

Figure 3. Classification des sols en fonction des types de sols à partir des données spectrales (I) et des données analysées au laboratoire (II). Type des sols : Fer = Ferralsol ; Cam = Cambisol ; Nit = Nitisol).

3.2 Relations entre les constituants et les propriétés physico-chimiques des sols

Les vecteurs correspondant aux analyses des constituants et des propriétés physico-chimiques des sols et la projection des divers échantillons de sols dans l'ACP sont présentés dans la Figure 4. Pour plus de lisibilité, les graphiques sont présentées en deux dimensions (2 axes de l'ACP), avec les axes PC1 et PC2, PC1 et PC3, respectivement. Les vecteurs seuls sont présentés sur les figures 4 I et II ; les projections des échantillons sont présentées en fonction des types de sols sur les figures 4 III et IV ; en fonction de la température sur les figures 4 V et VI ; en fonction de l'altitude sur les figures 4 VII et VIII.

Les variables analysées montrent une organisation forte en relation avec les axes de l'ACP. On observe une opposition, selon l'axe PC1, entre P_{rem} , associé aux valeurs positives de PC1, et Gb et Fe_2O_3 , qui sont associées aux valeurs négatives de PC1 (Figure 4 I et II). Ces deux variables, qui correspondent aux oxydes de Fe et Al, sont logiquement en opposition avec P_{rem} , qui donne la quantité de P non adsorbée par le sol, donc qui représente l'inverse du potentiel de sorption. La teneur en carbone est fortement reliée à celle de gibbsite. Il est connu que les oxydes de Fe et Al stabilisent les matières organiques et limitent leur minéralisation dans les sols (Kaiser et Guggenberger, 2003), ce qui peut expliquer cette relation. La teneur en sable est fortement associée à l'axe PC2, mettant en évidence une certaine indépendance de cette variable avec celles associées à l'axe PC1. Néanmoins, l'observation des axes PC1 et PC3 (Figure 4 II) montre une association étroite entre la teneur en sable et P_{rem} , indiquant que les sols sableux fixent moins le P. La teneur en kaolinite et le pH sont également assez indépendants de P_{rem} . Ces deux variables covarient comme l'indique la proximité de leurs vecteurs sur la Figure 4 I, mais de façon opposée selon l'axe PC3 (Figure 4 II), indiquant que l'augmentation des teneurs en kaolinite est associée à des sols plus acides.

Ces résultats sont cohérents et en relation avec les facteurs de la pédogénèse. Les figures 4 III et IV montrent une relation entre les constituants et des propriétés physico-chimiques bien distinctes selon les deux groupes de sols (Fer et C_N). La projection des sols sur les plans de l'ACP montrent que les Ferralsols, plus altérés que le groupe représenté par les Cambisols et les Nitisols, sont plus oxydiques, moins sableux et par conséquent plus fixateurs de P (Figures 4 III et IV). Il en va de même pour les sols de la température correspondant aux températures les plus faibles (Figure 4 V et VI) et aux altitudes les plus élevées (Figure 4 VII et VIII), en général plus altérés.

