
Identification des échelles spatiales et des facteurs de variations des sols et de leurs propriétés au sein de la Valle Alto de Cochabamba (Bolivie)

Auteur : Weber, Alexis

Promoteur(s) : 879

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5035>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**IDENTIFICATION DES ECHELLES SPATIALES ET DES
FACTEURS DE VARIATIONS DES SOLS ET DE LEURS
PROPRIETES AU SEIN DE LA VALLE ALTO DE
COCHABAMBA (BOLIVIE)**

ALEXIS WEBER

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADEMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR: GILLES COLINET

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

**IDENTIFICATION DES ECHELLES SPATIALES ET DES
FACTEURS DE VARIATIONS DES SOLS ET DE LEURS
PROPRIETES AU SEIN DE LA VALLE ALTO DE
COCHABAMBA (BOLIVIE)**

ALEXIS WEBER

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADEMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR: GILLES COLINET

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier sincèrement M. Gilles Colinet pour le temps important qu'il m'aura consacré dans le cadre de ce travail, de la compréhension qu'il aura eu à mon égard ainsi que des encouragements qu'il m'aura adressés.

Merci également à M. Demis Andrade pour son accueil et sa grande aide lors de mon séjour en Bolivie, ainsi que pour l'ensemble du travail que nous avons pu réaliser conjointement. Merci également à l'ensemble des membres du CISTEL pour leur accueil chaleureux. Merci à Edwards (Cuerpito !) et Léonardo pour leur aide très précieuse lors de toute la campagne d'échantillonnage.

Je remercie également l'ensemble du personnel du GP pour son accueil lors des 7 semaines de laboratoire que j'ai réalisées. En particulier je souhaiterais remercier M. Raphael Tarantino pour son encadrement durant mes laboratoires et Mme Françoise Toussaint pour ses réponses à mes nombreuses « petites questions ». Un très grand merci à toutes les personnes qui m'auront aussi permises de rester travailler plus longtemps au laboratoire. Je pense en particulier à M. Félix de Tombeur et M. Giovanni Mastrolonardo qui se seront portés garant de ma personne à de nombreuses reprises, me laissant travailler certaine fois jusqu'à près de 20h (même le vendredi soir !).

Enfin, je voudrais également profiter de cette page pour remercier mes proches pour l'aide et le soutien qu'ils auront pu m'apporter non seulement lors de la réalisation de ce travail, mais aussi et surtout lors de mes études. Merci à mes parents, Juliette, Bastien, David, Johan et Victor. Merci également à toutes les personnes que je n'aurais pas eu l'occasion de citer, mais qui se reconnaîtront très certainement.

Financement (bourse de voyage) : Le voyage réalisé dans le cadre du présent travail a été rendu possible grâce au soutien financier de l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur (ARES) de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique, dans le cadre de sa politique de Coopération au développement.

Résumé

La salinisation des sols est l'une des trois plus grandes menaces pour les sols identifiées par la FAO et l'ITPS (2015) pour l'Amérique latine. Utilisée généralement au sens large, elle sous-entend également la sodisation et l'alcalinisation des sols (Legros, 2007). Ce travail a pour objectif principal d'identifier des échelles spatiales et des facteurs de variations des sols et de leurs propriétés à l'échelle de la *Valle Alto*, à Cochabamba (Bolivie). Afin d'atteindre cet objectif, 8 profils de sols ont été décrits. Leur classification met en évidence des sols peu développés et très affectés par une salinité tel qu'un Sodic Solonchaks (Hypersalic). Les facteurs de variations mis en évidence rejoignent ceux identifiés par Metternicht (1996) et Metternicht et al. (1997), à savoir le climat semi-aride, le matériau parental calcaire et la géomorphologie. Les échelles spatiales ont été déterminées sur base de 123 échantillons composites des 20 premiers centimètres de la surface du sol. La cartographie du pourcentage de sodium échangeable (ESP), l'électro-conductivité (EC) et du pH KCl a montré que des variations très brusques et localisées étaient observées systématiquement sur les efflorescences salines. Enfin, la caractérisation de la salinisation (au sens large) a été réalisée via des méthodes plus simples et moins chronophages que celles couramment réalisées (via l'obtention d'un extrait de pâte saturée de sol). Les méthodes utilisées incluent l'EC 1 : 5, le pH KCl (1 : 5) et l'ESP. Les équations de Sonmez et al. (2008) ont permis d'estimer l'ECe sur base de l'EC 1 : 5. Il a été conclu que ces méthodes étaient pertinentes pour une évaluation de la salinité.

Mots-clés : Salinité, alcalinité, sodisation, krigage, ESP, EC 1 : 5, Cochabamba.

Abstract

Soil salinization has been identified by the FAO and the ITPS (2015) as one of the three most important threats to soils in Latin America. The term salinization, used in a broad sense, also includes sodicity and alkalinity (Legros, 2007). The main goal of the present study is to identify spatial scales and factors of soils and soil properties' variations in the *Valle Alto*, Cochabamba (Bolivia). To achieve this goal, 8 soil profiles were described. Their identification reveals low developed and salinity-affected soils, such as Sodic Solonchaks (Hypersalic). The factors of variations identified in this study are similar to those identified by Metternicht (1996) and Metternicht et al. (1997), they include: semi-arid climate, calcareous parent material and geomorphology. The spatial scales were determined based on 123 composite samples collected in the first 20cm of soil surface. The mapping of exchangeable sodium percentage (ESP), electroconductivity (EC) and pH KCl showed that abrupt and localized variations were observed mostly on saline efflorescence. Finally, the assessment of salinity (in a broad sense) was done by methods that are simpler and less time consuming than the ones used in the literature. The methods used include the use of EC 1 : 5, pH KCl (1 : 5) and ESP. The equations of Sonmez et al. (2008) were used to estimate the ECe from the EC 1 : 5. It was concluded that these methods are relevant to assess salinity.

Keywords : Salinity, alkalinity, sodicity, kriging, ESP, EC 1 : 5, Cochabamba.

Table des matières

I.	Bibliographie et objectifs de l'étude	1
I.1.	La dégradation des terres	1
I.2.	Les sols salins, alcalins et sodique	2
2.1.	Généralités.....	2
2.2.	Causes et origine de la salinisation	3
2.3.	Conséquences de la salinisation, la sodisation et l'alcalinisation.	7
2.4.	Caractérisation analytique des sols salins, alcalins et sodiques	10
2.5.	Classification des sols salins, alcalins et sodiques	13
I.3.	La spatialisation des données.....	14
3.1.	Principes de géostatistiques.....	14
3.2.	Méthodes cartographiques d'évaluation de la dégradation des terres.....	16
I.4.	Objectifs de l'étude	17
I.5.	Présentation du site d'étude	18
5.1.	Localisation	18
5.2.	Climat	19
5.3.	Géologie et géomorphologie	20
5.4.	Pédologie	21
5.5.	Activités humaines et végétation.....	22
5.6.	Origine de la salinisation.....	23
II.	Matériels et méthodes.....	24
II.1.	Travail de terrain	24
1.1.	Délimitation de la zone d'étude	24
1.2.	Choix des observations à réaliser	24
1.3.	Détermination du nombre d'échantillons et de profils.....	25
1.4.	Localisation des profils et plan d'échantillonnage	26
1.5.	Collecte des échantillons.....	29
II.2.	Analyses de laboratoire	30
2.1.	Choix des analyses de laboratoire	30
2.2.	Préparation des échantillons.....	30
2.3.	Détermination de la CEC	31
2.4.	Détermination des bases échangeables	31
2.5.	Calcul du taux de saturation en base et de la saturation du complexe d'échange par un élément	31

2.6. Détermination du pH.....	31
2.7. Détermination de l'électroconductivité, EC.....	31
2.8. Estimation de l'électroconductivité de l'extraît de « pâte du sol », ECe	32
2.9. Détermination de la matière organique	32
2.10. Détermination des éléments biodisponibles.....	32
2.11. Granulométrie.....	32
II.3. Traitement des données	32
3.1. Traitement primaire	32
3.2. Proposition et détermination de variables indicatrices.....	32
3.3. Cartographie	33
III. Résultats	36
III.1. Description des profils de sols	36
1.1. Punata.....	39
1.2. Cuchumuela	40
1.3. Tarata	42
1.4. Arani	44
1.5. San Benito	45
1.6. Cliza	47
1.7. Santa Ana	48
1.8. Aramasi	50
1.9. Concordance avec la classification couramment utilisée.....	52
1.10 . Proposition et détermination de nouveaux indicateurs	56
III.2. Approche cartographique	58
2.1. Variables discriminantes	58
2.2. Cartes des sols	66
IV. Discussion	68
IV.1. Pertinence du choix des variables mesurées	68
IV.2. Classification des profils de sols	69
2.1. Classification WRB et facteurs de pédogenèse	69
2.2. Classification simplifiée	71
2.3. Identification d'indicateurs et arbre décisionnel	72
IV.3. Approche cartographique	73
3.1. Variables discriminantes	73
3.2. Cartes des sols	75
V. Conclusions et perspectives	77

V.1. Conclusions	77
V.2. Perspectives	77
VI. Bibliographie	79
VII. Annexes	84
Annexe A : Carte de la géomorphologie de la <i>Valle Alto</i>	84
Annexe B : Localisation des échantillons composites prélevés	86
Annexe C : Observations réalisées sur les profils	87
Annexe D : Qualité et résultats des analyses de laboratoire	88
Annexe E : TOC et CEC de l'horizon de surface de chaque profil	95
Annexe F : Valeurs seuils usuelles d'ECe converties en EC	96
Annexe G : Précisions cartographiques concernant l'ESP, l'EC, le pH (KCl), le TOC et la CEC, ainsi que les deux classifications	97

Liste des figures

Figure 2. Exemple d'une situation où le changement de couvert végétal est une cause de la salinisation. Source : National Land and Water Resources Audit (2001).....	6
Figure 3. Sur base des valeurs prises par une variable en différents points d'une surface (a), la construction du variogramme d'une variable peuvent être résumée en trois étapes : 1) le calcul des semi-variances et leur représentation en fonction de la distance de chaque paire d'observation (b) ; 2) Le calcul de la moyenne des semi-variances pour un intervalle de distance donné appelé lag (c) ; 3) l'estimation de la fonction γh sur base de l'agrégation des semi-variances (d). Source : Hengl (2007).....	16
Figure 4. Localisation de la Valle Alto, du département de Cochabamba, Bolivie. Tarata, Cliza et Punata sont trois villes de la Valle Alto. Syst. Coo. : WGS84 - UTM 20S (Valle Alto) et WGS84 (Bolivie et Amérique latine).....	18
Figure 5. Carte représentant l'altitude de la Valle Alto. L'altitude est principalement comprise entre 2600 et 2850 mètres au-dessus du niveau de la mer. Syst. Coo. : WGS84 - UTM 20S.	18
Figure 6. Diagramme ombrothermique de 4 stations météo de localités différentes qui sont, d'ouest en est : l'aéroport de Cochabamba (CBB Aeropuerto), Tarata, San Benito et Arani. Le graphique représente les moyennes mensuelles calculées sur une période de 30 ans, de 1986 à 2016.....	19
Figure 8. Végétation et paysages rencontrés au sein de la Valle Alto. Au-dessus, photographie d'un des paysages rencontrés dans la partie plane de la vallée. En-dessous, photographie de la végétation rencontrée sur le versant des montagnes.	22
Figure 10. Image supérieure : Image satellitaire couvrant la Haute Vallée. Composition « couleurs vraies » (sans « étirement gama ») sur base d'images satellites Landsat 8 du 2 juillet 2016. Image inférieure : Zone d'étude (bleu clair) composée des terrains de pente inférieure ou égale à 10°	24
Figure 11. Représentation schématique d'un échantillon composite.....	25
Figure 12. Localisation des profils de sols caractérisés dans la Valle Alto.	27
Figure 13. Représentation schématique de l'échantillonnage au sein de chacune des cellules de la zone d'étude. La distance séparant l'échantillon S de l'échantillon 1 est de 1555 mètres ; celle séparant l'échantillon 1 de l'échantillon 2 est de 775 mètres ; et enfin, celle séparant l'échantillon 2 de l'échantillon 3 est de 195 mètres.....	28
Figure 14. Carte représentant les différents points d'échantillonnages ayant été générés.....	29
Figure 15. À gauche, photographie du profil de Punata et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite en relief (Google Earth Pro 2017) localisant le profil. Les traces laissées par l'érosion due aux cours d'eau intermittents sont identifiables (courbes gris clair provenant du bas des versants des montagnes).	39
Figure 16. À gauche, photographie du profil de Cuchumuela et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite en relief (Google Earth Pro 2017) localisant le profil.....	41
Figure 17. À gauche, photographie du profil de Tarata et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil.	43
Figure 18. À gauche, photographie du profil d'Arani et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et	

image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil. On constate que le profil se situe à moins de 500 de mètres d'une efflorescence saline marquée (tache blanche sur l'image satellite)	44
Figure 19. À gauche, photographie du profil de San Benito et caractéristiques principales des horizons le constituant. Les pointillés représentent le dernier horizon identifié non visible sur la photographie. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut), et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil.....	46
Figure 20. À gauche, photographie du profil de Cliza et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil.....	47
Figure 21. À gauche, photographie du profil de Santa Ana et caractéristiques principales des horizons le constituant. Les pointillés signifient une discontinuité dans la photographie. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut), de l'efflorescence saline à la surface du sol (milieu) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil	49
Figure 22. À gauche, photographie du profil d'Aramasi et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil. Comme le montre l'image satellite, le profil est situé sur une zone marquée par la salinisation.	51
Figure 23. Variation des valeurs d'EC au sein de chaque horizon de chacun des profils identifiés. L'ordre des profils suivant l'axe des abscisses se fait suivant un gradient de développement pédogénétique, Punata étant le moins développé et Aramasi le plus développé.	53
Figure 24. Variation des valeurs d'ESP au sein de chaque horizon de chacun des profils identifiés. L'ordre des profils suivant l'axe des abscisses se fait suivant un gradient de développement pédogénétique, Punata étant le moins développé et Aramasi le plus développé.	54
Figure 25. Variation des valeurs du pH KCl au sein de chaque horizon de chacun des profils identifiés. L'ordre des profils suivant l'axe des abscisses se fait suivant un gradient de développement pédogénétique, Punata étant le moins développé et Aramasi le plus développé.	54
Figure 26. Représentation des valeurs d'ESP et d'ECe du premier horizon de chacun des profils de sol. Les droites $x = 15$ (%) et $y = 4$ (dS/m) représentent les valeurs seuils utilisées dans la classification simplifiée. Un sol situé au-delà de ces droites sera considéré respectivement comme sodique et salin.	56
Figure 27. Arbre décisionnel proposé pour le classement des échantillons composites de surface. SCamP A est le SCamP d'Arani et SCamP SB celui de San Benito.....	57
Figure 28. Encart supérieur : Nuage des semi-variances concernant l'ESP. Trois nuages de points explorant des gammes de valeurs différentes d'ESP sont identifiés. Encart inférieur gauche : Le nuage de points supérieur est constitué de l'ensemble des semi-variances en lien avec les efflorescences au nord de la vallée. Cela peut être observé sur l'image satellite où les couples d'observations constituants ce nuage sont représentés par une ligne reliant les observations en question. Encart inférieur droit : Le nuage de points est constitué de l'ensemble des semi-variances en lien avec les efflorescences à l'ouest et au sud-est du centre de la vallée. Cela peut être observé sur l'image satellite où les couples d'observations constituants ce nuage sont représentés par une ligne reliant les observations en question.	59
Figure 29. Carte de prédiction des valeurs d'ESP de la Haute Vallée obtenue par la méthode des distances inverses.....	60

Figure 30. Carte de prédiction des valeurs d'ESP de la Haute Vallée obtenue par la méthode des distances inverses.....	61
Figure 31. Semi-variogramme concernant le pH (KCl) optimisé par cross-validation suivant un modèle sphérique. La portée est égale à 27 064 mètres, l'effet de pépite à 0,0217 et le palier partiel à 0,010.....	62
Figure 32. Carte de prédiction du pH (KCl) de la Haute Vallée obtenue par krigeage ordinaire.	62
Figure 33. Semi-variogramme concernant le % TOC optimisé par cross-validation suivant un modèle sphérique. La portée est égale à 829 mètres et le palier partiel à 0,078. Aucun effet de pépite n'a été observé.....	63
Figure 34. Carte de prédiction du TOC [%] de la Haute Vallée obtenue par krigeage avec dérive externe d'ordre 1.	64
Figure 35. Semi-variogramme concernant la CEC optimisé par cross-validation suivant un modèle sphérique. La portée est égale à 1798 mètres, l'effet de pépite à 0,015 et le palier partiel à 0,078.....	65
Figure 36. Carte de prédiction de la CEC [cmolc/kg] de la Haute Vallée obtenue par krigeage avec dérive externe d'ordre 1.	65
Figure 37. Classification simplifiée combinant les prédictions de l'ESP et de l'EC. Les sols identifiés sont, par ordre décroissant d'importance de surface couverte, les sols sodiques, salins-sodiques, agricoles typiques et salins. Les sols salins ne sont en réalité prédits qu'en un seul pixel au nord de la vallée.	66
Figure 38. Classification proposée sur base de l'arbre décisionnel. Sur les 7 types de sols initialement envisagés suivant l'arbre décisionnel, seulement 4 types de sols différents en lien avec 5 profils sont prédits. Aucun Solonchaks ne figurent parmi les sols prédits.	67
Figure 39. Carte des différentes unités géomorphologiques identifiées par Metternicht et al. (1997). La légende est donnée à la figure suivante. Source : Metternicht et al. (1997).....	84
Figure 40. Légende de la carte représentant les différentes unités géomorphologiques identifiées par Metternicht et al. (1997) de la figure 22. Source : Metternicht et al. (1997) ..	85
Figure 41. Valeurs de TOC en pourcents de chaque horizon de surface des profils de sols. La valeur de 0,7% correspond au seuil en TOC proposé au sein de l'arbre décisionnel de la figure 27.	95
Figure 42. Valeurs de la CEC en cmolc/kg de chaque horizon de surface des profils de sols. La valeur de 10,8 cmolc/kg correspond au seuil de CEC considéré dans l'arbre décisionnel de la figure 27.	95
Figure 43. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable ESP après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0$, dénommée ici BCM1.....	97
Figure 44. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable EC après une transformation Box-Cox avec $\lambda = -0,16$, dénommée ici BCM1.....	99
Figure 45. Détermination du λ optimal à devoir appliquer pour la transformation de variable Box-Cox	99
Figure 46. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable pH (KCl) après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0$, dénommée ici BCM0.....	101
Figure 47. Détermination du λ optimal à devoir appliquer pour la transformation de variable Box-Cox.	101
Figure 48. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable TOC après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0,5$, dénommée ici BCM1.....	103

Figure 49. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable CEC après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0$, dénommée ici BCM0..... 105

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison des effets observés sur la croissance d'une plante tolérante à la salinité et d'une plante non tolérante à la salinité à différentes échelles de temps. Cette comparaison permet de distinguer les effets dus à un stress hydrique et ceux spécifiques à un stress salin. Source : Munns (2002).	7
Tableau 2. Valeurs seuils de l'EC, l'ESP, du SAR, ainsi que du pH considéré comme un indicateur permettant de distinguer les sols en quatre classes. Richards et al. (1954) et Weil et al. (2017) précisent que le pH est généralement inférieur à 8,5 dans le cas de sol salin et sodique, mais ce dernier peut varier considérablement (Richards et al., 1954). Source : O'Geen (2015).....	14
Tableau 3. Résumé des observations principales concernant la caractérisation des profils. Pour chacun des profils, l'altitude, la géomorphologie, la classification et l'horizon diagnostique ainsi que la profondeur à laquelle ce dernier a été observé (profondeur à laquelle l'horizon démarre) sont repris dans ce tableau.	36
Tableau 4. Données analytiques concernant les profils de San Benito, Santa Ana, Punata et Arani.....	37
Tableau 5. Données analytiques concernant les profils de Cuchumuela, Aramasi, Cliza et Tarata.....	38
Tableau 6. Correspondance des classes de sols de la classification simplifiée aux sols identifiés suivant la WRB, en référence aux valeurs seuils de chacun des termes taxonomiques utilisés. Cette correspondance représente le résultat souhaité de la classification des profils de sol sur base des variables considérées caractérisant les horizons de surface de ces mêmes profils. Au sein de la colonne WRB, l'abréviation utilisé dans ce travail pour chaque type de sol est également mentionnée.....	55
Tableau 7. Signification et justification des valeurs seuils utilisées au sein de l'arbre décisionnel proposé à la figure 27.....	57
Tableau 8. Inventaire des différentes observations réalisées sur le terrain.	87
Tableau 10. Conversion des valeurs usuelles d'ECe en EC. La moyenne des valeurs est pondérée en fonction de l'occurrence des textures rencontrées pour les horizons de surfaces des profils de sols.	96
Tableau 11. Liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus dans le modèle de prédiction spatiale.	97
Tableau 12. Liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus dans le modèle de prédiction spatiale.	103
Tableau 13. Liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus dans le modèle de prédiction spatiale.	105

Liste des acronymes

CEC	Capacité d'Échange Cationique
COT (ou TOC)	Carbone Organique Total
EC	Électroconductivité
ECe	EC mesurée au sein de l'extrait de pâte saturée
ESP	Exchangeable Sodium Percentage
FAO	Food and Agriculture Organization (of the United Nations)
H_0	Hypothèse nulle
ITPS	Intergovernmental Technical Panel on Soils
RMSE	Root mean square error
SAR	Sodium Adsorption Ratio
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USDA	United States Department of Agriculture
V	Taux de saturation en bases
WRB	World Reference Base (for soil resources)

I. Bibliographie et objectifs de l'étude

I.1. La dégradation des terres

La dégradation des terres est aujourd’hui un problème majeur ayant des répercussions à l’échelle régionale et mondiale (Metternicht & Zinck, 2016). Pour illustrer ce propos, Metternicht et Zinck (2016) mentionnent notamment l’occurrence de tempêtes de poussières, l’émission de gaz à effet de serre ou encore des perturbations au niveau des cycles hydrologiques. Bien que la dégradation des terres soit unanimement reconnue comme un problème majeur auquel des actions conjointes doivent être prises entre les différents niveaux de pouvoirs et d’acteurs de cette thématique (Montanarella et al., 2016), une estimation quantitative de l’état de la dégradation des terres reste délicate. Il est en effet difficile de trouver des estimations actuelles sur cette problématique, comme le déplorent Montanarella et al. (2016). L’amélioration des connaissances et de la « surveillance » de l’état des sols figure d’ailleurs comme l’une des quatre plus grandes priorités à devoir suivre pour Montanarella et al. (2016) à la suite des observations du « World’s Soil Ressources Report » de 2015 réalisé par l’« Intergovernmental Technical Panel on Soils ».

Néanmoins, la FAO (2017) déclare qu’approximativement 33% des sols de la planète sont dégradés. Metternicht et al. (2016) donnent quant à eux une gamme de valeurs à l’échelle mondiale où le pourcentage des terres touchées oscillerait entre 15 et 63 %. Cette difficulté d’évaluer quantitativement l’ampleur de cette problématique peut être comprise pour les deux raisons suivantes. Tout d’abord, comme s’étonnent Metternicht et al. (2016), il n’existe pas encore de consensus sur les méthodes d’évaluation et de suivi de la dégradation des terres et ce, quel que soit l’échelle spatiale considérée. Ensuite, comme le mentionnent Cherlet et al. (2015), la complexité de cette problématique est telle qu’il ne serait pas propice de représenter l’étendue de ce processus sur une seule et unique carte. Par conséquent, il en est de même pour une évaluation globale quantitative.

La dégradation des terres est définie par D’Odorico et al. (2015) comme étant: « *a process resulting in a reduced ability of the land to provide ecosystem services* ». Ce terme regroupe dès lors une multitude de processus, de manière plus ou moins large, suivant le panel de services écosystémiques considérés. Il est aussi important de souligner que, dans la littérature, la désertification est parfois utilisée comme synonyme de dégradation des terres et inversément. En effet, si l’on se base sur la définition de la désertification des « United Nations Convention to Combat Desertification » (2012) qui est : « *Land degradation in arid, semi-arid and dry sub-humid areas resulting from various factors, including climatic variations and human activities* », on constate que la désertification est à comprendre comme une dégradation des terres au sein d’une aire géographique déterminée en fonction de son climat.

Il existe plusieurs définitions de la dégradation des terres (D’Odorico & Ravi, 2015; Mbagwu, 2003; Obalum et al., 2017), mais dans un cas comme dans l’autre, les processus de ces dégradations ou leurs indicateurs semblent unanimement reconnus. Lal (2015) décrit quatre grands types de dégradation du sol en fonction des mécanismes que ces derniers impliquent. Ces types de dégradation sont les suivants : physique, chimique, biologique et écologique.

Comme l’explique Lal (2015), la dégradation physique se traduit par une dégradation de la structure du sol, entre autre de la géométrie des pores et de leur connectivité. Les sols affectés sont donc plus sensibles à une compaction, une réduction de leur capacité d’infiltration ou

encore à l'érosion (Lal, 2015). En ce qui concerne la dégradation chimique, Lal (2015) ne la définit pas en tant que telle mais énonce plutôt les différents processus et éléments qui la caractérisent. De cette manière Lal (2015) cite notamment la salinisation, la réduction de la CEC, des carences en calcium ou en magnésium, le lessivage des nitrates, la contamination par des déchets industriels, etc. Il en est de même pour la dégradation biologique, pour laquelle Lal (2015) mentionne entre autre la perte de biodiversité du sol, l'épuisement du pool de carbone organique du sol, l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre du sol vers l'atmosphère, etc. Enfin, Lal (2015) décrit la dégradation écologique comme étant en réalité une combinaison des trois autres types de dégradations. Lal (2015) explique que cette combinaison de dégradation se traduit dès lors par des perturbations au niveau des fonctions de l'écosystème tel que du cycle hydrologique, du cycle des éléments ou encore de l'infiltration et la purification de l'eau.

La présentation de ces dégradations en différentes catégories est bien évidemment conceptuelle ; Lal (2015) le reconnaît d'ailleurs lui-même. Certains éléments ou caractéristiques d'une dégradation citée précédemment pouvant avoir comme conséquences d'entrainer d'autres types de dégradations. Lal (2015) parle d'ailleurs d'une « spirale infernale » qui, une fois enclanchée, entraîne une cascade de processus de dégradation du sol, à l'instar d'une réaction en chaîne.

Concernant les causes de ces dégradations, Mirzabaeve et al. (2016) ont réalisé une revue de la littérature à ce sujet et ont listé 15 causes principales de la dégradation des sols. Ces causes peuvent être directes ou indirectes et être naturelles, anthropiques, sociales ou encore économiques (Mirzabaeve et al., 2016). Ces causes sont donc complexes et varient en fonction de la région étudiée. De manière plus synthétique, la FAO (2015) pointe 6 grandes causes de dégradation des sols que sont : la déforestation, la croissance démographique, la pollution et le traitement des déchets, le changement climatique, et l'utilisation de pratiques de gestion des sols non durables.

Pour toutes les raisons expliquées précédemment et au vu des nombreux services écosystémiques assurés par le sol tel que son rôle de fertilité assurant la croissance des plantes, de conservation de la biodiversité ou encore de régulateur du climat de par son rôle dans la séquestration du carbone (Dominati, Patterson, & Mackay, 2010), il paraît évident que l'évaluation et le suivi de l'état des sols sont des éléments clefs dans leur gestion.

Dans le cadre de ce travail, une dégradation spécifique a été étudiée. Il s'agit de la salinisation des sols observée dans une haute vallée des Andes boliviennes de la région de Cochabamba, où l'utilisation des terres est principalement agricole. La salinisation est en effet l'une des trois plus grandes menaces identifiées par la FAO et l'ITPS (2015) pour l'Amérique latine et les Caraïbes.

I.2. Les sols salins, alcalins et sodique

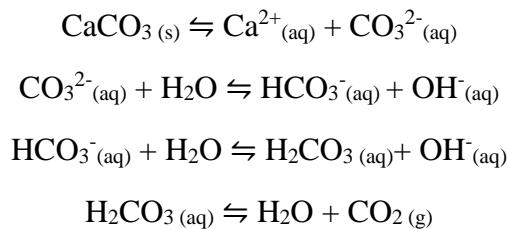
2.1. Généralités

Le terme de « salinisation » dans la littérature est parfois utilisé au sens large, couvrant dès lors des processus pourtant distincts. Suivant les cas, il faut parfois y sous-entendre le terme d'alcalinisation, de sodisation ou encore chacun de ces deux termes. Il est toutefois important de relier à chacun des termes le mécanisme ou processus qui lui est propre. Dans le cas de sols salins, trois processus clefs interviennent et sont définis par Legros (2007) comme étant :

- La salinisation, qui : « correspond à l'apparition de sels dans la solution du sol » ;
- L'alcalinisation, qui « est l'augmentation du pH liée à la présence de carbonates ou bicarbonates en excès, en particulier Na_2CO_3 et NaHCO_3 . Ce sont des sels de base forte et d'acide faible dont la dissociation dans l'eau se traduit donc par une réaction alcaline. Les calculs théoriques montrent que le pH peut monter jusqu'à 12 » ;
- La sodisation, qui « est l'enrichissement du complexe absorbant en sodium échangeable ».

L'origine de cette confusion ou de l'abus de langage dans l'utilisation du terme de salinisation provient sans doute des relations étroites qui existent entre ces différents processus en fonction des sels impliqués. En effet, comme l'explique Legros (2007), le complexe d'échange et la solution du sol étant en équilibre, la salinisation et la sodisation peuvent s'observer simultanément, de même que l'alcalinisation. Les principaux sels neutres, c'est-à-dire dont la dissolution ne conduit pas à une modification du pH, présents dans la solution du sol sont les chlorures et sulfates de sodium, potassium, magnésium et calcium (Weil & Brady, 2017).

L'augmentation du pH, soit l'alcalinisation, provient quant-à-elle des carbonates (CO_3^{2-}) ou bicarbonates (HCO_3^-) libérés lors de l'altération de minéraux carbonatés ou de la réaction de dissociation de l'acide carbonique (H_2CO_3) (Weil & Brady, 2017). En effet, en prenant comme exemple la dissolution de la calcite (CaCO_3), les réactions d'équilibre suivantes se produisent et sont décrites par Weil et al. (2017) comme étant :



De ces équations, il découle que la dissolution de la calcite amène à la libération de deux groupements hydroxyles, provoquant alors une augmentation du pH.

2.2. Causes et origine de la salinisation

En fonction des facteurs responsables de la salinisation (au sens large), cette dernière est distinguée en deux types différents : la salinisation primaire et la salinisation secondaire (Daliakopoulos et al., 2016; Zinck & Metternicht, 2008). La salinisation primaire est une accumulation de sels par le biais de mécanismes naturels (Daliakopoulos et al., 2016). Il s'agit donc d'un processus naturel pouvant être défini comme le transfert de sels solubles d'un endroit à un autre, ce dernier étant initialement dépourvu de sels (Zinck & Metternicht, 2008) ou voyant sa concentration en sels augmentée. La salinisation secondaire est quant à elle le résultat d'interventions de l'homme (Daliakopoulos et al., 2016) et est, de par ce fait, également appelée salinisation anthropique (Legros, 2007; Zinck & Metternicht, 2008).

De manière plus conceptuelle, Zinck et al. (2008) définissent l'origine de tous sels sur terre comme provenant de l'altération des minéraux primaires contenus au sein des roches ignées et métamorphiques. Ramenées à la surface de la terre et soumises aux processus d'altération et d'érosion, les minéraux primaires contenus dans ces roches libéreront in fine cations et anions

qui, après recombinaisons, pourront former différents sels (Zinck & Metternicht, 2008). Partant de cette origine naturelle, les principales causes de la salinisation primaire peuvent être mises en évidence.

La salinisation primaire

Dans le cas où les sels formés restent en place, comme cela peut notamment être le cas sous des climats ne permettant pas une lixiviation suffisante pour déplacer les sels formés, l'origine naturelle des sels est donc elle-même une des causes de la salinisation primaire (Zinck & Metternicht, 2008). Cette cause est toutefois à nuancer, car comme Zinck et al. (2008) l'expliquent, l'altération est alors ralentie à cause de faibles précipitations. De manière plus générale, les sels seront amenés à se disséminer dans l'espace suite aux mouvements de l'eau dans le sol et aux processus d'érosion (Zinck & Metternicht, 2008). Les sels transportés seront alors redistribués dans le paysage en fonction de leur solubilité (les moins solubles précipitant en premiers)¹ et s'accumuleront naturellement dans les creux et bas de pente ainsi que dans les dépressions (Legros, 2007; Zinck & Metternicht, 2008), ces derniers constituent avec les lacs, lagons et océans des réservoirs du cycle des sels sur la terre (Zinck & Metternicht, 2008).

Au sein de ces dépressions où convergent les flux d'eau transportant les sels, le bilan hydrique peut-être en faveur de l'évaporation amenant alors les sels à précipiter. Ces bassins enclos peuvent alors former des sebkra, chott ou encore playa (Zinck & Metternicht, 2008). Au sens strict, une sebkra (ou sebkha) désigne une : « dépression temporairement occupée par un lac, en général salé, et où se déposent des évaporites. » (Foucault et al., 2000). Le chott est en lien direct avec la sebkra puisqu'il désigne, comme l'expliquent Foucault et al. (2000) la : « terre salée ou parfois pâturage qui entoure une dépression fermée à lac temporaire (sebkra). ». Le mot playa est, toujours d'après Foucault et al. (2000) une : « zone d'épandage d'alluvions à surface plane, située à l'aval d'un glacis ou d'un pédiment avec lequel elle se raccorde. ». Foucault et al. (2000) précisent que le centre de la playa est, dans le cas où cette dernière recouvre une dépression endoréique (soit sans écoulement vers une mer ouverte), la plupart du temps occupé par une sebkra entourée par un chott. Malgré ces distinctions, les termes de sebkra et chott sont parfois utilisé comme synonyme de « lac salés » (Abdallah et al., 2016). À titre d'exemple, le Chott El Jerid d'une superficie de 5000 km² peut être cité (Abdallah et al., 2016). Un autre exemple d'une dépression récoltant les eaux continentales dont les sels y précipitent immédiatement est la mer Morte (Legros, 2007), qui voit actuellement son niveau d'eau descendre à une vitesse d'approximativement 1 mètre par an (Katz & Starinsky, 2009).

Une autre cause de la salinisation primaire est ce que Legros (2007) nomme comme étant les gisements fossiles (dans ce cas compris comme évaporites) ou salinité d'origine géologique. Ces évaporites se forment à la suite de la précipitation et du dépôt des sels en solution, atteignant des concentrations très importantes suite à une évaporation (Foucault & Raoult, 2000). Foucault et al. (2000) expliquent que la formation d'évaporites est observée : « généralement dans des lagunes peu ou pas reliées à la mer, ou encore dans les lacs salés. ». Les principaux minéraux formés sont le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'anhydrite (CaSO_4), l'halite (NaCl), la carnallite ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) et la sylvine (KCl) (Foucault & Raoult, 2000). Le mécanisme impliqué est

¹ Legros (2007) précise toutefois que bien que les précipitations s'effectuent le plus souvent suivant les solubilités relatives des sels en solution, une approche de la cristallisation des sels d'une solution uniquement sur base de cette dernière peut se révéler insuffisante. Une solution très riche en Ca^{2+} et SO_4^{2-} où une précipitation du gypse (CaSO_4) pourra s'effectuer avant celle de la calcite (CaCO_3) pourtant moins soluble.

dès lors le même que décrit pour la formation des sebkra, chott. Dans le cas présent, il n'est donc plus observé actuellement et correspond à de longue période d'accumulation passée (Legros, 2007). Ces dernières datent souvent des périodes du Permien et Trias, ainsi que des époques de l'Oligocène et du Miocène (Zinck & Metternicht, 2008). Suite aux mouvements tectoniques, elles sont aujourd'hui rencontrées au sein de reliefs vallonnés ou plus accidentés (Zinck & Metternicht, 2008). Leur plasticité et faible densité font que ces masses de sels sont soumises au diapirisme, formant les diapirs et dômes de sels (Foucault & Raoult, 2000). Le mouvement ascendant de ces masses de sels permet dès lors de les retrouver aujourd'hui à plus haute altitude et d'avoir percé les différentes couches leurs étant sus-jacentes (Zinck & Metternicht, 2008). En conséquence, la redistribution des sels au sein du paysage est effectuée via le ruissellement et les écoulements d'eaux souterraines (Zinck & Metternicht, 2008). Dans le cas de climat aride, la résurgence d'écoulements d'eau souterraine chargée en sels provenant de l'altération de roches sédimentaires salifères est une des principales causes de la salinisation primaire (Zinck & Metternicht, 2008). En effet, l'eau du site de la résurgence se sera chargée progressivement en sels lors de son parcours depuis les zones de recharges en eau où l'eau non retenue par le sol et les plantes aura rejoint la nappe phréatique (Zinck & Metternicht, 2008). Les sels précipiteront alors lorsque l'écoulement provenant de la résurgence aura pris fin par l'évaporation de ce dernier (Zinck & Metternicht, 2008).

La salinisation primaire des sols est également effectuée par l'eau de mer et peut se faire suivant trois mécanismes distincts (Legros, 2007). Dans le cas où la côte est basse et lagunaire, cette dernière peut alors facilement être submergée par l'eau de mer lors de marées et tempêtes (Legros, 2007). En effet, comme le déclare Legros (2007) et sur base d'observations satellites, dans le cas d'une dépression atmosphérique importante le niveau de la mer peut monter d'un mètre ou plus. Un autre mécanisme amenant des sels provenant de la mer à l'intérieur des terres est dû aux embruns (Legros, 2007). Ce transport de sels par le vent prend naissance à la crête des vagues ou lorsque que ces dernières se brisent (ATILF - CNRS & Université de Lorraine, 1994). Ce mécanisme est d'autant plus important sur les côtes où des affleurements rocheux sont présents (Zinck & Metternicht, 2008). Comme l'explique Legros (2007), l'amplitude de ce phénomène dépend donc de la position de la mer et du continent, ainsi que de la direction des vents dominants. Les quantités de sels apportées sont par conséquent variables, mais Legros (2007) précise qu'elles sont le plus souvent de l'ordre de 300 kg par hectare et par an et peuvent atteindre jusqu'à 750 kg par hectare et par an comme cela a été observé en Algérie. Il s'agit d'ailleurs de la première cause de salinisation primaire rencontrée en Australie (National Land and Water Resources Audit, 2001). Enfin, le dernier mécanisme de salinisation par l'eau de mer est par pénétration souterraine de celle-ci sous la surface du continent (Legros, 2007). Dans ce cas, Legros (2007) explique qu'une nappe d'eau salée se forme sous la surface du continent et peut être surmontée d'une nappe d'eau douce alimentée par les précipitations. Une remontée de sels de la nappe salée vers la nappe d'eau douce peut alors être observée si une surconsommation de l'eau douce a lieu (par exemple par le biais d'une évapotranspiration excessive) créant alors une nappe d'eau sur-salée sub-affleurante dont la concentration en sels peut être près de trois fois plus importante que celle de l'eau de mer (Legros, 2007). À titre d'exemple, en Camargue (France), la nappe d'eau salée résultante de cette pénétration souterraine est retrouvée à 50 mètres de profondeur à une distance de la mer égale à 15 kilomètres (Legros, 2007). Suivant les régions considérées, ce mécanisme (cumulé à d'autres facteurs ou non) peut revêtir une importance particulière, comme c'est notamment le cas dans le cadre de la salinisation du delta Nil où la pénétration de l'eau de mer au sein des

aquifères est un des facteurs principaux (Ahmed, Abdel Samie, & Badawy, 2013). Enfin, Zinck et al. (2008) mentionnent également l'activité volcanique comme dernière source de salinisation primaire.

La salinisation secondaire

Les causes d'une salinisation secondaire sont par définition anthropiques (Daliakopoulos et al., 2016). Weil et al. (2017) expliquent que dans la plupart des cas, la salinisation d'un sol est dû à des changements dans l'équilibre hydrique du système considéré. Ce qui est logique, puisqu'une modification de cet équilibre affectera alors le mouvement et l'accumulation des sels dans le sol (Zinck & Metternicht, 2008). Par conséquent, les causes de la salinisation secondaire peuvent être nombreuses, mais seules les principales seront envisagées dans cette section.

La principale cause de la salinisation secondaires dans le cas de zones non irriguées, est le changement de la couverture végétale naturelle (voir figure 2) (Weil & Brady, 2017). L'effet de ce changement est encore plus amplifié à proximité de zone de résurgence en climat semi-aride (Weil & Brady, 2017). Dans le cas du changement d'une végétation pérenne à système racinaire profond par une culture, la principale conséquence est une diminution de l'évapotranspiration (Weil & Brady, 2017). Comme l'expliquent Weil et al. (2017), cette diminution de l'évapotranspiration se traduira par une percolation plus importante de l'eau vers la nappe phréatique dont le niveau augmentera alors. De plus, durant son parcours vers la nappe phréatique, l'eau percolant se chargera plus ou moins fortement en sels suivant les régions considérées (Weil & Brady, 2017). Dans le cas où l'écoulement de l'eau est freiné ou empêché, comme cela peut-être le cas en présence d'une couche imperméable, l'écoulement se dirigera encore d'avantage vers les points de plus basse altitude (Weil & Brady, 2017). Si la nappe est suffisamment proche de la surface, Weil et al. (2017) expliquent que l'eau remontant par voie capillaire pourra rejoindre la surface, s'y évaporer, et les sels précipiter. Dans ce cas, un flux continual de sels est alors généré (Weil & Brady, 2017).

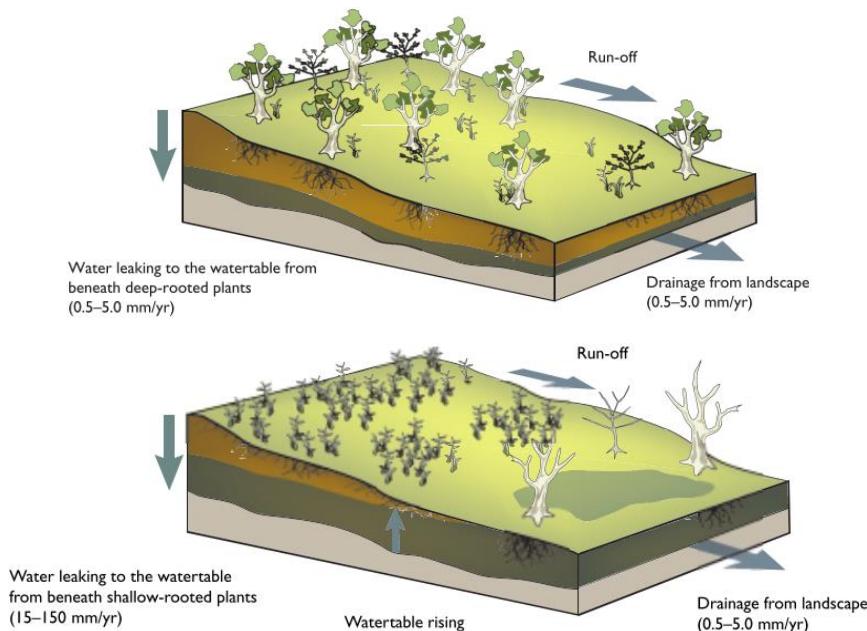


Figure 1. Exemple d'une situation où le changement de couvert végétal est une cause de la salinisation. Source : National Land and Water Resources Audit (2001).

La deuxième cause principale de salinisation secondaire est l'irrigation qui, même en utilisant une eau douce de bonne qualité, en plus d'apporter de l'eau amènera également une quantité de sels importante à long terme (Weil & Brady, 2017). Dans les régions arides, cette salinisation est accentuée par les caractéristiques de l'eau utilisée pour irriguer les cultures mais également du climat (Weil & Brady, 2017). En effet, les sols de ces régions contenant généralement une quantité importante de minéraux facilement altérables, les eaux des rivières et des nappes phréatiques utilisées pour l'irrigation ont alors une salinité généralement élevée (Weil & Brady, 2017). De plus, dans le cas d'un climat aride, la demande évaporatoire est importante, ce qui implique alors de devoir apporter plus d'eau, et donc plus de sels (Weil & Brady, 2017).

2.3. Conséquences de la salinisation, la sodisation et l'alcalinisation.

La salinisation

Comme le mentionne Shrivastava et al. (2015), les plantes soumises à un stress salin, soit à un stress dû à une augmentation de sels dans la solution du sol, présentent un ensemble de réponses variées. Toutefois, Munns (2002) explique que les premières réponses ou conséquences à la suite d'un stress salin sont en réalité identiques à celles induites par un stress hydrique. Les effets spécifiques liés à l'augmentation de sels dans la solution s'expriment quant à eux sur une échelle de temps plus grande, mais ne sont pas pour autant aisément distinguables de ceux engendrés par un stress hydrique (Munns, 2002). Le tableau 1 réalisé par Munns (2002) illustre les effets observés sur la croissance des plantes en réponse à une salinité, et ce, pour différentes échelles de temps.

Tableau 1. Comparaison des effets observés sur la croissance d'une plante tolérante à la salinité et d'une plante non tolérante à la salinité à différentes échelles de temps. Cette comparaison permet de distinguer les effets dus à un stress hydrique et ceux spécifiques à un stress salin. Source : Munns (2002).

Time	Water stress effects	Salt-specific effects
	(Observed effect on growth of a salt-tolerant plant)	(Additional effects on growth of a salt-sensitive plant)
Minutes	Instant reduction in leaf and root elongation rate then rapid partial recovery	
Hours	Steady but reduced rate of leaf and root elongation	
Days	Leaf growth more affected than root growth; Reduced rate of leaf emergence	Injury visible in oldest leaf
Weeks	Reduced final leaf size and/or number of lateral shoots	Death of older leaves
Months	Altered flowering time, reduced seed production	Younger leaves dead, plant may die before seed matures

De manière plus générale, deux mécanismes de base interviennent dans la réponse des plantes à une salinisation : un effet osmotique et un effet d'ions spécifiques (Weil & Brady, 2017). L'effet osmotique tire son origine de la diminution du potentiel de l'eau du sol à la suite de l'augmentation de sels en solution (Weil & Brady, 2017). Il est dès lors plus difficile pour la plante de prélever l'eau du sol (Weil & Brady, 2017). Elle doit alors dépenser plus d'énergie pour diminuer le potentiel de ses cellules, comme cela peut être fait en accumulant des solutés à l'intérieur de celles-ci (Weil & Brady, 2017). L'absence d'un équilibre osmotique adéquat pour la plante amène à une perte de turgescence, une déshydratation des cellules et conduit in fine à la mort de ces cellules (Shrivastava & Kumar, 2015). Du point de vue d'une culture, les conséquences peuvent être un prélèvement d'eau dans le sol par les plantes moins important et une occurrence plus élevée d'un état de flétrissement de la culture (Weil & Brady, 2017).

Concernant l'effet d'ions spécifiques, celui-ci est en réalité distingué en deux sous-effets : d'une part un déséquilibre ou des perturbations dans le prélèvement et l'utilisation d'ions par

la plante, d'autre part la toxicité de certains ions pour la plante (A. K. Parida & Das, 2005; Weil & Brady, 2017). Le déséquilibre ou les perturbations proviennent de la compétition lors du mécanisme de transport à travers la membrane de la cellule végétale entre les ions des sels dissous et d'autres ions nécessaires au bon fonctionnement de la plante (Weil & Brady, 2017). À titre d'exemple, le Na^+ et le K^+ sont en compétition dans ce mécanisme (Weil & Brady, 2017). De fortes concentrations en Na^+ provenant de sels dissous rendent alors le prélèvement de l'élément essentiel K^+ par la plante plus difficile (Weil & Brady, 2017). En plus de cet effet, certains ions sont toxiques pour la plante. Dans le cas du Na^+ , sa toxicité provient du remplacement du K^+ qu'il effectue au sein de réaction biochimiques (Shrivastava & Kumar, 2015). De plus, le Na^+ , ainsi que le Cl^- , induisent également des changements de conformations de protéines (Shrivastava & Kumar, 2015). En effet, le K^+ est notamment un cofacteur pour de nombreuses enzymes (Shrivastava & Kumar, 2015).

En ce qui concerne les conséquences (tableau 1), un stress salin entraîne une diminution générale de la croissance de la plante et peut à terme amener à la mort de celle-ci ou de certains de ses organes (Munns, 2002). Les concentrations létales en sels ainsi que les différents niveaux de tolérance varient bien évidemment en fonction des espèces concernées, mais l'impact sur la croissance est rencontré pour toutes les plantes (A. K. Parida & Das, 2005). Les différentes phases de développement de la plante sont également impactées, de la germination à la reproduction (Shrivastava & Kumar, 2015). Il en est de même pour les principaux mécanismes tels que la photosynthèse, la synthèse des protéines, ou encore le métabolisme énergétique et celui des lipides (A. K. Parida & Das, 2005). Pour être quelque peu plus précis, suite à un stress salin, le contenu total des feuilles en chlorophylle et caroténoïde diminue (A. K. Parida & Das, 2005) ainsi que celui des protéines solubles (A. Parida, Das, & Das, 2002).

Il est également important de constater que l'augmentation de la salinisation d'un sol n'impacte pas uniquement la végétation. Les propriétés physicochimiques du sol et plus globalement l'équilibre écologique de la zone affectée seront touchées également (Shrivastava & Kumar, 2015). En particulier, les microorganismes présents jouant un rôle clef dans de nombreux mécanismes, cycles et propriétés du sol (tels que la décomposition de la matière organique, la nitrification, la minéralisation du phosphore ou encore l'oxydation du soufre) sont également impactés par cette augmentation de sels en solution (Yan, Marschner, Cao, Zuo, & Qin, 2015). Les mécanismes de base par le biais desquels ces microorganismes sont affectés sont cependant identiques à ceux présentés pour les plantes, à savoir un effet osmotique et d'ions spécifiques (Yan et al., 2015).

La sodisation

L'enrichissement en sodium du complexe d'échange a pour conséquence une dégradation physique du sol (Weil & Brady, 2017). Legros (2007) distingue deux effets à la suite de la sodisation d'un sol : d'une part une diminution de la stabilité structurale et d'autre part une diminution de la perméabilité. Cette diminution de la perméabilité n'est en réalité qu'une conséquence de l'altération de la structure du sol (Weil & Brady, 2017). La structure du sol joue un rôle clef dans le fonctionnement du celui-ci, améliorant sa fertilité, la productivité agricole ou encore diminuant sa sensibilité à l'érosion (Bronick & Lal, 2005). Son altération se traduit dès lors par un ensemble de conséquences relativement larges, mais seules les conséquences directes d'une sodisation, autrement dit les conséquences sur les propriétés physiques du sol, seront détaillées dans cette section.

