



**INDICATEURS DE QUALITE DE SITE
POUR L'ERABLE A SUCRE.**

Par

Philippe Nolet, B.Sc., M.Sc.

Issifi Boureima, B.Sc., M.Sc.

Remis à

Pierre Labrecque ing. f.

Commission régionale sur les ressources naturelles de la
Conférence régionale des élus de l'Outaouais

Septembre 2009



Institut québécois d'Aménagement
de la Forêt feuillue

Équipe de réalisation de l'IQAFF*

Responsables scientifiques

Philippe Nolet, B.Sc., M.Sc.

Issifi Boureima, B.Sc., M.Sc.

Équipe technique :

Daniel Bouffard, M.Sc.

Régis Pouliot

Julie Poirier

Natalie Rojas

*IQAFF : Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue

58 Principale, Ripon, Québec, J0V 1V0

Tél : 819-983-6589 ; Fax : 819-983-6588

Courriel : iqaff@iqaff.qc.ca

Site internet : www.iqaff.qc.ca

Pour citation :

Nolet, P et I. Boureima. 2009. Indicateurs de qualité de site pour l'érable à sucre. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. Rapport Scientifique, 34 p. + annexes

Remerciements

Nous tenons à remercier Daniel Bouffard, Régis Pouliot et Julie Poirier pour tous les efforts investis lors des inventaires terrains ainsi qu'à Natalie Rojas pour son dévouement lors de l'étude dendrochronologique des échantillons.

Ce projet a été financé par la conférence régionale des élus de l'Outaouais.

Résumé

Bon nombre de forestiers émettent l'hypothèse que la coupe de jardinage est peut-être appliquée sur des sites peu productifs pour l'érable à sucre. Au Québec où un grand nombre de dispositifs à long terme ont été installés, les différences de rendement observées entre les dispositifs n'ont d'ailleurs pas été mises en relation avec les caractéristiques de site. Le but principal de ce projet était de distinguer les variables qui permettent de d'établir la qualité de site pour l'érable à sucre pour identifier les sites peu favorables à la production de l'érable à sucre. Nous avons opté pour une approche qui vise à identifier les sites qui permettent de produire des érables de haute valeur et de soutenir la croissance d'érables de 40 cm. Nous avons échantillonné 59 peuplements dominés par l'érable à sucre qui avaient été jardinés en 1997 ou 1998. Dans chaque peuplement, nous avons identifié aléatoirement 7 érables à sucre de 40 cm de diamètre. Pour chacun de ces arbres, nous avons évalué la hauteur, la croissance des 20 dernières années et la longueur du bois blanc. Nous avons aussi évalué une série de variables écologiques. Aucune variable ne permet, à elle seule, de bien circonscrire les sites pauvres. Toutefois, avec certaines combinaisons de variables, il est possible d'identifier diverses conditions qui défavorisent l'érable à sucre. Le pH, l'azote total, le calcium, la hauteur des arbres, l'altitude et l'épaisseur des dépôts sont les variables les plus intéressantes pour discriminer les mauvais sites ou parfois les bons sites. Nous avons aussi observé qu'environ les 2/3 de nos peuplements ont observé une diminution de croissance après la coupe de jardinage. Cette proportion est plus grande chez les peuplements ayant un $\text{pH} < 4.4$. Nous proposons que de nouvelles données soient prises lors des inventaires d'intervention ou de prospection afin de préciser la qualité de station. Enfin, nous estimons qu'il

est essentiel qu'un dispositif de recherche à long terme soit mis en place en Outaouais afin de quantifier les différences de rendement de la coupe de jardinage en fonction diverses qualités de site.

Table des matières

Équipe de réalisation de l'IQAFF	ii
Remerciements	iii
Résumé	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Introduction	1
Approche	4
Méthodologie	5
Inventaire.....	5
Mesure en laboratoire.....	6
Analyses statistiques	9
Résultats et discussion.....	14
Discussion générale.....	28
Conclusion.....	31
Références	33
Annexe 1 : Graphiques ayant servi à l'analyse visuelle pour l'ICQS.....	1
Annexe 2 : Graphiques ayant servi à l'analyse visuelle pour la croissance	21
Annexe 3 : Graphiques ayant servi à l'analyse visuelle pour le bois blanc	41

Liste des tableaux

Tableau 1: Description sommaire de variables échantillonnées	8
Tableau 2: Corrélations de Spearman entre les différentes variables étudiées	16
Tableau 3 : Résumé des analyses de régression multiples	17
Tableau 4 : Effet du pH sur la réponse des peuplements au jardinage.....	27
Tableau 5: Seuils, avantages et désavantages associés aux différentes combinaisons de facteurs indicatrices de potentiel de site faible.	29

Liste des figures

Figure 1 : Résumé de l'approche d'analyse choisie.....	13
Figure 2: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir du pH, de l'azote total et de la hauteur.....	19
Figure 3: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir du calcium, de l'azote total et de la hauteur.	21
Figure 4: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir de l'élévation, du pH et de la hauteur.....	22
Figure 5: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir de l'élévation, de l'épaisseur du dépôt et de la hauteur.	23
Figure 6: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir de l'élévation, de la hauteur de la première branche et de la hauteur.....	24
Figure 7: Identification des sites à faible potentiel (croissance) à partir du pH, du calcium et de la hauteur.....	25
Figure 8 : Identification des sites à faible potentiel (bois blanc) à partir de l'élévation, de la hauteur de la première branche et de la hauteur.....	26

Introduction

La coupe de jardinage est un traitement sylvicole populaire à peu près partout sur l'aire de distribution de l'érable à sucre, notamment au Québec (Bédard et Majcen 2001, Forget *et al.* 2007), en Ontario (OMNR 2004) et dans le Nord-est américain (Strong 1992; Niese et Strong 1992). Ce traitement a d'ailleurs fait l'objet d'un grand nombre de publications scientifiques. Au Québec, la coupe de jardinage est le traitement sylvicole le plus utilisé en forêt feuillue publique depuis le début des années 1990. Les rendements attendus associés à ce traitement sont basés en partie sur les dispositifs expérimentaux de la Direction de la Recherche Forestière (DRF) (Majcen, 1995; Bédard et Majcen 2001). Après plus de 10 ans d'utilisation à grande échelle de ce traitement, Bédard et Brassard (2002) déposaient un rapport, basé sur des données provenant du réseau des effets réels, indiquant que la mortalité 5 ans après jardinage en forêt publique québécoise est approximativement 2 fois plus élevée que dans les dispositifs expérimentaux de la DRF. (Nolet et Bouffard 2005) montrent aussi que la mortalité annule l'accroissement brut 10 ans après jardinage dans la région des Laurentides. Quelques années plus tard, un autre rapport de la DRF (Bédard *et al.* 2004) vient confirmer les résultats inquiétants de Bédard et Brassard (2002). Suite à ce constat, le MRNF propose une nouvelle classification des tiges afin de resserrer l'application de la coupe de jardinage en forêt publique. Depuis ce temps, une étude de (Nolet *et al.* 2007) a démontré que cette nouvelle classification ne permettait pas de prédire avec succès la mortalité observée. Aujourd'hui, bon nombre de forestiers émettent l'hypothèse que la coupe de jardinage est peut-être appliquée sur des sites finalement peu productifs pour l'érable à sucre.

Forget et al (2007) ont identifié un grand nombre d'études portant sur le jardinage et ont observé une grande variabilité de la productivité suite à ce traitement. Bien entendu, cette variabilité peut s'expliquer en partie par les caractéristiques des peuplements résiduels et par l'étendue l'effet de la qualité de site sur la productivité après jardinage. Même au Québec où un grand nombre de dispositifs à long terme ont été installés (Bédard *et al.* 2004), les différences de productivité observées n'ont pas été mises en relation avec les caractéristiques de site. Il semble donc que l'on ait pris pour acquis que les peuplements dominés par l'ERS sont riches et peuvent bien répondre à la coupe de jardinage.

Whitney (1987) et Nolet *et al.* (2001) ont démontré que l'érable à sucre a profité des perturbations anthropiques depuis l'arrivée des européens pour coloniser des sites qui lui étaient moins propices. De plus, un très grand nombre d'études ont mis en relation la richesse des sites avec la santé des érablières (Duchesne *et al.* 2002, Sharpe 2002). La teneur en calcium, en aluminium, le pH et l'épaisseur des dépôts de surface sont parmi les facteurs écologiques que l'on a associés à la santé des érablières. À ce jour, il demeure malgré tout que ces recherches n'ont pas amené les chercheurs en sylviculture à se questionner si les effets des coupes de jardinage diffèrent selon la qualité de site.

Cet état de fait s'explique probablement par la difficulté à établir de façon **objective** un indice de qualité de site en forêt feuillue dominées par l'ERS. En effet, la qualité de site est souvent établie à partir de la hauteur des tiges à un âge donné (souvent 50 ans). Cet indice de qualité de site (IQS₅₀) est plutôt utilisé dans les peuplements équiennes. Or souvent, les

peuplements dominés par l'érable à sucre sont des peuplements inéquiennes, ce qui rend inefficace un tel indice puisque les arbres d'un peuplement inéquienne peuvent avoir passé par un grand nombre d'à-coups de croissance. Plusieurs études dans le nord-est américain ont mis en relation la qualité de site avec des plantes indicatrices pour les forêts dominées par l'érable à sucre (Horsley *et al.* 2008). L'utilisation des plantes indicatrices, bien qu'intéressante à certains égards, comporte certaines lacunes¹.

Par ailleurs, en forêt feuillue dominée par l'ERS, ce n'est pas seulement la productivité qui intéresse le sylviculteur, mais aussi la production de tiges de haute valeur pour le sciage et le déroulage. Ainsi, idéalement, un indice de qualité de site serait indicateur du potentiel du site à faire croître l'érable rapidement, mais aussi en qualité (externe et interne).

Le but principal de ce projet est de distinguer les variables qui permettent de d'établir la qualité de site pour l'érable à sucre. Plus précisément, les forestiers de l'Outaouais se demandent comment on peut établir de façon objective si un site est peu favorable à la production rapide et de qualité de l'érable à sucre. Une fois ces sites identifiés, il est probable qu'on y effectue une sylviculture qui demande moins d'efforts que la coupe de jardinage traditionnelle ou que si on y effectue une coupe de jardinage, les rendements espérés y seront moins élevés.

¹ Les plantes ne sont présentes qu'une partie de la saison et ne peuvent pas toujours être inventoriées. Bien que la présence d'une plante puisse être indicatrice d'une richesse x, son absence ne signifie à peu près rien. Enfin, les plantes indicatrices ont rarement été mises directement en relation avec des données de productivité (e.g. la croissance).

Approche

Dans un monde idéal, la présente étude aurait été basée sur l'évaluation de la productivité après coupe de jardinage sur une variété de sites afin de mettre la réponse au jardinage en relation avec divers facteurs écologiques. D'une part, le manque de données précises (avant et après traitement) constitue une limite majeure à l'utilisation d'une telle approche. Une telle approche aurait aussi nécessité que l'on ait accès à de très grandes placettes-échantillons (e.g. ½ à 1 hectare) pour diminuer le bruit occasionné par la mortalité dans les analyses statistiques; or, nous ne disposons pas de telles placettes-échantillons. Une approche dendrochronologique, telle qu'utilisée par Forget et al (2007), a aussi été envisagée. Toutefois, l'impossibilité de quantifier de façon exacte la mortalité et l'absence précise de données pré- et post-traitement auraient limité le pouvoir d'une telle approche. Ainsi, l'utilisation d'une approche dendrochronologique aurait nécessité l'utilisation de placettes-échantillons, à la fois très grandes et très nombreuses, afin d'être en mesure de quantifier l'effet de facteurs écologiques sur la réponse des érablières au jardinage. Une telle étude aurait nécessité des sommes bien plus importantes que celles investies dans le présent projet.

Nous avons donc opté pour une approche qui vise à simplifier la question. Quels sont les sites qui permettent de produire des érables de haute valeur et de soutenir la croissance d'érables de 40 cm de DHP? Cette classe DHP a été choisi pour diverses raisons². Il faut toutefois comprendre que le

² On remarque une mortalité plus élevée de l'ERS à partir de ce DHP (Nolet *et al.* 2007). Ainsi, 40 cm nous apparaît un diamètre intéressant à partir duquel on peut distinguer l'effet des variables écologiques sur la croissance de l'érable à sucre. Par ailleurs, à 40 cm, les érables ont souvent l'étage des dominants dans nos forêts, là où leur croissance en hauteur risque moins

plus important était de comparer des arbres de DHP similaires provenant de plusieurs sites. Afin de caractériser la production soutenue d'érable de 40 cm, nous avons opté pour 3 variables :

1. la croissance en diamètre qui fournit une mesure de la capacité production du site;
2. la hauteur de l'arbre qui fournit aussi une mesure de la capacité de production;
3. l'épaisseur du bois blanc qui fournit une mesure de la capacité du site à produire de l'érable à sucre de qualité.

Nous sommes conscients que ces variables sont toutes trois influencées non seulement par la qualité de site, mais aussi par l'historique des peuplements et de la croissance des tiges échantillonnées. Par le fait même, une variabilité (impossible à quantifier) due à cet historique est attendue dans nos analyses statistiques. C'est par la quantité de sites échantillonnés que nous croyons être en mesure de distinguer les variables importantes pour les érabières de l'Outaouais.

Méthodologie

Inventaire

Nous avons échantillonné, dans l'UAF 72-51, 59 peuplements (donc 59 parcelles) dominés par l'érable à sucre qui avaient été jardinés en 1997 ou 1998. Nous avons volontairement visité des peuplements aux conditions variées (position, force sur la pente et orientation). Dans chaque

d'être ralenti par la compétition. Nous croyons qu'à ce diamètre, les arbres auront atteint **près** de leur hauteur maximale, qui est reconnue comme étant indicatrice de qualité de site. Ainsi, prendre des arbres de 40 cm, nous permet d'utiliser la hauteur des arbres comme indicateur de qualité de site.

peuplement, nous avons identifié aléatoirement 7 érables à sucre de 40 cm de diamètre (entre 38 et 42 cm). Pour chacun de ces arbres, nous avons noté le DHP exact, la hauteur à l'aide d'un Vertex, la hauteur de la première branche, l'épaisseur de l'horizon LFH, l'épaisseur de l'horizon (lorsque présent), le pourcentage de dépérissement évalué visuellement, la surface terrière en hêtre à l'aide d'un prisme facteur 2, l'épaisseur du dépôt et le pourcentage d'affleurement évalué visuellement. Aussi, nous avons pris 2 échantillons de sol dans l'horizon A à proximité de chacun des arbres étudiés afin de déterminer le pH et la teneur en divers éléments nutritifs. L'altitude de chaque peuplement a été déterminée à l'aide d'un modèle d'élévation numérique. Finalement, nous avons récolté une carotte sur chacun de ces arbres afin de déterminer la croissance avant et après jardinage et aussi pour mesurer la longueur radiale de bois blanc pour chacune des tiges.

Nous tenons à mettre de l'avant une particularité importante de la variable hauteur. En effet, cette variable peut à la fois être considérée comme variable dépendante ou indépendante. D'abord, elle est un bon indicateur de qualité de site (c'est pourquoi l'IQS est si souvent utilisé) et c'est aussi une variable que l'on chercherait à optimiser (comme la croissance diamétrale et la longueur du bois blanc) parce que la valeur d'une tige (ou d'un peuplement) est directement liée à sa hauteur. Ainsi, à certains moments jugés opportuns, nous utiliserons la hauteur comme variable indépendante. De plus, la hauteur est facilement mesurable sur le terrain, ce qui représente un aspect important d'une variable indicatrice. Un résumé des variables amassées et analysées est présenté au tableau 1.

Mesure en laboratoire

Les carottes prélevées sur les tiges d'érable ont d'abord été séchées à l'air libre, puis collées à des languettes de bois avant d'être sablées, en trois étapes, avec du papier abrasif aux dimensions suivantes: 150 grains/po², 400 grains/po² et 600 grains/po². L'évaluation de la largeur des cernes de chacune des 20 dernières années de croissance a été effectuée à l'aide d'un stéréo-microscope Leica MZ12s (40 x) couplé à une table de numérisation électronique Velmex d'une précision de 10 microns.

Tableau 1: Description sommaire de variables échantillonnées

Variable	Appellation ou abréviation utilisée	Unités	Classes utilisées	Méthode d'inventaire
Croissance radiale moyenne des dernières années	Croissance	mm/an	n.a.	1 carotte par arbre échantillon
Hauteur moyenne des érables	Hauteur	m	n.a.	Sur chaque arbre échantillon
Longueur du bois blanc	Bois blanc	mm	n.a.	Sur chaque carotte
Épaisseur du dépôt	Épaisseur du dépôt	cm	1 : moins de 25 cm; 2 : entre 25 et 50 cm; 3 : entre 50 cm et 1 m ; 4 : plus d'un mètre	Évalué à côté de chaque arbre échantillon
Élévation	Élévation	m	n.a.	Évalué par un modèle d'élévation numérique
Hauteur de la première branche	Hauteur première branche	m	n.a.	Sur chaque arbre échantillon
pH	pH	Log (mol/l H)	n.a.	ibid ³
Azote total	Azote	mg/g	n.a.	ibid
Calcium	Calcium	mg/g	n.a.	ibid
Carbone	Carbone	mg/g	n.a.	ibid
Ratio carbone/azote	C/N	ratio	n.a.	ibid
Magnésium	Magnésium	mg/g	n.a.	ibid
Sodium	Sodium	mg/g	n.a.	ibid
Potassium	Potassium	mg/g	n.a.	ibid
Pourcentage de dépérissement	Pct dépérissement	n.a.	n.a.	Sur chaque arbre échantillon
Pourcentage d'affleurement rocheux	Pct affleurement rocheux	n.a.	n.a.	Évalué à côté de chaque arbre échantillon
La surface terrière en hêtre	STHEG	m ² /ha		Autour de chaque arbre échantillon
Épaisseur de l'horizon LFH	LFH	mm	n.a.	Évalué à côté de chaque arbre échantillon

³ Échantillons recueillis à côté de chaque arbre échantillon puis mélangés pour la parcelle. Ainsi, une seule analyse en laboratoire par parcelle

Pour les analyses de sol, le pH, le ratio C/N et la concentration des principaux cations (Ca , Mg , K et Na) ont été déterminés. Avant analyse, les 59 échantillons ont été séchés à l'air ambiant et broyés finement. Le pH a été mesuré dans une boue de sol (2 volumes de sol, 1 volume d'eau déminéralisée), à l'aide d'un couple d'électrodes étalonné avec des tampons de pH 4, 7 et 10. Le carbone et l'azote totaux ont été déterminés par analyse élémentaire (Vario C-N Analyser, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Allemagne) via une combustion à très haute température (960°C) dans de l'oxygène pur et le filtrage dans une colonne de filtration. Ces mesures de C et N totaux ont alors permis de déterminer le ratio C/N des différents échantillons. D'un autre côté, les cations ont été mesurés par dosage Mehlich III. Les étalons ont été préparés avec une solution La₂O₃ 10% et 100 ppm de chaque cation dosé. Les échantillons de sols (3g) ont été dissous dans 30ml de solution Mehlich III pendant 5 minutes et filtrés sur papier de cellulose (N°5). Le dosage a été fait par spectrophotométrie (Perkin-Elmer AAnalyst Atomic Absorption Spectrophotometer Waltham, MA, USA) après dilution (si nécessaire et jusqu'à 30:1) des échantillons et après l'ajout de solution La₂O₃ 10%.

Analyses statistiques

Pour chacune des variables dépendantes et indépendantes, nous avons calculé une moyenne par peuplement. Pour les variables chimiques du sol, cette opération n'était pas nécessaire puisque nous avons déjà aggloméré les échantillons de sol d'un même peuplement préalablement à l'analyse. Afin d'évaluer les relations entre nos différentes variables, nous avons procédé à une analyse de corrélation de Spearman. Nous avons préféré celle-ci à la corrélation de Pearson, car nous ne nous attendions pas nécessairement à des relations linéaires entre

nos variables. Cette analyse nous permet à la fois de voir les relations entre nos 3 variables dépendantes, entre nos variables indépendantes, puis entre nos variables dépendantes et indépendantes.

Nous avons procédé à une régression linéaire multiple afin de vérifier si l'ajout de plusieurs variables et les interactions entre celles-ci permettaient de mieux cerner la variabilité observée pour nos variables dépendantes. Pour ce faire, nous avons utilisé la routine « All possible regressions » du logiciel NCSS (Hintze 2004). Cette routine permet d'identifier rapidement les combinaisons de variables intéressantes et aussi de vérifier si l'ajout d'une variable indépendante dans le modèle apporte de l'information supplémentaire appréciable.

Ces premières analyses ne nous ayant pas fourni des réponses satisfaisantes en regards des objectifs du projet, nous avons changé quelque peu notre stratégie d'analyse. Nous avons réalisé que le jeu de données contenait fort probablement des imprécisions d'échantillonnage (plus communément appelé erreur d'échantillonnage en statistique). Par exemple, les données de croissance et de largeur du bois blanc auraient probablement nécessité un plus grand effort d'échantillonnage (soit plus de carottes/arbre ou plus de d'arbres/site). La hauteur des arbres est aussi une variable dont la justesse peut varier en fonction de la capacité à isoler la cime de l'arbre-étude lors de la prise de mesure. Plusieurs variables indépendantes comportaient également une certaine part de subjectivité : l'épaisseur du dépôt, le pourcentage d'affleurement, le pourcentage de dépérissement. Il est aussi reconnu que la chimie des sols est très variable à l'intérieur même d'un peuplement. Ainsi, il est aussi possible d'avoir une

erreur d'échantillonnage à cet égard. À titre comparatif, notre jeu de données est moins précis qu'un jeu de données où on tente de mettre en relation une quantité de semis observée à un endroit et la distance aux semenciers les plus près. Dans un tel cas, les erreurs d'échantillonnage sont minimales. Dans le cas de notre jeu de données, pour diminuer l'erreur d'échantillonnage sur certaines variables, il aurait fallu soit diminuer le nombre de variables échantillonnées, soit diminuer le nombre de parcelles échantillonnées. Ces deux options auraient aussi eu leurs propres désavantages.

Afin de pallier à ce problème, nous avons changé notre stratégie d'analyse. Dans un premier temps, nous avons synthétisé nos trois variables dépendantes en un seul indice composite (Eq. 1).

Eq. 1 : $\text{Indice composite}_i = \text{Croissance}_i / \text{Croissance maximale} + \text{Bois blanc}_i / \text{Bois blanc maximum} + \text{Hauteur}_i / \text{Hauteur maximale}$

Où :

Indice composite_i est l'indice composite de la parcelle i ;

Bois blanc_i est la longueur moyenne du bois blanc de la parcelle i ;

Croissance_i est la croissance moyenne de la parcelle i ;

Hauteur_i est la hauteur moyenne de la parcelle i ;

Bois blanc maximum est la valeur de bois blanc maximale observée parmi les parcelles.

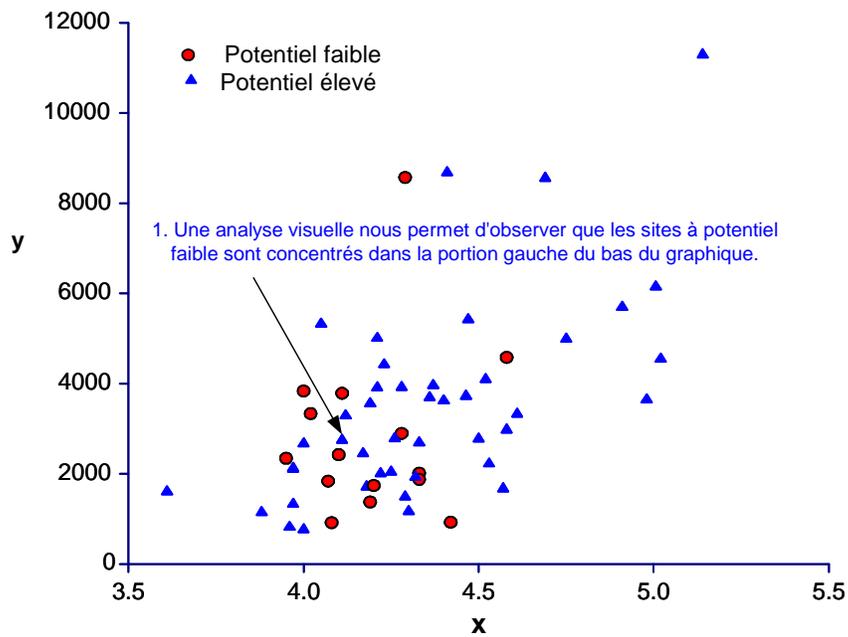
Croissance maximale est la croissance maximale observée parmi les parcelles.

Hauteur maximale est hauteur maximale observée parmi les parcelles.