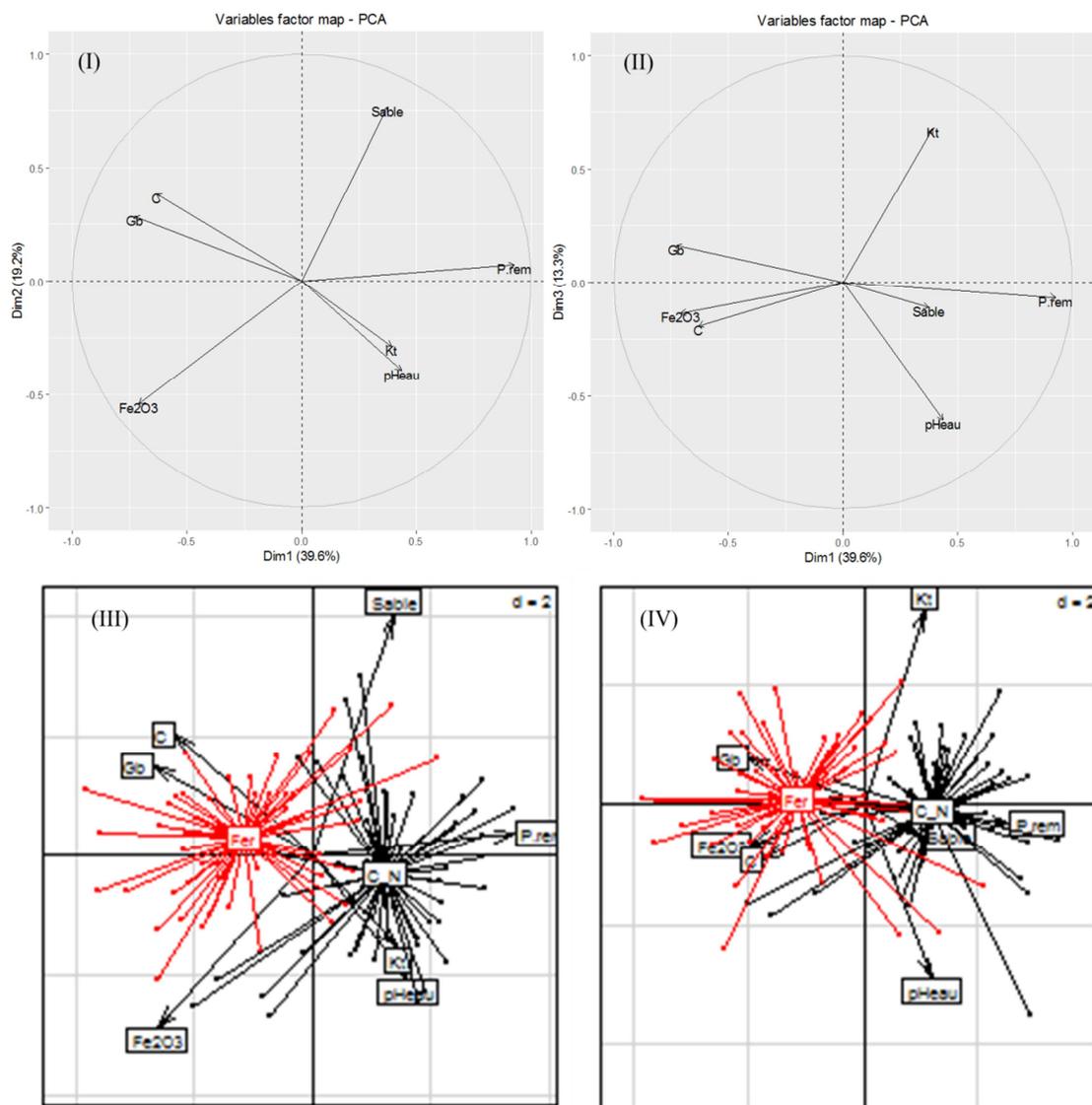


Figure 4. Relations entre les constituants et les propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques de Madagascar et les facteurs de la pédogénèse : (I) ACP en PC1 et PC2 ; (II) ACP en PC1 et PC3 ; (III) PC1 et PC2 en fonction des types de sol ; (IV) PC1 et PC3 en fonction des types de sol (Fer=Ferralsol ; C_N=Cambisol et Nitisol).