Le sodium possède un pouvoir de dispersion important, à contrario du calcium ou magnésium participant notamment à la liaison de particules d'argiles et de la matière organique du sol (Bronick & Lal, 2005). Par conséquent, le sodium échangeable fragilisera les agrégats et la dégradation de ces derniers libérera des particules d'argile et de limon qui, transportés dans le sol par l'eau, colmateront la porosité (Weil & Brady, 2017). En présence d'argiles gonflantes au complexe d'échange riche en sodium, la macroporosité est également diminuée par un gonflement plus important des argiles qui comprime les pores de plus grandes tailles (Weil & Brady, 2017). De manière plus générale, si des argiles possèdent un taux de sodium échangeable important, un mécanisme de dispersion des argiles sera observé, à condition que la solution du sol ait une concentration en ions faible (Weil & Brady, 2017).

Cette dispersion des argiles s'explique tout d'abord par la taille du rayon ionique hydraté du sodium et sa charge unique qui font de lui un élément peu retenu sur le complexe d'échange (Weil & Brady, 2017). Il en découle que la distance « imposée » entre deux colloïdes saturés en Na^+ est donc relativement grande et les forces de cohésion (de van der Waals) entre ces colloïdes sont alors contrecarrées (Weil & Brady, 2017). À titre de comparaison, Weil et al. (2017) prennent l'exemple du Ca^{2+} ayant un pouvoir de flocculation des argiles et possédant deux charges positives. Le Ca^{2+} est retenu plus fortement sur le complexe d'échange et il faut deux fois moins de Ca^{2+} que de Na^+ pour équilibrer les charges présentées à la surface du colloïde (Weil & Brady, 2017). Par conséquent, la distance qui sépare les deux colloïdes saturés en Ca^{2+} est plus faible et les forces de van der Waals s'exercent entre ceux-ci (Weil & Brady, 2017).

Le deuxième mécanisme nécessaire pour une dispersion des argiles est, comme mentionné précédemment, une faible concentration en ions dans la solution sol (sous-entendu suffisamment loin de la couche ionique développée à proximité immédiate de la surface des argiles, soit la double couche diffuse) (Weil & Brady, 2017). Comme l'explique Legros (2007), plus la concentration en sels de la solution est élevée, plus cette double couche diffuse sera fine, « écrasée ». Cela s'explique par un gradient de concentration en anions plus important entre la surface des argiles et la solution du sol, ce qui amène les anions à diffuser plus fortement vers les argiles (Weil & Brady, 2017). Par conséquent, si la concentration en ions de la solution du sol est faible, le gradient de concentration en anions sera également plus faible, donc leur diffusion vers les argiles également (Weil & Brady, 2017). La double couche diffuse est alors plus épaisse, ce qui se traduit par une distance entre les argiles plus grande (Weil & Brady, 2017).

Ce dernier mécanisme impliqué dans la dispersion des argiles est lourd de conséquence dans le cadre d'une tentative de remédiation. En effet, comme l'explique Legros (2007) : « une tentative de dessalage, avec une eau pure, est-elle susceptible de disperser les argiles, de détruire les agrégats, de fermer la porosité, d'imperméabiliser le sol, de rendre enfin impossible l'élimination complète des sels et l'utilisation agricole. Dans ce cas, il ne reste plus qu'à abandonner à la nature une sorte de pâte à modeler devenue compacte et totalement imperméable à l'eau. [...] La conductivité hydraulique tombe à quelques mm / mois ! [...] Il faut avoir vu cela pour comprendre l'ampleur des dégâts et les difficultés d'une réhabilitation éventuelle. ». Il est important de constater que cet apport d'eau à faible concentration en électrolytes peut être rencontré en condition naturelle par une infiltration d'eau de pluie (Weil & Brady, 2017).

L'alcalinisation

Il est bien connu que la biodisponibilité des éléments nutritifs pour les plantes est optimale pour une gamme de pH comprise entre 6 et 8 (Läuchli & Grattan, 2017). Par conséquent, Läuchli et al. (2017) expliquent qu'en dehors de cette gamme de valeurs, la biodisponibilité de certains nutriments diminue et la plante rencontre des problèmes de toxicité en certains ions ainsi que des déséquilibres nutritifs. Les différents nutriments ne réagissent pas de la même manière suivant les valeurs de pH considérées, mais les éléments les plus impactés par cette sortie de la gamme de pH optimal sont le calcium, le potassium, le phosphore et le fer (Läuchli & Grattan, 2017). À titre d'exemple et en ce qui concerne le phosphore, sa biodisponibilité diminue environ à partir d'un pH 7 à un pH 8 et peut alors entraîner pour les plantes une carence en ce nutriment (Läuchli & Grattan, 2017). De plus, Weil et al. (2017) mentionnent que dans les régions arides, la forte concentration en Ca^{2+} et Mg^{2+} des sols alcalins diminue la dissolution des minéraux phosphorés. Dans ce cas, Weil et al. (2017) expliquent que même l'ajout de phosphore sous forme d'engrais soluble n'a que peu d'intérêt, puisque les phosphates précipiteront alors avec le calcium.

Les valeurs élevées de pH rencontrées peuvent également entraîner une dispersion et une dissolution de la matière organique du sol qui, suite à une remontée capillaire, donnent une couleur noire à la surface du sol (Weil & Brady, 2017).

2.4. Caractérisation analytique des sols salins, alcalins et sodiques

La caractérisation des sols salins, alcalins et sodiques doit immanquablement permettre d'évaluer l'amplitude des trois processus clefs mentionnés précédemment, à savoir la salinisation, l'alcalinisation et la sodisation. Différentes méthodes et variables existent, mais seules les plus couramment utilisées seront mentionnées dans cette section.

La salinisation

Il est bien connu que lorsque la concentration en sels d'une solution augmente, sa conductivité électrique augmente également. Se basant sur ce principe, la salinité d'une solution peut alors être mesurée sur base de sa conductivité électrique, soit l'électroconductivité notée EC dont les unités sont les déciSiemens par mètre (dS m^{-1}) (Weil & Brady, 2017). L'EC variant avec la température, ces mesures doivent dès lors être réalisées à une température définie, fixée pour des conditions standard à 25°C (Legros, 2007). Dans le cas du sol, la teneur en eau doit également être définie puisque la quantité de sels dissous varie avec celle-ci (Legros, 2007). Pour mesurer la conductivité électrique d'un sol, différentes méthodes sur échantillon ou in situ existent.

La méthode la plus couramment utilisée et considérée comme étant celle de référence dans le cas de sols salins est de mesurer l'EC de l'extrait de pâte saturée notée ECe (Amakor, Jacobson, Cardon, & Hawks, 2014; Amezketa, 2006; Legros, 2007; Weil & Brady, 2017). Pour obtenir la pâte de sol, l'échantillon de sol est mélangé à de l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une pâte à l'aspect brillant et dont la consistance permet un léger écoulement en cas de pression sur celle-ci (Weil & Brady, 2017). Le lendemain, lorsque les équilibres de dissolution des sels sont atteints, la solution du sol est extraite de cette pâte de sol par succion, est ensuite filtrée et l'ECe de l'extrait est alors mesurée (Weil & Brady, 2017). Cette méthode est recommandée depuis les années 50 par le *United Salinity Laboratory Staff* (Richards et al., 1954) à la suite de la

constatation que les plantes étaient d'avantage influencées par la teneur en sels de la solution du sol que par le contenu total en sels du sol (Sonmez et al., 2008). Cette méthode tend dès lors à se rapprocher des conditions rencontrées dans les sols (Sonmez et al., 2008) et à être plus représentative des conditions rencontrées lors de la croissance des plantes (Richards et al., 1954). L'inconvénient reste toutefois le temps nécessaire à sa réalisation en comparaison avec d'autres méthodes de mesures (Sonmez et al., 2008; Weil & Brady, 2017), le coût de la réalisation et du suivi de la salinité d'une campagne à grande échelle, ainsi que la possibilité d'erreur lors de la préparation de la pâte de sol (Amakor et al., 2014). En effet, l'arrêt du mélange de l'eau distillée à l'échantillon de sol n'est que raisonnablement défini et doit, dans le cas où plusieurs opérateurs participent aux mesures d'ECe, être le fruit d'un accord entre ces derniers (Richards et al., 1954).

Parmi les autres méthodes de mesures plus rapides et moins coûteuses figurent les mesures d'EC au sein de l'extrait (par filtration) de solution ayant différents ratios de concentration entre le sol et l'eau (Richards et al., 1954; Sonmez et al., 2008; Weil & Brady, 2017). Les ratios sol : eau (en masse) couramment utilisés sont les ratios 1 : 1 et 1 : 5 (Sonmez et al., 2008; Weil & Brady, 2017) ou encore 1 : 2 (Weil & Brady, 2017) et 1 : 2,5 (Sonmez et al., 2008). Richards et al. (1954) considèrent que ces mesures sont appropriées lorsque l'évolution de la salinité d'un sol en fonction du temps ou de différents traitements est étudiée, que des mesures répétées doivent être effectuées ou encore que le temps fait défaut. En ce qui concerne les différences entre l'ECe et l'EC des ratios sol : eau, Richards et al. (1954) expliquent que celles-ci seront plus ou moins importantes en fonction du type de sels impliqués et du ratio sol : eau. En effet, dans le cas de sels relativement solubles tels que les sels de chlorures, les différences seront moins importantes que dans le cas de sels moins solubles tel que les sels de sulfates ou de carbonates, où la dilution due au ratio sol : eau influencera de manière plus importante la quantité de sels dissous (Richards et al., 1954). Weil et al. (2017) précisent cependant que ces différentes mesures sont corrélées entre elles et que le passage de l'une à l'autre est dès lors possible. L'intérêt de bénéficier de mesures plus simples et moins coûteuses est tel que des études permettant d'estimer l'ECe via l'EC des ratios sol : eau ont été réalisées. Parmi ces études, Zhang et al. (2005) ont établi des droites de régression entre les mesures effectuées dans l'extrait de pâte de sol et le ratio 1 : 1 ; Sonmez et al. (2008) ont également établi des droites de régression, mais en tenant compte de la texture du sol et ce pour les ratio 1 : 1, 1 : 2,5 et 1 : 5 ; et He et al. (2013) ont établi des modèles mettant en lien l'ECe et l'EC de ratio 1 : 5 obtenu via quatre protocoles distincts. Il est également important de préciser que, comme le font Herrero et al. (2015), les mesures de l'EC via certains ratio sol : eau sont plus adéquates que l'ECe dans le cas de sols hypersalins en zone humide occasionnellement inondée. En effet, et à contrario des ratios 1 : 5 et 1 : 10, la formation de paires d'ions est très courante dans le cas de l'extrait de pâte saturée pour ces sols (Herrero et al., 2015). La formation de paires d'ions est l'association partielle d'ions de charges opposées en solution et conduit, du moins pour des paires d'ions à charge neutre, à une diminution de la conductivité électrique de la solution (Marcus & Hefter, 2006). Dans ce cas, la mesure de la conductivité sous-estimera la quantité totale de sels dissous, la relation entre ces deux variables n'étant plus linéaire (Amakor, Jacobson, & Cardon, 2013). Le ratio 1 : 5 est alors recommandé par Herrero et al. (2015) comme mesure de référence.

À titre d'information, les mesures de conductivité électrique peuvent être réalisées directement dans la pâte de sol ou dans les ratio sol : eau et non dans les extraits (Richards et al., 1954; Weil & Brady, 2017). Richards et al. (1954) précisent cependant qu'il ne s'agit alors que

d'estimations approximatives de la salinité. Les mesures *in situ* courantes de la salinité d'un sol sont celles de la conductivité apparente et l'utilisation de l'induction électromagnétique (Weil & Brady, 2017). Dans le premier cas, plusieurs électrodes espacées d'une distance déterminée sont insérées dans le sol et permettent de mesurer sa conductivité apparente jusqu'à une profondeur déterminée par l'espacement choisi entre les électrodes (Weil & Brady, 2017). Dans le second cas, la salinité est estimée sur base de la mesure des champs magnétiques dus au déplacement de charges dans le sol, déplacement lui-même induit par la génération d'un champ magnétique (Weil & Brady, 2017). Ces mesures ont notamment l'avantage d'être peu coûteuses en temps (Weil & Brady, 2017).

La sodisation

Le processus de sodisation est couramment caractérisé par l'utilisation de *l'Exchangeable Sodium Percentage* (ESP) ou du *Sodium Adsorption Ratio* (SAR) (Weil & Brady, 2017). L'expression de l'ESP est donnée par Weil et al. (2017) comme étant égale à :

$$ESP = \frac{ES}{CEC} * 100$$

Où l'ES est le sodium échangeable en cmolc kg⁻¹ et la CEC est la capacité d'échange cationique également exprimée en cmolc kg⁻¹. Comme son expression le montre, l'ESP est une mesure directement liée au processus de sodisation puisqu'elle exprime simplement la quantité de sodium fixée sur le complexe d'échange et rejoint la définition de la sodisation donnée par Legros (2007).

Le SAR est quant à lui défini comme étant (Legros, 2007; Richards et al., 1954; Weil & Brady, 2017) :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Où les concentrations des différents ions sont exprimées en milliéquivalents par litre. Il s'agit donc bien des concentrations d'éléments en solution et non d'éléments fixés sur le complexe d'échange. En réalité, comme l'explique Legros (2007), le SAR a été initialement introduit afin d'estimer la quantité de sodium qui sera fixée sur le complexe d'échange en fonction des caractéristiques d'une eau d'irrigation. Cette relation se base donc sur le fait qu'un équilibre existe entre la solution du sol et le complexe d'échange (Legros, 2007; Richards et al., 1954). La relation entre l'ESP et le SAR a notamment été étudiée par Richards et al. (1954) et conduit, à l'époque, à la construction de nomogrammes et abaques célèbres pour passer d'une variable à une autre (Legros, 2007). Le SAR est donc couramment utilisé pour caractériser la solution du sol et l'extrait de pâte de sol, ainsi que l'eau d'irrigation (Weil & Brady, 2017).

L'alcalinisation

Le caractère alcalin d'un sol est apprécié par la mesure du pH. Lorsque l'extrait de pâte de sol saturé est préparé, la mesure du pH de cet extrait est alors recommandée (IUSS Working Group WRB, 2015). Dans le cas de mesures de pH des extraits sol : eau, celles-ci ne seront pas identiques puisqu'elles dépendent notamment des ratios sol : eau (Darab, 1975). Le pH KCl est une alternative au pH eau qui, même si le pH obtenu sera plus faible, permet d'obtenir des valeurs plus stables (Darab, 1975).

Caractérisation suivant la World Reference Base for soil resources (2015)

En ce qui concerne la classification suivant la *World Reference Base for soil resources* (IUSS Working Group WRB, 2015), les mesures permettant de classer les différents types de sols sont, bien entendu, les mesures couramment effectuées (CEC à pH 7, taux de saturation en base à pH 7, granulométrie...) ainsi que d'autres dédiées spécifiquement à l'évaluation de la salinité (au sens large). En l'occurrence, l'ECe et l'ESP sont les deux critères diagnostiques. Le pH eau est, quant à lui, également un critère diagnostique dans certain cas. Pour une évaluation de la salinité, la WRB (2015) recommande comme procédure analytique de déterminer le pH, l'électroconductivité, le SAR et les cations et anions des sels dissous dans l'extrait de pâte saturée. Le *Soil Survey Laboratory Methods Manual* (Rebecca Burt et al., 2004), manuel vers lequel la WRB (2015) renvoie pour obtenir une description complète des analyses recommandées pour la classification des sols, mentionne cependant que lorsque l'extrait de pâte saturée n'est pas réalisé, l'ESP est calculé sur base du sodium échangeable extrait à l'acétate d'ammonium (NH_4OAc) en cmolc kg^{-1} et de la CEC mesurée à l'acétate d'ammonium à pH7 en cmolc kg^{-1} .

2.5. Classification des sols salins, alcalins et sodiques

La World References Base for soil resources (2015)

Au sein de la *World Reference Base for soil resources* (2015), deux groupes de sols de référence ainsi que trois qualificatifs caractérisent la salinité des sols. Il s'agit des groupes de références « Solonetz » et « Solonchaks », et des qualificatifs « Sodic », « Argisodic », « Protosodic », « Protosalic » et « Hypersalic ». Les caractéristiques principales de chacun de ces termes sont présentées au sein de cette section mais le lecteur désireux d'obtenir de plus amples informations est renvoyé à la consultation de la WRB (2015).

Le premier groupe de référence des sols caractérisés par une salinisation lors de l'utilisation de la clef de la WRB (2015) est le groupe de référence des Solonetz. Les Solonetz sont marqués par un processus de sodisation important. Ils sont caractérisés par la présence d'un horizon diagnostique « natric » débutant au plus à 100 cm de la surface du sol. Cet horizon est un cas particulier de l'horizon diagnostique « argic » qui correspond à un horizon significativement enrichi en argiles en comparaison avec les horizons sus-jacents. L'horizon natric possède en plus de cette caractéristique un contenu en sodium échangeable important se traduisant par une valeur d'ESP supérieure ou égale à 15%. Dans certains cas, les valeurs de magnésium échangeable sont également importantes (IUSS Working Group WRB, 2015).

Le deuxième groupe de référence des sols caractérisés par une salinisation lors de l'utilisation de la clef d'identification de la WRB (2015) sont les « Solonchaks ». Les Solonchaks sont marqués par un processus de salinisation (au sens strict) important. Ils sont caractérisés par la présence d'un horizon diagnostique « salic » commençant au plus à 50 cm de la surface du sol. Cet horizon est caractérisé par la présence d'une quantité importante de sels relativement solubles, c'est-à-dire de sels plus solubles que le gypse². La caractéristique principale de cet horizon est que son EC_e (à 25°C) doit être égale ou supérieure à 15 dS m⁻¹ ou, si le pH eau de l'extrait de pâte saturée est supérieur à 8,5, être égale ou supérieure à 8 dS m⁻¹.

² Le logarithme du produit de solubilité du gypse ($\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), soit log K_s, est égal à -4,85 à 25°C (IUSS Working Group WRB, 2015).

En ce qui concerne les qualificatifs (à adjoindre au nom du groupe de sols considéré si les conditions sont respectées), six d'entre eux sont caractéristiques d'une salinisation. Le premier est le qualificatif Sodic. Il indique la présence d'une couche d'au moins 20 cm d'épaisseur à au plus 100 cm de la surface du sol possédant une valeur d'ESP au moins égale à 6% et plus de 15% de sodium et magnésium occupant le complexe d'échange, sans qu'un horizon natic à au plus 100 cm de profondeur ne puisse être identifié. Le préfixe « Argi » peut y être ajouté si, en plus de ces caractéristiques à l'exception de l'épaisseur, l'ensemble des caractéristiques d'un horizon argic sont respectées. Le préfixe « Proto » peut également être ajouté au qualificatif Sodic si la valeur du sodium et magnésium échangeable est inférieure à 15%.

Le deuxième qualificatif est le terme Salic mentionnant la présence d'un horizon salic à au plus 100 cm de la surface du sol. Le préfixe « Hyper » peut lui être ajouté pour faire référence à la présence d'une couche présente à au plus 100 cm de profondeur de la surface du sol dont l'EC_e est égale ou supérieure à 30 dS m⁻¹. Le préfixe « Proto » est quant à lui utilisé lorsqu'aucun horizon salic à au plus 100 cm de profondeur ne peut être diagnostiqué, mais si, dans la même gamme de profondeur, une couche possédant une EC_e égale ou supérieure à 4 dS m⁻¹ à 25°C est identifiée.

Autre système de classification

D'autres systèmes de classification prenant en compte moins de paramètres sont également communément utilisés pour caractériser les sols salins (au sens large) dans un objectif de remédiation. Quatre types de sol sont alors distingués : les sols dit « normaux », les sols salins, les sols sodiques, et les sols salins et sodiques (O'Geen, 2015; Richards et al., 1954; Weil & Brady, 2017). La distinction de ces classes s'effectue sur base de deux variables que sont la conductivité électrique et l'ESP ou le SAR (O'Geen, 2015). Le pH est quant à lui considéré comme un bon indicateur au même titre que peut l'être la structure du sol (O'Geen, 2015). Le tableau 2 donne les valeurs seuils de ces variables en fonction de chacune des classes.

Tableau 2. Valeurs seuils de l'EC, l'ESP, du SAR, ainsi que du pH considéré comme un indicateur permettant de distinguer les sols en quatre classes. Richards et al. (1954) et Weil et al. (2017) précisent que le pH est généralement inférieur à 8,5 dans le cas de sol salin et sodique, mais ce dernier peut varier considérablement (Richards et al., 1954). Source : O'Geen (2015).

Classe	EC (dS m ⁻¹)	ESP (%)	SAR	pH
Sol agricole typique	< 4	< 15	< 13	< 8,0
Salin	> 4	< 15	< 13	< 8,5
Sodique	< 4	> 15	> 13	> 8,5
Salin et sodique	> 4	> 15	> 13	< 8,5

I.3. La spatialisation des données

3.1. Principes de géostatistiques

Hengl (2007) définit la géostatistique comme un ensemble de techniques statistiques dédiées aux données spatiales, dont la prédiction sur l'ensemble d'une surface déterminée des valeurs d'une variable connue en un certain nombre de points de cette surface constitue le principal intérêt. Par conséquent, la géostatistique s'oppose aux modèles de prédiction dit « mécanique » où les différents paramètres utilisés sont soit empiriques, soit arbitraires (Hengl, 2007).

Son intérêt dans la prédiction de variables environnementales dans l'espace provient du fait que, bien que ces variables environnementales soient déterminées par l'interaction de processus physique, chimique ou encore biologique, ces interactions sont si complexes ou encore insuffisamment comprises qu'une solution déterministe n'est jusqu'à lors pas envisageable (Oliver & Webster, 2014). La variation de ces variables dans l'espace peut alors paraître aléatoire bien qu'elle ne le soit pas (Oliver & Webster, 2014). Dans le cadre de la géostatistique, ces variables environnementales sont en réalité considérées comme étant des variables spatiales aléatoires pour lesquelles une seule réalisation de cette variable aléatoire en un point de l'espace est donnée (Oliver & Webster, 2014).

Sur base de cela, un modèle de prédiction spatial d'une variable environnementale aléatoire Z sur le domaine géographique d'intérêt noté \mathbb{A} est représenté par Hengl (2007) de la manière suivante :

$$\hat{z}(s_0) = E\{Z|z(s_i), q_k(s_0), \gamma(h), s = (x, y) \in \mathbb{A}\}$$

Où $\hat{z}(s_0)$ est l'estimation de la réalisation de Z au point s_0 de coordonnées (x_0, y_0) ; E est l'espérance mathématique; $z(s_i)$ sont les valeurs connues de Z aux points (x_i, y_i) avec $i = 1, 2, 3, \dots, n$ et n étant le nombre d'observations; $q_k(s_0)$ sont les valeurs des prédicteurs (non arbitraires) pour le point s_0 avec $k = 1, 2, 3, \dots, m$ et m étant le nombre de prédicteurs. Le terme $\gamma(h)$ est quant à lui une fonction dépendante de h , où h est la séparation entre deux observations en distance et en direction (Oliver & Webster, 2014). Cette fonction $\gamma(h)$ permet de tenir compte de l'effet d'autocorrélation spatiale (Hengl, 2007). L'effet d'autocorrélation spatiale traduit le fait que les valeurs de la variable de deux points proches l'un de l'autre sont plus similaires que dans le cas de deux points plus éloignés (Hengl, 2007). L'estimation de cette fonction $\gamma(h)$, appelée variogramme, est une étape cruciale en géostatistique (Oliver & Webster, 2014). Oliver et al. (2014) expliquent qu'elle se base sur le calcul des semi-variances, soit :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [\{z(s) - z(s + h)\}^2]$$

Qui est calculé en pratique suivant la relation :

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2 m(h)} \sum_{j=1}^{m(h)} \{z(s_i) - z(s_i + h)\}^2$$

Comme l'explique Oliver et al. (2014), dans cette relation h est fixé et est dénommé le lag (h est borné). À un lag h donné correspond $m(h)$ paires d'observations pour lesquelles les semi-variances calculées sont moyennées. Après quoi, h est progressivement incrémenté et permet d'estimer d'autres points du variogramme. La fonction ajustée à cet ensemble de point est alors $\hat{\gamma}(h)$. Les différentes étapes de construction d'un variogramme sont illustrées à la figure 2 donnée par (Hengl, 2007). Comme le montre cette figure, les semi-variances de l'ensemble du jeu de donnée peuvent d'abord toutes être calculées (Fig. 3 encart b) et être ensuite regroupées suivant le lag h (Fig. 3 encart c).

Sur base de cela, différentes modèles de prédiction spatial ont été développés, mais l'un des modèles ayant été le plus utilisé est le Krigeage que l'on peut noter comme (Hengl, 2007) :

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n w(s_0) \cdot z(s_i)$$

Où $w(s_0)$ sont des facteurs pondérant l'influence des observations $z(s_i)$. Comme l'explique Hengl (2007) ces facteurs sont basés sur l'estimation du variogramme et donneront plus de poids aux observations à proximité du point s_0 que les observations plus éloignées.

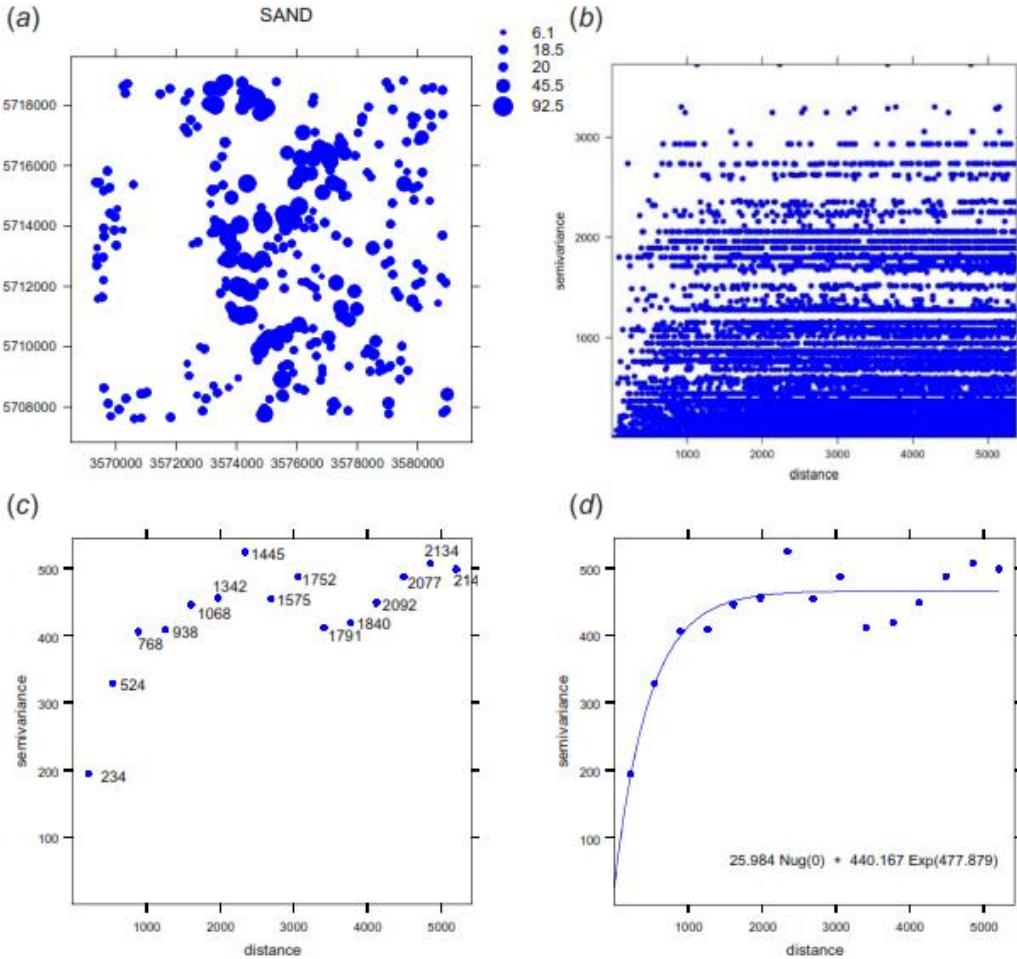


Figure 2. Sur base des valeurs prises par une variable en différents points d'une surface (a), la construction du variogramme d'une variable peuvent être résumée en trois étapes : 1) le calcul des semi-variances et leur représentation en fonction de la distance de chaque paire d'observation (b) ; 2) Le calcul de la moyenne des semi-variances pour un intervalle de distance donné appelé lag (c) ; 3) l'estimation de la fonction $\gamma(h)$ sur base de l'agrégation des semi-variances (d). Source : Hengl (2007).

3.2. Méthodes cartographiques d'évaluation de la dégradation des terres.

Dans l'optique d'une remédiation des sols affectés par une salinisation au sens large, Zinck et al. (2008) expliquent que l'évaluation et le suivi de la salinisation est nécessaire afin de pouvoir prendre des décisions à temps. Pour le suivi et l'évaluation de la salinisation, Zinck et al. (2008) identifient deux étapes clefs : 1) identifier où les sels se concentrent dans le paysage et 2) détecter les changements dans le temps et l'espace de la salinisation. La cartographie de la salinisation est donc un élément clé.

En ce qui concerne la *Valle alto* à Cochabamba, Metternicht et al. (1997) ont cartographié les surfaces affectées par la salinisation au sens large. Pour ce faire, Metternicht et al. (1997) ont

utilisé une méthode de classification d'images digitales satellites sur base d'observations réalisées sur le terrain et de déterminations en laboratoire. Le jeu de données utilisé par Metternicht et al. (1997) est constitué de 95 échantillons composites des 5 premiers centimètres du sol et sont géoréférencés. Une première classification des sols utilisant les valeurs de référence du SAR et de l'ECe a tout d'abord été envisagée par Metternicht et al. (1997). Cette classification n'a pas été retenue pour deux raisons : 1) le jeu de données présentait une dispersion très importante au-dessus des seuils fixés, 2) les 60 valeurs manquantes de SAR ont été estimées sur base du pH mais plus de 90% d'entre elles présentaient des valeurs supérieures à 30 et étaient très élevées (jusqu'à plus de 3000 !) (Metternicht & Zinck, 1997). Metternicht et al. (1997) ont alors conclu que le SAR n'était pas un bon indicateur dans le cadre d'une classification sur base d'images satellites. La classification retenue par Metternicht et al. (1997) est quant à elle constituée de neuf classes de sol salins et alcalins qui se distinguent l'une de l'autre sur base de l'ECe et du pH. Enfin, Metternicht et al. (1997) ont conclu que le type et la densité de la couverture végétale, la texture en surface du sol ainsi que le mélange de la surface du sol à la suite de pratiques agricoles masquent les différents degrés de salinité et d'alcalinité. En ce qui concerne la distribution spatiale de la salinité, Metternicht et al. (1997) ont conclu que les principaux facteurs contrôlants celle-ci étaient le matériau parental, la position topographique et le climat sec.

I.4. Objectifs de l'étude

L'objectif principale de ce travail est de réaliser l'évaluation de la salinisation (au sens large) des sols de la *Valle Alto* de la région de Cochabamba (Bolivie). Cette évaluation se traduit par l'identification des échelles spatiales et des facteurs de variations de ces sols et de leurs propriétés au sein de la *Valle Alto*.

Plus précisément, pour atteindre cet objectif, une identification des différents types de sol rencontrés dans la *Valle Alto* est nécessaire. Par conséquent, l'ouverture et la description de profils de sols ont été effectuées. La production d'outils cartographiques est également un élément clé pour l'identification et la compréhension des échelles spatiales et des facteurs de variations des sols. Dans ce contexte, la cartographie des propriétés de surface en lien avec les sols identifiés et caractéristiques d'une salinisation (au sens large) a été effectuée à l'échelle de la vallée. Celle-ci a été réalisée via le prélèvement d'échantillons composites et, par la suite, l'utilisation de modèles de prédictions spatiales. Sur cette base, la cartographie des sols suivant la classification simplifiée présentée a été réalisée et discutée. Il en est de même pour la cartographie des différents types de sols identifiés, réalisée sur base d'un nombre réduit de variables et de leurs propriétés de surface.

La caractérisation analytique en laboratoire des échantillons est également discutée. En effet les variables diagnostiques d'une salinisation ont été déterminées par des méthodes plus simples et moins chronophages que celles couramment effectuées sur base de l'extrait de pâte saturée de sol. L'utilisation de ces méthodes plus simples et moins coûteuses en temps constitue un véritable atout dans le cadre du suivi de l'évolution de la dégradation du sol et ce, d'autant plus lorsque les moyens à disposition peuvent faire défaut ou sont limités. Pour cette raison, ces méthodes ont donc été choisies et discutées.

Les études les plus récentes concernant la caractérisation des sols de la *Valle Alto* sont celles réalisées dans le cadre de la thèse de doctorat de Metternicht (1996) à l'université de Gent (Belgique) ainsi que les publications connexes à cette thèse de doctorat (Metternicht & Zinck,

2003; G. Metternicht & Zinck, 1997, 2016; Zinck & Metternicht, 2008). D'autres documents provenant de la littérature grise existent, mais la difficulté d'identifier les sources de ces documents et dès lors d'évaluer leur qualité ont fait de cette thèse de doctorat et des publications connexes, les documents de références auxquels comparer les observations réalisées sur le terrain et les résultats obtenus dans le cadre de ce travail.

I.5. Présentation du site d'étude

5.1. Localisation

Le site d'étude se situe en Bolivie, en plein cœur des Andes Centrales et de la Cordillère Orientale. Plus particulièrement, il se situe au sein du département de Cochabamba, à une vingtaine de kilomètres au sud-est de la ville donnant son nom à ce département, soit la ville de Cochabamba. Il s'agit de la « *Valle Alto* » (Haute Vallée en français) comprise entre les coordonnées $66^{\circ} 7'$ et $65^{\circ} 43'$ ouest, $17^{\circ} 29'$ et $17^{\circ} 42'$ sud (voir figure 4). Cette haute vallée s'étend sur près de 51 000 hectares et son altitude moyenne est de 2750 mètres (voir figure 5).

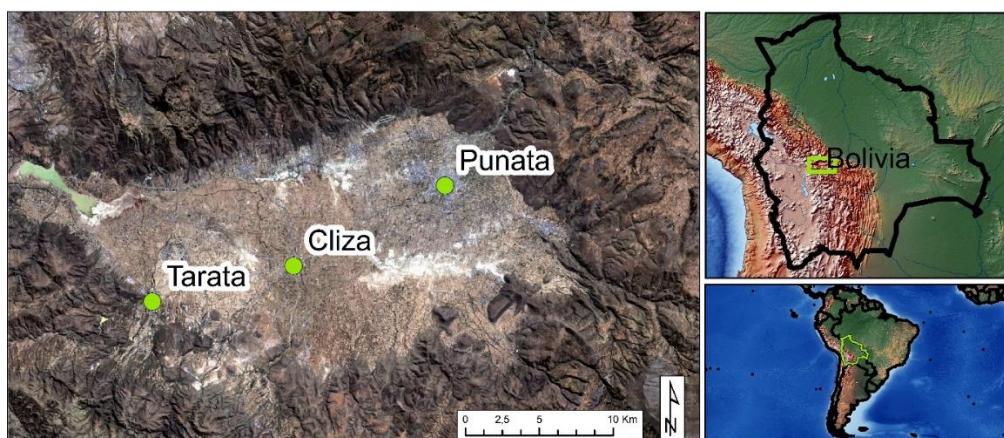


Figure 3. Localisation de la *Valle Alto*, du département de Cochabamba, Bolivie. Tarata, Cliza et Punata sont trois villes de la *Valle Alto*. Syst. Coo. : WGS84 - UTM 20S (*Valle Alto*) et WGS84 (Bolivie et Amérique latine).

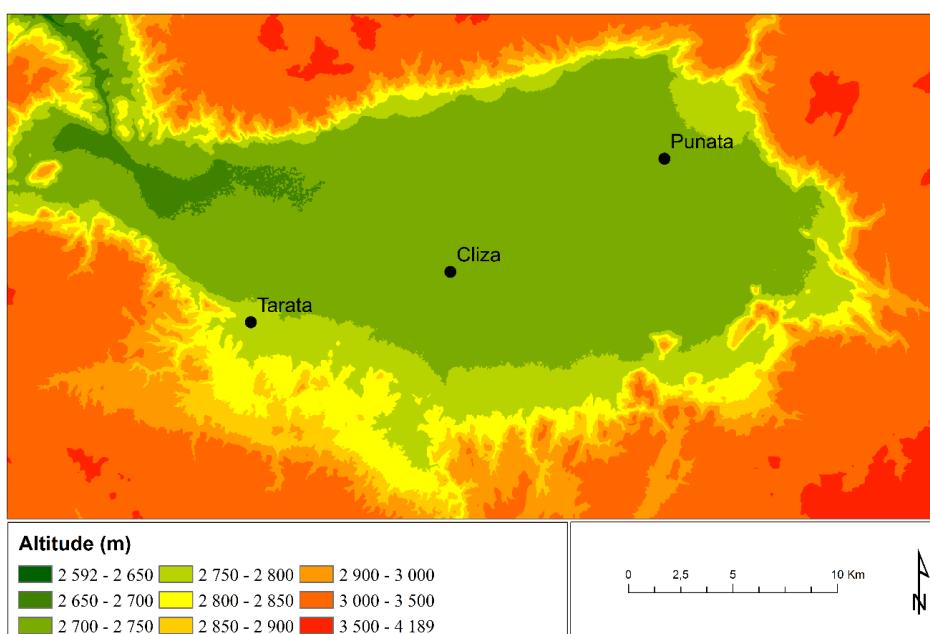


Figure 4. Carte représentant l'altitude de la *Valle Alto*. L'altitude est principalement comprise entre 2600 et 2850 mètres au-dessus du niveau de la mer. Syst. Coo. : WGS84 - UTM 20S.

5.2. Climat

En ce qui concerne le climat rencontré dans la *Valle Alto*, des données de quatre stations météorologiques de la SENAMHI³ ont été obtenues et permettent de caractériser le climat. Trois de ces stations sont situées dans la *Valle Alto* aux localités suivantes qui sont, d'ouest en est : Tarata, San Benito et Arani. La quatrième station est quant à elle celle de l'aéroport de Cochabamba située dans le bassin de Cochabamba au nord-ouest de la *Valle Alto* à une altitude de 2548 mètres, soit approximativement 200 mètres plus bas que les trois autres stations météo. Sur base des données de 1986 à 2016, les températures et précipitations moyennes mensuelles ont été calculées (voir figure 6).



Figure 5. Diagramme ombrothermique de 4 stations météo de localités différentes qui sont, d'ouest en est : l'aéroport de Cochabamba (CCB Aeropuerto), Tarata, San Benito et Arani. Le graphique représente les moyennes mensuelles calculées sur une période de 30 ans, de 1986 à 2016.

Comme indiqué à la figure 6, le climat de la Haute Vallée de Cochabamba comprend une saison sèche de 7 à 8 mois (d'avril à octobre/novembre) où les températures moyennes sont plus élevées que les précipitations. Par conséquent, il s'agit d'une période de sécheresse. Lors de la saison humide durant 4 à 5 mois (de novembre/décembre à mars), les précipitations sont des événements intenses et courts qui marquent le paysage en créant des cours d'eau intermittents et des zones d'érosion importantes là où le couvert végétal est faible (Metternicht, 1996). Le contraste de précipitation entre ces deux saisons est important puisqu'en moyenne 87% du total des précipitations de l'année sont enregistrées pendant la saison humide de novembre à mars. Les précipitations les plus importantes sont quant à elle enregistrées au mois de Janvier, et les plus faibles en Mai (pour Tarata) ou Juin (pour CBB Aeropuerto, Arani et San Benito). De 1986 à 2016, la précipitation moyenne annuelle est de 409 mm/an.

Concernant les températures, la moyenne annuelle est de 16,6 °C dans la *Valle Alto* et de 17,8 °C à Cochabamba. Les températures minimum moyennes mensuelles sont observées durant le mois de juillet. Dans la *Valle Alto*, cette température est en moyenne de 13,4°C et est de 14,2

³ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

°C à Cochabamba. Les températures maximum moyennes mensuelles sont quant à elles observées en novembre avec 18,8°C en moyenne dans la *Valle Alto* et 20,3°C à Cochabamba.

Selon les critères de la classification de Köppen – Geiger tels que décrits par Kottek et al. (2006), le climat rencontré dans la *Valle Alto* est un climat tempéré chaud avec hivers secs et étés chauds (Cwb). Les données enregistrées par la station météorologique d'Arani sont cependant proches d'être caractéristiques d'un climat aride (B). La carte mondiale de la classification du climat suivant Köppen – Geiger obtenue d'après les travaux de Kottek et al. (2006) et de Rubel et al. (2017), classifie d'ailleurs une partie de la *Valle Alto* en climat aride steppique froid (Bsk). En se basant sur la valeur des précipitations moyennes annuelles, le climat de la *Valle Alto* est qualifié de climat semi-aride si l'on se réfère à la définition du climat semi-aride de Chesworth (2008), mentionnant que les précipitations annuelles doivent être comprises entre 250 et 500 mm/an. Metternicht et al. (1997) qualifient d'ailleurs le climat de la *Valle Alto* comme tel.

5.3. Géologie et géomorphologie

La *Valle Alto* est un des bassins tertiaires de la Cordillère orientale de la région de Cochabamba (Lavenu, 1986). Cette dépression tectonique est en réalité un graben dont les sédiments du Quaternaire sont d'origine lacustre, glacio-lacustre et alluvio-lacustre (Metternicht & Zinck, 2016). Dans le cadre du projet conjoint entre Geobol et les Nations Unies intitulé « *Proyecto Integrado de Recursos Hídricos, Cochabamba* », Graf-Meier (1977)⁴ a analysé des sondages réalisés dans la *Valle Alto*. Des deux sondages analysés dans ce bassin, il ressort que la profondeur des sédiments rencontrée était de 249 mètres pour le premier sondage et de 260 mètres pour le second. Graf-Meier (1977) a également relevé la présence de sédiments d'époque glaciaire à des profondeurs variant de 245 mètres à 260 mètres. Metternicht (1996) souligne que les forages réalisés présentent une importante variabilité verticale et horizontale, ce qui s'explique par le régime chaotique, rythmé et de nature torrentiel du dépôt de ces sédiments. Metternicht (1996) précise qu'une séquence stratigraphique peu perturbée est observée dans la partie centrale du cône de déjection de la ville de Punata.

Les différents sédiments ont donc pour origine les hautes montagnes et collines bordant la *Valle Alto*. La géologie aux abords du site de l'étude est décrite par la carte géologique élaborée par le SERGEOTECMIN⁵ (2000). De cette carte, trois éléments géologiques distincts sont identifiés. Entourant la majeure partie de la *Valle Alto*, on retrouve une couche datant de l'Ordovicien composée de grès, siltite, quartzite, phyllades et pélites (ou lutites). Au nord-ouest de la vallée, il s'agit de lutites, siltite, quartzite et de diamictite⁶ datant du Silurien. Au sud-ouest, il s'agit d'une couche du Néogène (Tertiaire) composée de conglomérats, grès, argilite, gypse, marne, et de tuf. La formation de diapir est également mentionnée.

Comme mentionné précédemment, la *Valle Alto* est bordée de hautes collines et montagnes. Elle présente en son centre un relief relativement plat. Au total, quatre structures

⁴ Cité par (Lavenu, 1986) : Graf-Meier K. (1977). – Nuevos datos palinológicos del Cuaternario de Bolivia. Bol. Ser. Geol., Bol., ser. A, V. 1, n° 1, p. 1-14.

⁵ Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas.

⁶ « Diamictite » est un terme anglophone qui, comme le définit Pinti (2011), est : « a nonsorted or poorly sorted, noncalcareous, terrigenous sedimentary rock. Diamictite contains a wide range of particle sizes, from gravel to sand, dispersed in a clayey matrix. ». Le terme « terrigenous » réfère quant à lui à la nature océanique des sédiments.

géomorphologiques principales composent le paysage de la *Valle Alto*. Il s'agit de montagnes, de collines, de piémonts et, bien entendu, de la vallée en elle-même (Metternicht, 1996).

Les montagnes culminent à certains endroits à plus de 4000 mètres d'altitudes. La topographie de celles-ci rencontrée au-delà de 3900 mètres d'altitude est représentative de la dernière glaciation avec entre autre la présence de vallées glaciaires (vallée en auge) et de moraines (Metternicht, 1996). Les pentes importantes rencontrées entre 3900 et 2800 mètres implique un ruissellement et une érosion du sol importants, ainsi que l'incision profonde de cours d'eau en direction de la *Valle Alto* (Metternicht & Zinck, 2016).

Les piémonts sont composés de matériaux alluviaux et colluvio-alluviaux que l'on retrouve soit sous la forme de cônes de déjection, soit sous la forme de glacis (Metternicht & Zinck, 2016). Ces cônes de déjection peuvent être anciens et d'origine fluvio-glaciaire ; récents et composés de colluvions et d'alluvions ; actifs et composés d'alluvions ; ou encore être coalescents et former un glacis (Metternicht & Zinck, 2016).

Les collines sont quant à elles rencontrées au sein des piémonts et constituent une forme plus isolée du relief (Metternicht & Zinck, 1997). Elles se situent au sud-ouest de la vallée (Metternicht et al., 1997).

Metternicht (1996) qualifie le centre de la vallée de dépression lagunaire où des playas occupent les parties les plus basses de la vallée. Ces playas tiennent leur origine de la présence à ces endroits de lacs du Pléistocène et possèdent le plus souvent un épais lit de matériaux argileux et sablo-argileux qui, à une certaine profondeur, revêt un caractère salin (Metternicht, 1996). Lors de la saison sèche, leur surface devient dès lors salée (Metternicht, 1996). La transition entre les *playas* et les piémonts s'effectue par un relief en légère pente en direction des *playas* et d'origine alluvio-lagunaire que Metternicht (1996) qualifie de relief « lagunaire plat ». Comme le résume Zinck (2016), cette dépression tectonique a donc été occupée par un lac qui s'est progressivement asséché laissant en place un relief lagunaire dont les produits de l'érosion des montagnes ont progressivement masqué les traces, à l'exception du centre de la *Valle Alto*.

Metternicht et al. (1997) ont cartographié chacun des éléments géomorphologiques composants le paysage de la *Valle Alto* précédemment détaillés. Leur localisation est donnée à l'annexe A.

5.4. Pédologie

Metternicht (1996) a identifié principalement deux types de sols dans la *Valle Alto*. Il s'agit, suivant la classification USDA, d'Entisols et d'Aridisols. Les Entisols sont caractérisés par l'absence ou la non évidence de développement d'horizons caractéristiques (Soil Survey Staff, 1999). Ils sont donc jeunes au sens pédologique du terme. Metternicht (1996) les a identifiés sur les cônes de déjection récents et actifs dans les zones de piémonts. Les Aridisols sont quant à eux caractérisés par un développement pédogénétique plus avancé que les Entisols (Soil Survey Staff, 1999). Le régime d'humidité de ces sols est de type aridic et met en évidence le déficit hydrique qu'il rencontre pendant une grande partie de l'année. En effet, pour pouvoir qualifier le régime d'humidité d'un sol d'aridic suivant la classification USDA, la section déterminée de ce sol doit être sèche en tout point pendant plus de la moitié des jours cumulés de l'année où la température du sol est de plus de 5°C à 50 cm de profondeur. La seconde condition est que cette section de sol ne peut être humide ne serait-ce que partiellement plus de 90 jours consécutifs lorsque la température du sol à 50 cm de profondeur est supérieure à 8°C.

Dans l'ordre des Aridisols, Metternicht (1996) a identifié des Haplargids et Calcids⁷ développés sur les glacis. Les Haplargids sont caractérisés par la présence d'un horizon argillic, soit un horizon illuvial d'argiles. Les Calcids sont quant à eux caractérisés par un horizon enrichit en carbonates, tel que le carbonate de calcium.

Les sols à caractère salin, alcalin et / ou sodique ont été identifiés par (G. Metternicht, 1996) au sein des *playas* et des dépressions « lagunaires plates ». Les principaux sols identifiés sont les Natic Cambids⁸ et les Salids. Les Cambids sont les sols de l'ordre des Aridisols les moins développés au sens pédologique. Ils sont marqués par la présence d'un horizon cambic présentant des évidences d'altération, sans pour autant que cet horizon ne développe plus de caractéristiques. Les Salids⁹ ont quant à eux la caractéristique de présenter un horizon salic, soit un horizon présentant une accumulation de sels plus solubles (en eau froide) que le gypse.

5.5. Activités humaines et végétation

D'après les différentes observations réalisées lors du travail de terrain, il a été constaté que l'occupation du sol de la partie plane de la *Valle Alto* est essentiellement dédiée à l'agriculture. Les principales cultures rencontrées sont le maïs et le blé. Des cultures maraîchères ont également été rencontrées dans la région de Punata ainsi que des cultures fruiticoles tel que l'abricot. L'irrigation des cultures est également pratiquée. Dans ce cas, les parcelles sont le plus souvent partiellement inondées. L'eau utilisée est soit celle de la nappe phréatique, soit de l'eau de rivière, soit de l'eau usée.

La végétation naturelle présente dans la *Valle Alto* est une végétation principalement éparses composée de plantes arbustives et herbacées. Des arbres isolés sont également présents. Selon la classification de (Metternicht & Zinck, 1997), la *Valle Alto* correspond à un écosystème de type « steppe à épineux ». En conséquence du climat, la végétation est majoritairement xéromorphique (Metternicht & Zinck, 1997). La figure suivante illustre le type de végétation et paysage rencontré au sein de la *Valle Alto*.



Figure 6. Végétation et paysages rencontrés au sein de la *Valle Alto*. Au-dessus, photographie d'un des paysages rencontrés dans la partie plane de la vallée. En-dessous, photographie de la végétation rencontrée sur le versant des montagnes.

⁷ Le sol décrit par Metternicht (1996) est un Calciorthid décrit par la classification USDA de 1992 (voir Soil Survey Staff, 1992). Son équivalent actuel au sein de la classification USDA est le Calcids.

⁸ Le sol décrit par Metternicht (1996) est un Natic Camborthid (USDA de 1992). Son équivalent actuel le plus proche au sein de la classification USDA est le Cambids avec un horizon natic. Le Natic Camborthid n'implique cependant pas la présence d'un horizon natic mais bien celle d'un horizon cambic possédant une valeur d'ESP au moins égale ou supérieur à 40% et à 45 pour le SAR.

⁹ Le sol décrit par Metternicht (1996) est un Salorthid (USDA de 1992). Son équivalent actuel au sein de la classification USDA est le Salids.

Des plantes halophytes sont également rencontrées localement sur des zones marquées par la salinité. La distribution de la végétation halophyte dépend du type et de la sévérité de l'expression de la salinité en ces endroits (Flores, Fernández, & Yupanqui, 2009). Citons à titre d'exemple la plante au nom local *Q'wachi*, vraisemblablement *Suaeda foliosa* Moq. de la famille des Chenopodiaceae, utilisée dans la remédiation de sols salins en Bolivie (Flores et al., 2009). Plusieurs espèces du genre *Suaeda* sont d'ailleurs utilisées dans le cadre de la phytoremédiation (Panta et al., 2014).