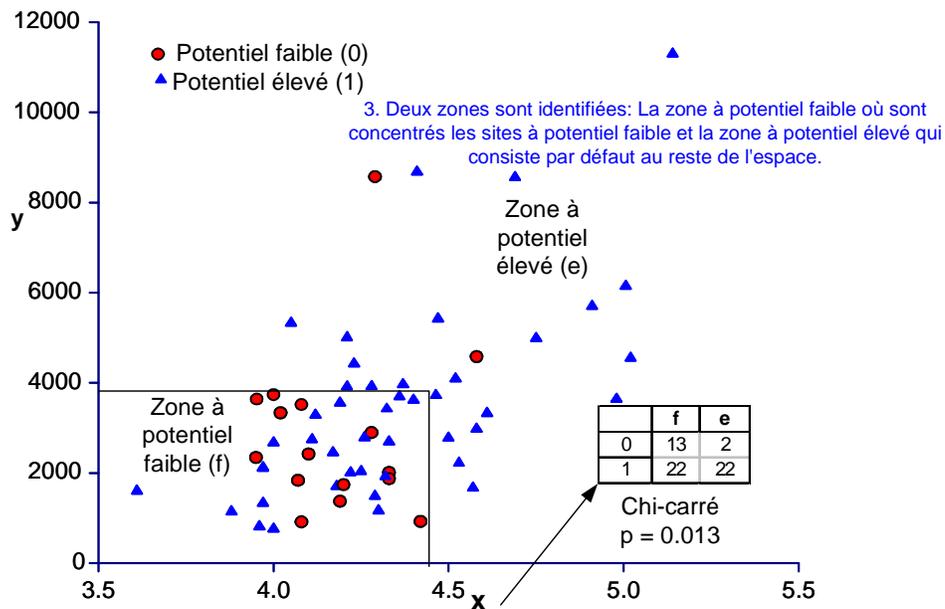
Nous croyons que cet indice nous permet d'atténuer les erreurs d'échantillonnage. Surtout, cette façon de faire permet de synthétiser la qualité de site d'une parcelle donnée.

Par la suite, nous avons procédé à une analyse visuelle de nos données dans laquelle deux variables indépendantes, une en abscisse et l'autre en ordonnée, sont mises

en relation et forment un nuage de points. Ces points sont par la suite identifiés par la variable dépendante. Dans notre cas, cette variable dépendante était l'indice composite dans un premier temps. Afin de faciliter la visualisation, les points correspondants aux sites avec un indice composite supérieur à 2 était coloré bleu (potentiel de site élevé) et ceux avec un indice composite inférieur à 2 était coloré rouge (potentiel de site faible). Ces analyses visuelles nous ont par la suite permis d'observer que l'utilisation de deux variables permettait souvent de délimiter dans un secteur donné du graphique les sites à potentiel faibles ou dans certains cas ceux à fort potentiel. Ces analyses visuelles étaient corroborées par la suite par une analyse chi-carré qui visait à optimiser les meilleures valeurs de seuils (sur nos variables indépendantes) pour circonscrire de façon statistiquement significative un potentiel de site donné dans une zone du graphique. Pour ce faire, nous avons utilisé l'algorithme génétique d'optimisation du logiciel Optworks (PiBlue. 2007) combiné à Excel. La figure 1 résume le déroulement de l'analyse. L'utilisation de cette approche analytique présente, d'après nous, au moins deux avantages. Elle permet d'abord de visualiser l'effet d'interaction possible entre deux variables indépendantes sur une variable indépendante. Par exemple, à la figure 1, on peut voir que l'effet ne semble important que lorsque la variable x est en-dessous d'un certain seuil. Or, en écologie, ces relations avec seuils ne sont pas rares. Un autre avantage de l'approche est qu'elle permet d'établir des seuils de façon objective, ce qui est un aspect non-négligeable lorsque l'on désire fournir des outils d'aide à la décision comme c'est le cas dans la présente étude.



2. Des seuils sont identifiés à partir d'un algorithme d'optimisation pour optimiser la valeur du test de chi-carré.



4. Un tableau de contingence entre les zones du graphe est présenté. Ici, il nous informe que dans la zone à potentiel faible, on a 13 chances sur 35 (37%) d'avoir un site faible (37%). Dans le reste du graphe, cette chance est de 2/24 (8%). Le test du Chi-carré nous indique que cette différence de probabilité est statistiquement significative ($p = 0.013$).

Figure 1 : Résumé de l'approche d'analyse choisie

Résultats et discussion

Dans un premier temps, nous avons effectué des analyses de corrélations de Spearman entre les différentes variables étudiées, et ce, tant pour les variables explicatives que les variables dépendantes (tableau 2). En ce qui a trait aux variables dépendantes, soit la longueur de bois blanc, la croissance et la hauteur, on constate que les corrélations sont relativement faibles. Le bois blanc présente des corrélations statistiquement significatives de 0,39 et 0,36 avec la croissance et la hauteur respectivement alors qu'il n'y a pas de corrélations significatives entre la croissance et la hauteur. Peu de recherches ont auparavant étudié les relations entre ces variables. Par exemple, (Wiemann *et al.* 2004) n'avaient pas trouvé de relation entre la croissance (DHP/âge de l'arbre) et le bois blanc, mais dans un dispositif expérimental complètement différent de celui de la présente étude. Ce manque d'associations entre nos variables dépendantes constitue une source de complication pour la suite des analyses puisque cela semble indiquer qu'il sera difficile d'identifier des sites dont les érables présentent à la fois de bonnes croissances, de bonnes hauteurs et de bonnes longueurs de bois blanc. C'est cette absence de relations fortes qui nous a amené à l'élaboration de notre indice composite de qualité de site (voir méthodologie).

En ce qui a trait aux corrélations entre les variables dépendantes et indépendantes, encore une fois, les relations ne sont pas tellement élevées. La seule variable dépendante qui est corrélée avec le bois blanc est l'élévation (-0,44). Donc, plus les sites sont élevés en altitude, moins on observe que le bois blanc est long. Cela est en concordance avec les données de Wiemann et al. (2004), provenant d'un climat plus clément et qui présentent des longueurs de bois blanc plus grandes. Les variables dépendantes les mieux corrélées avec la croissance

sont le pourcentage de dépérissement et l'épaisseur du dépôt (respectivement -0.32 et 0.32). La croissance est aussi corrélée positivement au pH et au calcium (respectivement 0,31 et 0,26). La hauteur est significativement corrélée à la hauteur de la première branche (ce qui ne s'avère pas être une grande surprise), à l'élévation (-0.46), ainsi que curieusement de façon positive à la surface terrière en hêtre (0.41). Il est possible que cette relation soit fortuite, mais comme c'est une des relations les plus fortes observées dans notre jeu de données, cela est peu probable. Nous ne croyons pas toutefois que ce soit une relation indicatrice de qualité de site. En effet, il est possible que la pression latérale exposée par le hêtre amène l'érable à favoriser sa croissance apicale; cela demeure toutefois une hypothèse.

En général, les corrélations entre les différentes variables indépendantes sont cohérentes. Par exemple, le pH avec le calcium (0,52), le pourcentage de dépérissement avec ces deux variables (respectivement 0,41 et 0,30), le pourcentage d'affleurement rocheux avec l'épaisseur du dépôt (-0,56) et le carbone avec l'azote total (0,52). Les corrélations positives entre le Calcium, d'une part, et le carbone et l'azote (0,45 et 0,52 respectivement), d'autre part, sont quelques peu surprenantes. Ce résultat s'explique probablement par le fait que nous avons pris nos échantillons dans l'horizon A juste sous l'horizon LFH. Il est donc possible que des particules de matière organique issues de cet horizon et des racines fines viennent modifier les relations que l'on voit généralement entre ces éléments dans l'horizon B.

Tableau 2: Corrélations de Spearman entre les différentes variables étudiées

Variable	No-variable	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pct _affleurement	1	1.00	-0.13	-0.11	-0.18	-0.10	0.19	<u>0.37</u>	0.10	0.02	0.12	0.09	0.10	-0.20	-0.20	0.18	0.24	0.24	<u>-0.56</u>
Bois blanc	2	-0.13	1.00	0.18	<u>0.39</u>	0.10	<u>-0.44</u>	0.03	<u>0.36</u>	-0.14	-0.03	0.00	-0.15	-0.05	0.18	0.22	0.12	<u>-0.06</u>	0.24
Ca	3	-0.11	0.18	1.00	0.26	0.11	-0.19	0.07	0.01	0.23	<u>0.45</u>	-0.25	<u>0.52</u>	-0.12	<u>0.52</u>	0.07	-0.13	<u>-0.41</u>	<u>0.42</u>
Croissance	4	-0.18	<u>0.39</u>	0.26	1.00	0.11	-0.15	0.05	0.19	-0.13	-0.08	-0.04	-0.06	0.11	0.31	-0.19	-0.06	<u>-0.32</u>	0.32
Épaisseur_LFH	5	-0.10	0.10	0.11	0.11	1.00	-0.11	<u>-0.33</u>	-0.17	0.09	-0.06	-0.02	-0.03	0.22	-0.06	-0.16	-0.22	-0.17	0.05
Élévation	6	0.19	<u>-0.44</u>	<u>-0.19</u>	-0.15	-0.11	1.00	-0.09	<u>-0.47</u>	0.12	0.21	0.22	0.33	0.17	-0.02	-0.28	0.03	-0.12	<u>-0.37</u>
Hauteur 1b	7	0.37	<u>0.03</u>	0.07	0.05	<u>-0.33</u>	-0.09	1.00	<u>0.62</u>	0.15	0.31	-0.15	0.28	-0.17	-0.05	0.27	<u>0.48</u>	0.14	-0.13
Hauteur	8	0.10	<u>0.36</u>	0.01	0.19	-0.17	<u>-0.47</u>	<u>0.62</u>	1.00	-0.02	0.02	-0.01	-0.07	-0.07	-0.07	0.24	<u>0.41</u>	0.08	0.12
K	9	0.02	-0.14	0.23	-0.13	0.09	0.12	0.15	-0.02	1.00	0.54	-0.07	0.49	0.15	-0.18	0.40	0.23	0.04	-0.18
C	10	0.12	-0.03	<u>0.45</u>	-0.08	-0.06	0.21	0.31	0.02	0.54	1.00	0.09	0.93	-0.09	-0.03	<u>0.53</u>	0.23	0.00	-0.13
Mg	11	0.09	0.00	-0.25	-0.04	-0.02	0.22	-0.15	-0.01	-0.07	0.09	1.00	0.05	<u>0.47</u>	-0.02	-0.04	-0.06	0.03	-0.04
N	12	0.10	-0.15	<u>0.52</u>	-0.06	-0.03	0.33	0.28	-0.07	0.49	<u>0.93</u>	0.05	1.00	-0.06	0.10	0.27	0.13	-0.07	-0.09
Na	13	-0.20	-0.05	-0.12	0.11	0.22	0.17	-0.17	-0.07	0.15	-0.09	<u>0.47</u>	-0.06	1.00	0.13	-0.27	-0.05	-0.16	0.06
pH	14	-0.20	0.18	<u>0.52</u>	0.31	-0.06	-0.02	-0.05	-0.07	-0.18	-0.03	-0.02	0.10	0.13	1.00	-0.40	-0.23	-0.30	<u>0.38</u>
Ratio C/N	15	0.18	0.22	0.07	-0.19	-0.16	-0.28	0.27	0.24	<u>0.40</u>	<u>0.53</u>	-0.04	0.27	-0.27	-0.40	1.00	0.38	0.24	-0.19
ST_HEG	16	0.24	0.12	-0.13	-0.06	-0.22	0.03	<u>0.48</u>	<u>0.41</u>	0.23	0.23	-0.06	0.13	-0.05	-0.23	<u>0.38</u>	1.00	0.14	-0.03
Pct dépérissement	17	0.24	<u>-0.06</u>	<u>-0.41</u>	<u>-0.32</u>	-0.17	-0.12	0.14	0.08	0.04	0.00	0.03	-0.07	-0.16	-0.30	0.24	0.14	1.00	-0.31
Épaisseur dépôt	18	<u>-0.56</u>	0.24	<u>0.42</u>	<u>0.32</u>	0.05	<u>-0.37</u>	-0.13	0.12	-0.18	-0.13	-0.04	-0.09	0.06	<u>0.38</u>	-0.19	-0.03	-0.31	1.00

Le soulignement signifie une relation significative au seuil de 0.05 à 0.01. Le soulignement et le caractère gras signifient une relation significative au-dessous du seuil de 0.001. Les colonnes et lignes en bleu servent à mettre en évidence les variables dépendantes du jeu de l'étude.

Les analyses de régression multiple montrent qu'en utilisant conjointement plus d'une variable indépendante, il est possible d'augmenter légèrement (mais de façon statistiquement significative) l'explication de la variabilité pour les variables bois blanc et hauteur (tableau 3). Dans les deux cas, l'élévation entre dans le modèle comme première variable explicative. L'élévation n'est pas un facteur écologique en tant que tel, mais plutôt une variable qui intègre divers facteurs écologiques comme les conditions micro-climatiques et l'épaisseur du dépôt. Elle est intéressante pour le territoire à l'étude, mais il faut utiliser cette variable prudemment lorsque l'on sort de ce territoire. Ce n'est pas nécessairement à la même élévation que l'épaisseur du sol et les conditions climatiques seront influencées dans d'autres régions. Par exemple, dans le secteur à l'étude, les dépôts sont très minces à plus de 400 m d'élévation. Ce seuil n'est pas nécessairement le même dans d'autres régions. Pour la croissance, l'analyse de régression multiple n'a pas permis d'ajouter de variables supplémentaires après que le pH fut entré dans le modèle.

Tableau 3 : Résumé des analyses de régression multiples

Variable dépendante	2 meilleures variables indépendantes	R ²
Croissance	pH	0.135
Bois blanc	Élévation + Pct dépérissement	0.34
Hauteur	Élévation + STHEG	0.38

Nous présentons à l'annexe 1** l'ensemble des graphes ayant servi à effectuer les analyses visuelles des relations entre les diverses variables dépendantes et l'ICQS. Nous avons retenu pour les analyses subséquentes d'identification des seuils seulement les graphes qui semblaient présenter un certain potentiel pour l'isolement des sites à faible potentiel. Le premier graphe issu de cette analyse que nous présentons est celui mettant en relation l'azote total

et le pH (figure 2). L'optimisation du Chi-carré nous montre que les sites pauvres sont concentrés dans la zone en haut et à droite sur le graphe. Ainsi, la zone, où on retrouve un pH inférieur à 4.33 et une concentration en azote de moins de 9.4 mg/g, contient 52% de sites pauvres (ICQS<2) alors que ce pourcentage est de 5% dans le reste du graphe. Cette différence de proportion est hautement significative ($p<0.001$). On peut s'apercevoir visuellement que les deux variables indépendantes prises une à une ne permettraient pas de faire une distinction aussi nette. Le pH n'est pas nécessairement un bon indicateur de l'ICQS, mais en fonction de certaines valeurs d'azote, il permet de bien cerner dans quelles situations on peut observer un ICQS faible. On pourrait aussi dire que l'azote n'est pas un bon indicateur de l'ICQS sauf quand on le jumèle avec le pH. Cela est particulièrement intéressant parce que les analyses de corrélations ne laissaient pas entrevoir l'azote comme indicateur de qualité de site. Nous croyons que l'utilisation de l'azote nous permet de voir quand le pH compromet réellement les activités de la décomposition de la matière organique. Par ailleurs, en isolant les 23 sites de la zone à potentiel faible, nous avons été en mesure de raffiner notre capacité à distinguer les sites à forts et faibles ICQS. Nous avons en effet remarqué que la majorité des sites (11/14) avec une hauteur moyenne de moins de 24 m ont un ICQS < 2 alors que sur les 9 sites avec une hauteur de plus de 24 m, un seul (1/9) a un ICQS <2 Cette différence entre ces classes de hauteur est statistiquement significative ($p<0.001$). Il y a bien évidemment une circularité dans cette constatation puisque la hauteur est utilisée dans le calcul de l'ICQS. La hauteur toutefois présente cette particularité qu'elle peut à la fois être considérée comme variable dépendante et indépendante (voir méthodologie). Ainsi, en utilisant le pH, l'azote total et la hauteur, il est possible de placer 53 des 59 (90 %) sites de notre jeu de données dans la bonne catégorie d'ICQS.

D'autres combinaisons de variables indépendantes peuvent être utilisées pour classifier les sites selon l'ICQS. Le calcium et l'azote peuvent être utilisés efficacement, mais avec une efficacité un peu moindre que la combinaison pH-azote, car on retrouve dans la zone à faible potentiel un 14 sites avec un ICQS > 2 (figure 3). Aussi, en utilisant la combinaison calcium-azote, la variable hauteur ne permet pas par la suite de bien distinguer les sites avec un ICQS<2 de ceux avec un ICQS>2.

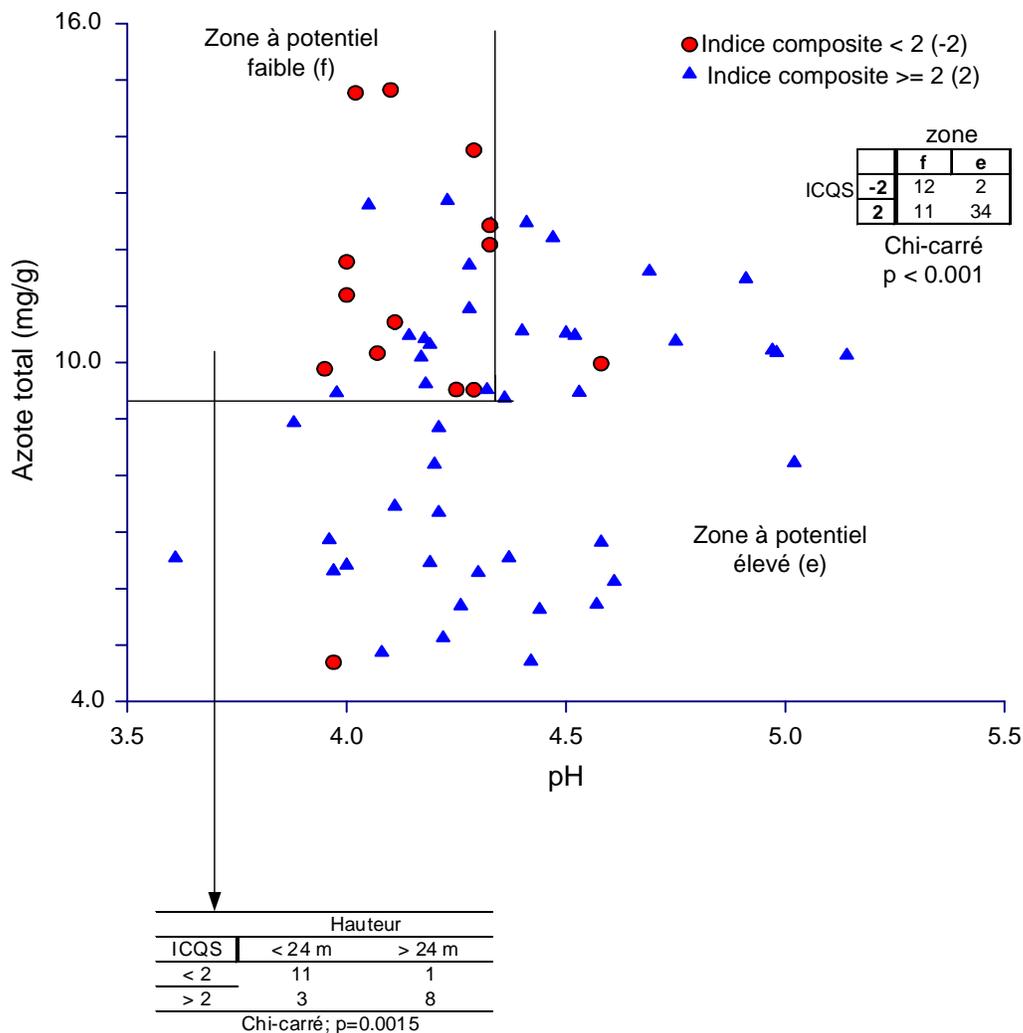


Figure 2: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir du pH, de l'azote total et de la hauteur.

La combinaison élévation-pH (figure 4) est efficace aussi; elle permet de bien distinguer les sites selon leur ICQS aussi bien que la combinaison calcium-azote mais en plus, elle permet l'utilisation efficace de la hauteur comme variable discriminante par la suite comme dans le cas de la combinaison pH-azote. En analysant seulement les sites dans la zone faible, nous avons en effet remarqué que la majorité des sites (12/18) avec une hauteur moyenne de moins de 24 m ont un ICQS < 2 alors que sur les 9 sites avec une hauteur de plus de 24 m, un seul (1/9) a un ICQS <2. Cette différence entre ces classes de hauteur est statistiquement significative ($p < 0.006$). Au final, en utilisant les variables élévation-pH et hauteur, on peut classer correctement 51 sites sur 59, soit 86%.

La combinaison élévation-épaisseur du dépôt (figure 5) permet d'obtenir une bonne distinction, mais surtout pour les ICQS > 2. En effet, ces variables prises ensemble permettent davantage d'identifier la zone où on est certains d'avoir un bon ICQS, car la zone à «faible» potentiel contient davantage de sites avec un ICQS > 2 que de sites avec un ICQS < 2. La hauteur n'apporte pas une distinction très intéressante par la suite. La combinaison des variables élévation et hauteur de la première branche (figure 6) apporte une information du même type que la combinaison élévation-épaisseur du dépôt, un peu moins intéressante même.

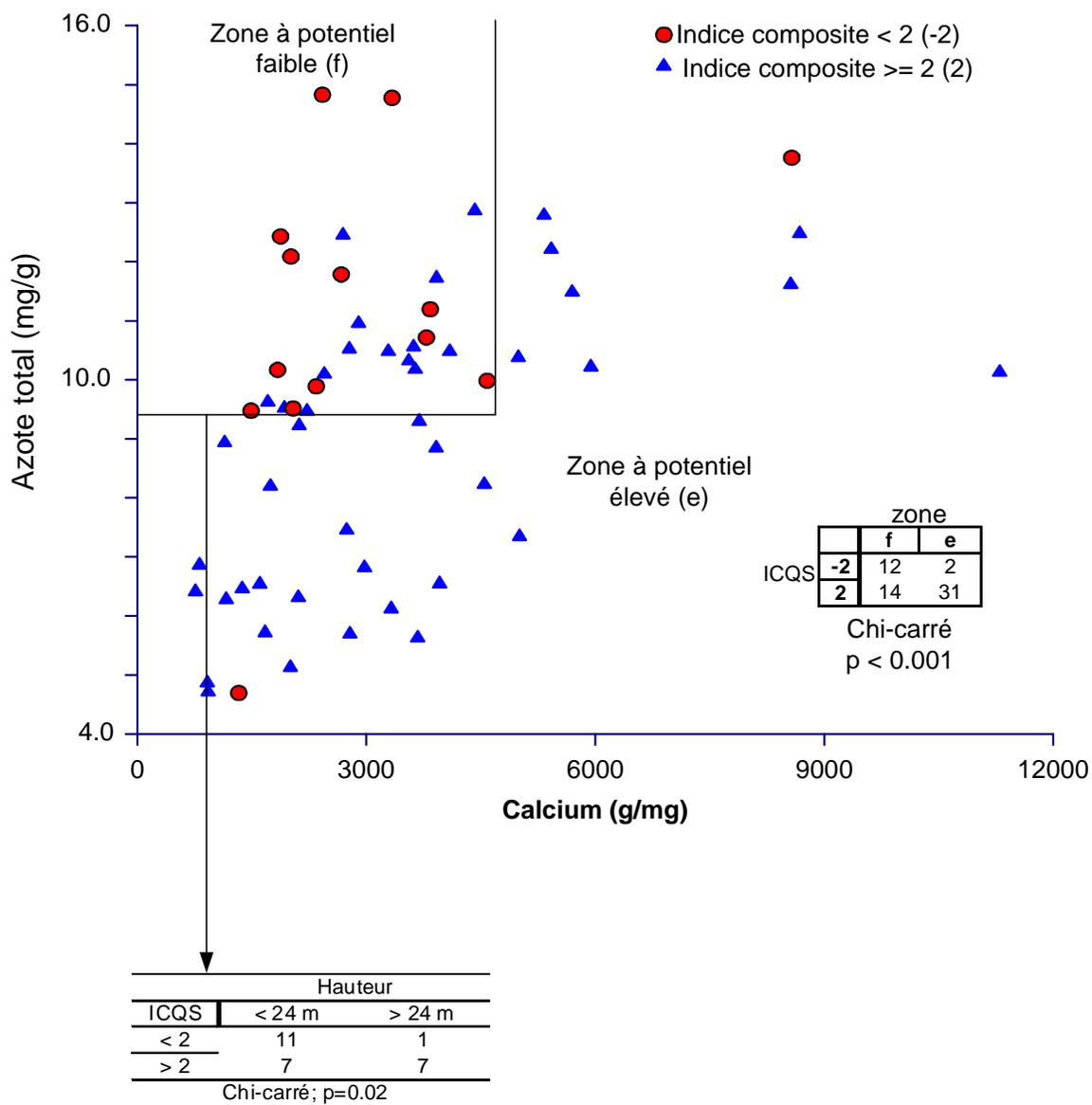


Figure 3: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir du calcium, de l'azote total et de la hauteur.