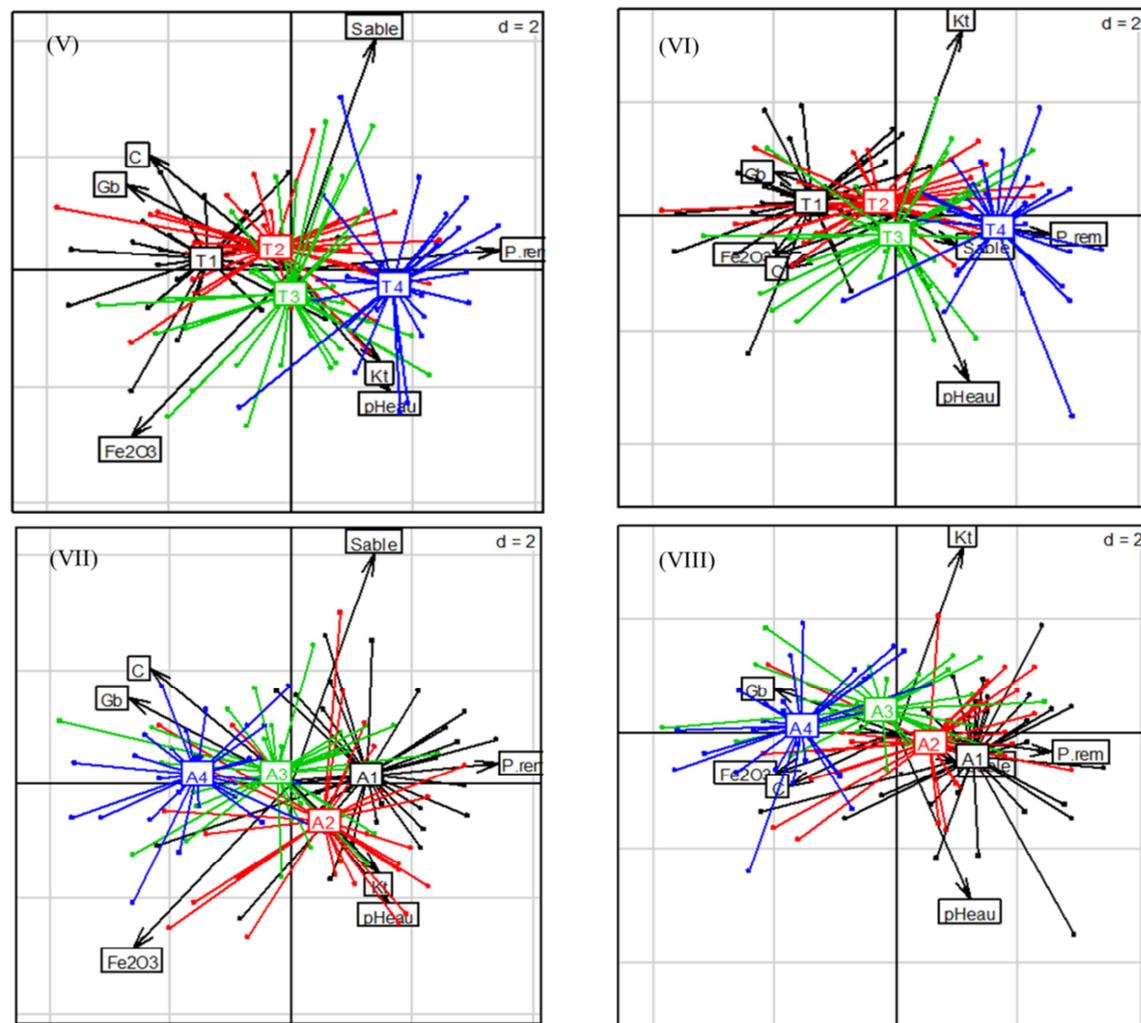


Figure 4 (suite). Relations entre les constituants et les propriétés physico-chimiques des sols ferrallitiques de Madagascar et les facteurs de la pédogénèse : (V) PC1 et PC2 en fonction de la température ; (VI) PC1 et PC3 en fonction de la température ; (VII) PC1 et PC2 en fonction des altitudes ; (VIII) PC1 et PC3 en fonction des altitudes.

3.3 Effet des facteurs de la pédogénèse sur la rétention de P

La figure 5 montre l'effet des facteurs de la pédogénèse sur la rétention de P dans les sols ferrallitiques de Madagascar.

Le type de sol a un effet important sur la teneur en P_{rem} (Figure 5a). Les Cambisols – Nitisols (C_N) ont une concentration min - max de 19,4 – 39,9 mg l⁻¹ de P_{rem} , avec une moy ± SD de 31,6 ± 4,7 mg l⁻¹ de P_{rem} . Les Ferralsols (Fer) ont une concentration de P_{rem} min - max qui varient de 10,7 – 36,4 mg l⁻¹, avec une moy ± SD de 22,2 ± 4,7 mg l⁻¹ de P_{rem} . Les teneurs de P_{rem} des Cambisols_Nitisols (C_N) sont significativement plus élevées que celles des Ferralsol (Fer) ($P < 0,0001$).

L'effet de la température est également très significatif ($P < 0,0001$) (Figure 5b). Les sols correspondant aux températures les plus faibles (T1) ont des concentrations de P_{rem} faibles avec min - max de 14,0 – 27,7 mg l⁻¹ et une moy ± SD de 21,6 ± 4,2 mg l⁻¹. Au contraire, les sols correspondant aux températures les plus élevées (T4) ont des concentrations de P_{rem} élevées avec min - max de 19,4 – 39,9 mg l⁻¹ et une moy ± SD de 33,6 ± 4,8 mg l⁻¹ de P_{rem} . Les températures intermédiaires correspondent à des niveaux de P_{rem} intermédiaires.

L'effet de l'altitude est également très significatif ($P < 0,0001$) (Figure 5c). Les sols correspondant aux altitudes les plus faibles (A1) ont des concentrations de P_{rem} élevées avec min - max de 19,2 – 39,9 mg l⁻¹ et une moy ± SD de 32,4 ± 5,5 mg l⁻¹. Au contraire, les sols correspondant aux altitudes les plus élevées (A4) ont des concentrations de P_{rem} faibles avec min - max de 14,0 – 27,5 mg l⁻¹ et une moy ± SD de 21,4 ± 4,0 mg l⁻¹ de P_{rem} . Les altitudes intermédiaires correspondent à des niveaux de P_{rem} intermédiaires.

