



Ministère de l'Agriculture
et de l'Elevage

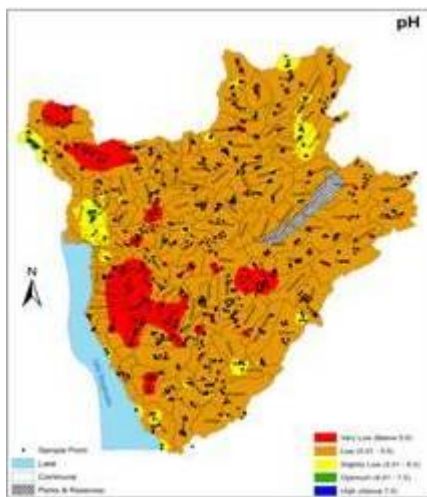


Institut des Sciences Agronomiques
du Burundi



International Fertilizer
Development Center

CARTOGRAPHIE DE LA FERTILITE DES SOLS DU BURUNDI ET DES BESOINS DES PRINCIPALES CULTURES VIVRIERES EN ELEMENTS NUTRITIFS



Nduwimana Oscar, Nzohabonayo Zacharie (IFDC)
Hicintuka Cyrille (ISABU)
Nibasumba Marcien (MINAGRIE DFS)

Bujumbura, novembre 2013

PAN PNSEB

PROJET D'APPUI AU NOUVEAU PROGRAMME NATIONAL DE SUBVENTION DES ENGRAIS DU BURUNDI



Royaume des Pays-Bas

REMERCIEMENTS

La cartographie actualisée des besoins en nutriments pour les cultures est un outil précieux permettant d'établir de nouvelles recommandations de fertilisation compte tenu des résultats d'analyse des échantillons de sols prélevés dans toutes les régions naturelles et provinces du Burundi.

Nous adressons nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué sous une forme ou une autre à l'aboutissement de ce travail. Qu'ils trouvent à travers cet ouvrage le couronnement de leur appui indéfectible.

Nos remerciements s'adressent particulièrement à Son Excellence Madame la Ministre de l'Agriculture et de l'Élevage et son Cabinet qui ont créé un cadre institutionnel favorable à la réalisation de cette activité réalisée dans le cadre du Projet d'Appui au Nouveau Programme de Subvention des Engrais du Burundi (PAN-PNSEB).

Nos sentiments de gratitude vont également aux différents Bailleurs notamment le Royaume des Pays Bas, qui ont financé les activités ayant abouti à ce travail.

Que les institutions qui ont collaboré dans l'affinage des protocoles, le prélèvement des échantillons, l'analyse de laboratoire et l'élaboration des cartes (ISABU, IFDC, DFS, FAO, et en particulier le laboratoire kenyan Crop Nutrition Laboratory Services) veuillent bien trouver ici l'expression de notre reconnaissance pour la remarquable qualité de leur travail.

AVANT PROPOS

La majeure partie de la population du Burundi vit de l'agriculture. Cependant, cette dernière fait face à plusieurs défis dont un amenuisement et une perte de fertilité des sols cultivables. L'utilisation des fertilisants minéraux reste très faible, limitée à 8 kg par habitant et par an, alors que la moyenne mondiale est de 80 kg (*source: ONU Afrique Renouveau, 2003*).

Cette situation est d'autant plus alarmante que le bilan des nutriments dans les pays des Grands Lacs est gravement déficitaire. Les pertes par exportation sont évaluées à 51.1 kg de N/ha/an, à 11.5 kg de P₂O₅ /ha/an et à 25.2 kg de K₂O/ha/an. La moyenne des pertes annuelles d'éléments nutritifs principaux est de 87.8 kg/ha, alors que les apports sont évalués à 26.9 kg/ha (*Africa Fertilizer Summit Report, 2006*). Cela traduit un bilan très déficitaire de 60.9 kg/ha.

Il s'avère important de connaître la teneur en éléments nutritifs des sols afin de pouvoir déterminer les quantités optimales d'engrais à apporter, en évitant les risques de sous ou de surdosage et en respectant les principes de gestion intégrée de la fertilité des sols.

Les dernières analyses des sols du Burundi ont porté sur 675 profils et ont permis d'établir une cartographie pédologique du Burundi à l'échelle de 1/50 000, manuscrite sur 42 planchettes. Elles datent des années 1990 et étaient réalisées par l'ISABU. Durant cette vingtaine d'années, la composition des sols a beaucoup changé. Les recommandations de fertilisation des sols et la cartographie des sols devraient donc être actualisées et adaptées aux changements des paramètres pédologiques.

La cartographie qui vient d'être actualisée dès août 2013 cadre avec le nouveau programme du Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage de subventionner et de libéraliser la commercialisation des engrais. Ce programme ne peut avoir de bons résultats que si les producteurs utilisent les meilleures doses permettant d'intensifier la production agricole et d'augmenter le revenu des ménages.

Cette cartographie est le résultat de l'analyse de sols prélevés dans 1039 sites géo référenciés, repartis dans toutes les provinces et régions naturelles du Burundi. Il s'agit d'un travail accompli par un partenariat entre Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage, ISABU, IFDC et FAO.

Les cadres et techniciens du développement agricole pourront utiliser cette cartographie dans les nouvelles recommandations de fertilisation des sols du Burundi, tenant compte des données de la fertilité initiale des sols, des types de cultures, des rendements potentiels et des rendements cibles à atteindre.

Les Universités et les écoles d'agriculture pourront aussi utiliser la cartographie pour appuyer leurs études et recherches, et offrir aux futurs agronomes et techniciens agricoles du Burundi un cadre actualisé de la condition des sols dans leur Pays.

TABLE DES MATIERES

- SIGLES ET ACRONYMES.....	6
- LISTE DES TABLEAUX.....	7
- LISTE DES PHOTOS.....	7
- LISTE DES CARTES.....	8
1. INTRODUCTION.....	10
1.1 Les régions naturelles du Burundi.....	10
1.2 Répartition des sols selon les régions naturelles et les provinces du Burundi.....	11
1.3 Définition sommaire des profils de sols rencontrés au Burundi.....	13
2. METHODOLOGIE.....	14
2.1 Protocole d'échantillonnage des sols	14
2.2 Analyse des échantillons de sol et établissement de la cartographie.....	15
3. RESULTATS ET DISCUSSION	16
3.1 Synthèse des résultats d'analyse.....	16
3.2 Cartographie du pH des sols.....	16
3.3 Cartographie de la saturation en acides.....	18
3.4 Cartographie de la fertilité des sols du Burundi	20
3.4.1 Carte de fertilité des sols en azote.....	20
3.4.2 Carte de fertilité des sols en phosphore	21
3.4.3 Carte de fertilité des sols en potassium.....	23
3.4.4 Carte de fertilité des sols en soufre.....	25
3.4.5 Carte de fertilité des sols en calcium.....	27
3.4.6 Carte de fertilité des sols en magnésium.....	28
3.4.7 Carte de fertilité des sols en zinc.....	31
3.4.8 Carte de fertilité des sols en cuivre.....	32
3.4.9 Carte de fertilité des sols en bore.....	34
4. CARTOGRAPHIE DES BESOINS EN NUTRIMENTS POUR CERTAINES CULTURES.....	35
4.1. Le maïs.....	35
4.1.1 Carte des besoins du maïs en azote.....	35
4.1.2 Carte des besoins du maïs en phosphore.....	36
4.1.3 Carte des besoins du maïs en potassium.....	37
4.1.4 Carte des besoins du maïs en soufre.....	38
4.1.5 Carte des besoins du maïs en magnésium.....	39
4.1.6 Carte des besoins du maïs en zinc.....	40
4.1.7 Carte des besoins du maïs en cuivre.....	41
4.1.8 Carte des besoins du maïs en bore.....	42
4.2. Le haricot.....	43
4.2.1 Carte des besoins du haricot en azote.....	43

