire des métaux solubilisables a été entraînée lors de la Lixiviation 1. Des lixiviations successives, simulant des mises en eaux répétées, ainsi que la présence de carbonates de calcium qui maintient la solution à un pH de 8, permettent de réduire considérablement les concentrations en éléments majeurs et éléments métalliques relargués dans les lixiviats.</p>		
APPROBATION			
FONCTION	NOMS	VISA	DATE
Rédacteur	Boulai E.	EB	15/12/2020
Vérificateur 1	Fernandez JM.	JMFA	17/12/2020
Vérificateur 2	Pousse C	CP	18/12/2020
Approbateur	Fernandez JM.	JMFA	18/12/2020
EVOLUTION			
VERSION	DESCRIPTION DES MISES A JOUR		DATE
V1.0	Rapport final		21/12/2020
COPIE - DIFFUSION			
NOM	ORGANISME		
Jean François Laplante Cédric Grouhel	Adecal Technopole		

Ce rapport est cité comme suit : 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/Adecal Technopole n° D136 / 364-AD-20-P_V2.1, 49p.

TABLE DES MATIERES

I.	INTRODUCTION.....	6
A.	CONTEXTE.....	6
B.	OBJECTIFS.....	7
II.	METHODOLOGIE.....	8
A.	ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET TRAITEMENTS STATISTIQUES.....	8
B.	ÉCHANTILLONNAGE.....	14
C.	TEST DE FAISABILITÉ TECHNIQUE : TESTS DE LIXIVIATIONS EN MODE BATCH.....	16
III.	RESULTATS.....	18
A.	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES.....	18
B.	ÉLÉMENTS MAJEURS ET ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES.....	20
C.	CORRÉLATION ENTRE LES RÉSULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES ET LES DONNÉES D'IMAGERIE.....	23
IV.	SYNTHÈSE.....	30
V.	PERSPECTIVES.....	31

I. INTRODUCTION

A. CONTEXTE

Le programme de travail s'inscrit dans le cadre de la définition de proxys afin de suivre l'état de vieillissement des fonds de bassins d'aquaculture de Nouvelle-Calédonie. Cette étude fait suite à une demande de la filière aquacole de Nouvelle-Calédonie, victime d'une chute drastique de rendement de production de crevettes (*Litopenaeus stylirostris*) depuis plusieurs années. Des travaux conséquents ont été réalisés par de nombreux acteurs afin de comprendre et d'améliorer les rendements de production dans les bassins. Dès les années 90, le vieillissement des fonds de bassins apparaît comme hypothèse explicative de la dégradation des rendements de production sur certains sites d'élevages (Lemonnier H., 2020). Il n'est cependant pas possible d'affirmer avec certitude que le fond de bassin n'est pas un facteur limitant la productivité, mais aucun indice affirmant le contraire n'a été trouvé (Lemonnier H., 2020. Fiche Biotechnique 98.17. Sodacal – bassin W).

À présent, les travaux résident dans la détermination de leviers d'actions, au moyen de mesures simples (définitions de Proxys) sur lesquels, en particulier les fermiers de la filière aquacole de Nouvelle-Calédonie, pourront s'appuyer. Plusieurs outils de suivis de l'évolution des fonds de bassins ont donc été envisagés, à commencer par une caractérisation physico-chimique des fonds de bassins représentatifs de chacune des fermes de la filière.

Toutefois, au vu des coûts inhérents engendrés par l'étude de tous les bassins (19 fermes, soit près de 900 échantillons à analyser), la stratégie finalement retenue a été de tenter la sélection de 2 ou 3 « fermes modèles » sur lesquelles les expérimentations seront conduites. Les résultats obtenus pourront alors servir de démonstrateurs afin d'étendre, par la suite, à l'ensemble de la filière l'application des proxys définis pour évaluer le degré de vieillissement des sols.

Préalablement à la mise en place d'un programme plus ambitieux, une étude bibliographique la plus complète possible a été proposée sur la base de données existantes. Son traitement par statistiques descriptives (ACP) devait permettre de sélectionner une ou des fermes/bassins modèles afin de réaliser des tests de faisabilité techniques en matière de comportement des sols des bassins en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques.

Parallèlement à cela, notre travail a consisté à caler deux méthodologies : celle de la prospection aérienne avec celle de l'analyse chimique élémentaire des sols en laboratoire. En effet, les bassins mesurant plusieurs hectares, la Province Sud a rapidement suggéré de faciliter l'acquisition des données de base sur le terrain en utilisant des drones équipés de capteurs (Annexe 1). Cette technologie, déjà appliquée sur les sols agricoles, permet d'obtenir plusieurs indices reflétant certaines propriétés des sols (taux d'humidification avec l'indice de brillance...). Afin de pouvoir utiliser cette méthode à des fins d'interprétation de l'état de vieillissement des sols de fonds de bassins, il est primordial d'étudier la corrélation entre l'imagerie et les résultats des analyses chimiques.

Ce document inclut les étapes des traitements statistiques ainsi que la première phase expérimentale de l'étude (test de faisabilité) comprenant l'échantillonnage, les premiers tests de lixiviation, les résultats obtenus, les traitements d'imageries par drone ainsi que les perspectives.

Remerciements : Nous exprimons nos plus vifs remerciements aux services de la DDDT (Province Sud, Nouvelle-Calédonie) pour leur contribution à réalisation de ce rapport, notamment pour leur disponibilité et leur intervention sur le terrain pour l'acquisition de l'imagerie aérienne avec leurs drones.

B. OBJECTIFS

Cette étude a pour objectifs de :

- Définir des clusters de fermes/bassins par traitement en statistique descriptive (ACP) afin de sélectionner les fermes/bassins « modèles » pour l'échantillonnage des sols ;
- Prélever les échantillons nécessaires (1 par hectare) à des fins de caractérisation physico-chimique, puis de sélection du ou des échantillons destinés aux tests de faisabilité technique ;
- Réaliser les tests de faisabilité technique (lixiviation en mode batch) au laboratoire sur les échantillons de sols provenant du ou des bassins choisis ;
- Étudier les corrélations qui pourraient être utilisées entre les résultats d'analyses chimiques avec les données d'imageries aériennes obtenues par drones de la Province Sud.

II. METHODOLOGIE

A. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET TRAITEMENTS STATISTIQUES

Les traitements statistiques ont été réalisés à partir du jeu de données de Boyd acquis en 2011 lors de sa venue en Nouvelle-Calédonie (Filière Crevettes de Nouvelle-Calédonie, Audit & Recommandations, Rapport Final). Au total, 19 échantillons de fonds de bassins de 13 fermes et de 2 bassins géniteurs des écloséries EORI et Mara ont été analysés (Annexe 2). Datant de 9 ans, ce jeu de données apparaît comme le plus homogène et le plus complet à ce jour ; toutefois, il n'est vraisemblablement pas représentatif des caractéristiques physico-chimiques actuelles.

Afin de mettre en évidence des clusters de fermes, plusieurs types de statistiques descriptives ont été réalisés :

- **L'analyse en composantes principales (ACP)¹.** C'est une des méthodes d'analyse de données multivariées la plus utilisée. Elle permet d'explorer des jeux de données multidimensionnels constitués de variables quantitatives. Elle distribue dans cet espace, des observations (fermes) selon des variables (paramètres physico-chimiques) ;
- **La classification ascendante hiérarchiques (CAH).** C'est une méthode de classification itérative dont le but est de répartir une population en différents groupes. Les individus d'un même groupe sont les plus semblables possibles et chaque groupe est le plus différent possible des autres (homogénéité intra-classe / hétérogénéité inter-classe). La ressemblance entre les observations (fermes) est évaluée par une distance entre les individus. Plus les observations seront différentes, plus leurs distances entre-elles seront importantes.

Enfin, ces traitements statistiques ont été réalisés à partir du tableau de Boyd déjà « catégorisé ». En effet, pour donner plus de sens aux représentations, les éléments représentant une même nature chimique et/ou physique sont regroupés par catégories. Ainsi, nous retrouvons le pH, le groupe d'éléments majeurs (« Al, Ca, Mg, K, Na »), les éléments qui caractérisent la matière organique (notés par « Organic matter, Organic carbon, Total Nitrogen, C/N, Total sulfur, Dilute acid-extractable phosphorus, Carbonate »), les éléments représentant la nature/texteure du sol (« Sand, Silt, Clay, Textural class »), les éléments mineurs et métaux (« As, Ba, Bo, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn »).

Dans un premier temps, les traitements ACP et les classifications CAH ont été effectués sur chacune de ces catégories, indépendamment les unes des autres.

¹L'ACP (Analyse en Composantes Principales) peut être considérée comme une méthode de projection qui permet d'organiser les observations depuis l'espace à p dimensions des p variables vers un espace à k dimensions ($k < p$) tel qu'un maximum d'information soit conservé sur les premières dimensions. Les résultats des traitements par ACP sont exprimés par une visualisation optimale des variables et des données, et des biplots mélangeant les deux. Néanmoins, ces représentations ne sont fiables que si la somme des pourcentages de variabilité associés aux axes de l'espace de représentation est suffisamment élevée (par exemple 80%).

Sur le cercle de corrélation, plus les variables sont proches du cercle, meilleure est leurs représentations dans le plan et meilleures seront les interprétations. Plus les variables forment un angle proche les unes par rapport aux autres, plus elles sont significativement positivement corrélées (r proche de 1). Si elles sont orthogonales les unes par rapport aux autres (forment un angle droit), alors elles sont significativement non-corrélées (r proche de 0). Enfin, lorsqu'elles sont symétriquement opposées par rapport au centre, alors elles sont significativement négativement corrélées (r proche de -1). Lorsque les variables sont proches du centre du graphique, alors toute interprétation est hasardeuse et il est nécessaire de se référer à la matrice de corrélation, à d'autres plans factoriels pour interpréter les résultats.

Afin d'optimiser les traitements, certains paramètres considérés comme redondants ou n'apportant pas d'informations supplémentaires sur la variabilité du jeu de données n'ont pas été intégrés dans les traitements. Ainsi, le rapport C/N, le paramètre « Textural class », les concentrations en arsenic, en barium, en bore, en cadmium, en molybdène et en plomb n'ont pas été pris en compte. Le tableau catégorisé et optimisé est présenté en Annexe 3.

1. Première série de traitements statistiques

a) Distribution des éléments majeurs

Le cercle de corrélation représente la projection des variables éléments majeurs (Al, Mg, K, Na, Ca) sur un plan en 2D constitué par des facteurs (axes F1 et F2) qui représentent le pourcentage de variabilité du jeu de données (Figure 1). La représentation est considérée comme correcte, la somme des deux axes représentant 70,4 % de la variabilité du jeu de données.

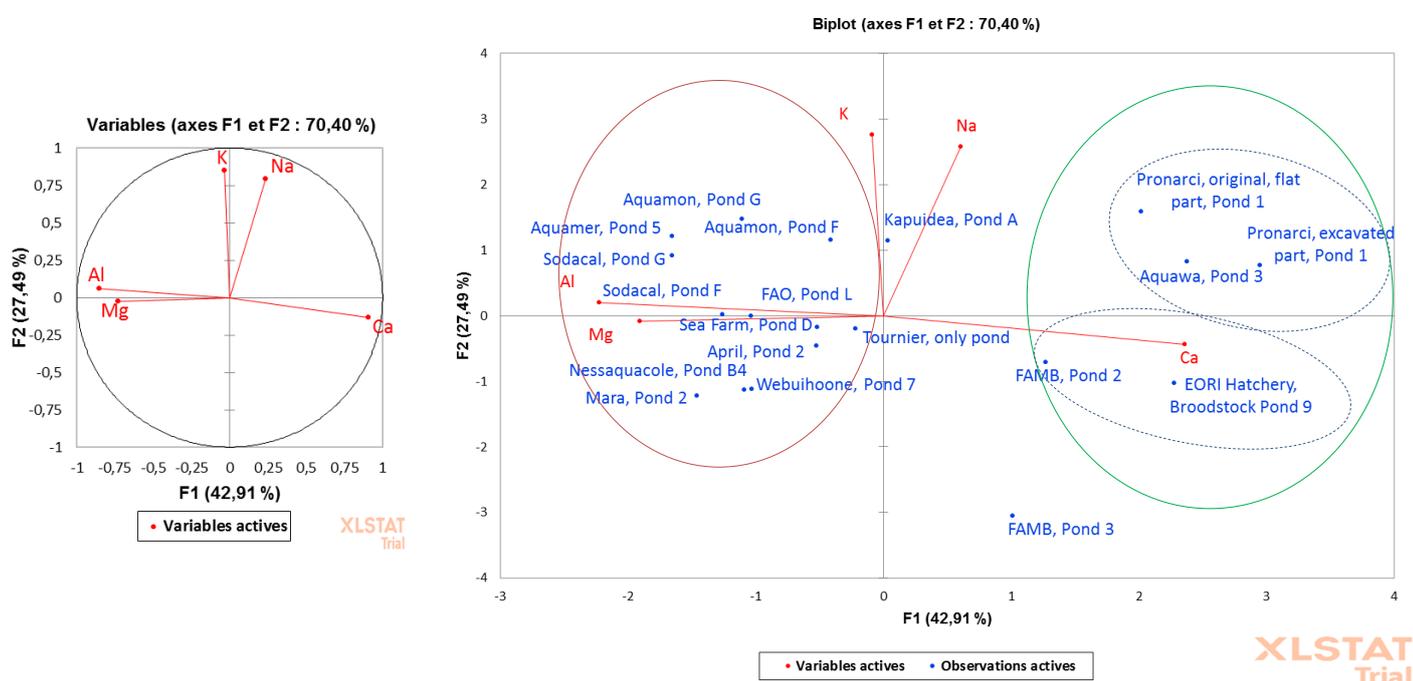


Figure 1 : Traitement ACP sur les éléments majeurs. À gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). À droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la constitution de clusters.

Ce premier traitement montre que la concentration en calcium se révèle être inversement proportionnelle aux concentrations en aluminium et magnésium. Les concentrations en potassium et sodium semblent être plus ou moins corrélées entre elles. De plus, formant un angle droit avec les autres variables, elles ne semblent pas avoir de lien avec celles-ci, en termes d'évolution des concentrations.

Le Biplot à droite correspond à la représentation des variables (éléments majeurs) avec les données (fermes) réparties dans l'espace. Plusieurs groupes de fermes se distinguent : un premier groupe de fermes ayant des concentrations très élevées en calcium (FAMB, Pond 2 et EORI Hatchery, Broodstock Pond 9), un deuxième groupe des fermes ayant des concentrations élevées en calcium (Pronacri, Pond 1 et Aquawa, Pond 3). Comme le montre l'angle obtus (proche de 180°) formé entre les variables Ca et Al/Mg, ces deux premiers groupes (en vert) se distinguent par de faibles concentrations en aluminium et magnésium. Inversement, le groupe de ferme situé à gauche du barycentre du graphique se caractérise par des concentrations riches en aluminium et magnésium et plus pauvres en calcium. Les fermes ne semblent pas être distribuées selon leurs concentrations en éléments potassium et sodium.

b) Distribution des paramètres sédimentologiques

La distribution des fermes selon la nature de leurs substrats forme trois clusters prépondérants (Figure 2) : un cluster constitué des fermes à substrat d'argile majoritairement (à droite en noir), un cluster formé par les fermes à dominance sableuse (FAMB et Welbuihoone, en violet) et un cluster, à part, formé par la ferme Pronacri (en bleu) dont la texture de sol est majoritairement limoneuse. En plus d'être réparties selon leurs natures et leurs textures de sol, les fermes se distribuent également sur le graphique selon leurs situations géographiques (fermes du Nord en bleu et fermes du Sud en vert).

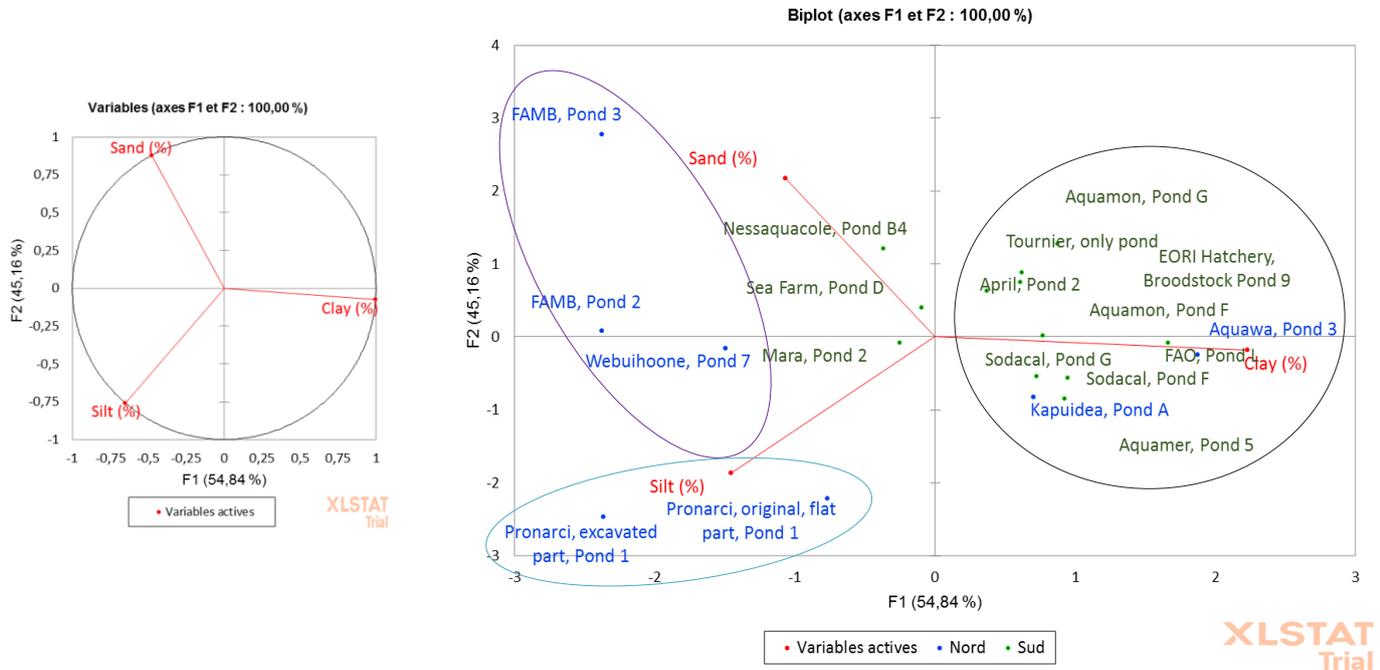


Figure 2 : Traitement ACP sur les paramètres caractéristiques de la nature et texture des sols. À gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). À droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la constitution de clusters.