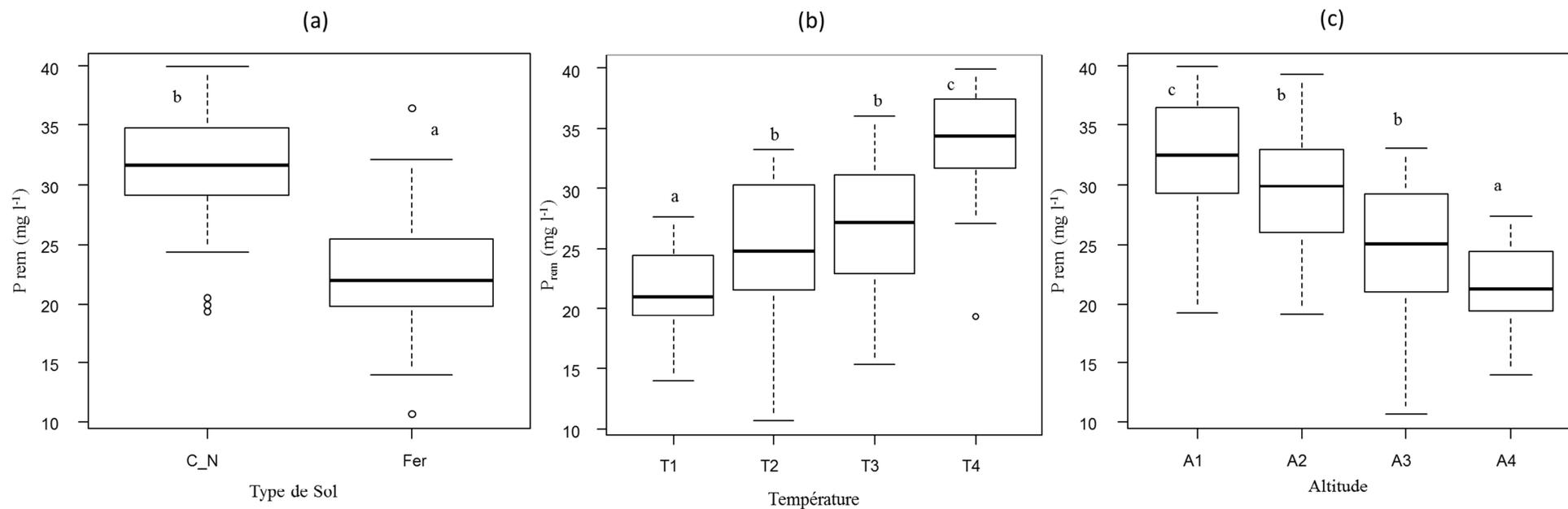


Figure 5. Effet des facteurs de la pédogénèse sur la rétention de P dans les sols ferrallitiques de Madagascar : (a) Types de sol (C_N = Cambisol et Nitisol, Fer = Ferralsol) ; (b) Température (T1 = min-Q1, A2 = Q1-Q2, A3 = Q2-Q3, A4 = Q3-max) ; (c) Altitude (A1 = min-Q1, A2 = Q1-Q2, A3 = Q2-Q3, A4 = Q3-max).

La figure 6 présente la distribution du P_{rem} selon les types de sol à l'échelle régionale. Cette distribution est faite en 6 classes selon les niveaux de concentrations de P_{rem} . Les Hautes Terres de Madagascar, dominés par des sols ferrallitiques fortement altérés en raison de l'altitude et de la pluviométrie, sont composés majoritairement par des Ferralsols. Ces sols présentent globalement des teneurs de P_{rem} faibles, indiquant un potentiel de fixation du P important. Les Hautes Terres sont caractérisées par (i) des reliefs formés de plateaux qui sont les restes d'anciennes surfaces pénéplanées, (ii) des collines en « demi-orange » qui sont le résultat de la fragmentation du relief et qui représentent les zones les plus humides, et (iii) des vallées caractérisent les sols ferrallitiques (Boyer, 1982). Ces sols ferrallitiques sont des sols profonds, caractérisés par une décomposition très poussée des minéraux primaires sauf le quartz. Les teneurs des hydroxydes d'aluminium (gibbsite) et de fer (goethite) sont généralement élevées dans ces sols, alors que les teneurs en kaolinite sont proportionnellement plus faibles (Figure 3b, Chapitre 2). La variation de la teneur en P_{rem} dans les sols ferrallitiques en présence de ces constituants oxydiques est largement expliqué par la capacité de sorption de ces constituants, comme nous l'avons montré par les fonctions de pédotransfert (Tableau 5, Chapitre 3). Les sols présentant le potentiel de sorption le plus important (P_{rem} entre 10 et 25 mg l⁻¹) sont situés dans la partie centrale des Hautes Terres, entre Antananarivo et Antsirabe.

Les sols situés sur les versants sont généralement classés comme des Ferralsols quand on se rapproche des zones d'altitude et généralement classés comme des Cambisols ou des Nitisols lorsque l'on est situé sur les zones de glacis correspondant au Moyen Ouest. Néanmoins, quel que soit la classification pédologique de ces sols, le potentiel de sorption de ces sols, présente des valeurs intermédiaires (P_{rem} entre 15 et 30 mg l⁻¹). Ces sols rajeunis par l'érosion et les apports provenant des Hautes Terres sont généralement relativement plus riches en kaolinite (322 ± 101 g kg⁻¹) que les précédents (279 ± 96 g kg⁻¹), ce qui limite la fixation du P sur les oxydes d'Al et Fe.