4.2.2	Carte des besoins du haricot en phosphore.....	44
4.2.3	Carte des besoins du haricot en potassium.....	45
4.2.4	Carte des besoins du haricot en soufre.....	46
4.2.5	Carte des besoins du haricot en magnésium.....	47
4.2.6	Carte des besoins du haricot en zinc.....	48
4.2.7	Carte des besoins du haricot en cuivre.....	49
4.2.8	Carte des besoins du haricot en bore.....	50
4.3.	La pomme de terre.....	51
4.3.1	Carte des besoins de la pomme de terre en azote.....	51
4.3.2	Carte des besoins de la pomme de terre en phosphore.....	52
4.3.3	Carte des besoins de la pomme de terre en potassium.....	53
4.3.4	Carte des besoins de la pomme de terre en soufre.....	54
4.3.5	Carte des besoins de la pomme de terre en magnésium.....	55
4.3.6	Carte des besoins de la pomme de terre en zinc.....	56
4.3.7	Carte des besoins de la pomme de terre en cuivre.....	57
4.3.8	Carte des besoins de la pomme de terre en bore.....	58
4.4.	Le riz.....	59
4.4.1	Carte des besoins du riz en azote.....	59
4.4.2	Carte des besoins du riz en phosphore.....	60
4.4.3	Carte des besoins du riz en potassium.....	61
4.4.4	Carte des besoins du riz en soufre.....	62
4.4.5	Carte des besoins du riz en magnésium.....	63
4.4.6	Carte des besoins du riz en zinc.....	64
4.4.7	Carte des besoins du riz en cuivre.....	65
4.4.8	Carte des besoins du riz en bore.....	66
4.5.	Le blé.....	67
4.6.	Le manioc.....	67
4.6.1	Carte des besoins du manioc en azote.....	67
4.6.2	Carte des besoins du manioc en phosphore.....	68
4.6.3	Carte des besoins du manioc en potassium.....	69
4.6.4	Carte des besoins du manioc en soufre.....	70
4.6.5	Carte des besoins du manioc en magnésium.....	71
4.6.6	Carte des besoins du manioc en zinc.....	72
4.6.7	Carte des besoins du manioc en cuivre.....	73
4.6.8	Carte des besoins du manioc en bore.....	74
CONCLUSION.....		75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		76

ANNEXE : RESULTATS D'ANALYSE DES ECHANTILLONS DE SOLS DU BURUNDI

SIGLES ET ACRONYMES

ADN : Acide désoxyribonucléique

ARN : Acide ribonucléique

CaCO₃ : Carbonate de calcium

CAN : Calcium ammonium nitrate

CaO : Monoxyde de calcium

Ca(OH)₂ : Di hydroxyde de calcium

C.E.C : Capacité d'échange cationique

DFS : Direction de la Fertilisation des Sols

FAO : Food and Agriculture Organization

GIFS : Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols

IFDC : International Fertilizer Development Center

ISABU : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

K : Potassium

K₂O : Potasse

MINAGRIE : Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage

N : Azote

P : Phosphore

PAN-PNSEB : Projet d'Appui au Nouveau Programme National de Subvention des Engrais du Burundi

PH : Potentiel d'hydrogène

PNSEB : Programme National de Subvention des Engrais du Burundi

P₂O₅ : Phosphate

ppm : Partie par million

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les régions naturelles du Burundi.....	11
Tableau2 : Typologie des sols selon les régions naturelles du Burundi.....	11
Tableau 3 : Les profils des sols du Burundi.....	13
Tableau4 : Pourcentage des échantillons en dessous de la limite inférieure acceptable pour les principaux paramètres.....	15
Tableau 5 : Pourcentage des échantillons en dessous de la limite inférieure acceptable par culture pour les principaux paramètres.....	15

LISTE DES PHOTOS

Photo1 : Symptômes de carence en azote sur le maïs.....	20
Photo2 : Symptômes de carence en phosphore sur le maïs.....	21
Photo3 : Symptômes de carence en potassium sur le maïs.....	23
Photo4 : Symptômes de carence en soufre sur le riz.....	25
Photo5 : Symptômes de carence en calcium sur la canne à sucre.....	27
Photo5 : Symptômes de carence en magnésium sur le blé.....	29
Photo6 : Symptômes de carence en zinc sur le citronnier.....	32
Photo 7 : Symptômes de carence en cuivre sur le blé.....	32

LISTE DES CARTES

Carte1 : Les régions naturelles du Burundi.....	11
Carte2 : Le ph des sols.....	18
Carte3 : Pourcentage de saturation en acide.....	19
Carte4 : Fertilité des sols en phosphore.....	22
Carte5 : Fertilité des sols en potassium.....	24
Carte6 : Fertilité des sols en soufre.....	26
Carte7 : Fertilité des sols en calcium.....	28
Carte8 : Fertilité des sols en magnésium.....	30
Carte9 : Fertilité des sols en zinc.....	31
Carte 10 : Fertilité des sols en cuivre.....	33
Carte 11 : fertilité des sols en bore.....	34
Carte 12 : Besoins du maïs en azote.....	35
Carte 13 : Besoins du maïs en phosphore.....	36
Carte14 : Besoins du maïs en potassium.....	37
Carte 15 : Besoins du maïs en soufre.....	38
Carte 16 : Besoins du maïs en magnésium.....	39
carte17 : Besoins du maïs en zinc.....	40
Carte18 : Besoins du maïs en cuivre.....	41
Carte19 : Besoins du maïs en bore.....	42
Carte20 : Besoins du haricot en azote.....	43
Carte21 : Besoins du haricot en phosphore.....	44
Carte22 : Besoins du haricot en potassium.....	45
Carte23 : Besoins du haricot en soufre.....	46
Carte 24 : Besoins du haricot en magnésium.....	47
Carte25 : Besoins du haricot en zinc.....	48

Carte26 : Besoins du haricot en cuivre.....	49
Carte27 : Besoins du haricot en bore.....	50
Carte 28 : Besoins de la pomme de terre en azote.....	51
Carte29 : Besoins de la pomme de terre en phosphore.....	52
Carte 30 : Besoins de la pomme de terre en potassium.....	53
Carte31 : Besoins de la pomme de terre en soufre.....	54
Carte32 : Besoins de la pomme de terre en magnésium.....	55
Carte33 : Besoins de la pomme de terre en zinc.....	56
Carte 34 : Besoins de la pomme de terre en cuivre.....	57
Carte 35 : Besoins de la pomme de terre en bore.....	58
Carte 36 : Besoins du riz en azote.....	59
Carte37 : Besoins du riz en phosphore.....	60
Carte38 : Besoins du riz en potassium.....	61
Carte 39 : Besoins du riz en soufre.....	62
Carte 40 : Besoins du riz en magnésium.....	63
Carte41 : Besoins du riz en zinc.....	64
Carte42 : Besoins du riz en cuivre.....	65
Carte43 : Besoins du riz en bore.....	66
Carte 44 : Besoins du manioc en azote.....	67
Carte45 : Besoins du manioc en phosphore.....	68
Carte46 : Besoins du manioc en potassium.....	69
Carte47 : Besoins du manioc en soufre.....	70
Carte48 : Besoins du manioc en magnésium.....	71
Carte49 : Besoins du manioc en zinc.....	72
Carte50 : Besoins du manioc en cuivre.....	73
Carte51 : Besoins du manioc en bore.....	74

1. INTRODUCTION

Les plantes se nourrissent par absorption sélective des éléments nutritifs contenus dans le sol qui en est le réservoir. Ces éléments sont classés en éléments majeurs, en éléments secondaires et en oligo éléments.

Les éléments majeurs ou macro éléments ou éléments de base sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Ces éléments sont absorbés en grande quantité par les plantes et sont les constituants de la majeure partie des engrais chimiques trouvés sur le marché. Ils sont absorbés dans l'ordre des centaines de kilogrammes par hectare.

Les éléments secondaires sont le calcium (Ca), le soufre (S), le magnésium (Mg). Ils ne sont pas absorbés au même degré que les éléments primaires mais jouent un rôle important dans la croissance et la production végétale. Ils sont absorbés dans l'ordre de dizaines de kilogrammes par hectare.

Les oligo éléments sont le bore (B), le chlore (Cl), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo) et le zinc (Zn). Ces éléments sont absorbés en quantités très faibles, mais ils sont pourtant nécessaires, donc leur absence se manifeste par des symptômes de carence.

Le Burundi présente une diversité de sols selon les différentes régions naturelles. Néanmoins, la répartition des éléments nutritifs est très hétérogène si bien que certains sols sont fertiles, d'autres pauvres. Il est aussi nécessaire de comprendre que la présence d'un élément dans le sol ne signifie pas automatiquement qu'il soit facilement absorbé par la plante. Cela peut être conditionné par un équilibre entre les autres éléments nutritifs et les différentes réactions tendant à l'établir.

Ce document établit une cartographie actualisée de fertilité des sols pour les éléments nutritifs suivants : N, P, K, S, Ca, Mg, Zn, Cu et B. Il dégage également le pH du sol et le % de saturation en acides qui sont des facteurs influençant la disponibilité de ces éléments nutritifs.

Il montre aussi les quantités à apporter au sol pour satisfaire les besoins en ces éléments pour six des principales cultures vivrières sur lesquelles portent les expérimentations de fertilisation dans les régions naturelles du Burundi : le maïs, le haricot, le manioc, la pomme de terre, le riz et le blé.

Cette cartographie actualisée est un outil pour la formulation de nouvelles recommandations de fertilisation des sols du Burundi. Le protocole d'échantillonnage des sols, en des points géo référenciés répartis dans toutes les provinces et régions naturelles du pays, a été établi de façon à garantir la fiabilité des résultats d'analyse et des travaux de cartographie qui en ont suivi.

1.1. Les régions naturelles du Burundi.

Le Burundi est subdivisé en onze régions naturelles. Cette subdivision se fonde sur la topographie, la géologie, le climat, la flore et la faune. Ces régions sont présentées dans le tableau 1 et sur la carte1.