Ainsi, les fermes majoritairement situées dans le Sud de la Nouvelle-Calédonie présentent des teneurs plus élevées en argile qu'en limons et sables. A l'inverse, les fermes du Nord de la Nouvelle-Calédonie sont plutôt riches en sables et limons.

Les traitements statistiques des autres paramètres, mettant en évidence la distribution des fermes selon les paramètres caractéristiques de la matière organique ainsi que les concentrations en éléments mineurs (métaux), sont présentés en Annexe 4. Le résultat de ces compléments ne conduit pas à proposer une classification distinctive permettant d'affiner la composition des clusters.

c) Classification hiérarchique ascendante (CAH)

Le traitement intégrant toutes les catégories de paramètres physico-chimiques a permis d'accéder à une première classification (Figure 3) formée par 4 groupes :

- Groupe 1 : Pronacri. Cette ferme forme à elle seule un groupe tant elle se distingue des autres par sa composition riche en calcium, par sa texture de sol limoneuse, par sa teneur élevée en matière organique et par ses concentrations extrêmement importantes en Ni et en Mn.
- Groupe 2 : Welbuihoone, Pond7 ; Mara, Pond 2 ; April, Pond 2 ; Nessaquacole, Pond B4 ; Tournier, only pond ; Sea Farm, Pond D ; Aquamer, Pond 5 ; Sodacal, Pond F et Pond G ;
- Groupe 3 : FAMB. Elle forme à elle seule aussi un groupe. Elle se distingue par ses concentrations en métaux (concentration particulièrement élevée en zinc et faible en fer) et par sa texture de sol sableuse ;

- Groupe 4 : Aquamon, Pond G ; FAO, Pond L ; Aquamon, Pond F ; Aquawa, Pond 3 ; Kapuidea, Pond A ; EORI Hatchery, Broodstock, Pond 9.

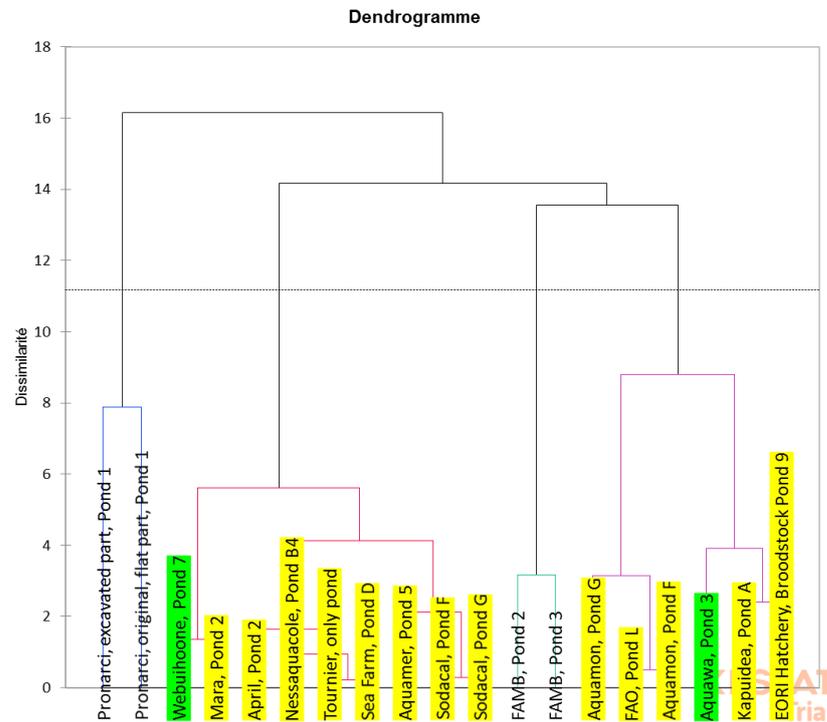


Figure 3 : Bilan : CAH sur tous les paramètres physico-chimiques du tableau optimisé de Boyd (2011) (Annexe 3).

Ce qu'il faut retenir :

Les statistiques descriptives (ACP et CAH) permettent de distribuer le jeu de données (fermes aquacoles) selon les variables physico-chimiques présentent dans le tableau de données de Boyd (2011).

Ainsi, 4 groupes/clusters de fermes se distinguent :

- deux clusters « mono-fermes » : composés des fermes Pronacri et FAMB.
- deux clusters composés de 9 et 6 bassins (8 et 5 fermes), principalement situés en Province Sud.

Note : Cette première étape dans le traitement statistique a fait l'objet d'une réunion avec le GFA-NC le 31 Aout 2020, dont les échanges et les recommandations ont abouti aux points suivants :

- Les échantillons prélevés dans les bassins géniteurs des écloséries Mara et EORI ne doivent pas être pris en compte dans les traitements statistiques ultérieurs ;
- Les fermes Pronacri et FAMB forment 2 clusters « mono-fermes ». L'objectif étant de sélectionner des fermes servant de « démonstrateurs », les sols des bassins doivent être les plus représentatifs possibles des autres fermes. Ainsi, Pronacri et FAMB doivent être isolées du jeu de données car ne présentant pas de caractéristiques adéquates d'une ferme « moyenne » ;
- La variable production de l'année 2011 doit être incluse dans les traitements statistiques ultérieurs afin de tenter de relier cette donnée aux paramètres physico-chimiques du milieu (Annexe 5). La variable de production 2011 et non pas 2012 a été choisie dans le but de comprendre les phénomènes physico-chimiques des paramètres analysés reflétant l'élevage précédent et ses conséquences sur l'assec (période d'échantillonnage de Boyd).

2. Deuxième série de traitements statistiques

La production de l'année 2011 (en tonnes) a été incluse comme variable quantitative supplémentaire dans les traitements statistiques. La ferme Aquamer, n'ayant pas eu de production pendant l'année 2011, elle a été isolée du jeu de données.

Toutefois, cette deuxième série de traitements statistiques intégrant la production n'a pas permis de conclure sur un lien possible avec les paramètres physico-chimiques analysés (Annexe 6) ; la masse produite est principalement une fonction de la quantité de larves introduites (et de leurs taux de survie) ainsi que de la surface des bassins.

3. Troisième série de traitements statistiques

Le paramètre « production 2011 » a été substitué par le rendement en t/ha et le rendement en t/MPL qui intègrent une notion de « survie larvaire ». La production (en t) et le rendement (en t/ha) étant corrélés entre eux, seul le rendement en t/MPL a été retenu dans les traitements statistiques. Cette nouvelle étape dans le traitement statistique a confirmé la relation inverse qui existe entre la teneur en matière organique et le rendement en t/MPL, même si cette dépendance n'est pas très robuste (Figure 4). De plus, la Figure 5 semble montrer que les bassins constitués de forts taux d'argile ont tendance à être les moins productifs. Cette observation est en accord avec la description faite par Boyd (1995).

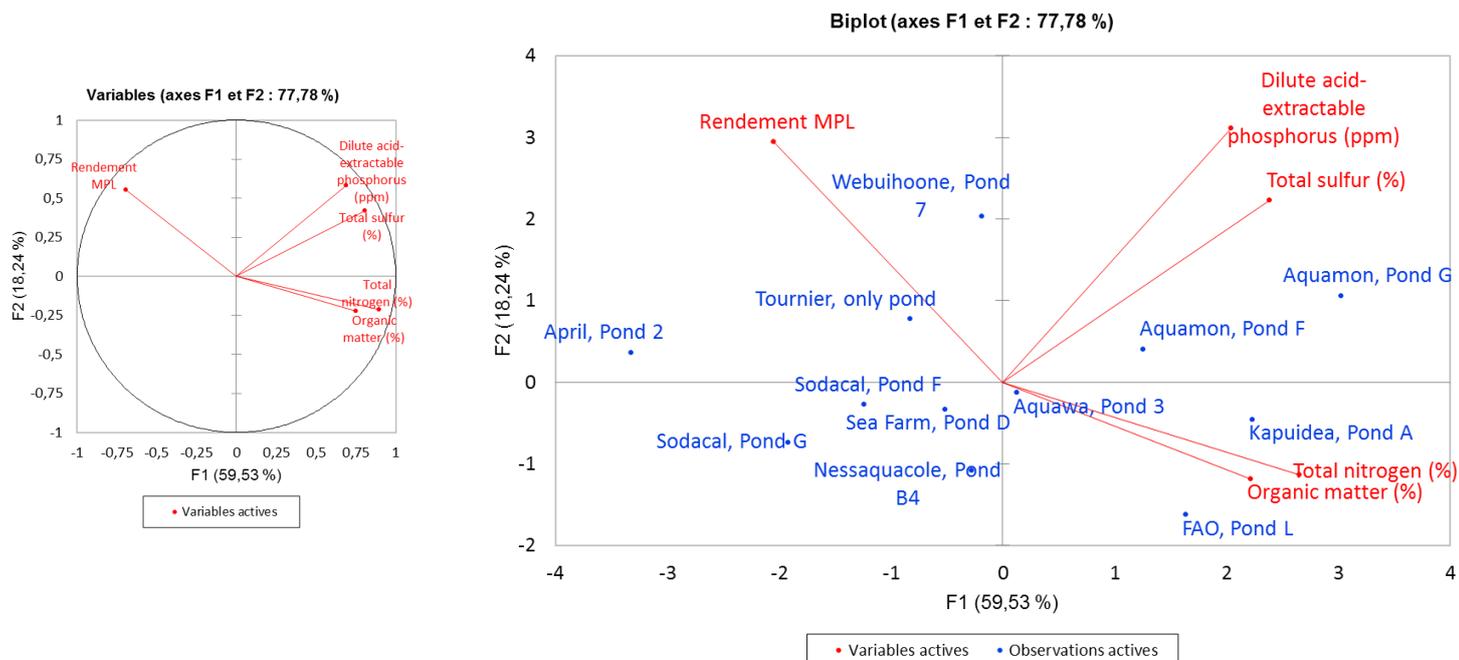


Figure 4 : Traitement ACP sur les éléments caractéristiques de la matière organique. À gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). À droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes.

En effectuant un traitement intégrant toutes les catégories de variables physico-chimiques et la production en t/MPL, une classification finale a été obtenue (Figure 6) et a permis la distinction de 3 groupes de fermes/bassins dont les degrés de disponibilité étaient variables pour amorcer les tests de faisabilité :

Groupe 1 (7 bassins) :

- April_pond 2 : disponible (sans eau) mais, un élevage d'holothurie pendant l'année dernière peut avoir influencé la nature du sol (?) ;
- Nessaquacole_pond B4 : à l'arrêt depuis plusieurs années ;
- SeaFarm_pond D : actuellement en eau et un élevage de crevettes est en cours ;
- Tournier : actuellement à l'arrêt ;
- Webuihoone_pond 7 : localisée en Province Nord, la phase préliminaire de survol par les drones n'est pas pour

l'instant envisagée ;

- Disponibilité des deux bassins de la Sodacal, pond F et pond G qui n'ont jamais abrité d'élevage d'Holothurie (uniquement de la crevette).

Groupe 2 (1 bassin) :

- Aquawa : ferme dont les performances sont très satisfaisantes. Elle ne sera donc pas retenue pour les tests de lixiviation, dans un premier temps.

Groupe 3 (4 bassins) :

- FAO_pond L : bassin actuellement rempli d'eau, donc sans possibilité d'échantillonnage ;
- Kapuidea_pond A : ferme dont les opérations d'amendement ont été répétées et plus fréquentes que pour les autres ;
- Aquamon_pond F et pond G, les deux bassins de cette ferme ne sont plus en activité.

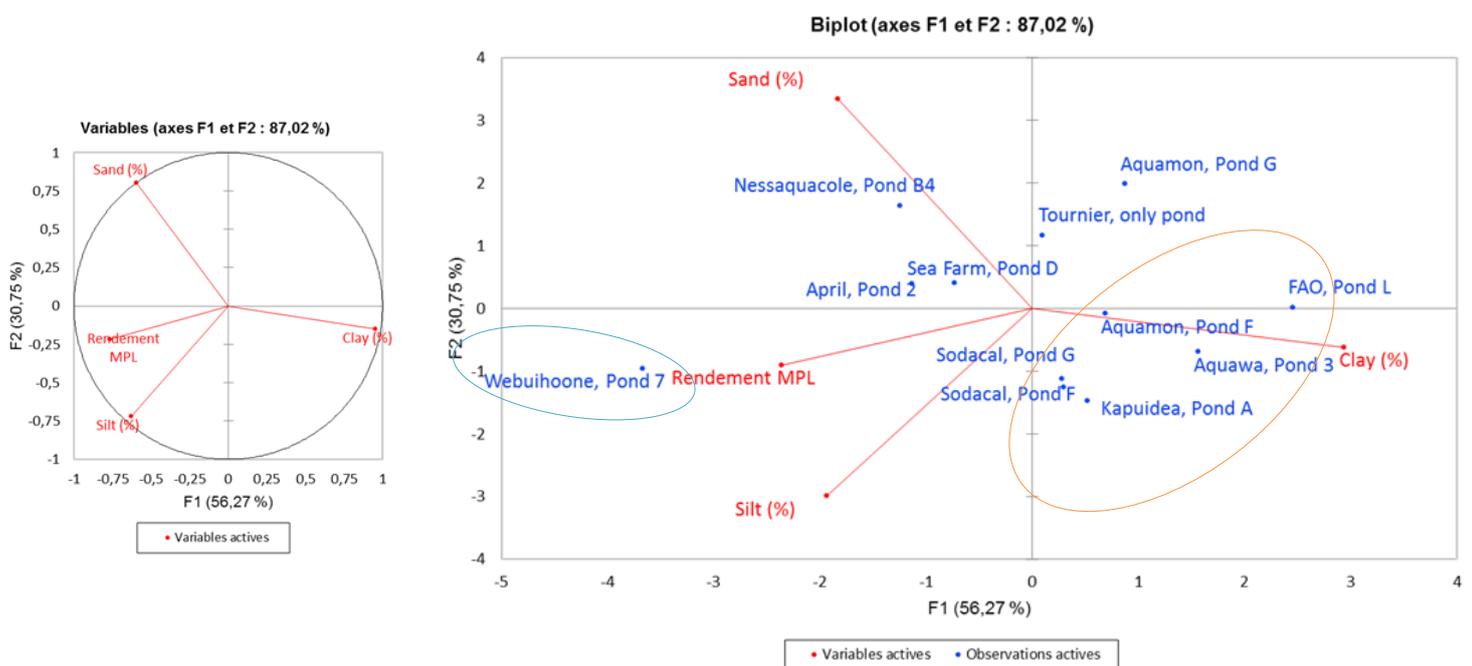


Figure 5 : Traitement ACP sur les éléments reflétant la nature/texte du sol. À gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). À droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la formation de clusters.

Ce qu'il faut retenir :

La ferme Sodacal a donc été sélectionnée pour conduire l'étude préliminaire de faisabilité technique de caractérisation et d'expérimentations de laboratoire, en raison :

- D'une part, de l'avis favorable du responsable de la ferme qui s'est montré intéressé par cette étude ;
- D'autre part, de la connaissance historique de l'Ifremer (Hugues Lemonnier).

La phase de terrain a dû être rapidement programmée en raison de la mise en eau des deux bassins F et G prévue pour la dernière semaine d'octobre par l'exploitant.