Les sols situés sur les roches sédimentaires fixent beaucoup moins le P que les autres sols avec des valeurs de P_{rem} atteignant souvent 25 à 40 mg l⁻¹. Ces sols sont généralement plus sableux (515 ± 156 g kg⁻¹) que les précédents (483 ± 130 g kg⁻¹).

Dans cette zone, les deux sols situés à l'extrême nord correspondent à une exception notable : ces sols ont des teneurs de P_{rem} très faibles, de 10-15 mg l⁻¹. Ils sont situés à proximité de la montagne d'Ambre, un massif basaltique ayant donné naissance à des sols ferrallitiques très riches en oxydes de fer, dont la capacité de sorption explique la forte rétention du P.

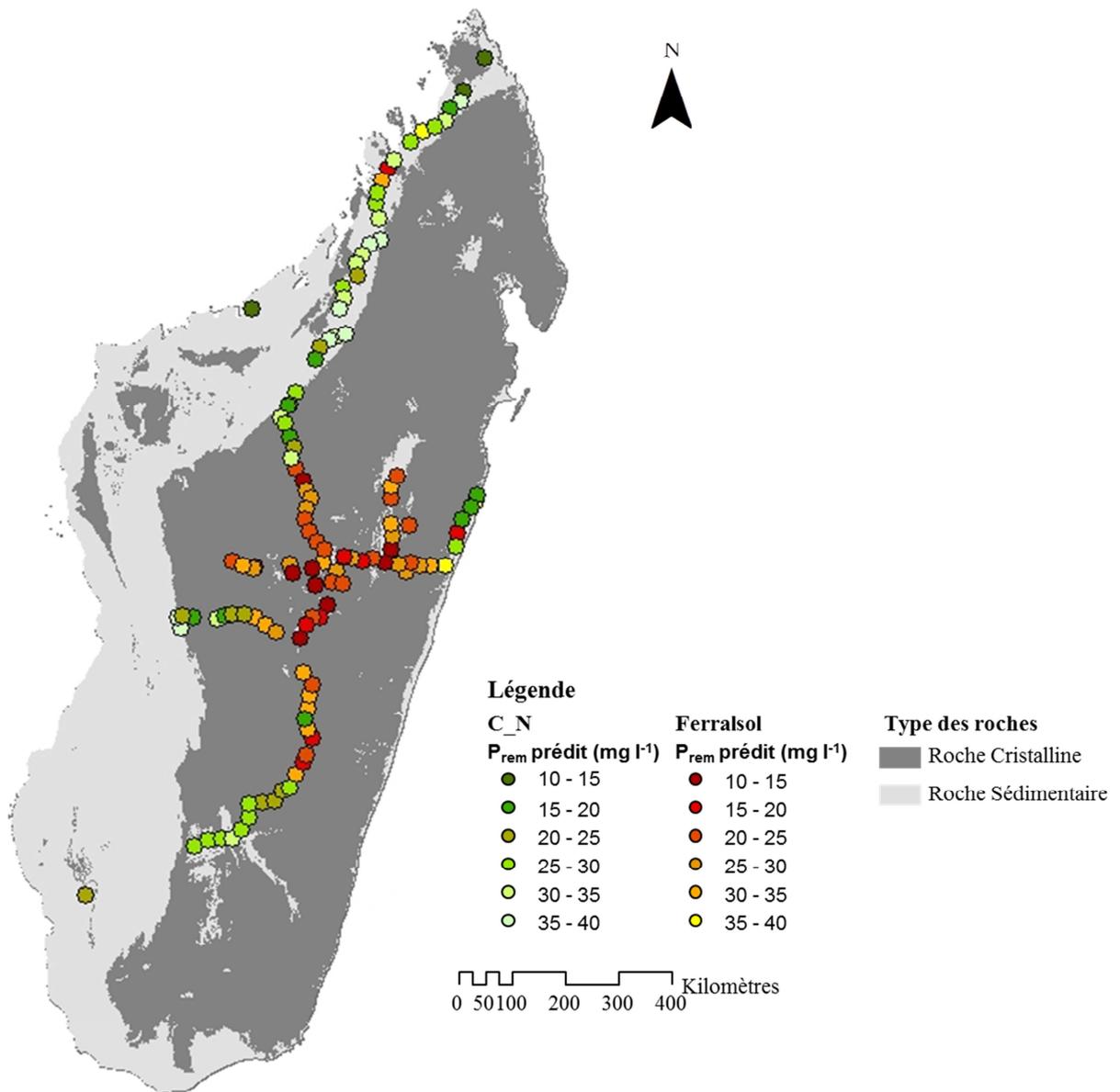


Figure 6. Représentation de la distribution de P_{rem} prédit par NIRS à l'échelle régionale.