Carte1 : Les régions naturelles du Burundi

No	Régions	Superficie (ha)
1	Bugesera	195 973
2	Buragane	116 996
3	Bututsi	140 096
4	Buyenzi	210 463
5	Buyogoma	427 824
6	Bweru	238 217
7	Imbo	175 504
8	Kirimiro	275 785
9	Moso	286 547
10	Mugamba	246 576
11	Mumirwa	272 317
TOTAL		2 586 298

Tableau1 : Les régions naturelles du Burundi

Source : Contribution à la connaissance des régions naturelles du Burundi, ISABU, Juillet 1992

Les frontières entre ces régions naturelles font que certaines communes se retrouvent à cheval entre deux régions naturelles différentes. Les sols rencontrés dans ces régions naturelles sont différents mais peuvent présenter quelques ressemblances pédologiques les rapprochant sur le plan taxonomique.

1.2. Répartition des sols selon les régions naturelles et les provinces du Burundi

Tableau 2 : Typologie des sols selon les régions naturelles du Burundi

Régions	Provinces couvertes	Types de sols (classification INEAC)
Imbo	Bubanza Bujumbura Bururi Cibitoke Makamba	Sol brun hydro morphe (I) Argile noire tropicale (v) Hygroxéoferralsol (Y) Régosol (R) Hygroxéoferrisol sans horizon B ferralitique (U) Régogley salin (E)
Buragane	Makamba Rutana	Regogley (G) Hygroxéoferralsol (Y) Hygroxéoferrisol sans horizon B ferralitique (U) Lithoso (L)
Moso	Cankuzo Makamba Rutana Ruyigi	Hygroxéoferralsol (Y) Regogley (G) Lithosol (L) Hygroxéoferrisol sans horizon B ferralitique (U) Régosol (R)

Bweru	Karusi Kirundo Muyinga Ngozi	Hygroxéoferralsol (Y) Régogley (G) Régosol (R) Hygroxéoferralsol sans horizon B ferralitique (U)
Bugesera	Kirundo Muyinga	Régosol (R) Hygroxéoferralsol (Y) Hygroxéoferralsol à horizon B ferralitique (B) Sols organiques (O)
Mirwa	Bubanza Bujumbura Bururi Cibitoke Makamba Muramvya	Hygroxéoferralsol sans horizon B ferralitique (U) Régosol (R) Hygroferralsol (X) Ferralsol humifère (Z) Hygroxéoferralsol (Y) Hygroferralsol sans horizon B ferralitique (M) Hygroxéoferralsol à horizon B ferralitique (B)
Bututsi	Bururi Gitega Makamba Mwaro	Kaolisol humifère à horizon sombre (K) Hygroferralsol (X) Lithosol (L) Hygroferralsol sans horizon B ferralitique (M)
Mugamba	Bubanza Bujumbura Bururi Cibitoke Kayanza Muramvya Mwaro	ferralsol humifère (Z) ferralsol humifère sans horizon B humifère (W) Hygroferralsol sans horizon B ferralitique (M) Régosol (R) Lithosol (L) hygroferralsol à horizon B ferralitique (A) Hygroxéoferralsol à horizon B ferralitique (B) Kaolisol humifère à horizon sombre (K) Hygroferralsol (X)
Buyogoma	Cankuzo Gitega Karusi Rutana Ruyigi	Régoso (R) Lithosol (L) Hygroferralsol (X) Hygroxéoferralsol (Y) Hygroxéoferralsol sans horizon B ferralitique (U)
Buyenzi	Karusi Kayanza Ngozi	Hygroxéoferralsol sans horizon B ferralitique (U) Ferrisol humifère sans horizon B humifère (W) Hygroferralsol sans horizon B ferralitique (M) Hygroxéoferralsol à horizon B ferralitique (B) Hygroxéoferralsol (Y) Kaolisol humifère à horizon sombre (K)
Kirimiro	Gitega Karusi Kayanza Muramvya Mwaro Rutana	Hygroxéoferralsol sans horizon B ferralitique (U) Hygroxéoferralsol (Y) Hygroferralsol (X) Kaolisol humifère à horizon sombre (K) Hygroferralsol sans horizon B ferralitique (M)

Source : Carte des sols du Burundi, ISABU ,1998

1.3. Définition sommaire des profils de sols rencontrés au Burundi.

Tableau 3 : Les profils des sols du Burundi

Types de sols	Définition sommaire
Sols bruns hydro morphes (I)	Sols bruns ayant des traces d'hydromorphie avant 60cm de profondeur.
Argiles noires tropicales (V)	Sols à profil A-C développé dans des limons argileux très lourds à filiation basaltique, à drainage imparfait et caractérisé par la présence de nombreuses faces de glissement dans les horizons de profondeur, à très faible charge en profondeur.
Hygroxéroferralsols (Y)	Sols à profil A-B2c-C, ocre-rouge passant à rouge-brun foncé en profondeur, argileux lourd à très lourd, bien drainé, sans charge.
Régosols (R)	Sols à profil A/C, argilo-sableux à limon argileux lourd, développé sur schistes et envahi par une charge importante de débris schisteux
Hygroxéroferralsols sans horizon B ferrallitique (U)	Sols brun jaunâtres foncés devenant rouge jaunâtres en profondeur, limon argileux lourds, bien drainés, à profil A-Bs-C développé sur schistes.
Régogleys (G)	Sols à profil A-C à drainage imparfait, limoneux lourds, à structure faiblement développée, de couleur gris foncé, formé dans des dépôts alluvionnaires, sans charge
Lithosol (L)	Sols jaunes, limon argileux, à profil A/R, à contact lithique schisteux à 30cm, bien drainés, charge graveleuse hétérogène près de la surface (30% environ)
Hygroxéroferralsols à horizon B ferrallitique (B)	Ce sont des sols à profil A-B-C, rouge sombre, limon argileux très lourds à horizon B2 structurale (revêtements colorés, épais, discontinus), bien drainés, à faible charge graveleuse ferrugineuse en surface, absente en profondeur
Sols organiques (O)	Sols dont la teneur en matière organique, jusqu'à une profondeur de 50cm pour les sols hydromorphes non drainés et 30cm pour les autres, est supérieure à 30% dans les matériaux argileux et argilo-sableux, et supérieure à 20% dans les matériaux sableux et sablo-argileux
Hygroferralsols (X)	Critères de définition et de subdivision comparable aux ferralsols humifères; compte des sous groupes supplémentaires : humique et plinthique (présence de plinthite endéans les 2 m de profondeur)
Ferralsol humifères (Z)	Kaolisols humifères à profil A-B-C sombre ayant un horizon ferrallitique directement sous l'horizon A et une teneur en argile supérieure à 20% avant la profondeur de 1 m.
Hygroferralsols sans horizon B ferrallitique (M)	Ce sont des sols à profil A-B2s-C, à rapport limon/argile élevé, argileux (limoneux), de couleur brun foncé en surface et rougeâtre en profondeur, dérivé des roches micacées acides, bien drainé, à charge nulle

Source : Carte des sols du Burundi , ISABU ,1998

2. METHODOLOGIE

2.1 Protocole d'échantillonnage des sols

En vue de faire une cartographie actualisée de la fertilité des sols et de proposer de nouvelles formules de fertilisation des cultures, des prélèvements et des analyses des échantillons de sols ont été effectués aux points géo référenciés répartis dans toutes les provinces et régions naturelles.

a) Détermination du nombre d'échantillons.

Il a été identifié 54 sites représentatifs du pays en partant du nombre de régions naturelles, des différentes zones agro écologiques et des grands types de sols rencontrés.

Autour de chaque site, 4 à 6 collines de recensement bien dispersées ont été identifiées en tenant compte de la variabilité pédologique et de l'accessibilité. Sur chaque colline, 4 exploitations ont été retenues, réparties suivant les 4 points cardinaux par rapport au milieu de la colline. Au niveau de chaque exploitation, un échantillon composite a été prélevé.

Tous les sites, collines, sous-collines et exploitations ont été géo référenciés afin d'être utilisés dans l'établissement de la cartographie. Au total, 1039 échantillons ont été prélevés et géo référenciés.

b) Organisation du travail d'échantillonnage

Quatre équipes de cadres et de techniciens ont été constituées pour l'échantillonnage. Chaque équipe était formée de 3 personnes dont un chef d'équipe chargé de la coordination et de l'administration des finances. Ces cadres et techniciens provenaient de l'ISABU, de la Direction de la Fertilisation des Sols.

Avant de procéder à l'échantillonnage, un atelier de formation et d'harmonisation a été organisé à l'intention des équipes techniques sur les méthodes d'échantillonnage et d'utilisation des GPS et des Smartphones. L'atelier, qui a duré 3 jours, a été facilité par des spécialistes de la société kenyane Crop Nutrition Laboratory Services.