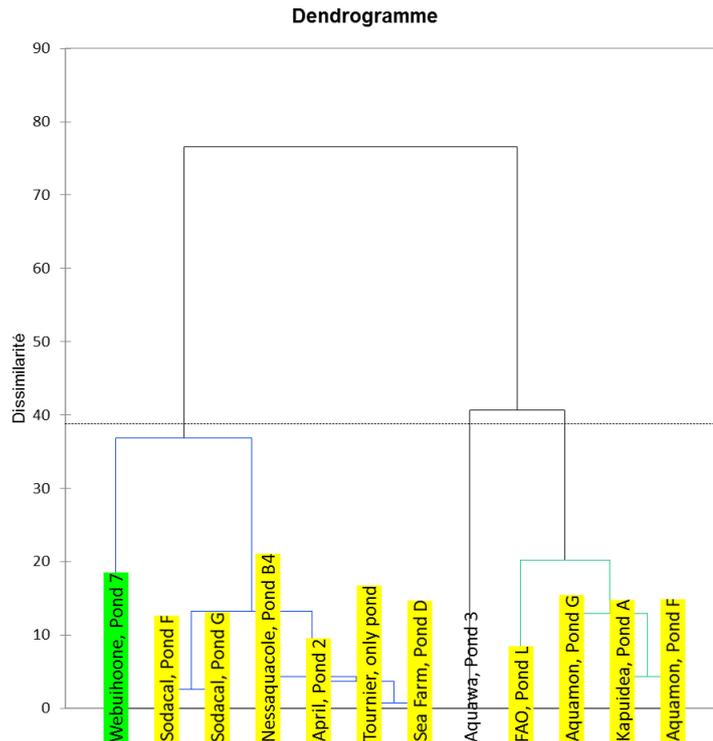


Figure 6 : Bilan : CAH sur tous les paramètres physico-chimiques du tableau optimisé de Boyd (2011), incluant la donnée de production en t/MPL.

B. ECHANTILLONNAGE

La campagne de prélèvement dans le bassin F de la ferme SODACAL a été effectuée le 08 Octobre 2020, dans l'objectif d'une part, d'effectuer une caractérisation physico-chimique sommaire des sols (teneur en eau et perte au feu) et d'autre part, de procéder à des tests préliminaires de lixiviation in-vitro des sols.

Avant de commencer l'échantillonnage, un certain nombre de vols par drone ont été menés à des fins d'imagerie de l'ensemble de la ferme. Deux appareils de la Province Sud ont été déployés : une aile pour visualiser l'ensemble des bassins ainsi qu'un quadricoptère afin de collecter des images plus détaillées du bassin F.

En raison du temps nécessaire pour traiter les images collectées par les drones, il n'a pas été possible d'utiliser ces images pour déterminer la localisation des différences potentielles dans les sols du bassin F. Par conséquent, les échantillons ont été prélevés sur l'ensemble du bassin en fonction de l'aspect uniquement visuel de la couche de surface, à raison approximativement d'un échantillon par hectare.

Au total, ce sont donc 14 échantillons qui ont été prélevés sur les 10 premiers centimètres de la couche de surface ; les échantillons ont été conditionnés dans des sachets plastiques. Les points de prélèvements sont illustrés sur la Figure 7 et répertoriés dans le Tableau 1.

La campagne de prélèvement s'est déroulée par temps ensoleillé et régime d'Alizés de SE.



Figure 7 : Localisation des stations de prélèvements sur le bassin F, ferme Sodacal (Nouvelle-Calédonie)

Tableau 1 : Coordonnées géophysiques des stations de prélèvement (référentiel WGS-84).

Référence AEL	Référence GPS	Latitude	Longitude	Remarque
D136-S-001	320	21°44,447	165°41.665	NA
D136-S-002	320 bis	21°44,447	165°41.665	Sol très humide
D136-S-003	321	21°44,220	165°41.666	NA
D136-S-004	322	21°44,224	165°41.685	NA
D136-S-005	323	21°44,389	165°41.691	NA
D136-S-006	324	21°44,354	165°41.721	NA
D136-S-007	325	21°44,303	165°41.741	NA
D136-S-008	326	21°44,245	165°41.776	NA
D136-S-009	327	21°44,214	165°41.795	NA
D136-S-010	328	21°44,193	165°41.797	NA
D136-S-011	329	21°44,179	165°41.775	NA
D136-S-012	330	21°44,217	165°41.723	NA
D136-S-013	331	21°44,295	165°41.674	NA
D136-S-014	332	21°44,346	165°41.668	NA

C. TEST DE FAISABILITÉ TECHNIQUE : TESTS DE LIXIVIATIONS EN MODE BATCH

1. Caractérisation des échantillons

Les 14 échantillons ont fait l'objet d'une caractérisation simplifiée afin de pouvoir distinguer de potentielles variations spatiales en termes de physico-chimie des sols.

Il a été procédé à l'estimation des teneurs en eau (%W) et en Matière Organique (%MO). La teneur en eau des échantillons non-conditionnés (frais) a été déterminée selon la norme **NF EN 14346** et la technique de « perte au feu » a été conduite selon la norme **NF EN 15169**.



Figure 8 : Photographie des 14 échantillons de sols secs dans des creusets avant les analyses de perte au feu

2. Expérimentation

L'objectif de cette étape a été de quantifier les concentrations en métaux solubilisables au terme de tests de lixiviation statique (mode batch) selon une adaptation de la norme **NF EN 12457-2**.

Au total, deux tests ont été programmés afin de simuler des mises en eau après des assecs successifs :

- Sans étape d'alcalinisation préalable (Test 1) ;
- Avec un amendement en carbonates (Test 2).

Pour chacun des tests, un aliquote de matière sèche (d'un seul échantillon parmi les 14 prélevés) a été tamisé à 4mm, environ 100 g ont été introduits dans chacun des bédiers des deux tests, mis en solution et agités avec une pale tournant à 150 t/min. Les tests ont été conduits sur une durée de 96h pendant lesquelles les mesures de pH/conductivité ont été enregistrées à la fréquence d'acquisition de 10 minutes. Au terme de chaque lixiviation, la solution a été filtrée à 0,45 µm pour analyses.

Les éléments Ca, Mg, K, Na, Co, Ni, Mn, Fe et Cu ont été analysés par ICP-OES.

Tous les tests ont été conduits à température et atmosphère ambiante.

a) Test 1

Dans le premier b cher (Test 1), un volume de 500 ml d'eau déminéralisée (18,2 M ) a été introduit avec 100 g d'échantillon de matière sèche. Celui-ci a subi une première lixiviation de 96h. Le lixiviat a ensuite été analysé puis évacué et séché à 40 C jusqu'à retrouver un poids constant. Enfin, une deuxième lixiviation de 96h a été réalisée avec l'analyse finale du lixiviat comme précédemment (Figure 9).

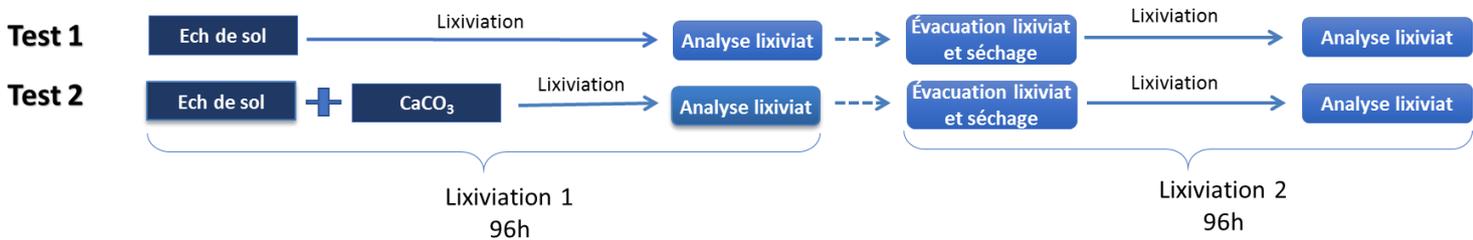


Figure 9 : Schéma représentant les 2 tests avec les étapes de « lixiviation 1 » et « lixiviation 2 »



Figure 10 :  chantillon 320, séché et émotté avant l'ajout de phase liquide (  gauche) ; échantillon 320 avec amendement de CaCO  (  droite).

b) Test 2

Dans le deuxième b cher (Test 2), une solution saturée en carbonates de calcium (solubilité de l'ordre de 15 à 20mg/L   25 C) a été ajoutée (Figure 9).  galement, une réserve alcaline sous la forme de CaCO  solide a été apportée à la surface. La quantité additionnée représente une quantité équivalente à 2 t/ha (teneur qui semble être habituellement répandue) (Figure 10).

Au terme des premières 96h de la « lixiviation 1 », le lixiviat a été évacué du b cher et la phase solide restante a été séchée à 40 C jusqu'à retrouver un poids constant.

Durant la lixiviation 2, cette fois-ci, 500 mL d'eau ultrapure ont été ajoutés aux deux échantillons de sol, sans ajout supplémentaire de CaCO .

III. RESULTATS

A. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

1. Teneur en eau et perte au feu

La teneur en eau des 14 échantillons varie entre 10% et 51% (Figure 11), la valeur la plus forte étant observée dans la partie la plus basse du bassin (Station 320bis). Ces valeurs reflètent la déclivité du bassin vers le sud, c'est à dire la topographie entre les points d'alimentation en eau et de refoulement dans le lagon.

Les résultats de perte au feu pour ces mêmes 14 échantillons varient de 4,8% à 12,3% (Figure 11 et Figure 16). Comme pour la teneur en eau, la valeur la plus élevée a été observée dans la station 320bis, la plus humide, où les courants engendrés par le refoulement ont accumulé les débris en matière organique les plus fins ; la deuxième valeur la plus forte est mesurée à proximité de celle-ci, à la station 320. Ailleurs, les pertes au feu montrent que les teneurs en matière organique totale sont globalement similaires avec une moyenne de 7 ± 1 %.

Les résultats obtenus à partir de ces deux paramètres ont permis de sélectionner l'échantillon 326 comme échantillon représentatif moyen (perte au feu de 7,8% et particulièrement sec avec une teneur en eau de 10%) afin de l'utiliser pour les tests de faisabilité.

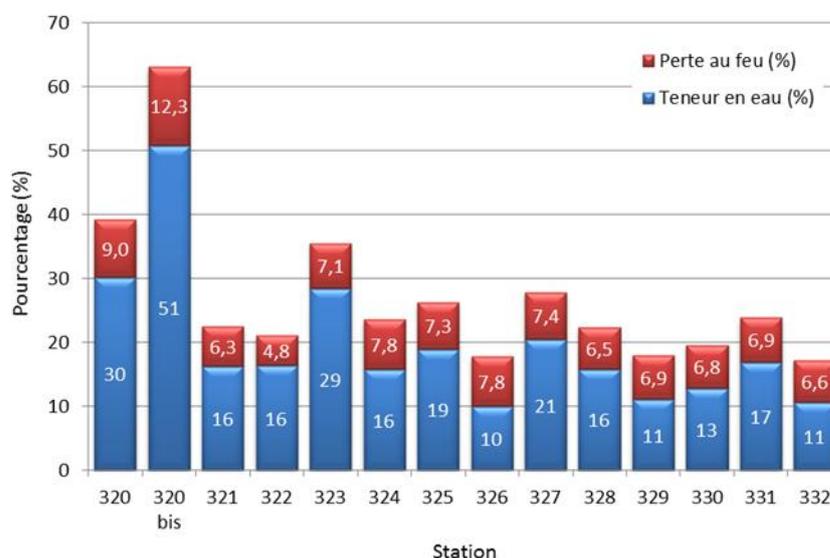


Figure 11 : Graphique représentant le pourcentage de perte au feu (en rouge) et de teneur en eau (en bleu) en fonction des stations d'échantillonnages.

2. Conductivité

Pour chacun des deux tests, les valeurs de conductivité électrique EC (mS.cm^{-1}) et de pH ont été mesurées en continu au cours de l'expérimentation (Figure 12 et 13).

Lixiviation 1 (Figure 12) : les profils de conductivité électrique (EC) pour les deux tests suivent des tendances parallèles pendant les 60 premières heures, avec des augmentations progressivement ; les valeurs légèrement plus élevées pour

l'échantillon carbonaté (courbe rouge) étant attribuées à la présence initiale d'ions Ca^{2+} ; CO_3^{2-} . Puis, les 30 dernières heures mettent en évidence une stabilisation des phénomènes de solubilisation pour l'échantillon non carbonaté, qui montre une valeur plateau en-dessous de 14 mS/cm (courbe bleue). Pour l'échantillon carbonaté, la progression de la conductivité traduit la poursuite de la solubilisation de la réserve alcaline constituée de carbonates de calcium solide ajoutée initialement (courbe rouge).

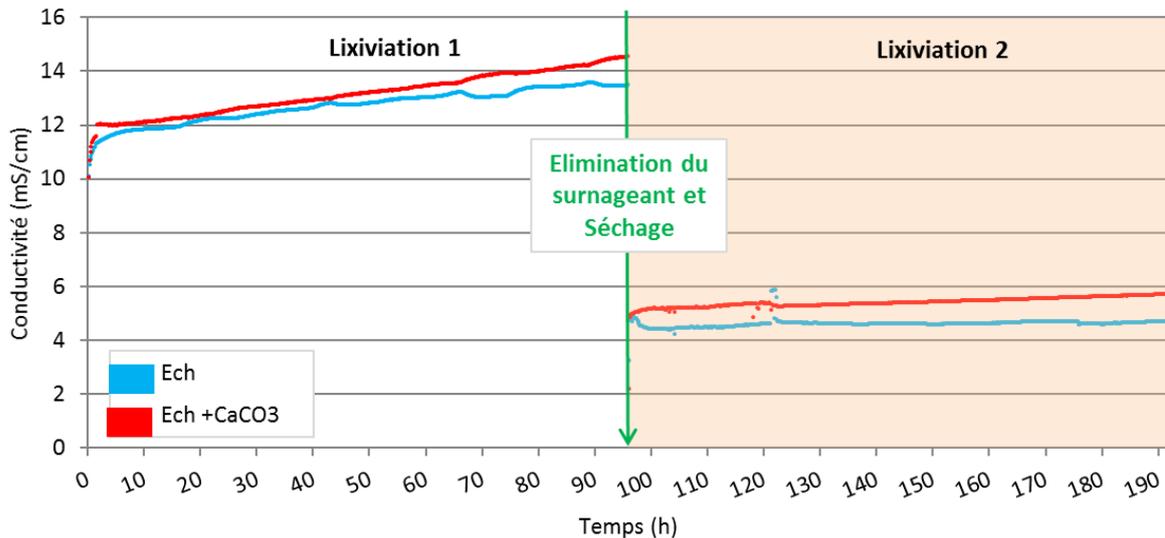


Figure 12 : Courbes de conductivités obtenues durant la lixiviation pour les deux essais effectués séquentiellement avec une période de séchage entre les deux essais.

Lixiviation 2 (Figure 12) : le renouvellement des solutions par 500 mL d'eau déminéralisée explique la baisse drastique des deux EC. Pour l'échantillons sans ajout initial de CaCO_3 , la conductivité reste relativement constante pendant toute la lixiviation 2 ($T_{110h} = 4,7 \text{ mS / cm}$, $T_{192h} = 4,7 \text{ mS / cm}$). L'augmentation de la conductivité pour l'échantillon carbonaté confirme la poursuite des phénomènes de dissolution avec des valeurs qui croissent d'environ $0,9 \text{ mS / cm}$ ($T_{110h} = 4,8 \text{ mS / cm}$, $T_{192h} = 5,7 \text{ mS / cm}$).

3. pH

Lixiviation 1 (Figure 13) : sur l'échantillon sans ajout initial de CaCO_3 , le pH a d'abord augmenté, passant d'une valeur initiale de 7,3 à un maximum de 7,6 avant de redescendre après environ 10-15 heures. Au-delà, le pH a chuté rapidement avant de se stabiliser progressivement autour d'un pH de 6, environ 48 heures après. L'augmentation initiale du pH n'est pas interprétable à ce stade de l'étude, bien que la libération d'ions hydroxyle lors de la mise en place des phénomènes de solubilisation de différents composés en soit probablement la cause.

Le pH de l'échantillon contenant du CaCO_3 a rapidement augmenté mais son évolution a été tenue tout au long de la « Lixiviation 1 ». Comme pour le premier échantillon, le pH a diminué, puis s'est stabilisé avec, ensuite, une très légère évolution progressive jusqu'à la fin du test. Le pH moyen pendant 96h était de $7,9 \pm 0,1$.

Lixiviation 2 (Figure 13) : avec le renouvellement de l'eau, le pH de l'échantillon sans ajout de CaCO_3 s'est rapproché de la valeur de 5,5 (eau déminéralisée) ; la valeur mesurée ($\text{pH}=6,5$) s'étant maintenue stable au cours des 10 premières heures du test. Le pH a ensuite diminué pour se stabiliser à environ $\text{pH}=6,2$, valeur qu'il a gardé jusqu'à la fin du test.

Au début du test, le pH de l'échantillon contenant une réserve alcaline (CaCO_3 solide résiduel) a été mesuré à une valeur très proche de celle observée à la fin de la première lixiviation ($\text{pH} 7,9$). Par la suite, sa valeur est restée relativement constante tout au long du test avec une moyenne de 7,8 et un écart-type de moins de 0,1.