3.4 Application des modèles chimiométriques à une échelle locale

a. Validation du modèle P_{rem} à l'échelle locale

Les modèles proposés à partir d'une échelle régionale au chapitre 3 ont été testés à une échelle locale. La figure 7 montre la validation du P_{rem} prédit par : (I) le modèle NIRS mPLS (Chapitre 3, Tableau 2), (II) une fonction de pédotransfert utilisant les teneurs prédites de texture (sable) et teneurs en minéraux (Chapitre 3, Tableau 5, Eq. 7). Cette validation correspond aux corrélations des valeurs mesurées par rapport aux valeurs prédites de P_{rem} .

Pour le modèle du P_{rem} prédit par NIRS (Figure 7a), 28 *outliers* ont été éliminés et le lot de validation est constitué finalement de 198 échantillons. La régression linéaire entre P_{rem} mesuré et prédit est hautement significative (p-value < 0,0001), avec un $R^2c= 0,70$ et une erreur standard (SE) de 3,909. Cette régression est toutefois bien distincte du modèle de P_{rem} obtenu à l'échelle régionale ($R^2c = 0,70$). Si les pentes des droites de régression sont assez similaires (1 et 0.93, respectivement), les ordonnées à l'origine sont sensiblement différentes (11.4 et 2.0, respectivement). Cette différence marquée pourrait être due au fait qu'à l'échelle régionale nous avons utilisé des sols qui n'ont a priori jamais été fertilisés (sous bozaka), alors qu'à l'échelle locale, les sols ont probablement reçu des apports de fertilisants organiques ou minéraux.

Concernant le modèle du P_{rem} prédit par la fonction pédotransfert (Figure 7b), le lot de des échantillons pour la validation du modèle est constitué uniquement sur les 225 échantillons après avoir enlevé les outliers des analyses. La corrélation entre P_{rem} mesuré et prédit est plus faible mais toujours hautement significative (p-value < 0,0001), avec un $R^2c= 0,43$, un SE de 5,793. Cette régression est peu distincte du modèle de P_{rem} obtenu à l'échelle régionale ($R^2c = 0,49$). Par ailleurs, la différence entre les deux pentes est peu marquée, du fait que le modèle à l'échelle locale tend à se rapprocher au modèle régionale. Malgré une corrélation moins bonne, le modèle du P_{rem} développé avec la fonction pédotransfert, pourrait être utilisé pour des estimations de la teneur en P_{rem} à des échelles locales.