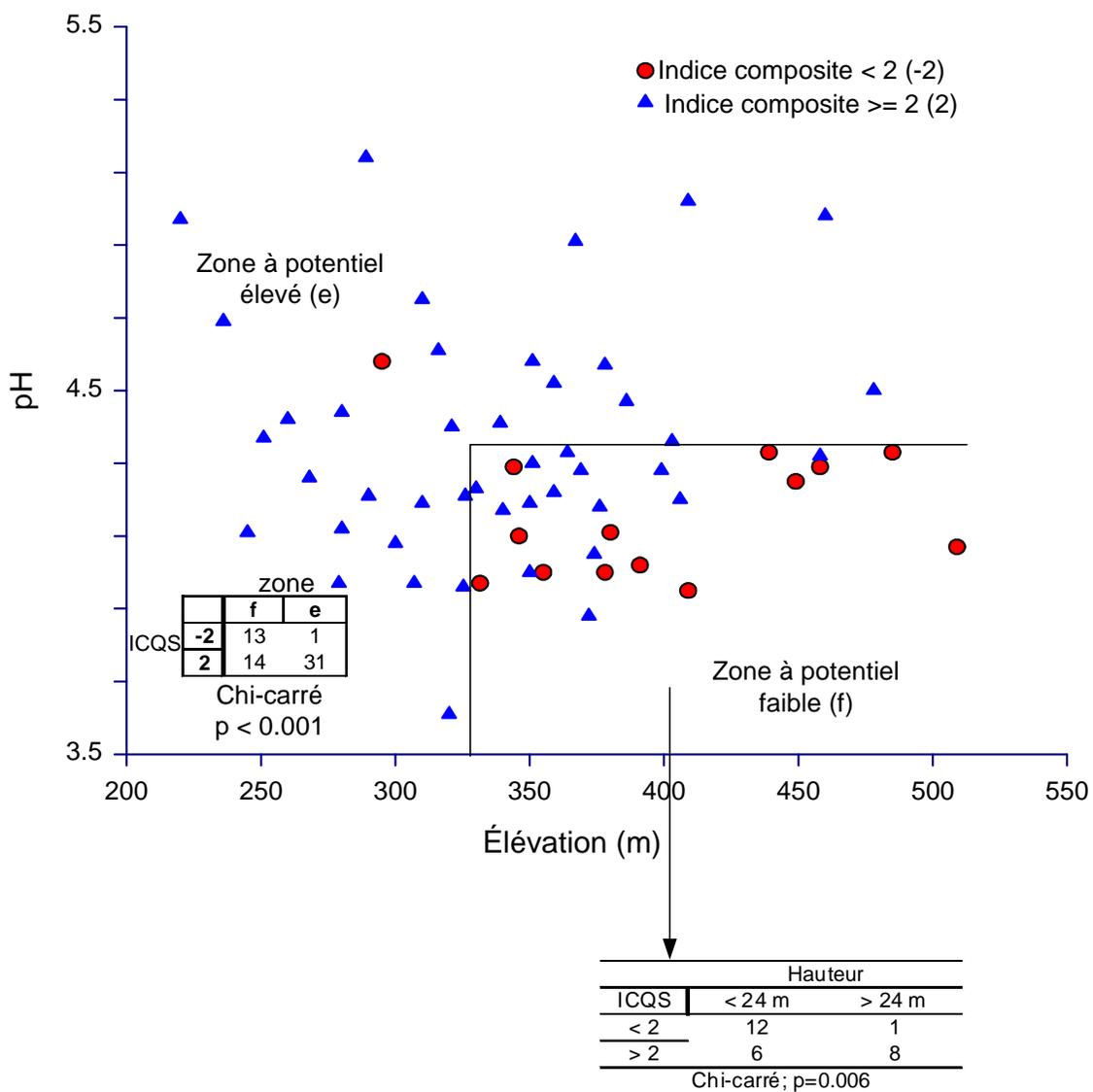


Figure 4: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir de l'élévation, du pH et de la hauteur.

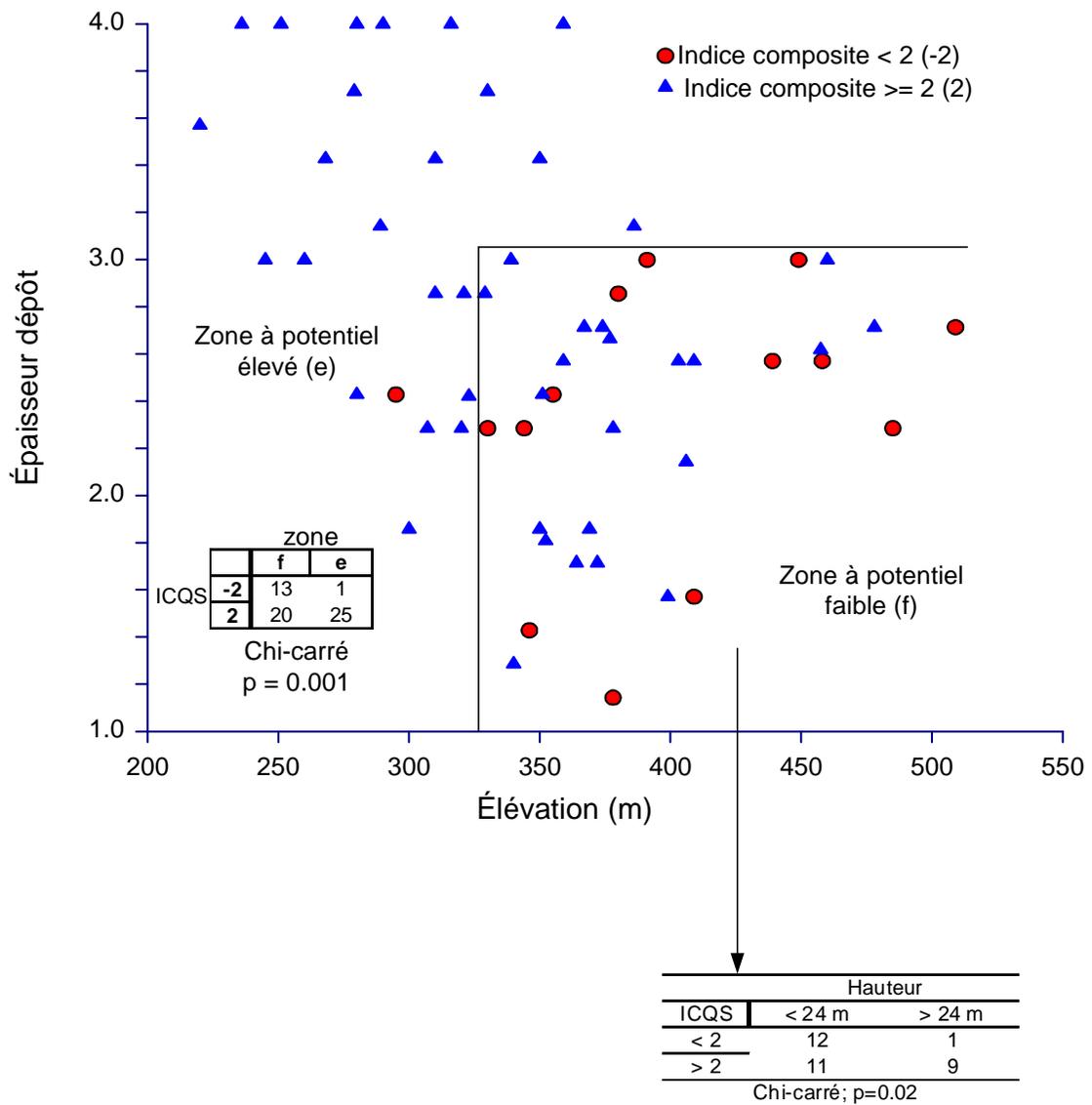


Figure 5: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir de l'élévation, de l'épaisseur du dépôt et de la hauteur.

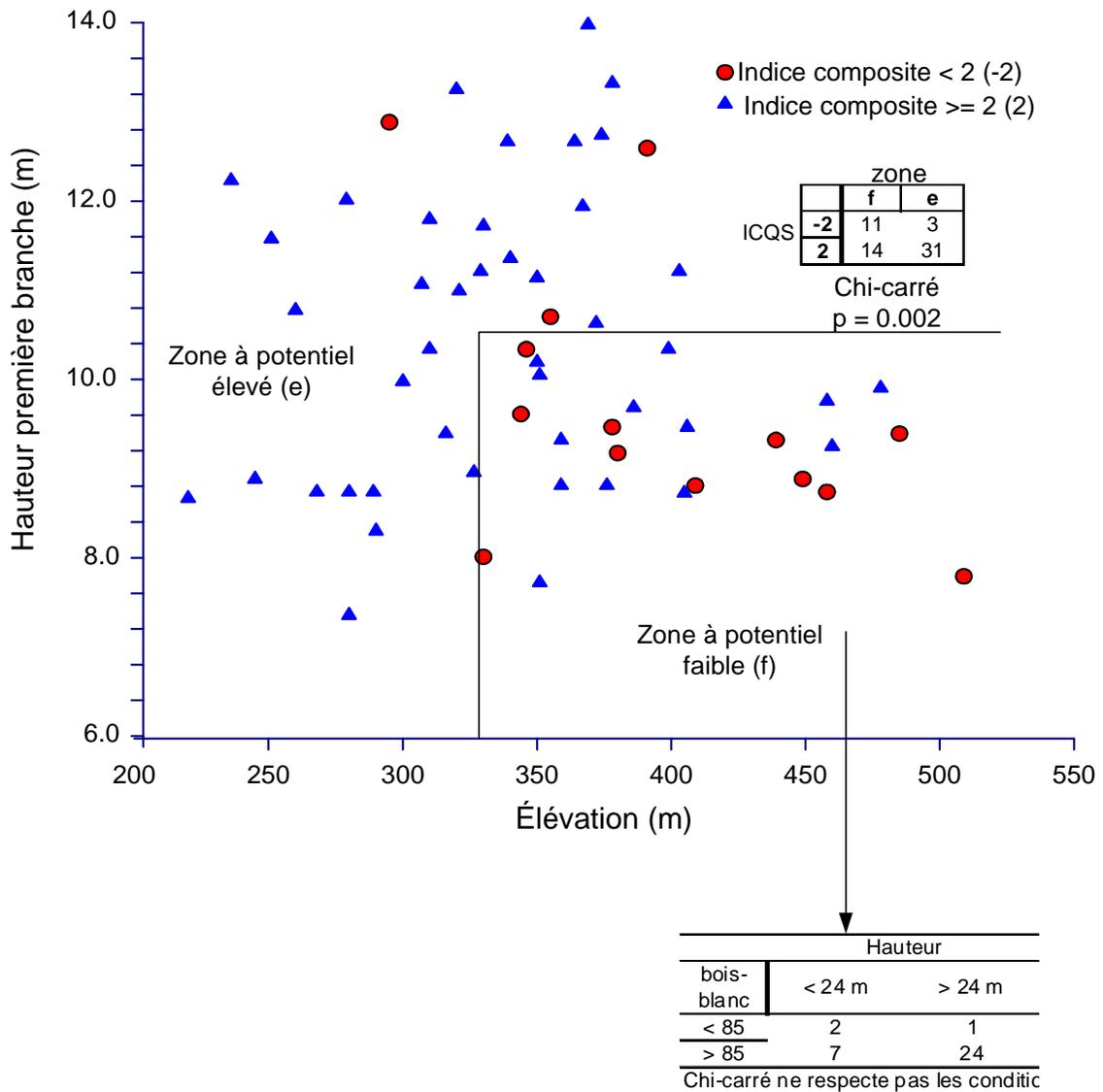


Figure 6: Identification des sites à faible potentiel (ICQS) à partir de l'élévation, de la hauteur de la première branche et de la hauteur.

Les graphes ayant servi aux analyses utilisant la croissance et le bois blanc comme variables dépendantes sont respectivement présentés aux annexes 2 et 3**. Dans les deux cas, un seul graphe a été retenu après l'analyse visuelle. Dans le cas de la croissance, le calcium et le pH

permettent de distinguer la zone où on est certain d'avoir une forte croissance (figure 7). Les conditions sont de ne pas avoir un pH en dessous de 4.4 combiné à une concentration en calcium de moins de 4400mg/g. En l'absence d'une de ces deux conditions, la croissance radiale devrait être au-dessus de 1.25 mm/an. Pour le bois blanc, l'analyse visuelle a permis de démontrer que les sites peu élevés avec des sols profonds (plus que 50 cm) assurent d'avoir une longueur de bois blanc plus grande que 85 mm (figure 8). Cette combinaison pourrait être intéressante pour entamer l'identification des sites pour de la sylviculture intensive.

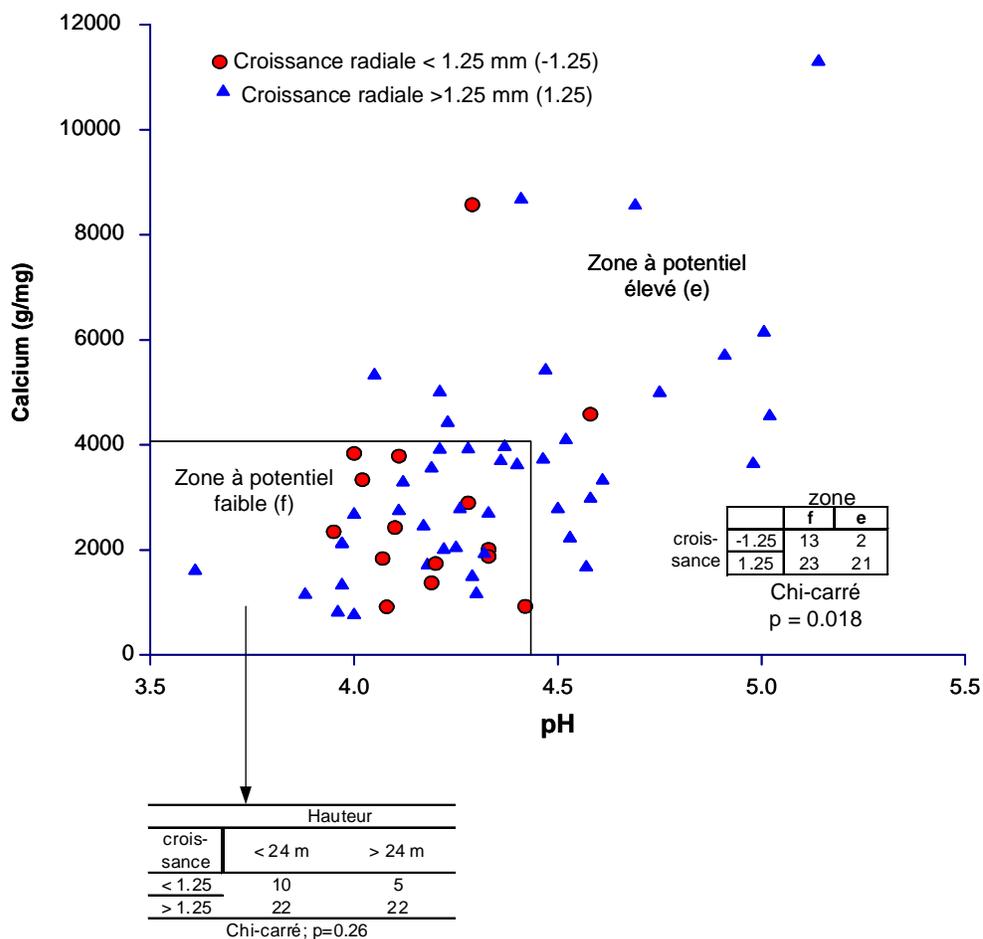


Figure 7: Identification des sites à faible potentiel (croissance) à partir du pH, du calcium et de la hauteur.

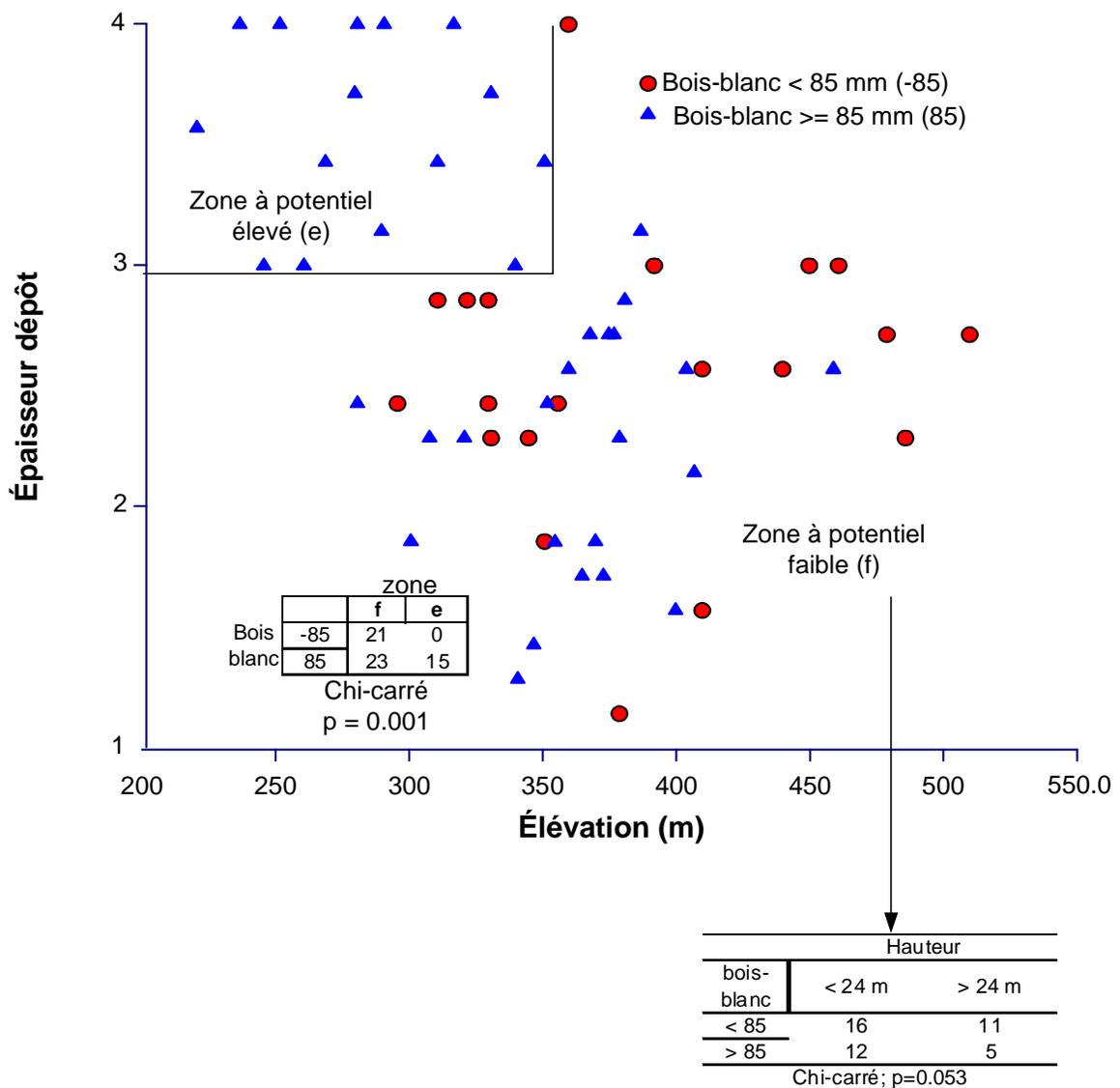


Figure 8 : Identification des sites à faible potentiel (bois blanc) à partir de l'élévation, de la hauteur de la première branche et de la hauteur.

Afin de simplifier nos analyses, nous avons utilisé la croissance 10 ans après traitement en omettant volontairement la croissance avant traitement. La comparaison des croissances avant et après traitement nous montre que pour 39 de nos 59 peuplements (Tableau

4), la croissance après traitement est plus faible que la croissance avant traitement. Ce résultat est préoccupant et diffère de ce qu'on voit généralement dans la littérature (Bédard et Majcen 2003; Forget et al 2007). Aussi, sur 40 peuplements ayant un pH de moins de 4.4, on voit que 31 (78%) de ceux-ci ont une croissance négative alors que pour les peuplements avec un pH de plus de 4.4, c'est 8 peuplements sur 19 (42%) qui ont une réponse négative au jardinage. Cette différence de pourcentage entre les deux catégories de pH est statistiquement significative ($p=0.007$; Chi-carré). Ce résultat est, d'une part, préoccupant, mais en même temps ne surprend pas complètement puisque plusieurs études (Nolet 2009; (Duchesne *et al.* 2002, Sharpe 2002, Juice S.M. *et al.* 2006)) ont fait état du dépérissement des érablières liées aux précipitations acides. Cette baisse de vigueur des érables à sucre est importante dans le cadre du présent projet, car elle peut avoir fait en sorte de modifier les relations entre la croissance et les variables de hauteur et de bois blanc.

Tableau 4 : Effet du pH sur la réponse des peuplements au jardinage

croissance après - croissance avant	ph	
	< 4.4	> 4.4
négative	31	8
positive	9	11

Discussion générale

Nous résumons au tableau 5 les différentes combinaisons qui peuvent être utilisées pour décrire la qualité d'un site donné. La combinaison pH-azote-hauteur semble définitivement la plus fiable ; elle demande par contre que des analyses de sol soient effectuées. Cela peut s'avérer coûteux dans le cadre des opérations normales. Nous proposons donc que lors des inventaires ou même lors des activités de prospection, les techniciens prennent l'habitude d'évaluer sommairement la qualité de site en utilisant la hauteur (érable de 40 cm de DHP), l'élévation et l'épaisseur du dépôt. Idéalement, les techniciens seraient également équipés de pH mètres portatifs. Nous croyons que cette mesure est très importante dans un contexte où les conditions écologiques qui ont mené au développement du peuplement en place n'étaient peut-être pas les mêmes que celles observées aujourd'hui. On a en effet tendance à croire qu'un site qui a permis le développement des tiges d'érable de qualité et de belle hauteur aura toujours cette capacité. Dans un contexte où les sols semblent s'acidifier, cela n'est peut-être plus vrai. Par exemple, pour les sites qui se trouvent dans la zone à potentiel faible (Figure 2, selon les variables de pH et d'azote), avec un ICQS élevé, il est permis de croire que le site n'a plus la capacité de produire des tiges d'érable à sucre d'une aussi bonne hauteur. Si les analyses de pH sur le terrain fournissent des pH bas et que d'autres facteurs vont dans le même sens (altitude élevée, épaisseur du dépôt faible et faible hauteur d'arbre), nous croyons que le site devrait être catégorisé dans les faibles potentiels. Si le pH révélé sur le terrain est bas, mais que les autres valeurs ne vont pas dans le même sens, il serait judicieux de compléter par des analyses chimiques plus poussées et

par la prise de carotte afin de vérifier si le site semble toujours avoir la même capacité de produire que celle qui a mené au peuplement en place.

Tableau 5: Seuils, avantages et désavantages associés aux différentes combinaisons de facteurs indicatrices de potentiel de site faible.

Conditions de site à potentiel faible	Avantages	Désavantages
pH < 4.33; Azote > 9.4; Hauteur < 24	La combinaison la plus précise	Requiert des analyses chimiques
Ca < 3880; Azote > 9.4; Hauteur < 24	La combinaison moins précise que la précédente	Requiert des analyses chimiques
pH < 4.36; Élévation > 340; Hauteur < 24	Ne requiert pas d'analyses chimiques (pH peut être pris sur le terrain)	L'élévation n'est pas une variable aussi fiable en dehors de la région à l'étude
Épaisseur du dépôt < 50 cm; Élévation > 330; Hauteur < 24	Ne requiert pas d'analyses chimiques ; les mêmes variables peuvent être utilisées pour identifier les bons sites pour le bois blanc	L'élévation n'est pas une variable aussi fiable en dehors de la région à l'étude
Élévation > 330; Hauteur de la première branche < 10	Ne requiert pas d'analyses chimiques	La plus imprécise des combinaisons présentées

La présente étude a permis d'identifier les principales variables pour identifier les sites à faible potentiel. Elle permet aussi d'identifier des sites où la croissance et la production de bois blanc sont très intéressantes. La très grande majorité des variables identifiées (pH, calcium, épaisseur du dépôt, altitude) dans notre étude comme variables potentielles pour l'évaluation de la qualité de site pour l'érable à sucre ont déjà été mentionnés par d'autres auteurs (Horsley *et al.* 2000, Moore *et al.* 2000, Sharpe 2002, Moore et Ouimet 2006). Seul l'azote total, à notre connaissance n'avait pas été identifié dans le cadre d'autres études. Cette concordance entre la présente étude et d'autres quant aux facteurs écologiques affectant l'érable à sucre vient confirmer la vraisemblance des résultats obtenus. L'étude permet également d'identifier

les variables qui semblent les plus importantes pour les érablières de l'Outaouais. Il serait ainsi possible de catégoriser les sites de la façon suivante : fort potentiel, potentiel incertain et potentiel faible. Toutefois, il faudra faire arrimer ces potentiels avec des données de productivité réelle. À ce jour, la région de l'Outaouais n'a aucun dispositif de recherche à long terme qui permette de quantifier la productivité attendue des coupes de jardinage en fonction de ces diverses qualités de site, et ce, malgré le fait que l'on intervient surtout avec ce traitement sur le territoire depuis près de 20 ans. Nous croyons que la mise en place d'un tel dispositif est impérative.