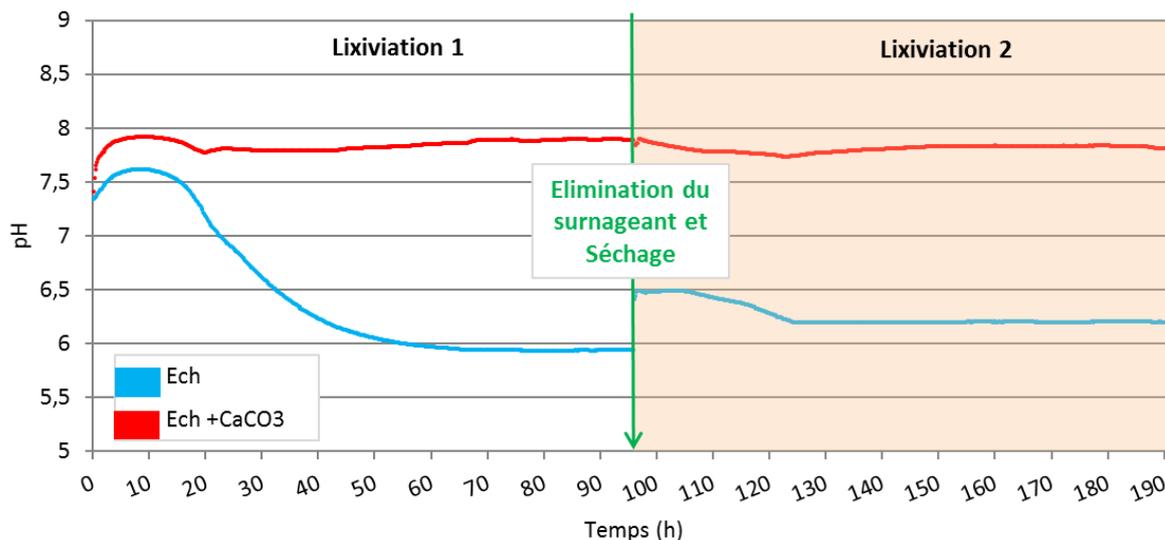


Figure 13 : Courbes de pH durant la lixiviation pour les deux essais effectués séquentiellement avec une période de séchage entre les deux essais

Malgré qu'aucune addition supplémentaire de CaCO_3 ait eu lieu avant d'effectuer la deuxième lixiviation, la quantité résiduelle de CaCO_3 (réserve alcaline) initialement ajoutée au sol s'est avérée suffisante pour maintenir le pH à un niveau considéré comme non stressant pour les crevettes. En effet, selon Husenot et Martin (1995), la gamme de pH in situ optimale se situe entre 7,5 et 8,5 en évitant les valeurs inférieures à 7.

B. ÉLÉMENTS MAJEURS ET ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES

Les concentrations en éléments majeurs (Ca, K, Mg et Na) et métalliques (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn) déterminées dans le lixiviat des tests en mode batch sont présentées dans les Figure 14 et 15, ainsi que dans l'Annexe 7. Ci-après seuls les 4 éléments majeurs et les 5 principaux métaux sont interprétés.

1. Éléments majeurs

Les concentrations en calcium à la fin de la « Lixiviation 1 » (Figure 14) sont plus élevées dans l'échantillon amendé avec des carbonates que dans l'échantillon de sol initial, respectivement 475 et 361 mg/L. A la suite de la « Lixiviation 2 », les ions calcium demeurent encore bien mesurables dans les deux nouveaux lixiviats, respectivement 176 et 89 mg/L. La quantité supérieure présente dans le sol amendé prouve que celui-ci dispose encore d'une réserve alcaline avec la dissolution progressive des carbonates ajoutés en T_{0h} .

Logiquement, l'ajout de carbonate de calcium pur n'a pas eu de conséquences sur les concentrations en Mg, K, et Na lixiviées du sol naturel ou amendé avec CaCO_3 durant la « Lixiviation 1 ». A la fin de la « Lixiviation 2 », les concentrations en éléments majeurs se révèlent être 2 à 4 fois inférieures à celles de la « Lixiviation 1 » et aucune différence de concentrations entre les deux échantillons n'est non plus perceptible.

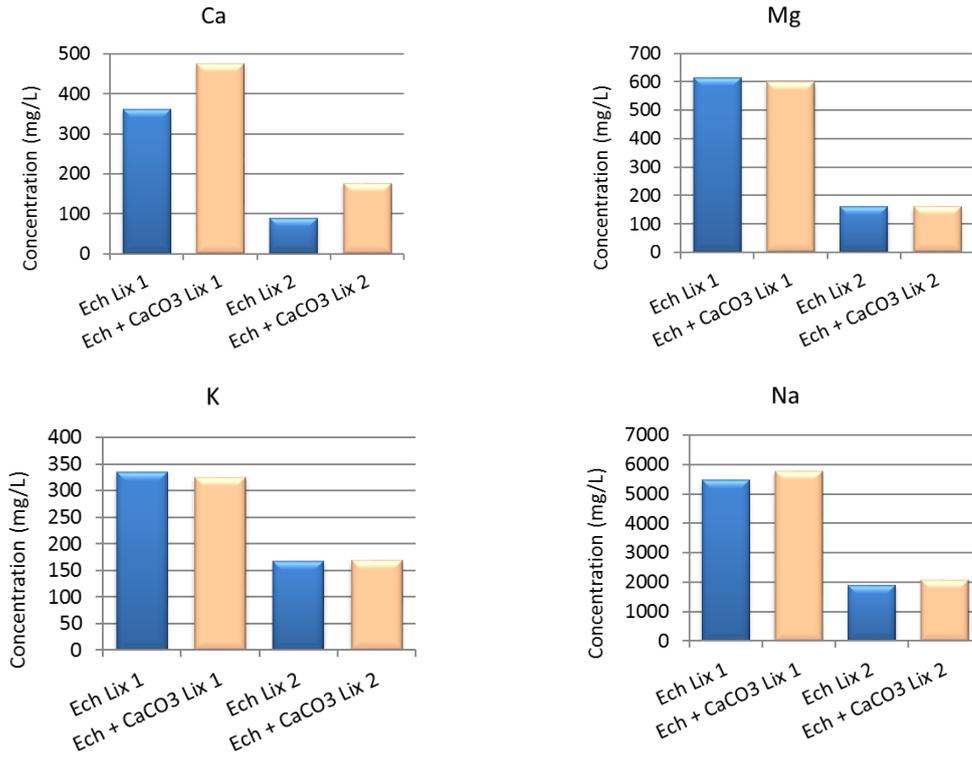
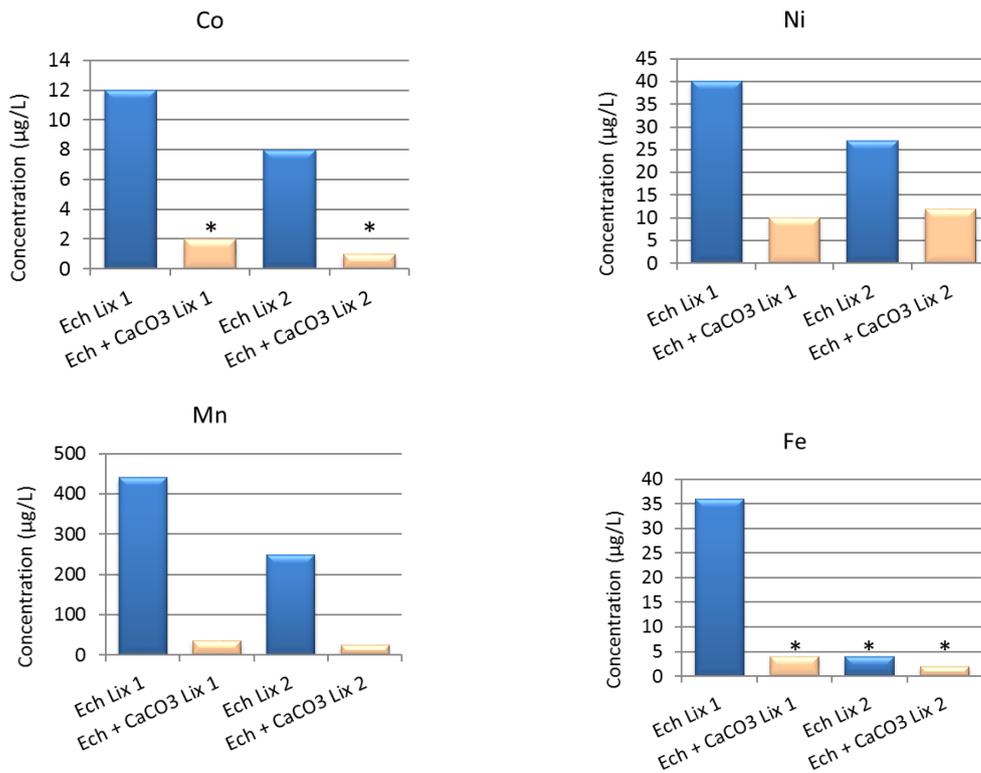


Figure 14 : Concentrations des éléments majeurs (Ca, Mg, K et Na) dissous en mg/L déterminées dans le lixiviat suite aux essais de lixiviation. Légende : Ech Lix 1 : échantillon de sol d'origine sans ajout de CaCO₃ à l'essai 1. Ech + CaCO₃ Lix 1 : échantillon de sol avec ajout de CaCO₃ à l'essai 1. Ech Lix 2 : échantillon de sol d'origine sans ajout de CaCO₃ à l'essai 2. Ech + CaCO₃ Lix 2 : échantillon de sol avec ajout de CaCO₃ à l'essai 2.



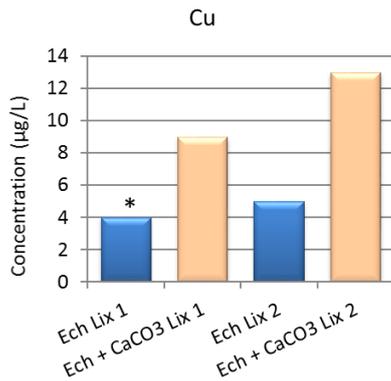


Figure 15 : Concentrations en éléments métalliques (Co, Fe, Cu, Mn, Ni) dissous en µg/L déterminées dans le lixiviat suite aux deux phases de lixiviation. Les étoiles (*) indiquent une concentration inférieure à la limite de quantification (LQ).

2. Métaux minoritaires :

Les concentrations en métaux Co, Mn, Ni et Fe mesurées dans le lixiviat à l'issue de la « Lixiviation 2 » (Figure 15) de l'échantillon non amendé avec du CaCO₃, se révèlent être 30 à 40% inférieures aux concentrations de ces mêmes éléments à l'issue de la « Lixiviation 1 ». Ainsi, pour le Co, sa concentration passe de 12 à 8 µg/L, pour Mn, de 441 à 248 µg/L et pour Ni, de 40 à 27 µg/L. En ce qui concerne le Fe, la concentration décroît drastiquement de 36 µg/L à une valeur inférieure à la limite de quantification (LQ=4 µg/L), respectivement. Le cuivre présente un comportement particulier en montrant des valeurs relativement constantes autour de sa limite de quantification (LQ=4 µg/L).

Dans l'échantillon amendé avec un ajout de CaCO₃, les concentrations de ces éléments sont nettement plus basses. Ainsi, à l'issue des « Lixiviation 1 » et « Lixiviation 2 », les teneurs en Co sont proches de la limite de quantification (LQ=5 µg/L). Pour Mn, les concentrations ne sont plus que de 35 et 24 µg/L et pour Ni elles passent en dessous de la limite de quantification (LQ=4 µg/L). Dans le cas du Fe, les concentrations pour les deux lixiviats sont inférieures à la limite de quantification (LQ=4 µg/L). Le cuivre se distingue avec des valeurs plus importantes dans les lixiviats des échantillons amendés et en particulier à l'issue de la « Lixiviation 2 ».

La présence de carbonate de calcium joue donc un rôle dans les phénomènes de solubilisation des métaux en permettant notamment une réduction des concentrations dans les lixiviats grâce au maintien du pH à des valeurs proches de 8. Cette diminution de la solubilisation est constatée pour tous les éléments, exception faite du Cu qui voit sa concentration augmenter avec les valeurs du pH. En effet, sa solubilisation dans l'échantillon sans ajout de carbonates passe d'environ 4 µg/L (« Lixiviations 1 ») à 5 µg/L (« Lixiviation 2 ») et de 9 µg/L à 13 µg/L, respectivement pour l'échantillon non amendé et amendé avec du CaCO₃ ; les potentiels Redox élevés semblent favoriser les formes solubles. Ils sont favorisés par les conditions opératoires des tests en mode batch réalisés à pression atmosphérique. Toutefois, à ce stade de l'étude, le comportement de Cu reste à élucider.

Ce qu'il faut retenir :

L'ajout de CaCO₃ conduit à une augmentation du pH du sol en créant une réserve alcaline (effet tampon ; à T_{96h} : pH = 8 avec CaCO₃ v.s. pH = 6 sans ajout de CaCO₃).

La « Lixiviation 2 » ne conduit pas à des variations marquées de pH mais elle montre que la fraction majoritaire des métaux solubilisables a été entraînée lors de la « Lixiviation 1 ».

L'ajout de carbonate joue un rôle important dans la stabilisation des sols en contenant les mécanismes d'acidification qui sont à l'origine du relargage des métaux sous forme dissoute.

C. CORRÉLATION ENTRE LES RÉSULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES ET LES DONNÉES D'IMAGERIE

Dans cette étude préliminaire, les seuls paramètres analysés pouvant donner lieu à une recherche de corrélation avec l'imagerie aérienne sont les teneurs en eau (%W) et en Matière Organique (MO) des sols.

Les images de la Province Sud acquises lors du survol des bassins de la SODACAL ont été transmises à AEL et le livrable est représenté en Annexe 8. La définition et les explications des différents indices utilisés sont présentées en Annexe 1.

1. Résultats

De prime abord, les images brutes ne permettent pas de rapprochement évident entre les analyses et la représentation photographique directe (Figure 16). Ainsi, un traitement a été nécessaire pour obtenir une cartographie qui puisse exprimer les différents indices et leurs variations spatiales.



Figure 16 : Photographie représentant la localisation et le pourcentage de perte au feu associé à la teneur en MO pour les 14 échantillons prélevés dans le bassin F de la ferme Sodacal.

Note : La zone prospectée pour étudier l'expression des différents indices est étendue au-delà du bassin F, intégrant ainsi l'extérieur du bassin. De ce fait, les natures extrêmement différentes des surfaces explorées (fonds de bassins et couvert végétal) ont nécessité l'adaptation des échelles des gradients de couleurs pour mettre en évidence les différences minimes des indices intrinsèques aux bassins. La répartition des couleurs s'est donc réalisée par « Quantiles » et non pas de façon « Linéaire » avec le logiciel QGIS. Cette observation montre qu'il est pertinent de délimiter la zone du bassin à étudier au plus juste pour optimiser les échelles de couleur.

INDICE DE BRILLANCE DU SOL (IB)

L'indice de « brillance du sol » couvre une palette allant du bleu (IB faible) au rouge (IB fort).

Dans le bassin F (Figure 17), l'indice de brillance ne couvre pas de surfaces de manière homogène et ne présente pas non plus de gradient bien identifié. L'indice est plus faible (bleu) dans le tiers Nord, en correspondance approximative avec les aires d'alimentation en eau. Ailleurs, notamment au centre du bassin, les valeurs de l'indice augmentent (ex. : stations 321, 322 et 325, ...) et en particulier le long des remblais Sud-Ouest (324) et Sud-Est (332). Dans la partie Sud du bassin, les indices aux stations 320 et 320bis montrent des valeurs intermédiaires alors que les teneurs en eau mesurées des sols y sont maximales (Figure 11).

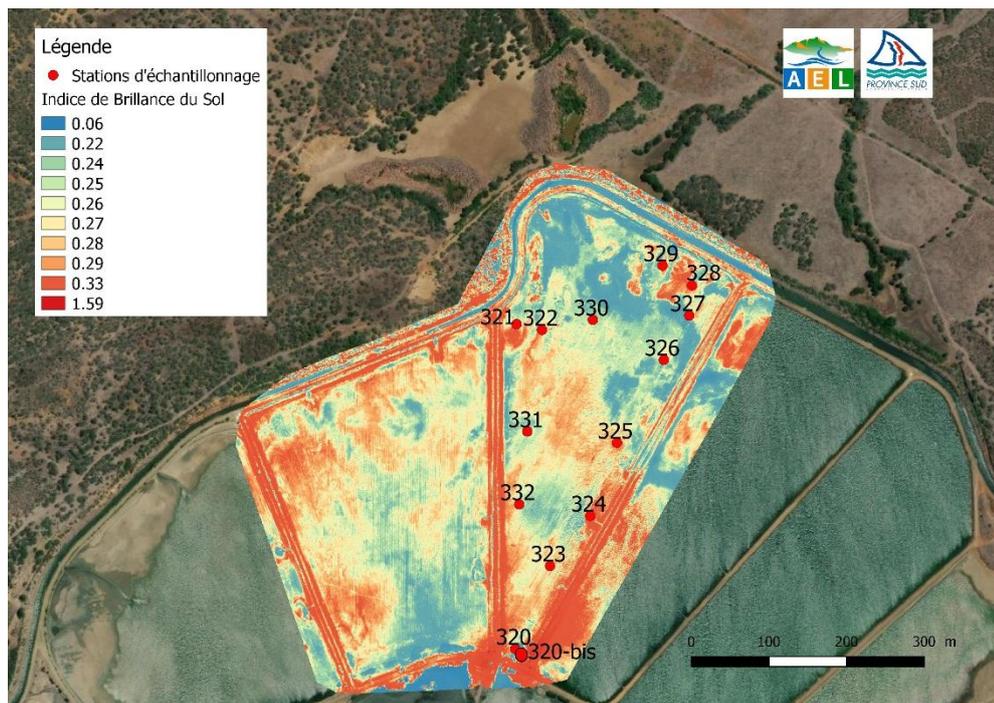


Figure 17 : Cartographie représentant l'indice de brillance du bassin F par un gradient de couleur (du bleu au rouge)

INDICE DE CONTENU EN EAU (ICE)

L'indice de « contenu en eau » couvre une palette allant du jaune (ICE faible) au violet (ICE fort).