L'échantillonnage a été fait pendant une période de six semaines, allant du 6 mai au 15 juin 2013. Les agronomes communaux ont guidé les équipes techniques sur terrain pour le choix des agriculteurs et l'identification des parcelles représentatives pour une culture et une zone agro-écologique données.

c) Méthode d'échantillonnage de sol

Un échantillon composite a été prélevé dans chaque parcelle des exploitations retenues pour la cartographie et l'expérimentation de nouvelles formules de fertilisation des sols. L'échantillon composite a été obtenu à partir de 20 prélèvements pris en zigzag sur la parcelle et à une profondeur de 0 à 20 cm. Chaque échantillon était dupliqué pour en conserver une partie à l'ISABU en vue de pallier les pertes éventuelles pendant le transport ou les erreurs qui pouvaient survenir au cours des analyses.

Avant de faire les prélèvements, il fallait décaper la couche superficielle de matière organique. Des précautions ont été prises afin d'éviter de prendre un échantillon ou des prélèvements :

- sur des parcelles fertilisées depuis moins de 3-4 mois ;
- en bordure des parcelles ;

- sur les buttes ;
- sur les levées de fossés ou de cours d'eau ;
- aux endroits où il y a déjà eu des amas de déjections animales, de compost de ferme, de matières résiduelles fertilisantes ou de chaux ;
- aux abords de routes;
- dans les allées de ferme ;
- dans les endroits trop humides (bas fonds).

d) Le matériel utilisé lors de l'échantillonnage

- Les sondes pédologiques ;
- Les sachets qui ont été fournis par la société chargée de l'analyse des échantillons ;
- Les GPS et les smartphones ;
- Les bêches ;
- Les récipients pour réaliser le mélange composite.

e) Etiquetage des échantillons de sol

Les échantillons portaient des codes permettant d'identifier la région naturelle, le site, la colline, l'exploitation, la référence géographique, la culture, le technicien échantillonneur et la date d'échantillonnage.

2.2 Analyse des échantillons de sol et établissement de la cartographie.

Les analyses de sols, de même que la cartographie, ont été faites par la société kenyane spécialisée dans les analyses de sols et des plantes. Il s'agit de « Crop Nutrition Laboratory Services », qui dispose d'un appareillage spécial permettant d'effectuer rapidement des analyses multiples.

Les paramètres qui ont été analysés sont le pH, P, K, Ca, Mg, Mn, S, Cu, B, Zn, Na, Fe, C.E.C, Al, Si, Mo, etc. Les cartes ont été élaborées à partir des coordonnées géographiques des points de prélèvement des échantillons (latitude, longitude, altitude) et des résultats d'analyse.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Synthèse des résultats d'analyse

Tableau 4 : Pourcentage des échantillons en dessous de la limite inférieure acceptable pour les principaux paramètres

Paramètres	pH	P (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)	Ca (ppm)	S (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)	Zn (ppm)
Limite inférieure des paramètres	5	10	80	120	800	15	0,6	0,3	1,5
% d'échantillons en dessous de la limite	27	85	30	50	68	71	13	90	62

Le tableau montre que 27% des sols cultivés au Burundi ont un pH inférieur à 5. Ces sols nécessitent un chaulage. La majorité des sols sont aussi déficients en phosphore (85%), en bore (90%), en soufre (71%) et en zinc (62%). La moitié des sols présentent des carences en magnésium. Les sols carencés en potassium représentent 30% des échantillons. La carence en cuivre s'observe dans 13% des échantillons. La carence en calcium représente 68% des terres cultivées.

Tableau 5 : Pourcentage des échantillons en dessous de la limite inférieure acceptable par culture pour les principaux paramètres

Paramètres	pH	P (ppm)	K (ppm)	Mg (ppm)	S (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)	Zn (ppm)
Limite inférieure des paramètres	5	10	80	120	15	0,6	0,3	1,5
Haricot	19	83	43	40	80	8	86	58
Manioc	33	82	63	55	76	11	93	62
Maïs	29	86	26	58	67	15	91	67
Pomme de terre	54	98	63	80	34	30	100	79
Riz	8	94	73	17	67	15	90	48
Blé	46	88	33	71	38	42	100	71

Les cultures présentées dans ce tableau sont celles que les producteurs ont mis dans les parcelles expérimentales à la saison 2014A et B (pour le blé).

La pomme de terre et le blé sont cultivés dans des sols généralement acides, respectivement 54% et 46% des parcelles échantillonnées ont un pH inférieur à 5. Ces sols sont aussi carencés à 100 % en bore. La majorité des cultures sont cultivées sur des sols carencés en zinc, en phosphore, en soufre. La carence en cuivre existe mais n'est pas fréquente.

3.2 Cartographie du pH des sols

L'acidité des sols s'exprime en pH ou potentiel d'hydrogène. C'est la mesure de l'activité chimique des ions H⁺ en solution dans le sol. Les ions H⁺ libres expriment l'acidité active ou l'acidité réelle tandis que les ions liés au colloïde traduisent une acidité potentielle. Le pH < 7 est acide, il est

neutre à 7 et basique à une valeur > 7. En général, on considère que le sol est tampon ou neutre si le pH se situe entre 6.5 et 7.5.

Le degré d'acidité influence directement l'assimilabilité des éléments nutritifs par les plantes. Il joue ainsi un important rôle dans la nutrition, la croissance et la production des plantes. En principe, l'acidité du sol a les effets suivants:

- Elle rend les éléments nutritifs non disponibles pour la plante;
- Elle diminue l'absorption des éléments nutritifs par les racines;
- Elle augmente la solubilité de l'aluminium;
- Elle diminue l'activité des microorganismes dans le sol et par conséquent la vitesse de minéralisation;
- Elle freine la croissance des racines et perturbe l'absorption de l'eau

Les pH optimaux varient en fonction des types de sols et des cultures. Pour les sols lourds, le pH varierait entre 6.8 et 7.5. Pour les sols limoneux, les valeurs devraient osciller entre 6.2 et 6.8. Les sols légers auraient un pH de 5.2 à 6.3. Pour les sols organiques elles auraient un pH de 5.0 à 5.6. (Doucet, 2006.p.382).

La correction de l'acidité des sols se fait par des amendements. Le produit couramment utilisé est la chaux qui peut être vive (Ca O) ou éteinte Ca(OH)_2 . D'autres produits peuvent être utilisés comme la dolomie et le travertin.

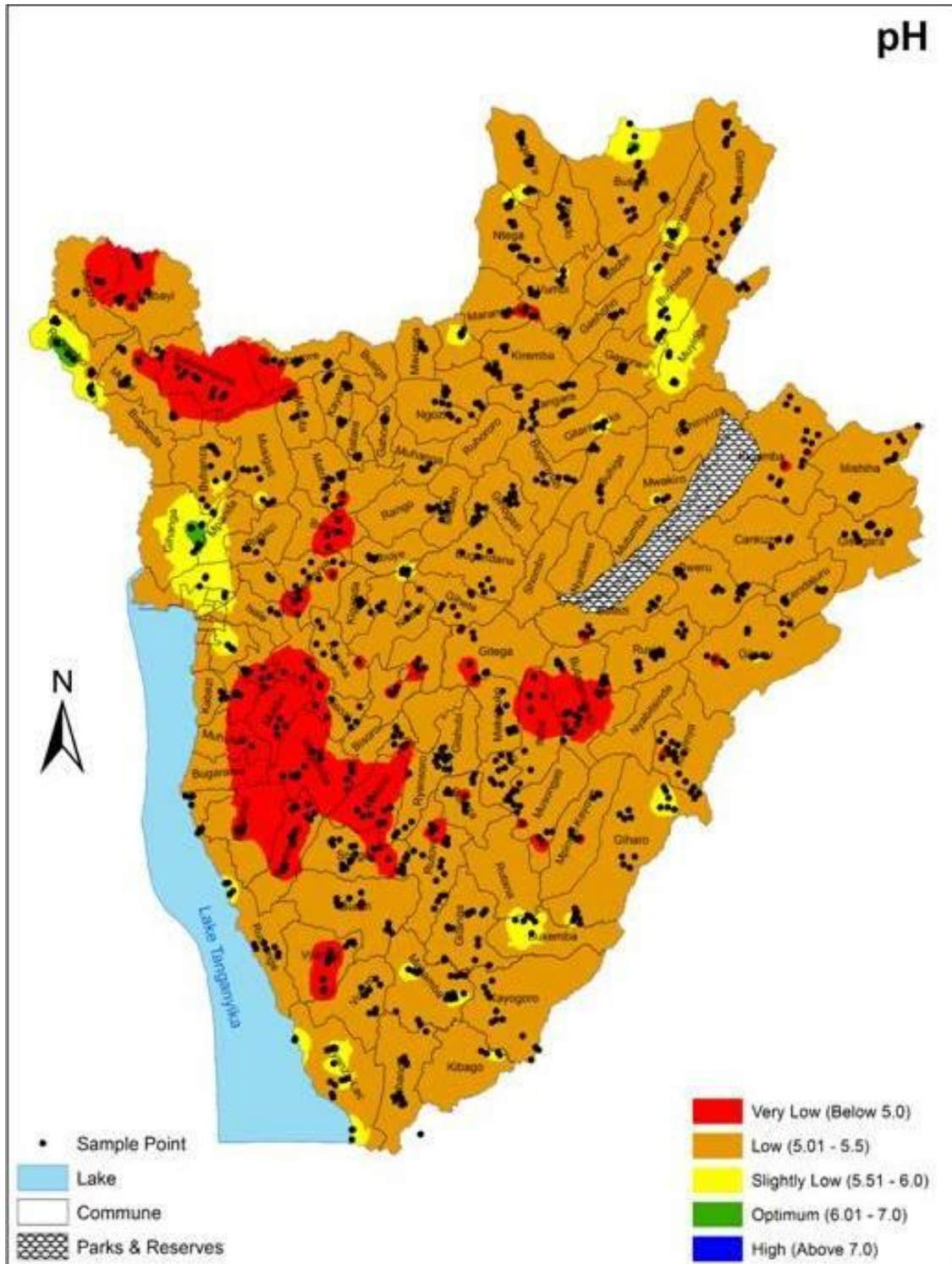
Un chaulage massif peut occasionner des déséquilibres d'assimilation de certains éléments nutritifs. Il est donc conseillé de chauler au moins deux semaines avant le semis ou la plantation.