Conclusion

L'élaboration d'une classification de la qualité de sites pour des peuplements inéquiennes est un défi majeur. Dans de tels peuplements, les tiges ont souvent expérimenté des historiques de croissance très diversifiés et qui ont par la suite eu des effets aussi diversifiés sur la croissance en hauteur et en diamètre des tiges. Il s'en suit qu'il est difficile de ne s'en tenir aux caractéristiques des arbres présents aujourd'hui dans le peuplement pour évaluer la qualité des sites. L'absence de classification des sites pour les érablières inéquiennes de l'Outaouais constitue une lacune majeure car la région présente, par son relief et son étendue géographique, une très grande diversité de site en termes de qualité qui supporte aujourd'hui des peuplements d'érable à sucre. Sans une telle classification, il est impossible d'estimer correctement le rendement de l'intervention sylvicole la plus répandue sur notre territoire.

Ce projet constitue une première étape vers l'élaboration d'une telle classification. Au terme de ce projet, les aménagistes et les sylviculteurs disposent de divers indicateurs pour évaluer la qualité de site pour l'érable à sucre. À la vue des résultats de la présente étude, les praticiens pourraient être déçus de réaliser qu'il n'existe pas une variable, qui à elle seule, permet d'établir la qualité de site pour l'érable à sucre hors de tout doute. L'explication à l'absence d'une telle variable s'explique d'une part par le fait qu'il existe plusieurs raisons pour lesquelles un site peut être plus ou moins productif pour une essence donnée. Ça peut être une carence en un élément nutritif donné, un sol trop peu profond ou un microclimat défavorable pour l'essence visée. D'autre part, il est fort probable que la détérioration de la qualité de site pour

l'érable à sucre par les précipitations acides complexifie de façon notable l'élaboration d'une classification des sites. En plus d'avoir à composer avec le fait que les individus d'un même peuplement aient été exposés à des conditions de croissance très variées, on doit tenir compte de la possibilité que la qualité de site qui a permis au peuplement de se développer n'est plus ce qu'elle était. Il est possible que sans cette interférence des précipitations acides, nous aurions pu voir une plus grande association entre la hauteur des érables d'une part et la croissance et le bois blanc d'autre part.

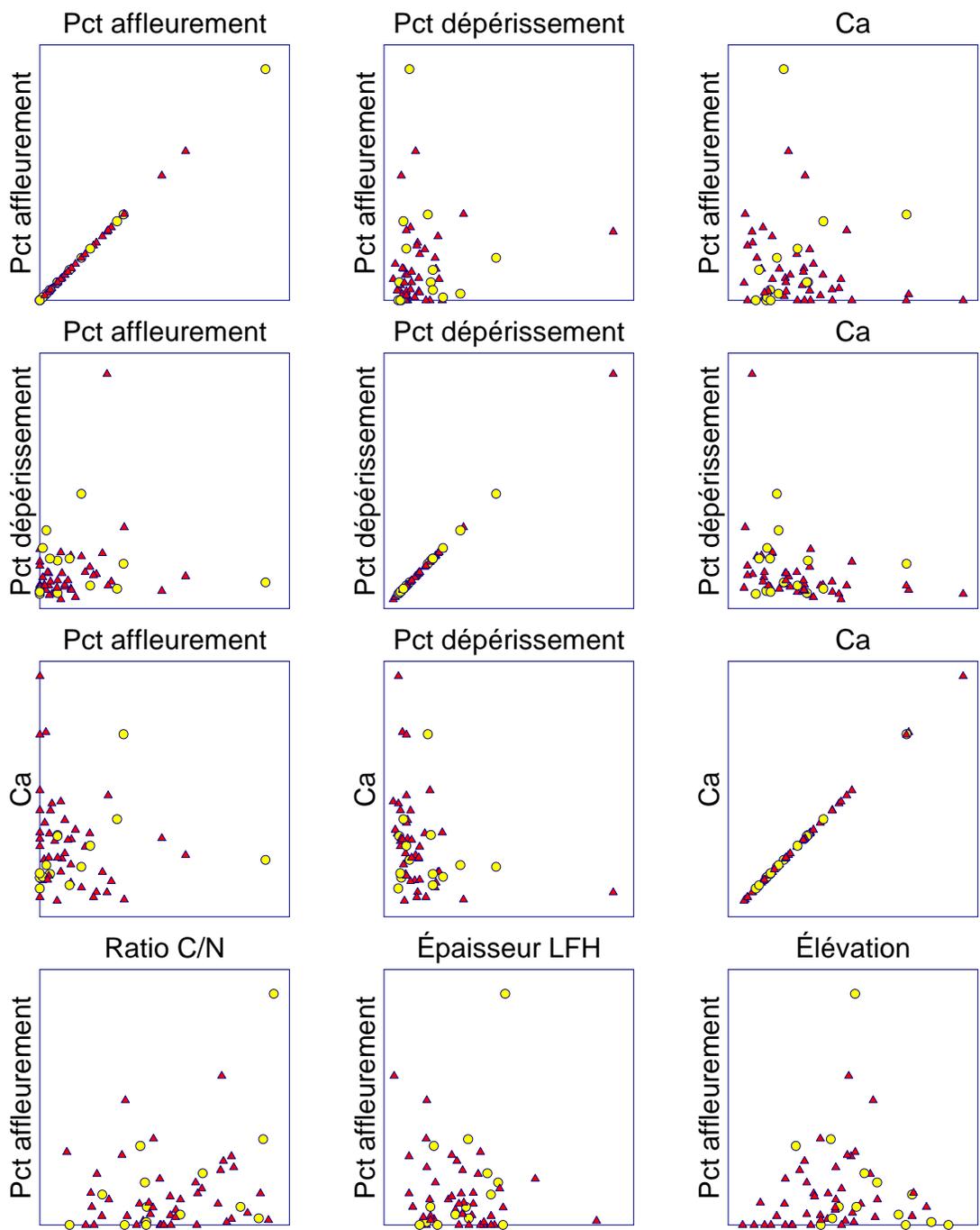
Devant une telle complexité et une telle variabilité, un réflexe pourrait être de se contenter de la « moyenne ». Ce genre d'attitude pourrait toutefois mener à des surprises comme celle de l'annonce de l'annonce des effets réels des coupes de jardinage en 2001 par Bédard et Brassard. Ainsi, nous proposons de mieux évaluer la qualité de site, ou pour le moins, d'identifier les sites pauvres en utilisant dans le cadre des inventaires d'intervention ou de prospection de nouveaux outils et moyens : une sonde pédologique, un pH-mètre, une sonde de Preissler et, si nécessaire, procéder à des analyses chimiques complètes des sols. Nous croyons que de telles mesures pourraient être prises sans engendrer des coûts énormes et permettraient d'établir des prescriptions sylvicoles beaucoup mieux appuyées. Ce que nous proposons est un changement, une évolution, mais ce n'est pas un défi énorme par rapport à d'autres changements vécus - telle l'instauration de la coupe de jardinage ou la mise en place de la norme MSCR – par le milieu de la forêt feuillue de l'Outaouais et du Québec.

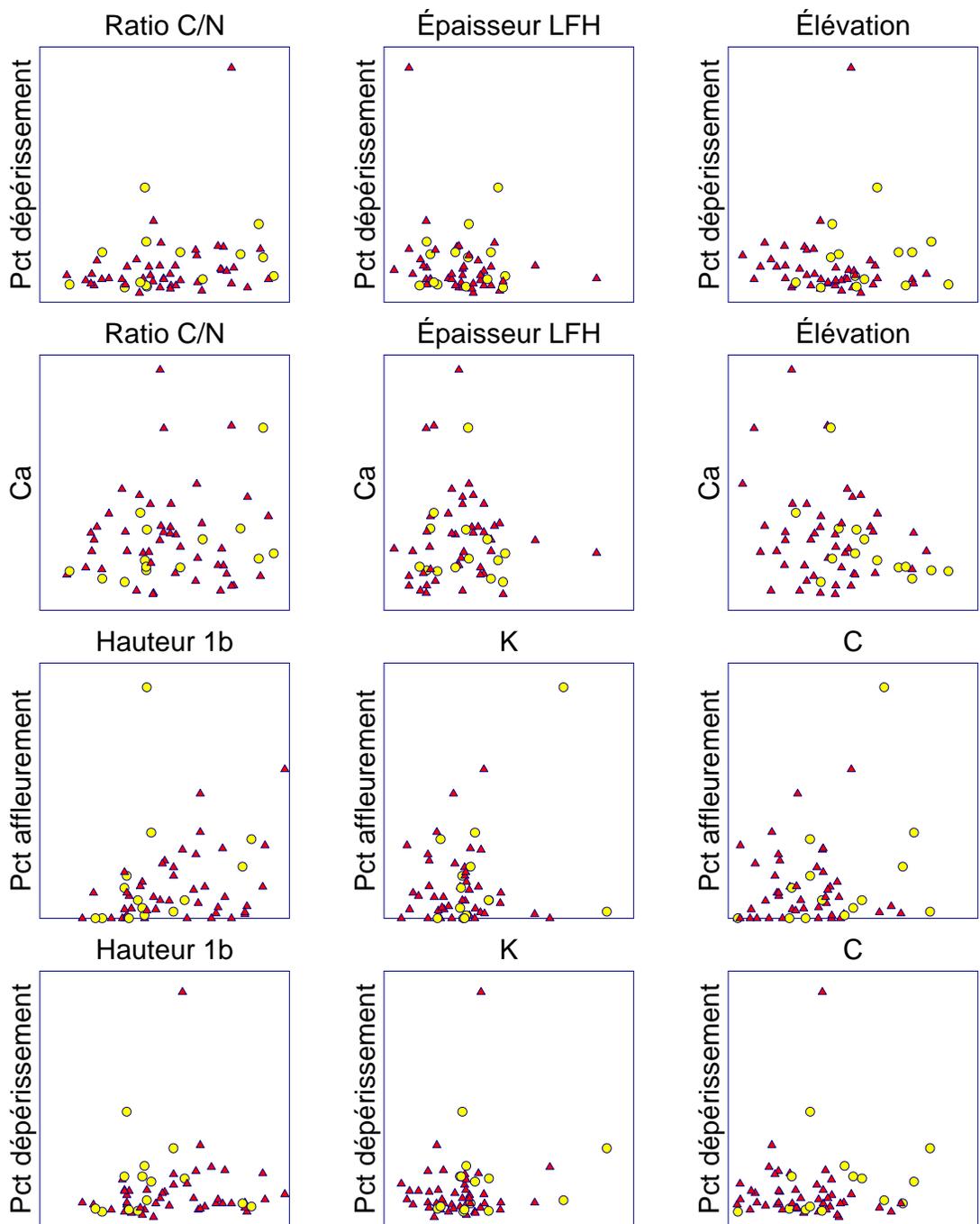
Références

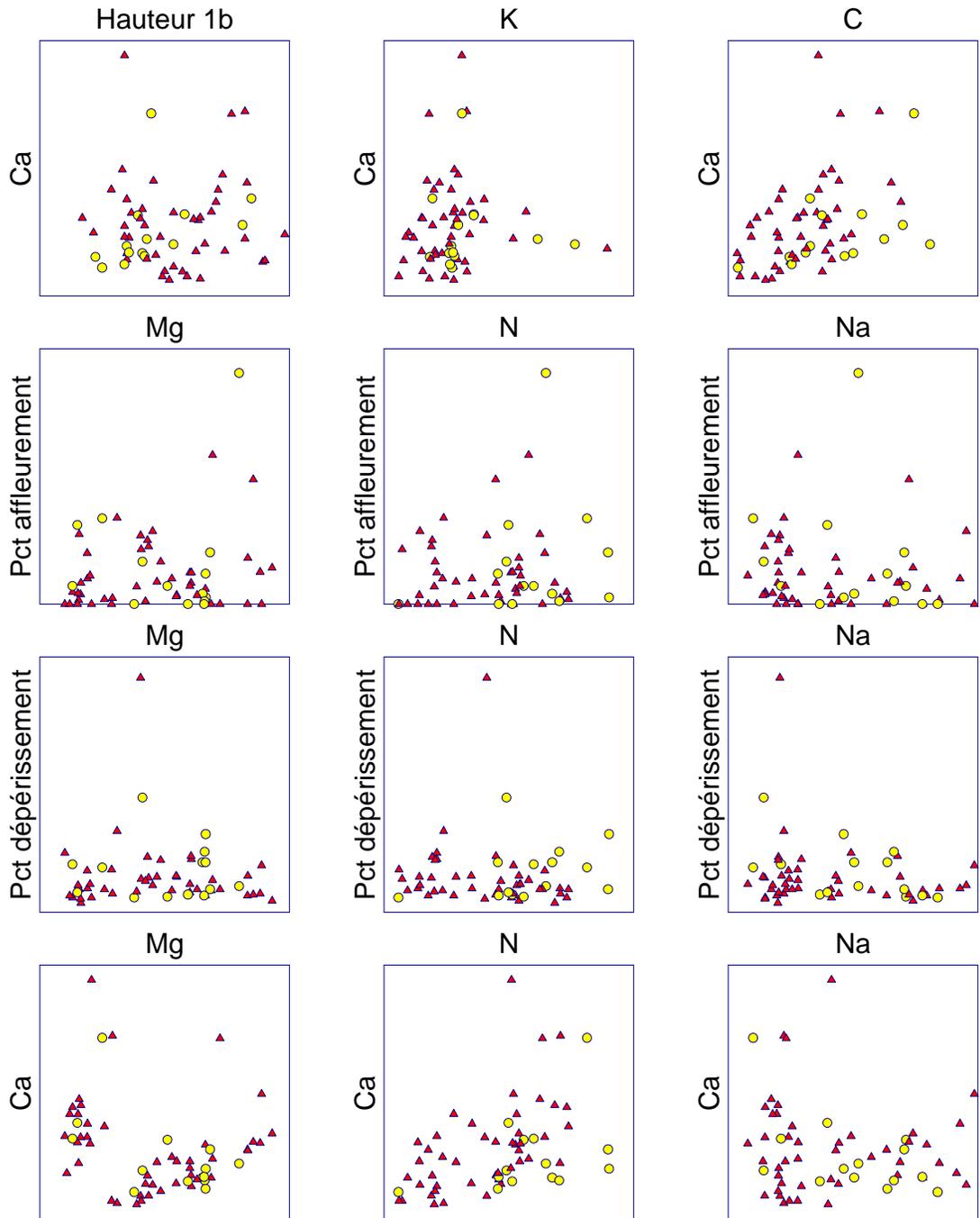
- Bédard, S. et Majcen, Z. 2003. Growth following single-tree selection cutting in Québec northern hardwoods. *The forestry chronicle*, 79 : 898-905.
- Bédard S., et Majcen. 2001. Ten-year response of sugar maple-yellow birch-beech stands to selection cutting in Quebec. *Northern Journal of Applied Forestry* **18**:119-126.
- Bédard S., Meunier S., Blais L. et Majcen Z. Les effets réels des coupes de jardinage dans les forêts publiques du Québec de 1995 à 1998. 483, -48. 2004. Gouvernement du Québec, Ministère des ressources naturelles, de la Faune et des Parcs.
- Duchesne, L., R. Ouimet, et D. Houle. 2002. Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health, and soil nutrients. *Journal of Environmental Quality* **31**:1676-1683.
- Forget, E., P. Nolet, F. Doyon, S. Delagrangé, et Y. Jardon. 2007. Ten-year response of northern hardwood stands to commercial selection cutting in southern Quebec, Canada. *Forest Ecology and Management* **242**:764-775.
- Hintze J.L. NCSS and Pass. Number Cruncher Statistical Systems. Kaysville, Utah. www.ncss.com. 2004.
- Horsley, S. B., S. W. Bailey, T. E. Ristau, R. P. Long, et R. A. Hallett. 2008. Linking environmental gradients, species composition, and vegetation indicators of sugar maple health in the northeastern United States. *Canadian Journal of Forest Research* **38**:1761-1774.
- Horsley, S. B., R. P. Long, S. W. Bailey, R. A. Hallett, et T. J. Hall. 2000. Factors associated with the decline disease of sugar maple on the allegheny plateau. *Canadian Journal of Forest Research* **30**:1365-1378.
- Juice S.M., Fahey T.J., Siccama T.G., Driscoll C.T., Denny E.G., Eagar C., Cleavitt N.L., Minocha R., et Richardson A.D. 2006. Response of sugar maple to calcium addition to northern hardwood forest. *Ecology* **87**:1267-1280.
- Majcen Z. Résultats après 10 ans d'un essai de coupe jardinatoire dans une érablière. 1995. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, direction de la recherche forestière.
- Moore, J. D., C. Camiré, et R. Ouimet. 2000. Effects of liming on the nutrition, vigor, and growth of sugar maple at the Lake Clair

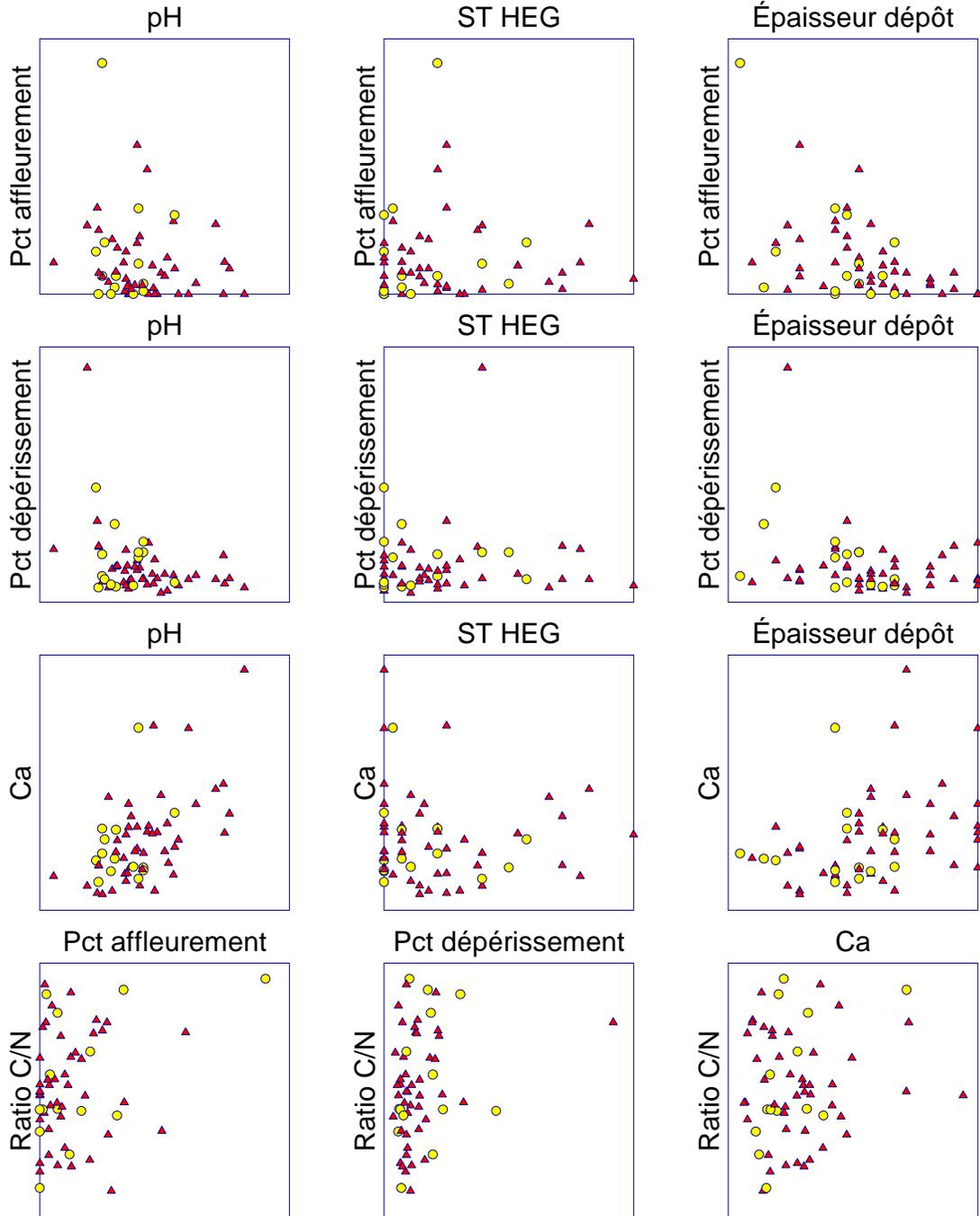
- Watershed, Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* **30**:725-732.
- Moore, J. D., et R. Ouimet. 2006. Ten-year effect of dolomitic lime on the nutrition, crown vigor, and growth of sugar maple. *Canadian Journal of Forest Research* **36**:1834-1841.
- Niese, J. N., et T. F. Strong. 1992. Economic and Tree Diversity Trade-Offs in Managed Northern Hardwoods. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere* **22**:1807-1813.
- Nolet P. et Bouffard D. Étude préliminaire des causes de mortalité 10 ans après jardinage. -26. 2005. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Qc.
- Nolet P., Forget E., Bouffard D. et Doyon F. 2001 Reconstitution historique du dynamisme du paysage forestier du bassin de La Lievre au cours du 20ième siècle. 114 p.. Ripon, Qc. Canada., Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue.
- Nolet, P., H. Hartmann, D. Bouffard, et F. Doyon. 2007. Predicted and observed sugar maple mortality in relation to site quality indicators. *Northern Journal of Applied Forestry* **24**:258-264.
- Nolet, P. 2009. Diminution de la croissance de l'érable à sucre : analyse comparative avec le hêtre à grandes feuilles. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, Ripon, Québec. Rapport Scientifique, 34 p.
- OMNR. Ontario Tree Marking Guide, Version 1.1. Ont. Min. Nat. Resour. 2004. Toronto, Ontario, Canada. 252 p., Queen's Printer for Ontario.
- PiBlue. 2007. Optworks: Excel. http://www.piblue.com/products/optworks_ex.html. Web site.
- Sharpe, W. E. 2002. Acid deposition explains sugar maple decline in the east. *BioScience* **52**:5.
- Strong, T. F. 1992. Productivity of even-age, second-growth northern hardwoods brought under uneven-aged management. USDA .
- Whitney, G. G. 1987. An ecological history of the Great Lakes forest of Michigan. *Journal of Ecology* **75**:667-684.
- Wiemann M.C., Schuler T.M. et Baumgras J.E. 2004. Effects of Uneven-Aged and Diameter-Limit Management on West Virginia Tree and Wood Quality. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-621.