Les valeurs les plus importantes de cet indice sont localisées dans le tiers Nord du bassin (Figure 18), en particulier de part et d'autre des deux chenaux naturels correspondant aux axes d'alimentation en eau ; le prélèvement 329 réalisé dans le lit de chenal Est montre un indice moins fort. Dans le Sud, les valeurs de ICE, sont également très élevées aux abords des stations 320 et 320-bis, en accord avec les teneurs en eau mesurées (Figure 11). Ailleurs, l'indice montre un gradient de valeurs intermédiaires entre le centre du bassin et les remblais Est et Ouest, exception faite de certaines zones spatialement très délimitées (stations 321 et 322 et 326).

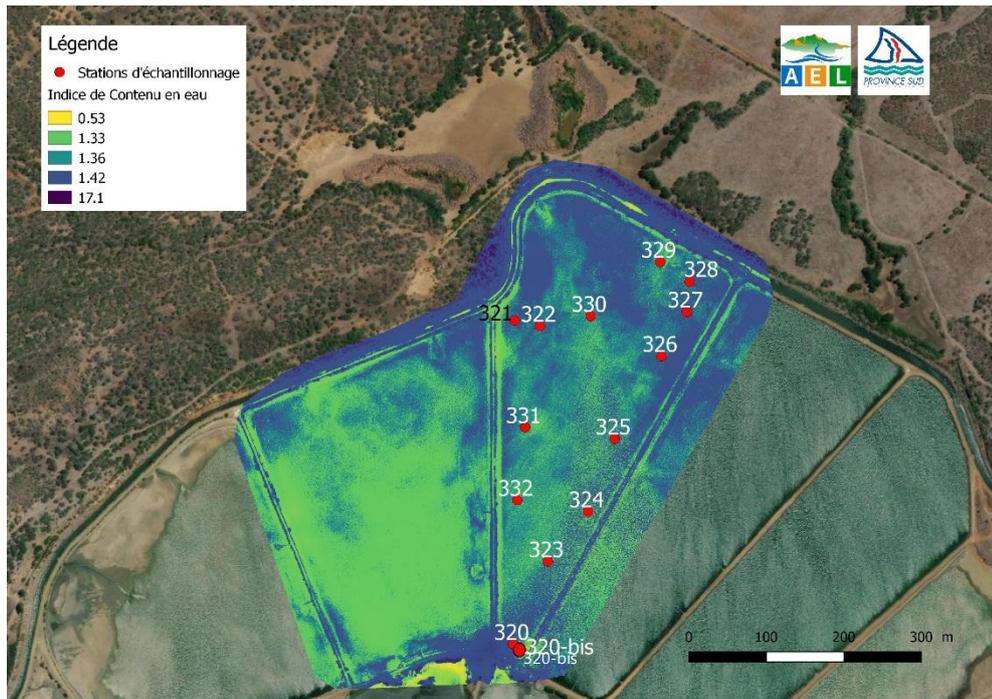


Figure 18 : Cartographie représentant l'indice de contenu en eau du bassin F par un gradient de couleur (du jaune au bleu-violet).

INDICE DE COULEUR DE SOL (ICS)

L'indice de « couleur du sol » couvre une palette allant du gris (ICS faible) au rouge (ICS fort) (Figure 19).

Les valeurs d'indice ICS sont globalement plus importantes dans la moitié nord du bassin et en particulier le long des remblais (stations 324 à 328 à l'Est et 321, 322, 331 à l'Ouest), ainsi qu'au droit des dispositifs d'alimentation en eau (329). A l'inverse, dans le secteur sud (stations 320, 320-bis et 323), on recense les valeurs les plus faibles de l'indice.

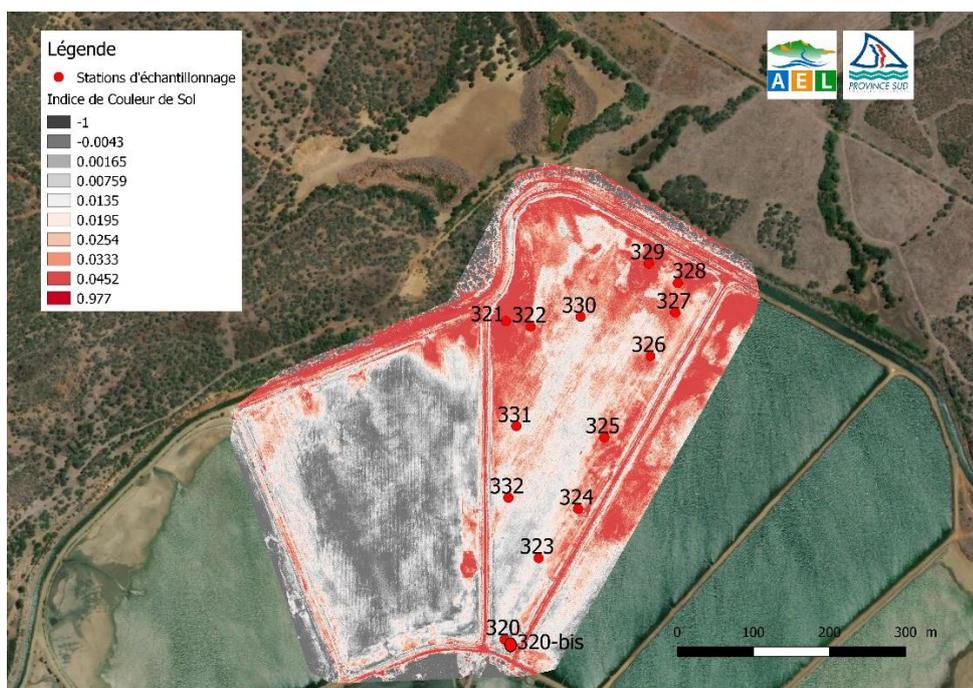


Figure 19 : Cartographie représentant l'indice de couleur de sol du bassin F par un gradient de couleur (du noir au rouge)

Les couleurs grise à noire désignent les zones contenant les teneurs les plus élevées en matière organique (stations 320, 320bis, voire 323 et 332), les rouges correspondraient plutôt avec les teneurs élevées en oxydes de fer 325 à 329 et 321, 322). Il apparaîtrait donc que cet indice fait ressortir globalement un gradient Nord-Sud d'enrichissement en matière organique vers le point d'exhaure des eaux et inversement, les teneurs en oxydes de fer étant plus élevées en direction des entrées d'alimentation. Les abords des remblais, notamment Nord-Est, semblent correspondre également à des aires de fortes concentrations en oxydes.

INDICE DE CUIRASSE (ICUIR)

L'indice de « cuirasse » couvre une palette de couleurs allant du jaune (ICUIR faible) au brun (ICUIR fort) (Figure 20).

Le gradient de couleur brun-orange montre que l'indice ICS le plus important est localisé dans les zones Sud (Stations 320, 320bis, 323 et 332) et centrale du bassin (324 et 331). Les valeurs les plus faibles de l'indice sont localisées dans un grand secteur Nord (325 à 329) et en particulier au Nord-Ouest du bassin (321 et 322). Cette distribution est sensiblement équivalente à l'indice ICS.

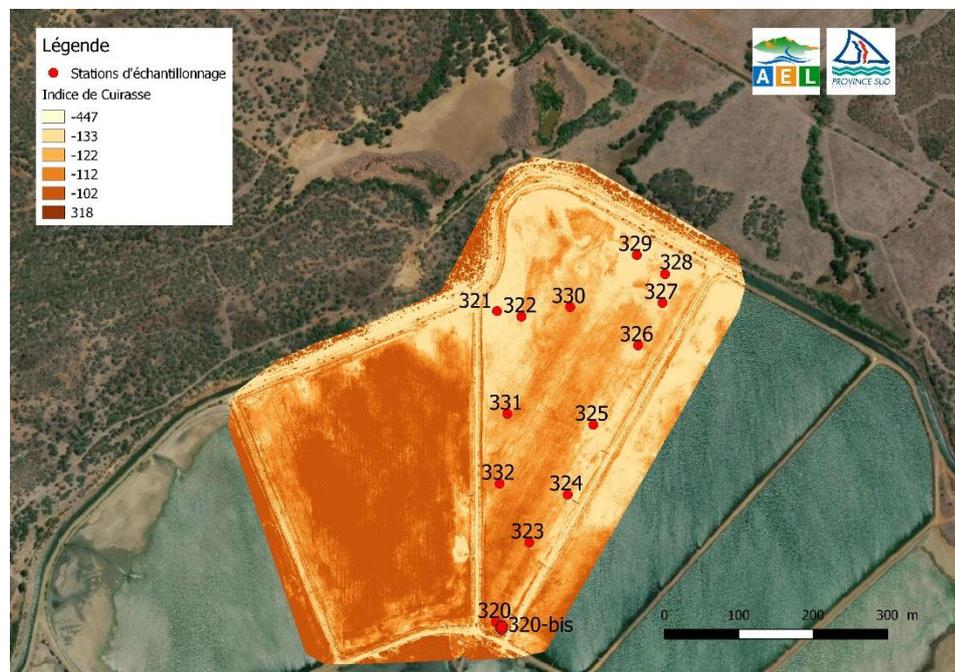


Figure 20 : Cartographie représentant l'indice de cuirasse du bassin F par un gradient de couleur (du blanc à l'orange)

INDICE DE COLORATION DE SOL (ICOL)

L'indice de « coloration du sol » couvre une palette de couleurs allant du brun (ICOL faible) au bleu (ICOL fort) (Figure 20).

Note : aucune définition satisfaisante n'a pu être retrouvée pour cet indice dans la littérature, selon la DDDT. Il est donc déconseillé d'utiliser cet indice pour le moment. Toutefois, à ce stade de l'étude il sera proposé de le prendre en compte tout de même dans cette étude.

L'indice de ICOL montre une évolution entre le Nord et le Sud du bassin. Le secteur Nord possède les valeurs les plus fortes de l'indice, en particulier aux abords des entrées d'eau ; les valeurs les plus faibles étant localisables dans le Sud. Néanmoins, quelques zones brunes réparties dans tout le bassin (stations 331 ; 322 ; 321 ; 327).

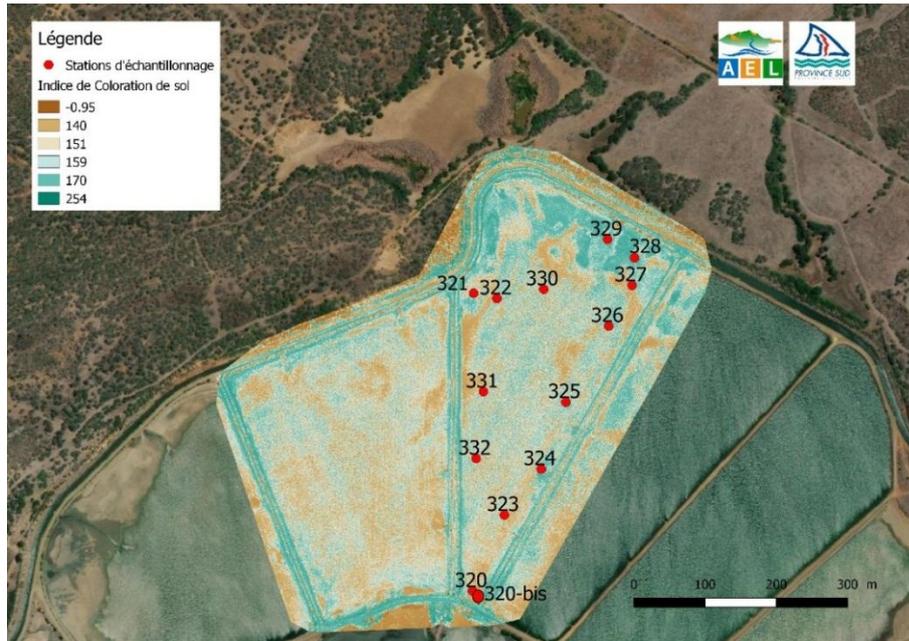


Figure 21 : Cartographie représentant l'indice de coloration de sol sur le bassin F par un gradient de couleur (marron au bleu)

2. Interprétations

Afin de tester au mieux le degré de corrélation entre les informations fournies par les différents indices issus des traitements d'images, et les valeurs des deux paramètres mesurés (%W et %MO), une étape d'analyse en statistique descriptive a été tentée. Ainsi, un ACP et une matrice de corrélation ont été réalisées en compilant les données d'indices moyens de caractérisation de sols (notées Moy, Annexe 8) calculés dans un cercle de 1m autour de chaque station échantillonnée. Les variables d'entrée du traitement statistique ont été les valeurs moyennes calculées (DDDT) et les résultats de mesure des deux paramètres physico-chimiques de base mesurés en laboratoire pour les 14 stations d'échantillonnage (Observations).

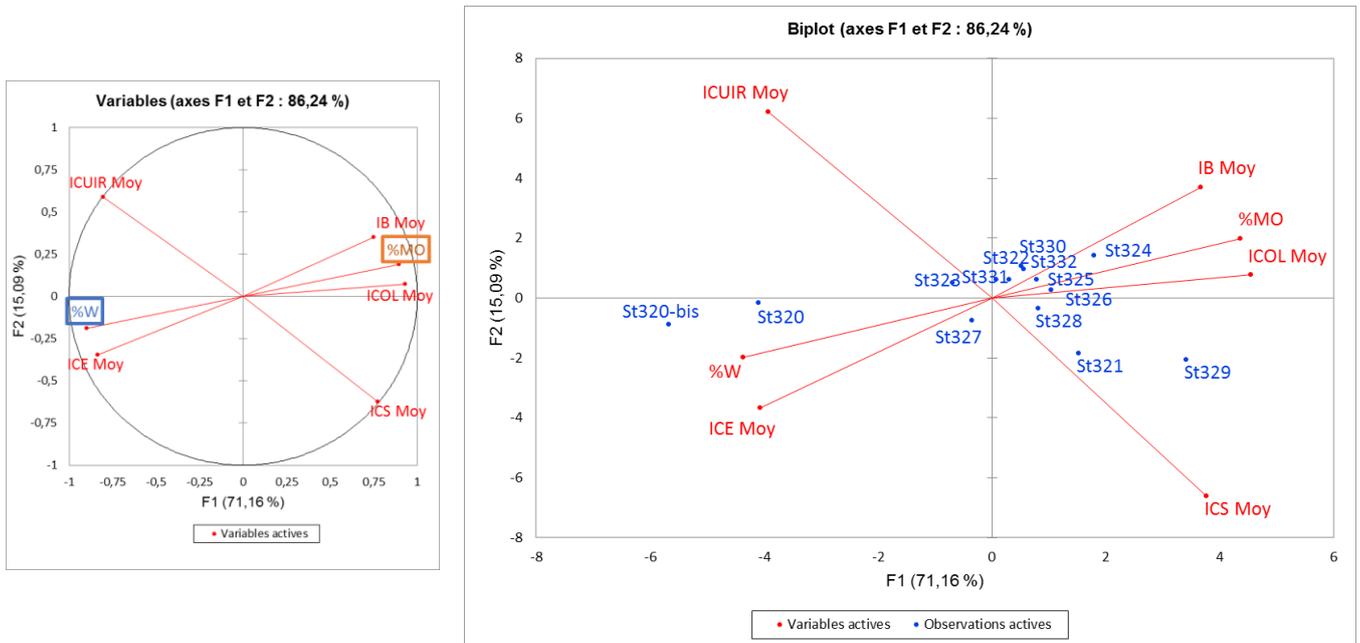


Figure 22 : Traitement ACP sur les indices provenant du traitement d'image par drone. A gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2) avec en encadré bleu et orange, les paramètres de physico-chimie mesurés au laboratoire. A droite, la projection de ces variables ainsi que les 14 stations d'échantillonnage.

La représentation statistique (Figure 22) peut être considérée comme fiable, la somme des pourcentages de variabilité associés aux axes du cercle de corrélation étant égale à 86%. La projection 2D montre que :

- Les variables « %W » et « indice de contenu en eau moyen (ICE Moy) » forment un angle aigu, celles-ci semblent donc être corrélées entre elles ;
- Le pourcentage de matière organique (%MO) semble être relativement corrélé avec les indices moyens de brillance (IB Moy) et de coloration du sol (ICOL Moy) ;
- Les angles de 180° formés par les indices de cuirasse (ICUIR Moy) et de couleur du sol moyens (ICS Moy), ainsi qu'entre les indices de brillance (IB Moy) et de contenu en eau (ICE Moy), montrent deux anti-corrélations entre ces variables.