5.6. Origine de la salinisation

D'après les études réalisées par (G. Metternicht, 1996; G. Metternicht & Zinck, 1997), les principaux facteurs contrôlant la salinisation au sein de la *Valle Alto* sont le matériau parental, la position topographique et le climat sec. En particulier, les sols riches en carbonates sont une conséquence de l'altération du matériau parental calcaire provenant des montagnes au sud de la *Valle Alto* (G. Metternicht, 1996). La texture plus grossière rencontrée dans les zones de piedmont des glacis permet une lixiviation lente des carbonates, au contraire des playas et zones à relief lagunaire plat où la texture argileuse constraint le déplacement des sels plus en profondeur (G. Metternicht, 1996).

II. Matériels et méthodes

Afin de pouvoir répondre aux objectifs précédemment cités, la méthodologie suivante a été mise en place. Cette dernière peut être divisée en 3 grandes parties. La première est le travail de terrain, permettant la récolte d'échantillons et la réalisation d'observations in situ sur base du plan d'échantillonnage préalablement établi. La deuxième est la réalisation des analyses de laboratoire sur les différents échantillons prélevés afin de pouvoir les caractériser suivant les grandeurs ou variables choisies. Enfin, la troisième constitue le traitement des données, qu'il soit statistique ou permette la production de carte. Le chapitre de cette section présentera chacune de ces parties, dans l'ordre où elles ont été abordées ci-dessus.

II.1. Travail de terrain

1.1. Délimitation de la zone d'étude

La délimitation de la zone d'étude au sein de la Haute Vallée a été effectuée sur base de la carte des pentes obtenue via un SRTM d'une résolution de 30 mètres (1 arc-second) datant du 23 septembre 2014. Une limite de pente inférieure ou égale à 10° a dès lors été fixée. Cette limite a été choisie sur base de plusieurs observations. Premièrement, il a été constaté que la majorité des terres allouées à l'agriculture se situent dans la partie plane de la *Valle Alto*, de même que les zones les plus marquées par la salinisation (au sens large). De plus, la végétation présente sur les versants rend l'accès à ces derniers complexe et parfois très chronophage. Une limite de 10° est donc apparue comme la plus adéquate, permettant de ne pas limiter la caractérisation de la *Valle Alto* uniquement à sa partie plane et sans pour autant impliquer des difficultés d'échantillonnage trop importante.

La zone d'étude obtenue est reprise à la figure 10. Cette dernière présente une aire de près de 50 960 hectares.



Figure 7. Image supérieure : Image satellitaire couvrant la Haute Vallée. Composition « couleurs vraies » (sans « étirement gama ») sur base d'images satellites Landsat 8 du 2 juillet 2016. Image inférieure : Zone d'étude (bleu clair) composée des terrains de pente inférieure ou égale à 10° .

1.2. Choix des observations à réaliser

Deux grands types d'observations ont été réalisées sur le terrain : d'une part, la description de profils afin d'identifier les sols présents sur la zone d'étude considérée et d'autre part des échantillons de surface pour une approche cartographique.

L'étude des profils vise à identifier les processus pédogénétiques intervenant dans la formation des sols et participe à l'identification des causes de la salinisation observée. La dimension des profils qui ont été ouverts est d'1 mètre de large, 2 mètres de long et 1,5 mètres de profondeur.

Le choix du type des échantillons caractérisant les propriétés de surface des sols s'est porté naturellement sur des composites représentatifs des 20 premiers centimètres du sol. Il s'agit en effet d'une gamme de profondeur dans laquelle toute végétation devra évoluer à un moment ou à un autre. Ce choix de profondeur permet dès lors de simplifier l'échantillonnage sur le terrain.

Chacun des échantillons composites est composé de cinq carottes de sol prélevées sur une surface de 9 m². Le prélèvement des différentes carottes de sols se fait sous la forme d'une croix suivant la direction des 4 points cardinaux, avec une carotte prélevée au centre de cette croix. Chacune de ces carottes est distante de celle centrale de 1,5 mètres. Cette disposition permet en outre d'éviter une influence de l'échantillonneur quant à la localisation du prélèvement de ces carottes (par exemple une orientation de la croix permettant le prélèvement d'une carotte sur une efflorescence saline). Une représentation schématique d'un échantillon composite est donnée à la figure 11.

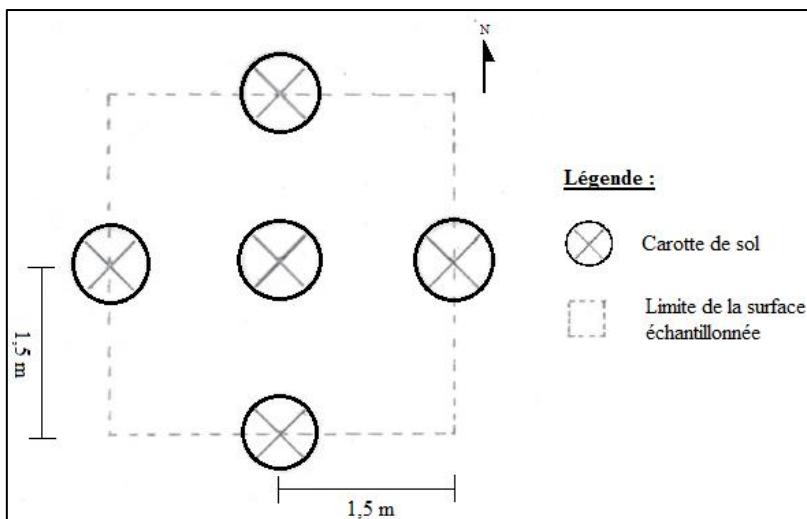


Figure 8. Représentation schématique d'un échantillon composite.

1.3. Détermination du nombre d'échantillons et de profils

Détermination du nombre d'échantillons composites.

La détermination du nombre d'échantillons à devoir prélever afin de pouvoir cartographier les sols et leurs propriétés s'est effectuée sur base d'une relation donnée par Legros (1996) (de Boulaine (1980)¹⁰, modifié) :

$$Ob = \frac{4}{K} E^2 10^8 S$$

Où Ob est le nombre d'observations [-] ; E est l'échelle cartographique [cm⁻¹] ; S la surface à cartographier [ha] ; et K l'efficience pédologique [-]. Boulaine (1980) (cité par (Legros, 1996)) explique que la valeur de cette efficience est comprise entre 1 et 20 (inclus) et est fixée par l'utilisateur. Elle se veut représentative de la difficulté ou facilité relative à laquelle le

¹⁰ Ouvrage cité par Legros (1996) : Boulaine, J. (1980). Pédologie appliquée. (sd). Paris: Masson.

cartographe fera face lors de la réalisation de la carte considérée. L'accessibilité à des sources d'informations connexes telles que des images satellitaires, des cartes topographiques ou géologiques, ou encore simplement une certaine expérience du cartographe dans le domaine sont autant de facteurs qui permettent d'augmenter la valeur attribuée à K et donc de diminuer le nombre d'observations à effectuer. L'utilisation d'une valeur de K égale à 1 dans ce calcul représente dès lors le nombre d'observations qui devraient être théoriquement effectuées en l'absence d'autres sources d'informations que les observations elles-mêmes. Il s'agit donc en quelque sorte du nombre d'observations idéal à effectuer.

Afin d'estimer le nombre d'observations à effectuer, la plus petite échelle cartographique de travail a été définie comme étant égale à 1/250 000. Le nombre théorique d'observations à devoir réalisées (c'est-à-dire pour $K = 1$) en considérant l'aire de la zone d'étude comme étant égale à 51 000 hectares est alors de 326 observations. En concordance avec les moyens à disposition pour la campagne d'échantillonnage (moyen d'accès au terrain, mobilité, nombre de personne, budget et temps imparti), le nombre d'observations a été fixé à 160. À ce nombre d'observations, correspond une efficience pédologique de 2,04. Au vu des autres sources d'informations disponibles (images satellitaires, information sur la géologie, ...), cette valeur d'efficience pédologique de 2,04 est de loin acceptable.

Détermination du nombre de profils

Le nombre de profils à décrire est également conforme aux recommandations de Legros (1996), pour une échelle de 1/250 000, soit de décrire un profil pour 3000 à 5000 hectares. Il a été décidé que la densité de profils soit de 1 pour 5000 hectares, portant le nombre de profils à 10 pour la zone d'étude.

1.4. Localisation des profils et plan d'échantillonnage

Localisation des profils

La localisation des profils de sol a été fixée en fonction de :

- la géomorphologie de la zone,
- la géologie,
- la présence d'efflorescences salines ou d'autres marques de salinisation,
- l'affectation du territoire,
- la dispersion géographique des profils afin de ne pas concentrer les observations au même endroit.

Sur les dix profils recommandés par Legros (1996), huit ont été caractérisés. La figure suivante illustre la localisation de chacun des profils identifiés.

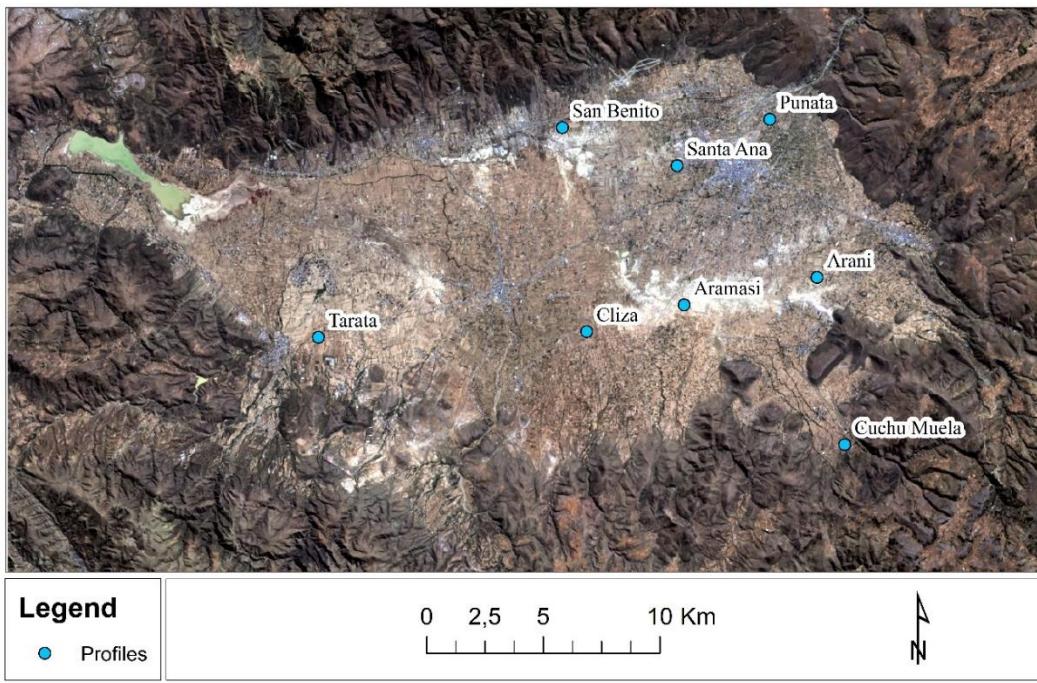


Figure 9. Localisation des profils de sols caractérisés dans la Valle Alto.

Approche spatiale

a. Principe d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage réalisé doit être en adéquation avec les techniques d'interpolation utilisées. Dans cette étude, les techniques d'interpolation utilisées sont les distances inverses, le krigage ordinaire et le krigage avec dérive externe.

Pour cette étude, il a été choisi d'établir un plan d'échantillonnage mêlant des échantillons systématiques et aléatoires. En effet, selon Hengl (2007), la combinaison d'échantillons aléatoires et systématiques est souvent recommandée. De cette manière, le plan d'échantillonnage établi se veut tirer, du moins en partie, chacun des avantages d'un échantillonnage purement aléatoire ou purement systématique tout en minimisant leurs inconvénients. Ainsi, comme l'explique Hengl (2007), un échantillonnage systématique permet de couvrir toute la zone d'étude et, dans le cas de l'utilisation du krigage ordinaire, de diminuer le plus souvent la prédiction de la variance. Son inconvénient réside, quant à lui, dans la mauvaise évaluation de la variation concernant les distances plus petites que celles séparant deux échantillons systématiques adjacents. Concernant l'échantillonnage aléatoire, Hengl (2007) souligne que dans ce cas les différentes distances entre chaque échantillon sont représentées, ce qui permet d'obtenir une meilleure estimation du variogramme. L'inconvénient dans l'utilisation d'échantillons complètement aléatoires est que leur dispersion sur la zone d'étude est plus faible, ce qui peut entraîner une diminution de la précision générale de la carte produite.

Afin de réaliser ce plan d'échantillonnage mixte devant comporter 160 échantillons, la zone d'étude a été découpée en cellules. Ces cellules sont carrées et possèdent une longueur de 3,570 km, soit une aire de 1274,49 hectares. La superficie totale de la zone d'étude est donc équivalente à celle de 40 cellules. Au centre de chacune de ces cellules, un échantillon composite a été prélevé ; il s'agit de l'échantillon systématique. Trois autres échantillons ont

été prélevés dans chacune de ces cellules ; il s'agit des échantillons aléatoires. La position de ces échantillons au sein de chaque cellule n'est toutefois pas complètement aléatoire. En effet, la position du premier échantillon aléatoire a été déterminée dans une direction aléatoire par rapport à l'échantillon systématique mais à une distance préalablement déterminée. La position des deuxième et troisième échantillons aléatoires a également été déterminée dans une direction aléatoire respectivement par rapport à la position du premier et du deuxième échantillon aléatoire, à des distances préalablement fixées. Une représentation schématique de l'échantillonnage au sein de chacune des cellules de la zone d'étude est présentée à la figure 13.

Les distances entre chaque échantillon ont été déterminées sur base de la distance maximale qu'il doit être possible d'atteindre au sein de chaque cellule lors de l'allocation de la position du troisième échantillon aléatoire et de la volonté de vouloir explorer différentes gammes de distances entre chaque échantillon. La distance maximale rend compte du fait qu'au sein de chaque cellule, chaque point doit pouvoir se voir attribuer un échantillon. Autrement dit, elle représente la distance séparant l'échantillon systématique (au centre de la cellule) et l'un des quatre coins de la cellule, celui-ci devant pouvoir avoir la possibilité d'être échantillonné. Cette distance est donc égale à :

$$Distance \text{ maximum à atteindre} = \frac{\sqrt{3570^2 + 3570^2}}{2} = 2525 \text{ m}$$

Différentes gammes de distances doivent être explorées pour permettre une bonne estimation du variogramme. La distance entre chaque échantillon est donc variable et une gamme de distances proches, moyennes et éloignées a été fixée. Elles correspondent à 8/13, 4/13 et 1/13 de la distance maximale. Dès lors, la distance séparant l'échantillon systématique et le premier échantillon aléatoire est égale à 1555 m ; celle séparant le premier échantillon aléatoire et le second est quant à elle de 775 m ; enfin, celle séparant le deuxième et le troisième échantillon aléatoire est de 195 m (voir figure 13).

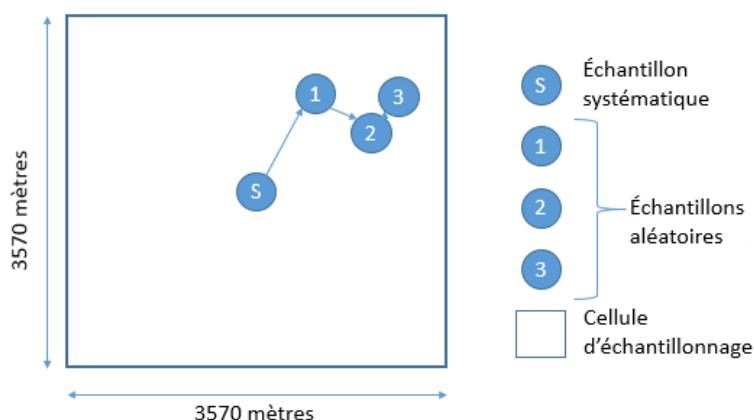


Figure 10. Représentation schématique de l'échantillonnage au sein de chacune des cellules de la zone d'étude. La distance séparant l'échantillon S de l'échantillon 1 est de 1555 mètres ; celle séparant l'échantillon 1 de l'échantillon 2 est de 775 mètres ; et enfin, celle séparant l'échantillon 2 de l'échantillon 3 est de 195 mètres.

Réalisation du plan d'échantillonnage

La réalisation du plan d'échantillonnage a été effectuée à l'aide du logiciel ArcMap 10.3.1®. Au total, 161 points ont été générés (38 systématiques et 123 aléatoires dont 5 ont été rajoutés

dans des cellules initialement dépourvues d'échantillons et pour lesquelles la superficie de la zone d'étude contenue dans cette cellule est supérieure ou égale à un quart de la superficie d'une cellule). Une carte schématique du plan d'échantillonnage obtenu est donnée à la figure 14. La carte détaillant la position de chacun de ces points est quant à elle données à l'annexe B.

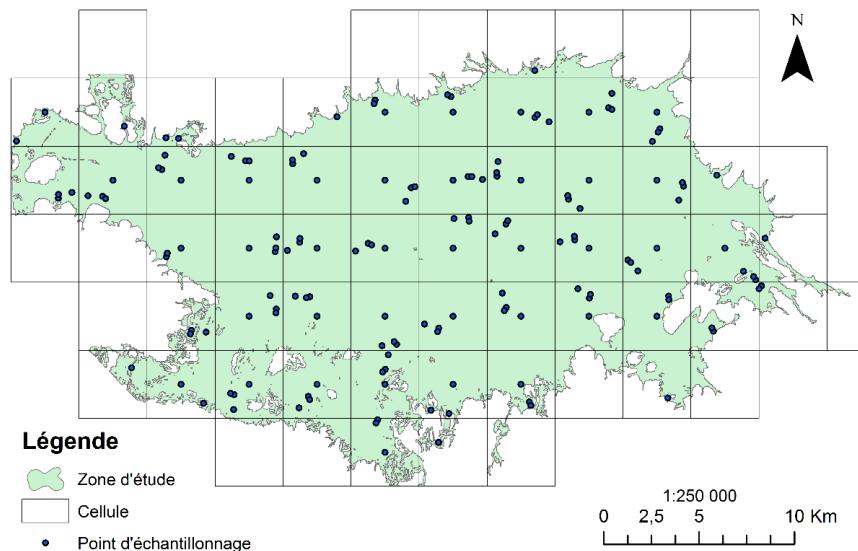


Figure 11. Carte représentant les différents points d'échantillonnages ayant été générés.

1.5. Collecte des échantillons

Description de profils

La description des profils se base sur les informations nécessaires afin de les classer dans le référentiel WRB. Les observations réalisées sur le terrain sont les observations essentielles pour la classification de ces sols dans un contexte de salinisation.

Les observations effectuées pour chacun des profils sont données à l'annexe C. Un échantillon par horizon identifié a été prélevé et conservé dans un sac plastique. La localisation des profils a été marquée à l'aide d'un GPS Garmin eTrex® modèle 20.

Collecte des échantillons composites

La collecte des échantillons composites a été effectuée à l'aide d'une tarière de type « Edelman » classique et pour sol pierreux. Les carottes prélevées ont été mélangées sur le terrain dans un récipient en plastique. L'échantillon a été ensuite transvasé et conservé dans un sac en plastique. La localisation des points sur le terrain s'est faite grâce à l'utilisation d'un GPS Garmin eTrex® modèle 20 ou d'un GPS Garmin GPS76®.

Adaptation aux conditions de terrains

Sur le terrain, la position d'échantillons composites pouvait coïncider avec l'emplacement de bâtiments, de routes, d'étendues d'eau profonde, ou d'autres obstacles empêchant tout prélèvement d'échantillons à ces endroits. Dès lors, il a été décidé de déplacer les points d'échantillonnage problématiques d'une distance de 200 mètres par rapport à leur position initiale et dans une direction déterminée. Si pour cette distance, l'échantillon ne pouvait toujours pas être prélevé, une distance de 175 mètres a été d'abord envisagée. Dans le cas où l'échantillon ne pouvait toujours pas être prélevé, cette distance est progressivement augmentée jusqu'à trouver un emplacement permettant son prélèvement. La distance maximum envisagée

a toutefois été de 225 mètres. Si au terme de ces modifications l'échantillon ne pouvait toujours pas être prélevé, un changement de direction a été effectué.

La direction choisie concernant les distances envisagées ci-dessus a dépendu du type d'échantillons (systématiques ou composites) et de sa position dans la zone d'étude (pour les échantillons systématiques) ou de sa position au sein de la cellule (pour les échantillons aléatoires). Deux cas de figure se sont alors présentés :

- S'il s'agissait d'un échantillon systématique situé dans la moitié nord de la zone d'étude, la direction dans laquelle il devait être déplacé était le sud. Si au contraire il se situait dans la moitié sud de la zone d'étude, la direction de son déplacement était le nord.
- S'il s'agissait d'un échantillon aléatoire, situé dans la moitié est de la cellule considérée, la direction dans laquelle il devait être déplacé était l'ouest. Si au contraire il se situait dans la moitié ouest de la cellule, la direction de son déplacement était l'est.

Si, dans un cas comme dans l'autre, la direction envisagée ne permettait pas de prélever l'échantillon, la direction choisie, a été celle du point cardinal suivant celle-ci dans le sens des aiguilles d'une montre (c'est-à-dire du nord à l'est, de l'est au sud, du sud à l'ouest, etc.). Si les directions des 4 points cardinaux ne permettaient toujours pas un échantillonnage, alors les directions composées de type nord-est, sud-est, ... étaient envisagées. Si aucune des directions ne permettaient un échantillonnage, le point était alors supprimé. Il s'agit d'une des solutions proposé par Legros (1996) lors de l'impossibilité de prélever un échantillon sur le terrain.

La carte répertoriant la position de chacun des échantillons prélevés sont données à l'annexe B.

II.2. Analyses de laboratoire

2.1. Choix des analyses de laboratoire

Comme expliqué précédemment (voir section I.2.4), trois grandeurs chimiques sont déterminantes concernant la salinité et l'alcalinité des sols. Ces grandeurs sont :

- L'électroconductivité, permettant d'évaluer la quantité de sels présents dans l'échantillon.
- Le pH, permettant de caractériser l'alcalinité des sols.
- Le pourcentage de sodium échangeable fixé sur le complexe d'échange, dont l'ESP ou le SAR est utilisé pour le caractériser.

La détermination de ces dernières est notamment nécessaire pour la détermination des horizons salic et natric, caractéristiques des Solonchaks et Solonetz respectivement. En plus de la détermination de ces trois grandeurs clés, le TOC, les bases échangeable, la CEC et les éléments biodisponibles (P, K, Mg et Ca) ont été déterminés. Concernant les échantillons de profils, leur granulométrie est en plus déterminée. Il s'agit en effet d'une caractéristique nécessaire pour la classification.

2.2. Préparation des échantillons

Les échantillons composites et de profils ont tout d'abord été séchés à l'air libre durant plusieurs jours. Après quoi, ces derniers ont été tamisés à 2 mm à l'aide d'un tamis métallique. La fraction ne passant pas au travers de ce tamis a été déposée dans un mortier en porcelaine et un pilon en porcelaine a été utilisé pour broyer celle-ci. Le contenu du mortier a été alors à nouveau tamisé. L'échantillon tamisé a alors été stocké dans un sachet en plastique. Les échantillons dont

l'humidité était trop importante (ce qui correspond à la majorité de ceux-ci) ont ensuite été séchés en étuve à 40°C.

2.3. Détermination de la CEC

La détermination de la CEC à pH 7 a été effectuée suivant la méthode de Metson modifiée par le Laboratoire de Géopédologie de Gembloux Agro Bio-Tech. Elle est exprimée en cmolc/kg.

La CEC a été déterminée sur 5,00 g de chaque échantillon. Le protocole détaillé qui a été suivi pour cette manipulation est donné en annexe de ce document. Le principe de cette manipulation est de déplacer les éléments cationiques fixés sur le complexe d'échange par le NH₄⁺ d'une solution d'acétate d'ammonium à pH7. L'excès d'ammonium, c'est-à-dire celui qui n'est pas fixé sur le complexe d'échange, est ensuite éliminé via un lavage du sol à l'éthanol. De la soude à 50% est ensuite utilisée pour déplacer l'ammonium fixé sur le complexe d'échange (le sodium vient déloger l'ammonium). L'ammonium produit se retrouve sous forme d'ammoniac par réaction avec les ions OH⁻. Une distillation de l'échantillon permet alors de récupérer l'ammoniac. Après celle-ci, l'ammoniac réagit avec de l'acide borique et se trouve à nouveau sous forme d'ammonium. Cette quantité d'ammonium qui était fixé initialement sur le sur le complexe d'échange est alors déterminée par titrage à l'HCl.

2.4. Détermination des bases échangeables

La détermination des bases échangeables a été effectuée par spectrophotométrie d'absorption atomique après extraction de 5,00 g d'échantillon par de l'acétate d'ammonium à pH 7. Le dosage des bases échangeables ne pouvant se faire le jour même où ces dernières ont été extraites, 100 µl d'acide nitrique 7 M ont été rajoutés dans les solutions d'extraction qui ont été conservées au frigo. Les résultats obtenus sont en cmolc/kg.

2.5. Calcul du taux de saturation en base et de la saturation du complexe d'échange par un élément

Le taux de saturation en bases a été calculé comme suit :

$$\text{Taux de saturation en Bases} = \frac{\text{Somme des bases}}{\text{CEC à pH 7}} \times 100$$

Il s'agit d'un pourcentage provenant d'un rapport de concentration (mEq/100g). La saturation du complexe par un élément particulier se calcule de la même façon, excepté qu'il s'agit alors de la concentration de l'élément considéré en mEq/100g au numérateur et non de la somme des bases échangeables.

2.6. Détermination du pH

Le pH déterminé est le pH KCl. Cette mesure a été effectuée suivant la norme ISO 10390 dont le rapport sol : KCl 1N est un rapport 1 : 5.

2.7. Détermination de l'électroconductivité, EC

L'électroconductivité a été mesurée suivant la norme ISO 11265 et correspond à un rapport sol : eau de type 1 : 5.

2.8. Estimation de l'électroconductivité de l'extraît de « pâte du sol », ECe

L'estimation de l'électroconductivité qui aurait été obtenue sur base de l'extrait de « pâte de sol » a été calculée via les équations proposées par Sonmez et al. (2008) et sont, pour un sol argileux :

$$ECe = 7,36 * EC - 0,24 \left[\frac{dS}{m} \right]$$

Pour un sol limoneux :

$$ECe = 7,58 * EC + 0,06 \left[\frac{dS}{m} \right]$$

Pour un sol sableux :

$$ECe = 8,22 * EC - 0,33 \left[\frac{dS}{m} \right]$$

2.9. Détermination de la matière organique

La détermination de la matière organique du sol a été réalisée par une méthode dérivée de la norme ISO 14235, la méthode de Walkley-Black.

2.10. Détermination des éléments biodisponibles

La détermination des éléments biodisponibles (P, K, Mg et Ca) a été effectuée par extraction à l'acétate d'ammonium et à l'EDTA à un pH de 4,65. Il s'agit de la méthode de Lakanen et Erviö. Le dosage du K, Ca et Mg a été effectué à l'absorption atomique et celui du P au colorimètre (coloration au jaune).

2.11. Granulométrie

La granulométrie a été mesurée par une méthode dérivée de la norme NF X 31-107.

II.3. Traitement des données

3.1. Traitement primaire

Contrôle qualité

Quelle que soit l'analyse considérée, la qualité des données obtenues en laboratoire est appréciée par le résultat du témoin analysé avec la série considérée. Le témoin utilisé pour chacune des analyses effectuées est le « MRI 2005 0112 ». Les caractéristiques de ce témoin ont été déterminées en interne par le service de Géopédologie de Gembloux Agro-Bio Tech. Pour ce témoin, la valeur de l'analyse considérée est dès lors connue et permet de valider ou non la série d'échantillons analysée avec ce dernier. En effet, si la valeur du résultat obtenu diffère dans des proportions importantes par rapport à celle déterminée en interne, les valeurs de la série d'échantillons doivent être considérées comme suspectes. Il faut dès lors réeffectuer l'analyse. Il n'a cependant pas toujours été possible de refaire les analyses et les données de la série considérée ont alors été supprimées. Les résultats obtenus pour les différentes analyses sont donnés à l'annexe D.

3.2. Proposition et détermination de variables indicatrices.

Une identification visuelle sur base de graphiques représentant la valeur de chacune des variables prises par chacun des profils a été réalisée. L'identification des variables indicatrices

ne se base que sur les caractéristiques des horizons de surface des profils de sols. Les variables indicatrices sélectionnées gardent un sens physique et une cohérence avec la distinction entre les différents types de sols visés.

À la suite de la sélection des variables indicatrices, un arbre décisionnel permettant le classement des sols est proposé. Les valeurs seuils proposées pour chacune des variables indicatrices se veulent les plus cohérentes. Dans la mesure du possible, elles font référence à des seuils couramment utilisés au sein de la WRB ou de la classification simplifiée.

3.3. Cartographie

La première étape préalable à la production d'un modèle de prédiction spatiale est une identification des éventuels outliers et valeurs aberrantes présents au sein du jeu de données. Cette identification a été réalisée pour chaque variable et sur base d'un ensemble de différents outils que sont : des boxplots et histogrammes (avant et après une éventuelle normalisation de variable), des cartes de Voronoï et les nuages de points des semi-variances calculées pour chaque variable d'intérêt.

Les outliers identifiés ont alors été considérés comme suspects au même titre que certaines séries de laboratoire pour lesquelles la valeur du témoin n'a pas été satisfaisante. Le choix de leur maintien ou non au sein du jeu de données s'est basé sur deux critères : 1) une cohérence intrinsèque des valeurs prises par les différentes variables pour le même échantillon, 2) une cohérence spatiale des valeurs prises par l'échantillon en comparaison avec son voisinage et les caractéristiques du milieu.

La normalité des variables a été vérifiée suivant le test de Ryan-Joiner. Dans le cas où la normalité n'était pas vérifiée, une transformation de variable Box-Cox a été réalisée et un test de normalité a été réeffectué sur la variable transformée. La transformation de variable Box-Cox est donnée par les équations suivantes :

$$w_i = \frac{z_i^\lambda - 1}{\lambda} \text{ si } \lambda \neq 0$$

$$w_i = \ln(z_i) \text{ si } \lambda = 0$$

Où, z_i est l'observation i de la variable non transformée z , λ est un paramètre fixé et w_i est l'observation i de la variable z une fois transformée. Le choix de la valeur de lambda utilisée est celle permettant de minimiser l'écart-type de la variable transformée suivant les équations suivantes, où G est la moyenne géométrique des données non transformées :

$$w_i = \frac{z_i^\lambda - 1}{\lambda G^{\lambda-1}} \text{ si } \lambda \neq 0$$

$$w_i = G \ln(z_i) \text{ si } \lambda = 0$$

La construction du modèle de prédiction spatiale a été réalisée sur 80% des observations constituant le jeu de données et ont été sélectionnées aléatoirement. Les 20% d'observations restants ont été utilisés pour valider et déterminer la qualité du modèle de prédiction obtenu.

Dans le cas où l'hypothèse concernant la normalité des observations était vérifiée, l'utilisation de la méthode géostatistique du krigeage avec dérive externe a systématiquement été étudiée.

L'application du krigage ordinaire sur le jeu de données sans retrait de tendance et sur les résidus à la suite du retrait d'une interpolation polynomiale globale d'ordre 1 et 2 a dès lors été envisagée.

En ce qui concerne l'estimation de la fonction $\hat{\gamma}(h)$, soit le semi-variogramme, les modèles circulaire, sphérique, exponentiel, gaussien et stable ont été envisagés. La fonction $\hat{\gamma}(h)$ a alors été optimisée suivant une méthode de cross-validation. Cette méthode permet de minimiser la racine carrée de la moyenne du carré des écarts (RMSE) entre les observations (incluses dans la construction du modèle et non celles constituant le jeu de validation) et les prédictions réalisées par le modèle aux mêmes points.

Le nombre d'observations à devoir inclure pour chaque prédiction en un point donné a également été étudié. Il en est de même en ce qui concerne la définition de secteurs au sein desquelles un nombre minimum d'observations doivent être incluses pour la prédiction d'une variable en un point. À titre d'exemple, la définition de 4 secteurs directionnels, un pour chacune des directions cardinales, a systématiquement été étudiée.

Le choix du modèle de prédiction s'est basé sur celui minimisant le RMSE par rapport au jeu de données de validation (soit les 20% d'observations restants). Le calcul du RMSE est donné par la formule suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}}$$

Où, pour n observations, $\hat{z}(s_i)$ est la valeur de la variable z prédite au point de coordonnées s_i . Dans le cas de modèles présentant un RMSE non significativement différent, le choix s'est porté sur celui minimisant la moyenne des erreurs. Le nombre de semi-variances sur lequel le modèle du variogramme a été construit a également été un critère de sélection dans certain cas. En effet, un nombre trop faible de semi-variances incluses dans le variogramme ne permet pas de déceler une éventuelle anisotropie au sein du jeu de données et pose question quant à la représentativité du modèle obtenu.

Dans le cas où la normalité des observations n'était pas respectée et qu'aucune corrélation spatiale entre les observations n'a pu être détectée, la méthode d'interpolation appliquée a été celle des distances inverses. Il s'agit de la méthode qu'Hengl (2007) suggère de considérer pour de tels cas. L'ordre de la relation avec lequel le poids des observations diminue en fonction de la distance a été optimisé suivant une méthode de cross-validation. Le nombre d'observations à devoir inclure pour chaque prédiction en un point donné ainsi que la considération de secteurs directionnels ont également été étudiés.

La classification des différents types de sols sur base de la cartographie des variables d'intérêts nécessite la conversion des surfaces de prédiction obtenues sous forme de raster. Dans ce cadre, la détermination de la résolution d'un pixel peut être calculée sur base de la relation donnée par McBratney et al. (2003) permettant le passage d'une échelle cartographique traditionnelle (sur format papier) à cette résolution. Cette relation, en lien avec la plus petite surface distinguable à l'œil nu, est la suivante :

$$\text{Échelle cartographique} = \frac{1m}{\text{Longueur de 1000 pixels}}$$

La résolution d'un pixel pour une échelle cartographique 1/250 000 est donc de 250 mètres. Dans le cadre de ce travail, la taille d'un pixel a été fixée à 200 mètres, soit un peu moins que la résolution d'un pixel calculée par la relation de McBratney et al. (2003). Cette distance de 200 mètres à l'avantage de correspondre à la plus petite distance fixe considérée initialement entre deux échantillons du plan d'échantillonnage établi.

Les cartes représentant l'occurrence de différents types de sols ont été obtenues sur base des différentes cartes des variables discriminantes réalisées. La valeur de chaque pixel de chacune de ces cartes a été extraite. Ensuite, pour chaque pixel, la classification considérée est appliquée et une valeur codante pour la classe concernée lui est attribuée.

L'ensemble des différentes productions cartographiques a été produit via l'utilisation du software Arcmap 10.3.1®. En particulier, l'outil Geostatistical Analyst a été utilisé pour la réalisation des différentes méthodes de prédictions spatiales utilisées dans ce travail.

III. Résultats

III.1. Description des profils de sols

L'identification des différents profils ainsi que leurs principales caractéristiques sont reprises au sein du tableau 3. Les résultats analytiques concernant les profils de sols sont, quant à eux, donnés aux tableaux 4 et 5. Pour chacun des profils de sols une description détaillée est effectuée aux points 1.1. à 1.8. de cette section. La présentation des profils est effectuée sur base d'un gradient de développement pédogénétique, en considérant la gradation de l'expression de la salinité comme un développement pédogénétique en soi. Ce gradient de salinité est identifié sur base des termes taxonomiques attribués à chaque profil (et dès lors de l'échelle de valeurs attenantes à ces termes), et non sur une observation directe de certains paramètres mesurés. Il peut être résumé par la série de type de sol suivant, du moins salin au plus salin : sols non salins – sols Protosalic et Sodic – Salic et Sodic – Solonchaks et Sodic – Solonchaks Hypersalic et Sodic. Soit plus précisément et sur base des sols identifiés, du moins développé au plus développé : Fluvisols – Cambisols – Calcisols – Sodic Cambisols (Protosalic) – Abruptic Lixisols (Argisodic, Salic) – Sodic Solonchaks – Sodic Solonchaks (Hypersalic).

Tableau 3. Résumé des observations principales concernant la caractérisation des profils. Pour chacun des profils, l'altitude, la géomorphologie, la classification et l'horizon diagnostique ainsi que la profondeur à laquelle ce dernier a été observé (profondeur à laquelle l'horizon démarre) sont repris dans ce tableau.

Altitude (m)	Géomorphologie	Profil	Classification (WRB 2014)	Horizon diagnostique	Profondeur (cm)
2708	Glacis (partie distale)	San Benito	Sodic Cambisols (Protosalic)	Cambic	20
2713	Playa	Aramasi	Sodic Solonchaks (Hypersalic)	Salic	0
2714	Ancien cône de déjection (limite entre la partie centrale et distale)	Santa Ana	Sodic Solonchaks	Salic	0
2717	Dépression lagunaire basse (limite avec la partie distale d'un glacis)	Cliza	Abruptic Lixisols (Argisodic, Salic)	Argic	20
2720	Dépression lagunaire basse (limite avec la partie centrale d'un glacis)	Arani	Sodic Cambisols (Protosalic)	Cambic	30
2743	Glacis (partie distale)	Tarata	Calcisols	Calcic	20
2758	Cône de déjection actif	Punata	Fluvisols	Aucun	Non relevant
2874	Glacis (partie proximale)	Cuchumuela	Cambisols	Cambic	18

Tableau 4. Données analytiques concernant les profils de San Benito, Santa Ana, Punata et Arani.

Profile	Soil fraction			Bioavailable elements			Exchangeable elements			Other features			Salinity/Sodicity								
	Horizon	Depth [cm]	Clay %	Silt %	Sand %	Textural class	P [mg/100g]	K [mg/100g]	Mg [mg/100g]	Ca [mg/100g]	Na [méq/100g]	K [méq/100g]	Mg [méq/100g]	Ca [méq/100g]	CEC [cmolc/kg]	TOC %	Base saturation %	pH dS*m^-1	EC dS*m^-1	Ece dS*m^-1	ESP %
San Benito																					
A	0-20	22,2	53,7	24,1	ALI	2,0	3,8	14,1	11,0	14,348	0,104	0,983	4,45	10,6	188	0,5	7,82	2,86	21,76	135,4	8,7
B	20 - 48	27,7	59,2	13,1	ALI	4,6	5,6	13,9	22	14,022	0,157	0,714	6,40	12,8	166	0,3	9,52	1,32	10,08	109,6	7,4
C	48 - 80	24,7	57,8	17,5	ALI	9,8	6,6	9,5	205	11,296	0,185	0,507	6,35	10,9	168	0,1	9,40	0,98	7,48	103,6	6,1
2C1	80 - 110	39,8	54,4	5,8	ALO	10,8	20,2	55,3	925	15,061	0,602	1,788	10,50	18,6	150	0,3	9,08	1,16	8,88	81,0	6,1
2C2	110 - 150+	37,2	61,1	1,6	ALI	10,5	20,1	47,6	702	15,952	0,594	1,828	12,35	15,4	200	0,2	9,40	1,34	10,20	103,6	6,0
Santa Ana																					
Ap	0-19	19,3	54,9	25,8	ALI	5,9	8,5	12,2	166	20,978	0,228	0,629	5,75	9,3	297	0,3	9,77	3,74	28,43	225,6	11,7
AB	19 - 34	20,3	55,3	26,3	ALI	3,5	5,8	13,1	161	16,222	0,155	0,720	5,60	9,0	252	0,3	9,85	2,88	21,91	180,2	9,1
B	34 - 48	23,6	51,4	25,0	AL	1,4	4,6	18,6	206	17,130	0,130	0,908	4,95	9,3	249	0,2	9,89	2,39	18,19	184,2	10,0
C1	48 - 106	15,4	47,8	36,9	LSL	1,3	2,6	10,0	103	12,761	0,072	0,564	3,50	6,4	264	0,1	9,99	1,77	13,49	199,4	9,0
2C2	106 - 132	11,5	24,3	64,3	LSP	3,6	3,2	8,1	104	8,978	0,088	0,439	2,30	3,2	369	0,0	9,87	1,05	8,28	280,6	7,7
Punata																					
A	0-20	18,3	50,4	31,3	ALI	0,7	9,0	17,0	89	0,1	0,2	1,5	4,1	9	66	0,9	5,60	0,03	0,31	1,1	0,1
C	20 - 30	10,4	16,9	72,7	SA	0,9	3,5	8,3	41	0,1	0,0	0,7	2,0	4	69	0,3	6,18	0,05	0,06	3,7	0,1
Arani																					
Ap	0-30	28,5	59,7	11,8	ALI	57,7	81,6	62,7	390	0,904	2,504	4,062	11,15	124	1,2	7,90	0,19	1,50	6,0	0,3	
Bw	30 - 69	20,0	46,0	34,0	AL	1,7	11,4	28,9	117	1,179	0,270	2,187	4,85	8,3	102	0,3	7,58	0,12	1,00	14,2	0,6
C1	69 - 91	22,1	45,1	32,9	AL	2,6	5,5	34,1	292	1,396	0,143	2,304	7,90	9,3	126	0,2	8,08	0,38	2,95	15,0	0,6
C2	91 - 140+	27,4	46,9	25,7	A	8,3	8,6	42,1	391	10,191	0,276	2,204	7,55	12,8	158	0,1	8,39	0,72	5,54	79,6	4,6

Tableau 5. Données analytiques concernant les profils de Cuchumuela, Aramasi, Cliza et Tarata.

Profile	Soil fraction			Bioavailable elements			Exchangeable elements			Other features			Salinity/Sodicity								
	Depth [cm]	Clay %	Silt %	Sand %	Textural class	P [mg/100g]	K [mg/100g]	Mg [mg/100g]	Ca [mg/100g]	Na [mé/100g]	K [mé/100g]	Mg [mé/100g]	Ca [mé/100g]	CEC [cmolc/kg]	Base saturation %	TOC %	pH	EC dS*m ⁻¹	Ee µS*m ⁻¹	ESP %	SAR %
Cuchumuela																					
Ap	0-18	26,7	32,8	40,5	A	1,3	27,5	21,6	160	0,1	0,9	1,9	6,8	12,5	76	1,1	5,9	0,14	0,79	0,7	0,0
Bw	18 - 70	63,5	16,3	20,1	ALS	0,0	52,1	59,2	249	0,5	1,8	5,1	11,8	30	64	0,3	6,02	0,10	0,51	1,7	0,2
BCc	70 - 94	49,2	36,0	14,9	ALS	15,7	120,7	84,7	637	1,0	ND	6,8	27,1	40	87	0,1	7,41	0,18	1,10	2,5	0,2
2Ck	94 - 130+	5,9	65,9	28,3	LS	4,2	130,1	155,6	4176	1,0	4,1	6,5	31,7	27,8	155	0,1	7,55	0,24	1,88	3,6	0,2
Aramasi																					
A	0-11	33,4	63,8	2,8	AL	13,5	50,4	12,9	365	57,478	1,554	0,414	7,45	19,2	348	0,5	9,92	9,09	68,98	299,3	29,0
B	11-25	25,2	70,4	4,5	LLO	13,0	26,9	9,8	305	38,496	0,830	0,375	6,60	13,1	353	0,3	10,13	6,40	48,59	293,9	20,6
C1	25 - 50	18,6	74,9	6,6	LLO	8,7	17,9	6,0	176	21,391	ND	0,306	5,70	10,8	254	0,2	10,08	3,51	26,68	198,1	12,3
C2	50 - 76	33,0	62,2	4,8	AL	14,6	26,1	9,6	414	27,778	0,799	0,444	8,75	16,4	230	0,3	10,08	3,65	27,74	169,4	13,0
2C3	76 - 120+	53,6	37,7	8,8	ATL	19,4	31,3	42,7	807	23,657	1,129	1,539	12,00	21,6	177	0,2	9,23	1,73	12,49	109,5	9,1
Cliza																					
A	0-20	18,3	40,4	41,3	AL	2,1	17,7	11,8	228	3,821	0,485	0,777	8,45	8,0	169	0,4	8,36	0,45	3,38	47,8	1,8
Bl	20 - 39	41,5	46,2	12,4	AL0	30,0	65,3	18,6	520	16,061	2,006	0,998	13,85	22,4	147	0,3	9,19	1,24	9,42	71,7	5,9
Bl2	39 - 84	37,8	46,6	15,7	AL0	14,1	53,1	10,9	117	13,313	1,607	0,593	3,25	13,8	136	0,4	9,52	1,27	9,67	96,5	9,6
C	84 - 148+	23,7	41,8	34,5	AL	6,0	30,4	19,7	198	12,452	0,872	1,091	5,80	8,6	235	0,1	9,78	1,73	13,19	144,8	6,7
Tarata																					
Ap	0-20	24,6	42,2	33,3	AL	13,6	43,5	31,6	1002	0,396	1,272	2,000	29,70	16,2	206	1,0	7,68	0,16	1,29	2,4	0,1
AB	20 - 36	25,1	41,5	33,4	A	4,0	32,1	36,9	1342	0,170	0,976	1,998	28,20	15,0	209	0,8	7,68	0,25	1,97	1,1	0,0
B	36 - 93	10,8	65,1	24,1	LS	2,8	18,4	46,1	2295	0,071	0,504	2,223	35,35	14,0	273	0,1	7,75	0,10	0,85	0,5	0,0
C1	93 - 110	19,7	54,8	25,5	AL	8,4	14,4	33,7	1291	0,054	0,401	2,026	25,75	11,2	252	0,0	7,86	0,09	0,78	0,5	0,0
C2	110 - 150+	19,5	49,5	31,0	AL	1,8	15,0	36,2	1220	0,107	0,441	2,355	24,65	12,5	220	0,0	7,91	0,10	0,81	0,9	0,0

1.1.Punata

Le profil de Punata se situe au nord-est de la vallée à 2758 mètres d'altitude. La pente à cet endroit est faible et est comprise entre 1 et 2%. La végétation rencontrée à l'emplacement de la fosse pédologique est de type herbacé. De jeunes arbres ont également été plantés. À proximité directe du profil, de petits buissons épineux, arbustes ainsi que des Cactaceae sont présents. À la surface du sol, des graviers, cailloux et pierres sont communément retrouvés et couvrent 5 à 15% de la surface du sol. À une trentaine de mètres du profil, des traces d'érosion laissées par le passage de cours d'eau intermittents et temporaires sont observées. En effet, à l'extrémité nord-est de la vallée, un cours d'eau intermittent a incisé plus en profondeur les montagnes. Sur base de la carte des cours d'eau secondaires du *Servicio Nacional de Hidrografía Naval* (2016), ce cours d'eau intermittent prend naissance à près de 3000 mètres d'altitude, soit plus de 240 mètres plus haut que l'altitude du profil. Lors de la saison des pluies, ce derniers collecte l'ensemble des ruissellements des montagnes situées en amont et arrive dans la *Valle Alto*. À cet endroit, les images satellites montrent que celui-ci se scinde en plusieurs cours d'eau, aucune incision profonde et unique n'étant observée (voir figure 15). Sur base de ces caractéristiques, ce cours d'eau intermittent provenant du nord-est de la vallée peut être défini comme un torrent. L'élément géomorphologique caractérisant cet environnement est dès lors, comme l'a cartographié Metternicht et al. (1997), un cône de déjection actif.

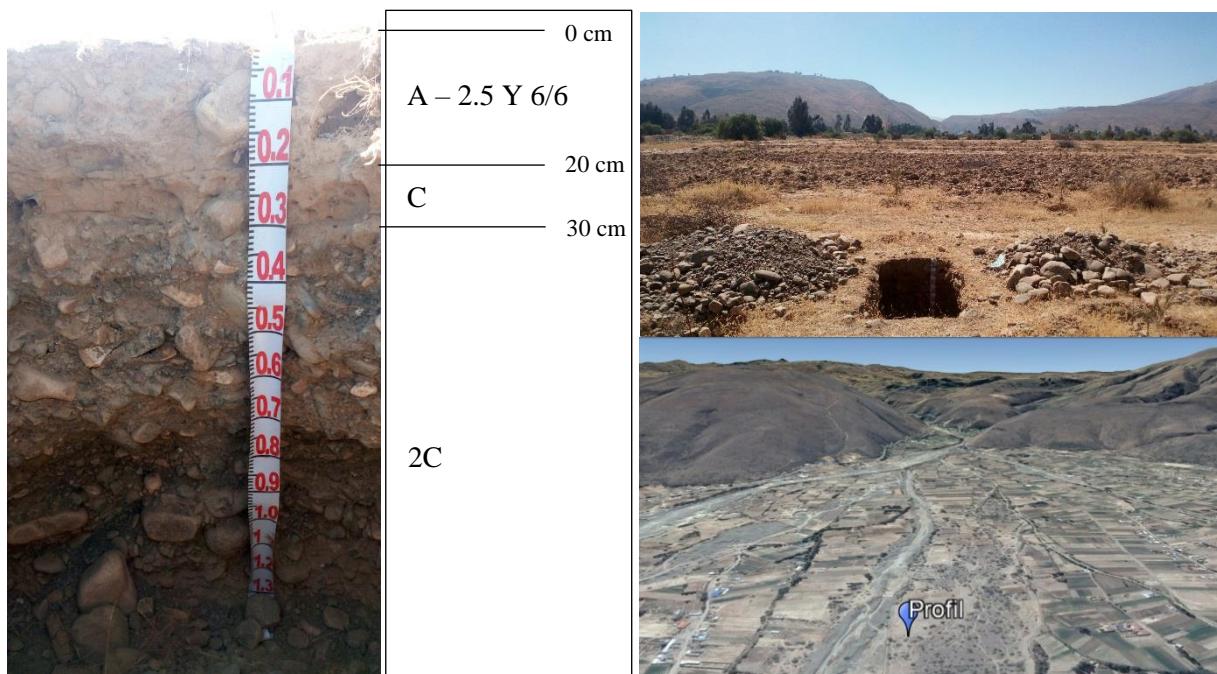


Figure 12. À gauche, photographie du profil de Punata et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite en relief (Google Earth Pro 2017) localisant le profil. Les traces laissées par l'érosion due aux cours d'eau intermittents sont identifiables (courbes gris clair provenant du bas des versants des montagnes).

L'ouverture du profil de Punata est marquée par la présence très importante de graviers, de cailloux et de pierres (voir figure 15). Ceux-ci sont retrouvés tout au long du profil. Ils sont nombreux jusqu'à 30 cm de profondeur (soit pour les deux premiers horizons) et sont ensuite dominants sur tout le reste du profil. Le profil est dès lors globalement peu développé. Trois horizons sont distingués : A, C et 2C.

Le premier est l'horizon A (de 0 à 20 cm) où des racines inférieures à 5 mm de diamètre sont observées, sans pour autant que ces dernières soient abondantes. La structure de cet horizon est granulaire à polyédrique. On constate également un enrichissement en matières organiques dans cet horizon en comparaison au second, le COT étant dans ces horizons de 0,9 % pour l'horizon A et 0,3 % pour l'horizon C. Cet horizon C (de 20 à 30 cm) se distingue du premier par une texture et une structure différentes. En effet, la fraction sableuse de cet horizon C est égale à près de 73% alors qu'elle n'est que de 31% pour l'horizon A. La structure est quant à elle qualifiée de particulaire à massive. L'horizon 2C (de 30 à 140 cm) est quant à lui caractérisé par la dominance de graviers, de cailloux et de pierres. On relèvera que cet horizon est légèrement humide, les horizons A et C étant secs.