Au Burundi, très peu de sols ont un pH optimal. Il est aussi rare de trouver des sols basiques ayant un pH >7. Comme on peut voir dans la carte ici-bas, la majorité des sols échantillonnés se retrouvent dans la zone de pH compris entre 5.01 et 5.5, ce qui est normal parce que les parcelles échantillonnées sont dans la strate sous cultures des exploitations.

Des cas de forte acidité ($\text{pH} < 5$) sont connus dans certaines régions du pays : Mugamba, Bututsi, Buyogoma, certains coins de Kirimiro etc. Il a été recommandé de recourir à l'amendement calcaire pour augmenter les productions. Le chaulage peut se faire en utilisant la formule :

$$\text{Besoins en chaux (tonnes/ha de Ca CO}_3\text{)} = 16 - 2.87 \times \text{pH}$$

Carte 1 : Le pH des sols Burundais

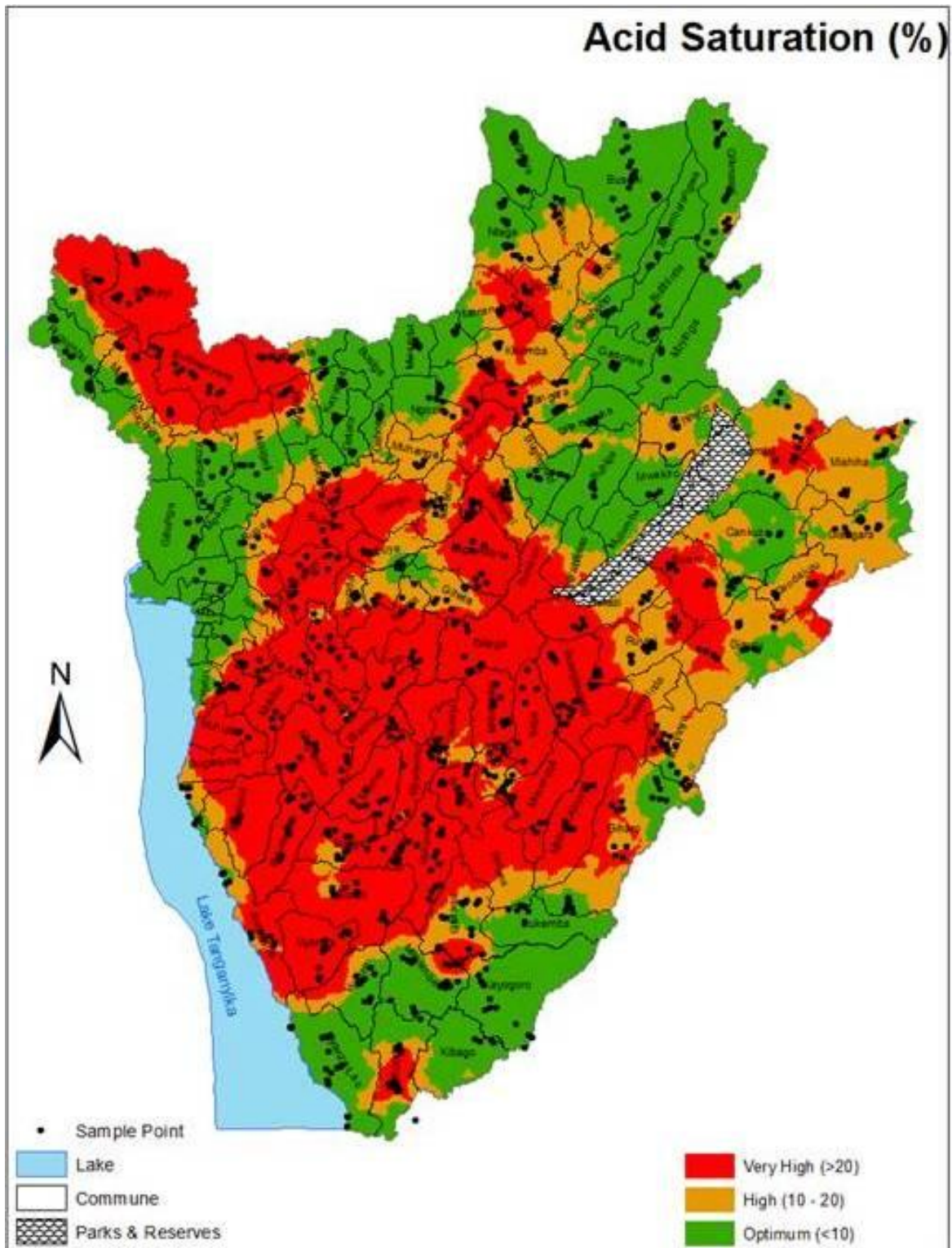


3.3 Cartographie de saturation en acides

Le taux de saturation en acides et le pH du sol sont liés et renseignent suffisamment sur la disponibilité des éléments nutritifs. Plus le sol est acide, plus la proportion des cations nutritifs

échangeables est faible, contrairement aux cations acides tels qu' Al^{3+} . Cette diminution est d'autant plus rapide que la capacité du sol à neutraliser les acides est faible.

Carte 2 : Pourcentage de saturation en acides



L'optimum de saturation en acide est une valeur inférieure à 10 %. Au Burundi, la très grande majorité de sols ont des valeurs supérieures à l'optimum. Ceci fait que la majorité des terres cultivées souffrent d'une grande saturation en ions acides, d'où la nécessité de procéder au chaulage.

3.4 Cartographie de la fertilité des sols Burundais

3.4.1 Carte de fertilité des sols en azote (N)

L'azote est un élément majeur très indispensable pour la vie des plantes. Il se retrouve à l'état libre dans l'air atmosphérique où il représente 80% mais aussi à l'état combiné sous forme minérale et organique. La forme minérale est à la base de l'alimentation de la plante tandis que la forme organique se retrouve dans les macromolécules comme les protéines. L'humus du sol contient un grand pourcentage d'azote.

L'azote est un facteur très important de la croissance et de la production végétale. Il intervient dans la synthèse des protéines, des acides nucléiques, de la chlorophylle, des alcaloïdes etc. C'est un élément de verdure et de vigueur des plants. Il intervient dans le métabolisme des plantes.

Les légumineuses ont la capacité de fixer l'azote atmosphérique et nécessitent peu de fertilisants azotés. Les autres plantes ne peuvent pas absorber la forme atmosphérique et n'utilisent que l'azote des fertilisants azotés.

Les principaux engrais azotés sont :

- Les engrais azotés organiques : non directement assimilables car ils nécessitent une minéralisation préalable. Ils sont utilisés comme engrais de fond.
- Les engrais ammoniacaux : ils nécessitent une nitrification, laquelle est fonction du climat et du travail du sol.
- Les engrais nitriques : ce sont des engrais à action rapide. L'apport peut être fractionné.

Les carences en azote se caractérisent par un jaunissement des feuilles et un retard de croissance. L'excès provoque une végétation excessive, un retard à la floraison et à la maturation. La teneur en sucre est faible et la plante devient sensible aux maladies. Les feuilles ont une chlorose.

Photo 1. Symptômes de carence en azote sur le maïs



N.B. Etant donné que les simples analyses d'échantillons de sols ne suffisent pas pour exprimer la disponibilité de l'azote et que la plus grande partie de l'azote est atmosphérique, la carte

pédologique de fertilité du sol en cet élément n'a pas été établie. Il y aura une carte des besoins en cet élément.

3.4.2 Carte de fertilité des sols en phosphore (P)

Le phosphore est aussi un élément important pour la croissance des plantes. Il compose les nucléoprotéines et les molécules tel que ARN et ADN, se retrouve dans les phospholipides comme les phytines. Il intervient dans le transport d'énergie, la photosynthèse, la transmission des caractères héréditaires, la respiration et le métabolisme cellulaire.