La répartition des stations d'échantillonnage sur le Biplot confirme la distribution des résultats antérieurement observée (Figure 11 et Figure 20), et souligne notamment la particularité des stations 320 et 320bis riches en eau. La distribution plutôt groupée du reste des stations montre qu'elles ne se distinguent pas ou peu entre elles avec les variables physico-chimiques choisies.

La matrice de corrélation de Pearson (Tableau 2) révèle :

- Une corrélation significative ($R^2=0,775$) entre le pourcentage de teneur en eau mesuré (%W) et l'indice de contenu en eau moyen (ICE Moy), lui-même étant corrélé au pourcentage en matière organique (%MO) ;
- Une corrélation significative ($R^2=0,737$) entre le pourcentage de matière organique (%MO) et l'indice de coloration du sol moyen (ICOL Moy) ;
- Des corrélations faibles ($R^2<0,7$) entre l'indice de brillance (IB Moy) et le pourcentage de la matière organique (%MO) et les indices moyens de couleur de sol (ICS Moy), de brillance (IB Moy) et de coloration (ICOL Moy) ;
- Une anti-corrélation forte ($R^2=0,986$) entre les indices moyens de cuirasse (ICUIR Moy) et de couleur de sol (ICS Moy) ; anti-corrélés, ces deux indices donnent le même type d'information en évoluant inversement l'un avec l'autre.

L'indice de coloration se révèle être en lien avec toutes les variables représentées : il est corrélé positivement avec l'indice de brillance (0,861) et dans une moindre mesure avec le pourcentage de MO (0,737) ; il est corrélé négativement avec l'indice de cuirasse (-0,718), l'indice de contenu en eau (-0,775) et la teneur en eau des échantillons (-0,737), mesurée au laboratoire. La corrélation entre l'indice de contenu en eau (ICE) et le pourcentage en matière organique (-0,775) traduit la présence d'un point bas plus humide, dans le bassin, qui favorise l'accumulation de la vase fine riche en MO.

Tableau 2 : Matrice de corrélation des variables « indices » et « paramètres physico-chimiques mesurés ». Les valeurs en gras sont les coefficients de corrélation différents de 0 à un niveau de significativité de 95% (p-values Pearson < 0,05).

Variables	ICS Moy	ICOL Moy	IB Moy	ICUIR Moy	ICE Moy	% W	% MO
ICS Moy	1	0,673	0,378	-0,986	-0,442	-0,557	0,557
ICOL Moy	0,673	1	0,861	-0,718	-0,775	-0,737	0,737
IB Moy	0,378	0,861	1	-0,417	-0,648	-0,570	0,570
ICUIR Moy	-0,986	-0,718	-0,417	1	0,471	0,596	-0,596
ICE Moy	-0,442	-0,775	-0,648	0,471	1	0,775	-0,775
%W	-0,557	-0,737	-0,570	0,596	0,775	1	-1,000
%MO	0,557	0,737	0,570	-0,596	-0,775	-1,000	1

Ce qu'il faut retenir

Finalement, les liens les plus forts existants entre les paramètres physico-chimiques mesurés au laboratoire et les traitements d'imagerie drone de la Province sont ceux entre :

- **Le pourcentage teneur en eau (%W) et l'indice de contenu en eau (ICE ; 0,775).**
- **Le pourcentage de matière organique (%MO) et l'indice de coloration (ICOL ; 0,737).**

IV. SYNTHÈSE

Au cours de ce projet d'étude du vieillissement des fonds de bassins, une étude bibliographique a été effectuée sur la base de données existantes pour *in fine*, à l'aide de traitements statistiques descriptifs, sélectionner une ferme « modèle », représentative des fermes de la filière aquacole. Les clusters de fermes ainsi formés sont répartis en 3 groupes distincts :

- Le premier groupe est formé des fermes/bassins : Welbuihoone, Pond7 ; Sodacal, Pond F et Pond G ; Nessaquacole, Pond B4 ; April, Pond 2 ; Tournier, only pond ; Sea Farm, Pond D ;
- Le groupe 2 est formé seulement par la ferme Aquawa ;
- Enfin les fermes FAO, Pond L ; Aquamon, Pond F et G ; Kapuidea, Pond A forment le groupe n°3.

Les différents traitements ont conduit à faire le choix de la ferme Sodacal (bassin de production F) sur laquelle effectuer les tests expérimentaux.

Ces premiers tests de préfaisabilité expérimentaux ont permis de conclure que :

- Le pouvoir tampon des carbonates est manifeste sur l'évolution du pH en annihilant l'acidification du milieu et le maintenant à pH voisin de 8 pour toute la durée de l'expérimentation (192 heures) ;
- L'effet de l'alcalinisation des sols (ajout de carbonate de calcium pur) est observé sur les phénomènes de solubilisation des métaux dont l'intensité de la diminution est remarquable pour Co, Mn, Ni et Fe ;
- Des lixiviations successives, simulant des mises en eaux répétées, permettent de réduire considérablement les concentrations en éléments majeurs et éléments métalliques relarguées dans les lixiviats, pour les sols amendés par des carbonates ou non ;
- Une solubilisation apparente de Cu en milieu alcalinisé (environ pH=8) par l'ajout de CaCO_3 est observable.

Les tests de préfaisabilité au laboratoire se sont révélés être un bon outil de compréhension des mécanismes de physico-chimie qui ont lieu dans les sols de fonds de bassins. Le champ d'application des tests au laboratoire étant très large, cela permet de jouer sur une infinité de paramètres d'activités de la ferme (types et quantités d'amendements, nombre de remise en eau, durée de séchage du bassin ...) et ainsi présenter des résultats permettant d'élargir les réflexions à l'échelle de bassins aquacoles.

Également, cette première phase de test a permis de mettre en évidence l'existence de corrélation entre les résultats d'analyses physico-chimiques de base (%W et %MO) et les données d'imagerie par drones, notamment entre le pourcentage de teneur en eau (%W) et l'indice de contenu en eau (ICE), et entre le pourcentage de matière organique (%MO) et l'indice de coloration (ICOL).

Malgré tout, des incompréhensions des phénomènes physico-chimiques persistent notamment celui de la solubilisation du Cu en milieu alcalinisé par ajout de carbonate de calcium. De plus, bien que certaines corrélations aient été mises en évidence entre paramètres physico-chimique et données d'imagerie, il est nécessaire de trouver de meilleures corrélations associant imagerie et analyses.

V. PERSPECTIVES

Etant donné la nécessité d'affiner notre compréhension des mécanismes physico-chimiques et de simuler au plus proche la réalité de terrain, il a été proposé pendant la réunion de présentation de la phase expérimentale du programme « Fonds de bassins & Proxys » (du 23 Novembre 2020) de développer une phase complémentaire (Phase 1b).

Elle consiste premièrement, en la réalisation des tests de lixiviations selon le même protocole sur deux ou trois échantillons supplémentaires de sols de fonds de bassin F de la Sodacal (faisant partie des 14 échantillons prélevés et donc déjà disponibles). Les échantillons sélectionnés seront ceux montrant les plus grands contrastes en termes de teneur en matière organique mesurée par perte au feu.

Deuxièmement, il a été proposé de mener les tests de lixiviation avec une solution saline (eau de mer) en substitution à l'eau déminéralisée du test normalisé, afin de se rapprocher de la réalité du terrain.

Troisièmement, différents types d'amendement industriels utilisés feront l'objet de tests d'optimisation afin obtenir une stabilisation des pH suffisante du sol.

Enfin, cette Phase 1b inclut la définition d'un ou plusieurs paramètres chimiques permettant de caractériser le degré de vieillissement de la matière organique pour rechercher de meilleures corrélations avec les données d'imagerie acquises par drones de la Province Sud.

Cette Phase 1b permettra de dimensionner au mieux la Phase 2 d'extension de la méthodologie à l'ensemble de la filière à partir de la fin du 2^{ème} trimestre 2021.

REFERENCES

Boyd, C. E. 1995. Bottom Soils, Sediment, and Pond Aquaculture. Chapman and Hall, New York, New York, USA.

Boyd, C. E. 2011. Filière Crevettes de Nouvelle-Calédonie, Audit & Recommandations, Rapport Final (trad). AquaSol, Inc, P,O, Box 14-1938, Coral Gables, FL 33114 USA.

Hussenot, J., Martin, J.L.M., 1995. Assessment of the quality of pond sediment in aquaculture using simple, rapid techniques. Aquaculture international 3, 123 – 133.

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.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS MAJEURS. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA CONSTITUTION DE CLUSTERS.	9
FIGURE 2 : TRAITEMENT ACP SUR LES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DE LA NATURE ET TEXTURE DES SOLS. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA CONSTITUTION DE CLUSTERS.	10
FIGURE 3 : BILAN : CAH SUR TOUS LES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DU TABLEAU OPTIMISÉ DE BOYD (2011) (ANNEXE 3).....	11
FIGURE 4 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS CARACTÉRISTIQUES DE LA MATIÈRE ORGANIQUE. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES.	12
FIGURE 5 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS REFLÉTANT LA NATURE/TEXTURE DU SOL. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA FORMATION DE CLUSTERS.	13
FIGURE 6 : BILAN : CAH SUR TOUS LES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES DU TABLEAU OPTIMISÉ DE BOYD (2011), INCLUANT LA DONNÉE DE PRODUCTION EN T/MPL.....	14
FIGURE 7 : LOCALISATION DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENTS SUR LE BASSIN F, FERME SODACAL (NOUVELLE-CALÉDONIE)	15
FIGURE 8 : PHOTOGRAPHIE DES 14 ÉCHANTILLONS DE SOLS SECS DANS DES CREUSETS AVANT LES ANALYSES DE PERTE AU FEU.....	16
FIGURE 9 : SCHÉMA REPRÉSENTANT LES 2 TESTS AVEC LES ÉTAPES DE « LIXIVIATION 1 » ET « LIXIVIATION 2 ».....	17
FIGURE 10 : ÉCHANTILLON 320, SÉCHÉ ET ÉMOTTÉ AVANT L'AJOUT DE PHASE LIQUIDE (À GAUCHE) ; ÉCHANTILLON 320 AVEC AMENDEMENT DE CaCO_3 (DROITE).....	17
FIGURE 11 : GRAPHIQUE REPRÉSENTANT LE POURCENTAGE DE PERTE AU FEU (EN ROUGE) ET DE TENEUR EN EAU (EN BLEU) EN FONCTION DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGES.	18
FIGURE 12 : COURBES DE CONDUCTIVITÉS OBTENUES DURANT LA LIXIVIATION POUR LES DEUX ESSAIS EFFECTUÉS SÉQUENTIELLEMENT AVEC UNE PÉRIODE DE SÉCHAGE ENTRE LES DEUX ESSAIS.....	19
FIGURE 13 : COURBES DE PH DURANT LA LIXIVIATION POUR LES DEUX ESSAIS EFFECTUÉS SÉQUENTIELLEMENT AVEC UNE PÉRIODE DE SÉCHAGE ENTRE LES DEUX ESSAIS.....	20
FIGURE 14 : CONCENTRATIONS DES ÉLÉMENTS MAJEURS (CA, MG, K ET NA) DISSOUS EN MG/L DÉTERMINÉES DANS LE LIXIVIAT SUITE AUX ESSAIS DE LIXIVIATION. LÉGENDE : ECH LIX 1 : ÉCHANTILLON DE SOL D'ORIGINE SANS AJOUT DE CaCO_3 À L'ESSAI 1. ECH + CaCO_3 Lix 1 : ÉCHANTILLON DE SOL AVEC AJOUT DE CaCO_3 À L'ESSAI 1. ECH LIX 2 : ÉCHANTILLON DE SOL D'ORIGINE SANS AJOUT DE CaCO_3 À L'ESSAI 2. ECH + CaCO_3 LIX 2 : ÉCHANTILLON DE SOL AVEC AJOUT DE CaCO_3 À L'ESSAI 2.	21
FIGURE 15 : CONCENTRATIONS EN ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES (CO, FE, CU, MN, NI) DISSOUS EN $\mu\text{G/L}$ DÉTERMINÉES DANS LE LIXIVIAT SUITE AUX DEUX PHASES DE LIXIVIATIONS. LES ÉTOILES (*) INDIQUENT UNE CONCENTRATION INFÉRIEURE À LA LIMITE DE QUANTIFICATION (LQ).....	22
FIGURE 16 : PHOTOGRAPHIE REPRÉSENTANT LA LOCALISATION ET LE POURCENTAGE DE PERTE AU FEU ASSOCIÉ À LA TENEUR EN MO POUR LES 14 ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS DANS LE BASSIN F DE LA FERME SODACAL.	23
FIGURE 17 : CARTOGRAPHIE REPRÉSENTANT L'INDICE DE BRILLANCE DU BASSIN F PAR UN GRADIENT DE COULEUR (DU BLEU AU ROUGE).....	24
FIGURE 18 : CARTOGRAPHIE REPRÉSENTANT L'INDICE DE CONTENU EN EAU DU BASSIN F PAR UN GRADIENT DE COULEUR (DU JAUNE AU BLEU-VIOLET).	25
FIGURE 19 : CARTOGRAPHIE REPRÉSENTANT L'INDICE DE COULEUR DE SOL DU BASSIN F PAR UN GRADIENT DE COULEUR (DU NOIR AU ROUGE).....	25
FIGURE 20 : CARTOGRAPHIE REPRÉSENTANT L'INDICE DE CUIRASSE DU BASSIN F PAR UN GRADIENT DE COULEUR (DU BLANC À L'ORANGE)	26
FIGURE 21 : CARTOGRAPHIE REPRÉSENTANT L'INDICE DE COLORATION DE SOL SUR LE BASSIN F PAR UN GRADIENT DE COULEUR (MARRON AU BLEU)	27
FIGURE 22 : TRAITEMENT ACP SUR LES INDICES PROVENANT DU TRAITEMENT D'IMAGE PAR DRONE. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2) AVEC EN ENCADRÉ BLEU ET ORANGE, LES	

PARAMÈTRES DE PHYSICO-CHIMIE MESURÉS AU LABORATOIRE. À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES 14 STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGES. 27

FIGURE 24 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS CARACTÉRISTIQUES DE LA MATIÈRE ORGANIQUE. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA FORMATION DE CLUSTERS. 44

FIGURE 25 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA FORMATION DE CLUSTERS. 44

FIGURE 26 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS MAJEURS. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA FORMATION DE CLUSTERS. 46

FIGURE 27 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS CARACTÉRISTIQUES DE LA MATIÈRE ORGANIQUE. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA FORMATION DE CLUSTERS. 46

FIGURE 28 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS CARACTÉRISTIQUES DE LA NATURE/TEXTURE DU SOL. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA FORMATION DE CLUSTERS. 47

FIGURE 29 : TRAITEMENT ACP SUR LES ÉLÉMENTS MÉTAUX. À GAUCHE, LA PROJECTION DES VARIABLES QUANTITATIVES SUR UN PLAN EN 2D CONSTITUÉ PAR LES 2 PREMIERS FACTEURS (F1 ET F2). À DROITE, LA PROJECTION DE CES VARIABLES AINSI QUE LES FERMES ET LA FORMATION DE CLUSTERS. 47

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COORDONNÉES GÉOPHYSIQUES DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT (RÉFÉRENTIEL WGS-84)	15
TABLEAU 2 : MATRICE DE CORRÉLATION DES VARIABLES « INDICES » ET « PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES MESURÉS ». LES VALEURS EN GRAS SONT LES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION DIFFÉRENTS DE 0 À UN NIVEAU DE SIGNIFICATIVITÉ DE 95% (P-VALUES PEARSON < 0,05)	28
TABLEAU 3 : JEU DE DONNÉES ORIGINEL DE BOYD (2011) - PARTIE 1	40
TABLEAU 4 : JEU DE DONNÉES ORIGINEL DE BOYD (2011) – PARTIE 2	41
TABLEAU 5 : JEU DE DONNÉES DE BOYD (2011) "CATÉGORISÉ" ET OPTIMISÉ POUR LES TRAITEMENTS STATISTIQUES PAR ACP. PARTIE 1. EN BLEU À GAUCHE, LE PH. EN JAUNE, LES ÉLÉMENTS MAJEURS. EN BLEU À DROITE, LES PARAMÈTRES CARACTÉRISANT LA MATIÈRE ORGANIQUE	42
TABLEAU 6 : JEU DE DONNÉES DE BOYD (2011) "CATÉGORISÉ" ET OPTIMISÉ POUR LES TRAITEMENTS STATISTIQUES PAR ACP- PARTIE 2. EN ROUGE, LES ÉLÉMENTS REPRÉSENTANT LA NATURE ET LA TEXTURE DU SOL. EN ROSE, LES MÉTAUX	43
TABLEAU 7 : RÉSULTATS DE PRODUCTION 2010/2011 ET 2011/2012 EN TONNES	45
TABLEAU 8 : RÉSULTATS DES ANALYSES RÉALISÉE SUR LES DEUX LIXIVIATS SUCCESSIFS DES TEST1 ET TEST2	48
TABLEAU 9 : VALEUR DES DIFFÉRENTS INDICES ISSUS DU TRAITEMENT D'IMAGERIE DRONE PAR LA PROVINCE SUD (SOURCE DDDT, PROVINCE SUD)	49

ANNEXES

ANNEXE 1.....	37
ANNEXE 2.....	40
ANNEXE 3.....	42
ANNEXE 4.....	44
ANNEXE 5.....	45
ANNEXE 6.....	46
ANNEXE 7.....	48
ANNEXE 8.....	49

Annexe 1

Deux types de drones disponibles à la Province-sud :

- Un quadricopter DJI P4P équipé pouvant couvrir une surface de 22 ha, à la hauteur maximale de vol de 150 m par rapport au sol. Ce drone est équipé d'un :
 - Capteur multispectrale SEQUOIA (Proche Infrarouge/Rouge/Vert/Red Edge + RGB 16Mpixels),
 - Capteur RGB DJI de 20 Mpixels permettant de réaliser des prises de vues (photos et vidéos) ;
- Une aile volante EBEE SQ pouvant couvrir une surface de 90-100 ha à une altitude de 95m par rapport au sol. Ce drone est équipé du même capteur SEQUOIA que le quadricopter.