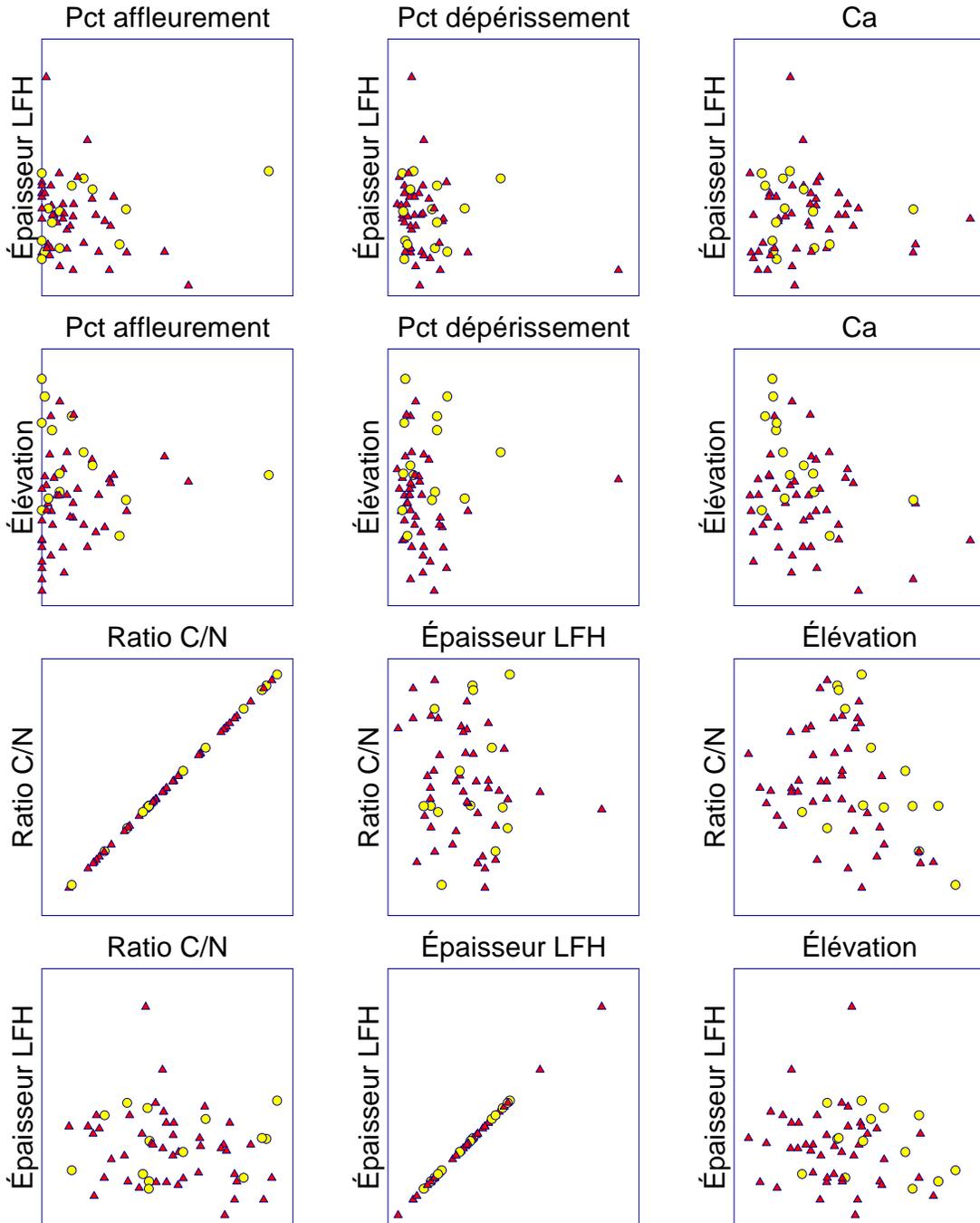
Annexe 1 : Graphiques ayant servi à l'analyse visuelle pour l'ICQS