Cet élément agit sur différentes phases des plantes : la fécondation, la fructification et la maturation des fruits et des graines. C'est un facteur de précocité et de développement du système racinaire. Le stade de thalage des céréales est plus sensible aux carences en cet élément.

Le phosphore se retrouve dans le sol sous plusieurs formes :

- P_2O_5 insoluble : il s'agit de la forme d'apatite rétrograde des roches mères
- P_2O_5 peu soluble : se trouve dans les précipités
- P_2O_5 adsorbé : localisé sur les colloïdes du sol
- P_2O_5 soluble : forme directement assimilable par les plantes

Le phosphore est peu mobile dans le sol, le P_2O_5 ne doit pas être au delà de 2 mm de la racine pour permettre une bonne absorption.

Les engrais phosphatés sont :

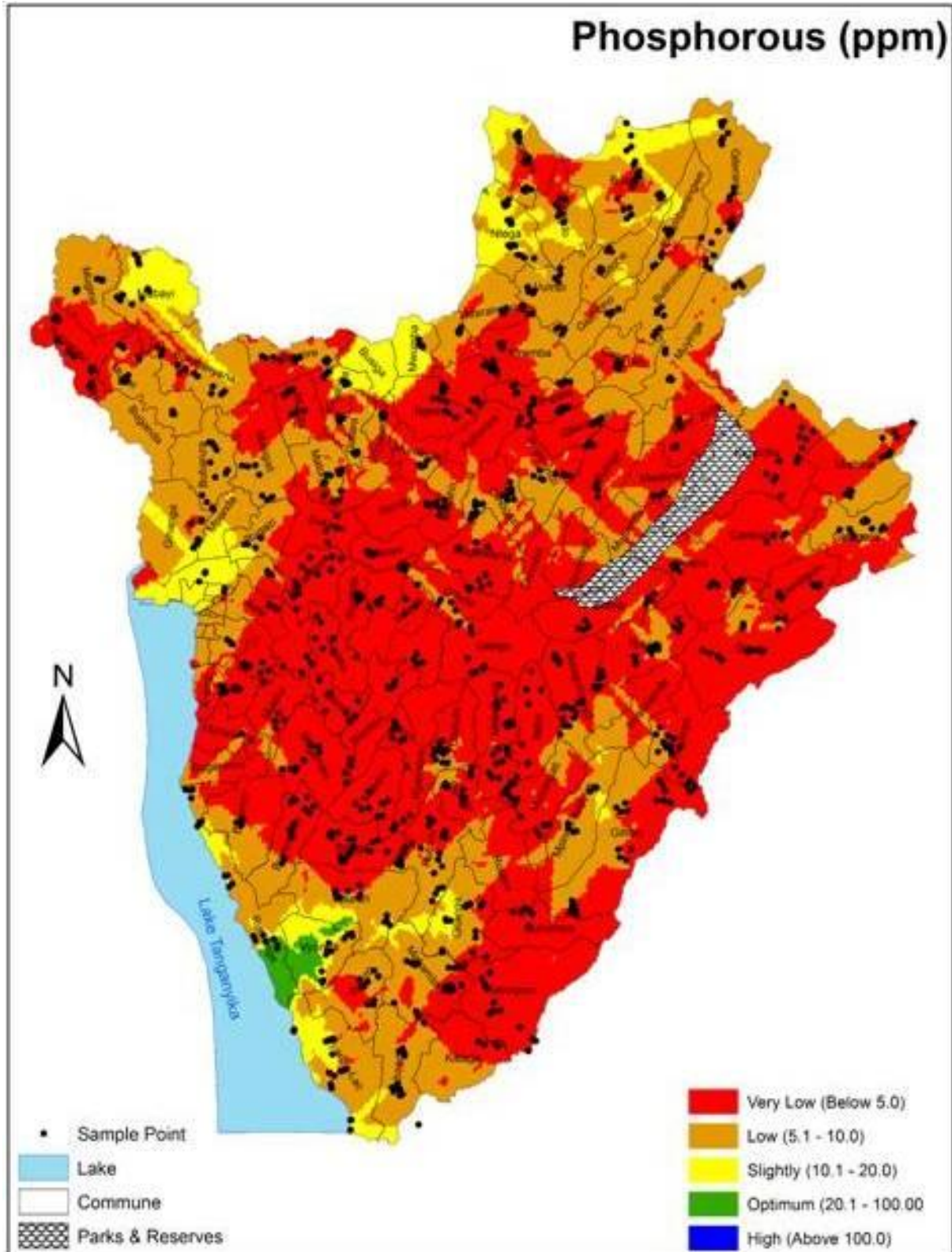
- Les phosphates naturels comme les apatites
- Les engrais chimiques : le TSP, le DAP, le MAP, etc.

Les symptômes de carence en phosphore se traduisent par la couleur anormale allant du vert-foncé au pourpre. La chlorose débute avec les feuilles plus âgées qui se dessèchent à partir des extrémités. Les racines et les tiges sont peu développées. Le tallage des céréales est réduit.

Photo2 : Symptômes de carence en phosphore sur le maïs



Carte 3 : Fertilité des sols en phosphore



La majeure partie des sols burundais n'atteint pas le niveau optimal de phosphore qui est de 20.1 à 100 ppm, elle a une teneur inférieure à 5 ppm (85% des sols burundais ont des carences en phosphore). Les engrais phosphatés doivent être apportés en quantité suffisante pour satisfaire les besoins des cultures.

3.4.3 Carte de fertilité des sols en potassium (K)

Cet élément nutritif joue plusieurs fonctions : il intervient dans la synthèse des hydrates de carbone et des protéines. Il favorise les réactions organiques vitales comme la photosynthèse.

Le potassium favorise la capacité de rétention d'eau par la plante, il active les enzymes et contrôle leur équilibre. Il améliore le goût des fruits et la teneur des tubercules et bulbes en réserves nutritives. C'est aussi un élément de résistance des plantes au gel, à la sécheresse, aux maladies, au stress, à la salinité, à la verse et au froid.

Il est recommandé pour les cultures comme le manioc, la pomme de terre, l'oignon et la canne à sucre. Les céréales sont moins exigeantes en potasse.

Le potassium se retrouve dans le sol sous forme :

- de minéraux argileux micacés, la sylvinite et kaïnite
- K_2O intermédiaire
- K_2O échangeable
- K_2O dissous dans la solution du sol

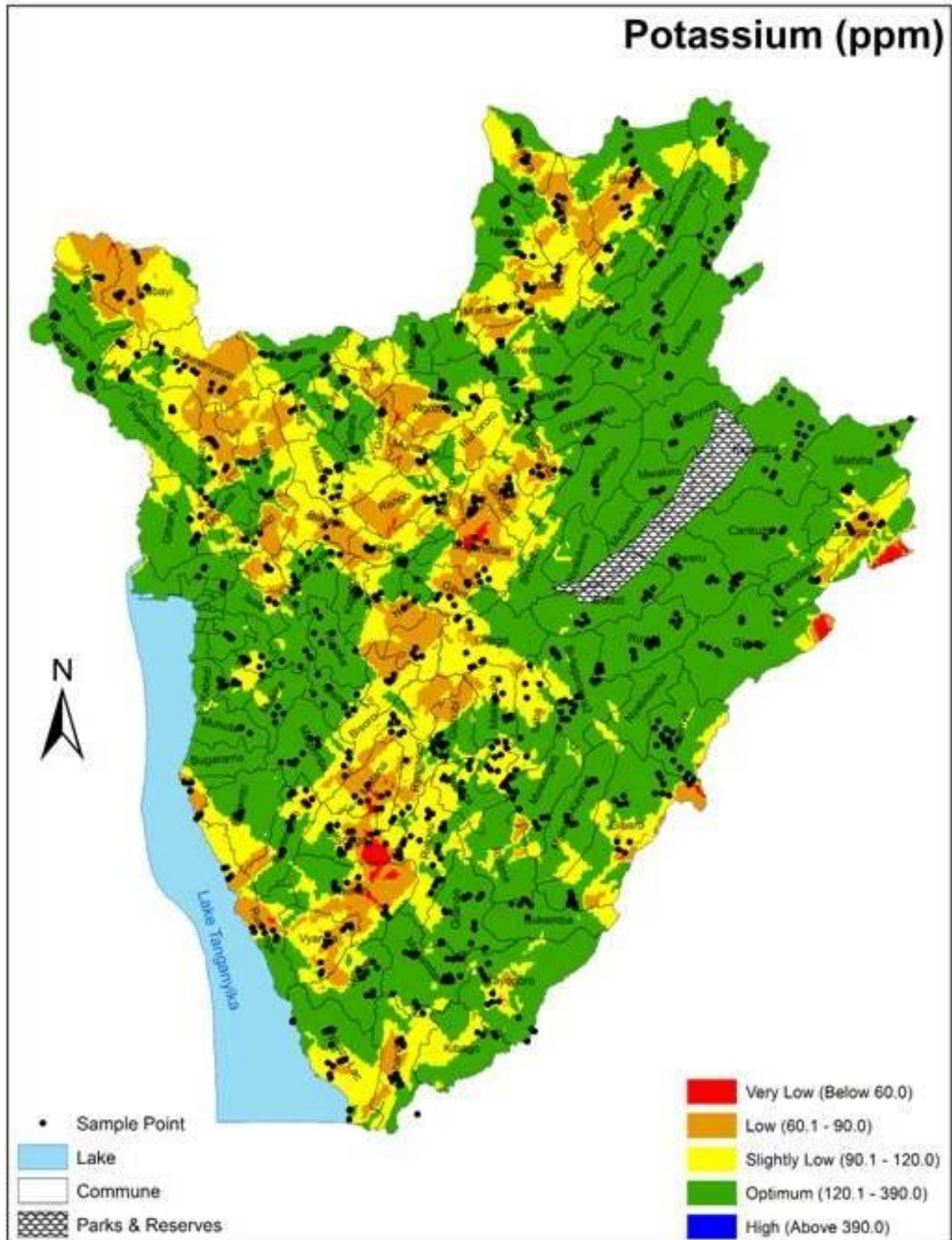
Les engrais minéraux potassiques sont par exemple le chlorure de potassium (KCl), la sylvinite et les sulfates de potasses.