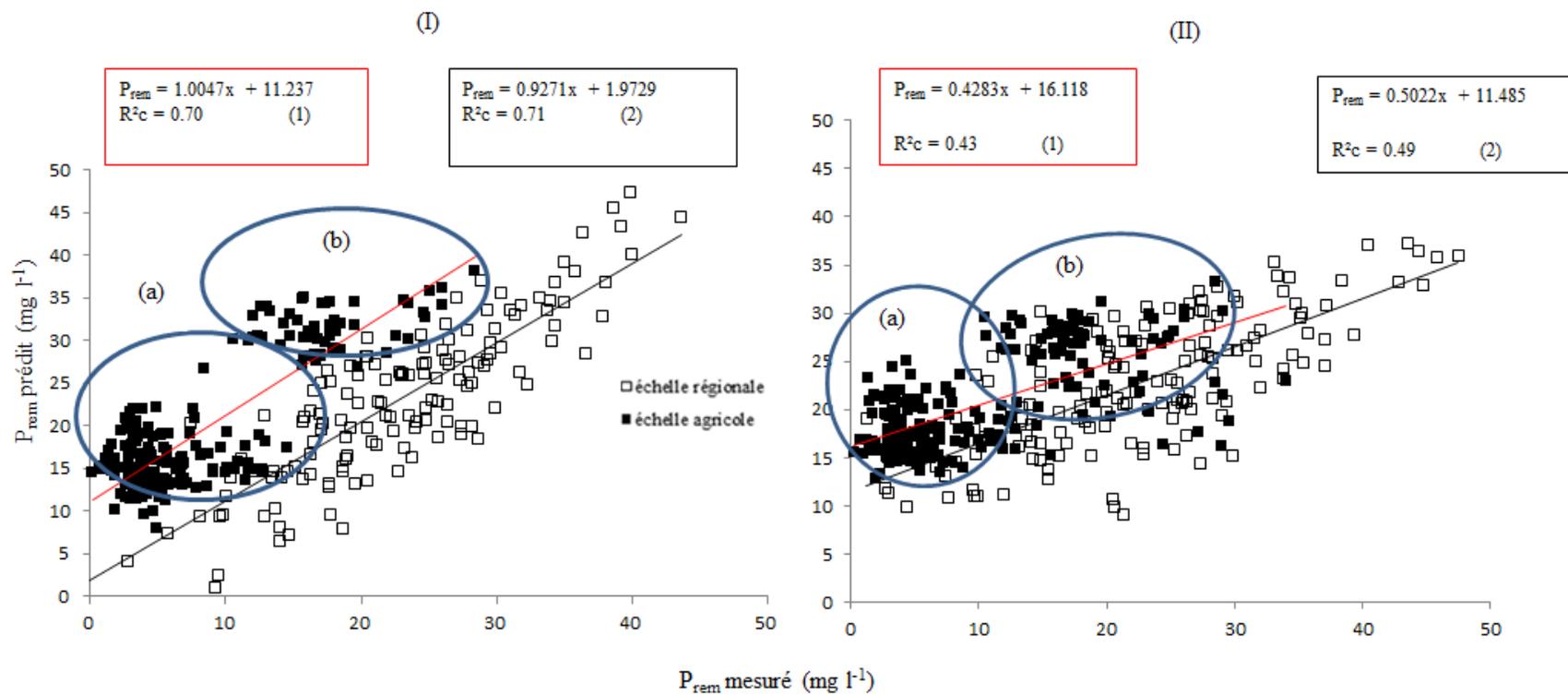


Figure 7. Validation du modèle P_{rem} prédit par la chimiométrie : (I) NIRS ; (II) fonction pédotransfert.

b. Application du modèle P_{rem} à l'échelle locale

Les deux lots d'échantillons étudiés à l'échelle locale, c'est-à-dire les échantillons dans la partie Est de Vakinankaratra (a) et ceux du Moyen Ouest du Vakinankaratra (b), correspondent à deux groupes bien distincts. Le premier groupe a des valeurs de P_{rem} faibles, ($16 \pm 3,0 \text{ mg l}^{-1}$ de moy \pm SD ; min-max de 4,2-23,6 mg l^{-1}), ce qui le rapproche des valeurs obtenues pour les Ferralsols très fixateurs. Le second groupe a des valeurs de P_{rem} plus élevées ($31,2 \pm 3,1 \text{ mg l}^{-1}$ de moy \pm SD ; min-max de 18-38,3 mg l^{-1}), ce qui le rapproche des valeurs obtenues pour les Cambisols ou les Nitisols, qui sont moins fixateurs. Les valeurs de P_{rem} à l'échelle locale sont présentées sur la figure 8.

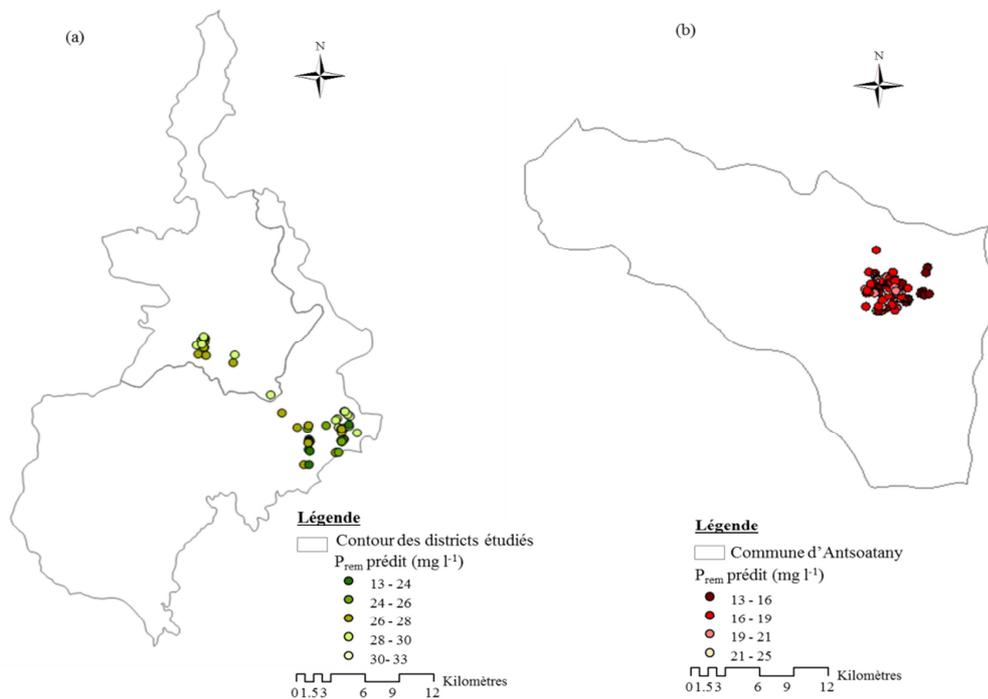


Figure 8. Représentation de la distribution de P_{rem} prédit par la fonction pédotransfert à l'échelle locale de la Région du Vakinankaratra : (a) Moyen Ouest de la Région ; (b) Est de la Région

4 Discussion

4.1 Caractérisation de clusters de sols

Les sols sont le résultat d'une altération chimique poussée de la roche mère, qui, lorsqu'elle est très poussée, se traduit par une dissolution de tous les minéraux et la lixiviation profonde de la plupart des éléments (Si, cations basiques, etc.) sauf du fer et de l'aluminium (Andriamasy, 2015). Cette altération poussée se traduit par la présence dominante d'oxydes de fer (goethite, hématite) et d'aluminium (gibbsite), alors qu'une altération plus modérée se traduit par la néoformation de kaolinite en quantité plus importante. La disposition des

vecteurs sur l'ACP de la figure 4 (III et IV) mettent bien en évidence ces variations minéralogiques observées, avec une opposition entre des sols très altérés et riches en oxydes d'aluminium et des sols moins altérés riches en kaolinite. Cette distinction se traduit par la formation de deux *clusters* regroupant les sols : un groupe correspondant principalement aux Ferralsols, riches en gibbsite, et un autre groupe correspondant principalement aux Cambisols et Nitisols, plus riches en kaolinite.