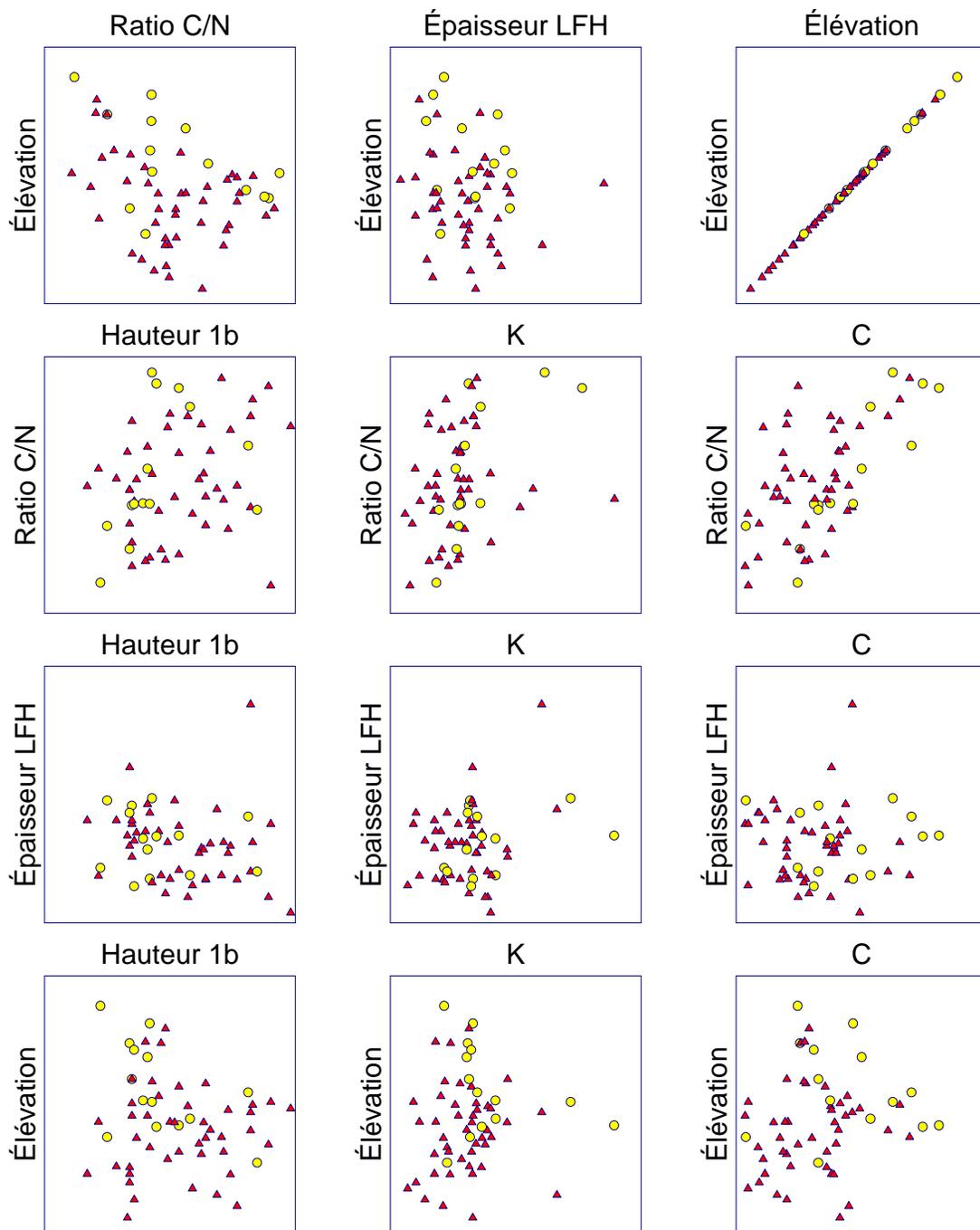


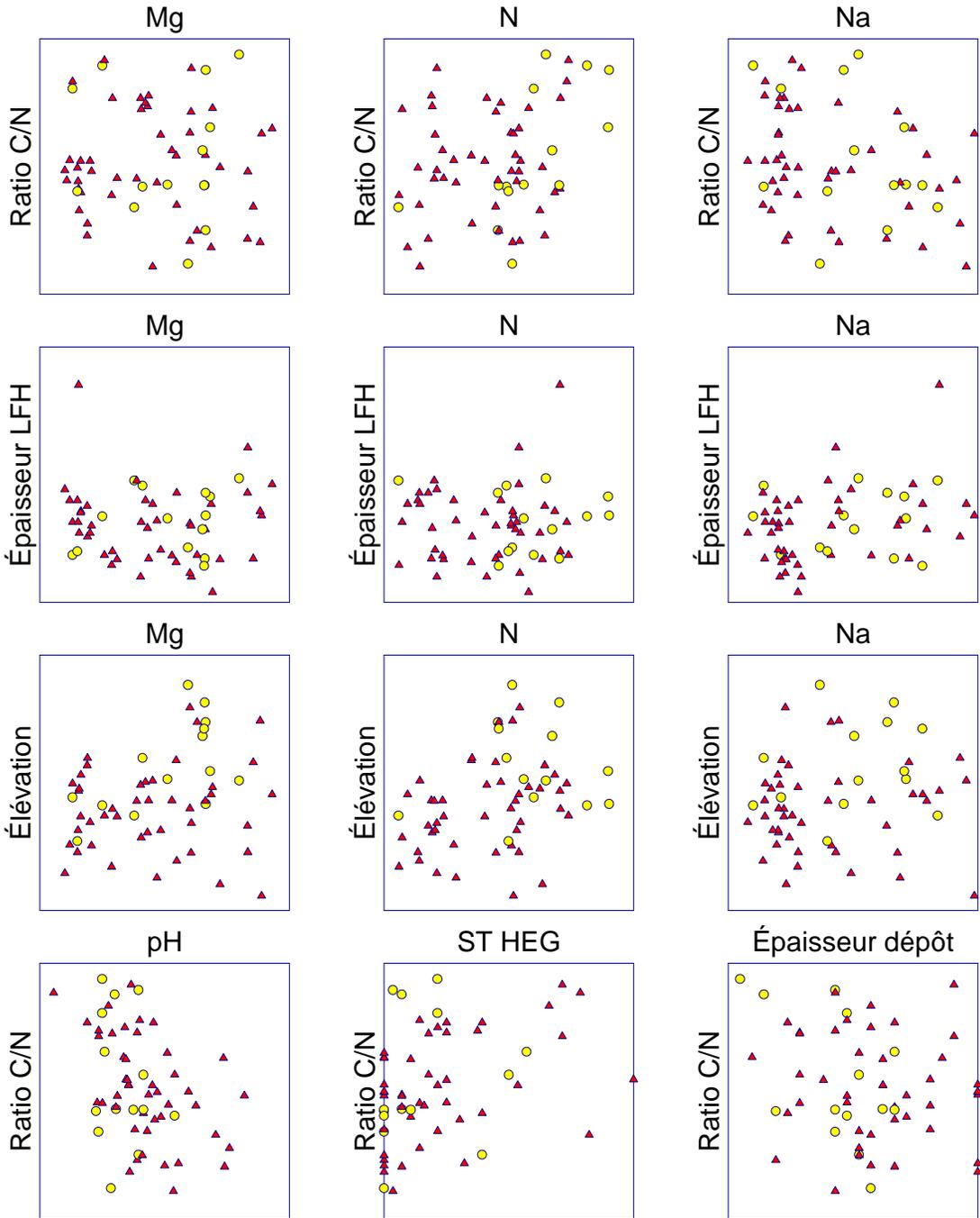


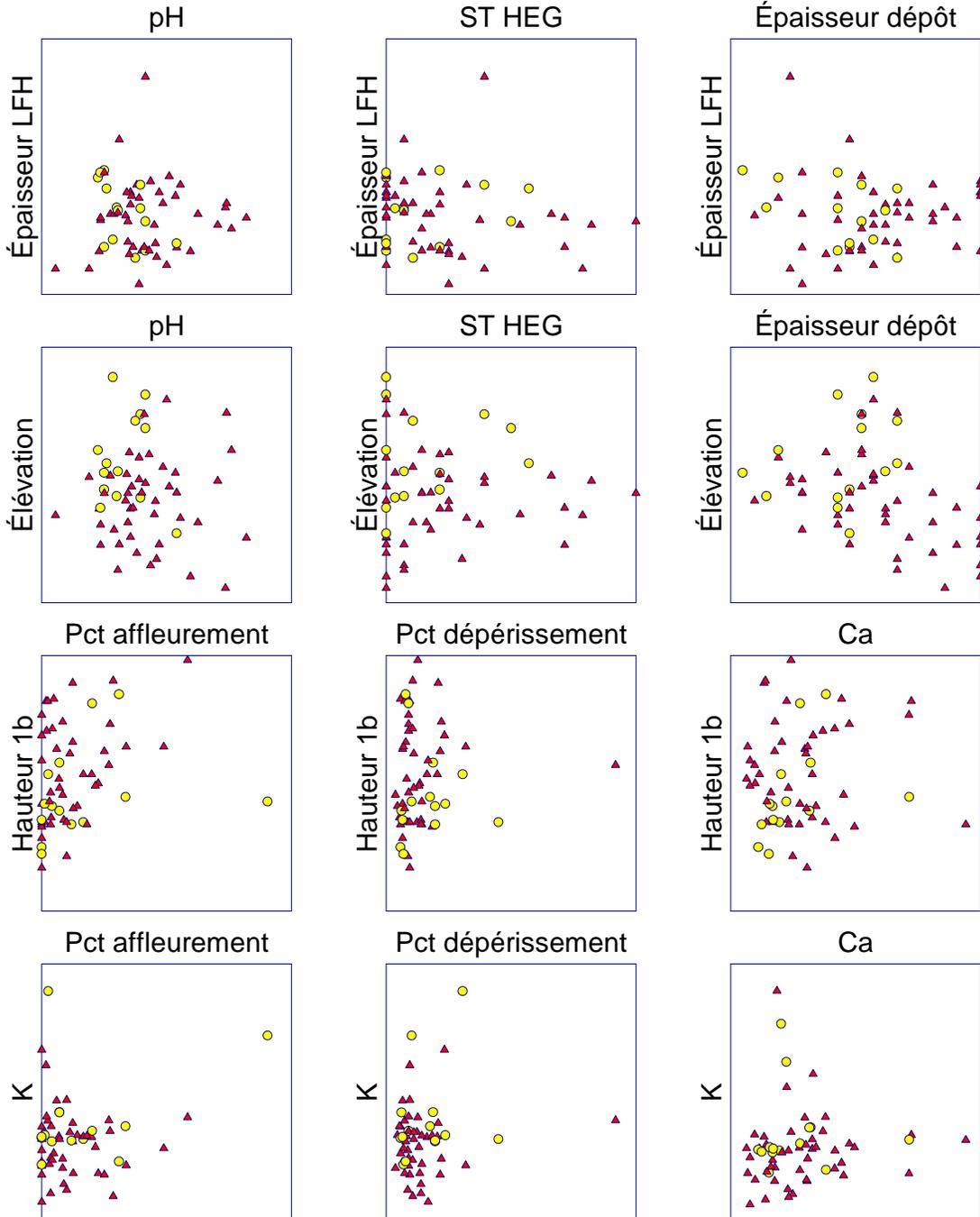


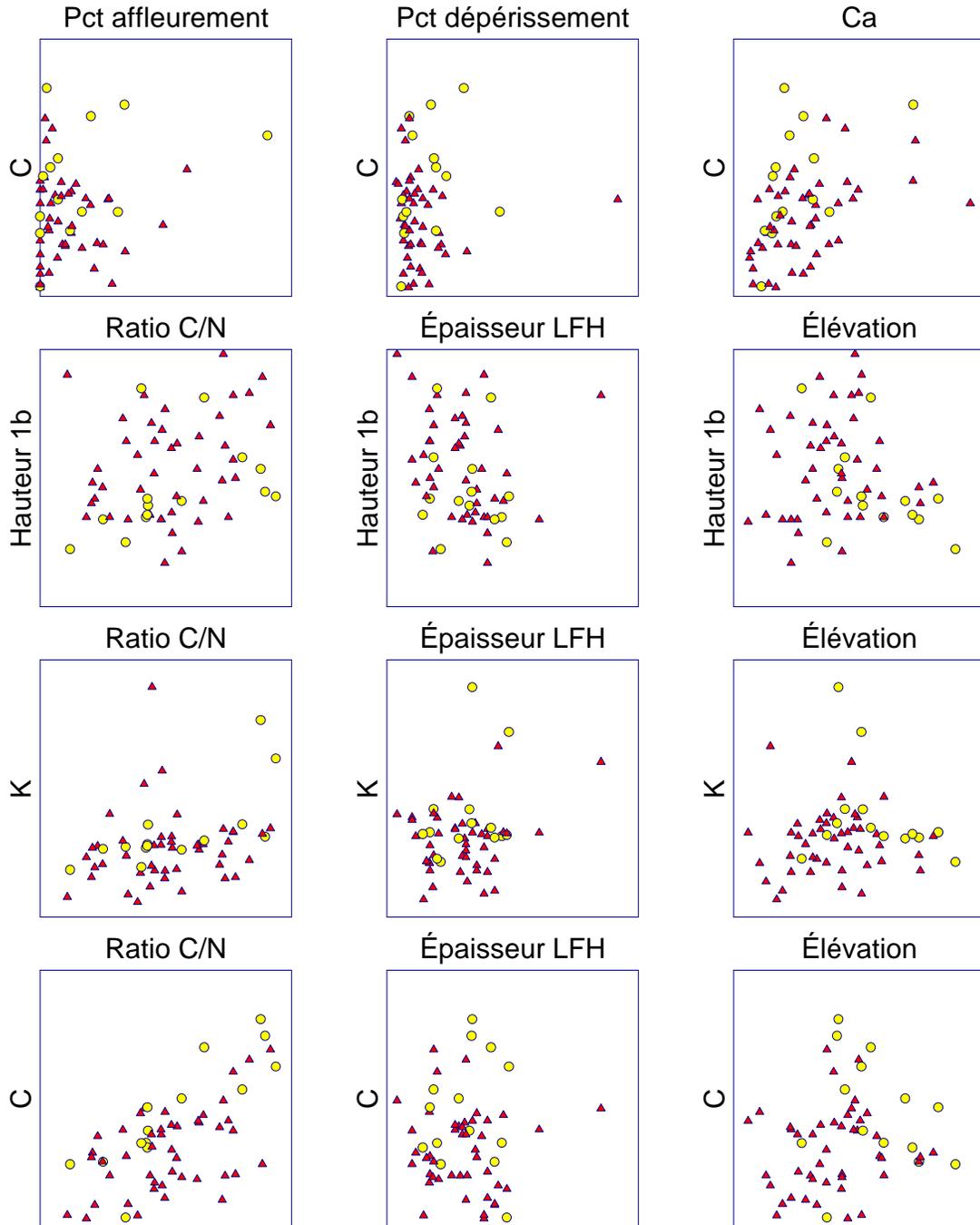


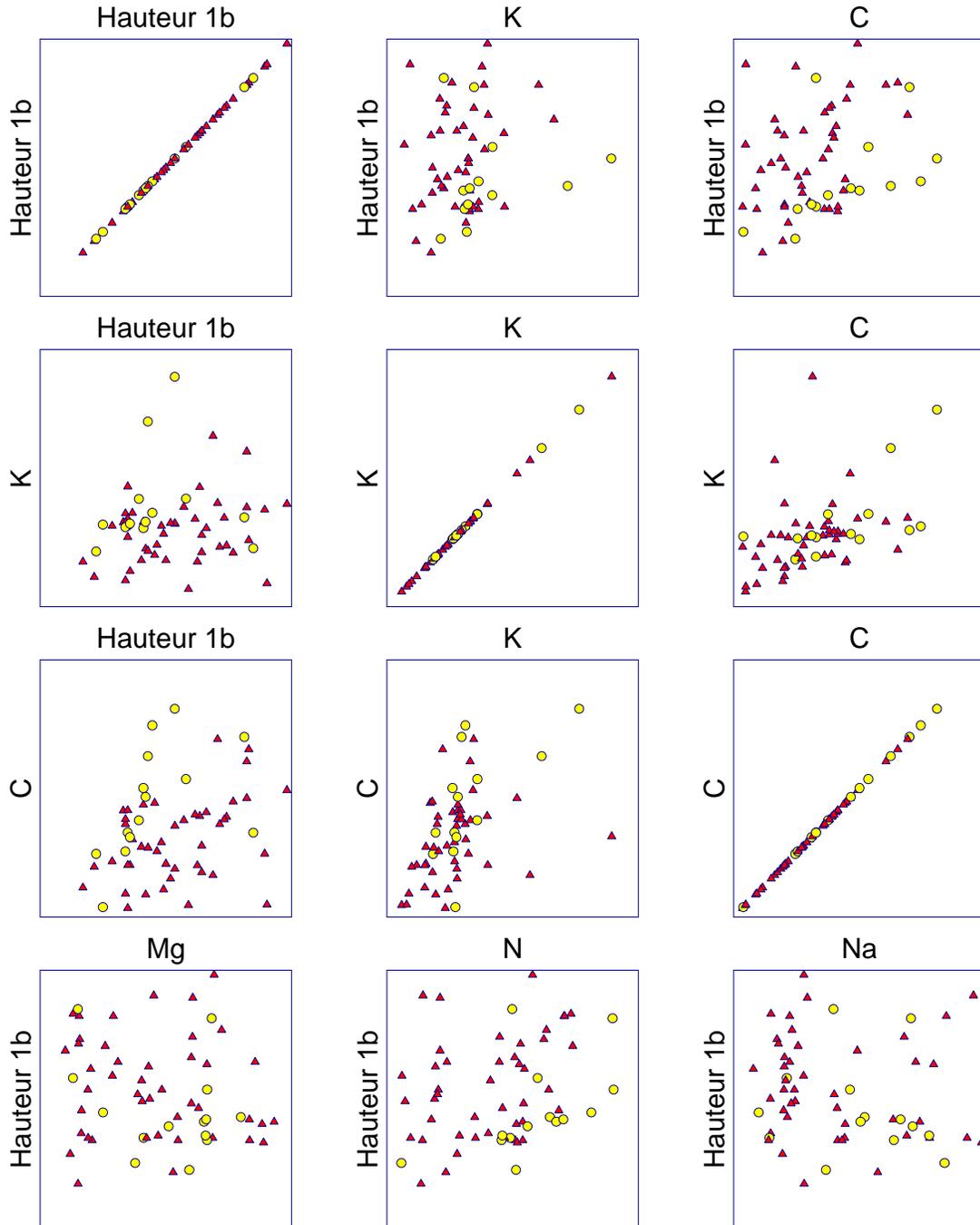


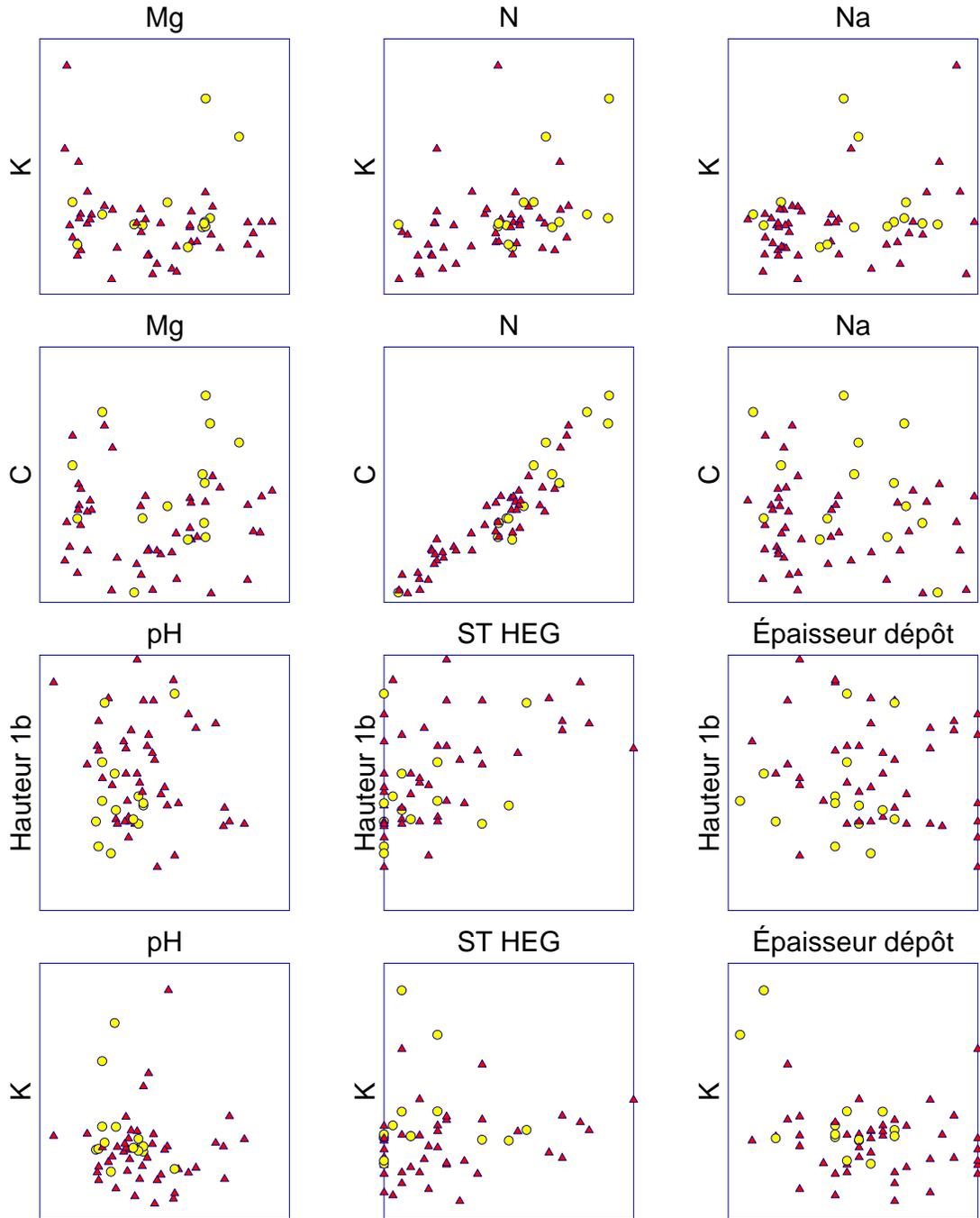


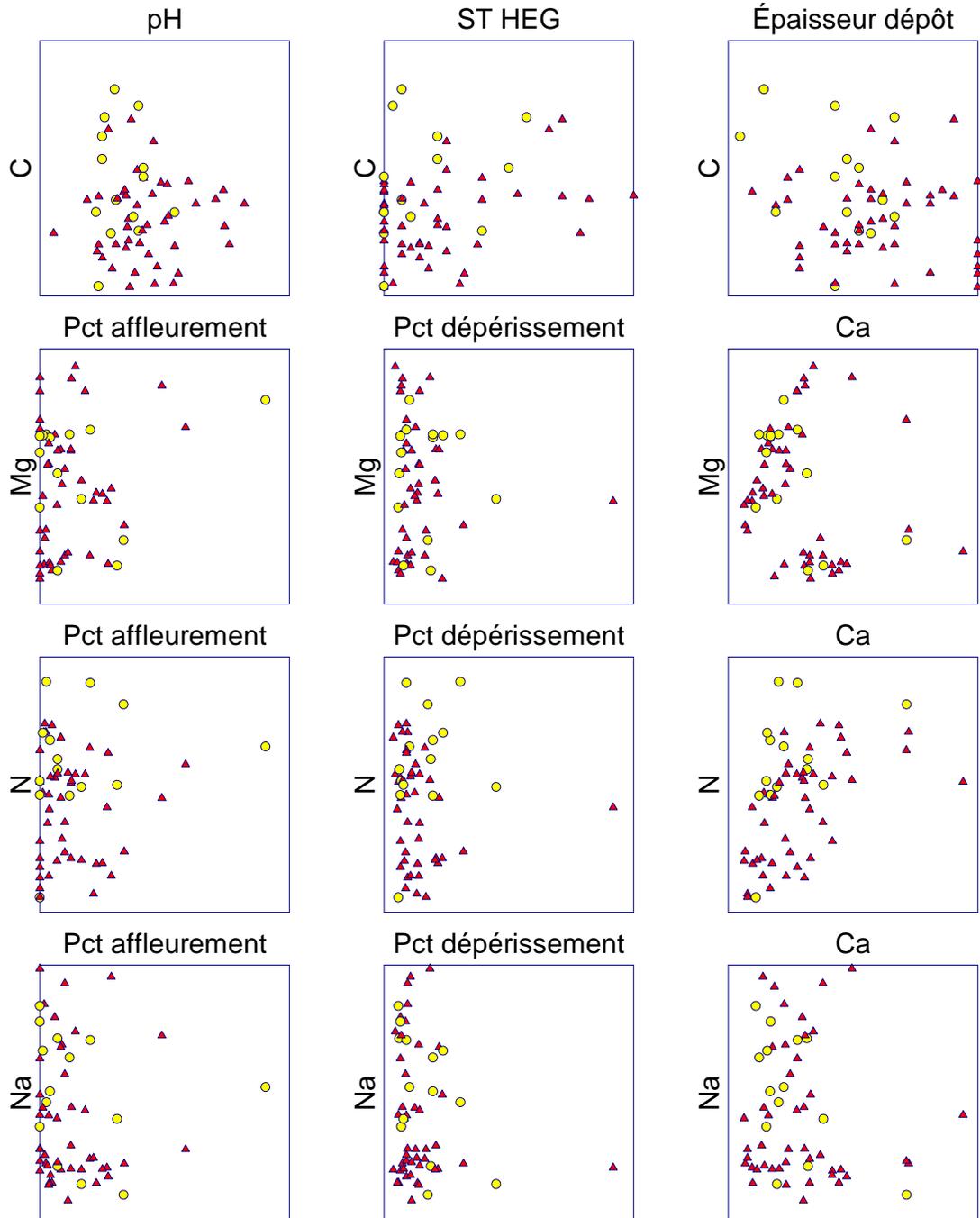


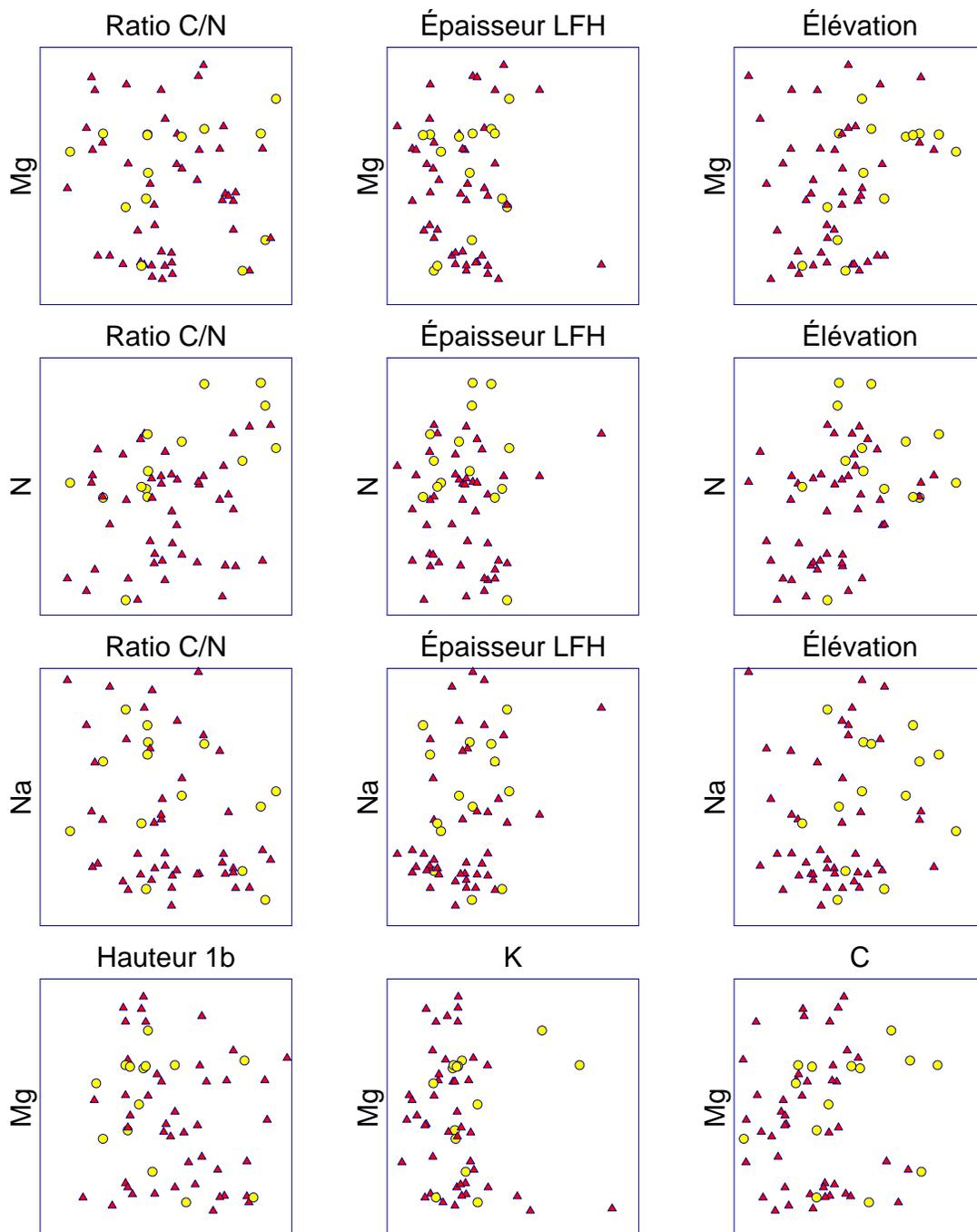


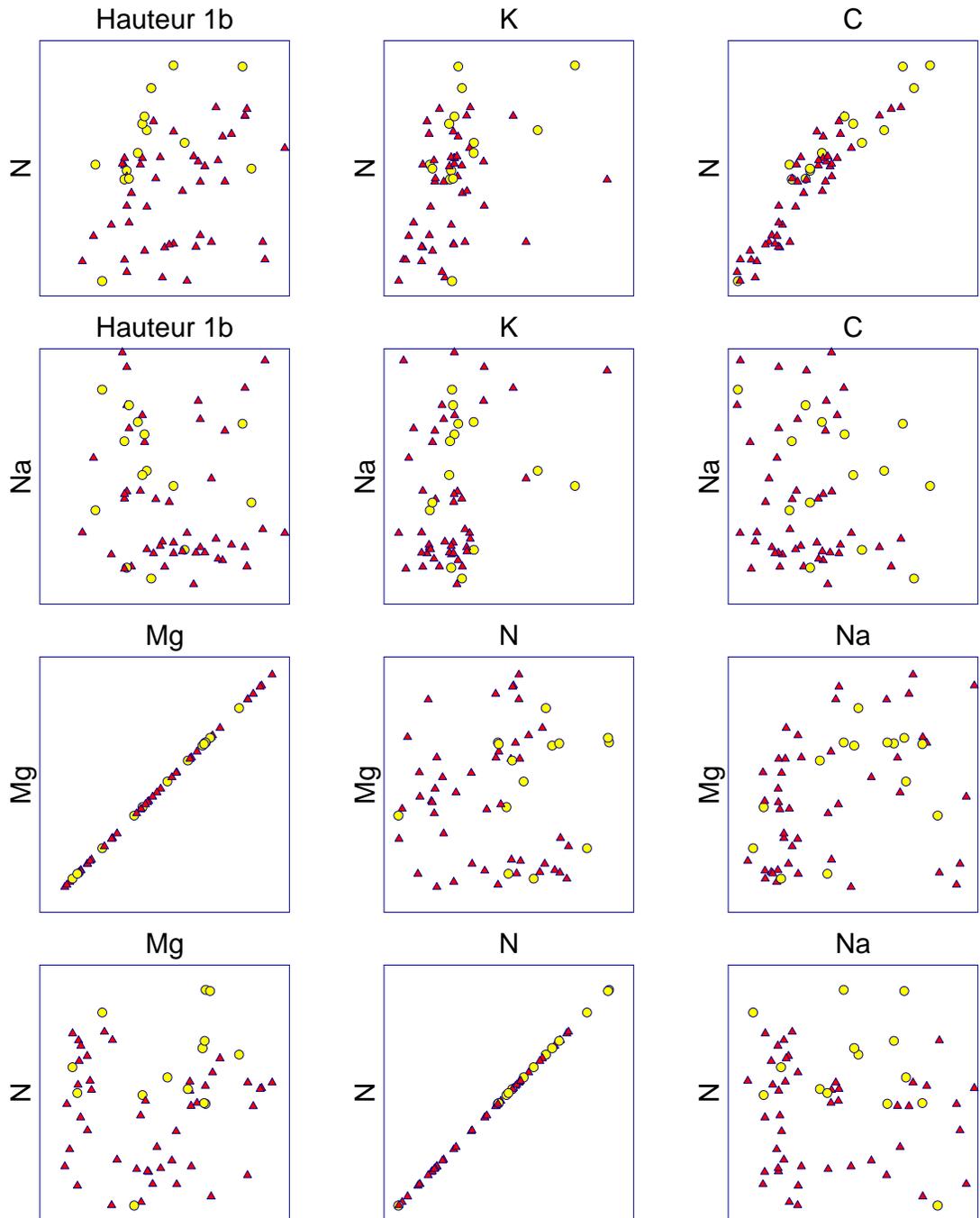


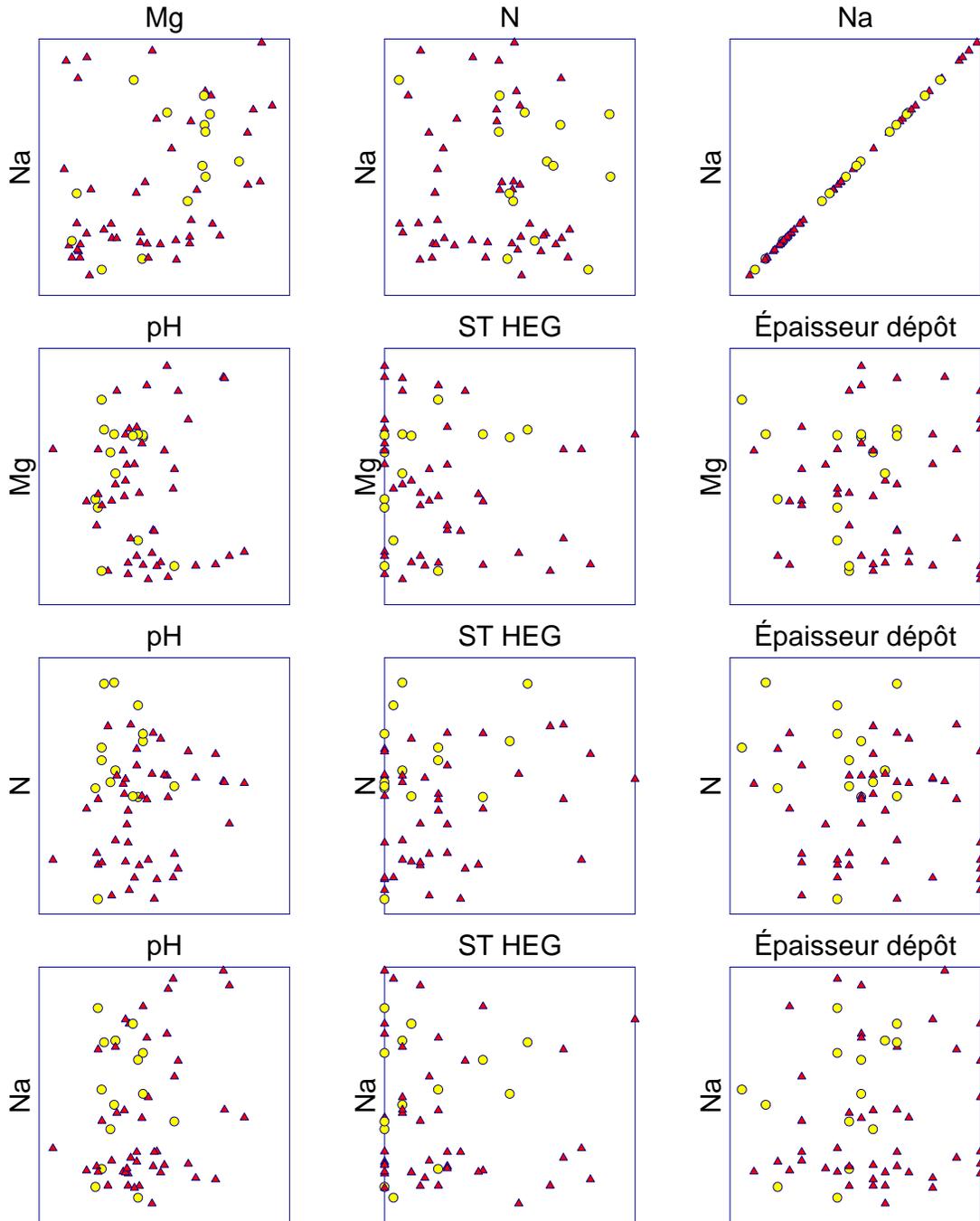