Les 5 indices (brillance, couleur du sol, cuirasse, coloration du sol, oxydes de fer) de caractérisation des sols que l'on peut calculer à partir des survols ainsi que leurs définitions respectives sont spécifiées dans le rapport de la DDDT, ci-après. En complément, la DDDT a été extrapoler un indice de contenu d'eau dans les sols, à partir de l'indice de brillance.



Les indices et leurs définitions

L'indice de brillance est construit à partir des canaux rouge (R) et proche infrarouge (PIR) suivant un calcul :

$$IB = \sqrt{(R*R+PIR*PIR)}$$

L'indice de brillance représente la moyenne des brillances de l'image. Cet indice est donc sensible à la brillance des sols, reliée à son humidité et à la présence de sels en surface. Il caractérise surtout l'albédo (Ratio de l'énergie solaire réfléchi par la surface sur l'énergie incidente, aussi appelé réflectance). L'indice de brillance permet d'estimer si l'élément de surface observé est clair ou foncé. Ce dernier cas est causé par différents phénomènes qui peuvent se combiner :

- la surface a été humidifiée (après des précipitations ou par irrigation)
- la rugosité de la surface a augmenté (par le travail du sol, par ex.)
- le couvert végétal a augmenté. L'éclaircissement correspond bien sûr au phénomène inverse, et donne souvent lieu à un diagnostic de dégradation de l'état du milieu.

L'interprétation de cet indice n'est pas toujours aisée.

L'indice de brillance a des valeurs comprises entre 1 et 100 et la légende ci-dessus les représente en 3 classes. Les cartes d'indice de brillance décrivent la façon dont la surface d'un sol nu réfléchit la lumière solaire.

La luminosité du sol comprend les effets combinés du type de sol (type de minéraux argileux), la teneur en matière organique et la teneur en humidité du sol au moment de l'acquisition de l'image. Alors que le type de sol et la teneur en matière organique sont très stables dans le temps, l'humidité du sol de la couche de surface est très variable.

Applications

Les cartes d'indice de brillance sont utiles pour les applications suivantes :

- Placement optimal des échantillons d'analyses des sols compte tenu de la variabilité.
- Visualisation des couches de potentiel pour la création de zones de gestion.
- Analyse des conditions d'humidité du sol.
- Identification des zones où la gestion du drainage est nécessaire.
- Planification des étapes de récolte.

L'indice couleur de sol (Cf. Carré 2002 / Mane et al. 1997) :

La couleur est un des critères importants lors de la description d'un sol. Sur le terrain, on utilise la charte Munsell ou des référentiels (pédo-comparateur) pour comparer les différents horizons pédologiques rencontrés.

La couleur est une variable synthétique qui exprime un ensemble de propriétés du sol, ainsi :

- une terre rouge indiquera une forte teneur en fer
- une terre noire, une teneur élevée en matière organique.

La réflectance des sols résulte directement de leur composition et de leur couleur. Elle varie suivant les diverses combinaisons entre les principaux paramètres de surface tels que :

- la matière organique (MO),
- le fer (Fe),
- le calcaire (CaCO₃);

Elle varie aussi en fonction de l'humidité du sol.

$$(Red - Green) / (Red + Green)$$

L'indice de cuirasse :

Cet indice permet de différencier les surfaces bâtis et les sols nus, il utilise les bandes verte et rouge. Les surfaces végétales et aquatiques apparaissent en noir (faibles valeurs de l'indice) alors que les surfaces minéralisées apparaissent en gris clair ou en blanc, les minimum et maximum de cet indice sont variables selon la composition de l'image traitée.

$$(3 * Green) - Red - 100$$

L'indice de coloration :

Aucune définition satisfaisante n'a pu être retrouvée dans la littérature. Il est conseillé de ne pas utiliser cet indice pour le moment.

Indice d'oxyde de fer

Le taux d'oxyde de fer est un ratio des longueurs d'ondes rouges et bleues. La présence de minerais limonitiques contenant des phyllosilicates et l'altération d'oxyde de fer limonitique entraîne l'absorption du canal bleu et de la réflectance du canal rouge. Ainsi, les surfaces qui présentent une altération prononcée d'oxyde de fer sont claires. La nature du ratio permet à cet indice d'atténuer les différences d'éclairage provoquées par l'ombrage du MNT.

$$\text{Oxyde de fer} = Red / Blue$$

Annexe 2

Tableau 3 : Jeu de données original de Boyd (2011) - partie 1

FERME	Perf.	pH	Calcium (ppm)	Organic matter (%)	Magnesium (ppm)	Organic carbon (%)	Sodium (ppm)	Total nitrogen (%)	Potassium (ppm)	C/N	Aluminum (ppm)	Total sulfur (%)	Arsenic (ppm)	Dilute acid-extractable phosphorus (ppm)
Kapuidea, Pond A	1	7,55	4 897	3,8	3 314	2,13	16 338	0,150	1 719	14,2	48	0,31	<0,1	96
Pronarci, excavated part, Pond 1	2	7,71	12 455	3,9	508	2,18	24 088	0,170	1 065	12,8	<0,1	0,27	<0,1	52
Pronarci, original, flat part, Pond 1	3	7,75	6 949	4,1	549	2,30	19 139	0,140	1 772	16,4	<0,1	0,43	<0,1	42
Aquawa, Pond 3	4	7,84	10 504	2,9	485	1,62	14 202	0,130	1 736	12,5	<0,1	0,30	<0,1	65
FAMB, Pond 2	5	8,05	11 197	1,9	2 765	1,06	11 652	0,110	1 106	9,6	<0,1	0,28	<0,1	65
FAMB, Pond 3	6	8,39	7 579	2,8	2 014	1,57	4 257	0,049	270	31,4	<0,1	0,07	<0,1	8
FAO, Pond L	7	7,22	1 871	2,9	3 772	1,62	11 324	0,170	1 379	9,5	115	0,21	<0,1	96
Webuihoone, Pond 7	8	6,42	1 244	2,4	2 554	1,34	11 692	0,130	690	10,3	238	0,27	<0,1	120
Tournier, only pond	9	7,53	2 653	2,1	3 003	1,18	13 066	0,097	1 167	12,2	123	0,22	<0,1	110
Sea Farm, Pond D	10	7,54	3 277	2,0	2 799	1,12	12 522	0,140	1 205	8,0	95	0,20	<0,1	88
Aquamon, Pond F	11	7,56	2 323	2,3	3 528	1,29	15 096	0,150	1 778	8,6	40	0,32	<0,1	105
Aquamon, Pond G	12	6,98	1 339	2,8	2 922	1,57	15 994	0,170	1 825	9,2	230	0,39	<0,1	131
April, Pond 2	13	7,63	2 784	1,9	3 048	1,06	10 971	0,077	1 154	13,8	111	0,17	<0,1	55
Aquamer, Pond 5	14	7,26	1 047	3,0	3 256	1,68	23 907	0,120	1 118	14,0	359	0,24	<0,1	63
Sodacal, Pond F	15	7,16	1 265	2,3	2 573	1,29	11 403	0,120	1 325	10,8	276	0,19	<0,1	74
Sodacal, Pond G	16	7,40	2 091	2,0	3 562	1,12	17 659	0,099	1 409	11,3	314	0,20	<0,1	53
Nessaquacole, Pond B4	17	7,37	1 831	2,6	2 719	1,46	8 811	0,150	893	9,7	229	0,21	<0,1	62
EORI Hatchery, Broodstock Pond 9		7,93	17 904	2,5	2 609	1,40	12 912	0,110	937	12,7	<0,1	0,25	<0,1	31
Mara, Pond 2		7,00	1 146	2,2	2 016	1,23	1 199	0,130	1 321	9,5	313	0,18	<0,1	56

Les valeurs < x sont remplacées par x

Tableau 4 : jeu de données original de Boyd (2011) – partie 2

FERME	Boron (ppm)	Carbonate (% CaCO3 equivalent)	Barium (ppm)	Sand (%)	Cadmium (ppm)	Silt (%)	Chromium (ppm)	Clay (%)	Copper (ppm)	Textural class	Iron (ppm)	Manganese (ppm)	Molybdenum (ppm)	Nickel (ppm)	Lead (ppm)	Zinc (ppm)
Kapuidea, Pond A	20	11,1	1,0	17,50	<0,1	30,00	<0,1	52,5	12,0	Clay	755	353	<0,1	<0,1	<0,1	3,0
Pronarci, excavated part, Pond 1	16	40,7	8,0	16,25	<0,1	63,75	2	20,0	7,0	Silt loam	717	2 003	<0,1	58,0	<0,1	3,0
Pronarci, original, flat part, Pond 1	39	25,0	6,0	11,25	<0,1	51,25	9	37,5	10,0	Silty clay loam	1 445	2 902	<0,1	114,0	<0,1	4,0
Aquawa, Pond 3	36	25,0	2,0	17,50	<0,1	17,50	3	65,0	14,0	Clay	1 133	1 177	<0,1	<0,1	<0,1	2,0
FAMB, Pond 2	14	29,6	9,0	40,00	<0,1	42,50	2	17,5	4,0	Loam	348	585	<0,1	10,0	<0,1	6,0
FAMB, Pond 3	11	48,2	2,0	65,00	<0,1	20,00	3	15,0	0,3	Sandy loam	233	114	<0,1	9,0	<0,1	5,0
FAO, Pond L	25	20,8	1,0	20,00	<0,1	17,50	5	62,5	9,0	Clay	1 253	572	<0,1	24,0	<0,1	5,0
Webuihoone, Pond 7	10	2,6	<0,1	33,75	<0,1	38,75	3	27,5	4,0	Clay loam	885	66	<0,1	23,0	<0,1	5,0
Tournier, only pond	20	9,9	0,3	33,75	<0,1	16,25	<0,1	50,0	1,0	Clay	536	258	<0,1	<0,1	<0,1	3,0
Sea Farm, Pond D	16	9,0	2,0	32,50	<0,1	25,00	<0,1	42,5	6,0	Clay	707	286	<0,1	<0,1	<0,1	4,0
Aquamon, Pond F	22	9,4	0,3	25,00	<0,1	22,50	3	52,5	8,0	Clay	997	712	<0,1	14,0	<0,1	4,0
Aquamon, Pond G	13	1,9	<0,1	36,25	<0,1	11,25	<0,1	52,5	8,0	Clay	826	227	<0,1	10,0	<0,1	6,0
April, Pond 2	16	7,6	2,0	32,50	<0,1	20,00	<0,1	47,5	8,0	Clay	545	309	<0,1	<0,1	<0,1	3,0
Aquamer, Pond 5	24	6,2	<0,1	16,25	<0,1	28,75	<0,1	55,0	2,0	Clay	581	51	<0,1	<0,1	<0,1	5,0
Sodacal, Pond F	16	6,4	0,2	18,75	<0,1	26,25	<0,1	55,0	2,0	Clay	589	111	<0,1	<0,1	<0,1	3,0
Sodacal, Pond G	24	6,6	1,00	20,00	<0,1	27,50	<0,1	52,5	3,0	Clay	640	363	<0,1	<0,1	<0,1	2,0
Nessaquacole, Pond B4	18	5,7	<0,1	41,25	<0,1	20,00	<0,1	38,8	2,0	Clay loam	103	69	<0,1	<0,1	<0,1	3,0
EORI Hatchery, Broodstock Pond 9	19	25,5	1,0	32,50	<0,1	17,50	<0,1	50,0	4,0	Clay	490	183	<0,1	<0,1	<0,1	3,0
Mara, Pond 2	10	1,4	0,8	28,75	<0,1	30,00	<0,1	41,3	4,0	Clay	399	49	<0,1	<0,1	<0,1	5,0

Les valeurs < x sont remplacées par x

Annexe 3

Tableau 5: Jeu de données de Boyd (2011) "catégorisé" et optimisé pour les traitements statistiques par ACP. Partie 1. En bleu à gauche, le pH. En jaune, les éléments majeurs. En bleu à droite, les paramètres caractérisant la matière organique.

FERME	Localisation	pH	Al	Ca	Mg	K	Na	Organic matter (%)	Organic carbon (%)	Total nitrogen (%)	Total sulfur (%)	Dilute acid-extractable phosphorus (ppm)	Carbonate (% CaCO ₃ equivalent)
Kapuidea, Pond A	Nord	7,55	48	4 897	3 314	1 719	16 338	3,8	2,13	0,150	0,31	96	11,1
Pronarci, excavated part, Pond 1	Nord	7,71	0,1	12 455	508	1 065	24 088	3,9	2,18	0,170	0,27	52	40,7
Pronarci, original, flat part, Pond 1	Nord	7,75	0,1	6 949	549	1 772	19 139	4,1	2,30	0,140	0,43	42	25,0
Aquawa, Pond 3	Nord	7,84	0,1	10 504	485	1 736	14 202	2,9	1,62	0,130	0,30	65	25,0
FAMB, Pond 2	Nord	8,05	0,1	11 197	2 765	1 106	11 652	1,9	1,06	0,110	0,28	65	29,6
FAMB, Pond 3	Nord	8,39	0,1	7 579	2 014	270	4 257	2,8	1,57	0,049	0,07	8	48,2
FAO, Pond L	Sud	7,22	115	1 871	3 772	1 379	11 324	2,9	1,62	0,170	0,21	96	20,8
Webuihoone, Pond 7	Nord	6,42	238	1 244	2 554	690	11 692	2,4	1,34	0,130	0,27	120	2,6
Tournier, only pond	Sud	7,53	123	2 653	3 003	1 167	13 066	2,1	1,18	0,097	0,22	110	9,9
Sea Farm, Pond D	Sud	7,54	95	3 277	2 799	1 205	12 522	2,0	1,12	0,140	0,20	88	9,0
Aquamon, Pond F	Sud	7,56	40	2 323	3 528	1 778	15 096	2,3	1,29	0,150	0,32	105	9,4
Aquamon, Pond G	Sud	6,98	230	1 339	2 922	1 825	15 994	2,8	1,57	0,170	0,39	131	1,9
April, Pond 2	Sud	7,63	111	2 784	3 048	1 154	10 971	1,9	1,06	0,077	0,17	55	7,6
Aquamer, Pond 5	Sud	7,26	359	1 047	3 256	1 118	23 907	3,0	1,68	0,120	0,24	63	6,2
Sodacal, Pond F	Sud	7,16	276	1 265	2 573	1 325	11 403	2,3	1,29	0,120	0,19	74	6,4
Sodacal, Pond G	Sud	7,40	314	2 091	3 562	1 409	17 659	2,0	1,12	0,099	0,20	53	6,6
Nessaquacole, Pond B4	Sud	7,37	229	1 831	2 719	893	8 811	2,6	1,46	0,150	0,21	62	5,7
EORI Hatchery, Broodstock Pond 9	Sud	7,93	0,1	17 904	2 609	937	12 912	2,5	1,40	0,110	0,25	31	25,5
Mara, Pond 2	Sud	7,00	313	1 146	2 016	1 321	1 199	2,2	1,23	0,130	0,18	56	1,4

Tableau 6 : Jeu de données de Boyd (2011) "catégorisé" et optimisé pour les traitements statistiques par ACP- partie 2. En rouge, les éléments représentant la nature et la texture du sol. En rose, les métaux.