Les valeurs prises par la CEC sont petites : 4 cmol_c kg⁻¹ pour l'horizon A et 9 cmol_c kg⁻¹ pour l'horizon C (voir tableau 4). Le pH est quant à lui de 5,6 pour A et de 6,2 pour C. Le taux de saturation en bases est élevé et égal à 66% pour A et 69% pour C. Le calcium est prépondérant sur le complexe d'échange puisque celui-ci occupe 45% du complexe d'échange pour A et 50% pour C.

Concernant les caractères salin, sodique et alcalin de ce sol, ceux-ci ne se sont pas exprimés. En effet, les trois variables caractéristiques (ECe, ESP et pH) sont largement en-dessous des seuils représentatifs d'une salinité (au sens large).

L'ensemble de ces observations est caractéristique d'un sol jeune, peu altéré et de dépôts alluviaux. En ce qui concerne les trois variables caractéristiques de la salinisation, aucune d'entre elles ne dépasse les valeurs seuils la caractérisant. Ce sol n'est donc pas salin. Suivant la classification WRB (2014) il s'agit d'un Fluvisols. En effet, le pourcentage volumique de terre fine sur les 75 premiers centimètres étant supérieur à 20%, ce dernier ne peut être considéré comme un Leptosols. L'origine du matériau parental et le très faible développement du profil le classe donc parmi les Fluvisols. L'abréviation utilisée dans ce travail est « Flu ».

1.2.Cuchumuela

Le profil de Cuchumuela se situe à l'extrémité sud-est de la zone d'étude, à 2874 mètres d'altitude. Comme le montre la vue satellite en relief présentée à la figure 16, le versant des montagnes est proche de ce profil. En effet, au sud du profil le début des versants est rencontré à moins de 300 mètres et à environ 650 mètres en direction de l'est nord-est. Les montagnes visibles sur la photographie illustrant le paysage à proximité du profil (voir figure 16) sont quant à elles distantes de plus de 1,8 km et se situent à l'ouest du profil. Ce dernier s'inscrit dans une pente générale de 6 – 7 % mais certaines parcelles semblent avoir été terrassées. Comme l'ont cartographié Metternicht et al. (1997), la géomorphologie rencontrée à cet endroit est caractéristique de la partie proximale d'un glacis.

En lieu et place du profil, il s'agit d'une parcelle agricole allouée à la culture du maïs et du blé mais actuellement sous couvert herbacé. À la surface du sol, des graviers et cailloux couvrent de 2 à 5% de sa surface. De fines fentes de surface (moins d'1 cm de largeur et de 2 cm de profondeur) espacées entre elles d'une distance comprise entre 0,5 et 2 m sont également observées. On remarque notamment la présence de taches noires sur la photo illustrant le paysage à proximité du profil (voir figure 16). Il s'agit en réalité d'endroit ou le couvert herbacé a brûlé. Le passage d'un feu à cet endroit n'est cependant pas en lien avec une pratique agricole et n'est donc pas répété périodiquement.

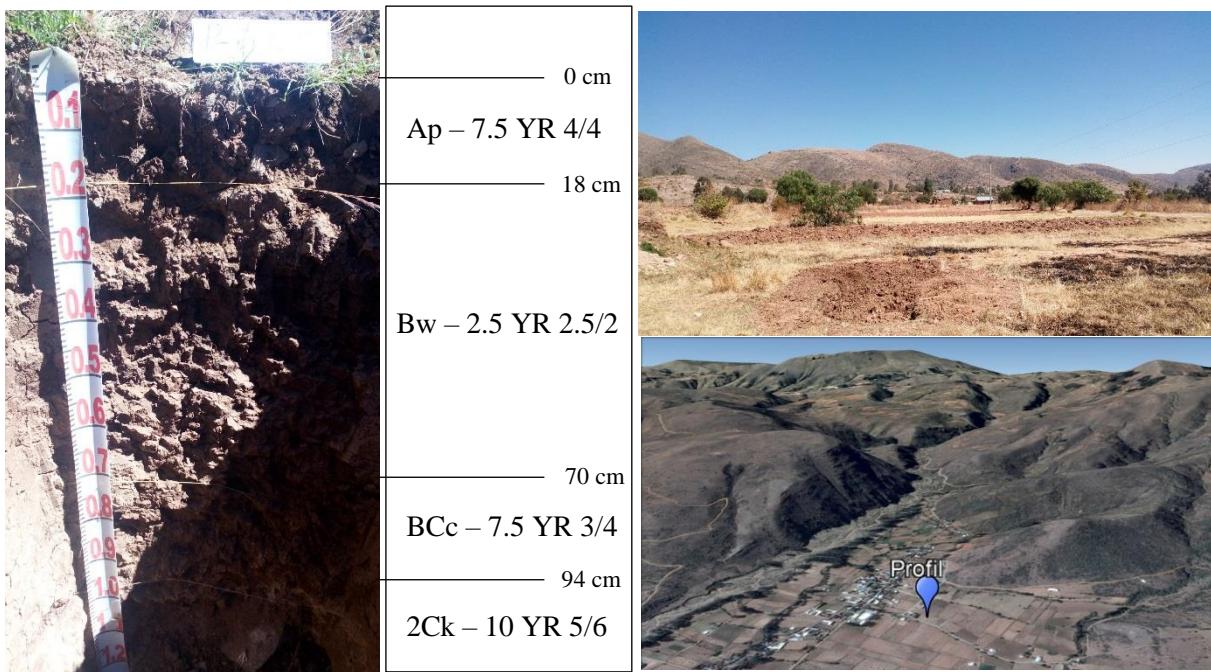


Figure 13. À gauche, photographie du profil de Cuchumuela et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite en relief (Google Earth Pro 2017) localisant le profil.

Cinq horizons ont été identifiés lors de la description du profil et sont, depuis la surface, les horizons Ap, Bw, BCc, et 2Ck (voir figure 16). Seul l'horizon 2Ck est légèrement humide lors de la description, les 3 autres horizons étant secs. Au sein des horizons Ap, Bw et BCc, des graviers et cailloux sont retrouvés. Ceux-ci occupent maximum 5% du volume de chacun des horizons.

L'horizon Ap possède une structure polyédrique à granulaire. Un réseau de racines dont le diamètre est compris entre 0,5 et 5 mm est présent et bien développé. Des racines sont également retrouvées dans l'horizon Bw et BCc, tous deux possédant une structure polyédrique. Les horizons Ap et Bw ont une consistance légèrement dure, alors qu'elle est dure pour les horizons BCc et 2Ck. Au sein des horizons BCc et 2Ck, des carbonates sont retrouvés sous forme de concrétion. Le test à l'HCl 1M n'amène cependant pas au développement d'une effervescence forte formant une mousse. Le pourcentage en carbonates est donc évalué comme étant inférieur à 15%.

On observe également un changement abrupt de texture entre les horizons BCc et 2Ck. En effet, le pourcentage d'argiles passe de 49,2% au sein de BCc à 5,9% au sein de 2Ck. Le pourcentage de limons granulométriques égal à 65,9% au sein de 2Ck est très élevé en comparaison avec le reste du profil puisqu'il est égal à 32,8%, 16,3% et 36,0% pour Ap, Bw et BCc respectivement. Ce changement abrupt de texture entre l'horizon BCc et 2Ck ainsi que la non identification de graviers et cailloux en 2Ck alors que ceux-ci sont retrouvés dans les 3 premiers horizons amènent à considérer une discontinuité lithic.

Concernant la CEC, ce profil possède les plus grandes valeurs de CEC en comparaison avec les autres profils caractérisés. Ces valeurs sont comprises entre 12,5 et 40 cmol_c kg⁻¹ (voir tableau 5). Les valeurs les plus importantes, 30 et 40 cmol_c kg⁻¹, sont observées dans les horizons Bw et BCc respectivement, tous deux riches en argiles. Une accumulation en matière organique au sein du premier horizon Ap est également observée, le COT étant égal à 1,1%. Les taux de

saturation en bases sont quant à eux élevés, variant pour les trois premiers horizons entre 64 et 87%. L'horizon 2Ck possède en ce qui le concerne un taux de saturation de 155%. On remarque que, peu importe les horizons, le calcium échangeable explique ces valeurs importantes. En effet, le rapport entre la CEC et le calcium échangeable varie de 39 à 114% suivant les horizons. Le pH est quant à lui inférieur à 7 pour les premiers horizons, soit égal à 5,9 pour Ap et 6,0 pour Bw, et supérieur à 7 pour les deux derniers horizons, soit 7,4 pour BCc et 7,5 pour 2Ck.

Pour ce qui est du caractère salin de ce sol, au vu des valeurs prises par l'ECE et l'ESP, celui-ci n'est ni caractérisé par une salinisation ni par une sodisation. Les plus hautes valeurs d'ECE et d'ESP observées sont égales à $1,88 \text{ dS m}^{-1}$ et 3,6% respectivement, soit bien en-dessous des seuils caractéristiques.

En ce qui concerne l'identification d'horizon diagnostique, malgré l'augmentation importante d'argiles de Ap à Bw, l'horizon Bw ne peut être qualifié d'Argic. En effet, dans le cas où l'horizon enrichi en argiles est directement situé sous un horizon de labour Ap, la WRB (2014) précise que l'origine illuviale des argiles doit être clairement établie. L'enrobage par les argiles de pores ou d'agrégats n'ayant pas été observé au sein de cet horizon, les critères d'évidence d'illuviation ne sont pas remplis. Par conséquent, l'horizon ne peut être qualifié d'Argic et noté comme étant un horizon Bt. Il rencontre cependant les critères d'un horizon Cambic.

En suivant la clef d'identification de la WRB (2014), l'absence d'identification d'un horizon Argic exclut l'appartenance de ce sol au groupe des Luvisols. Le sol caractérisé est dès lors un Cambisols. L'abréviation utilisée dans ce travail est « Cam ».

1.3.Tarata

Le profil de Tarata est situé au sud-ouest de la *Valle Atlo* à une altitude de 2743 mètres. À cet endroit, la pente est très faible et comprise entre 1 et 2%. Il prend place sur un terrain agricole alloué à la culture du maïs. On retrouve à proximité une végétation de type herbacé ainsi que de petits buissons et quelques arbres (voir figure 17). À la surface du sol, des graviers et cailloux sont présents en très faible quantité, ces derniers couvrant moins de 2% de la surface du sol. De fines fentes (moins de 1 cm de largeur) et de profondeur moyenne (supérieure à 2 cm mais inférieure à 10 cm) sont également observées. Celles-ci sont modérément espacées l'une de l'autre, soit espacées de 0,5 à 2m. En accord avec Metternicht et al. (1997), cet endroit est caractéristique de la partie distale d'un glacis.

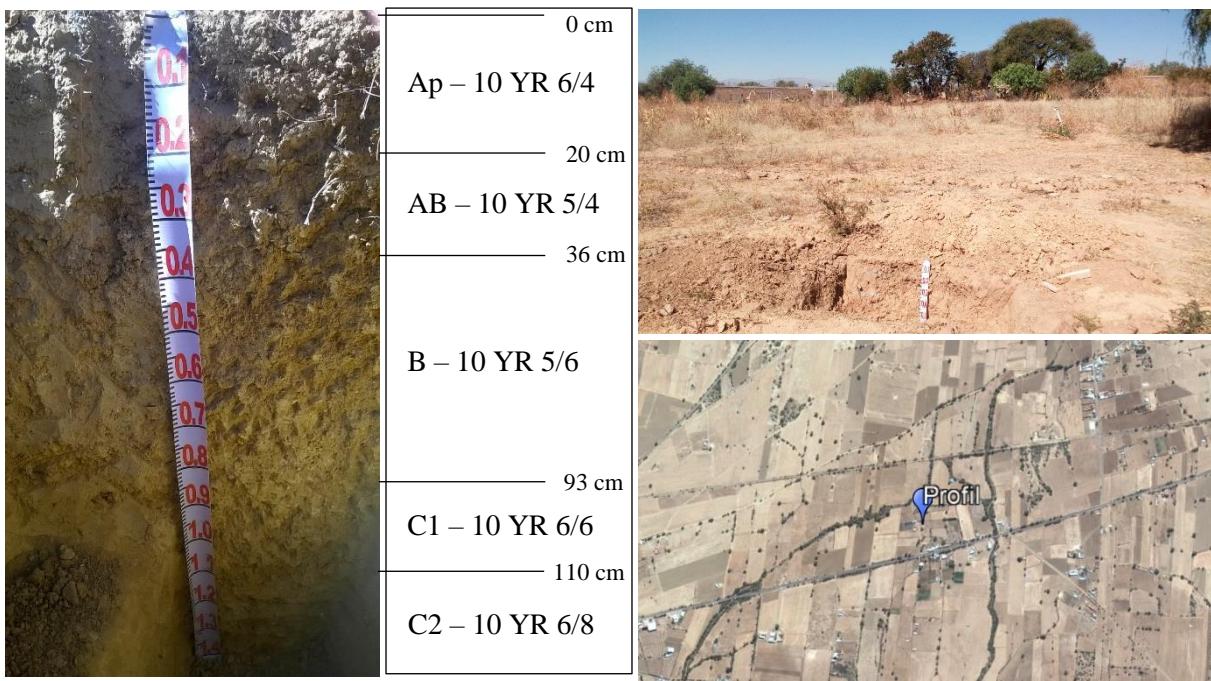


Figure 14. À gauche, photographie du profil de Tarata et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil.

Cinq horizons ont pu être identifiés et sont, en partant de la surface, les horizons Ap, AB, B, C₁, et C₂ (voir figure 17). Chacun de ces horizons étaient secs lors de la description du profil. Globalement, le profil de Tarata est peu développé.

Le premier horizon Ap (de 0 à 20 cm) est caractérisé par une structure granulaire et la présence de nombreuses racines de 0,5 à 5mm de diamètre. Le second horizon AB (de 20 à 36 cm) se distingue du premier par un contenu en carbonates estimé entre 10 et 25 %, la réaction à l'HCl 1M étant importante et l'effervescence créée développant une mousse. Ces carbonates sont présents au sein de cet horizon sous la forme d'une poudre dispersée. La consistance de l'horizon AB est légèrement plus dure que l'horizon Ap, mais la présence de racines de 0,5 à 5 mm est identique à celle de l'horizon Ap. La structure est quant à elle granulaire à polyédrique. Le troisième horizon B (de 36 à 93 cm) est également caractérisé par une effervescence importante après réaction à l'HCl 1 M, amenant à estimer le contenu en carbonates entre 10 et 25 %. Ces derniers sont également présents au sein de cet horizon sous la forme d'une poudre dispersée. La structure est de type polyédrique. Le quatrième et cinquième horizon, respectivement C₁ (de 93 à 110 cm) et C₂ (de 110 à 150 cm), sont, quant à eux, caractérisés par une structure massive. La sous-division de l'horizon C a été effectuée suite à une différence de couleur et à la présence quelque peu marquée de graviers en C₂.

Les valeurs de CEC développées par le profil sont comprises entre 11,2 et 16,2 cmol_c kg⁻¹ (voir tableau 5). Le pH varie quant à lui entre 7,7 et 7,9. Le taux de saturation en bases est très élevé et est compris entre 206 et 273 %. Ces taux élevés s'expliquent par les valeurs importantes observées pour le calcium échangeable. En effet, le rapport entre le calcium échangeable et la CEC varie, suivant les horizons, entre 183 et 253 %.

En ce qui concerne le caractère salin de ce sol, ce dernier n'est absolument pas marqué. La valeur d'ECe maximale observée est de 1,97 dS m⁻¹ au sein de l'horizon AB et est dès lors en-dessous du seuil caractéristique. En rapport avec la sodisation, les valeurs d'ESP calculées sont

très faibles et ne dépassent pas 2,4%. Il s'agit d'ailleurs du profil caractérisé présentant les plus petites valeurs d'ESP. Ces valeurs sont donc, bien entendu, inférieures à tout seuil caractérisant ce processus.

D'après la classification de la WRB (2014), les horizons AB et B réunissent les critères d'un horizon Calcic. Il s'agit des seuls horizons diagnostiques pour ce profil, amenant dès lors en suivant la clef de la WRB (2014) à classer ce sol comme un Calcisols. L'abréviation utilisée dans ce travail est « Cal ».

1.4.Arani

Le profil d'Arani se situe dans la partie sud-est de la *Valle Alto*, à une altitude de 2720 mètres. Il est localisé à proximité de ce qui apparaît sur l'image satellite comme étant la plus grande efflorescence saline de la vallée (voir figure 18) ; efflorescence au sein de laquelle le profil d'Aramasi a été ouvert. La pente rencontrée à cet endroit est d'un peu moins de 2%. Metternicht et al. (1997) caractérisent cet endroit comme une dépression lagunaire basse. La fosse pédologique a été ouverte sur une parcelle agricole dédié à la culture du maïs mais où un couvert herbacé est actuellement présent. À la surface du sol, des graviers et cailloux sont retrouvés en faible quantité, ceux-ci couvrant moins de 2% de la surface du sol. De fines fentes (moins de 1 cm de largeur) de surface (moins de 2 cm de profondeur) sont également observées. Celles-ci sont bien espacées l'une de l'autre, une distance de 2 à 5 mètres étant observée entre chacune d'elles. On remarque aussi la présence d'une très faible efflorescence saline, couvrant au maximum 2% de la surface du sol.

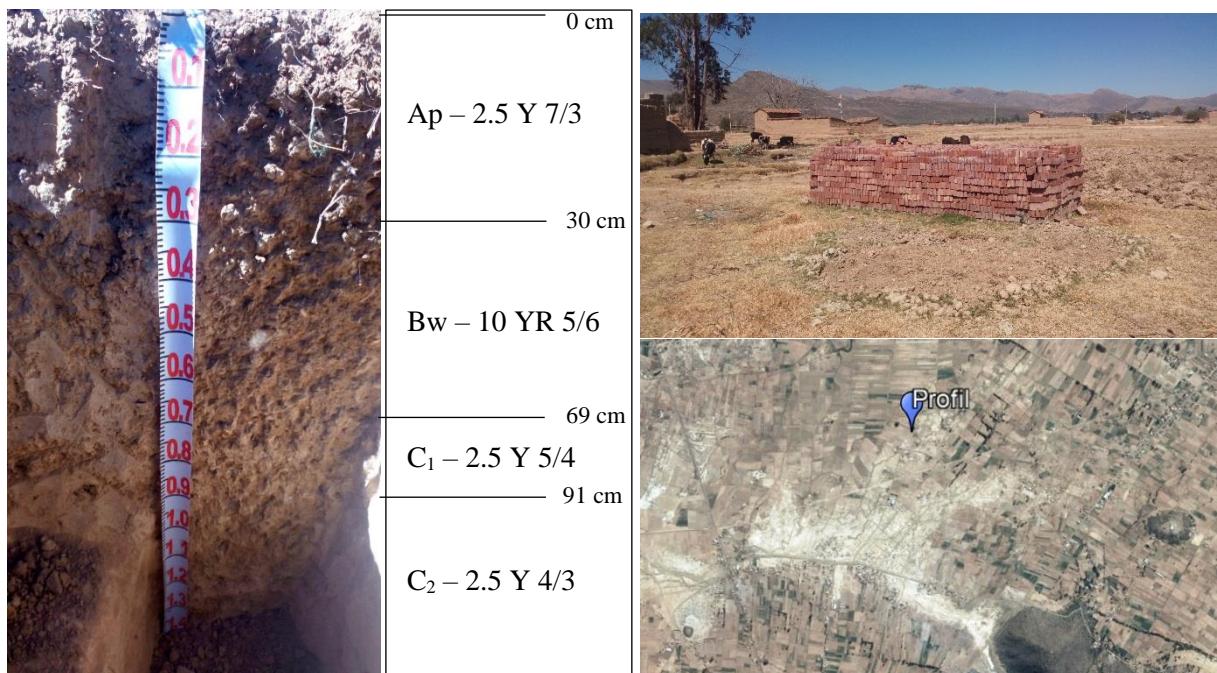


Figure 15. À gauche, photographie du profil d'Arani et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil. On constate que le profil se situe à moins de 500 de mètres d'une efflorescence saline marquée (tache blanche sur l'image satellite).

Quatre horizons distincts ont été identifiés pour le profil d'Arani et sont, en partant de la surface, les horizons Ap, Bw, C₁ et C₂ (voir figure 18). Lors de la caractérisation du profil, les horizons Ap et Bw étaient secs alors que les horizons C₁ et C₂ étaient tous deux humides. Dès l'horizon

Bw, des graviers et cailloux sont retrouvés au sein du profil, mais en faible quantité, ceux-ci représentant moins de 2% du volume au sein de chacun de ces horizons.

L'horizon Ap possède une structure polyédrique et des racines dont le diamètre varie de 0,5 à 5 mm y sont communément présentes. Des racines sont également présentes au sein du deuxième horizon (Bw) mais la structure de ce dernier est moins développée et s'approche plus d'une structure massive qui caractérise les horizons C₁ et C₂. Les horizons Bw et C₁ sont notamment caractérisés par une faible réaction à l'HCl 1M ne créant aucune effervescence. L'horizon C₂ se distingue de C₁ par une couleur d'une valeur d'une unité inférieure à C₁ et la présence de quelques taches d'oxydation.

Les valeurs de la CEC sont comprises entre 8,3 et 15,0 cmol_c kg⁻¹ (voir tableau 4). On constate un enrichissement important en matières organiques au sein de l'horizon Ap, le COT étant égal à 1,2%. Il s'agit de la valeur la plus élevée en comparaison avec les autres profils caractérisés. Le pH est supérieur à 7 et augmente avec la profondeur. La plus petite valeur est égale à 7,9 pour Ap et la plus grande, pour C₂, est égale à 8,4. Le taux de saturation en base est supérieur à 100% sur l'ensemble du profil. Ces taux de saturation en bases très élevés s'expliquent par des valeurs en calcium échangeable importante. En effet, la calcium échangeable occupant de 58 à 85% du complexe d'échange. Pour l'horizon C₂, on constate cependant que le sodium échangeable est plus important que le calcium échangeable, les valeurs étant respectivement de 10,2 meq/100g et de 7,6 meq/100g.

Concernant la salinité, aucune valeur seuil caractéristique n'est dépassée. Aucun horizon Salic n'est dès lors diagnostiqué. L'ECe est cependant supérieure à 4 dS m⁻¹ au sein du dernier horizon commençant à moins de 100 cm de la surface du sol. Dans ce cas, le qualificatif supplémentaire Protosalic peut être utilisé. L'ESP est quant à lui supérieure à 15% pour les deux derniers horizons. Toutefois, aucun horizon Natric ne peut être caractérisé, la structure des horizons C₁ et C₂ faisant défaut. Le qualificatif Sodic est alors d'application au vu des valeurs prises par l'ESP au sein de ces horizons.

D'après la classification de la WRB, ce sol est un Cambisols. L'absence de diagnostique d'un horizon Argic à la suite de critères non remplis tels que l'augmentation relative d'argiles entre deux horizons ou la marque d'évidences d'illuviation (comme un enrobage partiel de la porosité) excluent la classification de ce profil dans d'autre groupe de sols. L'horizon Bw remplit toutefois les critères d'un horizon Cambic. Il s'agit donc d'un Sodic Cambisols (Protosalic). L'abréviation utilisée dans ce travail est « SCamP A ».

1.5.San Benito

Le profil de San Benito est situé au nord de la Valle Alto à une altitude de 2708 mètres (voir figure 19). À cet endroit, la pente est très faible (moins de 1%). Metternicht et al. (1997) qualifient cet environnement comme la partie distale d'un glacis. La végétation rencontrée en lieu et place du profil est herbacée et éparses, laissant une surface de sol nu importante. Aucune utilisation particulière de ce terrain n'est à relever, mais on notera la présence d'une fabrique de brique à une vingtaine de mètres du profil. À la surface du sol des graviers et cailloux sont rencontrés en très faible quantité, couvrant moins de 2% de la surface du sol. On distingue également de fines fentes (moins de 1 cm de largeur) de surface (moins de 2 cm de profondeur) modérément espacées (distantes l'une de l'autre de 0,5 à 2 m).

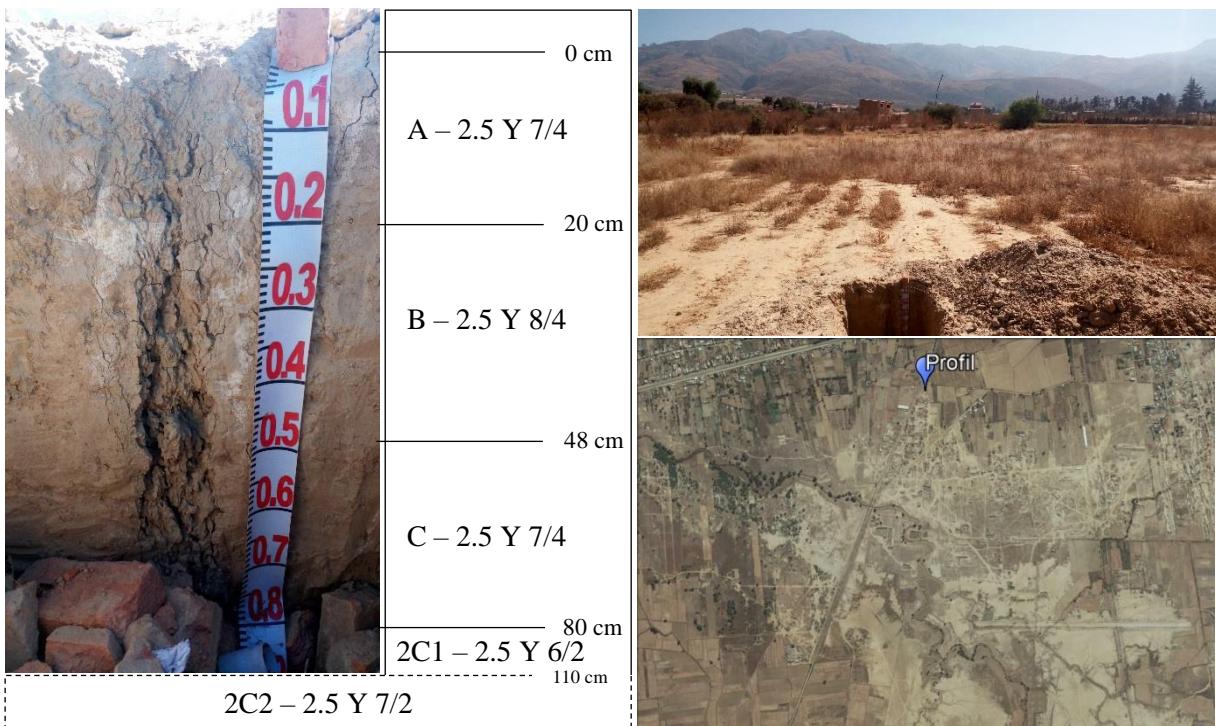


Figure 16. À gauche, photographie du profil de San Benito et caractéristiques principales des horizons le constituant. Les pointillés représentent le dernier horizon identifié non visible sur la photographie. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut), et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil.

Cinq horizons ont été identifiés et sont, en partant de la surface, les horizons A, B, C, 2C₁ et 2C₂ (voir figure 19). Lors de la description du profil, seuls les horizons 2C₁ et 2C₂ étaient légèrement humides, les horizons A, B, et C étant quant à eux secs. Des graviers sont retrouvés sur l'ensemble du profil mais en faible quantité (moins de 2% du volume au sein de chacun des horizons).

Le profil de San Benito est peu développé. L'horizon A est caractérisé par une structure granulaire et la présence de quelques racines de diamètre inférieur à 0,5 mm. Le reste du profil développe une structure en bloc. Tous les horizons du profil, à l'exception de A, sont marqués par une réaction modérée à l'HCl 1M (pas de développement d'une mousse suite au test à l'HCl). Le pourcentage de carbonates est donc estimé comme étant inférieur à 15%. Ces carbonates sont présents au sein de ces horizons sous forme de poudre dispersée. La consistance de A et B est qualifié de légèrement dure et de dure pour le reste du profil.

Les valeurs de la CEC sont comprises entre 10,6 et 18,6 cmol_c kg⁻¹ (voir tableau 4). On constate qu'elles sont plus importantes pour les deux derniers horizons du profil. Le pH est quant à lui plus faible pour l'horizon A que pour le reste du profil. En effet, il est égal à 7,8 pour A alors qu'il est compris entre 9,1 et 9,5 au sein des autres horizons. Le taux de saturation en bases est très élevé puisque celui-ci est compris entre 150 et 200%. On remarque que deux éléments échangeables sont responsables de ces valeurs supérieures à 100%. Il s'agit du sodium et du calcium.

Concernant la salinisation, aucun horizon Salic ne peut-être diagnostiqué malgré les hautes valeurs d'électroconductivité observées. En effet, le produit de l'épaisseur (en cm) et de l'électroconductivité (en dS m⁻¹) est inférieure à 450, alors qu'il doit être supérieur pour être caractéristique d'un horizon Salic. Aucun horizon de type natric ne peut également être

diagnostiquée. Les critères en lien avec une illuviation évidente d'argiles au sein de cet horizon tels que décrits dans la WRB (2014) (enrobage de particules, ratio de pourcentage d'argiles entre les horizons,...) n'étant pas remplis. Toutefois, les qualificatifs Protosalic et Sodic peuvent être utilisés.

En suivant la classification de la WRB (2014), le sol identifié est un Cambisols. En effet, la texture de l'horizon B et la valeur de sa chromaticité étant supérieure d'une unité par rapport à l'horizon sous-jacent C permettent de caractériser cet horizon comme Cambic. Au vu des valeurs prises par l'ECE et l'ESP, on classera ce sol comme étant un Sodic Cambisols (Protosalic). L'abréviation utilisée dans ce travail est « SCamP SB ».

1.6.Cliza

Le profil de Cliza se situe au centre de la *Valle Alto* dans la moitié sud, à une altitude de 2717 mètres. La pente y est d'environ 2%. La végétation rencontrée à cet endroit est principalement de type herbacé et assure un couvert relativement important en comparaison aux autres profils caractérisés (voir figure 20). À la surface du sol, des graviers sont présents en très faible quantité, couvrant au maximum 2% de la surface. Des fentes de surface (moins de 2 cm de profondeur) d'une largeur comprise entre 1 et 2 cm et moyennement espacées entre elles (distantes l'une de l'autre de 0,5 à 2 m) sont observées ainsi qu'une légère imperméabilisation de la surface (moins de 2 mm d'épaisseur). Une croûte saline de moins de 2 mm d'épaisseur couvrant au maximum 15% de la surface du sol est également présente. D'après la carte réalisée par Metternicht et al. (1997), le profil prend place au sein d'une dépression lagunaire basse, à la limite de la partie distale d'un glacis.

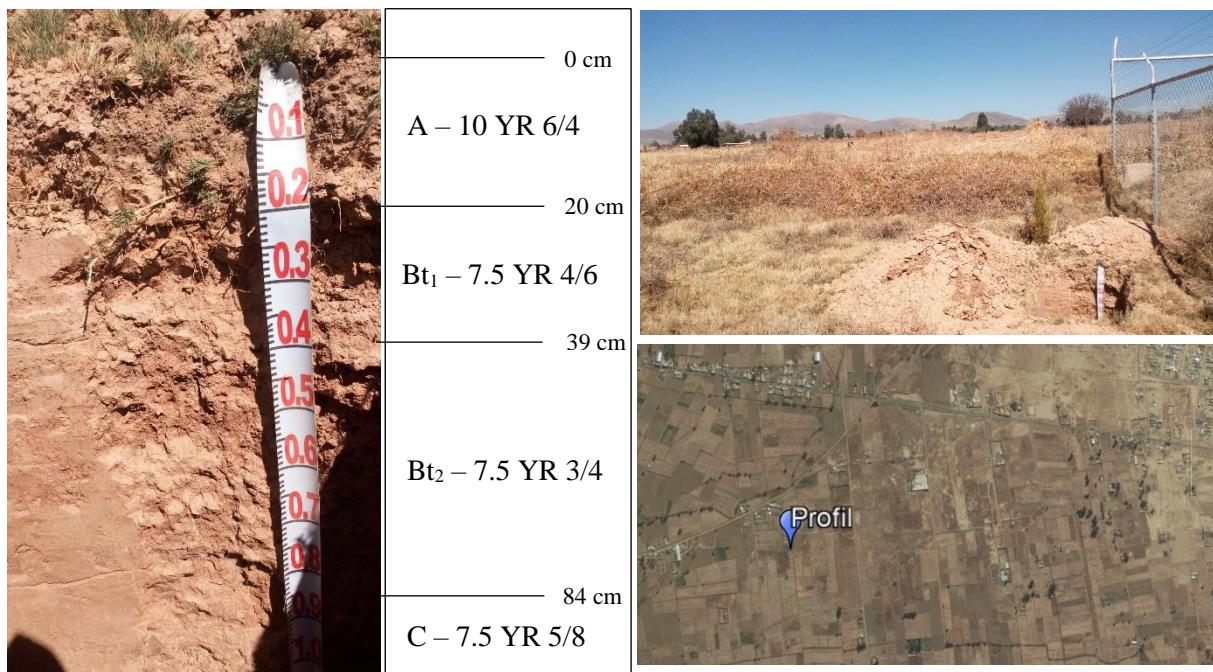


Figure 17. À gauche, photographie du profil de Cliza et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil..

Quatre horizons distincts ont été identifiés pour le profil de Cliza et sont, depuis la surface, les horizons A, Bt₁, Bt₂ et C (voir figure 20). Seul l'horizon C était humide lors de la description du profil, les horizons A, Bt₁ et Bt₂ étant secs. Des graviers ont été retrouvés dans chacun des horizons à l'exception de l'horizon A. Ces graviers sont présents en très faible quantité puisque

ceux-ci occupent de 2 à 5 % du volume de chaque horizon. Des racines sont également retrouvées sur l'ensemble du profil. Ces racines sont cependant bien plus nombreuses et d'un diamètre plus important au sein des deux premiers horizons. Le diamètre des racines observées est compris entre 0,5 et 5 mm.

La structure des horizons A et Bt₁ est moyennement développée et est qualifiée de polyédrique à granulaire. Celle des horizons Bt₂ et C est en ce qui la concerne peu développée et possède les caractéristiques d'une structure massive se désagrégeant en petits blocs, et où quelques slickensides semblent être observés. La consistance de ces deux horizons Bt₂ et C est très dure.

L'ensemble du profil à l'exception de l'horizon A est marqué par une réaction à l'HCl 1M sans que l'effervescence ne forme une mousse. Le pourcentage en carbonates de ces trois horizons est donc estimé comme étant inférieur à 15%. Ces carbonates sont présents au sein de ces horizons sous la forme d'une poudre dispersée. De nombreuses tâches blanches sont également observées dans ces horizons. Les horizons Bt₁ et Bt₂ sont quant à eux marqués par des traces d'enrobage en argiles, signe d'une illuviation de ces derniers.

En ce qui concerne les valeurs de la CEC, elles sont comprises entre 8,0 et 22,4 cmol_c kg⁻¹ (voir tableau 5). La valeur maximale est observée pour l'horizon Bt₁. Le pH croît quant à lui avec la profondeur et varie entre 8,4 et 9,8. Les taux de saturation en bases sont très importants et sont tous supérieurs à 100%. Ils varient de 136 à 235 %. La valeur maximale de 235% est observée au sein de l'horizon C. Pour les autres horizons, cette valeur décroît avec la profondeur. Ces taux très importants sont expliqués par les valeurs de sodium et de calcium échangeable. En effet, l'ESP calculé atteint jusqu'à 145% dans l'horizon C et le rapport entre le calcium échangeable et la CEC est compris entre 24 et 106%.

À propos de la salinité de ce sol, les valeurs d'ECe sont supérieures à 8 dS m⁻¹ pour les horizons Bt₁, Bt₂ et C, mais seul l'horizon C remplit l'ensemble des critères d'un horizon Salic. Les valeurs d'ESP sont quant à elles comprises entre 48 et 145 % et sont donc supérieures au seuil de 15 %. Aucun des horizons ne remplit cependant les critères d'un horizon Natic. En effet, les horizons Bt₁ et Bt₂ ne possèdent pas la structure caractéristique de ce type d'horizon et aucune observation n'a été effectuée quant à la pénétration au sein de Bt₁ et Bt₂ d'un horizon à texture plus grossière où figurent des grains de sables ou de limons (granulométriques) non enrobés d'argiles. L'horizon Bt₁ remplit toutefois les caractéristiques d'un horizon Argic.

L'horizon Salic débutant à plus de 50 cm de la surface du sol, l'identification d'un Solonchaks est exclue. En suivant la classification de la WRB (2014), ce sol correspond à un Abruptic Lixisol (Argisodic, Salic). L'abréviation utilisée dans ce travail est « ALAsS ».

1.7. Santa Ana

Le profil de Santa Ana se situe dans la partie nord-est de la *Valle Alto* à une altitude de 2714 mètres. Il prend place sur ce qu'ont identifié Metternicht et al. (1997) comme un ancien cône de déjection de la région de Punata, à la limite entre sa partie centrale et distale. La pente rencontrée à cet endroit est faible et est de moins d'1%. L'ouverture de la fosse pédologique a été réalisée à l'intérieur d'une culture de maïs où une efflorescence saline est apparente (voir figure 21). En effet, une croûte saline d'une épaisseur de moins de 2 mm couvre jusqu'à 40% de la surface du sol. Des plantes halophytes tel que le *Q'wachi* (vraisemblablement *Suaeda Foliosa* Moq.) sont présentes et rendent compte du caractère salin de cette aire.

Toujours à la surface du sol, des graviers sont retrouvés en faible quantité et couvrent moins de 2% de la surface du sol. On distingue également de fines fentes (moins de 1 cm de largeur) moyennement profondes (entre 2 et 10 cm de profondeur) et modérément espacées l'une de l'autre (distantes de 0,5 à 2m). Cette parcelle agricole est irriguée en l'inondant temporairement et périodiquement. Des bordures de terre présentes pour contenir l'eau au sein de la parcelle témoignent notamment de cette pratique. D'après des informations obtenues auprès de la population locale, il ressort que l'utilisation d'eau usée est courante pour l'irrigation des cultures dans la région. En ce qui concerne cette parcelle, la provenance de l'eau utilisée n'a cependant pas été identifiée.

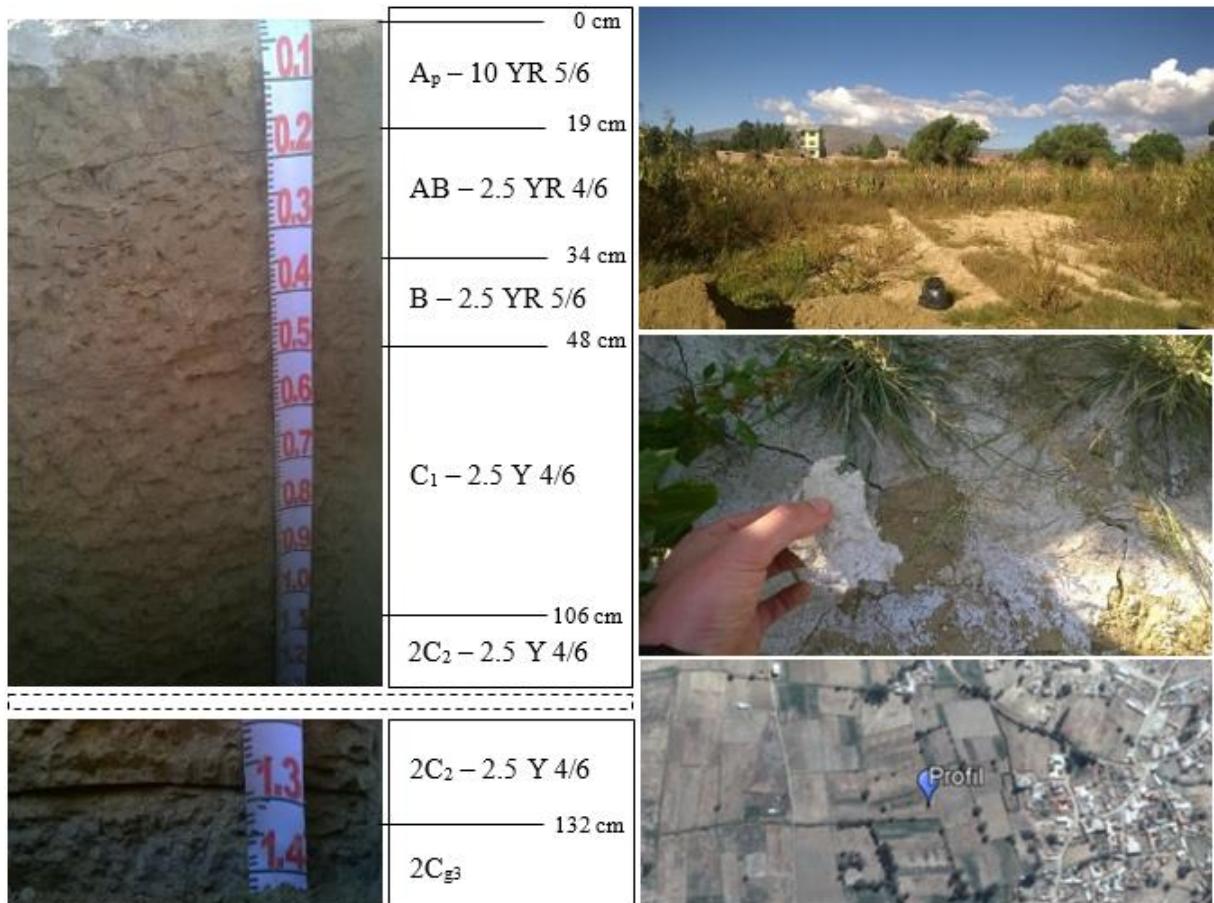


Figure 18. À gauche, photographie du profil de Santa Ana et caractéristiques principales des horizons le constituant. Les pointillés signifient une discontinuité dans la photographie. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut), de l'efflorescence saline à la surface du sol (milieu) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil

Six horizons distincts ont été identifiés pour le profil de Santa Ana (voir figure 21). Ces horizons sont, depuis la surface, les horizons Ap, AB, B, C₁, 2C₂ et 2C_{g3}. Le profil est profond et marqué par un statut humide dès l'horizon B. L'horizon Ap est quant à lui sec et le second, AB, légèrement humide. Des graviers sont retrouvés tout au long du profil mais ne représentent que maximum 2% du volume au sein de chaque horizon. Une réaction à l'HCl 1M est observée pour chacun des horizons mais aucune réaction avec une effervescence importante n'est visible. La structure du profil est peu développée. En effet, seul le premier horizon développe une structure polyédrique, le reste du profil ayant une structure massive.

Les horizons 2C₂ et 2C_{g3} se distinguent du reste du profil par une différence de texture importante. En effet, la fraction sableuse de l'horizon 2C₂ s'élève à 64,3 % alors qu'elle n'est

que de 36,9% pour l'horizon C₁. On constate également la présence de quelques tâches d'oxydation au sein de l'horizon 2C₂. L'horizon 2Cg₃, bien que visible uniquement sur quelques centimètres dû à la profondeur de la fosse pédologique, se distingue nettement de l'horizon 2C₂ par sa couleur. La couleur de cet horizon est gris clair et est caractéristique d'un milieu réducteur sableux (WRB, 2014).

Les valeurs de la CEC sont quant à elles comprises entre 3,2 et 9,3 cmol_c kg⁻¹ et les plus faibles valeurs sont observées en bas du profil (voir tableau 4). On constate que le pH est très élevé et varie peu tout au long du profil, la plus petite valeur observée étant égale à 9,8 et la plus grande à 10. Concernant le taux de saturation en bases, celui-ci est extrêmement élevé puisqu'il atteint même près de 369%. On remarque que ces valeurs très élevées sont principalement dues au sodium échangeable, l'ESP étant égal à 281% pour l'horizon 2C₂.

En ce qui concerne le caractère salin de ce sol, celui-ci est très marqué. L'ensemble des horizons présentent des valeurs d'ECe élevées, et l'horizon Ap et C₁ remplissent les critères d'un horizon Salic. Concernant la sodisation, aucun horizon Natric ne peut être identifié ; les critères d'augmentation relative d'argiles entre les horizons ou l'évidence d'illuviation n'étant pas remplis. Les valeurs d'ESP sont toutefois très élevées puisque ces dernières sont toutes supérieures à 180%. Cette observation amène dès lors à utiliser le qualificatif Sodic.

A l'exception des horizons Salic Ap et C₁, aucun autre horizon diagnostique n'est identifié pour ce profil. En effet, les observations réalisées au sein des horizons 2C₂ et 2Cg₃ ne permettent pas l'utilisation du qualificatif Gleyic puisque celles-ci sont observées à plus de 75 cm de profondeur. Il s'agit donc, d'après la classification de la WRB (2014), d'un Sodic Solonchaks. L'abréviation utilisée dans ce travail est « SS ».

1.8.Aramasi

Le profil d'Aramasi se situe au sud-est du centre de la *Valle Alto* à 2713 mètres d'altitude. Il prend place sur ce qui paraît être, au vu de la couleur blanche visible sur l'image satellite, la plus grande efflorescence saline de la vallée (voir figure 22). À cet endroit, il s'agit d'une vaste étendue relativement plane, la carte des pentes réalisée avec une résolution de 30 mètres indiquant toutefois une pente d'un peu plus de 2%. Metternicht et al. (1997) ont décrit cet environnement comme étant une *playa*. Une végétation herbacée éparsse ainsi que quelques petits buissons caractérisent le paysage et laissent une surface de sol nu plus ou moins importante. À la surface du sol, on observe une imperméabilisation suite à la formation d'une croûte légèrement dure et de moins de 2 mm d'épaisseur. On constate également la présence d'une croûte saline de moins de 2 mm d'épaisseur, mais celle-ci ne couvre que, en lieu et place du profil, jusqu'à 2% de la surface du sol. Très peu de graviers et cailloux sont retrouvés en surface. Ceux-ci couvrent au maximum 2% de la surface du sol. Des fines fentes de surface (moins d'1 cm de largeur et de 2 cm de profondeur) très proches les unes des autres (distantes de moins de 20 cm entre elles) sont aussi observées.

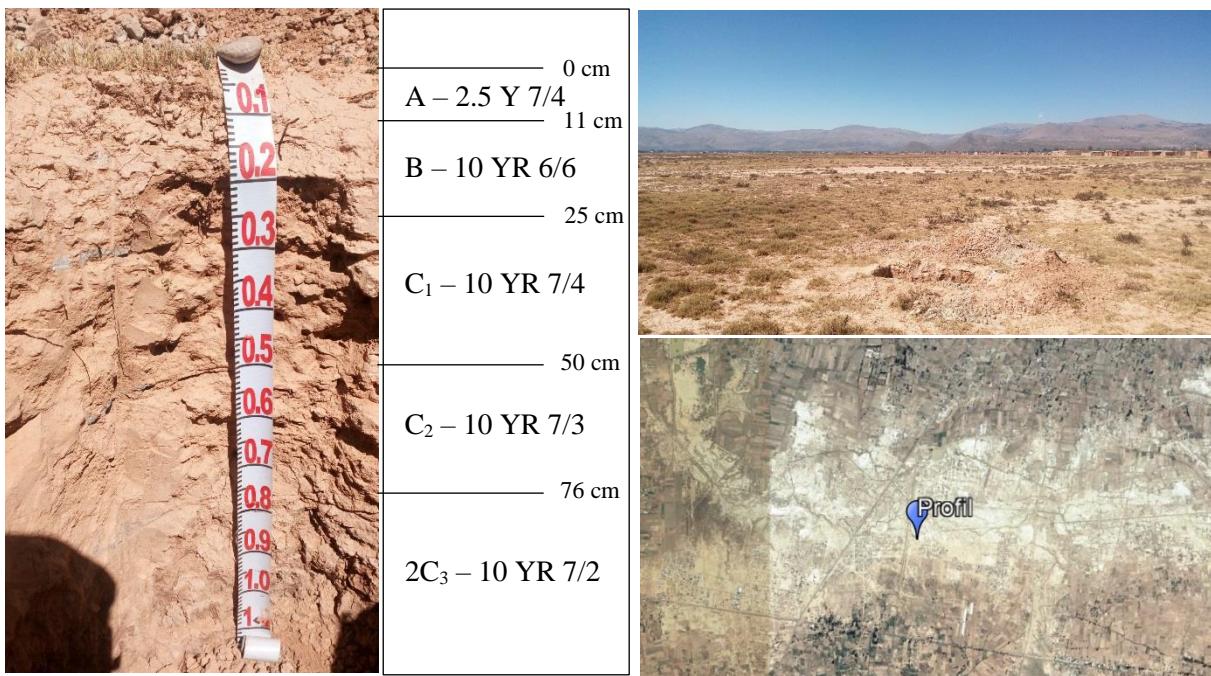


Figure 19. À gauche, photographie du profil d'Aramasi et caractéristiques principales des horizons le constituant. À droite, photographie du paysage aux alentours du profil (en haut) et image satellite (Google Earth Pro 2017) localisant le profil. Comme le montre l'image satellite, le profil est situé sur une zone marquée par la salinisation.

Le profil d'Aramasi est très peu différencié. Cinq horizons distincts ont toutefois été identifiés (voir figure 22). Il s'agit, depuis la surface du sol, des horizons A, B, C₁, C₂ et 2C₃. L'entièreté du profil était sec à très sec pour les deux premiers horizons. Des graviers ont été retrouvés au sein des horizons C₁, C₂ et 2C₃, mais en très faible quantité. Ces graviers occupent donc au maximum 2% du volume au sein de chacun de ces trois horizons. Aucune mesure quantitative n'a été effectuée concernant la porosité, mais cette dernière semble faible, en particulier pour les horizons C₁, C₂ et 2C₃. Ce profil se distingue notamment des autres profils caractérisés de par sa texture. En effet, la fraction de sables granulométriques au sein de chacun de ces horizons est la plus petite observée puisqu'elle est comprise entre 2,8 et 8,8% suivant l'horizon considéré. Les limons granulométriques représentent quant à eux 62,2 à 74,9% de la terre fine pour les trois premiers horizons et, en 2C₃, ne représentent en revanche que 37,7%.

Les deux premiers horizons, A et B, sont caractérisés par une structure lamellaire qui n'est cependant pas identifiable très clairement puisque celle-ci n'est pas très développée. Dans ces deux horizons, des racines dont le diamètre est inférieur à 0,5 mm sont retrouvées mais elles restent cependant très peu présentes. Le second horizon développe quant à lui une couleur d'une chromaticité inférieure d'une unité en comparaison avec les horizons sous-jacents. La consistance des horizons A et B est qualifiée de dure.