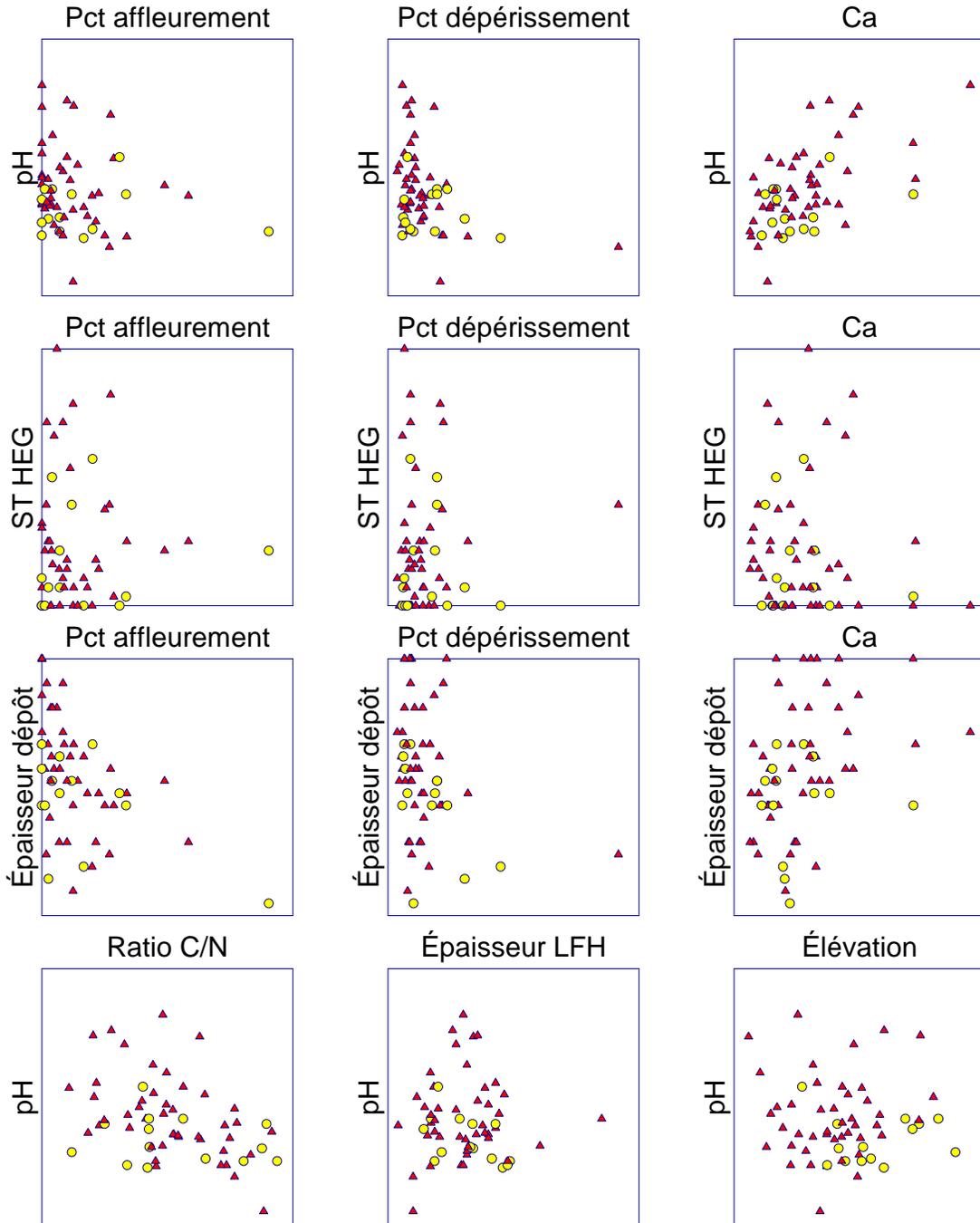


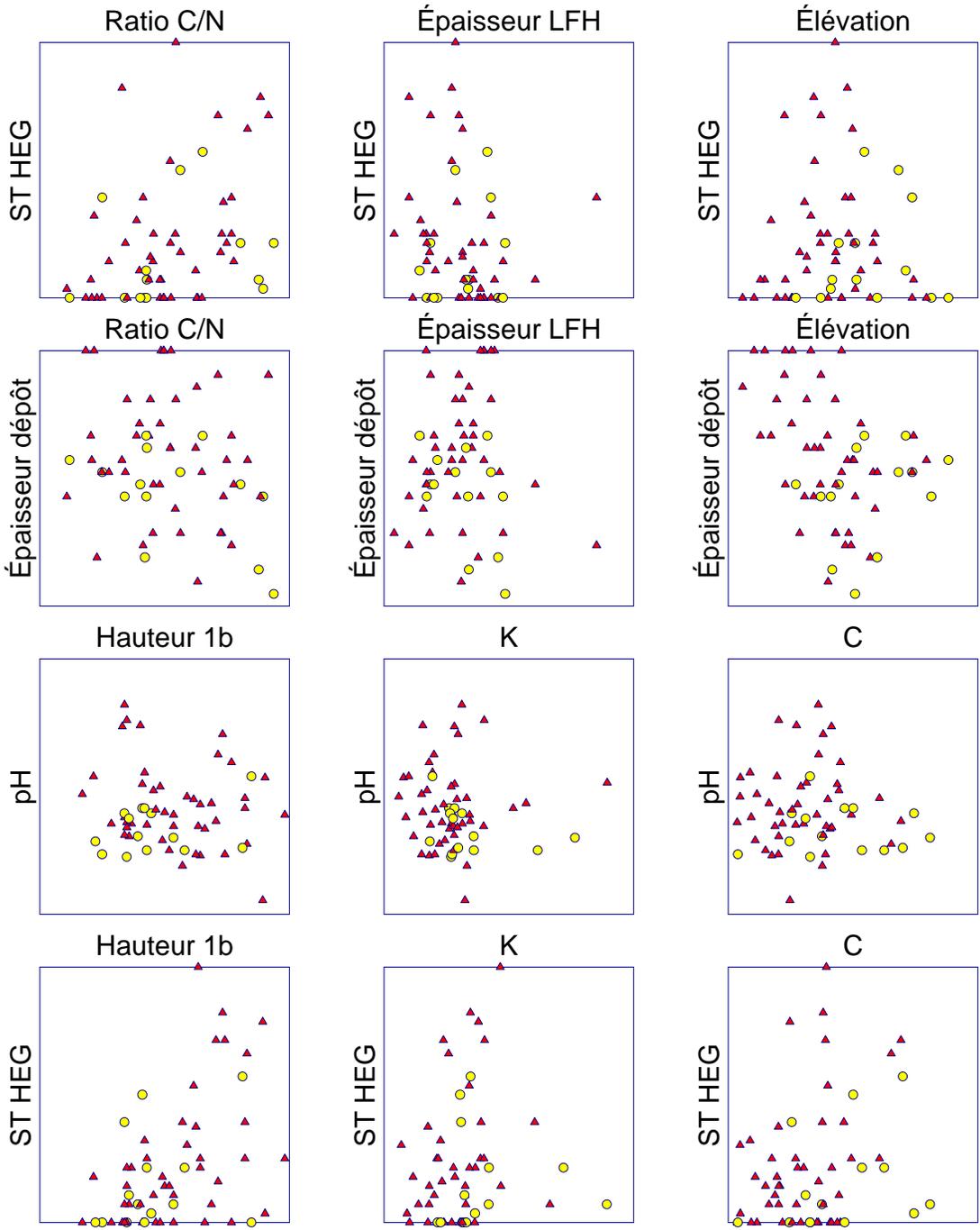


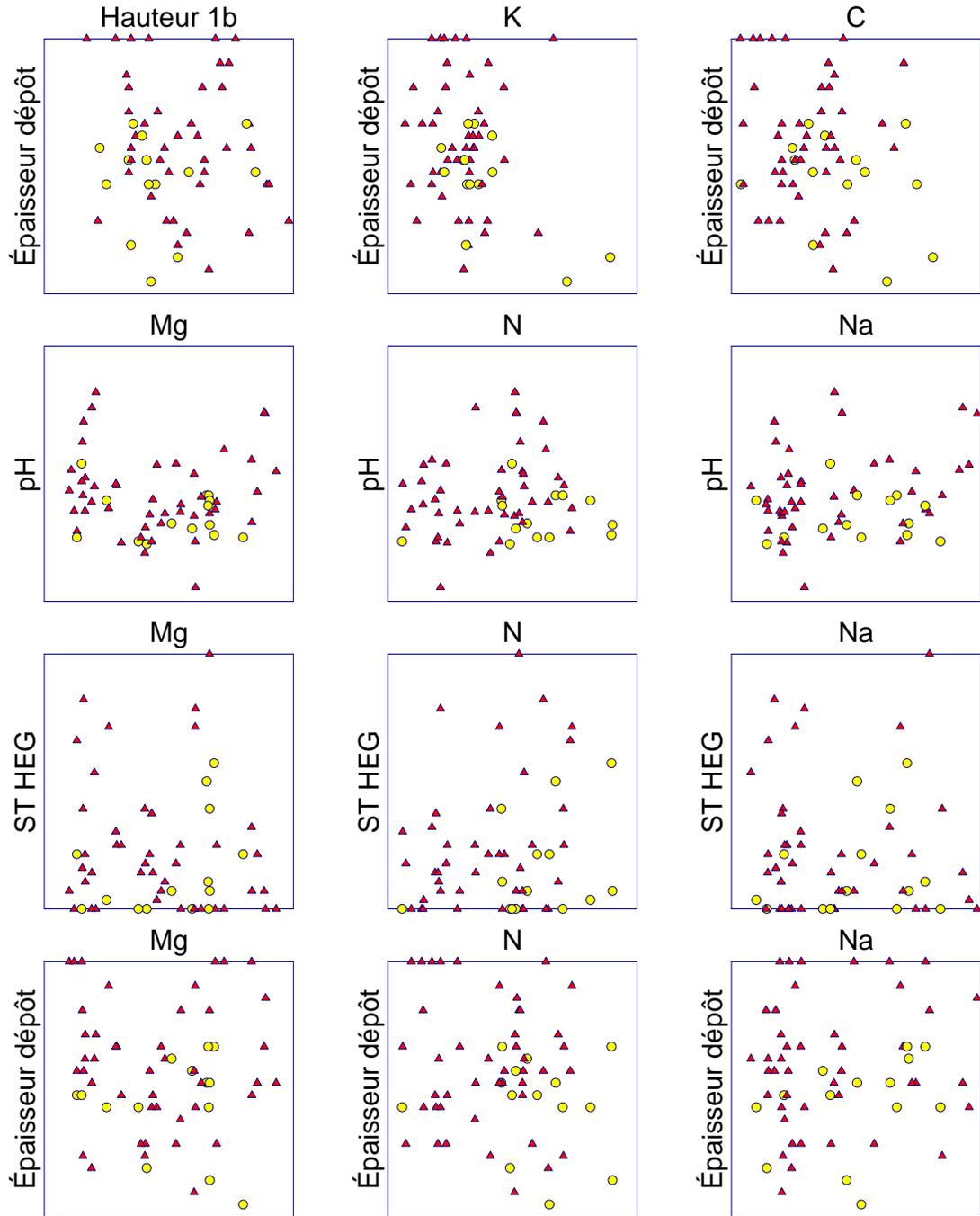


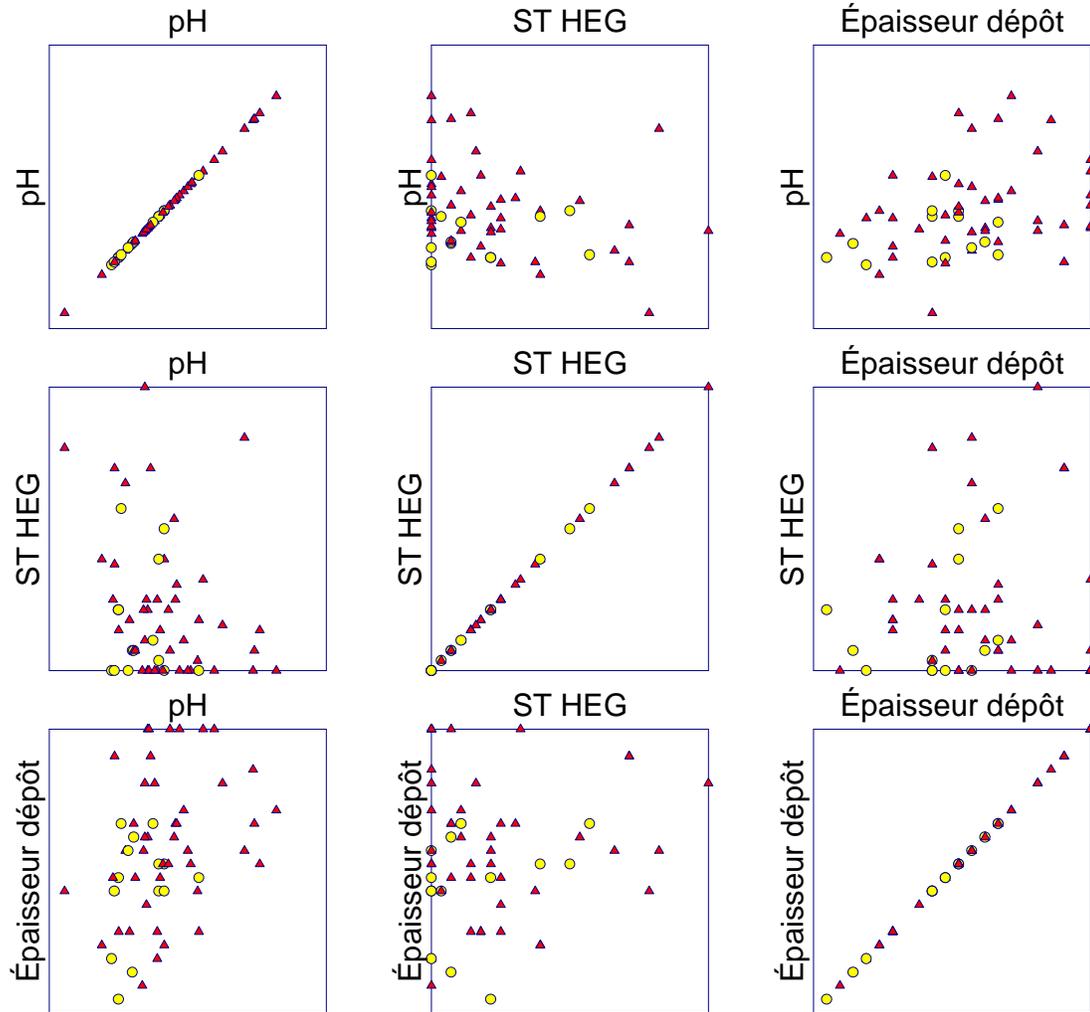




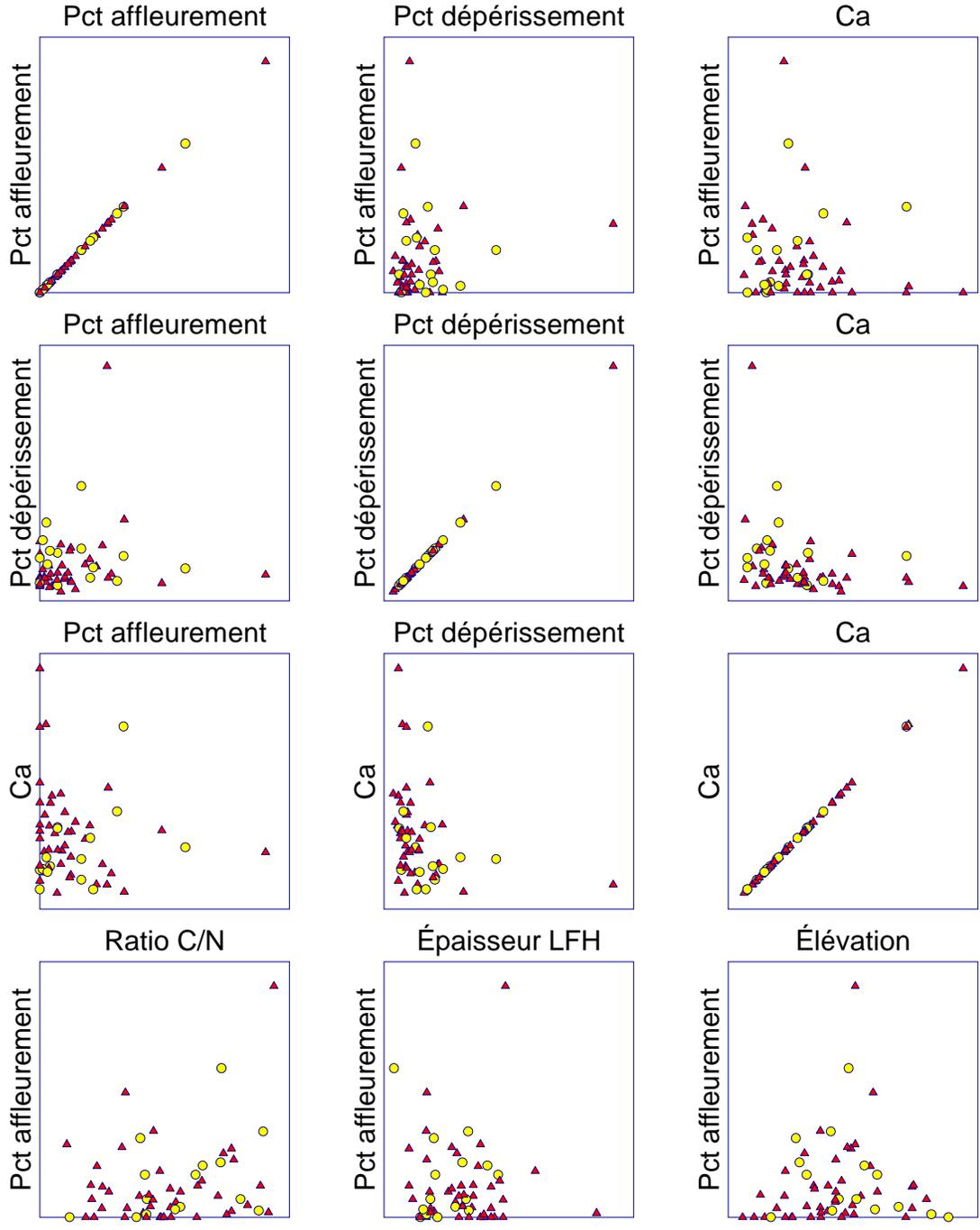


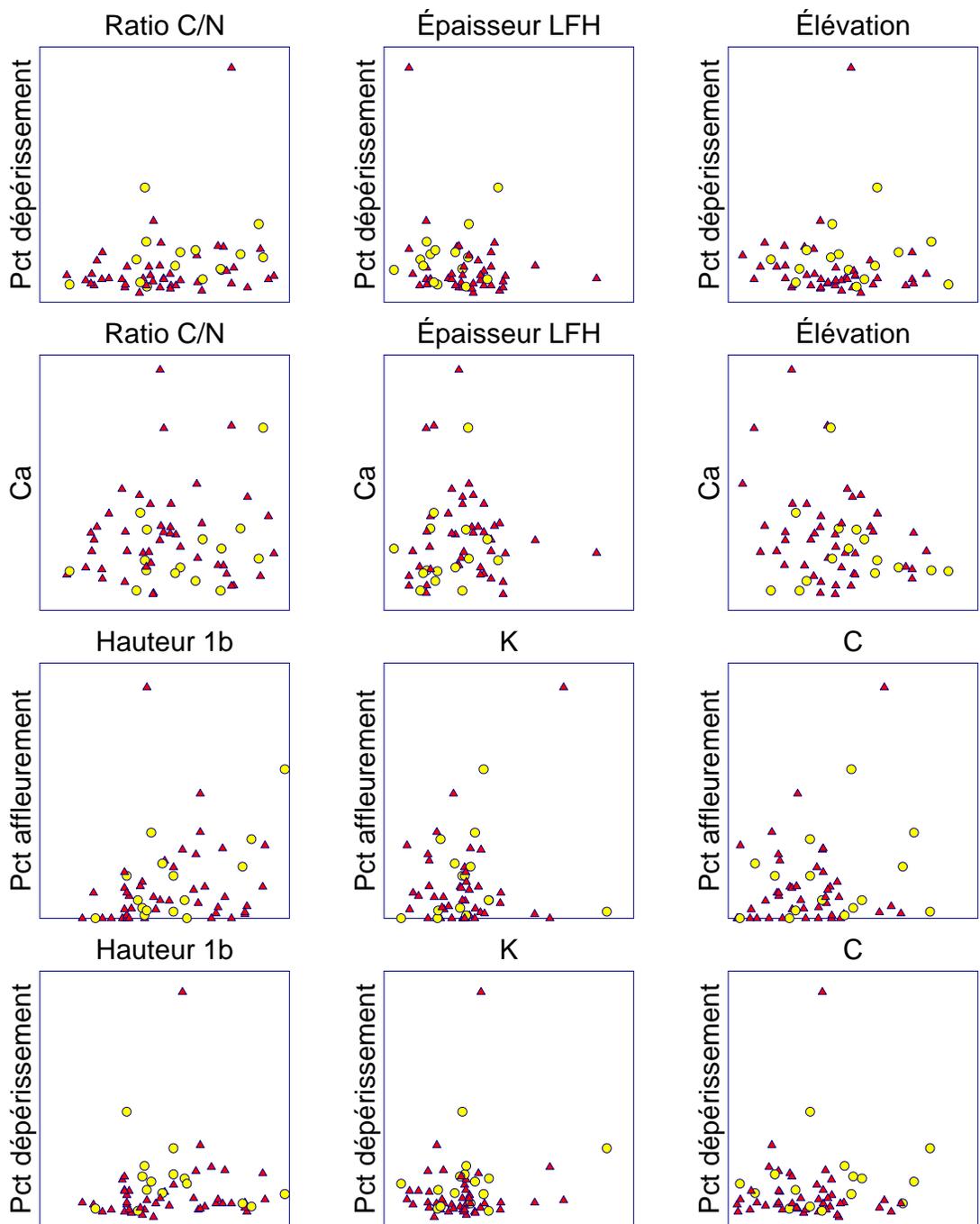


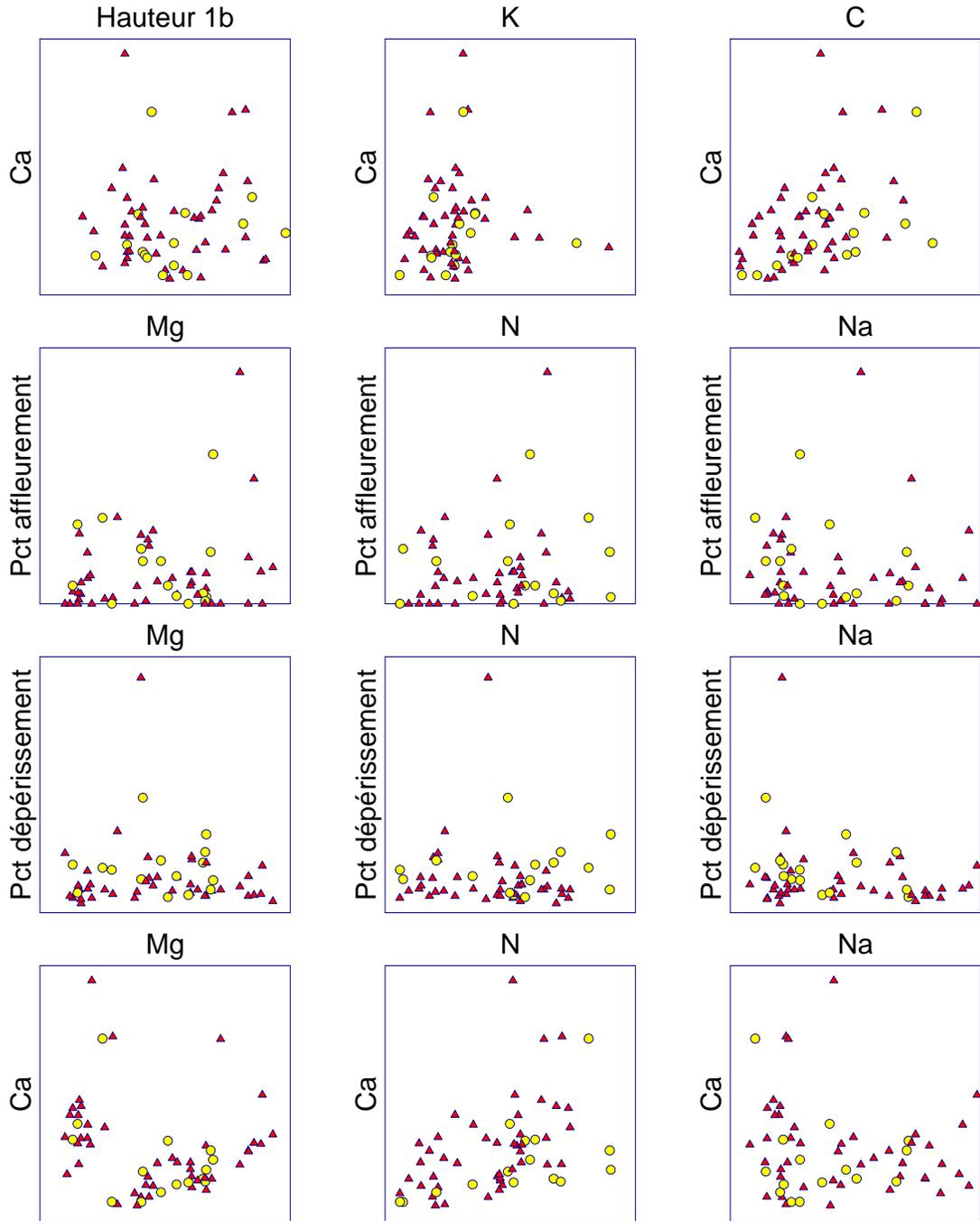


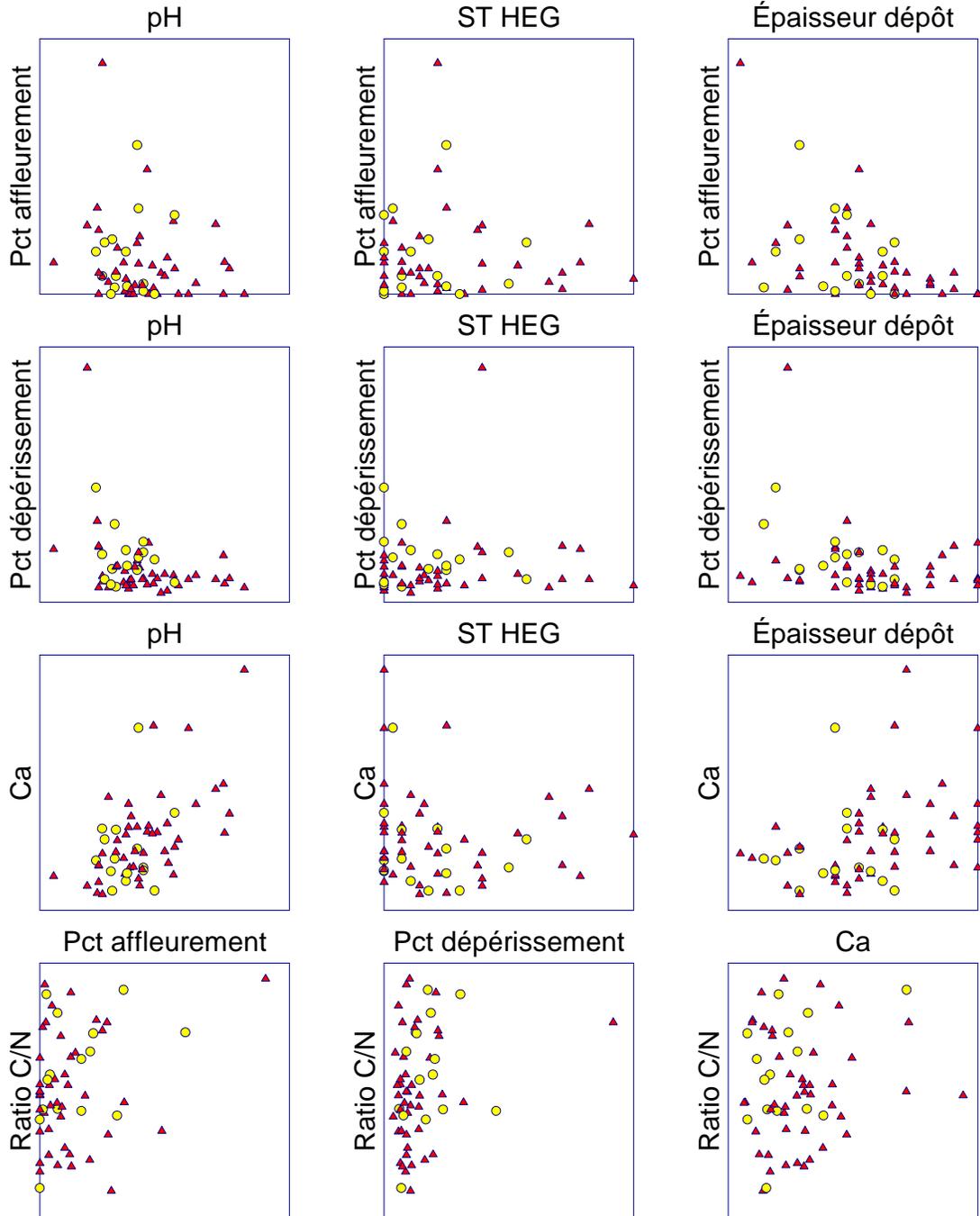


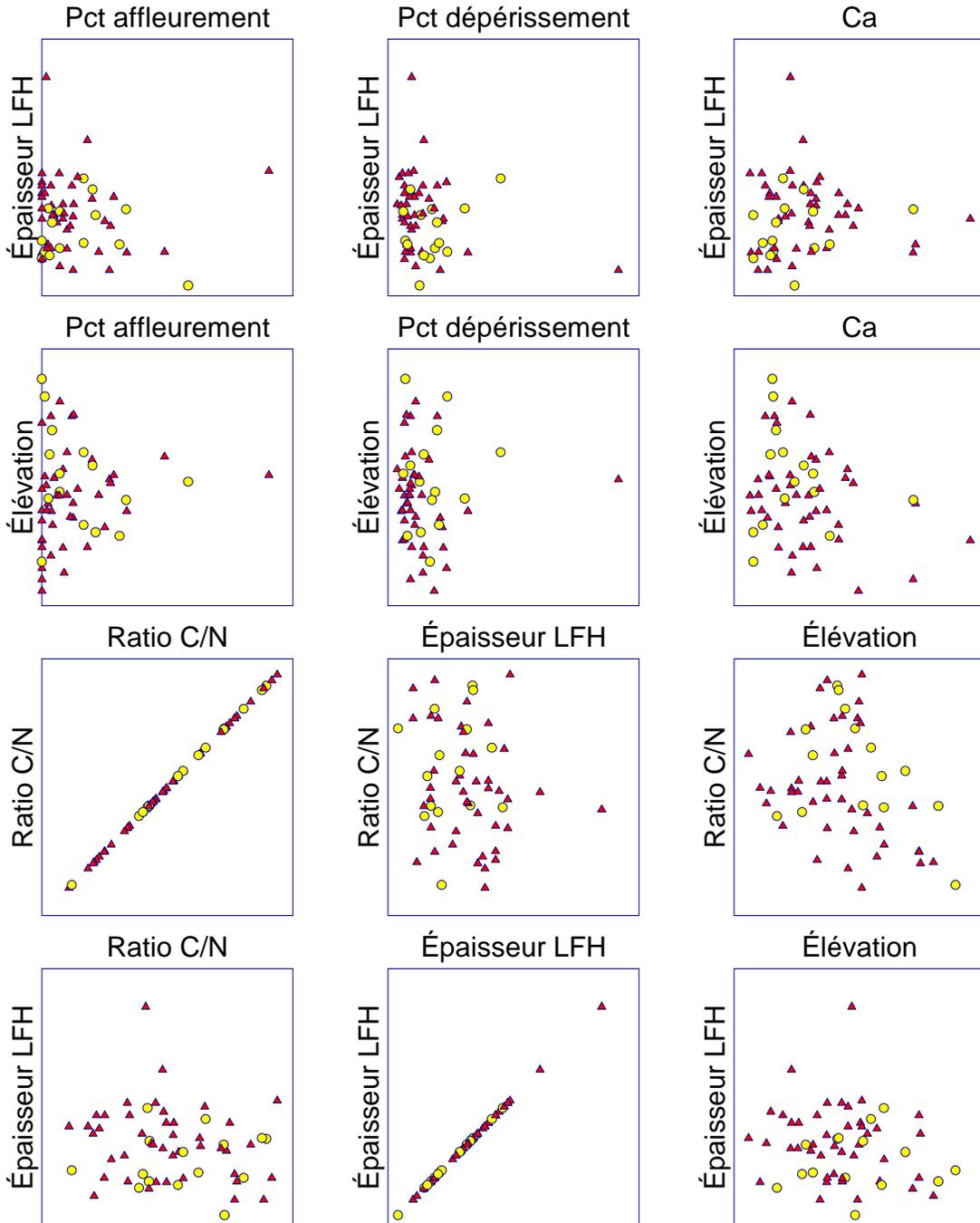
Annexe 2 : Graphiques ayant servi à l'analyse visuelle pour la croissance