En cas de carence en potassium, les plantes deviennent sensibles aux maladies et à la verse. L'absorption du calcium et du magnésium est perturbée.

Photo 3 : Symptômes de Carence en potassium sur le maïs



Carte 4 : Fertilité des sols en potassium



La plupart de sols burundais ont des valeurs optimales pour le potassium (120.1 à 390.1 ppm), sauf dans certains endroits de la commune Gihogazi, Giheta, Bisoro, Songa, Bururi et Vyanda. Il existe aussi des sols à valeurs basses ayant une ppm inférieure à 60.1., dans ces mêmes communes ci-haut citées.

Quoique les carences sont relativement faibles, il ne faudra pas négliger les apports de cet élément parce que tout éloignement de la zone optimale, petit qu'il soit, entraîne un déséquilibre minéral et des perturbations surtout pour les cultures qui en ont grandement besoin (exemple les tubercules).

3.4.4 Carte de fertilité des sols en soufre (S)

Le soufre entre dans la composition des acides aminés et des protéines. Il intervient dans la synthèse des enzymes et des vitamines. Il se retrouve surtout dans les feuilles et les parties vertes de la plante de part son rôle dans la photosynthèse.

Les sources de soufre sont en grande partie la minéralisation des réserves organiques, les pluies, les engrais sulfurés (sulfate de cuivre, sulfate d ammonium) et les engrais enrobés.

Les carences en soufre impliquent une baisse des protéines et des sucres. La croissance devient ralentie et le développement est faible. La chlorose est similaire à celle observée en cas de déficit azoté.

Photos 4 : Les symptômes de carence en soufre sur le riz

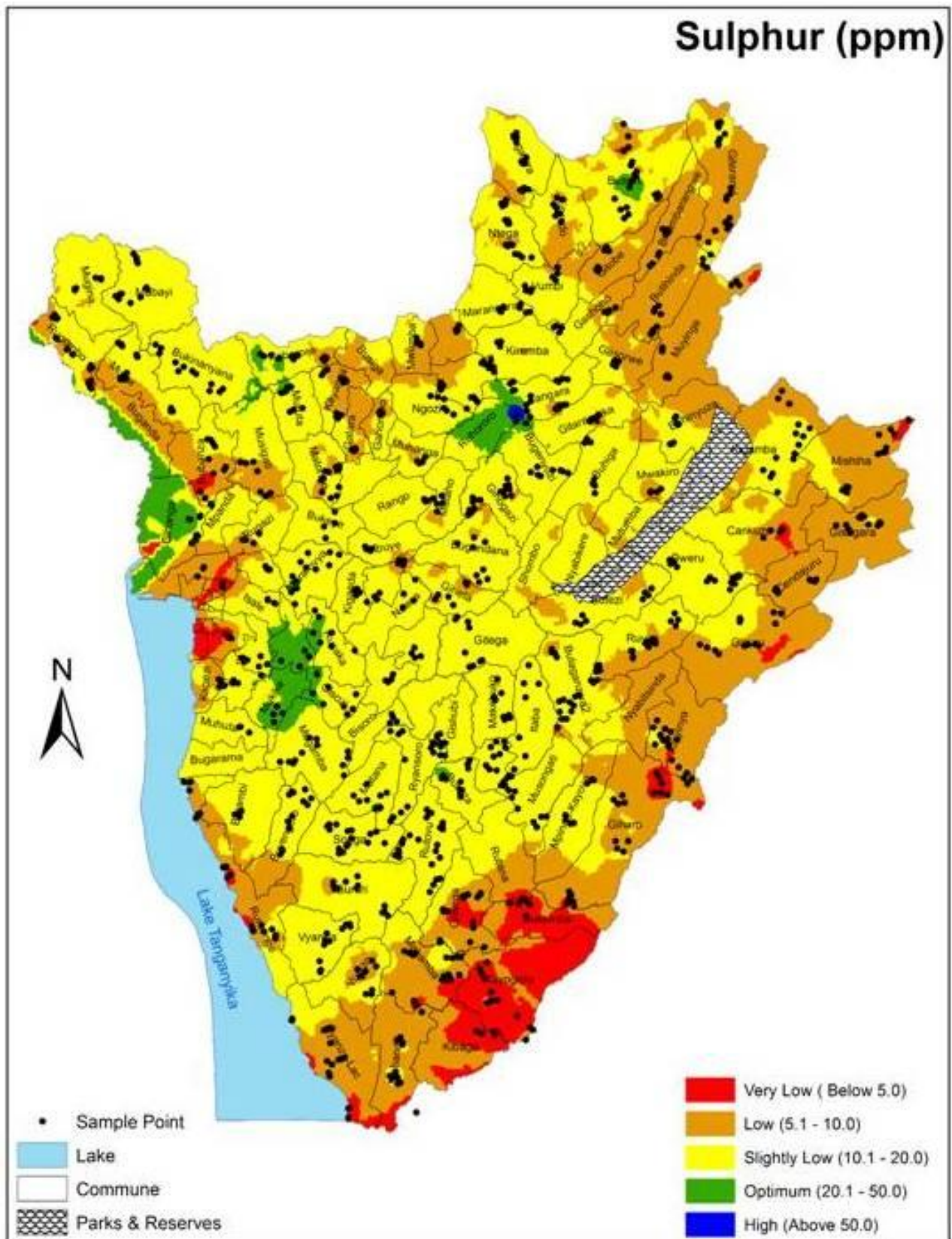


Le soufre atteint son seuil optimal dans la zone de 20.1 à 50.0 ppm.

Au Burundi, des cas de carences très prononcées se rencontrent dans certaines communes du pays : Makamba, Kibago, Kayogoro, Bukemba, Kinyinya, Cankuzo, Rumonge, Gihanga, Bubanza, etc.

La majorité des sols sont déficitaires en soufre (71%). Les engrais sulfurés couplés aux bonnes pratiques culturales pourraient être d'une grande utilité dans ces zones déficitaires.

Carte 5 : Fertilité des sols en soufre



3.4.5 Carte de fertilité des sols en calcium (Ca)

Le calcium joue un rôle prépondérant dans le mécanisme de perméabilité des parois cellulaires.

Il favorise la rigidité des tiges de la plante, l'élongation des méristèmes et la croissance des racines. Cet élément intervient dans la division cellulaire et le métabolisme de l'azote. Il accélère la maturation des fruits et des graines.

Les apports en calcium se font généralement sous forme d'amendements calcaires.

Les symptômes de carence sont un ralentissement de croissance. Les tiges deviennent molles et sensibles à la verse.

Photo 5 : Symptômes de carence en calcium sur la canne à sucre



Le calcium est optimal pour des valeurs de 800.1 à 2000.0 ppm.