Le reste du profil, soit C₁, C₂ et 2C₃ est quant à lui marqué par une consistance extrêmement dure. La structure est peu développée et est qualifiée de massive. Une réaction à l'HCl 1M est observée pour les horizons B, C₁, C₂ et 2C₃. Celle-ci est plus forte pour les horizons C₂ et 2C₃ que pour B et C₁. La réaction ne produit cependant pas une effervescence marquée par la formation d'une mousse. Le pourcentage de carbonates est donc estimé comme étant inférieur à 15%. Ces carbonates sont présents sous la forme d'une poudre dispersée au sein de ces quatre horizons mais également sous forme de concrétions indurées en C₂ et 2C₃.

En ce qui concerne la CEC, elle varie entre 10,8 et 21,6 cmol_c kg⁻¹ (voir tableau 5). La valeur maximale de la CEC est observée en 2C₃, horizon possédant le plus grand pourcentage d'argiles granulométriques au sein du profil. Les taux de saturation en bases sont quant à eux très élevés et compris entre 177 et 353 %. Ces taux très élevés s'expliquent par les valeurs très importantes de sodium échangeable. En effet, les valeurs calculées d'ESP sont comprises entre 110 et 299%.

La salinité de ce sol est extrêmement marquée puisque chacun des horizons remplit les caractéristiques d'un horizon salic. L'ECe étant supérieure à 30 dS m⁻¹ pour les deux premiers horizons, le qualificatif supplémentaire Hypersalic peut être utilisé. Concernant la sodicité, elle est également très prononcée. Comme mentionné précédemment, les valeurs d'ESP calculées sont en effet toutes supérieures à 100% et atteignent même près de 300%. Il s'agit également du sol identifié au caractère alcalin le plus prononcé, le pH étant supérieur ou égal à 9,2 pour tous les horizons et atteignant une valeur maximum de 10,1 dans le second horizon. Un horizon Natric ne peut cependant être diagnostiqué au sein de ce sol. La structure des différents horizons ainsi que l'absence de pénétration de texture plus grossière au sein de cet horizon diagnostique (sur au moins 2,5 cm de profondeur) empêchent sa caractérisation. D'après la WRB (2014), ce sol est un Sodic Solonchaks (Hypersalic). L'abréviation utilisée dans ce travail est « SSH ».

1.9. Concordance avec la classification couramment utilisée

Les résultats concernant l'évaluation du système de classification simplifiée tel que présentée à la section I.2.5 et au tableau 2 sont présentés ici. Pour rappel, quatre classes de sols sont considérées sur base de deux variables diagnostiques que sont l'ECe et l'ESP (ou le SAR) ainsi que d'une variable indicatrice, le pH. Les quatre classes envisagées sont les suivantes : sol agricole typique, sol salin, sol sodique et sol salin et sodique.

Cette classification est évaluée uniquement sur base des caractéristiques des horizons de surface des profils de sols, et ce dans un objectif de généralisation des observations aux échantillons composites prélevés. Dans un premier temps, des observations synthétiques suivant les trois variables d'intérêt au sein de chaque profil sont présentées. La présentation des valeurs prises au sein des différents horizons de chaque profil permet une remise en contexte des valeurs prises en surface ainsi qu'une meilleure critique de la classification discutée au point IV.2.2.

Observations synthétiques suivant les variables d'intérêt (ECe, ESP, pH)

Les observations précédentes ainsi que celles reprises dans le tableau 3 montrent que 4 profils sur les 8 caractérisés voient l'horizon diagnostique, soit l'horizon ayant permis leur classification, démarquer à 20 cm ou plus de profondeur. La profondeur à laquelle démarre cet horizon diagnostique est donc le plus souvent plus grande que la profondeur à laquelle les échantillons composites ont été effectués. Une gradation de la salinité avec l'altitude est également observée : au plus l'altitude diminue, au plus la salinité est forte. Cette gradation s'exprime par la série de types de sol suivants : sols non salins – sols Protosalic et Sodic – Salic et Sodic – Solonchaks et Sodic – Solonchaks Hypersalic et Sodic.

Toutefois, le profil de San Benito est le profil à l'altitude la plus faible et ce dernier possède uniquement le qualificatif Protosalic, malgré des valeurs d'ECe élevées allant jusqu'à 21,76 dS m⁻¹ pour l'horizon de surface. La figure 23 montre en effet que les valeurs d'EC de son horizon de surface sont plus proches de celles d'un Sodic Solonchaks que de tout autre sol. La géomorphologie est cependant différente de celles observées pour les autres Solonchaks. En

effet, il prend place sur la partie distale d'un glacis à proximité des versants nord de la *Valle Alto*. Les sols ayant développé un caractère salin sont majoritairement situés sur des dépressions lagunaires et playa, 3 profils sur les 5 aux caractères salins étant localisés sur ces unités géomorphologiques.

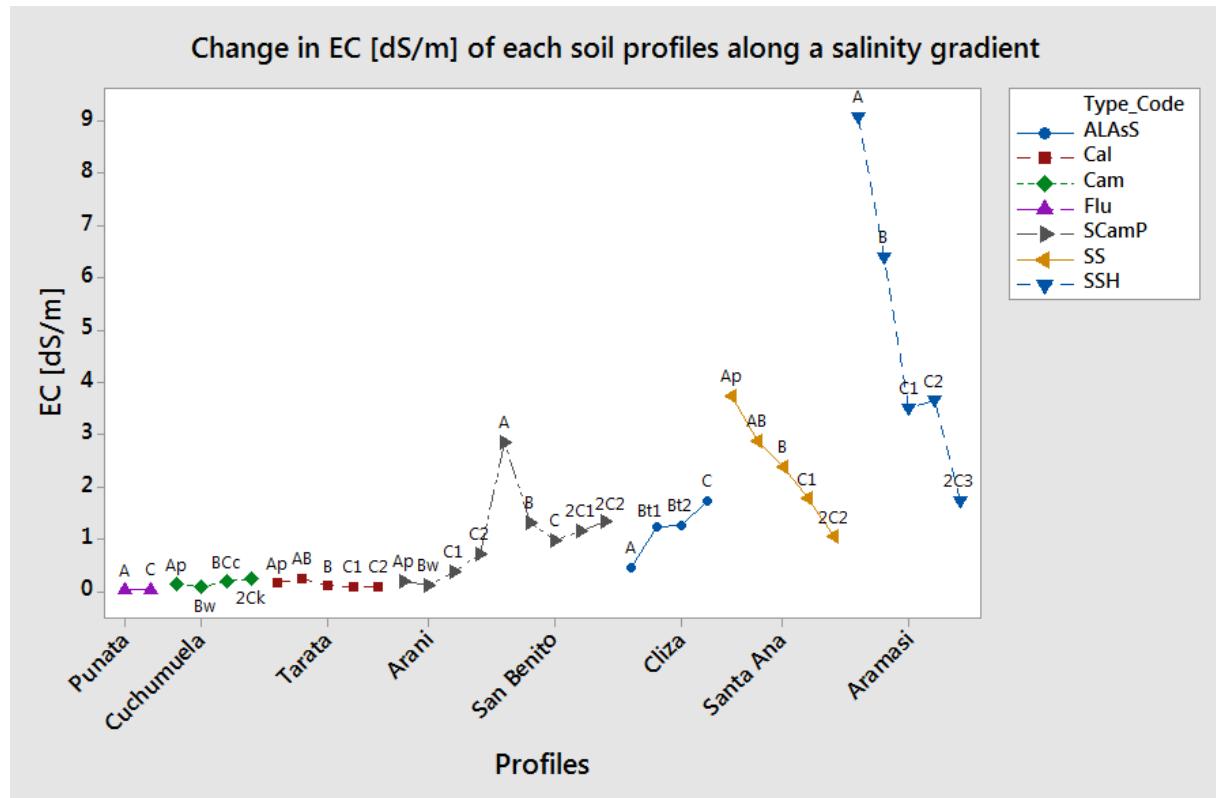


Figure 20. Variation des valeurs d'EC au sein de chaque horizon de chacun des profils identifiés. L'ordre des profils suivant l'axe des abscisses se fait suivant un gradient de développement pédogénétique, Pumata étant le moins développé et Aramasi le plus développé.

Le tableau 3 met également en évidence qu'aucun Solonetz n'a été identifié. Le caractère Sodic (ESP supérieur à 15%) est toutefois marqué, celui-ci étant utilisé comme qualificatif pour 5 profils. Comme le montre la figure 24, l'ESP est le plus souvent nettement supérieur à cette valeur seuil de 15%, à l'exception des 3 premiers horizons du profil d'Arani où ces valeurs lui sont inférieures ou égales. Le qualificatif Sodic apparaît également systématiquement avec le qualificatif Protosalic ou le groupe de sol Solonchaks.

En ce qui concerne le pH KCl, la figure 25 montre que ce dernier croît globalement avec le gradient de salinité identifié. Le pH KCl des sols Sodic varient de 7,58 à 10,13 tous horizons confondus. En ce qui concerne les Solonchaks, le pH KCl est très élevé puisque ce dernier est compris entre 9,23 et 10,13, tous horizons confondus également.

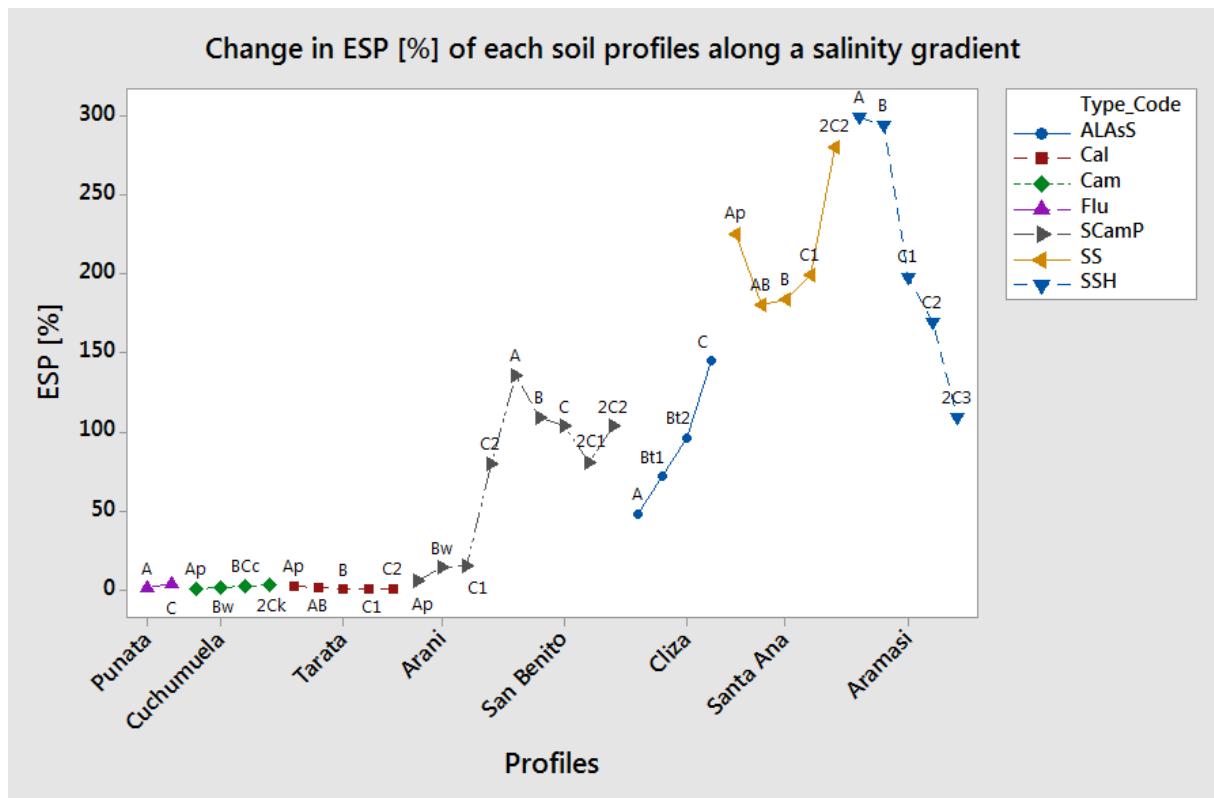


Figure 21. Variation des valeurs d'ESP au sein de chaque horizon de chacun des profils identifiés. L'ordre des profils suivant l'axe des abscisses se fait suivant un gradient de développement pédogénétique, Punata étant le moins développé et Aramasi le plus développé.

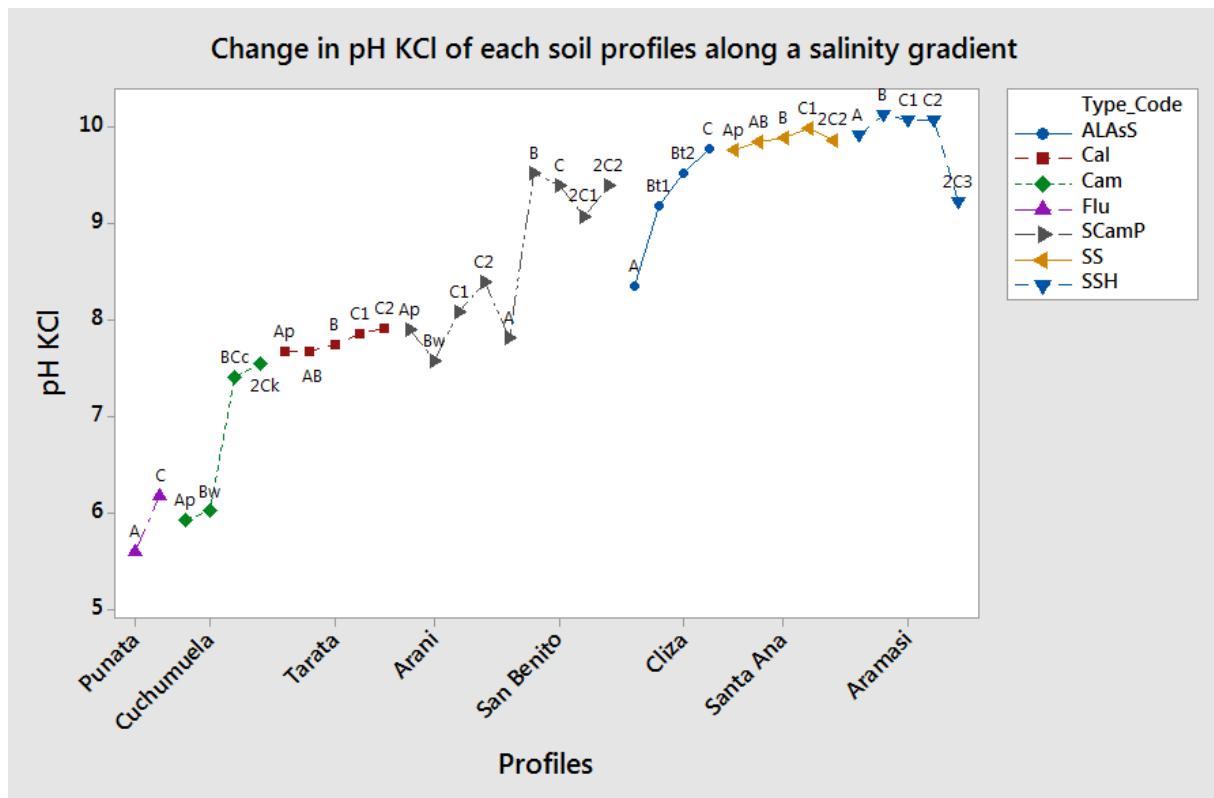


Figure 22. Variation des valeurs du pH KCl au sein de chaque horizon de chacun des profils identifiés. L'ordre des profils suivant l'axe des abscisses se fait suivant un gradient de développement pédogénétique, Punata étant le moins développé et Aramasi le plus développé.

Évaluation de la classification simplifiée couramment utilisée

Une correspondance entre les deux systèmes de classification pour les sols identifiés peut être effectuée. Cette correspondance ne se base que sur les valeurs seuils dont les termes taxonomiques utilisés font référence. Par exemple, le qualificatif Protosalic ($ECe > ou = à 4 ds/m$) de la WRB (2015) renvoi dès lors à un sol salin de la classification simplifiée. Cette correspondance taxonomique entre les deux systèmes de classification est donnée au tableau 6. Elle représente le résultat souhaité de la classification des profils de sols sur base des valeurs prises au sein des horizons de surface de ces mêmes profils.

Tableau 6. Correspondance des classes de sols de la classification simplifiée aux sols identifiés suivant la WRB, en référence aux valeurs seuils de chacun des termes taxonomiques utilisés. Cette correspondance représente le résultat souhaité de la classification des profils de sol sur base des variables considérées caractérisant les horizons de surface de ces mêmes profils. Au sein de la colonne WRB, l'abréviation utilisé dans ce travail pour chaque type de sol est également mentionnée.

Classification simplifiée	WRB
Sol agricole typique	Calcisols - Cal Cambisols - Cam Fluvisols - Flu
Salin	Néant ¹¹
Sodique	Néant ¹²
Salin et Sodique	Sodic Cambisols (Protosalic) - SCamP Abruptic Lixisols (Argisodic, Salic) - ALAsS Sodic Solonchaks - SS Sodic Solonchaks (Hypersalic) - SSH

Le résultat obtenu de la classification des profils de sols sur base des valeurs prises au sein de chacun des horizons de surface par les variables diagnostiques ECe et ESP est donné à la figure 26. Trois types de sols ont été attribués à la suite de la classification : sol agricole typique - sodique - salin et sodique. Deux sols ont été incorrectement classés en comparaison avec le résultat souhaité (voir tableau 6) ; il s'agit de sols salins et sodiques classés en tant que sol agricole typique et sol sodique. Plus particulièrement le profil d'Arani (SCamP) a été classé comme sol agricole typique et le sol de Cliza (ALaSS) comme sol sodique.

En ce qui concerne la variable indicatrice du pH, le tableau 8 identifie pour chacun des profils si les gammes de valeurs identifiées par la classification simplifiée sont respectées ou non. Dans le cas de la classification attribuée sur base des valeurs d'ESP et d'ECe, seul le profil de Cliza (ALaSS) ne respecte pas le critère de pH fixé. Étant classé comme sol sodique, sa valeur de pH devrait être supérieure à 8,5 or celle-ci est de 8,36. Pour la classification souhaitée, les critères fixés pour le pH sont quant à eux respectés pour chacun des profils. Qu'il s'agisse de la classification souhaitée ou attribuée, les profils de Santa Ana (SS) et d'Aramasi (SSH) voient tous deux leurs valeurs de pH être supérieure à 8,5. Pour la classification simplifiée, les valeurs de pH attendues pour les sols salins et sodiques sont généralement inférieures à 8,5 (Richards et al., 1954; Weil & Brady, 2017), mais Richards et al. (1954) précisent que le pH peut varier considérablement pour ces sols.

¹¹ Aucun Solonchaks non Sodic n'a été identifié et le qualificatif Salic ou apparenté a toujours été observé avec le qualificatif Sodic.

¹² Aucun Solonetz n'a été identifié et le qualificatif Sodic a toujours été observé avec un qualificatif salic ou apparenté.

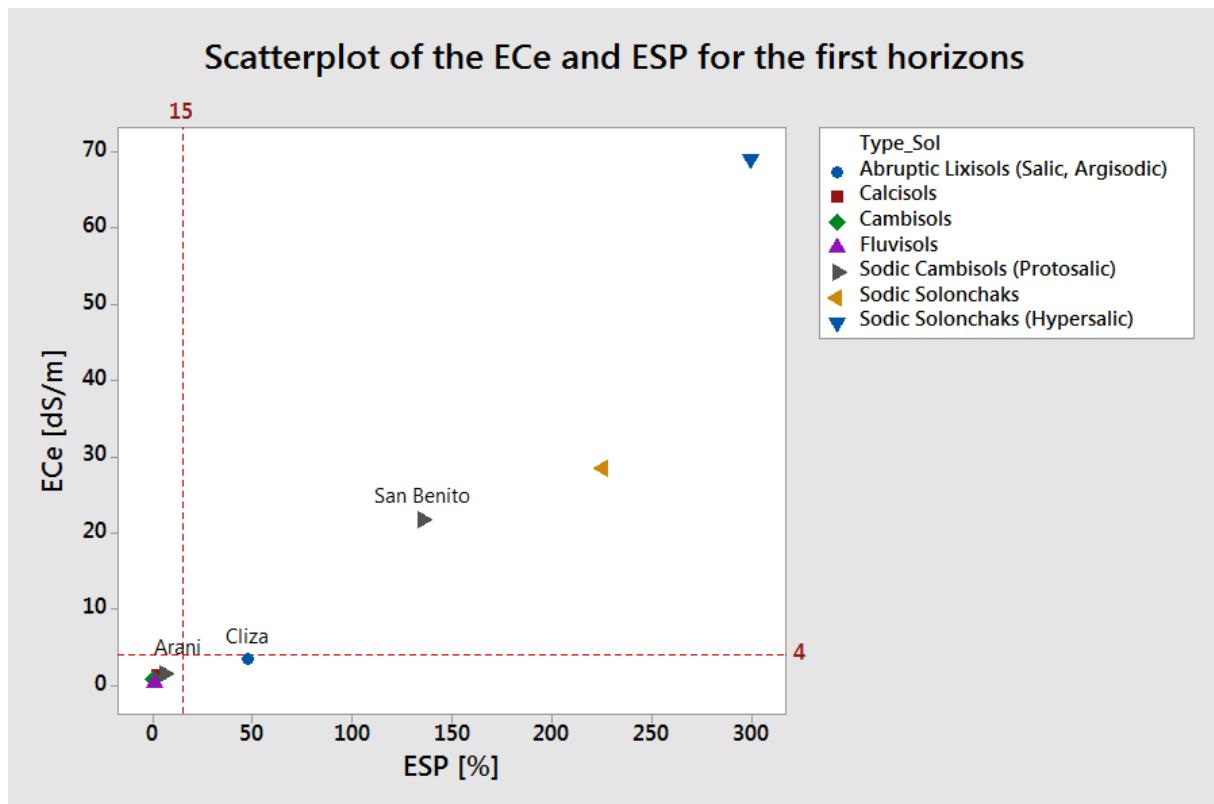


Figure 23. Représentation des valeurs d'ESP et d'ECe du premier horizon de chacun des profils de sol. Les droites $x = 15$ (%) et $y = 4$ (dS/m) représentent les valeurs seuils utilisées dans la classification simplifiée. Un sol situé au-delà de ces droites sera considéré respectivement comme sodique et salin.

1.10. Proposition et détermination de nouveaux indicateurs

En ce qui concerne les variables indicatrices choisies, le nombre d'observations concernant les profils ne permet pas la réalisation d'une analyse discriminante décisionnelle. Les variables indicatrices choisies ainsi que les seuils leur correspondant gardent dès lors un sens physique et sont représentatifs des processus que l'on souhaite distinguer. Les variables sélectionnées sont par conséquent l'ESP, l'EC et le pH (KCl) ; auxquelles deux variables supplémentaires sont considérées en comparaison à la classification simplifiée : le TOC et la CEC. Ces deux dernières variables ont été identifiées sur base de productions graphiques mettant en évidence leur capacité à distinguer des sous-groupes ou des types de sols concernant le premier horizon des profils. Les distributions des profils suivant le TOC et la CEC sont données à l'annexe E. Les seuils de valeurs choisis se réfèrent quant à eux, lorsque cela est possible, à des seuils déjà existants dans les classifications actuelles. La signification de ces seuils est donnée au tableau 7. La conversion des valeurs seuils usuelles d'ECe en EC sont quant à elles données à l'annexe F. Sur base de l'ensemble de ces observations, une proposition d'arbre décisionnel permettant le classement d'échantillons composites a été construit et est donné à la figure 27.

Tableau 7. Signification et justification des valeurs seuils utilisées au sein de l'arbre décisionnel proposé à la figure 27.

Variable	Seuil proposé	Justification
pH (KCl)	7	pH neutre et proche de la mi-distance (égale à 6,8) entre le point caractéristique du Cambisols et celui du Calcisols
	8,5	Seuil pour la distinction de sols sodiques
EC	3,9	Référence au seuil de 30 dS/m d'Ece caractérisant les sols Hypersalic ; ici égale à la valeur moyenne des seuils pour chaque texture de sol, pondérée suivant leur occurrence (voir annexe G)
	0,52	Référence au seuil de 4 dS/m d'Ece caractérisant les sols Hypersalic ; ici égale à la valeur moyenne des seuils pour chaque texture de sol, pondérée suivant leur occurrence (voir annexe G)
ESP	6	Seuil en ESP considéré au sein de la WRB pour le terme Sodic
CEC	10,8	Mi-distance entre le point caractéristique du Fluvisols et celui du Cambisols (voir annexe F)
TOC	0,7	Équidistance entre les valeurs moyennes des deux sous-groupes identifiés au sein des profils (voir annexe F)

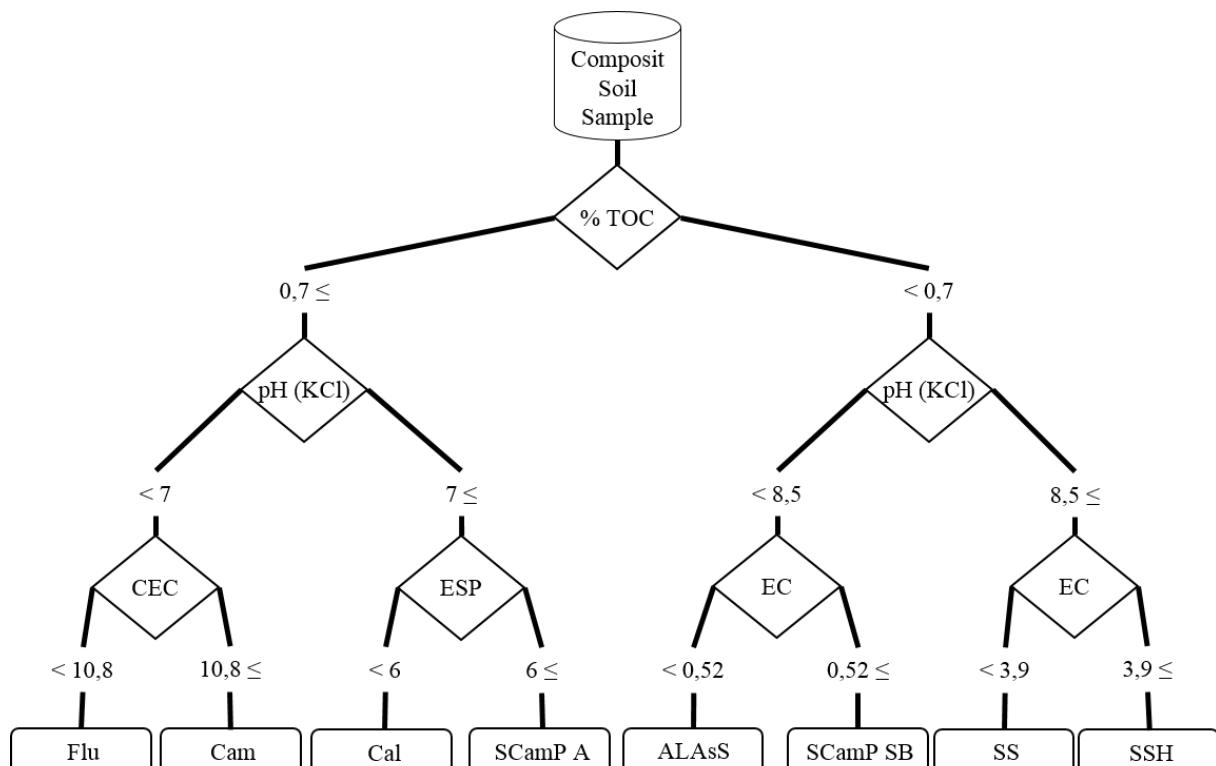


Figure 24. Arbre décisionnel proposé pour le classement des échantillons composites de surface. SCamP A est le SCamP d'Arani et SCamP SB celui de San Benito.

III.2. Approche cartographique

Les résultats des analyses de laboratoire concernant chacun des échantillons composites sont repris à l'annexe D ainsi que les résultats concernant la qualité des données de laboratoire. Pour chacune des variables cartographiées, la liste des échantillons inclus ou non dans le modèle de prédiction spatial est donnée à l'annexe G. Les cartes incluses dans cette section pour les différentes variables, représentent les modèles de prédiction obtenus sous forme vectorisée. Les cartes sous forme de raster avec la résolution d'un pixel fixée à 200 mètres sont également données à l'échelle 1/200 000 à l'annexe G. Il s'agit des cartes ayant été utilisées pour obtenir les cartes de prédiction des types de sols.

2.1. Variables discriminantes

ESP, EC et pH (KCl)

La base de données de l'ESP est constituée de 104 observations après le traitement des outliers et des données suspectes. Ces observations sont comprises entre 0 et 395,5%, la moyenne étant égale à 24,1 %, la médiane à 3,2% et l'écart-type à 66,7%. 23 observations se situent au-dessus du seuil de d'ESP de 15%. Toutefois, les valeurs les plus extrêmes sont systématiquement observées sur ou à proximité des efflorescences salines.

La méthode de prédiction spatiale utilisée a été celle des distances inverses. En effet, la normalité des données n'a pas été vérifiée et ce même après une transformation des données de type Box-Cox avec λ optimal égal à 0. Aucune corrélation spatiale n'a pu être mise en évidence pour cette variable. Le nuage de points des semi-variances est en réalité constitué de trois nuages distincts explorant des gammes de valeurs différentes (voir figure 28).

Comme le montre la figure 28, le nuage supérieur est constitué de l'ensemble des semi-variances en lien avec les valeurs très importantes d'ESP (jusqu'à près de 400 %) rencontrées sur les efflorescences salines au nord la vallée. Le nuage médiant est quant à lui constitué des semi-variances en lien avec les valeurs importantes d'ESP (jusqu'à 250%) rencontrées sur les efflorescences salines à l'ouest du centre de la vallée et celle d'Aramasi au sud-est de la vallée.

Le modèle de distances inverses retenu a été construit sur 83 observations et considère une décroissance linéaire des poids des observations avec la distance pour une prédiction en un point. Il considère quatre secteurs orientés suivant les quatre directions cardinales où 15 observations sont incluses dans le calcul de la valeur prédictive en un point. 21 observations ont été utilisées pour apprécier la qualité du modèle obtenu. Sur base de ces observations le RMSE est de 25,1% et la moyenne des erreurs de 20,2%. La carte de prédiction de l'ESP est reprise à la figure 29.

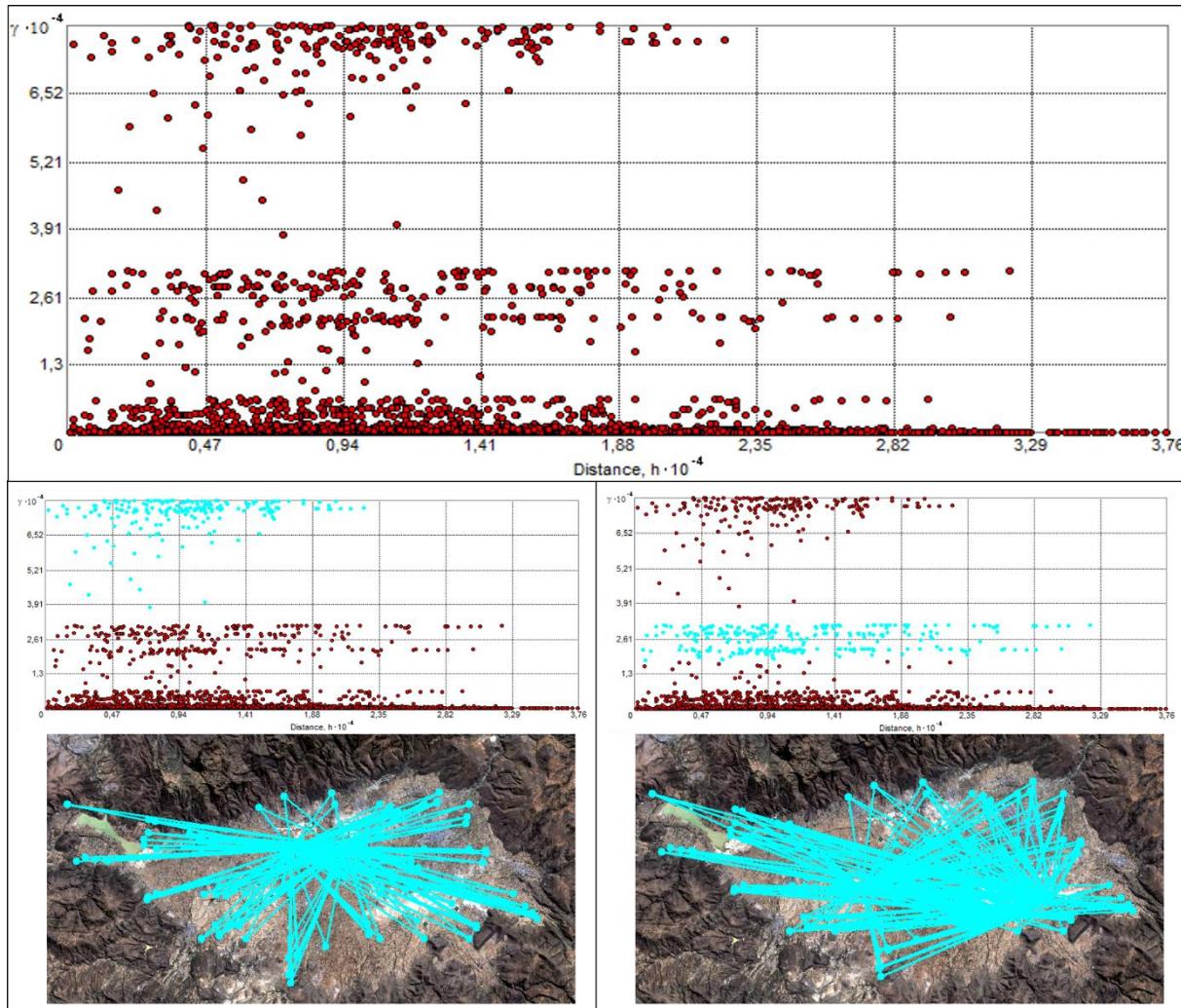


Figure 25. Encart supérieur : Nuage des semi-variances concernant l'ESP. Trois nuages de points explorant des gammes de valeurs différentes d'ESP sont identifiés. Encart inférieur gauche : Le nuage de points supérieur est constitué de l'ensemble des semi-variances en lien avec les efflorescences au nord de la vallée. Cela peut être observé sur l'image satellite où les couples d'observations constitutants ce nuage sont représentés par une ligne reliant les observations en question. Encart inférieur droit : Le nuage de points est constitué de l'ensemble des semi-variances en lien avec les efflorescences à l'ouest et au sud-est du centre de la vallée. Cela peut être observé sur l'image satellite où les couples d'observations constitutants ce nuage sont représentés par une ligne reliant les observations en question.

La figure 29 montre que les gammes de valeurs explorées pour la résolution fixée du modèle de prédiction sont comprises entre 1,3 et 258%. Une gradation des valeurs d'ESP prédictes est observée de l'ouest vers le centre de la vallée où sont présentes les efflorescences salines. À l'est de la vallée, les valeurs restent cependant majoritairement supérieures à 15%. Des valeurs élevées sont systématiquement prédictes sur ou en bordure de chacune des efflorescences. Sur base des classes de valeurs d'ESP créées, la haute vallée est découpée en zone relativement homogènes, bien que quelques « poches » de gammes de valeurs inférieures se retrouvent enclavées dans des zones de valeurs supérieures. La médiane des observations est égale 28,3%, et est donc 9 fois plus grande que celle des observations. La moyenne est quant à elle proche de celle des observations, celle-ci étant égale 28,8%.

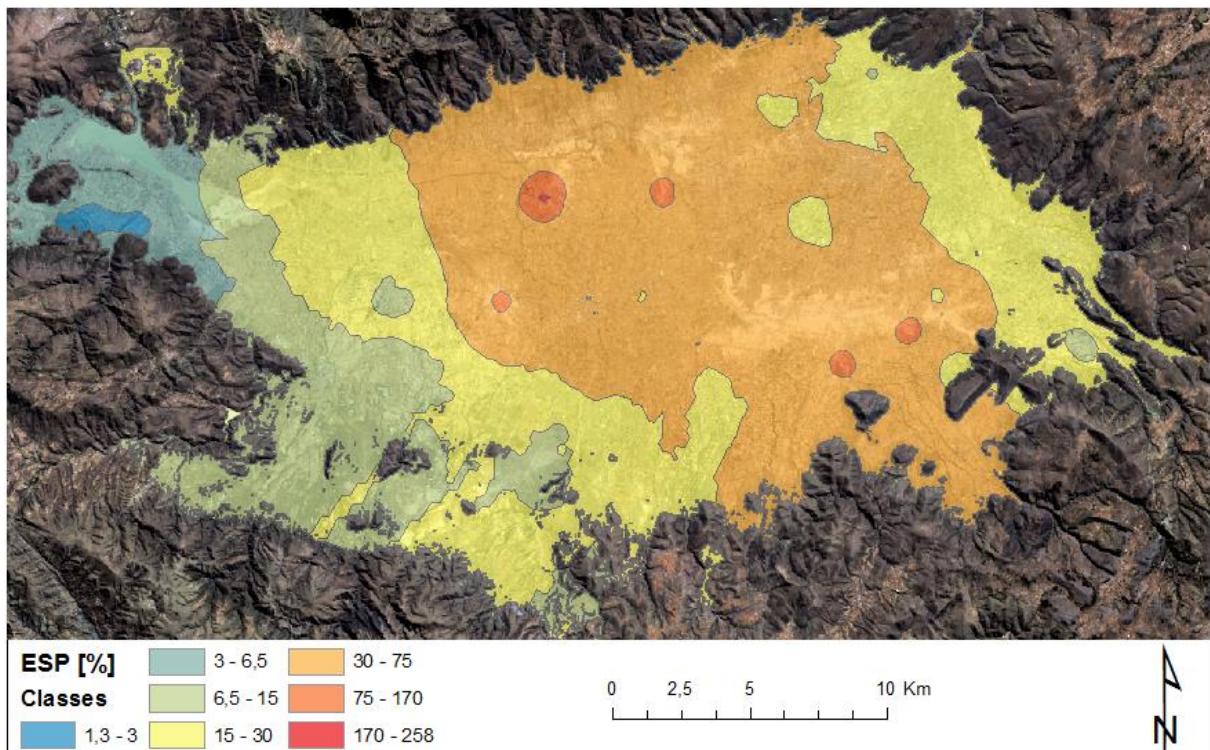


Figure 26. Carte de prédition des valeurs d'ESP de la Haute Vallée obtenue par la méthode des distances inverses.

Pour l'EC, 123 observations constituent la base de données de cette variable après le traitement des outliers et des données suspectes. Ces observations sont comprises entre 0 et 9,71 dS/m, la moyenne étant égale à 0,39 et l'écart-type à 1,27. La médiane est quant à elle égale à 0,08 dS/m. 10 observations sont supérieures au seuil de 0,52 dS/m. Elles se retrouvent systématiquement sur ou à proximité des efflorescences salines. Seul l'une d'entre elles se situe au nord, non loin du lac Angostura.

La méthode de prédiction spatiale utilisée a été celle des distances inverses et est donc identique à celle mise en place pour l'ESP. La normalité des données n'a pas été vérifiée et ce même après une transformation des données de type Box-Cox avec un λ optimal égal à -0,16. Aucune corrélation spatiale n'a pu être mise en évidence pour cette variable.

À l'instar de l'ESP, le nuage des semi-variances de l'EC peut également être divisé en sous-groupes. Les semi-variances en lien avec les efflorescences salines au nord de la vallée se distinguent également très nettement. Cette distinction est moins évidente en ce qui concerne les autres efflorescences ; les semi-variances en lien avec ces efflorescences ne se détachent pas réellement du nuage de points inférieurs mais constituant plutôt sa partie supérieure.

Le modèle de distances inverses retenu a été construit sur 98 observations et considère une décroissance linéaire des poids des observations avec la distance pour une prédiction en un point. Il considère quatre secteurs orientés suivant les quatre directions cardinales où 25 observations sont incluses dans le calcul de la valeur prédictive en un point. 25 observations ont été utilisées pour apprécier la qualité du modèle obtenu. Sur base de ces observations, le RMSE est de 0,68 dS/m et la moyenne des erreurs de 0,12 dS/m. La carte de prédiction de l'EC est reprise à la figure 30.

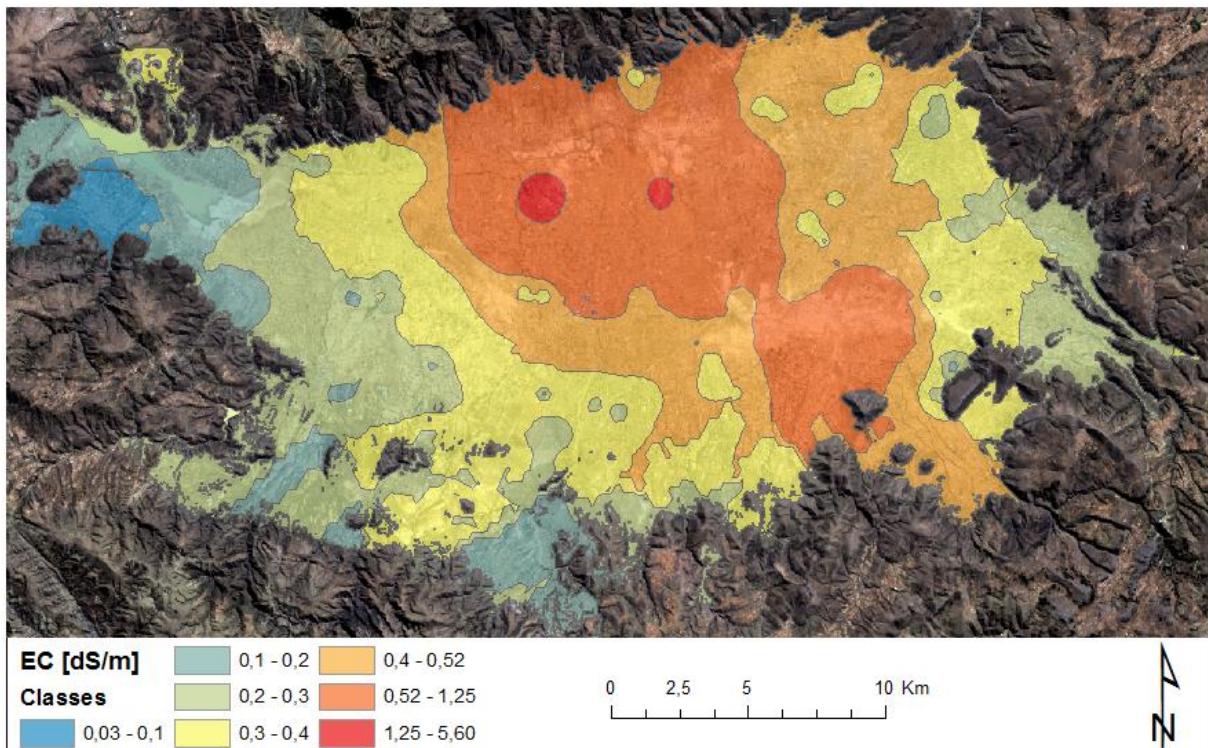


Figure 27. Carte de prédition des valeurs d'ESP de la Haute Vallée obtenue par la méthode des distances inverses.

Les valeurs prédites d'EC sur l'ensemble de la vallée varient entre 0,03 et 5,60 dS/m (voir figure 30). Les plus faibles valeurs sont rencontrées dans la partie ouest de la vallée et croissent progressivement vers le centre de celle-ci. Une gradation est également observée du sud-ouest vers le centre et de l'est vers le centre de la vallée. Les valeurs les plus élevées sont rencontrées sur les efflorescences salines au nord. Pour une grande partie de l'efflorescence d'Aramasi, les valeurs d'EC prédites sont supérieures au seuil de 0,52 dS/m. L'efflorescence présente à l'ouest du centre de la vallée possède quant à elle des valeurs d'EC prédites inférieures à ce seuil. L'inclusion de zones à valeurs d'EC plus faible au sein de zones à gammes de valeurs plus élevées est observée comme pour l'ESP, mais de manière plus marquée. Une similitude dans la distribution des valeurs prédites de l'EC et de l'ESP à l'échelle de la vallée est observée. En effet, la gradation des valeurs de ces variables se fait globalement suivant les mêmes directions. La moyenne des valeurs de l'EC prédites est égale à 0,41 et est proche de celle des observations. La médiane, égale à 0,37, est quant à elle près de 5 fois plus grande que celle des observations.

En ce qui concerne le pH (KCl), 123 observations constituent la base de données de cette variable après le traitement des outliers et des données suspectes. Ces observations sont comprises entre 4,36 et 10,2 unités de pH, la moyenne étant égale à 6,69 et l'écart-type à 1,09. La médiane est quant à elle égale à 6,56. 11 observations se situent au-dessus de pH (KCl) égal à 8. Celles-ci sont systématiquement situées sur ou à proximité des efflorescences salines, à l'exception de deux d'entre elles, l'une étant située entre les efflorescences nord et l'efflorescence d'Aramasi, et l'autre non loin du lac Angostura.

La méthode de prédition spatiale utilisée a été celle du krigage ordinaire sans retrait de tendance. En effet, le krigage sur les résidus après avoir retiré une tendance d'ordre 1 ou 2 diminuait les performances de prédition du modèle. Une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = 0$ a été nécessaire pour vérifier la normalité des données.

Le modèle de prédiction spatiale a été construit sur 98 observations. Le semi-variogramme optimal a été obtenu en considérant un modèle sphérique. La portée pour ce modèle optimisé par cross-validation est d'un peu plus de 27 000 mètres. Un effet pépite est obtenu et est égal à 0,0217. Le palier partiel est quant à lui égal à 0,010. Sa représentation est reprise à la figure 31.

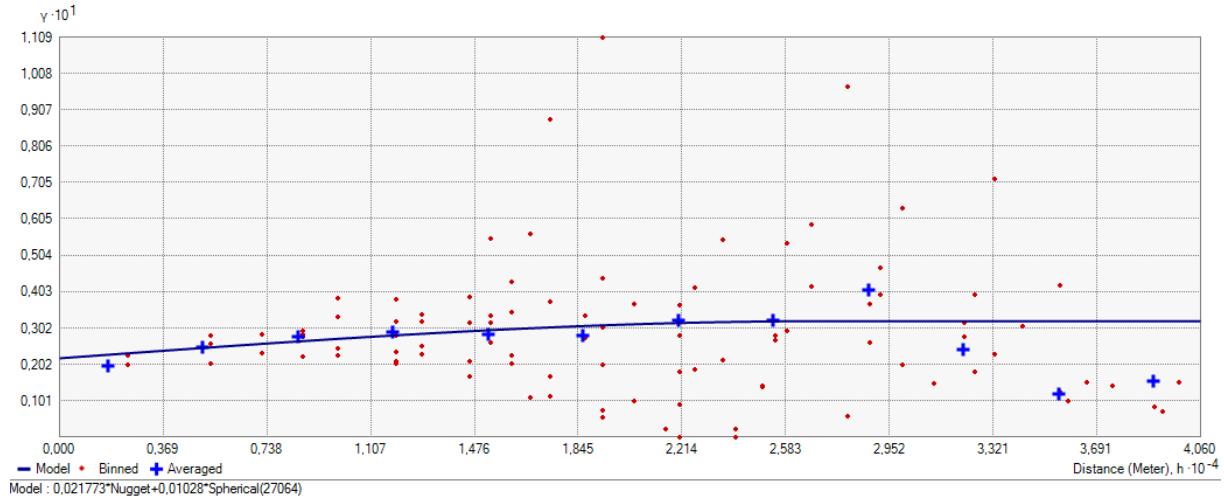


Figure 28. Semi-variogramme concernant le pH (KCl) optimisé par cross-validation suivant un modèle sphérique. La portée est égale à 27 064 mètres, l'effet de pépite à 0,0217 et le palier partiel à 0,010.

Le modèle de krigage ordinaire retenu considère huit secteurs où 3 observations sont incluses dans le calcul de la valeur prédictive en un point (les huit secteurs sont une subdivision des quatre secteurs orientés suivant les quatre directions cardinales). 25 observations ont été utilisées pour apprécier la qualité du modèle obtenu. Sur base de ces observations le RMSE est de 0,76 unité de pH et la moyenne des erreurs de 0,25 unité de pH. La carte de prédiction du pH (KCl) est donnée à la figure 32.

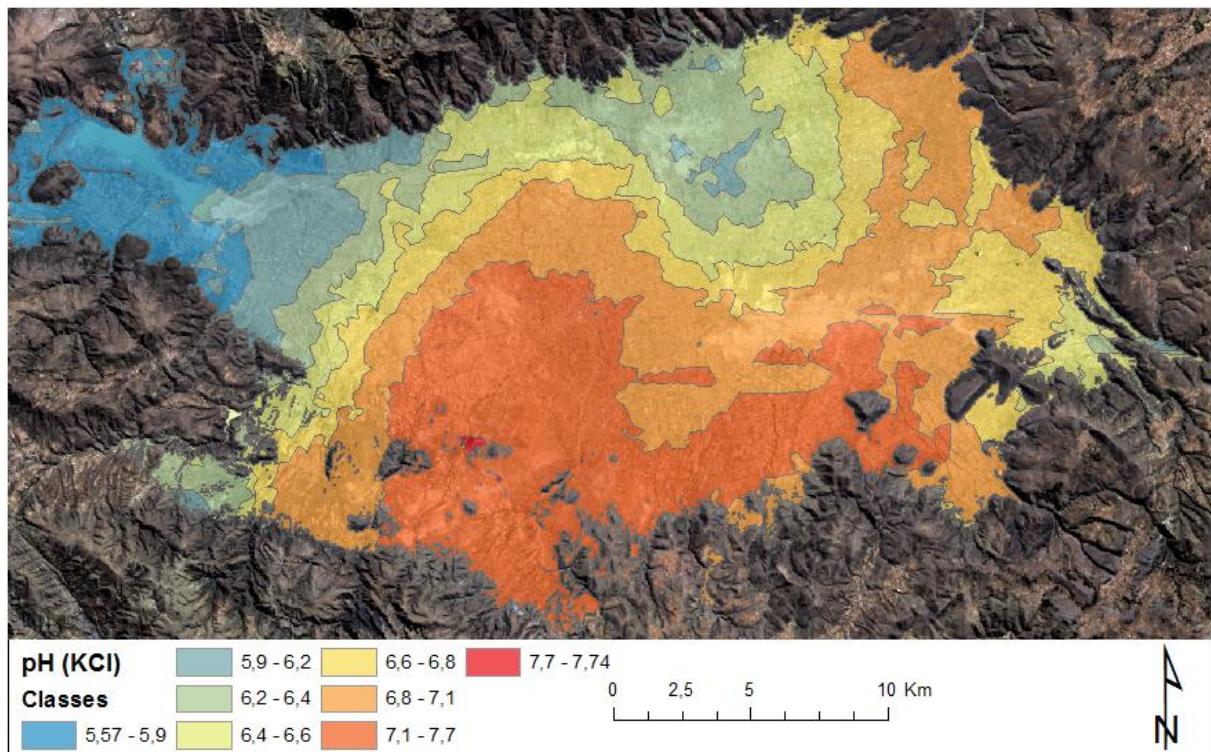


Figure 29. Carte de prédiction du pH (KCl) de la Haute Vallée obtenue par krigage ordinaire.