Philippon (2015) montre que l'on peut avoir deux types d'altération dans les sols tropicaux suivant le comportement du silicium et de l'aluminium libéré par l'hydrolyse des minéraux primaires des roches (quartz, feldspaths, micas, etc). La première est la monosiallisation, où la kaolinite et le fer migrent séparément à une altitude faible, une température élevée et une pluviométrie moyenne annuelle < 1500 mm, pour former des sols ferrugineux tropicaux (Philippon., 2015). Ces sols sont caractérisés par un rapport silice/alumine élevée, correspondant à une forte dominance de la kaolinite (Aubert, 1962 ; cité par Ségalen et Brion, 1981). Les cambisols et les nitisols (Figure 4, III et Figure 4, IV) ont les mêmes caractéristiques typiques que ces sols ferrugineux (selon la classification CPCS, 1967). Ils sont caractérisés par une forte concentration en kaolinite (327 g kg^{-1}) et sont riches en sable (497 g kg^{-1}). La seconde altération est l'allitisation où les oxydes et hydroxydes de Fe et d'Al se trouvent en forte concentration dans les sols tropicaux à une altitude élevée, une température plus faible et une pluviométrie moyenne annuelle > 1500 mm, pour former des Ferralsols (Philippon, 2015). Ces sols sont caractérisés par un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2$ où la kaolinite est moins abondante (Aubert, 1962 ; cité par Ségalen et Brion, 1981).

Nos résultats sont conformes aux propositions de Philippon (2015). Les sols très altérés ou Ferralsol sont formés à une altitude assez élevée (A4), à une température assez faible (T1) et une pluviométrie élevée (P4). Ces sols sont riches en oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium. Les sols moins altérés, les Cambisols et Nitisols, sont formés à une altitude plus faible (A1), à une température plus élevée (T4) et avec une pluviométrie faible (P1). Le facteur déterminant semble ainsi être la pluviométrie, qui induit une lixiviation intense de la silice et des cations basiques. Les températures et l'altitude sont fortement reliées au niveau de la pluviométrie : en altitude, la pluviométrie augmente avec l'altitude alors que la température baisse. Le climat joue donc un rôle majeur dans l'altération chimique des sols ferrallitiques tropicaux (Chatelin, 1972, cité par Ségalen et Brion, 1981). Par contre, les roches mères n'ont pas un effet marqué sur la répartition des sols dans ces *clusters* (Figure 2, II). L'effet de la roche mère est généralement largement masqué par celui du climat dans les

sols tropicaux. Néanmoins, les sols développés sur roches mafiques, riches en fer, se distinguent des autres sols (Figure 2, II).

La première hypothèse : « *est-ce que les analyses spectrales permet de distinguer les groupements des sols* » est confirmée. En effet, les facteurs pédologiques (type de sol) et climatiques (pluviométrie, température et altitude) ont un effet marqué sur le sol (Figure 2, I et figure 2 (Suite)), se traduisant par la formation de *clusters* marqués (types de sols) ou de gradients entre les sols soumis à des facteurs d'intensité variables (facteurs climatiques). Néanmoins, il est à noter que quelques sols classés dans un groupe de sol à partir des observations pédologiques de terrain présentent des caractéristiques spectrales qui les rapprochent de l'autre groupe de sol (Figure 9). En effet, 47 des 61 échantillons de sols classés comme Ferralsols à partir des observations pédologiques correspondant uniquement au cluster des Ferralsols sont bien classés comme des Ferralsols (77%). De même, 46 des 59 échantillons de sols correspondant uniquement au cluster des Cambisols_Nitisols sont bien classés comme des Cambisols ou des Nitisols (78%). Néanmoins, 8 échantillons de sols (13%) classés comme des Ferralsols et 11 échantillons de sols (19%) classés comme des Cambisols ou des Nitisols se trouvent à l'intersection des deux clusters, ce qui rendrait leur classification sur des critères spectraux assez difficile. Enfin, 6 échantillons de sols (10%) classés comme des Ferralsols se trouvent dans la partie des Cambisols ou des Nitisols, et, 2 échantillons de sols (3%) classés comme des Cambisols ou des Nitisols se trouvent dans la partie des Ferralsols, sont mal classés par les spectres et entraînant leur positionnement dans un mauvais groupe .