FERME	Localisation	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Zn
Kapuidea, Pond A	Nord	17,50	30,00	52,5	12,0	0,1	755	353	0,1	3,0
Pronarci, excavated part, Pond 1	Nord	16,25	63,75	20,0	7,0	2	717	2 003	58,0	3,0
Pronarci, original, flat part, Pond 1	Nord	11,25	51,25	37,5	10,0	9	1 445	2 902	114,0	4,0
Aquawa, Pond 3	Nord	17,50	17,50	65,0	14,0	3	1 133	1 177	0,1	2,0
FAMB, Pond 2	Nord	40,00	42,50	17,5	4,0	2	348	585	10,0	6,0
FAMB, Pond 3	Nord	65,00	20,00	15,0	0,3	3	233	114	9,0	5,0
FAO, Pond L	Sud	20,00	17,50	62,5	9,0	5	1 253	572	24,0	5,0
Webuihoone, Pond 7	Nord	33,75	38,75	27,5	4,0	3	885	66	23,0	5,0
Tournier, only pond	Sud	33,75	16,25	50,0	1,0	0,1	536	258	0,1	3,0
Sea Farm, Pond D	Sud	32,50	25,00	42,5	6,0	0,1	707	286	0,1	4,0
Aquamon, Pond F	Sud	25,00	22,50	52,5	8,0	3	997	712	14,0	4,0
Aquamon, Pond G	Sud	36,25	11,25	52,5	8,0	0,1	826	227	10,0	6,0
April, Pond 2	Sud	32,50	20,00	47,5	8,0	0,1	545	309	0,1	3,0
Aquamer, Pond 5	Sud	16,25	28,75	55,0	2,0	0,1	581	51	0,1	5,0
Sodacal, Pond F	Sud	18,75	26,25	55,0	2,0	0,1	589	111	0,1	3,0
Sodacal, Pond G	Sud	20,00	27,50	52,5	3,0	0,1	640	363	0,1	2,0
Nessaquacole, Pond B4	Sud	41,25	20,00	38,8	2,0	0,1	103	69	0,1	3,0
EORI Hatchery, Broodstock Pond 9	Sud	32,50	17,50	50,0	4,0	0,1	490	183	0,1	3,0
Mara, Pond 2	Sud	28,75	30,00	41,3	4,0	0,1	399	49	0,1	5,0

Annexe 4

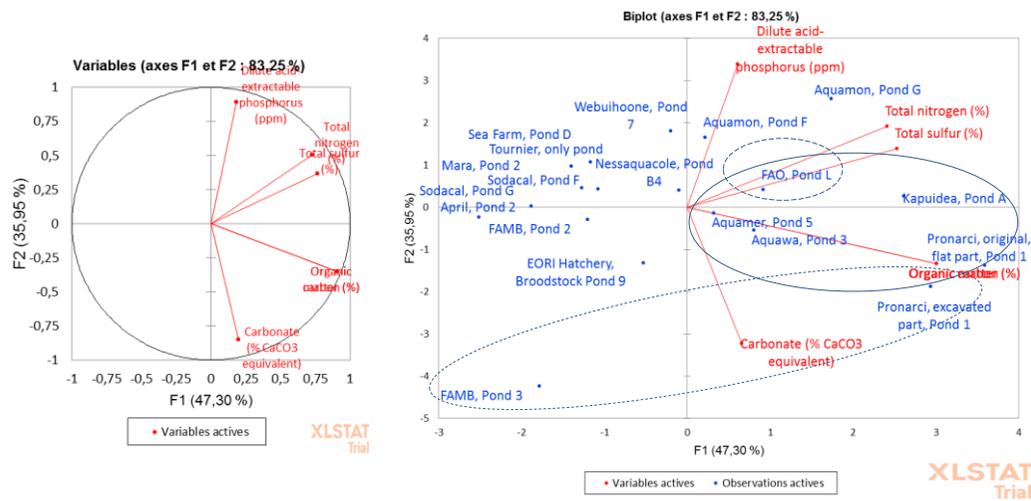


Figure 23 : Traitement ACP sur les éléments caractéristiques de la matière organique. A gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). A droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la formation de clusters.

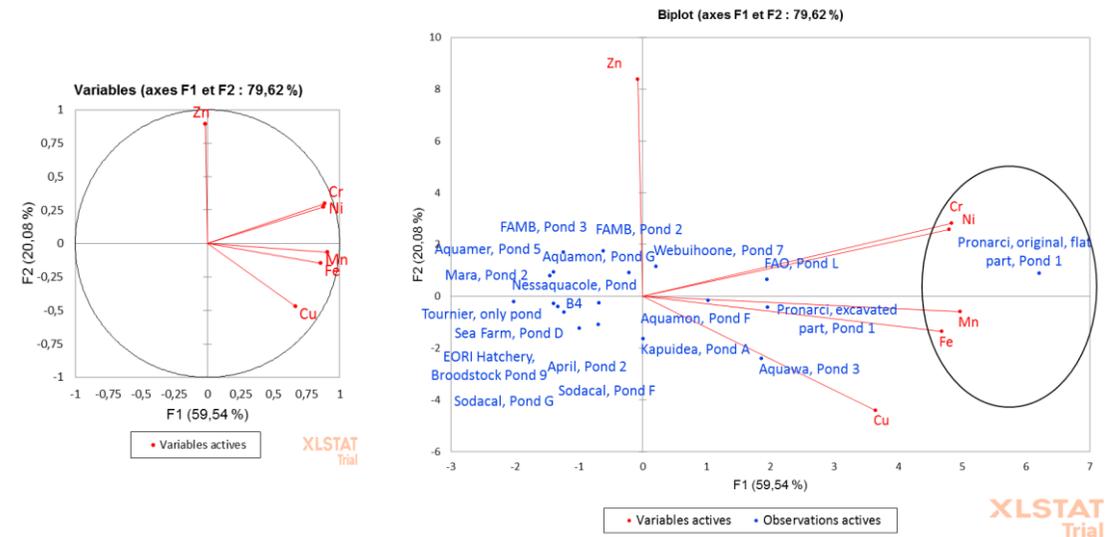


Figure 24 : Traitement ACP sur les éléments métalliques. A gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). A droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la formation de clusters.

Annexe 5

Tableau 7 : Résultats de production 2010/2011 et 2011/2012 en tonnes

FERME	BASSIN	PROD 2010-2011	PROD 2011-2012
Kapuidea	A	10 748	23 198
Pronarci	1	21 853	44 269
Aquawa	3	24 497	35 096
FAMB	2	Ne souhaite pas participer	Ne souhaite pas participer
FAMB	3		Ne souhaite pas participer
FAO	L	11 508	21 397
Webuihoone	7	31 982	24 117
Tournier	1	4 582	12 650
Sea Farm	D	10 916	15 165
Aquamon	F	10 259	10 369
Aquamon	G	9 078	12 129
April	2	37 803	5 069
Aquamer	5		
Sodacal	F	5 322	20 429
Sodacal	G	8 830	21 282
Nessaquacole	B4	20 052	12 746

 pas de production

Source : GFA-NC.

Annexe 6

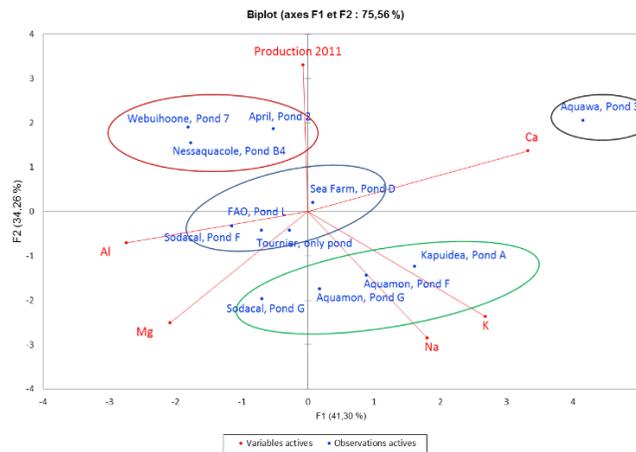
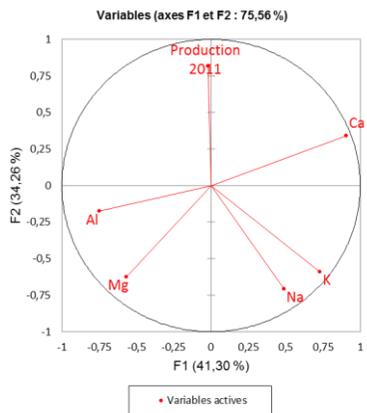


Figure 25 : Traitement ACP sur les éléments majeurs. A gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). A droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la formation de clusters.

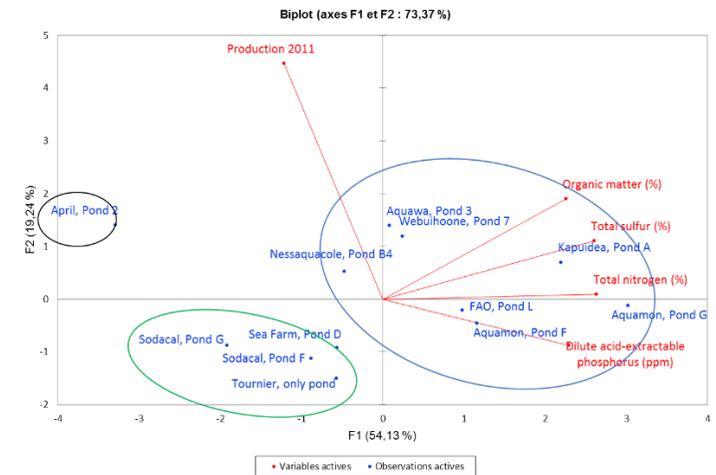
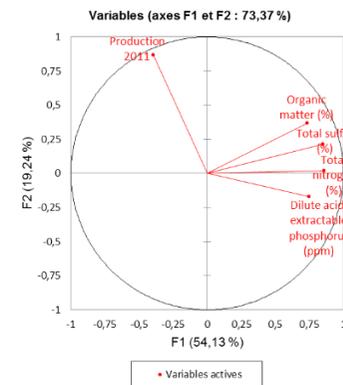


Figure 26 : Traitement ACP sur les éléments caractéristiques de la matière organique. A gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). A droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la formation de clusters.

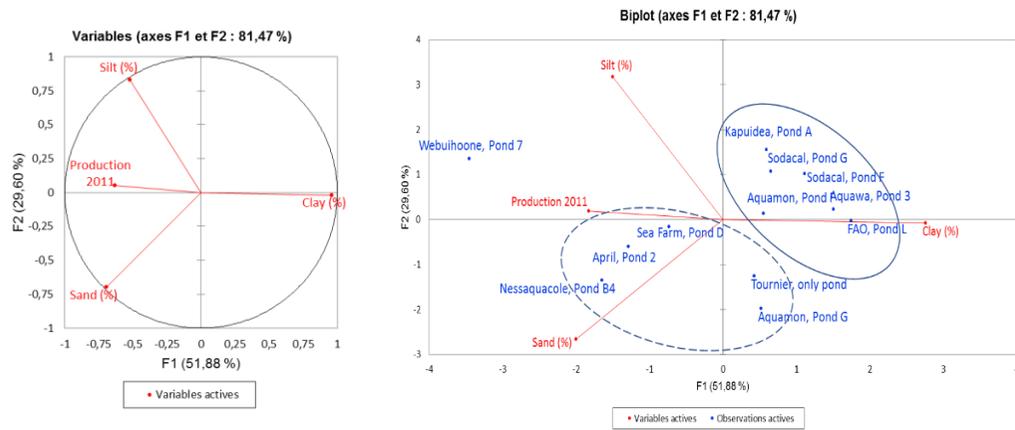


Figure 27 : Traitement ACP sur les éléments caractéristiques de la nature/texture du sol. A gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). A droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la formation de clusters.

Production 2011		
1	April, Pond 2	37803
2	Webuihoone, Pond 7	31982
3	Aquawa, Pond 3	24497
4	Nessaquacole, Pond B4	20052
5	FAO, Pond L	11508
6	Sea Farm, Pond D	10916

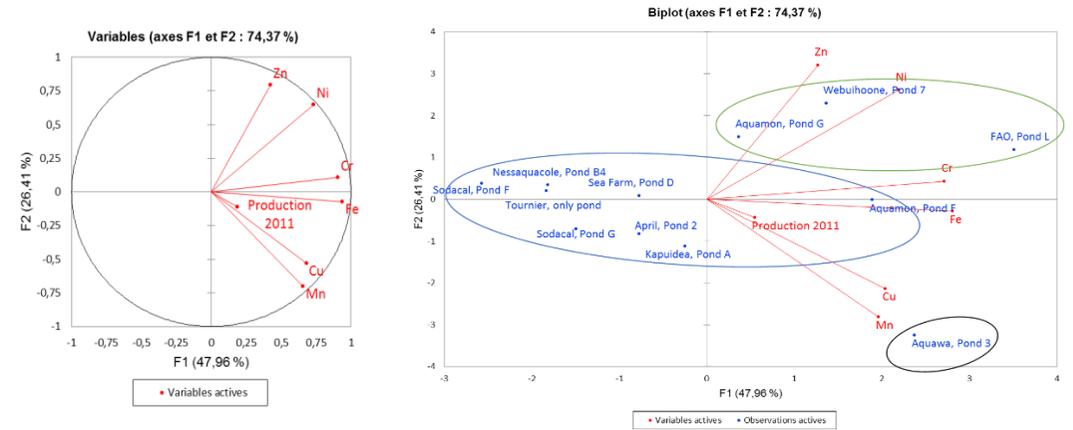


Figure 28 : Traitement ACP sur les éléments métalliques. A gauche, la projection des variables quantitatives sur un plan en 2D constitué par les 2 premiers facteurs (F1 et F2). A droite, la projection de ces variables ainsi que les fermes et la formation de clusters.

Annexe 7

Tableau 8 : Résultats des analyses réalisées sur les deux lixiviats successifs des Test1 et Test2

Lixiviation 1			Lixiviation 2		
Elément	Test 1 : Ech	Test 2 : Ech + CaCO3	Elément	Test 1 : Ech	Test 2 : Ech + CaCO3
Al (µg/L)	<50	<50	Al (µg/L)	<50	<50
As (µg/L)	<25	<25	As (µg/L)	<25	<25
Cd (µg/L)	<5	<5	Cd (µg/L)	<5	<5
Co (µg/L)	8	<5	Co (µg/L)	12	<5
Cr (µg/L)	<10	<10	Cr (µg/L)	<10	<10
Cu (µg/L)	5	13	Cu (µg/L)	<5	9
Fe (µg/L)	<20	<20	Fe (µg/L)	36	<20
Mn (µg/L)	248	24	Mn (µg/L)	441	35
Ni (µg/L)	27	12	Ni (µg/L)	40	<10
Pb (µg/L)	<25	<25	Pb (µg/L)	<25	<25
Zn (µg/L)	<50	<50	Zn (µg/L)	<50	<50
Ca (mg/L)	89	176	Ca (mg/L)	361	475
K (mg/L)	168	169	K (mg/L)	335	325
Mg (mg/L)	160	161	Mg (mg/L)	615	599
Na (mg/L)	1898	2074	Na (mg/L)	5467	5778

Annexe 8

Tableau 9 : Valeur des différents indices issus du traitement d'imagerie drone par la Province Sud (source DDDT, Province sud).

Nom Zone (emprise de 1 X 1 m)	ICS Min	ICS Moy	ICS Max	ICOL Min	ICOL Moy	ICOL Max	IB Min	IB Moy	IB Max	ICUIR Min	ICUIR Moy	ICUIR Max	ICE Min	ICE Moy	ICE Max
320	-0,02	0,00	0,01	83,73	115,58	147,42	0,16	0,17	0,18	-106,79	-90,46	-74,13	1,48	1,54	1,60
320 bis	-0,02	0,00	0,01	83,73	115,58	147,42	0,16	0,17	0,18	-106,79	-90,46	-74,13	1,48	1,54	1,60
321	0,07	0,08	0,09	140,28	156,01	171,74	0,27	0,28	0,29	-181,61	-170,97	-160,32	1,39	1,42	1,45
322	0,01	0,03	0,04	125,53	154,15	182,77	0,28	0,29	0,30	-136,67	-124,08	-111,49	1,37	1,40	1,42
323	0,01	0,02	0,03	129,06	152,67	176,29	0,27	0,27	0,28	-125,83	-118,47	-111,12	1,31	1,36	1,41
324	0,01	0,03	0,04	158,92	182,44	205,95	0,36	0,39	0,43	-139,22	-126,93	-114,64	1,16	1,38	1,60
325	0,03	0,04	0,05	143,41	162,87	182,34	0,28	0,30	0,31	-114,09	-122,29	-130,50	1,23	1,35	1,46
326	0,03	0,04	0,05	137,73	160,21	182,70	0,25	0,25	0,26	-141,51	-133,78	-126,06	1,36	1,39	1,42
327	0,03	0,04	0,05	120,96	149,03	177,10	0,20	0,21	0,23	-142,77	-134,46	-126,16	1,37	1,41	1,45
328	0,04	0,04	0,05	143,40	163,56	183,71	0,24	0,26	0,28	-147,29	-141,83	-136,372	1,36	1,40	1,45
329	0,08	0,10	0,11	161,73	179,57	197,42	0,27	0,28	0,29	-204,07	-195,21	-186,36	1,32	1,35	1,38
330	0,01	0,02	0,03	126,98	153,21	179,44	0,24	0,25	0,26	-122,35	-117,86	-113,37	1,27	1,33	1,39
331	0,02	0,02	0,03	124,03	149,03	174,04	0,25	0,25	0,26	-126,55	-121,37	-116,19	1,33	1,36	1,39
332	0,01	0,02	0,03	113,80	146,26	178,72	0,25	0,26	0,27	-126,33	-119,92	-113,52	1,32	1,36	1,39

Légende du tableau :

Désignation indice	Abréviation
Indice de couleur de sol	ICS
Indice de coloration	ICOL
Indice de brillance	IB
Indice de cuirasse	ICUIR
Indice de contenu en eau	ICE

Min	Plus petite valeur d'un pixel
Max	Plus grande valeur d'un pixel
Moy	Valeur moyenne (max - min / 2)