La carte de prédiction du pH (KCl) (voir figure 32) montre que les gammes de valeurs explorées pour la résolution fixée du modèle de prédiction sont comprises entre 5,57 et 7,74 unités de pH. Aucun pH supérieur à 8 n'est donc prédit. La moyenne et la médiane des valeurs prédictes, égales à 6,73 et 6,80 respectivement, sont toutes deux très proches de celles calculées sur base des observations. En ce qui concerne la distribution spatiale du pH (KCl), les valeurs les plus élevées sont observées au sud de la vallée. Globalement, les valeurs de pH (KCl) décroissent en direction du nord-ouest et du nord, les plus petites valeurs prédictes étant à l'ouest à proximité du lac Angostura. Seule l'efflorescence à l'ouest du centre de la vallée se voit attribuée pour l'entièreté de sa surface des valeurs supérieures à pH 7. Ce n'est le cas que partiellement pour celle d'Aramasi. En ce qui concerne les efflorescences au nord de la vallée, celle la plus à l'ouest se voit attribuer des valeurs de pH proche de la neutralité alors que celle la plus à l'est se voit prédire des pH plus bas proches de pH 6.

TOC et CEC

La base de données du TOC est constituée de 115 observations. Ces observations sont comprises entre 0,1 et 1,6 %, la moyenne étant égale à 0,8 et l'écart-type à 0,3. La médiane est quant à elle égale à 0,8%.

La méthode de prédiction spatiale utilisée a été celle du krigeage ordinaire avec dérive externe. Une interpolation polynomiale d'ordre 1 a été soustraite du jeu de données et le krigeage a été réalisé sur les résidus. Une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = 0$ a été nécessaire pour vérifier la normalité des données.

Le modèle de prédiction spatiale a été construit sur 92 observations. Le semi-variogramme optimal a été obtenu en considérant un modèle sphérique. La portée pour ce modèle optimisé par cross-validation est d'environ 830 mètres. Aucun effet pépite n'a été obtenu. Le palier est quant à lui égal à 0,145. Sa représentation est donnée à la figure 33.

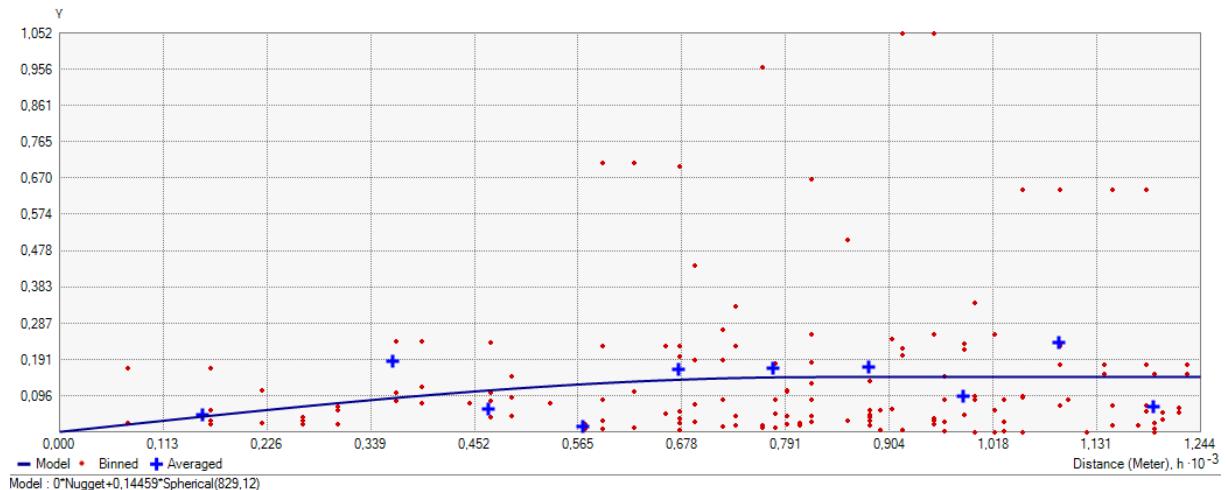


Figure 30. Semi-variogramme concernant le % TOC optimisé par cross-validation suivant un modèle sphérique. La portée est égale à 829 mètres et le palier partiel à 0,078. Aucun effet de pépite n'a été observé.

Le modèle de krigeage avec dérive externe retenu considère quatre secteurs orientés suivant les quatre directions cardinales où 3 à 5 observations sont incluses dans le calcul de la valeur prédictive en un point. 23 observations ont été utilisées pour apprécier la qualité du modèle obtenu. Sur base de ces observations le RMSE est de 0,26% et la moyenne des erreurs de 0,082 %. La carte de prédiction du % TOC est donnée à la figure 34.

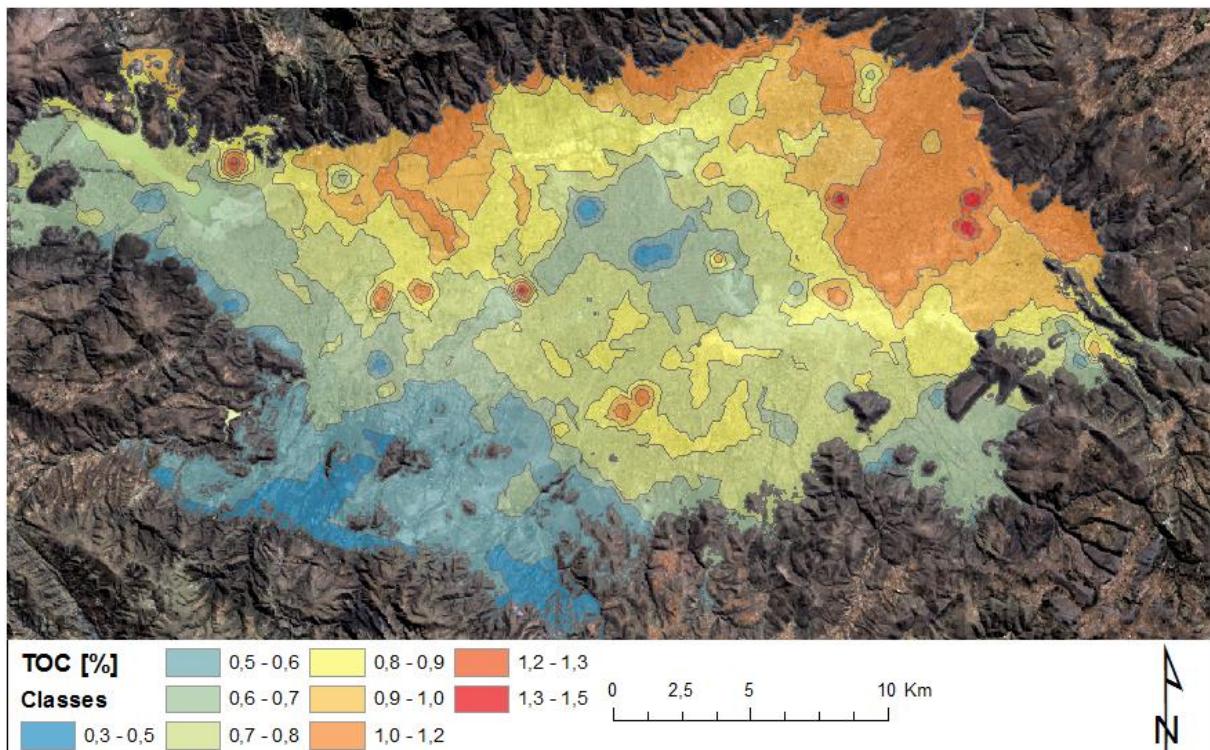


Figure 31. Carte de prévision du TOC [%] de la Haute Vallée obtenue par krigage avec dérive externe d'ordre 1.

Globalement, les valeurs prédictives de TOC situées au nord-est et au nord sont plus élevées qu'au sud et sud-ouest de la vallée. La prévision de la distribution spatiale du TOC présente des discontinuités relativement marquées. En effet, un nombre significatif de zones à valeurs de TOC plus élevées ou plus faibles incluses dans des zones de valeurs plus faibles ou plus élevées est observé. Les efflorescences salines ne semblent cependant pas se différencier par des gammes de valeurs de TOC spécifiques. La moyenne des valeurs prédictives de TOC sur l'ensemble de la vallée est identique à celle des observations, celle-ci étant égale à 0,8%. Dans le cas de la médiane, elle est très proche de celle des observations et est égale à 0,8%.

Pour la CEC, 109 observations constituent la base de données de cette variable après le traitement des outliers et des données suspectes. Ces observations sont comprises entre 5,1 et 22,7 cmolc/kg, la moyenne étant égale à 11,4 et l'écart-type à 3,6. En ce qui concerne la médiane, elle est égale à 10,9 cmolc/kg.

La méthode de prévision spatiale utilisée a été celle du krigage ordinaire avec dérive externe. Une interpolation polynomiale d'ordre 1 a été soustraite du jeu de données et le krigage a été réalisé sur les résidus. Une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = 0$ a été nécessaire pour vérifier la normalité des données.

Le modèle de prévision spatiale a été construit sur 87 observations. Le semi-variogramme optimal a été obtenu en considérant un modèle sphérique. La portée pour ce modèle optimisé par cross-validation est d'un peu moins de 1800 mètres. Un effet pépite est obtenu et est égal à 0,015. Le palier partiel est quant à lui égal à 0,078. Sa représentation est donnée à la figure 35.

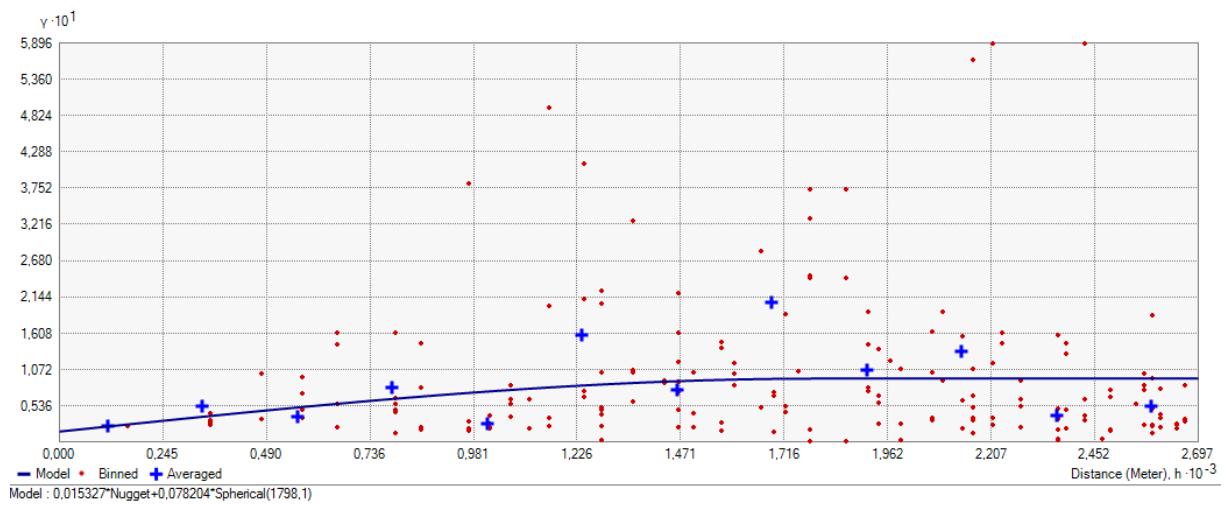


Figure 32. Semi-variogramme concernant la CEC optimisé par cross-validation suivant un modèle sphérique. La portée est égale à 1798 mètres, l'effet de pépite à 0,015 et le palier partiel à 0,078.

Le modèle de krigage avec dérive externe retenu considère quatre secteurs orientés suivant les quatre directions cardinales où 2 observations sont incluses dans le calcul de la valeur prédite en un point. 22 observations ont été utilisées pour apprécier la qualité du modèle obtenu. Sur base de ces observations le RMSE est de 3,01 cmolc/kg et la moyenne des erreurs de 0,30 cmolc/kg. La carte de prédiction de la CEC est donnée à la figure 36.

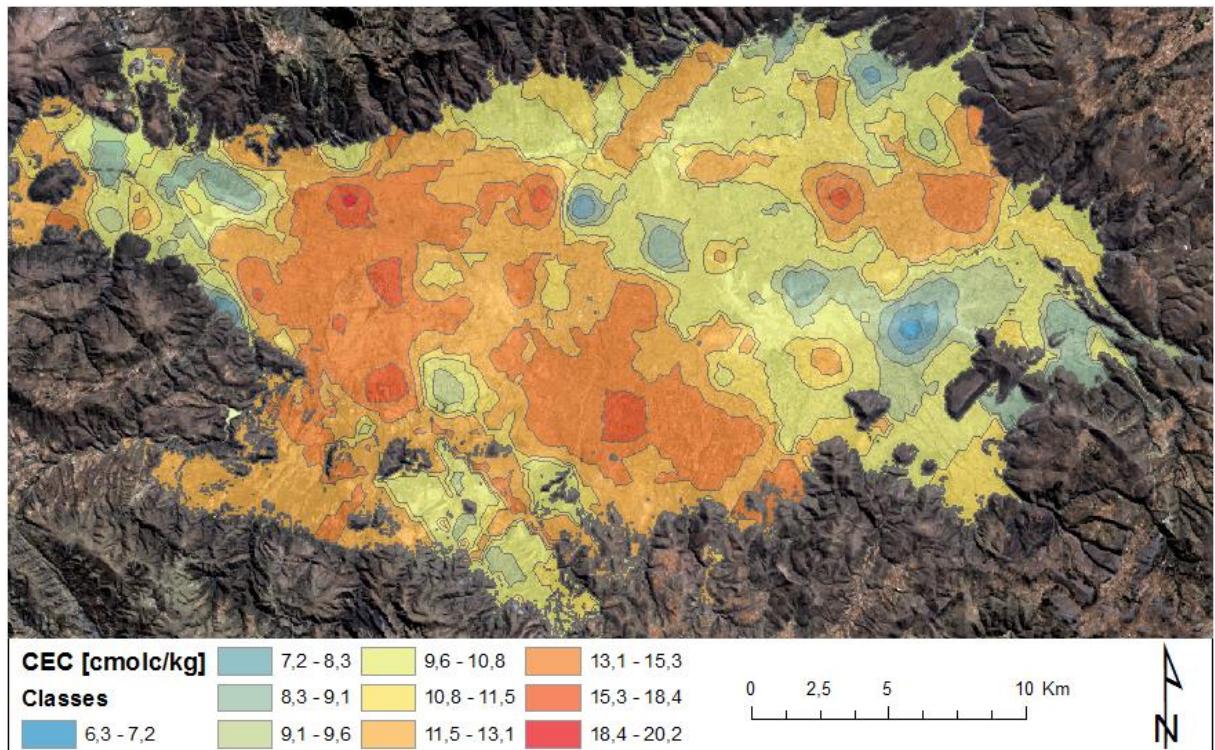


Figure 33. Carte de prédiction de la CEC [cmolc/kg] de la Haute Vallée obtenue par krigage avec dérive externe d'ordre 1.

De manière générale, les valeurs de CEC sont plus élevées à l'ouest et au sud-est de la vallée. Comme pour le TOC, les efflorescences salines ne semblent pas se dénoter par des gammes de valeurs spécifiques de CEC. Une certaine discontinuité au sein des valeurs prédites est observée, un nombre significatif de zones à valeurs de CEC plus élevées ou plus faibles étant incluses dans des zones de valeurs plus faibles ou plus élevées respectivement. La moyenne et

la médiane des valeurs de CEC prédites sur l'ensemble de la vallée sont quant à elles proche de celles des observations, leurs valeurs étant égales à 11,6 et 11,4 cmolc/kg respectivement.

2.2. Cartes des sols

Classification simplifiée

Sur base de l'ESP et de l'EC, la carte des types de sols envisagés au sein de la classification simplifiée a été réalisée avec la résolution d'un pixel fixée à 200 mètres (voir figure 37). Trois types de sols sont prépondérants et sont, par ordre décroissant de surface couverte : les sols sodiques, les sols salins-sodiques et les sols agricoles typiques. Les sols uniquement salins ne sont en réalité rencontrés qu'en un seul point (pixel) au nord de la vallée. Les sols salins-sodiques sont situés dans la partie centrale de la vallée. Ils recouvrent l'entièreté des efflorescences salines au nord de la vallée et une partie de l'efflorescence saline d'Aramasi au sud-est. À proximité immédiate de ces sols, les sols sodiques sont rencontrés. Ils recouvrent les autres efflorescences ou partie d'efflorescences de la vallée où des sols salins-sodiques ont été prédits. Les sols agricoles typiques sont quant à eux principalement rencontrés à l'ouest et au sud-ouest de la vallée.

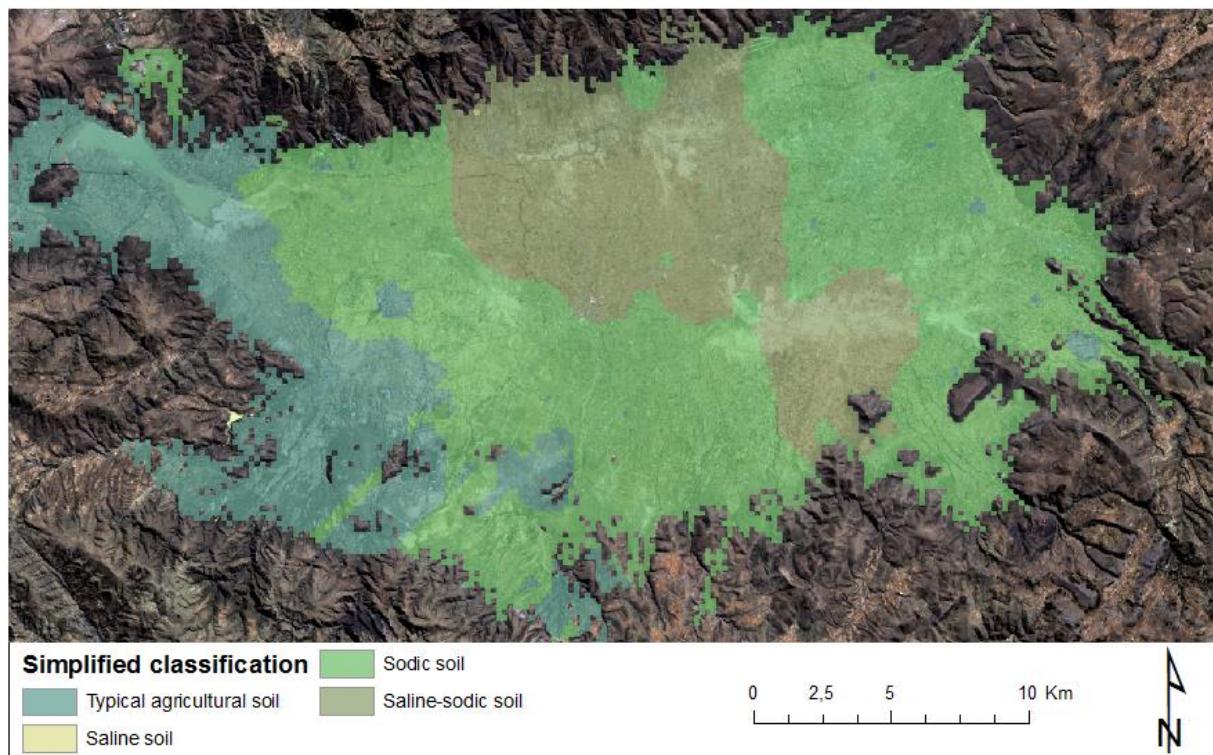


Figure 34. Classification simplifiée combinant les prédictions de l'ESP et de l'EC. Les sols identifiés sont, par ordre décroissant d'importance de surface couverte, les sols sodiques, salins-sodiques, agricoles typiques et salins. Les sols salins ne sont en réalité prédits qu'en un seul pixel au nord de la vallée.

Classification sur base de l'arbre décisionnel

Sur base des cinq variables présentées précédemment, la carte des types de sols envisagés par la proposition d'arbre décisionnel donné à la figure 27 a été réalisée avec la résolution d'un pixel fixé à 200 mètres. Seulement 4 types de sols en lien avec 5 profils sont prédits. Aucun Solonchaks ne figurent parmi ceux-ci. Les SCamP du profil de San Benito occupent la partie la plus centrale de la vallée et recoupent en partie l'une des efflorescences nord et en partie celle

d'Aramasi. Les SCamP d'Arani sont prédis quant à eux dans le sud de la partie centrale et couvrent une partie importante de l'efflorescence d'Arani. Les Fluvisols et Cambisols se retrouvent essentiellement dans la moitié nord de la vallée. Les sols de types Abruptic Lixisol Argisodic Salic sont situés quant à eux à l'est et au sud-est de la vallée.

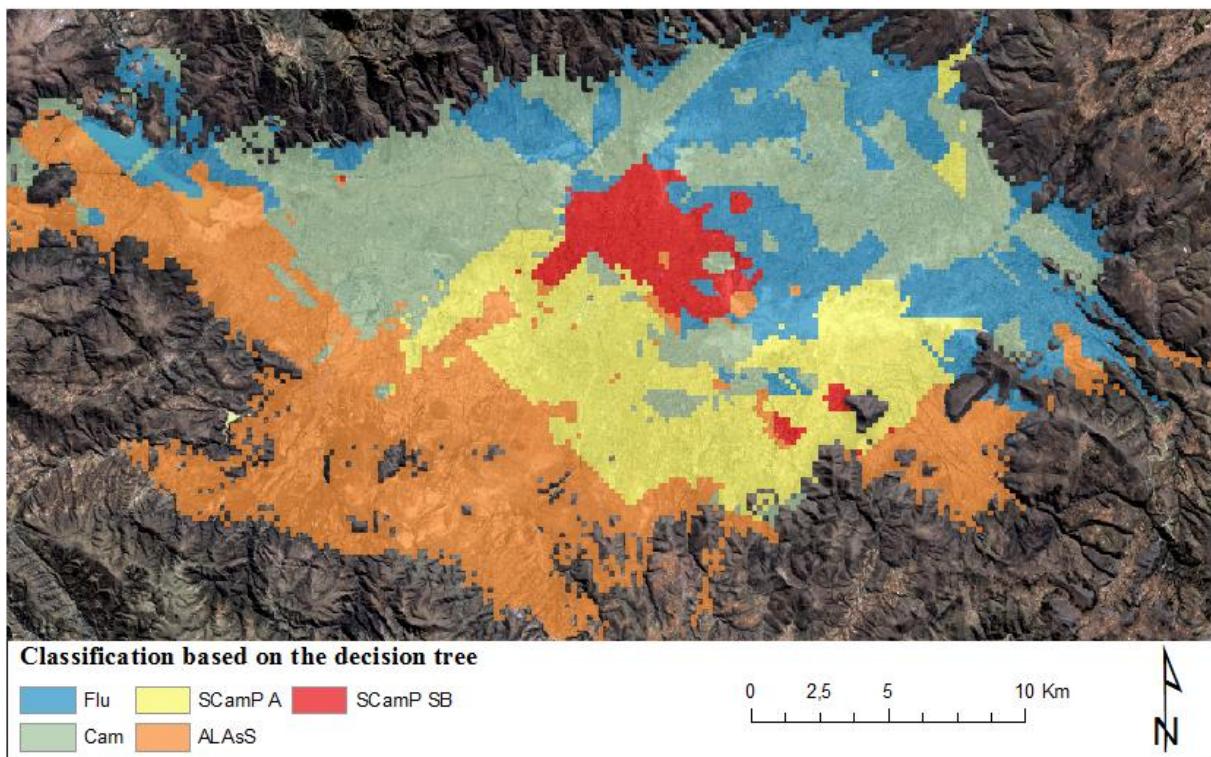


Figure 35. Classification proposée sur base de l'arbre décisionnel. Sur les 7 types de sols initialement envisagés suivant l'arbre décisionnel, seulement 4 types de sols différents en lien avec 5 profils sont prédis. Aucun Solonchaks ne figurent parmi les sols prédis.

IV. Discussion

IV.1. Pertinence du choix des variables mesurées

Justification des choix posés

En ce qui concerne la caractérisation de la salinisation, le choix de travailler sur base de mesures effectuées au sein d'un ratio sol : eau s'est imposé naturellement. Comme expliqué au point I.2.4, les mesures au sein de l'extrait de pâte saturée de sol sont certes plus représentatives des conditions rencontrées par les plantes au sein du sol (Richards et al., 1954), mais présentent une série d'inconvénients non négligeables que sont : le temps nécessaire à leur réalisation (Sonmez et al., 2008; Weil & Brady, 2017), leur coût important dans le cadre de campagnes de suivi de la salinisation à grande échelle et certaines imprécisions concernant la méthodologie d'obtention de la pâte de sol pouvant entraîner des erreurs (Amakor et al., 2014). Pour ces raisons et au vu du nombre important d'échantillons à analyser (plus de 150), le choix de caractériser la salinité sur base d'un ratio sol : eau de type 1 : 5 (en masse) a été posé. L'utilisation de ce type de ratio était déjà considérée par Richards et al. (1954) comme une alternative appropriée notamment pour le suivi de la salinisation dans le temps. De plus, comme expliqué précédemment (voir I.2.4), Herrero et al. (2015) préconisent cette méthode pour la caractérisation de certains sols salins.

Le choix de se tourner vers cette méthode de caractérisation de la salinisation n'est donc pas problématique en soit, d'autant plus que les mesures d'ECe et d'EC de type 1 : 5 sont corrélées entre elles et que le passage de l'une à l'autre est possible (Weil & Brady, 2017). L'estimation des valeurs d'ECe sur base de l'EC 1 : 5 via les équations de Sonmez et al. (2008) a uniquement été réalisée afin de pouvoir classer au mieux les profils de sols (les seuils de valeurs caractéristiques font référence à l'ECe) et de comparer les valeurs obtenues avec d'autres études.

Pour la mesure caractérisant la sodisation, l'ESP a été choisi puisqu'il est une mesure directe de ce mécanisme en comparaison au SAR et que l'utilisation de l'extrait de pâte saturée de sol n'a pas été réalisé. En ce qui concerne l'alcalinisation, le pH (KCl) a été choisi puisque, à nouveau, l'extrait de pâte saturée n'a pas été effectuée et qu'il permet d'obtenir des valeurs plus stables que le pH eau (Darab, 1975).

Cohérence et pertinence des observations

La pertinence des valeurs obtenues peut être estimée sur base des mesures réalisées par Metternicht et al. (1997) au sein de la haute vallée. Dans cette étude, les valeurs d'ECe variaient de 0,3 à 140 dS/m. Dans le cadre de ce travail, les valeurs d'ECe estimées sur base de l'EC 1 : 5 et des équations de Sonmez et al. (2008) varient de 0,00 à 75,12 dS/m. Il est toutefois important de constater que les mesures réalisées par Metternicht et al. (1997) ont été effectuées sur des échantillons de sols représentatifs des 5 premiers centimètres, alors que celles réalisées dans ce travail ont été effectuées sur des échantillons de sols représentatifs des 20 premiers centimètres. Par conséquent, dans le cas de mesures effectuées sur des sols présentant des efflorescences salines, il serait cohérent d'observer une ECe mesurée sur les 5 premiers centimètres de sol plus importante que celle mesurée sur les 20 premiers centimètres. En effet, comme expliqué précédemment (voir I.2.2), les sels peuvent être amenés à précipiter en surface à la suite de remontées capillaires (Weil & Brady, 2017), ce qui implique dès lors une

concentration en sels plus importante en surface. La différence entre les valeurs maximum d'ECe observée entre ces deux études provient très certainement de la différence de profondeur envisagée par ces deux types d'échantillonnages.

Pour contextualiser les valeurs d'ESP obtenues, celles-ci peuvent être comparées au SAR mesuré par Metternicht et al. (1997). Dans cette étude, les valeurs obtenues par Metternicht et al. (1997) ont une dispersion relativement importante, puisque ces dernières sont comprises entre 6 et 3900. Pour rappel (voir tableau 2, point I.2.5), la valeur seuil de SAR correspondant à celle des 15% d'ESP utilisée dans les systèmes de classification est égale à 13. Dans le cadre de ce travail, les valeurs d'ESP obtenues sont comprises entre 0,0 et 395,5%, certaines d'entre elles se situant dès lors également largement au-dessus du seuil de 15%.

En ce qui concerne le pH, les valeurs obtenues dans ce travail peuvent être comparées aux gammes de valeurs de pH de l'extrait de pâte saturée considérées dans l'étude de Metternicht et al. (1997) pour la classification d'images satellites. Celles-ci varient de pH 7 à des pH pouvant être supérieurs à 9,5. Les valeurs de pH (KCl) mesurées lors de ce travail varient, quant à elles, de pH 4,40 à pH 10,20. Une différence importante apparaît dès lors pour les plus faibles valeurs de pH, les valeurs en dessous de 7 n'étant à priori pas envisagées par Metternicht et al. (1997). Cette différence tire plus que probablement son origine non seulement de l'objectif poursuivi par l'étude de Metternicht et al. (1997) mais également de l'échantillonnage ayant été réalisé. En effet, l'objectif de l'étude de Metternicht et al. (1997) était de pouvoir discriminer, sur base d'images satellites, les surfaces affectées par une salinisation et une alcalinisation. L'échantillonnage réalisé par Metternicht et al. (1997) ne s'étend en réalité pas sur l'ensemble de la haute vallée, mais sur une surface restreinte de celle-ci égale à 9000 hectares (la zone d'étude dans le cadre de ce mémoire couvre, pour rappel, près de 51 000 hectares). L'ensemble des unités géomorphologiques rencontrées dans la haute vallée n'ont donc pas été couvertes par cet échantillonnage, la surface d'échantillonnage couverte par Metternicht et al. (1997) comprenant uniquement la partie distale de glacis, des reliefs lagunaires plats et des playas. Par conséquent, la présence de pH inférieurs à 7 et donc inférieurs à ceux envisagés par Metternicht et al. (1997) n'est pas incohérent, d'autant plus que le pH mesuré dans cette étude est le pH (KCl).

Il est également important de souligner qu'aucune incohérence ou ambiguïté lors de la classification des profils au sein des résultats n'a été attribuable uniquement au choix de travailler avec des méthodes de mesures autres que celle impliquant l'obtention de l'extrait de pâte saturée de sol. Par conséquent, il peut être conclut que l'utilisation de ces méthodes de mesures pour caractériser la salinisation (au sens large) est pertinente.

IV.2. Classification des profils de sols

2.1. Classification WRB et facteurs de pédogenèse

Classification WRB

L'ensemble des profils de sols identifiés dans le cadre de ce travail est en cohérence avec ceux identifiés par Metternicht (1996) (voir point I.5.4), qu'il s'agisse de leurs caractéristiques ou de leur position dans le paysage. De cette manière, un Fluvisols, sol très peu développé sans horizon diagnostique, a été identifié sur un cône de déjection actif où Metternicht (1996) a

identifié des Entisols ; un Calcisols a été identifié sur un glacié, équivalent au Calcids de Metternicht (1996) ; un Lixisol, caractérisé entre autre par la présence d'un horizon argic, a été identifié à la limite entre une dépression lagunaire et la partie distale d'un glacié, ce qui équivaut à l'horizon argillic des Haplargids sur glacié de Metternicht (1996) ; un Solonchaks a été identifié sur playa, correspondant au Salids de Metternicht (1996) ; et enfin, des Sodic Cambisols (Protosalic) ont été identifiés sur des dépressions lagunaires, ce qui correspond au Natric Camborthid (Metternicht, 1996). Pour rappel (voir point I.5.4), le Natric Camborthid de la classification USDA de 1992 n'implique pas l'identification d'un horizon natric mais bien d'un horizon cambic dont l'ESP est supérieur à 40%. Certains profils identifiés se distinguent cependant quelque peu et sont discutés ci-après.

Sur base du tableau 4 (section IV.1) et des figures 23 à 25 (point IV.1.9), le profil de San Benito classé comme étant un Sodic Cambisols (Protosalic) se distingue, non pas de l'ensemble des profils, mais par sa position relative au sein du gradient de salinisation considéré. Les valeurs prises par les différentes variables (ECe, ESP, pH (KCl)) le caractérisant sont en effet très élevées et n'évoluent pas de la même manière que celle du profil d'Arani, possédant lui aussi la même classification. Elles se dénotent également quelque peu du profil de Cliza possédant, quant à lui, un horizon Salic. Sa localisation dans la haute vallée pose également question en ce qui concerne sa classification. Pour rappel, il s'agit du profil de sol ouvert à l'altitude la plus faible (2708 mètres), à proximité de l'une des efflorescences salines nord de la vallée et possédant des valeurs en ECe élevées allant jusqu'à 21,76 dS/m pour l'horizon de surface. Sur base de ces observations, la présence d'un Solonchaks pourrait être attendue mais le produit de l'épaisseur et de la conductivité, égal à 435,2, est inférieur au seuil de 450 fixé par la WRB qui doit être atteint ou dépassé à un moment de l'année. Cette observation doit dès lors être quelque peu relativisée. En effet, à moins de 7 mm près en ce qui concerne l'épaisseur de cet horizon ou de 0,74 dS/m concernant la valeur de l'ECe, ce sol aurait été classé comme un Solonchaks. Sachant que la distinction de la limite entre deux horizons n'est pas toujours très franche et que les valeurs d'ECe n'ont pas été mesurées mais estimées sur base des équations de Sonmez et al. (2008), la classification de ce sol peut être discutée. L'observation d'un Cambisols, et donc d'un sol jeune pour ce profil n'est cependant pas incohérente. En effet, sur base de la carte de la géomorphologie réalisée par Metternicht et al. (1997), celui-ci est situé sur la partie distale d'un glacié. Par conséquent, un apport de colluvions et d'alluvions peu altérées des versants nord est attendu. Ces apports de matériaux et les cônes de déjection provenant des versants des montagnes sont d'ailleurs bien visibles sur les images satellites SRTM et la carte d'altitude donnée à la figure 5 (point I.5.1).

Le profil de Santa Ana, un Sodic Solonchaks se dénote quant à lui par sa position dans la haute vallée. En effet, celui-ci ne se situe pas sur une dépression lagunaire ou playa mais sur un ancien cône de déjection. Son altitude est cependant basse et de l'ordre de celles rencontrées pour certains playas. L'horizon 2Cg₃, visible tout en bas du profil, suggère que la nappe phréatique atteint, du moins une partie de l'année, cette profondeur. Par conséquent, une remontée de l'eau de la nappe, et donc des sels dissous, par voie capillaire devrait se produire et être une des causes probables de la salinité observée. Une autre cause vraisemblable de la salinité observée pour ce profil est l'irrigation qui, comme vu précédemment (voir point I.2.2), peut-être une cause de salinisation. L'aspect localisé de cette efflorescence saline, observée uniquement sur une partie de la parcelle agricole, laisse à penser que des remontées capillaires ne doivent pas uniquement être la cause de la salinité observée pour ce profil.

Facteurs de pédogenèse

Les valeurs du taux de saturation en bases ainsi que celles de l'ESP supérieures à 100% peuvent paraître à première vue incohérentes, le complexe d'échange ne pouvant fixer plus de charges qu'il n'en possède lui-même. Les deux éléments participant de manière prépondérante à cette « sursaturation » sont le Na^+ et le Ca^{2+} . En effet, l'ESP est supérieur à 100% pour plusieurs profils et le rapport entre le Ca^{2+} échangeable et la CEC est également supérieur à 100% pour certains profils, comme celui de Tarata (Calcisols). Comme l'explique Legros (2007) pour le cas de sols calcaires possédant un taux de saturation du complexe d'échange en calcium supérieur à 100%, la cause de cette observation résulte de la méthode de mesure elle-même. Cette dernière n'extrait en réalité pas uniquement le calcium fixé sur le complexe d'échange mais également celui des carbonates de calcium d'éléments plus grossiers. La même constatation est réalisée ici, le Na^+ et le Ca^{2+} mesurés n'étant pas uniquement ceux fixés sur le complexe d'échange mais également ceux de sels ayant précipités tels que les carbonates de sodium et de calcium.

Cette observation montre notamment l'importance du matériau parental et du climat dans la pédogenèse des sols de la haute vallée. En ce qui concerne le matériau parental, Metternicht (1996) explique qu'il est la source des carbonates rencontrés dans la haute vallée suite à l'altération de matériau calcaire provenant des montagnes au sud de la haute vallée. La carte géologique du SERGEOTECMIN (2000) mentionne notamment la présence de marne au sud-ouest de la haute vallée. Cela explique dès lors également les valeurs de pH importantes observées et la prépondérance de sols relativement peu développés ; il est bien connu qu'une décarbonatation est préalable à tout autre processus d'altération. Le climat étant marqué par une importante saison sèche (voir figure 5, point I.5.2), des mouvements ascendants de solutés au sein des profils sont donc possibles après la saison des pluies et conduisent dès lors à une accumulation de bases au sein de ces derniers. Une partie de l'année étant soumises à de fortes précipitations, il pourrait toutefois être supposé qu'une altération plus prononcée ait lieu, une lixiviation des bases en profondeur pouvant être attendue. À cela, et au vu des montagnes entourant toute la haute vallée, un renouvellement important du matériau parental à la suite d'un apport de matériau provenant des montagnes, peut être l'une des raisons que des sols plus développés n'aient pas été identifiés. Pour rappel (voir I.5.6), Metternicht (1996) explique que la texture plus argileuse rencontrée au sein des dépressions lagunaires et playas constraint le déplacement des sels. Un pourcentage significativement plus important sur ces unités géomorphologiques n'a pas été observé, mais il est vrai que le profil d'Aramasi ouvert sur playa possède les plus faibles pourcentages de texture sableuse, notamment égal à 2,8% pour l'horizon de surface. Au vu également de l'effet de la sodisation sur la structure du sol et sur la conductivité hydraulique (voir I.2.3), l'hypothèse de Metternicht (1996) prend tout son sens. Il est dès lors compréhensible que même en cas de précipitations importantes la lixiviation des différentes bases et sels en solution soit très lente et participe alors également à leur accumulation au sein des profils. La géomorphologie apparaît dès lors également comme un élément prépondérant, les sols à caractère salins ayant été identifiés majoritairement sur des dépressions lagunaires et playas.

2.2. Classification simplifiée

Pour rappel (voir I.2.5), la classification simplifiée se base uniquement sur deux variables discriminantes, l'ECE et l'ESP, qui sont directement représentatives des processus de

salinisation et de sodisation. La comparaison de cette classification avec celle obtenue en suivant la WRB permet d'identifier dans quelle classe les différents sols identifiés sont placés. Les différents sols étant caractérisés par une salinité plus ou moins importante, cette comparaison représente en quelque sorte un test de sensibilité de la classification simplifiée.

En comparaison avec la concordance réalisée entre les deux classifications au tableau 6 (voir III.1.9), les profils d'Arani (SCamP) et de Cliza (ALAsS) n'ont pas été classés dans les classes souhaitées. Cette différence de classification s'explique par l'évolution de l'ECe et de l'ESP au sein de leur profil. En effet, et en comparaison avec les autres profils affectés d'une salinité, les profils d'Arani et de Cliza ont une ECe et un ESP croissant avec la profondeur (voir figure 23 et 24). Les valeurs d'ECe et d'ESP sont donc plus élevées en bas de profil et non en surface, comme c'est le cas pour les autres profils affectés par une salinité (au sens large). Il est à noter que la caractérisation d'un échantillon à une profondeur supérieure à 20 cm aurait permis de classer le profil de Cliza suivant la classification souhaitée. Pour le profil d'Arani, cette profondeur est toutefois beaucoup plus importante et est égale à 91 cm. Le profil de Cliza possède en effet un horizon Salic, en comparaison avec le profil d'Arani caractérisé seulement de Protosalic.

2.3. Identification d'indicateurs et arbre décisionnel

La proposition de l'arbre décisionnel pour la classification des sols donné à la figure 27 se veut garder le plus de sens physique et être représentatif des processus qui doivent être distingués pour classer les différents types de sols. L'utilisation de méthode statistique classique tel qu'une analyse discriminante décisionnelle pour l'identification d'indicateur permettant de classer les différents types de sols entraînerait obligatoirement une répétition d'observations pour chaque type de sol identifié. En toute rigueur, une répétition d'observation au moins égale à 10 pour chaque type de sol devrait être effectuée, ce qui conduirait dans le cas présent à l'ouverture de 70 profils ou du moins la sélection de 70 échantillons de surface dont les types de sols s'y référant sont connus. Un tel effort d'échantillonnage supplémentaire dans le cadre de ce travail n'était tout simplement pas envisageable. Pour pouvoir pallier ce manque de représentativité statistique, le choix des variables et des seuils doit dès lors garder le plus de sens possible.

Par conséquent, le choix de l'EC, de l'ESP et du pH s'est imposé naturellement ainsi que les valeurs seuils utilisées pour ces variables, celles-ci se référant aux seuils des classifications utilisées dans ce travail (WRB et classification simplifiée). Le seuil de pH 7 utilisé dans cet arbre n'est toutefois pas utilisé dans ces classifications. Il permet, dans ce cas, de distinguer les sols n'étant pas affectés d'une salinité aux Calcisols et les sols affectés par une salinité dont le pH (KCl) a systématiquement été observé comme supérieur à 7.

Deux autres variables ont été utilisées au sein de cet arbre décisionnel. Il s'agit du TOC et de la CEC. Le TOC a été considéré au vu de sa grande importance dans les propriétés biologiques, chimiques et physiques des propriétés du sol (tel que la stabilité structurale, la provision de nutriments pour les microorganismes,...) (Krull, Skjemstad, & Baldock, 2004). Obalum et al. (2017) proposent d'ailleurs de considérer la matière organique du sol comme un indicateur général de la dégradation des sols. Dans le cadre de cet arbre décisionnel, le TOC est utilisé avec comme hypothèse sous-jacente que les sols fortement affectés par une salinité et une sodisation possèdent un pourcentage de TOC plus faible que des sols non affectés. Le TOC distingue donc ici les sols affectés par une salinisation et ceux ne l'étant pas ou que très

faiblement. En effet, le profil d'Arani (SCamP) est regroupé avec les sols n'étant pas affectés par une salinisation. Cela s'explique du fait que les valeurs seuils de 4 dS/m de l'ECe et de 15% de l'ESP ne sont dépassées qu'à plus de 69 et 91 cm respectivement. La valeur seuil de 0,7% a été calculée comme le point médiant séparant les deux groupes de sols, ne possédant pas de valeur de référence sur laquelle se baser. Elle est dès lors discutable, au vu du nombre d'observations sur base duquel elle a été calculée.

La CEC, quant elle, a été sélectionnée sur base de son lien avec l'altération des sols. Le choix de la CEC a également l'avantage de ne pas ajouter une variable supplémentaire à quantifier pour la classification, celle-ci étant nécessaire pour le calcul de l'ESP déjà inclus au sein de l'arbre. Elle permet dès lors de distinguer le Fluvisols au Cambisols sur base d'une valeur seuil de 10,8 cmolc/kg calculée comme le point médiant séparant ces deux sols. Comme pour la valeur seuil du TOC, celle-ci est discutable au vu du nombre d'observations sur lesquelles elle a été calculées.

IV.3. Approche cartographique

3.1. Variables discriminantes.

ESP et EC

L'ESP et l'EC présentent de très grandes similitudes en ce qui concerne les résultats obtenus. Tout d'abord, il s'agit des deux seules variables cartographiées pour lesquelles l'utilisation d'une méthode de prédiction géostatistique n'a pas été possible, faute de vérification de la normalité des observations. Ces deux variables possèdent en effet un écart-type relativement important et des valeurs extrêmes se détachant fortement du reste de la population (en témoigne la comparaison de la valeur maximale observée à celle de la médiane pour chacune des variables). Ces caractéristiques concernant la distribution de la population de l'ESP et de l'EC se marquent également sur leur nuage de points de semi-variances.

En effet, comme montré à la figure 28 (point III.2.1), le nuage des points des semi-variances de l'ESP est constitué de trois nuages distincts dont les deux supérieurs sont en lien avec les efflorescences salines visibles sur les images satellite. Ces gammes de valeurs distinctes explorées par les semi-variances montrent que : 1) des différences de valeurs très importantes existent entre les observations constituant le jeu de données ; 2) ces sauts brusques de valeurs sont observés aussi bien pour de très faibles distances (entre deux observations) que pour de plus grandes (autrement dit, tout le long de l'axe des abscisses du semi-variogramme). Des limites très franches dans la distribution spatiale de ces variables doivent donc exister ou, dans tous les cas, être inférieures aux gammes de distances explorées par le système d'échantillonnage mis en place. Cette dernière constatation n'aurait pas pu être faite si, par exemple, ces semi-variances très élevées avaient été observées seulement après une certaine distance sur le semi-variogramme. L'identification des observations impliquées dans le calcul de ces semi-variances montre qu'il s'agit systématiquement des semi-variances calculées entre une observation localisée sur une efflorescence et une autre observation non située sur une efflorescence. Pour rappel, les efflorescences salines observables sur les images satellites coïncident avec les playas identifiés par Metternicht et al. (1997). Ces sauts brusques de valeurs sont donc très localisés et principalement liés aux efflorescences salines, soit aux playas et à la géomorphologie. Cette constatation n'aurait pu être réalisée si, par exemple, les observations impliquées dans le calcul des semi-variances étaient constituées de couple d'observations

quelconques réparties sur l'ensemble de la haute vallée. En ce qui concerne l'EC, les mêmes conclusions sont tirées sur base du nuage de points des semi-variances obtenu pour cette variable. Ces différentes constatations sont des observations clés dans la compréhension des échelles spatiales et facteurs de variations des sols.

À propos de la diminution des valeurs maximales prédictes en comparaison avec les valeurs maximales observées, celle-ci est également un signe du caractère localisé de la distribution spatiale de ces variables. En effet, bien que la méthode des distances inverses, tout comme le krigage, est un interpolateur exact, le passage à une résolution fixée implique irrémédiablement la réalisation d'une moyenne pour attribuer une seule valeur à la surface de prédiction considérée (ici égale à la surface couverte par le pixel). La prédiction de la valeur au point de coordonnées d'une observation n'est donc plus exactement la valeur de l'observation elle-même. Cette diminution de la valeur maximale prédictive en comparaison de celle observée sera d'autant plus importante que cette observation est localisée ou, autrement dit, qu'elle dénote fortement vis-à-vis de son voisinage spatial.

En ce qui concerne les modèles de prédiction spatiales obtenus, le RMSE du modèle de l'ESP (25,1%) et de l'EC (0,68 dS/m) sont tous les deux importants et supérieurs aux seuils respectifs de 15% et 0,52 dS/m. Il est dès lors difficile de prédire avec précision les valeurs prises par ces deux variables. Cette difficulté s'observe également dans le nombre d'observations qu'inclut le modèle optimal de prédiction. En effet, 15 observations suivant chaque direction cardinale sont prises en compte pour la prédiction des valeurs soit 60 observations lorsque cela est possible. Les prédictions en un point se rapprochent donc plus de la réalisation d'une moyenne pondérée suivant la distance séparant le point de prédiction à chaque observation de l'ensemble du jeu de données que sur un nombre d'observation restreint à proximité du point de prédiction. Sur base des observations précédentes, il peut être supposé avec une grande certitude que cela est également dû au caractère brusque et localisé des variations entre les observations.

Les cartes obtenues (figures 29 et 30) sont, bien évidemment, en accord avec les observations précédentes réalisées. Trois observations pertinentes sont toutefois à relever. La première concerne la tendance d'accroissement que ces variables manifestent, depuis les versants vers le centre de la vallée et plus particulièrement en direction des efflorescences salines (correspondant aux playas). La deuxième observation concerne la constatation que la médiane des prédictions effectuées est très nettement supérieure la médiane des observations (9 fois plus grande pour l'ESP et 5 fois plus grande pour l'EC). Partant de l'hypothèse qu'une certaine similitude devrait être conservée entre la distribution des observations et celle des prédictions, cette constatation suggère que le modèle de prédiction surestime globalement les valeurs d'ESP et d'EC. La troisième observation concerne la carte de prédiction de l'EC où l'efflorescence saline à l'ouest du centre de la vallée possède des valeurs inférieures au seuil de 0,52 dS/m. En réalité, l'observation réalisée sur cette efflorescence fait partie du jeu de données de validation du modèle et non du jeu de données ayant été inclus pour la construction du modèle. Cela constitue une fois de plus, s'il fallait encore le souligner, une constatation concernant le caractère brusque et localisé des variations entre les observations.

pH (KCl)

Pour le pH, la méthode du krigage ordinaire a été utilisée. Le semi-variogramme obtenu (voir figure 31) ne montre cependant pas une auto-corrélation spatiale très marquée. En effet, l'effet de pépite très important observé représente près de 70% de la valeur du palier. Cet effet de

pépite montre que pour de très petites distances séparant deux points, de très grandes variations peuvent être observées. L'auto-corrélation spatiale ne s'exprime donc que sur les 30% restants de la valeur du palier. Au regard de la portée considérée par le modèle, égale à 27 km soit presque aussi grande que la longueur de la haute vallée, cette auto-corrélation spatiale peut-être remise en question.

En ce qui concerne la distribution des valeurs prédictes en comparaison aux observations, leur moyenne et médiane sont relativement proches. Toutefois, la valeur maximale prédictée est beaucoup plus faible que la valeur maximale observée, celles-ci étant respectivement de 7,74 et 10,20 unité de pH. Aucune valeur prédictée n'est donc supérieure à pH 8. Des observations supérieures à cette valeur sont toutefois relevées et sont présentes en majorité sur les efflorescences salines. Les valeurs prédictes les plus élevées sont quant à elles situées au sud de la vallée et décroissent globalement vers le nord. Il s'agit certainement de l'influence du matériau parental calcaire provenant des montagnes au sud de la vallée que Metternicht (1996) mentionne comme source des carbonates. La carte géologique du SERGEOTECMIN (2000) mentionne en effet la présence de marne.

Au vu de la faible auto-corrélation spatiale, de l'effet de pépite important et de la différence importante entre la valeur maximale des observations et des prédictions, il est conclu que les variations de pH (KCl) revêtent également un caractère brusque et localisé bien que toutefois moins prononcé que pour l'ESP et l'EC.

TOC et CEC

Pour ces deux variables, le krigage sur les résidus à la suite du retrait d'une dérive d'ordre 1 a pu être utilisé. Les modèles de prédiction obtenus possèdent pour chacune de ces deux variables une moyenne des erreurs faibles (0,1% pour le TOC et 0,3 cmolc/kg pour la CEC). Les RMSE sont certes plus élevés, mais restent inférieurs aux seuils utilisés au sein de l'arbre décisionnel proposé pour le classement des échantillons. La moyenne, la médiane et les valeurs extrêmes prédictes sont très proches de celles des observations. Une meilleure qualité de prédiction est donc observée pour ces modèles que pour les précédents.