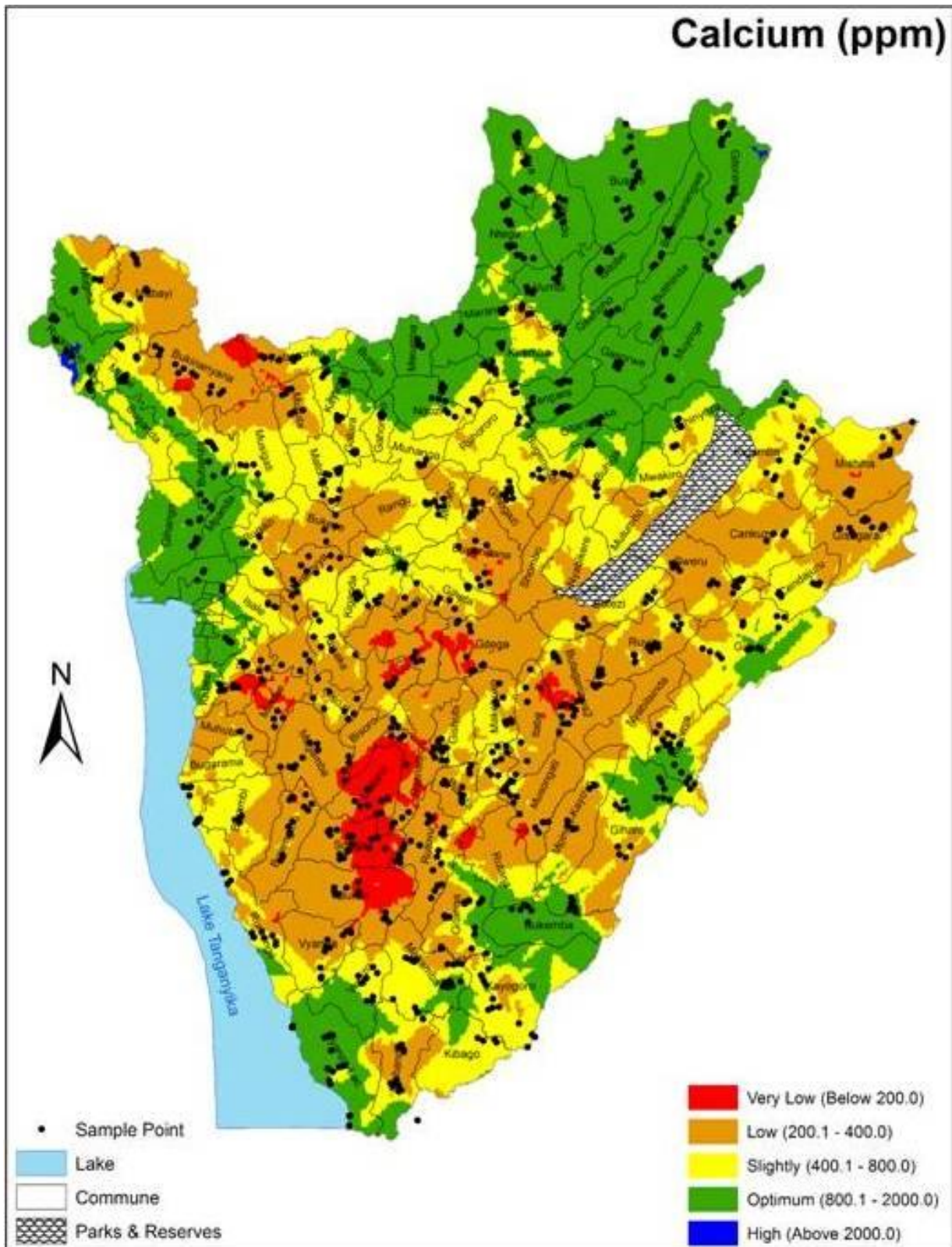
Les régions du nord-est, le nord du Mumirwa, la plaine de l'Imbo-nord et de Nyanza-Lac, la zone de Bukemba et quelques poches de Giharo, Kinyinya et Gisuru présentent des valeurs optimales.

Il est déficitaire dans les autres parties du pays avec des valeurs extrêmement faibles dans les communes de Bururi, Songa et Matana et autres coins du Kirimiro (valeurs inférieures à 200.0 ppm).

Les amendements calcaires en ces zones permettront de redresser et pallier cette situation en vue d'une bonne production agricole. La pratique du chaulage pour réduire l'acidité des sols enrichit au même temps le sol de sa dotation en cet élément indispensable pour la croissance et la santé des plantes.

Certains engrais contiennent aussi du calcium. En particulier, le recours à l'utilisation du CAN (calcium ammonium nitrate) en substitution de l'urée serait à conseiller dans les zones où les sols sont caractérisés par la carence en calcium.

Carte 6 : Fertilité des sols en calcium



3.4.6 Carte de fertilité des sols en magnésium (Mg)

Pour la plante, le magnésium est un constituant de la chlorophylle, il intervient dans la photosynthèse et donne une pigmentation verte de la plante. Il favorise l'absorption du phosphore.

Il est constituant des protéines et des vitamines, intervient dans les réactions enzymatiques de transport d'énergie dans la plante.

Le magnésium, avec le calcium et d'autres cations, participe dans les échanges cellulaires de la plante et lui confère une structure favorable aux principales fonctions vitales.

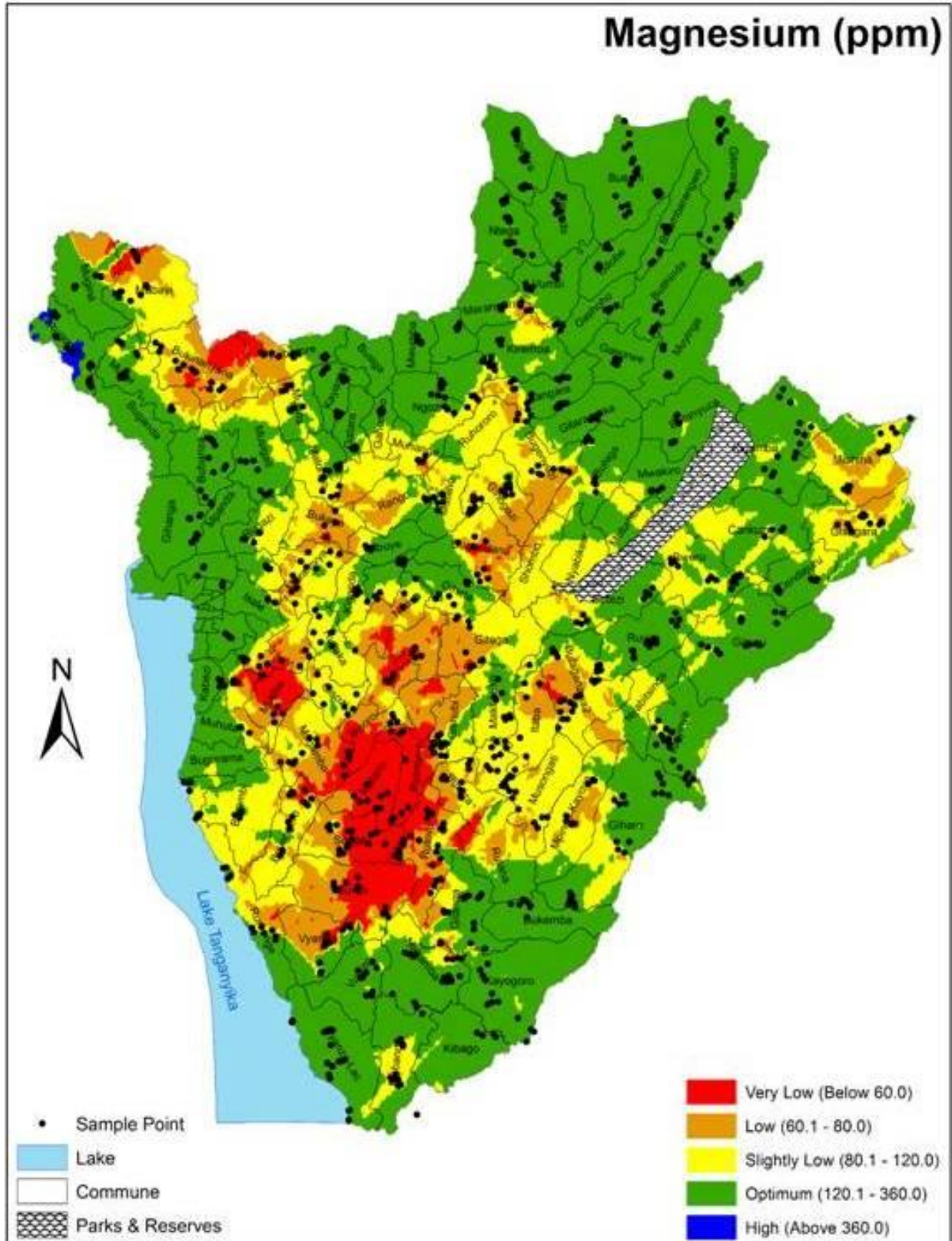
Le magnésium du sol provient des minéraux du sol, du fumier, des engrais (scories Thomas, Patente carie, etc.) et des amendements magnésiens.

Les symptômes de carence sont le nanisme des plantes, la chute prématurée des feuilles, la chlorose des feuilles et l'apparition des taches de couleur foncée.

Photo 6 : Symptômes de carence en magnésium su le blé



Carte 7 : Fertilité des sols en magnésium



Au Burundi, les teneurs en Mg suivent celles du Ca mais avec beaucoup de zones à valeurs optimales. Cependant, la moitié des sols présentent des carences en magnésium. Les déficits en magnésium sont particulièrement marqués vers Ryansoro, Rutovu, Matana, Bisoro, Songa, Bururi, la région du