Aucune observation ne laisse supposer que des variations très brusques et localisées existent, comme c'est le cas pour l'ESP, l'EC et le pH (KCl). En effet, l'effet de pépite est faible pour la CEC et inexistant pour le TOC, et la portée des modèles est bien plus faible que pour le pH (829 mètres pour le TOC et 1798 mètres pour la CEC). Aucun lien apparent avec les efflorescences salines ne semble observable. Pour la CEC, une prépondérance de faibles valeurs à proximité des versant n'est pas observée. Au vu de ces caractéristiques, l'utilisation de ces variables au sein de l'arbre décisionnel peut-être remise en question.

3.2. Cartes des sols

Classification simplifiée

L'ESP et l'EC évoluant globalement de la même manière au sein de la haute vallée, la carte de prédiction des différents types de sols suivant la classification simplifiée présente les mêmes caractéristiques. Il est cependant important de relever que les échelles spatiales de variations de ces sols apparaissent à première vue comme étant relativement grandes, mais que cette constatation ne peut être réalisée en connaissance des caractéristiques des distributions spatiales de l'ESP et de l'EC. L'absence apparente de prédiction de sols salins (du moins pour une surface significative) montre que la salinisation est systématiquement associée à une sodisation.

Classification sur base de l'arbre décisionnel

La carte de prédiction des différents types de sols sur base de l'arbre décisionnel montre peu de cohérence. Cette carte incluant de nombreuses informations (c'est-à-dire les cartes de prédiction des 5 variables discriminantes et l'arbre décisionnel proposé) les incertitudes liées à chacune de ces informations s'amplifient. En l'occurrence, il est dès lors difficile d'identifier qui de la spatialisation ou de l'arbre décisionnel est le plus à remettre en question. Certaines informations peuvent cependant être tirées de cette carte de prédiction. En effet, bien que la position des sols prédis dans la haute vallée est incohérente, elle n'en reste pas moins représentative du fonctionnement de l'arbre décisionnel proposé pour les performances cartographiques obtenues.

L'absence de Solonchaks s'explique par l'absence de valeurs prédictives de pH (KCl) supérieures à 8,5, valeurs pourtant bien présentes au sein du jeu de données. Cette absence est dans ce cas du aux performances cartographiques, comme discutées précédemment. Les sols les plus affectés par une salinisation et sodisation sont par conséquent les SCamP lié au profil de San Benito. Leur position centrale dans la haute vallée n'est en soit pas incohérente, mais aucune efflorescence saline ne se voit affecter par ce type de sol de manière significative. Des valeurs d'EC importantes y sont pourtant bien rencontrées, en témoignent les produits cartographiques précédents. Les performances cartographiques du TOC figurant parmi les meilleures obtenues dans ce travail, son utilisation au sein de l'arbre décisionnel est remise en question et, dans tous les cas, l'utilisation de la valeur seuil de 0,7% n'est pas satisfaisante. La même conclusion est tirée pour l'utilisation de la CEC. En effet, une proportion importante de Fluvisols, identifiés dans ce travail à la suite de la présence d'un cours d'eau temporaire, sont identifiés entre autres au centre de la vallée et sur certaines efflorescences. Enfin, l'absence de tout Calcisols suggère que le seuil d'ESP de 6% n'est pas satisfaisant dans ce contexte.

V. Conclusions et perspectives

V.1. Conclusions

En conclusion, l'ouverture et la description de profils de sols ainsi que la caractérisation de la distribution spatiale des propriétés de surface des sols affectés par une salinisation (au sens large) a permis de mettre en évidence les facteurs et échelles spatiales de variations des sols au sein de la *Valle Alto* de Cochabamba (Bolivie). Les facteurs de variations mis en évidence rejoignent ceux identifiés par Metternicht (1996) et Metternicht et al. (1997) et sont : le matériau parental calcaire provenant des montagnes au sud de la *Valle Alto*, la géomorphologie et le climat semi-aride. L'observation du profil de Santa Ana laisse toutefois supposer que l'irrigation de parcelles agricoles peut également participer à la salinisation dans la *Valle Alto* mais dans une moindre mesure.

En ce qui concerne les échelles spatiales de variations des sols et de leurs propriétés, il a été montré que des variations très brusques et localisées étaient observées pour les variables caractéristiques d'une salinisation (au sens large), à savoir : l'ESP, l'EC et le pH (KCl). Ces variations extrêmement brusques pour de faibles distances sont presque exclusivement liées aux efflorescences salines visibles sur images satellites. Elles ont empêché l'utilisation du krigeage ou, dans le cas du pH (KCl), en ont montré les limites. Il en résulte également que les cartes obtenues de prédition des types de sols identifiés sur base d'échantillons composites des 20 premiers centimètres de sol ne sont pas satisfaisantes.

Enfin, la caractérisation analytique de la salinisation, sodisation et alcalinisation, effectuée suivant des méthodes de laboratoire plus rapides et plus simples, se sont révélées pertinentes. En particulier, les méthodologies courantes consistant à réaliser les différentes mesures (electro-conductivité ECe, pH et SAR) au sein d'un extrait de pâte saturée de sol ont été remplacé par :1) l'électro-conductivité au sein d'un ration sol : eau de type 1 : 5 (EC 1 : 5) ; 2) le pH KCl (ratio 1 : 5) et 3) le pourcentage de sodium échangeable ESP. L'ECe estimée sur base de l'EC 1 : 5 via les équations de Sonmez et al. (2008) a notamment permis la classification des sols. Aucune incohérence ou ambiguïté résultant de ce choix n'a été mis en évidence. Ces méthodes de mesures peuvent donc être proposées dans le cadre d'une évaluation et du suivi d'une salinisation (au sens large).

V.2. Perspectives

Avant de pouvoir appliquer un système de classification pour identifier les différents types de sols, il semble essentiel d'améliorer les performances de prédition cartographique des variables discriminantes de la salinisation. Plusieurs méthodes peuvent être envisagées, mais ces dernières représentent un investissement important.

Au vu des variations très brusques et localisées des observations, la distinction des zones fortement affectées par une salinisation au sens large pourrait être réalisée. Deux options existeraient pour la cartographie :

- 1) Considérer les deux types de zones distinguées de manière complètement indépendante et réaliser des modèles de prédition cartographique distincts pour chacune de ces zones. Un échantillonnage supplémentaire pourrait être nécessaire en fonction du nombre d'observations disponibles par zone distinguée. Dans le cadre de l'échantillonnage réalisé pour ce travail,

moins de 10 observations ont été recensées sur les efflorescences salines. Si les zones distinguées correspondent exactement à ces efflorescences, il faudra donc obtenir plus d'observations pour la construction du modèle de prédiction. Cela ne serait pas forcément le cas si la distinction était réalisée, par exemple, sur base des dépressions et des playas.

2) Utiliser un système de modification de l'attribution du poids des observations pour la prédiction en un point tenant compte de l'appartenance à la zone où la prédiction est réalisée, mais ce système semble à première vue plus difficile à mettre en place. Ces méthodes restent toutefois des pistes de solutions ; une recherche bibliographique préalable à leur réalisation devrait être effectuée pour voir si des solutions existent déjà face à ces problèmes.

Néanmoins, en ce qui concerne la distinction de ces différentes zones, celle-ci pourrait être effectuée suivant une méthodologie de classification d'images satellites telle que celle réalisée par Metternicht et al. (1997). Elle pourrait également être réalisée suivant la géomorphologie, l'altitude ou encore d'autres variables environnementales. Au vu des résultats obtenus dans le cadre de ce travail, l'utilisation d'images satellites est probablement la solution qui apporterait le plus de précision et permettrait un suivi dans le temps.

Une autre méthode éventuelle pour améliorer les performances de prédiction pourrait être la sélection d'un échantillon à une plus grande profondeur. Cela permettrait probablement d'obtenir des variations moins franches que dans le cas où seules les caractéristiques de surface des sols sont considérées. L'augmentation de la densité d'échantillonnage, au moins aux abords des efflorescences salines, pourrait également être réalisée, mais au vu des sauts de valeurs très importants observés, l'échantillonnage pourrait être conséquent.

VI. Bibliographie

- Abdallah, M. Ben, Karray, F., Mhiri, N., Mei, N., Quéméneur, M., Cayol, J. L., ... Sayadi, S. (2016). Prokaryotic diversity in a Tunisian hypersaline lake, Chott El Jerid. *Extremophiles*, 20(2), 125–138. <https://doi.org/10.1007/s00792-015-0805-7>
- Ahmed, M. A., Abdel Samie, S. G., & Badawy, H. A. (2013). Factors controlling mechanisms of groundwater salinization and hydrogeochemical processes in the Quaternary aquifer of the Eastern Nile Delta, Egypt. *Environmental Earth Sciences*, 68(2), 369–394. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1744-6>
- Amakor, X. N., Jacobson, A. R., & Cardon, G. E. (2013). Improving Estimates of Soil Salinity from Saturation Paste Extracts in Calcareous Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 77(3), 792–799. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0235>
- Amakor, X. N., Jacobson, A. R., Cardon, G. E., & Hawks, A. (2014). A comparison of salinity measurement methods based on soil saturated pastes. *Geoderma*, 219–220, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.010>
- Amezketa, E. (2006). An integrated methodology for assessing soil salinization, a precondition for land desertification. *Journal of Arid Environments*, 67(4), 594–606. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.010>
- ATILF - CNRS & Université de Lorraine. (1994). TLFi : Trésor de la Langue Française informatisé. Retrieved March 23, 2018, from <http://www.atilf.fr/tlfii>
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Burt, R., Alexander, L. T., Baird, S. L., Baumer, O. W., Ellis C. Benham, C. Reese Berdanier Jr., Wade A. Blankenship, Benny R. Brasher, Laurence E. Brown, John G. Cady, Frank J. Carlisle, James H. DeMent, Joe D. Dixon, Moustafa A. Elrashidi, Ric, and K. K. Y., & Larry V. Arnold, Michelle A. Etmund, Kristina Goings, Diane G. Hooper, Patricia E. Jones, Janis L. Lang, Christopher W. Lee, Valerie M. Murray, James F. Neal, Kathryn L. Newman, Michael J. Pearson, Susan J. Reidel, Crystal A. Schaecher, Emily K. Rose Seif, and T. J. Z. (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. (R. Burt, Ed.) (Vol. No. 42). Lincoln, Nebraska: United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service Agriculture. <https://doi.org/10.1021/ol049448l>
- Cherlet, M., Rynolds, J., Hutchinson, C., Hill, J., von Maltitz, G., Sommer, S., ... Lorenzo Marasco. (2015). *World Atlas of Desertification, Mapping Land Degradation and Sustainable Land Management Opportunities, Introductory brochure* (Third Edit). Publications Office of the European Union, L-2995 Luxembourg, Luxembourg. <https://doi.org/10.2788/928958>
- Chesworth, W. (Ed.). (2008). Semi-arid. In *Encyclopedia of Soil Science* (p. 623). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_512
- D'Odorico, P., & Ravi, S. (2015). *Land Degradation and Environmental Change. Biological and Environmental Hazards, Risks, and Disasters*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394847-2.00014-0>
- Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutoulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale

- review. *Science of the Total Environment*, 573, 727–739.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- Darab, K. (1975). Laboratory analyses of soils related to the prognosis and monitoring of salinity and alkalinity. In *Prognosis of salinity and alkalinity* (pp. 147–157). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- FAO. (2015). Our soils under threat. Retrieved December 16, 2017, from <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/en/c/326257/>
- FAO. (2017). Why a Global Soil Partnership ? Retrieved November 24, 2017, from <http://www.fao.org/global-soil-partnership/overview/why-the-partnership/en/>
- FAO and ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- Flores, G. A., Fernández, L. T., & Yupanqui, D. N. (2009). *Recuperación de suelos salinos mediante el cultivo del Q'AWCHI*. (Secretaria Departamental De Recursos Naturales y Medio Ambiente Programa Educación Ambiental, Ed.). Oruro, Bolivia.
- Foucault, A., & Raoult, J.-F. (2000). *Dictionnaire de géologie* (5e édition). Paris: Dunod.
- He, Y., DeSutter, T., Hopkins, D., Jia, X., & Wysocki, D. A. (2013). Predicting EC_e of the saturated paste extract from value of EC_{1:5}. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(5), 585–594. <https://doi.org/10.4141/cjss2012-080>
- Hengl, T. (2007). *A Practical guide to Geostatistical Mapping. Scientific and Technical Research series*. [https://doi.org/10.1016/0277-9390\(86\)90082-8](https://doi.org/10.1016/0277-9390(86)90082-8)
- Herrero, J., Weindorf, D. C., & Castañeda, C. (2015). Two Fixed Ratio Dilutions for Soil Salinity Monitoring in Hypersaline Wetlands. *PLoS ONE*, 10(5), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126493>
- IUSS Working Group WRB. (2015). *World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106*. <https://doi.org/10.1017/S0014479706394902>
- Katz, A., & Starinsky, A. (2009). Geochemical history of the Dead Sea. *Aquatic Geochemistry*, 15(1–2), 159–194. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9045-0>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Krull, E. S., Skjemstad, J. O., & Baldock, J. A. (2004). *GRDC Project No CSO 00029 Residue Management, Soil Organic Carbon and Crop Performance - Functions of Soil Organic Matter and the Effect on Soil Properties*. Glen Osmond: CSIRO Land & Water. <https://doi.org/GRDC Project No CSO 00029>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

- Läuchli, A., & Grattan, S. R. (2017). Plant Stress under Non-optimal Soil. In S. Shabala (Ed.), *Plant Stress Physiology* (2nd Editio, pp. 201–216). Boston, MA: CABI. Retrieved from https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=wvMsDgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&ots=xHJmf_v56p&sig=Rp8D8AykKVprkWUwprTalJKhTGE#v=onepage&q&f=false
- Lavenu, A. (1986). *Étude tectonique et néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère orientale des Andes boliviennes*. Paris 11. Retrieved from http://horizon.documentation.ird.fr/exl-php/cadgp.php?LANGUE_WEB=&TYPE_VUE=fdi&NBREP=1&POSITION=1&COUNT=2&RESTRICT_INIT=%28LCK_CLI+not+contains+%27LOCKTAG%27+and+LCK_CLI+not+contains+%27SUPPR%27+and+IRD_DP+%3E+0+and+%28WKF_STA_TUT+%3D+%275%27+or+WKF_DAT_V
- Legros, J.-P. (1996). *Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. (Première é). Presses polytechniques et universitaire romandes.
- Legros, J.-P. (2007). *Les grands sols du monde* (Première é). Presses polytechniques et universitaire romandes.
- Marcus, Y., & Hefter, G. (2006). Ion pairing. *Chemical Reviews*, 106(11), 4585–4621. <https://doi.org/10.1021/cr040087x>
- Mbagwu, J. S. C. (2003). Aggregate Stability and Soil Degradation in the Tropics. *Physics*, (March).
- Metternicht, G. (1996). *Detecting and monitoring land degradation features and processes in the Cochabamba Valleys, Bolivia. A synergistic approach*. University of Ghent, Belgium. Retrieved from http://www.itc.nl/%0Alibrary/papers_1996/phd/metternicht.pdf
- Metternicht, G. I., & Zinck, J. A. (2003). Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00188-8)
- Metternicht, G., & Zinck, J. a. (1997). Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12), 2571–2586. <https://doi.org/10.1080/014311697217486>
- Metternicht, G., & Zinck, J. A. (2016). Geomorphic Landscape Approach to Mapping Soil Degradation and Hazard Prediction in Semi-arid Environments: Salinization in the Cochabamba Valleys, Bolivia. In J. A. Zinck, G. Metternicht, G. Bocco, & H. F. Del Valle (Eds.), *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies* (pp. 425–439). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19159-1_26
- Mirzabaee, A., Nkonya, E., Goedecke, J., Johnson, T., & Anderson, W. (2016). Global Drivers of Land Degradation an Improvement. In E. Nkonya, A. Mirzabaee, & J. von Braun (Eds.), *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development* (pp. 167–195). Springer International Publishing.
- Montanarella, L., Pennock, D. J., McKenzie, N., Badraoui, M., Chude, V., Baptista, I., ... Vargas, R. (2016). World's soils are under threat. *Soil*, 2(1), 79–82. <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239–250. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>

- National Land and Water Resources Audit. (2001). *Australian Dryland Salinity Assessment 2000. Extent, impacts, processes, monitoring and management options*. Commonwealth of Australia. Canberra.
- O'Geen, A. (2015). Drought Tip: Reclaiming Saline, Sodic, and Saline-Sodic Soils. University of California, Agriculture and Natural Resources, (August, Publication 8519), 1–6.
- Obalum, S. E., Chibuike, G. U., Peth, S., & Ouyang, Y. (2017). Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5881-y>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Panta, S., Flowers, T., Lane, P., Doyle, R., Haros, G., & Shabala, S. (2014). Halophyte agriculture: Success stories. *Environmental and Experimental Botany*, 107, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.05.006>
- Parida, A., Das, A. B., & Das, P. (2002). NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins, and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*, in hydroponic cultures. *Journal of Plant Biology*, 45(1), 28–36. <https://doi.org/10.1007/BF03030429>
- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>
- Pinti, D. (2011). Diamictite/Diamicton. In M. Gargaud, R. Amils, J. C. Quintanilla, H. J. (Jim) Cleaves, W. M. Irvine, D. L. Pinti, & M. Viso (Eds.), *Encyclopedia of Astrobiology* (pp. 424–425). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_422
- Richards, L. A., Allison, L. E., Bernstein, L., Bower, C. A., Brown, J. W., Fireman, M., ... Richards Wilcox, A. L. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No. 60*. (L. A. Richards, Ed.). Washington: United States Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x>
- Rubel, F., Brugger, K., Haslinger, K., & Auer, I. (2017). The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(2), 115–125. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0816>
- SERGEOTECMIN - Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas. (2000). Mapa geológico de Bolivia. Retrieved December 6, 2017, from <https://geo.gob.bo/geonetwork/srv/esp/catalog.search#/metadata/9d4640bf-522a-4949-9a14-4838685c5a2c>
- Servicio Nacional de Hidrografía Naval. (2016). Ríos Secundarios del Estado Plurinacional de Bolivia 2016. Retrieved December 16, 2017, from <https://geo.gob.bo/geonetwork/srv/esp/catalog.search#/metadata/ab6d7ea7-dc65-45cc-a7b7-c7b32a0c9cd0>
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of*

- Biological Sciences*, 22(2), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Soil Survey Staff. (1992). *Keys to Soil Taxonomy, 5th edition*. (SMSS technical monograph No. 19, Ed.), *Change* (5th ed.). Blacksburg, Virginia: Pocahontas Press. <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service Agriculture. <https://doi.org/10.1017/S0016756800045489>
- Sonmez, S., Buyuktas, D., Okturen, F., & Citak, S. (2008). Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. *Geoderma*, 144(1–2), 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.12.005>
- United Nations Convention to Combat Desertification. (2012). Terminology and glossaries. Retrieved November 24, 2017, from <http://www.unccd.int/en/resources/Library/Pages/Glossary.aspx>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. (D. Fox, Ed.) (15th editi). Pearson Education.
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4), 316–323. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.11.003>
- Zhang, H., Schroder, J. L., Pittman, J. J., Wang, J. J., & Payton, M. E. (2005). Soil Salinity Using Saturated Paste and 1:1 Soil to Water Extracts. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1146–1151. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0267>
- Zinck, J. . A., & Metternicht, G. (2008). *Soil Salinity and Salinization Hazard. Remote Sensing of Soil Salinization*. https://doi.org/doi:10.1201/9781420065039.pt1_10.1201/9781420065039.pt1
- Zinck, J. A. (2016). The Geopedologic Approach. In J. A. Zinck, G. Metternicht, G. Bocco, & H. F. Del Valle (Eds.), *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies* (pp. 27–59). Cham: Springer International Publishing.

VII. Annexes

Annexe A : Carte de la géomorphologie de la *Valle Alto*

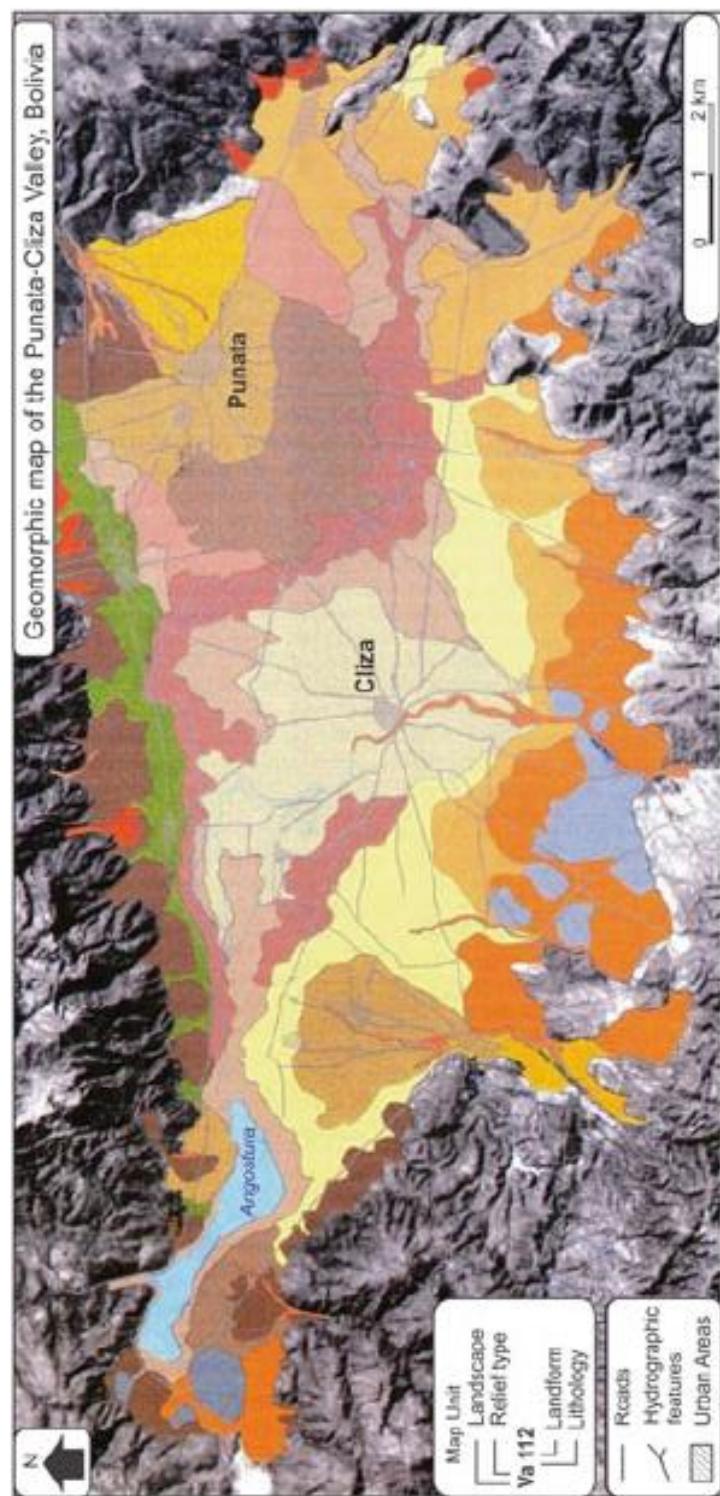
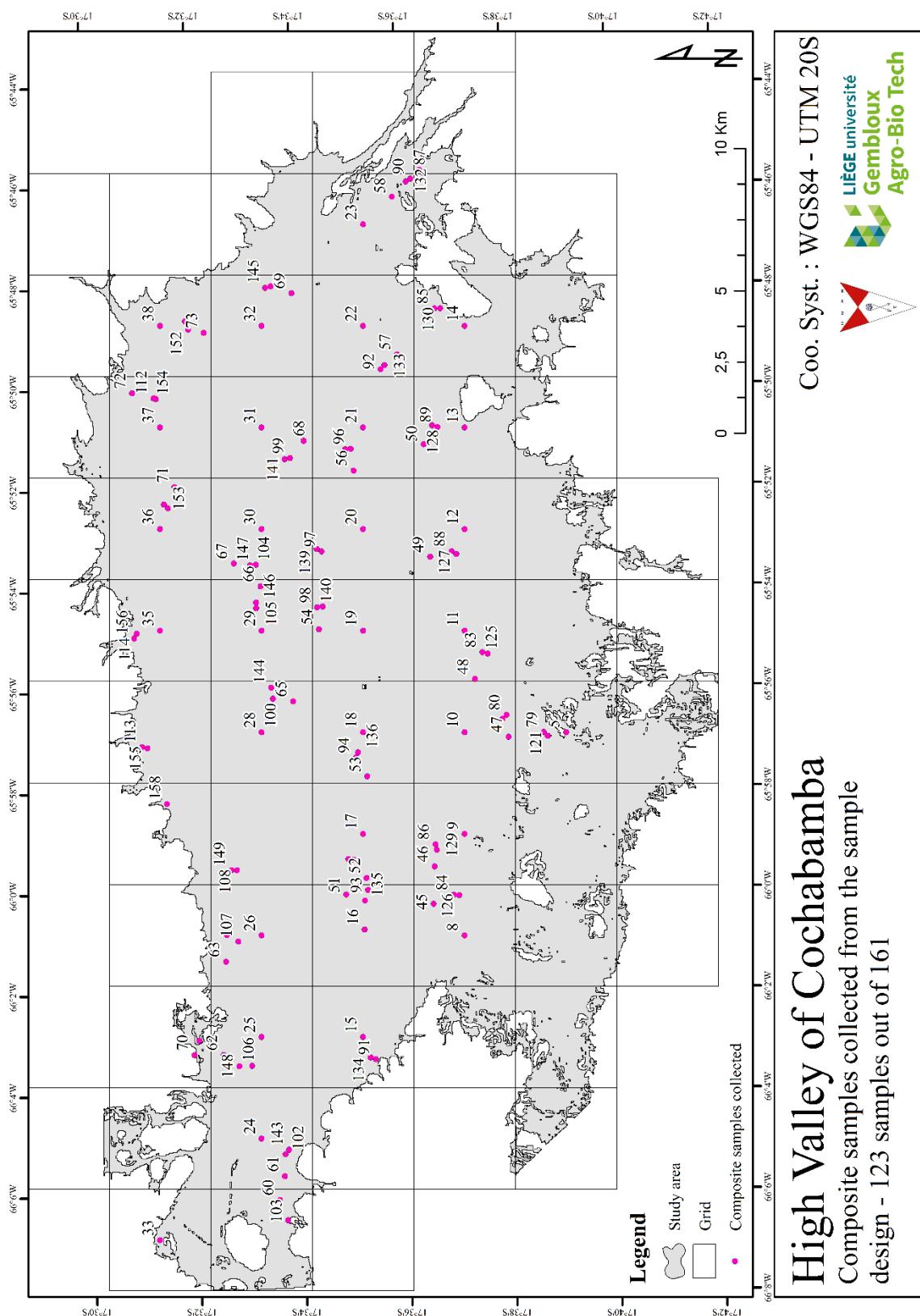


Figure 36. Carte des différentes unités géomorphologiques identifiées par Metternicht et al. (1997). La légende est donnée à la figure suivante. Source : Metternicht et al. (1997).

GEOPEDOLOGIC LEGEND					
LANDSCAPE	RELIEF TYPE	FACIES	LANDFORM	CODE	SOILS
PIEDMONT	Dissected-depositional glaciis	Alluvial	Proximal	Pi 111	Association: Typic Calciorthids Typic Camborthids
			Central	Pi 112	Consociation: Typic Camborthids (ca)* Ustochreptic Camborthids
			Distal	Pi 113	Association: Ustalfic Haplargids Ustochreptic Camborthids
	Depositional glaciis	Colluvio-alluvial	Distal	Pi 213	Consociation: Ustochreptic Camborthids Typic Camborthids
	Active fans	Alluvial	Active channels	Pi 411	Miscellaneous land type: Mixed Alluvial
			Inactive channels	Pi 412	Consociation: Typic Torrifluvents Typic Torriorthents
	Recent fans	Colluvio-alluvial		Pi 51	Association: Ustic Torriorthents Typic Torrifluvents
	Old dissected fans	Glacio-alluvial	Proximal	Pi 661	Association: Typic Camborthids Typic Haplargids
			Central	Pi 612	Consociation: Ustochreptic Camborthids (ca)*
			Distal	Pi 613	Consociation: Ustochreptic Camborthids
VALLEY	Hills	Quartzitic sandstones		Pi 71	Consociation: Lithic Torriorthents
		Marls sandstones limestones		Pi 72	Consociation: Typic Calciorthids Lithic Calciorthids
	Lagunary depressions	Alluvio-lagunary	Higher lagunary flats	Va 111	Association: Fluventic Camborthids Ustochreptic Camborthids
			Middle lagunary flats	Va 112	Association: Ustalfic Haplargids Ustochreptic Camborthids
			Lower lagunary flats	Va 113	Association: Ustalfic Haplargids (saso)* Ustochreptic Camborthids (sa)*
		Lagunary	Playas	Va 124	Association: Typic Salorthids Natric Camborthids
* Phases: (ca) calcareous (saso) saline-alkaline (sa) saline					

Figure 37. Légende de la carte représentant les différentes unités géomorphologiques identifiées par Metternicht et al. (1997) de la figure 22. Source : Metternicht et al. (1997).

Annexe B : Localisation des échantillons composites prélevés



Annexe C : Observations réalisées sur les profils

Tableau 8. Inventaire des différentes observations réalisées sur le terrain.

Soil formation factors	Soil description-surface characteristics
Weather (present/former)	Rocks outcrops
Soil climate (temperature/moisture)	Coarse surface fragments (size/cover)
Major landform / position	Erosion (category, degree, area)
Slope (form, gradient)	Surface sealing (thickness, consistence)
Human influence / land use	Surface cracks (width, depth, distance)
Vegetation / crops	Salt (cover / thickness)
Soil description-Horizons	
Depth boundary (cm)	
Distinctness / topography	
Soil color	
Rock fragments (Abundance/size)	
Mottles (colour/abundance)	
Carbonates (content / forms)	
Gypsum (content / foms)	
Salt content	
Structure (type / grade)	
Soil-water status	
Consistence (dry)	
Porosity-voids	
Coatings	
Compaction (degree / nature / structure)	
Mineral concentrations (abundance / kind)	
Human materials	
Biological activity-roots (diameter/abundance)	
Biological activity-features (kind/abundance)	

Annexe D : Qualité et résultats des analyses de laboratoire

Pour la CEC et les bases échangeables, le calcul de l'erreur relative aide à identifier des séries suspectes :

$$Erreur\ relative = \frac{\sqrt{(Valeur\ du\ témoin\ observée - Valeur\ du\ témoin\ de\ référence)^2}}{Valeur\ du\ témoin\ de\ référence}$$

CEC (Metson modifié Géopédologie GxABT)		
Valeur témoin [mEq/100g]		10,45
Série	Valeur observée [mEq/100g]	Erreur relative [-]
S01	9,6	8,1
S02	10,6	1,4
S03	19,6	87,6
S04	10,4	0,5
S05	10,4	0,5
S06	10,8	3,3

Les valeurs du témoin pour la lecture au spectrophotomètre sont données ci-dessous :

Na			
Seuil inf. [mg/L]	Seuil sup. [mg/L]	[nm]	MRI [mg/100g]
0,01	2,00	589,60	0,32
K			
Seuil inf. [mg/L]	Seuil sup. [mg/L]	[nm]	MRI [mg/100g]
1,00	6,00	769,90	16,00
Mg			
Seuil inf. [mg/L]	Seuil sup. [mg/L]	[nm]	MRI [mg/100g]
0,003	1,00	285,20	8,50
Ca			
Seuil inf. [mg/L]	Seuil sup. [mg/L]	[nm]	MRI [mg/100g]
0,01	3,00	422,70	242,00

Ca				
Série échantillons	Série spectro	Valeur observée [mg/100g]	Erreurs relatives [-]	
S01	1	236	2,5	
	2	ND	ND	
S02	1	224	7,4	
	1	ND	ND	
S03	2	242	0	
	1	251	3,7	
S04	2	240	0,8	
	3	240	0,8	
	1	236	2,5	
S05	3	236	2,5	
	1	232	4,1	
S06	2	232	4,1	

Mg				
Série échantillons	Série spectro	Valeur observée [mg/100g]	Erreurs relatives [-]	
S01	2	8,01	5,8	
	3	7,96	6,4	
S02	1	7,04	17,2	
	2	8,9	4,7	
S03	1	8,33	2	
	2	8,25	2,9	
S04	1	7,97	6,2	
	2.1	8,31	2,2	
	2.2	8,2	3,5	
S05	1	8,34	1,9	
	2	8,26	2,8	
	3	7,97	6,2	
S06	1	7,82	8	
	2	8,3	2,4	

K				
Série échantillons	Série spectro	Valeur observée [mg/100g]	Erreur relative [-]	
S01	2	14,86	7,1	
	3	15,45	3,4	
S02	1	11,91	25,6	
	2	17,17	7,3	
S03	1 ND		ND	
	2	20,4	27,5	
S04	1 ND		ND	
	2	16,13	0,8	
S05	3	15,5	3,1	
	4	16,01	0,1	
	5	14,67	8,3	
	6	15,39	3,8	
S06	1	15,42	3,6	
	2	16,09	0,6	
	3	15,05	5,9	
	4	14,88	7	

Na				
Série échantillons	Série spectro	Valeur observée [mg/100g]	Erreur relative [-]	
S01	1	-0,2	162,5	
S02	1	0,42	31,3	
S03	1	3,31	934,4	
	2	5,96	1762,5	
S04	1	-0,18	156,3	
	2	-4,78	1593,8	
	3	3,2	900	
	4	-45,54	14331,3	
	5	0	100	
S05	1	1,1	243,8	
	2	1,15	259,4	
	3	-0,17	153,1	
	4	0,28	12,5	
	5	0,17	46,9	
S06	1	0,65	103,1	
	2	0,62	93,8	
	3	0,93	190,6	
	4	0,96	200	
	5	1,16	262,5	

N°	Série	S Na	S K	S Mg	S Ca	CEC [cmolc/ kg]	Na [méq/ 100g]	K [méq/ 100g]	Mg [méq/ 100g]	Ca [méq/ 100g]	Base saturation [%]	ESP [%]	pH (KCl)	P Bio (mg/ 100g)	K Bio (mg/ 100g)	Mg Bio (mg/ 100g)	Ca Bio (mg/ 100g)	TOC [%]	EC [dS/m]
5	S02	1	1	1	1	8,3	0,144	0,163	1,263	6,95	102,7	1,7	7,64	2,2	7,4	17,6	183	0,5	0,09
8	S02	1	2	1	1	15,7	0,129	0,620	1,608	6,90	59,0	0,8	5,96	0,8	17,2	19,1	156	0,7	0,04
9	S04	1	1	1	1	7,4	0,000	0,203	1,008	7,60	119,1	0,0	7,84	3,4	6,3	14,5	198	0,4	0,06
10	S03	1	1	1	2	15,0	0,664	0,227	1,473	9,85	81,4	4,4	7,29	6,0	9,1	20,2	230	0,7	0,08
11	S03	1	2	2	2	27,6	1,611	0,778	2,733	14,70	71,8	5,8	6,50	1,9	22,1	29,5	300	1,2	0,06
12	S03	1	2	1	2	11,8	3,184	0,486	1,478	8,15	112,7	27,0	7,66	2,6	20,0	19,4	188	0,9	0,24
13	S03	1	2	1	1	10,2	0,392	0,437	1,044	6,25	79,6	3,8	6,81	17,6	16,5	13,4	185	0,5	0,08
14	S03	1	1	1	1	8,0	0,193	0,177	1,273	3,65	66,2	2,4	5,62	1,5	7,5	17,4	84	0,5	0,03
15	S02	1	1	1	1	18,4	0,169	0,205	1,503	6,35	44,7	0,9	5,87	1,3	9,2	18,0	149	0,6	0,03
16	S02	1	2	2	1	12,6	3,008	0,340	2,392	9,15	118,2	23,9	6,25	2,4	10,2	29,9	180	0,7	0,04
17	S06	1	1	1	1	9,0	0,004	0,180	1,383	5,10	74,1	0,0	6,05	0,8	5,9	17,5	108	0,4	0,03
18	S02	1	1	1	1	9,9	0,465	0,114	1,754	5,10	75,1	4,7	6,93	2,2	4,9	22,1	121	0,7	0,04
19	S03	1	1	2	2	15,7	1,181	0,231	2,334	9,30	83,1	7,5	6,87	3,9	8,1	27,8	189	0,7	0,08
20	S03	2	1	1	1	7,7	4,452	0,164	0,711	3,80	118,5	57,8	6,92	1,6	7,2	12,2	86	0,5	0,05
21	S02	1	2	1	1	13,1	14,765	1,236	0,866	7,35	184,9	112,7	8,11	19,5	33,4	15,4	214	1,2	2,31
22	S02	1	1	1	1	8,0	0,187	0,241	1,744	3,70	73,4	2,3	5,24	0,8	11,3	21,2	80	0,7	0,05
23	S04	2	2	2	1	12,2	0,319	0,406	1,832	6,00	70,1	2,6	6,88	1,8	15,1	24,0	143	0,9	0,08
24	S03	1	1	1	1	25,6	0,460	0,112	1,223	3,55	20,9	1,8	5,40	1,0	4,8	19,5	80	0,4	0,04
25	S03	2	2	2	2	7,7	1,996	0,441	2,930	8,85	184,6	25,9	6,64	2,2	16,2	41,0	201	0,5	0,17
26	S03	2	2	2	1	22,7	2,273	0,567	2,928	7,00	56,2	10,0	4,36	1,2	20,1	36,0	151	1,0	0,25
28	S03	2	2	1	1	19,8	78,304	0,814	0,529	5,00	427,5	395,5	10,20	15,6	26,9	16,5	221	0,7	9,71
29	S03	1	1	1	1	9,6	0,807	0,180	1,553	5,55	84,3	8,4	5,72	0,6	6,3	18,3	124	0,5	0,09
30	S03	1	1	1	1	9,3	0,803	0,125	1,386	4,30	71,1	8,6	5,24	0,4	4,6	19,4	96	0,5	0,07
31	S03	1	2	2	2	18,9	0,655	0,609	2,593	8,40	64,9	3,5	6,53	3,2	24,6	35,0	201	1,5	0,1
32	S03	1	1	2	1	14,7	0,981	0,166	2,393	7,05	72,0	6,7	5,50	0,3	5,0	31,3	162	1,2	0,04
33	S03	1	2	1	2	12,8	0,000	1,665	1,664	9,75	102,2	0,0	7,20	11,1	57,5	21,5	220	2,3	0,25

N°	Série	S Na	S K	S Mg	S Ca	CEC [cmolc/ kg]	Na [méq/ 100g]	K [méq/ 100g]	Mg [méq/ 100g]	Ca [méq/ 100g]	Base saturation [%]	ESP [%]	pH (KCl)	P Bio (mg/ 100g)	K Bio (mg/ 100g)	Mg Bio (mg/ 100g)	Ca Bio (mg/ 100g)	TOC [%]	EC [dS/m]
35	S03	1	1	1	1	8,6	0,204	0,122	1,544	4,90	78,7	2,4	5,70	1,8	4,4	18,7	112	0,9	0,03
36	S03	2	1	1	1	11,2	3,727	0,130	1,674	4,85	92,7	33,3	6,31	1,2	4,2	22,4	115	0,7	0,57
37	S02	1	2	2	1	11,5	0,520	1,495	2,368	6,55	95,1	4,5	7,08	24,4	60,1	31,9	213	1,2	0,02
38	S02	1	2	1	1	11,4	0,289	0,648	1,994	ND	25,7	2,5	7,78	5,1	15,3	28,9	212	0,9	0,08
45	S02	1	2	1	1	14,1	0,059	0,396	1,768	11,60	98,0	0,4	7,80	4,5	11,1	28,8	328	0,4	0,06
46	S04	1	1	1	1	11,5	0,016	0,268	1,710	7,00	78,2	0,1	6,52	3,1	8,4	23,0	185	0,7	0,03
47	S04	1	2	1	1	14,1	0,134	0,435	1,947	7,95	74,2	1,0	6,71	0,4	13,3	24,0	202	0,3	0,04
48	S03	1	2	1	1	7,7	1,008	0,270	1,138	6,30	113,2	13,1	7,42	5,7	11,2	16,1	152	0,5	0,08
49	S03	1	1	1	1	10,9	1,529	0,180	1,281	6,20	84,3	14,0	6,23	0,9	6,7	19,5	144	0,7	0,07
50	S03	2	1	1	1	12,5	4,142	0,186	1,188	4,55	80,5	33,1	7,21	1,2	6,0	17,0	112	0,6	0,36
51	S03	2	2	2	2	17,9	1,817	0,394	2,671	11,60	92,1	10,2	7,47	6,4	13,5	36,1	264	0,9	0,18
52	S04	1	1	1	1	15,4	0,031	0,297	1,876	8,70	70,8	0,2	6,90	2,9	10,1	26,5	225	0,7	0,04
53	S04	5	2	2	1	11,8	28,017	0,534	0,278	7,40	307,0	237,4	9,92	19,1	19,2	12,2	568	0,3	1,84
54	S04	1	1	1	1	5,1	0,020	0,135	0,662	3,90	92,5	0,4	7,08	2,2	4,6	9,6	102	0,3	0,04
56	S04	3	1	1	1	7,7	1,991	0,266	0,701	5,40	108,5	25,9	7,91	5,1	10,2	11,0	152	0,6	0,16
57	S04	4	2	1	1	5,8	14,457	0,535	1,282	8,25	422,8	249,3	9,64	12,0	21,3	25,4	314	0,1	2,72
58	S04	1	1	1	1	7,0	0,110	0,154	1,242	3,75	75,1	1,6	5,82	0,9	5,6	16,7	91	0,6	0,03
60	S03	1	1	1	1	9,0	0,070	0,296	1,700	4,60	74,1	0,8	5,88	1,3	12,1	24,4	112	0,8	0,03
61	S02	1	1	1	1	8,0	0,144	0,156	1,534	3,30	64,2	1,8	5,54	1,1	6,2	21,2	80	0,6	0,03
62	S03	1	1	1	1	12,5	0,463	0,297	1,630	6,85	73,9	3,7	5,01	2,8	10,4	21,4	155	1,6	0,01
63	S04	1	2	2	1	11,2	0,051	0,344	2,145	6,80	83,4	0,5	6,27	5,6	12,6	25,8	174	2,5	0,07
65	S03	1	1	1	1	10,8	1,562	0,260	1,695	5,55	84,0	14,5	6,14	5,3	10,0	24,4	131	0,6	0,08
66	S04	2	1	1	1	11,2	0,025	0,286	1,656	5,15	63,5	0,2	5,44	1,4	9,9	22,3	129	0,8	0,03
67	S03	2	1	2	1	14,8	12,378	0,309	3,139	6,80	152,9	83,6	6,30	2,0	10,6	41,0	148	1,0	1
68	S03	1	2	1	1	11,6	1,757	0,522	2,050	5,25	82,6	15,1	5,58	1,2	14,9	29,1	126	0,9	0,06

N°	Série	S Na	S K	S Mg	S Ca	CEC [cmolc/ kg]	Na [méq/ 100g]	K [méq/ 100g]	Mg [méq/ 100g]	Ca [méq/ 100g]	Base saturation [%]	ESP [%]	pH (KCl)	P Bio (mg/ 100g)	K Bio (mg/ 100g)	Mg Bio (mg/ 100g)	Ca Bio (mg/ 100g)	TOC [%]	EC [dS/m]	
69	S04	3	2	2	1	14,1	1,994	0,622	2,344	9,25	100,8	14,1	7,55	11,4	25,4	33,4	274	1,5	0,16	
70	S03	1	2	1	1	12,0	0,173	0,689	1,148	4,60	55,1	1,4	4,52	1,5	20,6	13,9	100	2,3	0,04	
71	S04	2	1	1	1	9,2	0,817	0,112	1,453	5,40	84,6	8,9	6,76	1,1	3,7	20,4	120	0,8	0,1	
72	S04	1	2	1	1	7,4	0,080	0,476	1,403	7,55	128,5	1,1	7,77	8,6	20,6	20,0	186	0,7	0,1	
73	S04	1	2	1	1	8,6	0,176	0,398	1,945	5,80	96,7	2,0	6,98	17,7	17,9	26,4	143	0,8	0,09	
79	S04	2	1	1	2	9,0	0,105	0,252	1,230	27,05	318,2	1,2	7,92	2,3	9,8	19,0	775	0,4	0,19	
80	S04	2	1	2	1	14,1	0,149	0,253	2,011	11,20	96,5	1,1	7,28	3,5	9,1	28,8	262	0,8	0,11	
83	S04	2	2	2	1	19,8	0,503	0,405	2,366	9,80	66,0	2,5	6,59	4,5	15,3	31,1	240	1,1	0,09	
84	S04	1	2	1	2	22,1	0,043	0,560	1,913	21,65	109,3	0,2	7,45	1,9	19,1	26,6	555	0,9	0,08	
85	S04	1	2	1	1	10,8	0,049	0,449	1,195	4,90	61,0	0,5	6,07	10,9	16,6	15,3	124	0,9	0,04	
86	S03	1	1	1	2	12,8	0,665	0,309	1,675	9,70	96,5	5,2	7,38	7,3	10,9	25,3	224	0,6	0,08	
87	S04	1	1	1	1	10,4	0,081	0,218	1,956	4,40	64,0	0,8	5,96	1,0	8,5	24,5	95	0,9	0,05	
88	S02	1	1	1	1	9,3	0,989	0,097	1,027	4,00	65,7	10,6	7,08	1,2	4,3	13,0	96	0,6	0,09	
89	S03	2	2	1	2	12,0	ND	1,409	1,410	18,75	179,7	ND	8,45	4,3	41,8	28,2	714	0,7	0,63	
90	S06	2	2	2	1	10,9	0,937	1,129	2,372	5,80	93,9	8,6	6,42	10,6	42,8	29,5	142	1,7	0,33	
91	S06	1	1	1	1	6,0	0,000	0,164	1,964	2,80	82,1	0,0	5,00	0,7	6,7	12,6	63	0,4	0,03	
92	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	5,80	1,3	15,0	17,7	75	0,9	0,08
93	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	6,36	4,1	15,8	29,2	285	0,7	0,04
94	S06	3	4	2	2	14,1	6,683	3,826	2,383	15,30	199,9	47,4	8,03	33,9	133,6	37,8	458	1,6	1,59	
95	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	7,12	17,3	102,8	28,9	181	1,3	0,4
96	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	7,94	25,6	60,8	25,3	260	1,0	0,17
97	S06	3	2	2	1	12,5	12,035	1,410	2,499	7,60	188,4	96,3	7,26	49,5	48,4	33,0	232	1,1	2,71	
98	S06	2	2	1	1	7,4	3,386	0,551	0,853	7,50	166,1	45,8	8,26	5,1	20,8	14,4	187	0,4	0,37	
99	S06	1	1	1	1	7,0	0,146	0,303	1,200	4,00	80,7	2,1	6,49	2,1	14,2	16,0	91	0,7	0,06	
100	S06	1	2	1	1	6,1	0,287	0,469	0,837	4,70	103,2	4,7	7,36	5,1	19,3	12,5	115	0,5	0,08	

N°	Série	S Na	S K	S Mg	S Ca	CEC [cmolc/ kg]	Na [méq/ 100g]	K [méq/ 100g]	Mg [méq/ 100g]	Ca [méq/ 100g]	Base saturation [%]	ESP [%]	pH (KCl)	P Bio (mg/ 100g)	K Bio (mg/ 100g)	Mg Bio (mg/ 100g)	Ca Bio (mg/ 100g)	TOC [%]	EC [dS/m]
101	S02	1	2	2	1	16,0	0,858	0,429	2,482	ND	23,6	5,4	7,74	9,6	10,8	34,1	350	1,1	0,15
102	S02	1	1	1	1	15,0	0,110	0,152	1,486	3,80	37,0	0,7	4,80	0,5	6,7	22,2	82	0,6	0,01
103	S02	1	2	1	1	14,7	0,144	0,888	1,666	7,20	67,3	1,0	5,32	7,8	33,1	19,3	161	2,3	0,11
104	S02	1	1	1	1	9,0	0,550	0,104	1,873	5,20	85,9	6,1	5,49	0,5	4,4	24,1	118	0,7	0,46
105	S06	5	2	1	1	12,5	48,565	0,467	1,370	10,60	488,0	388,5	8,40	6,0	16,1	23,1	253	0,8	9,04
106	S03	1	2	1	1	8,4	0,330	0,388	0,942	2,45	48,9	3,9	4,55	1,1	10,7	12,1	51	0,5	0,05
107	S06	4	2	2	1	13,4	4,674	0,527	3,529	13,05	162,5	34,9	8,02	3,1	15,8	55,1	358	0,6	0,66
108	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	6,49	2,3	10,7	16,8	95	0,8	0,05
109	S04	2	2	2	1	11,6	0,039	0,376	2,253	7,60	88,5	0,3	7,29	29,7	15,2	30,7	220	0,9	0,1
111	S04	2	1	1	1	8,8	0,900	0,106	1,273	4,30	74,8	10,2	6,23	1,5	3,3	16,6	96	0,9	0,05
112	S04	2	1	1	1	9,2	0,434	0,226	1,919	5,10	83,5	4,7	6,78	4,5	8,6	24,8	118	0,9	0,06
113	S04	1	2	2	1	11,2	0,170	0,404	2,264	5,85	77,6	1,5	5,91	2,7	14,5	27,7	126	1,2	0,1
114	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	6,56	1,9	9,3	17,7	94	1,0	0,06
121	S06	1	2	1	2	13,4	0,000	0,617	1,351	20,25	165,8	0,0	7,56	2,0	22,4	18,7	613	1,6	0,1
122	S06	1	2	1	2	17,9	0,088	0,422	1,719	22,40	137,6	0,5	7,51	2,0	13,3	25,0	594	1,0	0,09
125	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	7,79	1,7	5,6	19,7	173	0,5	0,15
126	S04	1	2	1	3	12,0	0,021	0,466	1,323	30,55	269,7	0,2	7,88	3,3	16,6	29,3	1954	0,8	0
127	S04	2	2	1	1	11,6	0,595	0,419	1,221	5,80	69,3	5,1	6,74	4,3	16,6	15,9	136	0,7	0,1
128	S04	5	2	1	1	8,8	18,543	0,951	0,778	9,30	336,0	210,7	9,64	10,6	38,1	14,7	268	0,8	2,56
129	S04	1	1	1	1	9,2	0,054	0,222	1,215	9,10	115,1	0,6	7,76	3,3	7,7	17,2	203	0,4	0,07
130	S04	1	2	1	1	10,0	0,102	0,361	1,651	6,10	82,1	1,0	5,91	3,1	13,8	19,5	133	1,1	0,04
131	NE					NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	6,06	0,8	6,0	19,3	91	0,5	0,03
132	S06	1	1	1	1	8,3	0,436	0,179	1,223	4,55	77,0	5,3	6,02	0,9	8,1	15,8	105	0,6	0,06
133	S06	2	4	1	1	7,7	3,070	7,328	1,293	8,00	255,7	39,9	8,09	51,8	242,6	27,1	269	0,9	1,94
134	S06	1	1	1	1	8,3	0,009	0,156	1,157	4,75	73,2	0,1	5,82	1,4	5,8	15,5	107	0,4	0,01

Annexe E : TOC et CEC de l'horizon de surface de chaque profil

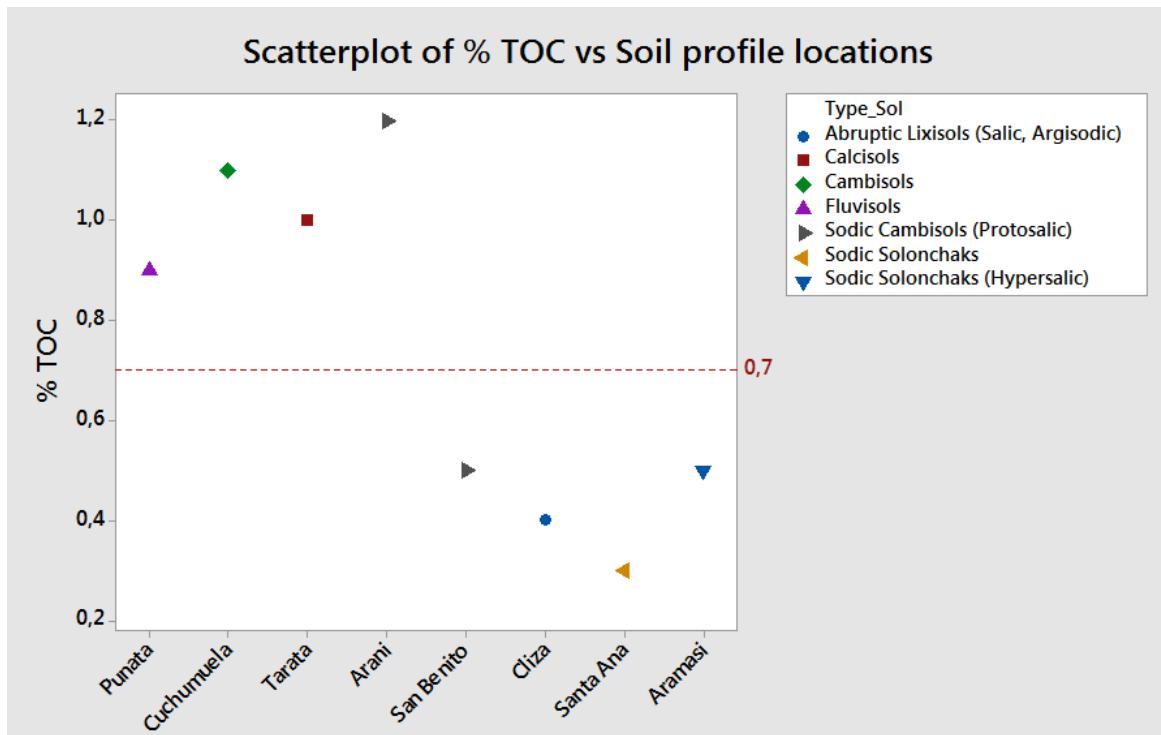


Figure 38. Valeurs de TOC en pourcents de chaque horizon de surface des profils de sols. La valeur de 0,7% correspond au seuil en TOC proposé au sein de l'arbre décisionnel de la figure 27.

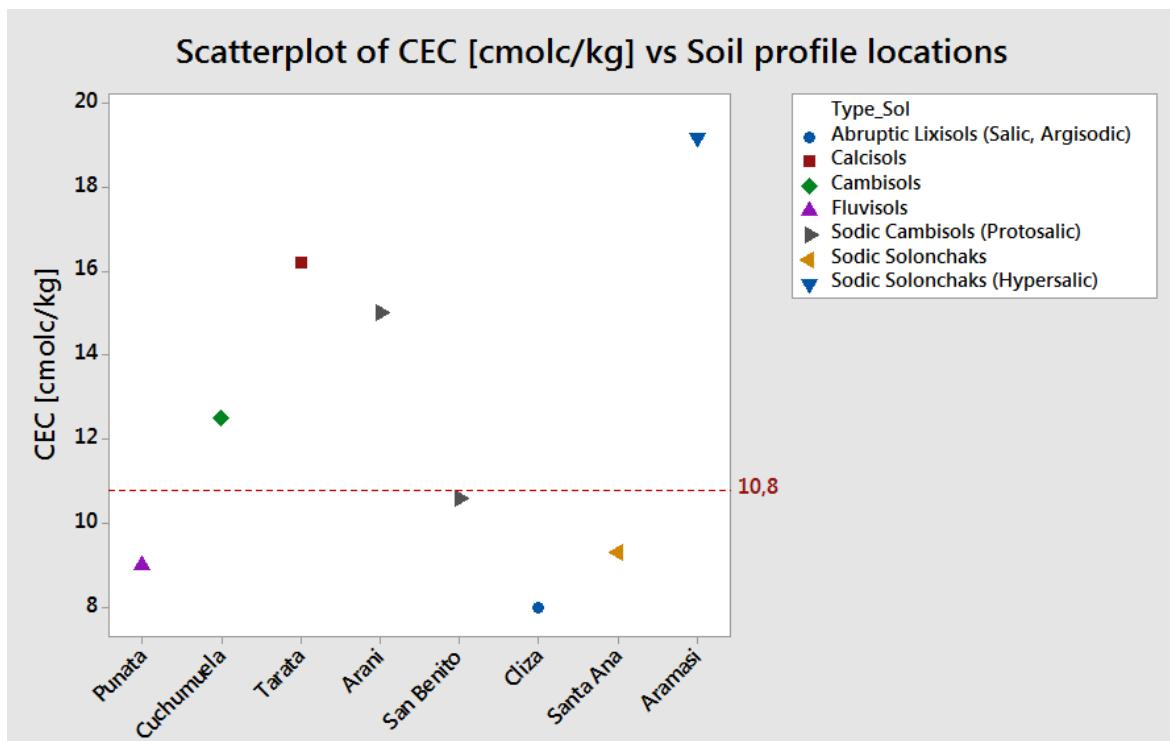


Figure 39. Valeurs de la CEC en cmolc/kg de chaque horizon de surface des profils de sols. La valeur de 10,8 cmolc/kg correspond au seuil de CEC considéré dans l'arbre décisionnel de la figure 27.

Annexe F : Valeurs seuils usuelles d'ECe converties en EC

Le tableau 10 reprend l'ensemble des valeurs couramment utilisées au sein de la WRB et de la classification simplifiée. La conversion a été effectuée suivant les équations de Sonmez et al. (2008). Afin d'obtenir une valeur unique pour chaque terme taxonomique, une moyenne pondérée est effectuée en fonction de l'occurrence des textures rencontrées pour les horizons de surfaces des profils de sols. Sur les huit profils identifiés, six possèdent leurs horizons de surface dominé par une texture limoneuse et deux par une texture sableuse. L'EC moyen est donc obtenu comme suit :

$$\text{Moyenne pondérée} = \frac{6}{8} \text{ EC limon} + \frac{2}{8} \text{ EC sable}$$

Tableau 9. Conversion des valeurs usuelles d'ECe en EC. La moyenne des valeurs est pondérée en fonction de l'occurrence des textures rencontrées pour les horizons de surfaces des profils de sols.

Terme taxonomique	Seuil ECe [dS/m]	EC [dS/m]			Moyenne pondérée
		Argile	Limon	Sable	
Salin (simplifié)	4	0,58	0,52	0,53	0,52
Protosalic (WRB)	4	0,58	0,52	0,53	0,52
Salic (WRB) si pH > 8,5	8	1,12	1,05	1,01	1,04
Salic (WRB)	15	2,07	1,97	1,86	1,94
Hypersalic (WRB)	30	4,11	3,95	3,69	3,88

Annexe G : Précisions cartographiques concernant l'ESP, l'EC, le pH (KCl), le TOC et la CEC, ainsi que les deux classifications.

ESP

La liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus à la suite du traitement des outliers pour la réalisation ou la validation du modèle de prédiction spatiale est donnée au tableau 11.

Tableau 10. Liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus dans le modèle de prédiction spatiale.

Liste des échantillons sans donnée (ND) ou non inclus (NI) dans le modèle de prédiction spatiale	
11 NI	96 ND
24 NI	108 ND
48 NI	109 NI
65 NI	114 ND
66 NI	125 ND
86 NI	131 ND
89 ND	144 ND
92 ND	149 ND
93 ND	155 ND
95 ND	

Le résultat concernant le test de normalité après application d'une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = 0$ est donné à la figure 43. La carte à l'échelle 1/200 000 de l'ESP sous le format de raster avec la résolution d'un pixel fixée à 200 mètres est quant à elle donnée à la page suivante.

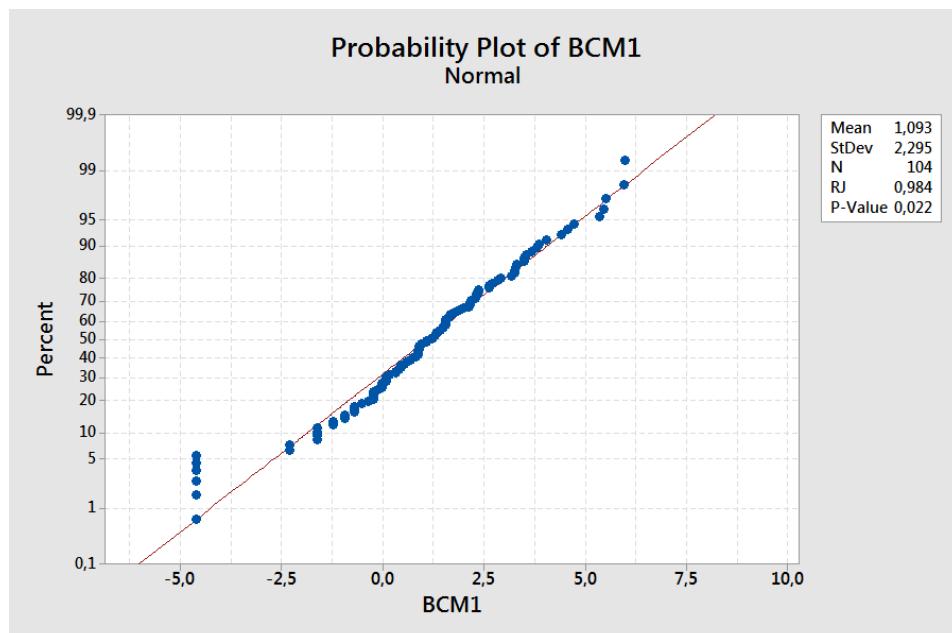
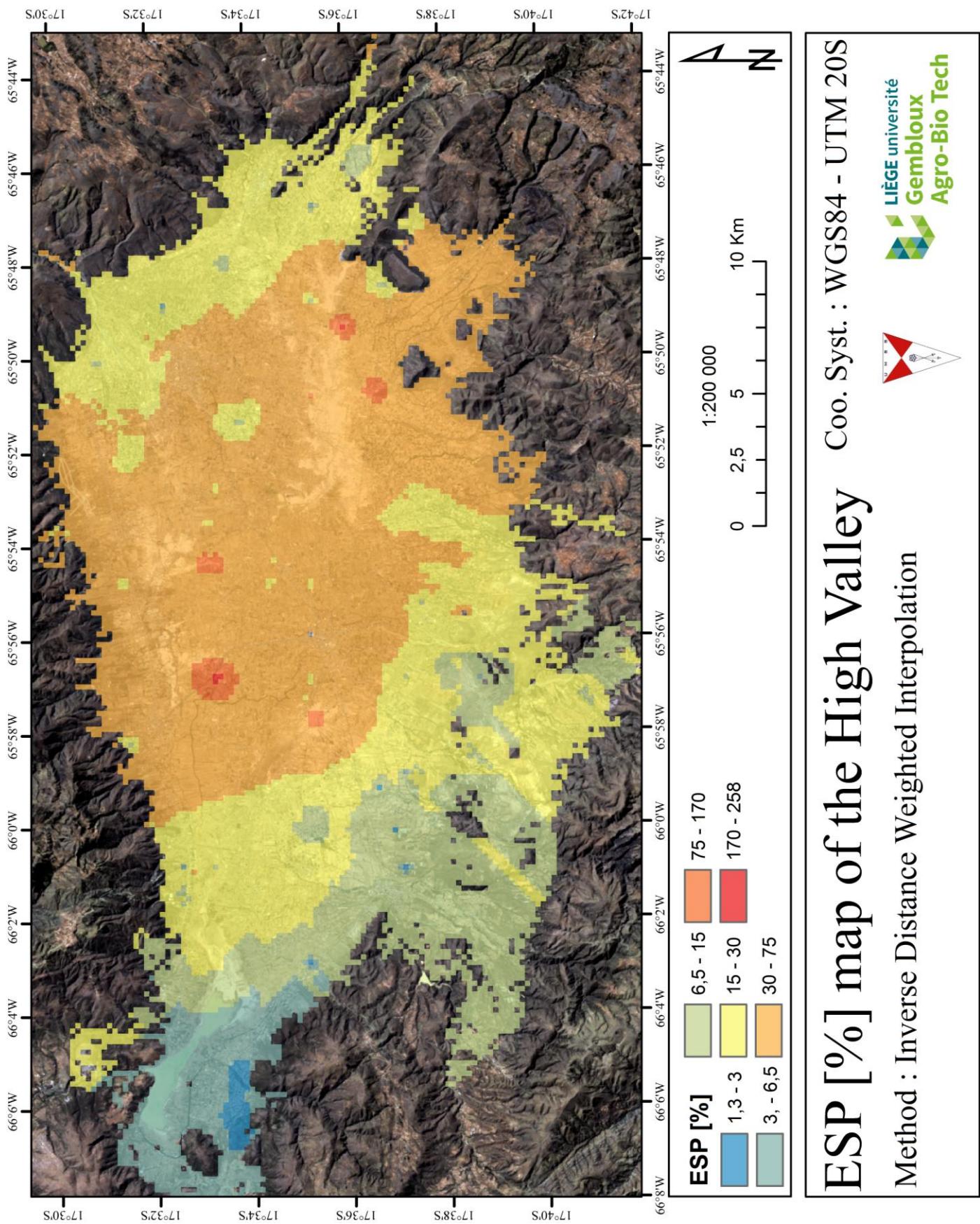


Figure 40. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable ESP après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0$, dénommée ici BCM1.



EC

Aucune donnée manquante n'existe pour l'EC et aucune donnée n'a été exclue à la suite du traitement des outliers pour la réalisation ou la validation du modèle de prédiction spatiale. Le résultat concernant le test de normalité après application d'une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = -0,16$ est donné à la figure 44. À titre d'exemple, le résultat de la détermination du λ optimal à devoir appliquer pour la transformation de variable Box-Cox est également donné à la figure 45. La carte à l'échelle 1/200 000 de l'ESP sous le format de raster avec la résolution d'un pixel fixé à 200 mètres est quant à elle donnée à la page suivante.

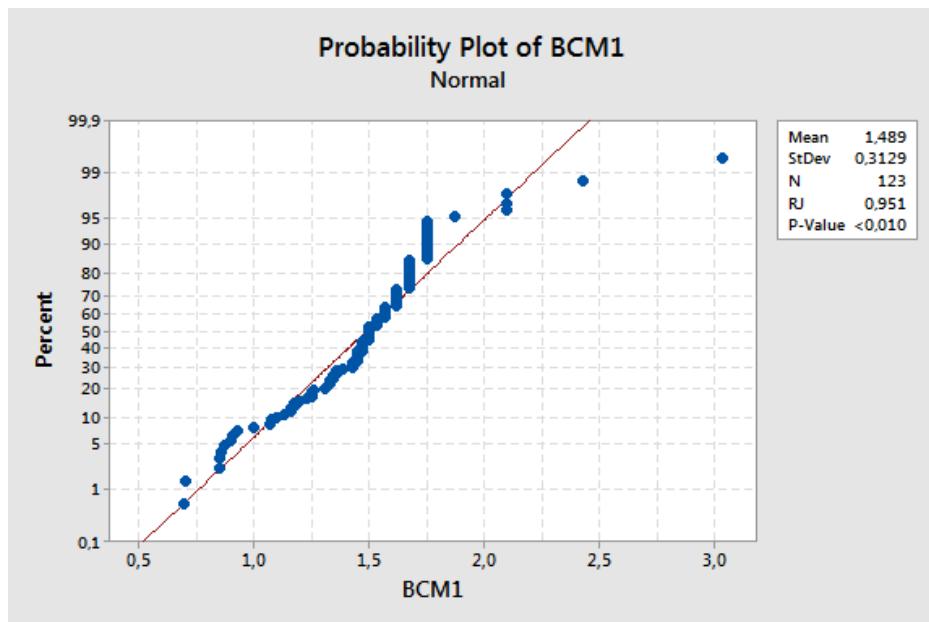


Figure 41. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable EC après une transformation Box-Cox avec $\lambda = -0,16$, dénommée ici BCM1.

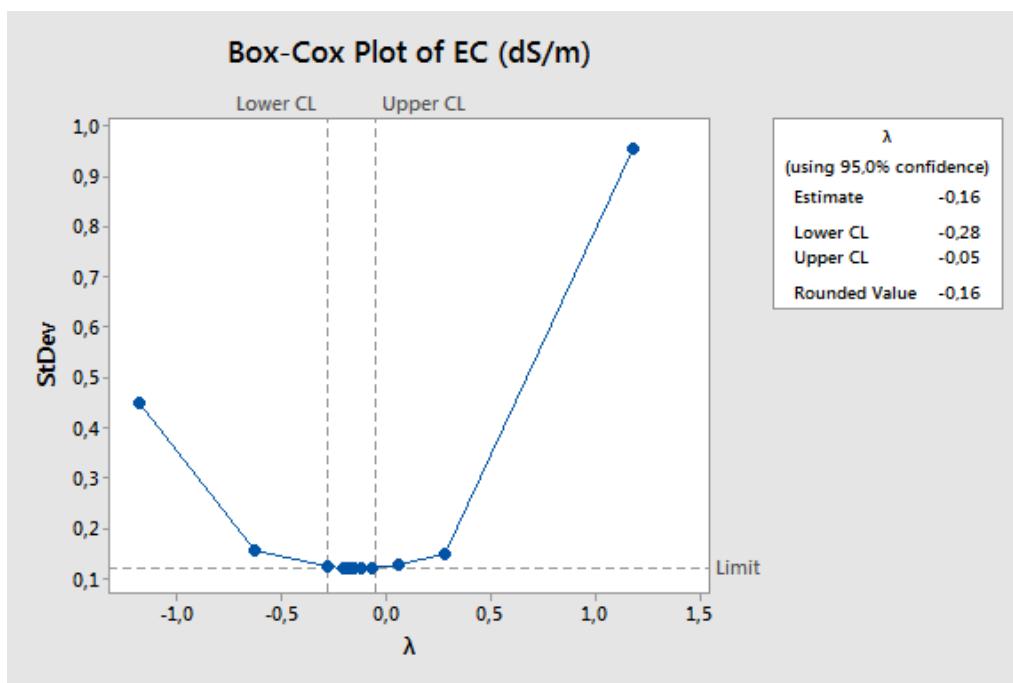
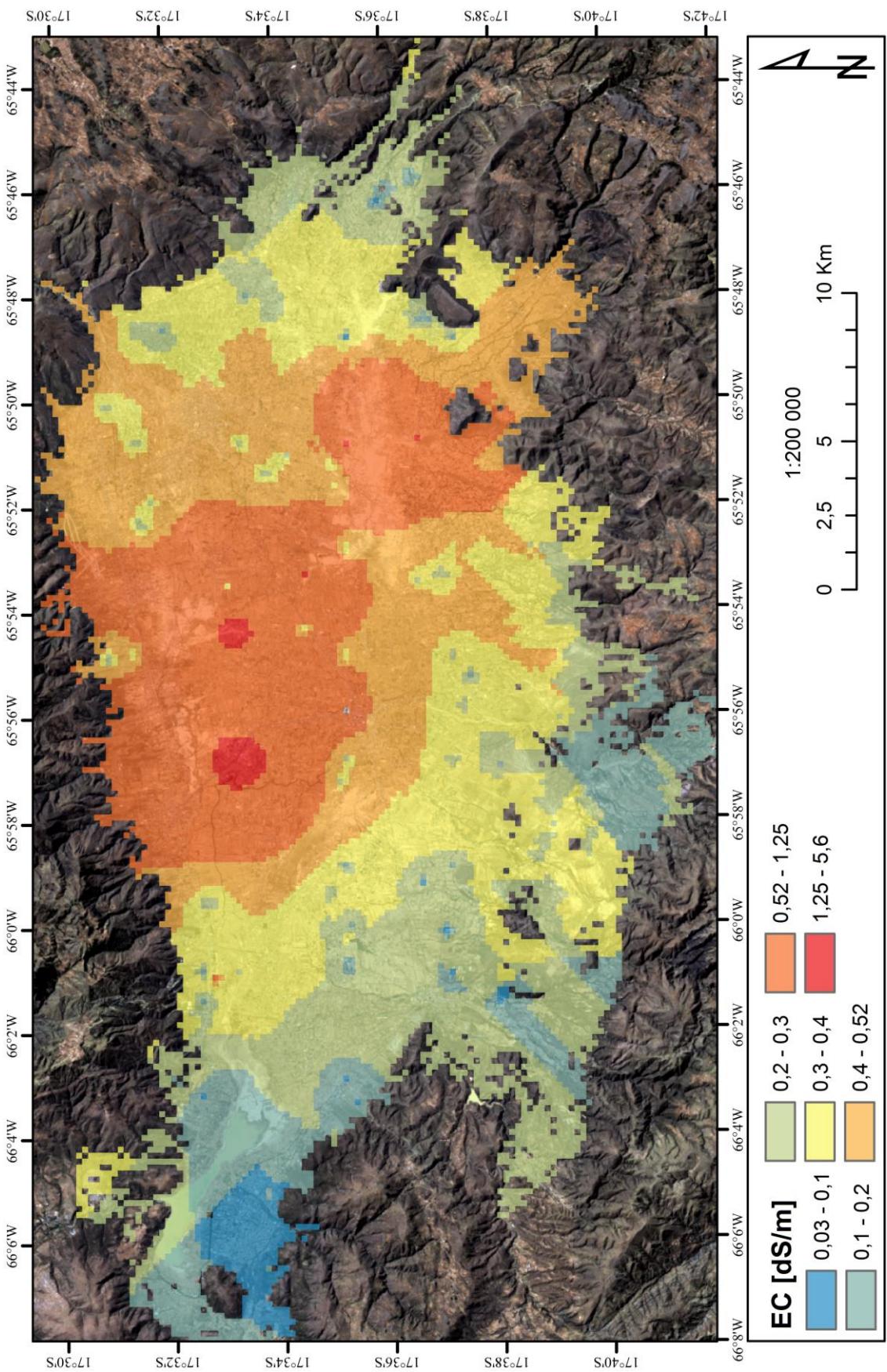


Figure 42. Détermination du λ optimal à devoir appliquer pour la transformation de variable Box-Cox



EC [dS/m] map of the High Valley Coo. Syst. : WGS84 - UTM 20S

Method : Inverse Distance Weighted Interpolation



pH (KCl)

Aucune donnée manquante n'existe pour le pH (KCl) et aucune donnée n'a été exclue à la suite du traitement des outliers pour la réalisation ou la validation du modèle de prédiction spatiale. Le résultat concernant le test de normalité après application d'une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = 0$ est donné à la figure 46. À titre d'exemple, le résultat de la détermination du λ optimal à devoir appliquer pour la transformation de variable Box-Cox est également donné à la figure 47. La carte à l'échelle 1/200 000 de l'ESP sous le format de raster avec la résolution d'un pixel fixé à 200 mètres est quant à elle donnée à la page suivante.

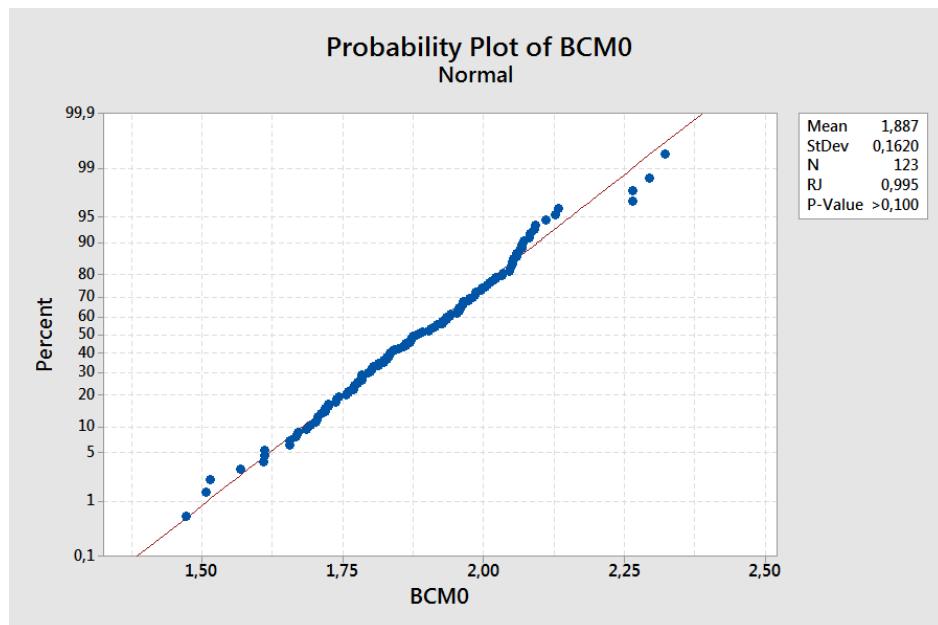


Figure 43. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable pH (KCl) après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0$, dénommée ici BCM0.

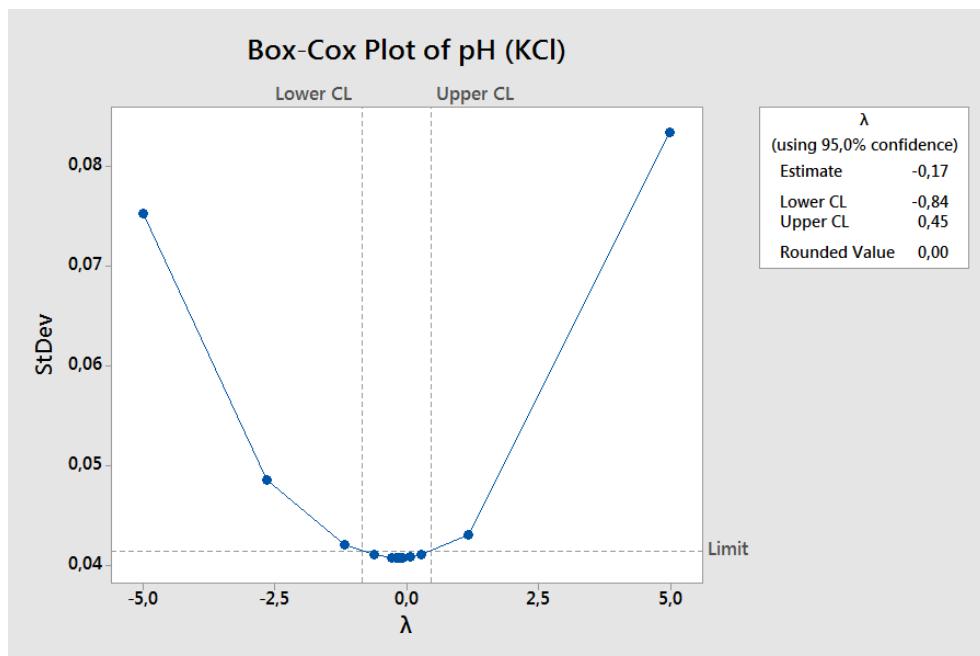
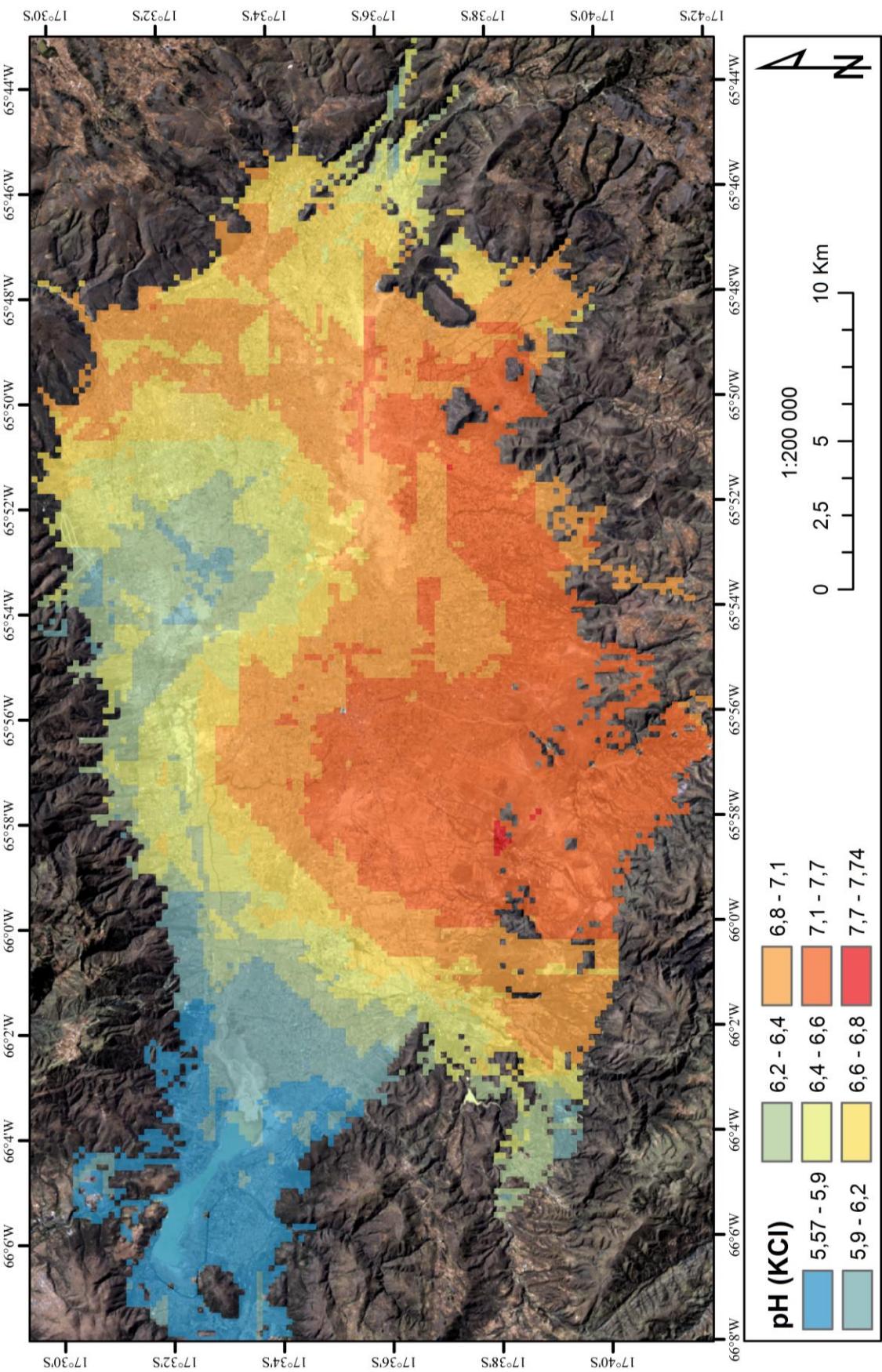


Figure 44. Détermination du λ optimal à devoir appliquer pour la transformation de variable Box-Cox.



pH (KCl) map of the High Valley Coo. Syst. : WGS84 - UTM 20S

Method : Ordinary Kriging



TOC

La liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus à la suite du traitement des outliers pour la réalisation ou la validation du modèle de prédiction spatiale est donnée au tableau 12.

Tableau 11. Liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus dans le modèle de prédiction spatiale.

Liste des échantillons sans donnée (ND) ou non inclus (NI) dans le modèle de prédiction spatiale	
33 NI	103 NI
63 NI	121 NI
70 NI	151 NI
90 NI	156 NI

Le résultat concernant le test de normalité après application d'une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = 0,5$ est donné à la figure 48. La carte à l'échelle 1/200 000 de l'ESP sous le format de raster avec la résolution d'un pixel fixée à 200 mètres figure à la page suivante.

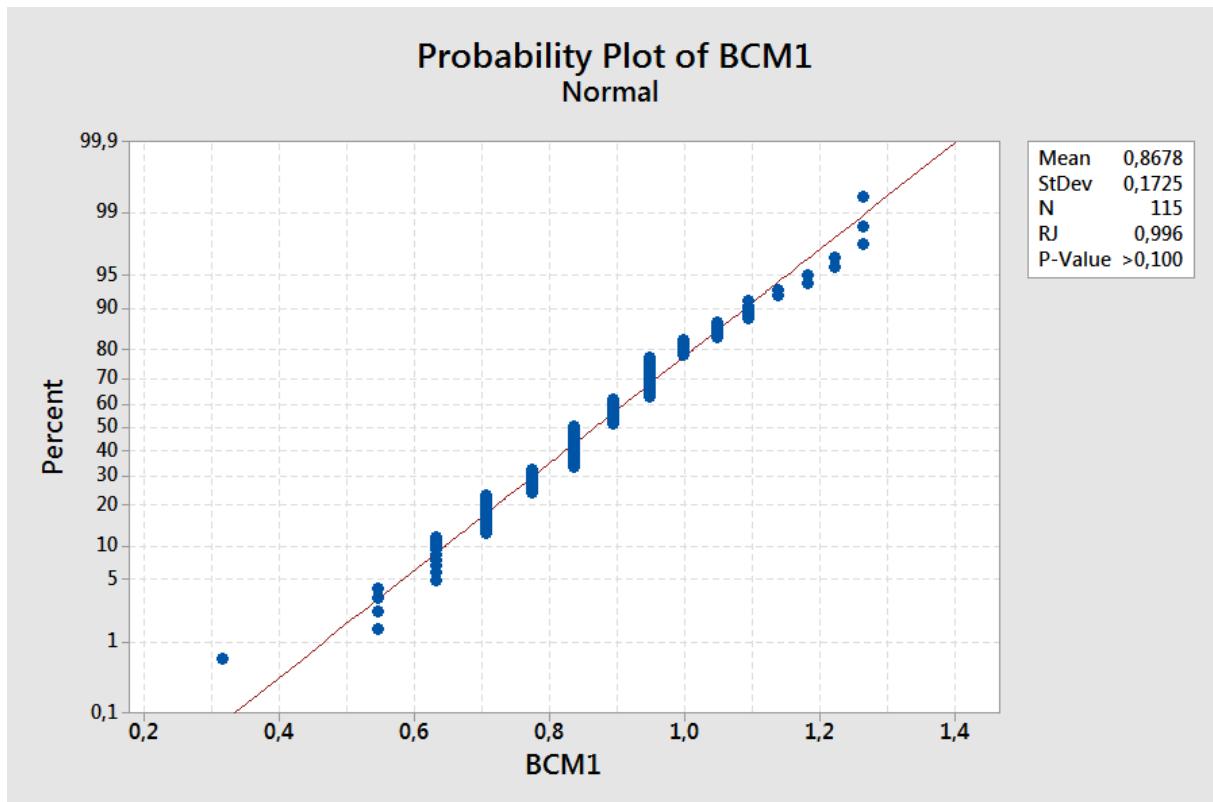
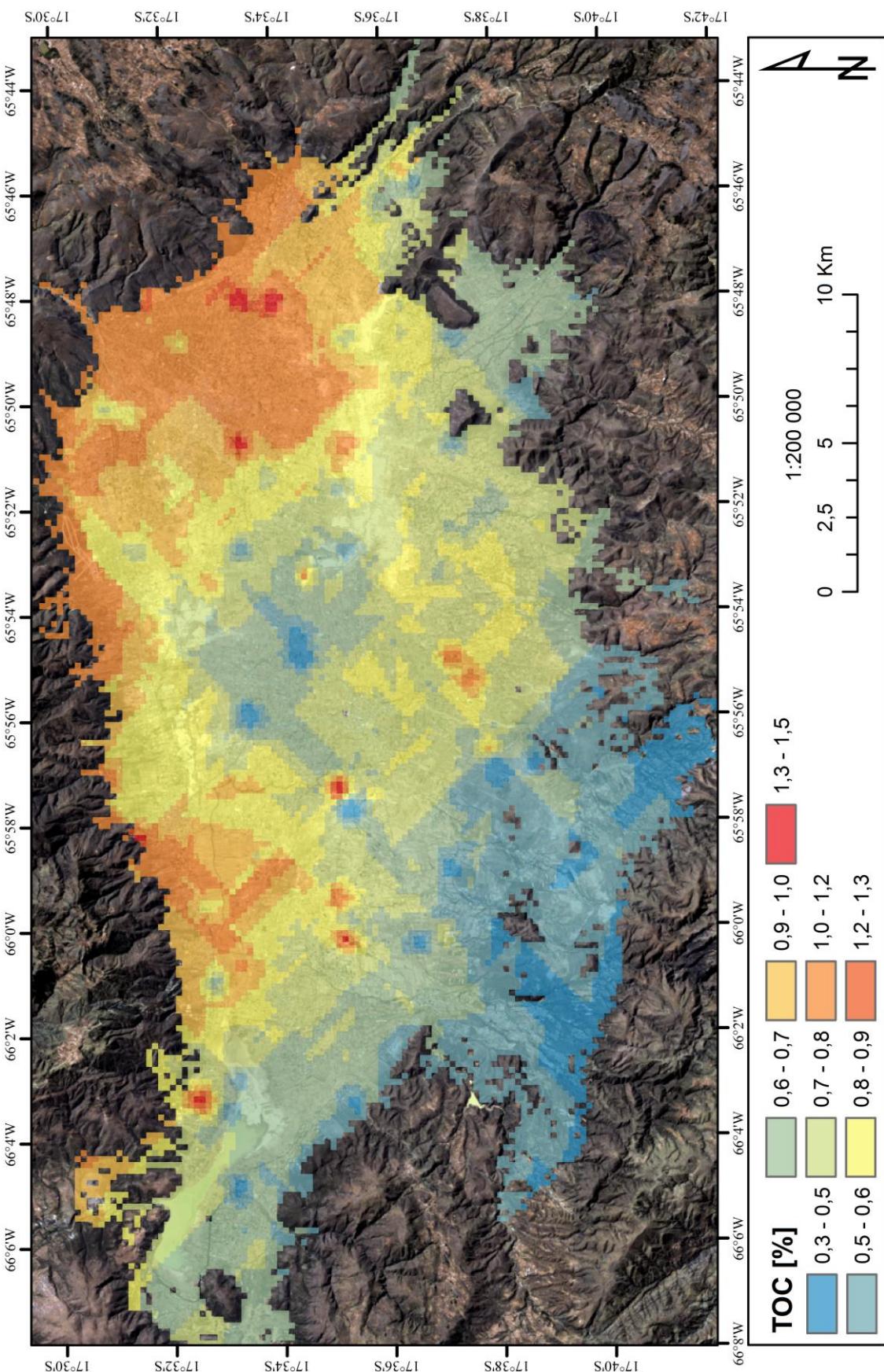


Figure 45. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable TOC après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0,5$, dénommée ici BCM1.



TOC [%] map of the High Valley Coo. Syst. : WGS84 - UTM 20S

Method : Kriging with external drift
Trend removal : 1st order



CEC

La liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus à la suite du traitement des outliers pour la réalisation ou la validation du modèle de prédiction spatiale est donnée au tableau 13

Tableau 12. Liste des échantillons pour lesquels aucune donnée n'est disponible ou n'ayant pas été inclus dans le modèle de prédiction spatiale.

Liste des échantillons sans donnée (ND) ou non inclus (NI) dans le modèle de prédiction spatiale		
11 NI	95 ND	131 ND
24 NI	96 ND	144 ND
48 NI	108 ND	149 ND
92 ND	114 ND	155 ND
93 ND	125 ND	

Le résultat concernant le test de normalité après application d'une transformation de type Box-Cox avec $\lambda = 0,5$ est donné à la figure 49. La carte à l'échelle 1/200 000 de l'ESP sous le format de raster avec la résolution d'un pixel fixée à 200 mètres est donnée à la page suivante.

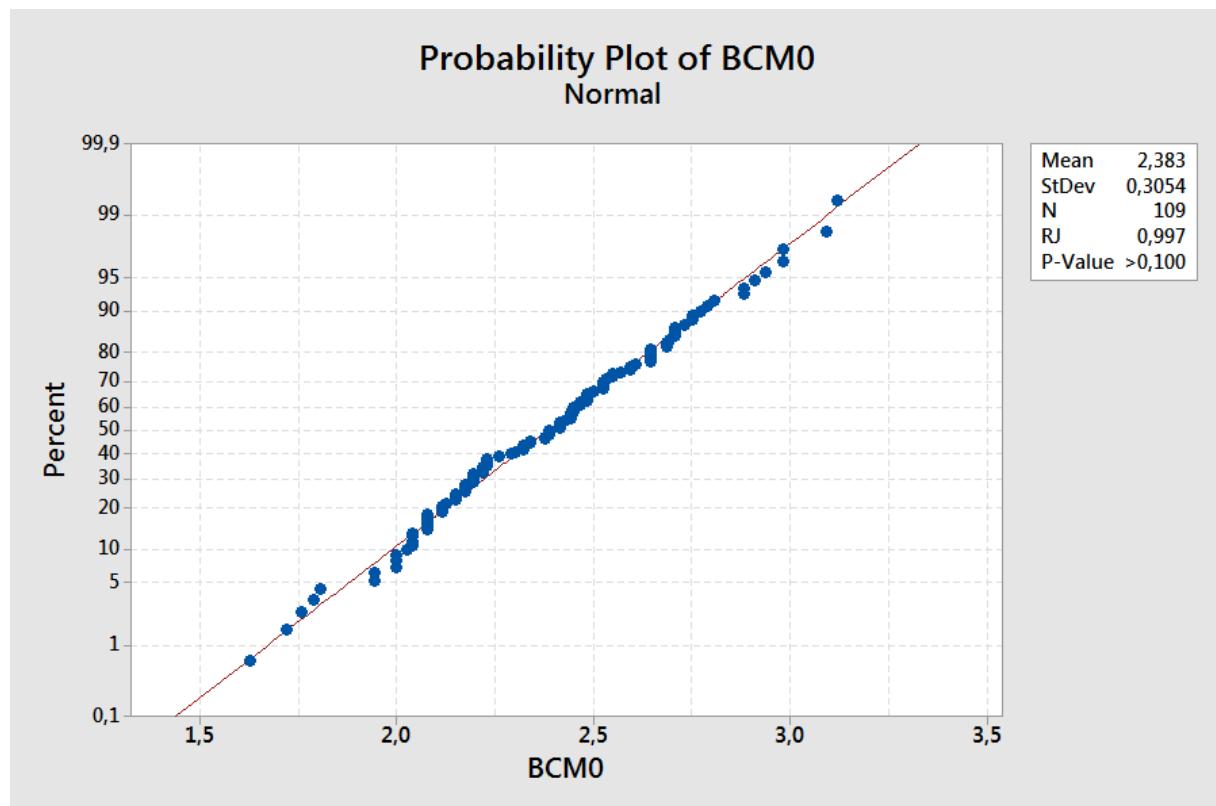
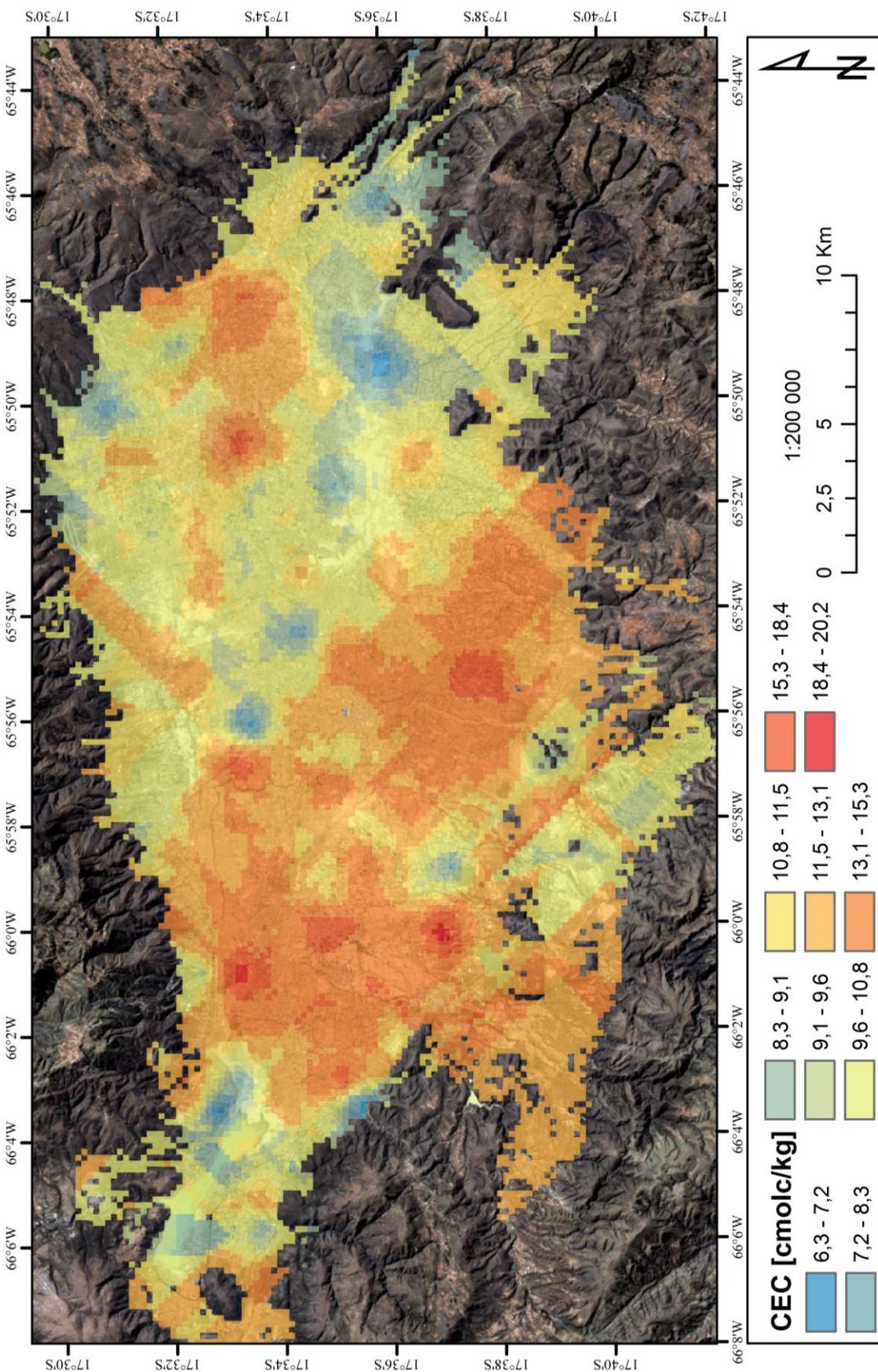
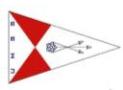


Figure 46. Test de normalité (Ryan-Joiner) de la variable CEC après une transformation Box-Cox avec $\lambda = 0$, dénommée ici BCM0.

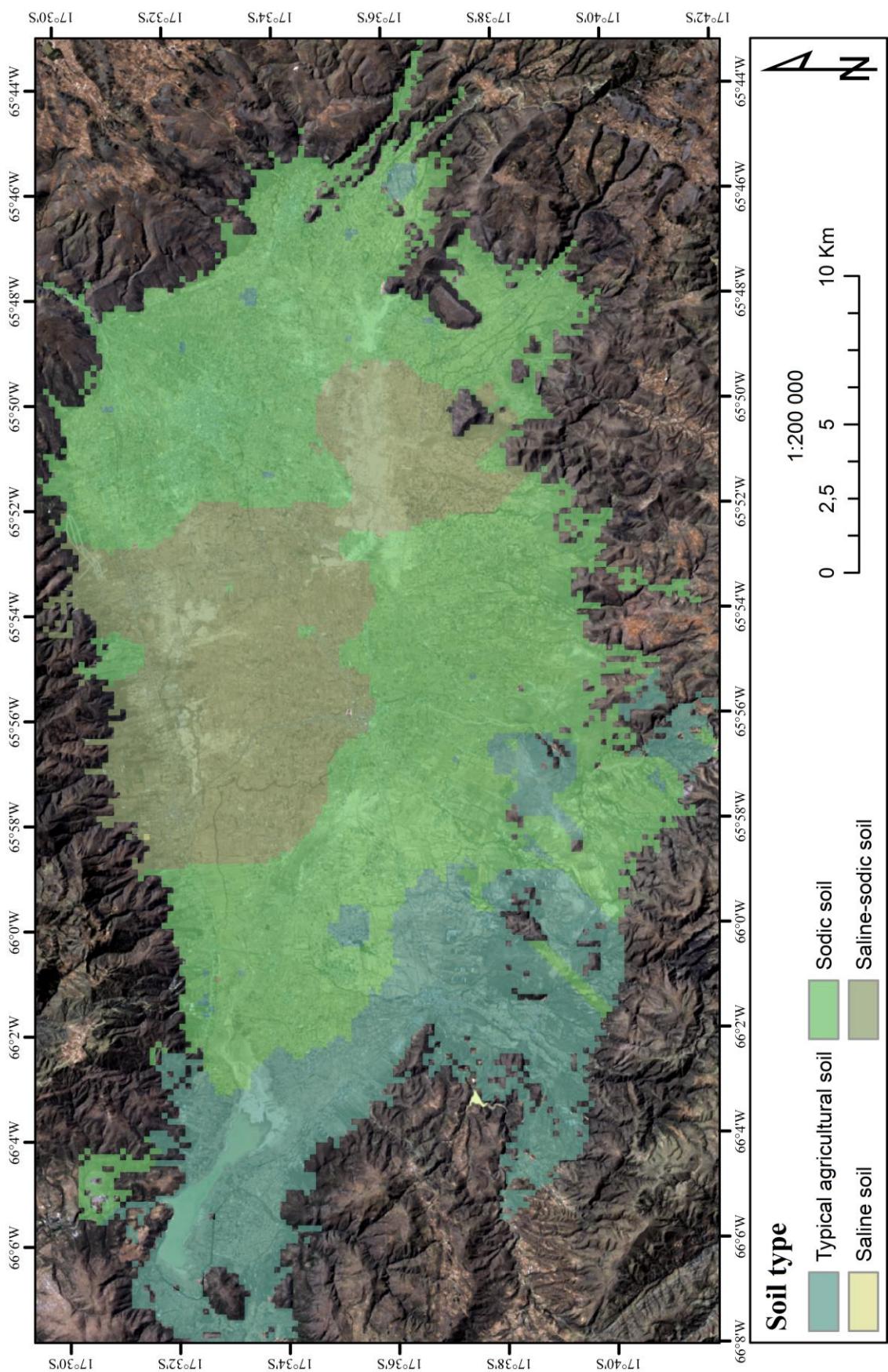


CEC [cmolc/kg] map of the High Valley

Method : Kriging with external drift; Trend removal : 1st order



Classification simplifiée



**Map of soils considered by the
simplified classification**

Coo. Syst. : WGS84 - UTM 20S



Classification sur base de l'arbre décisionnel