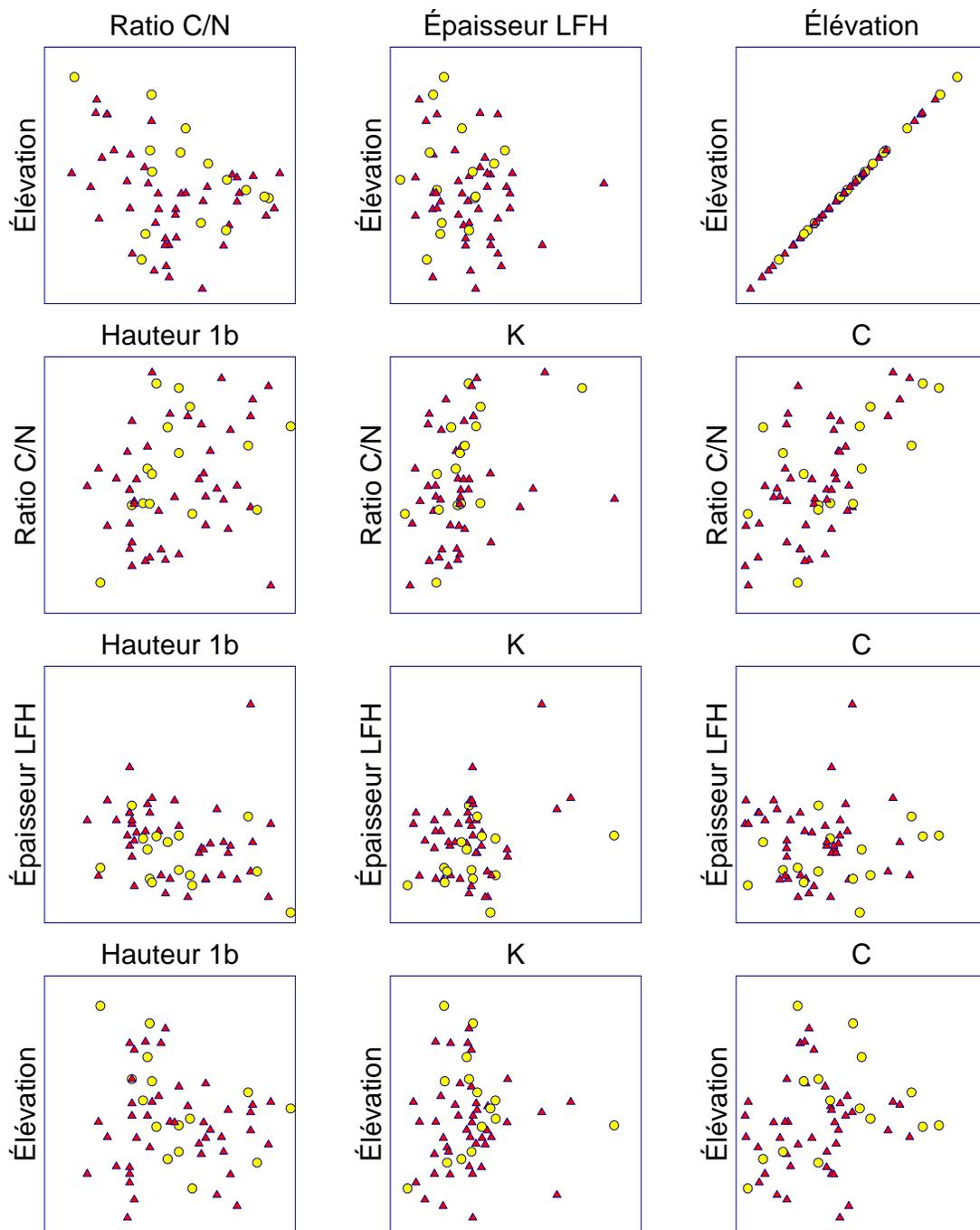


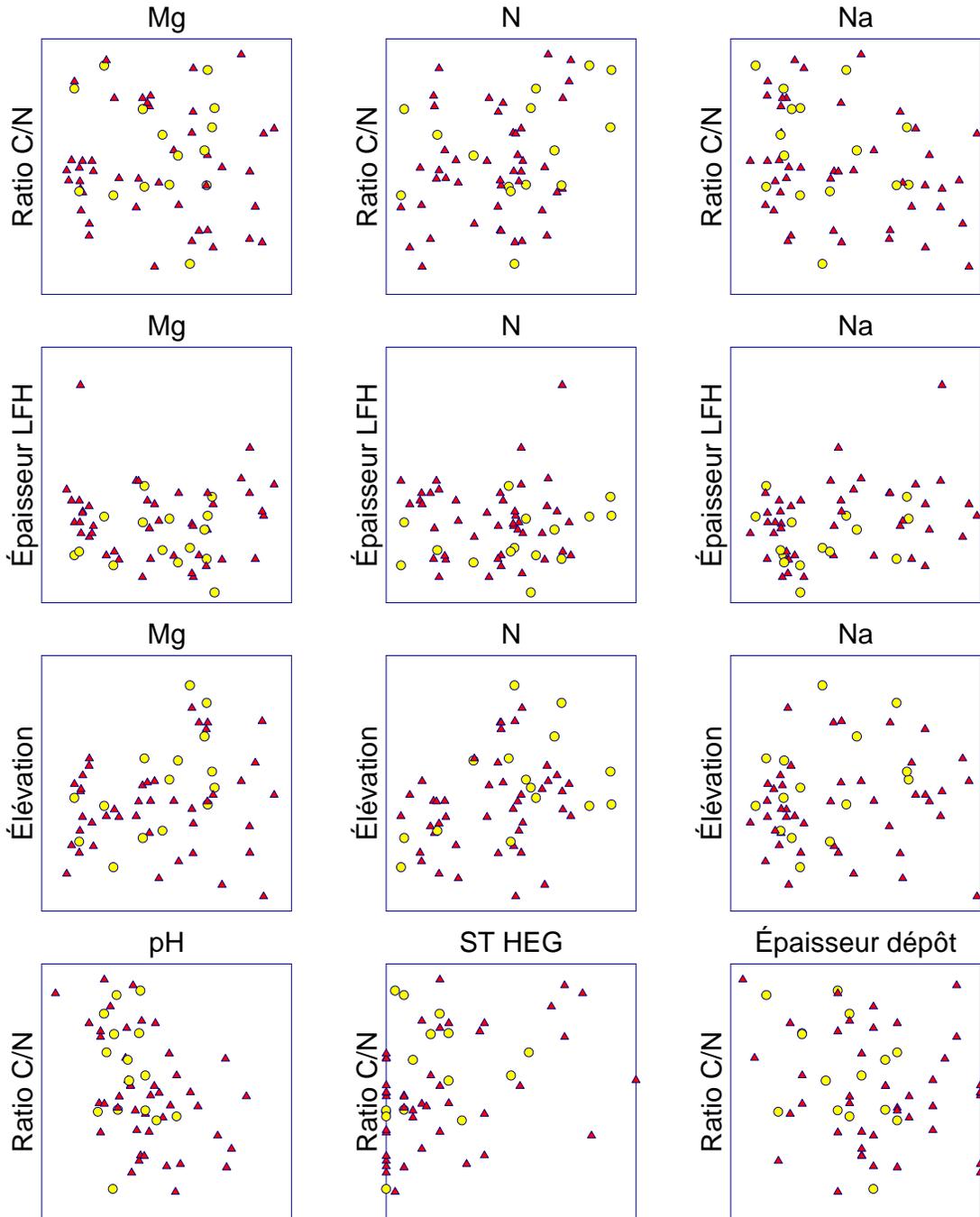


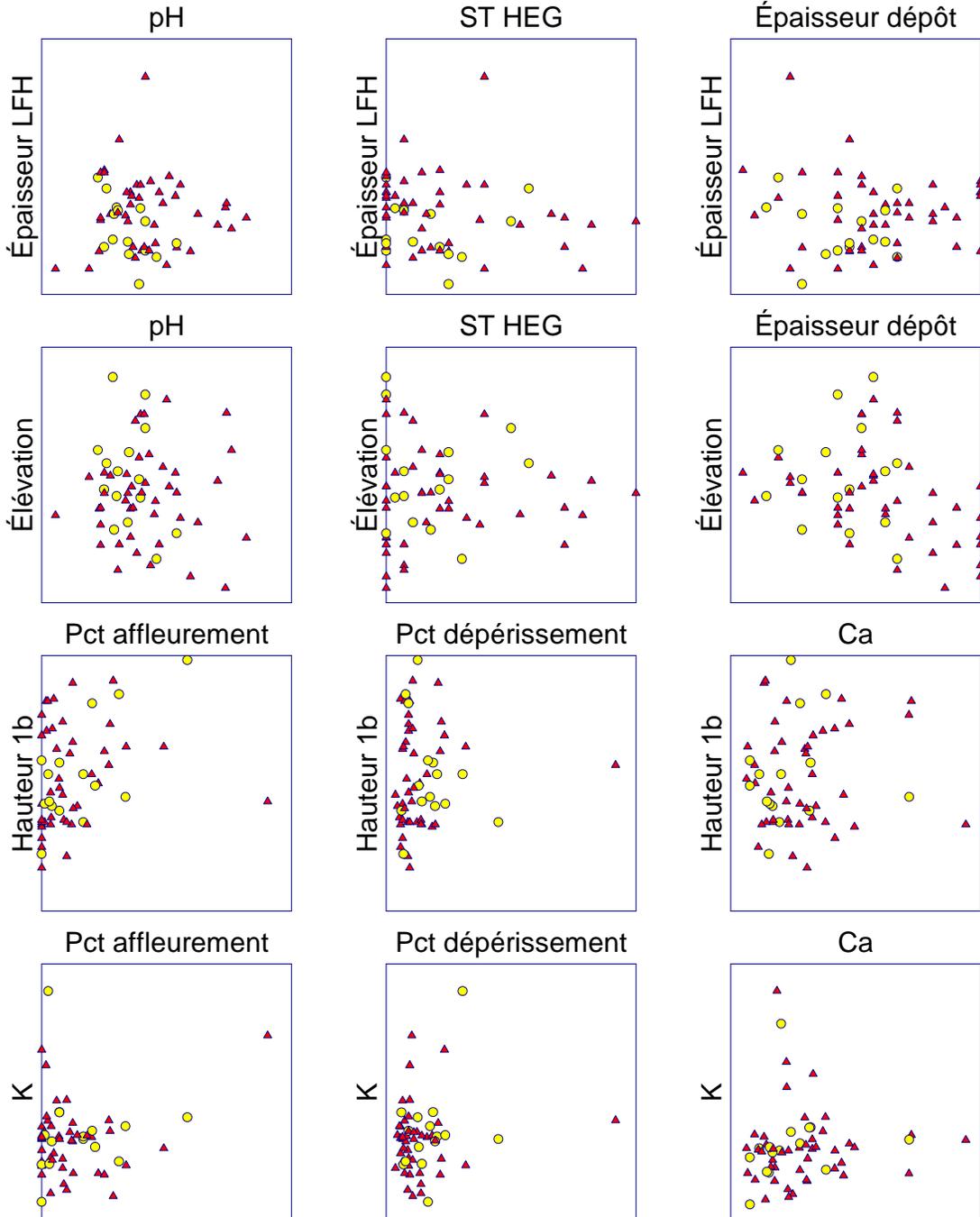


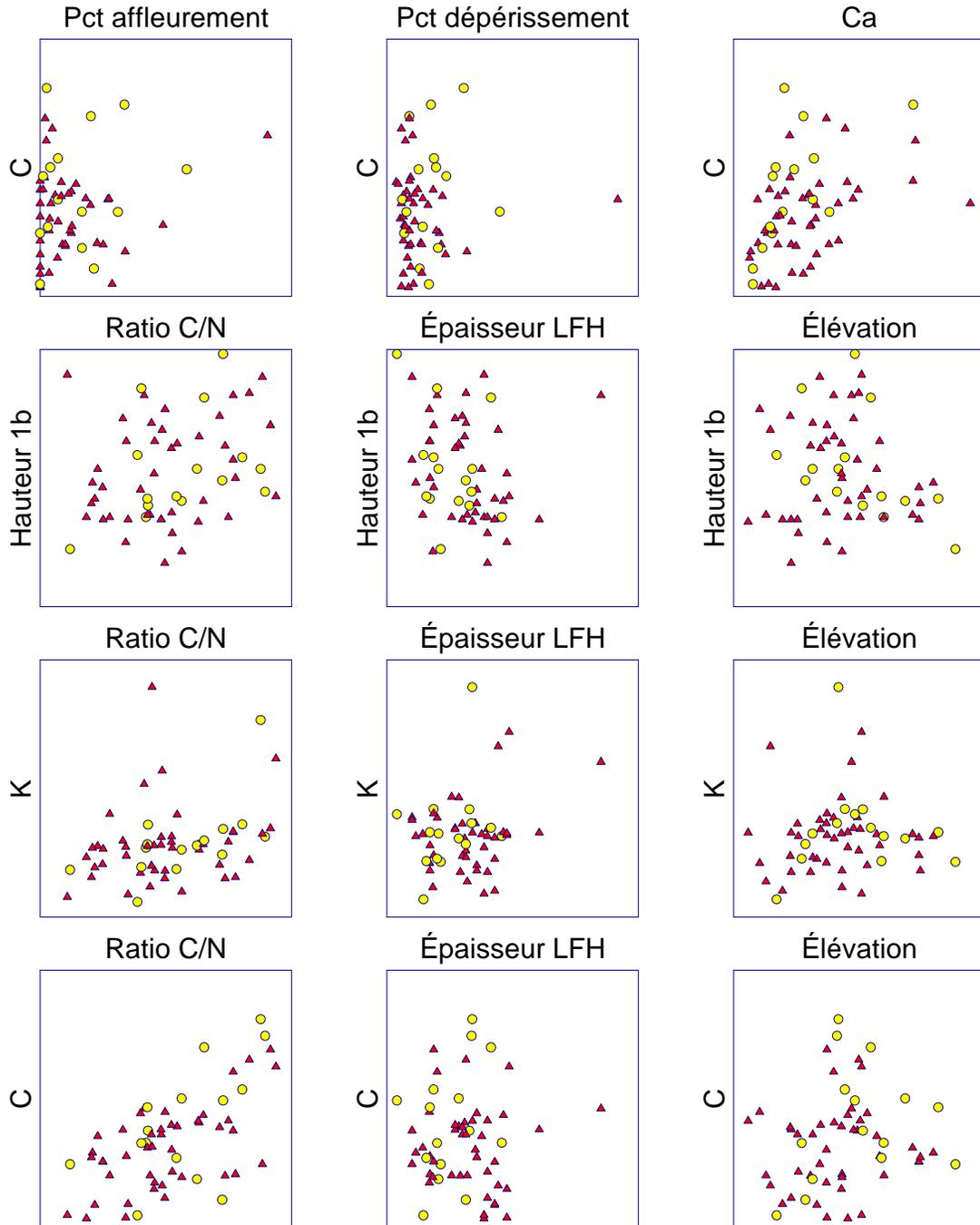


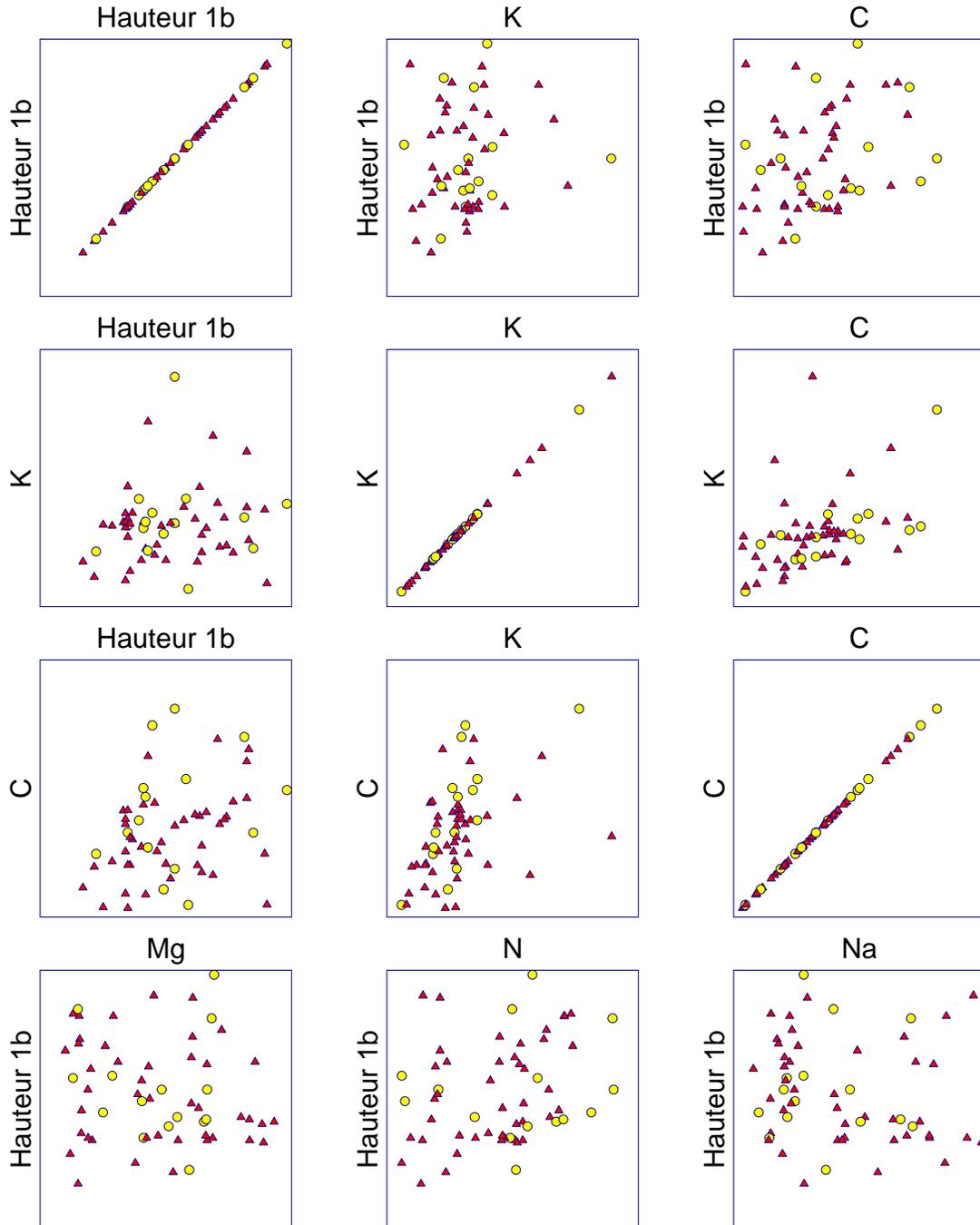


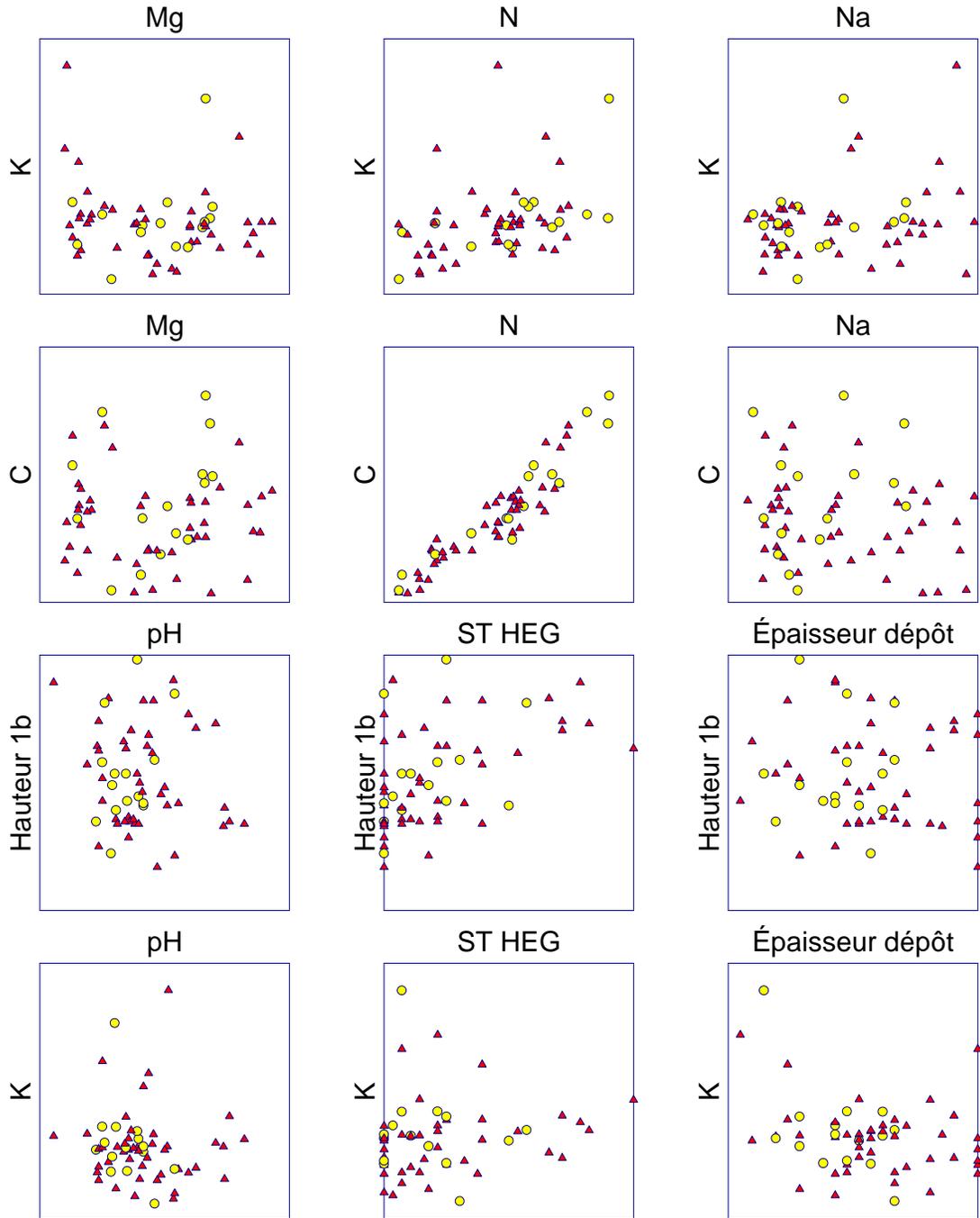


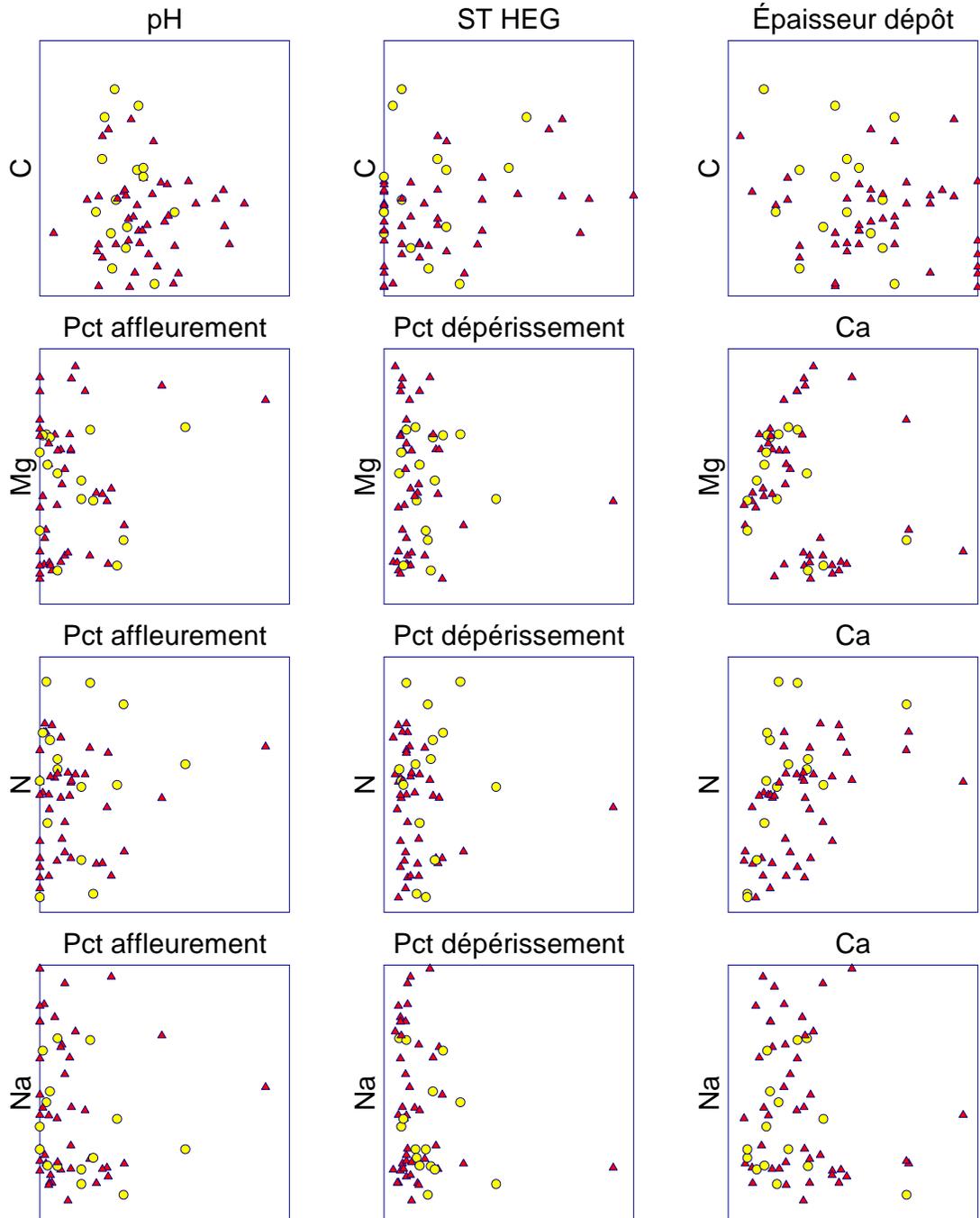


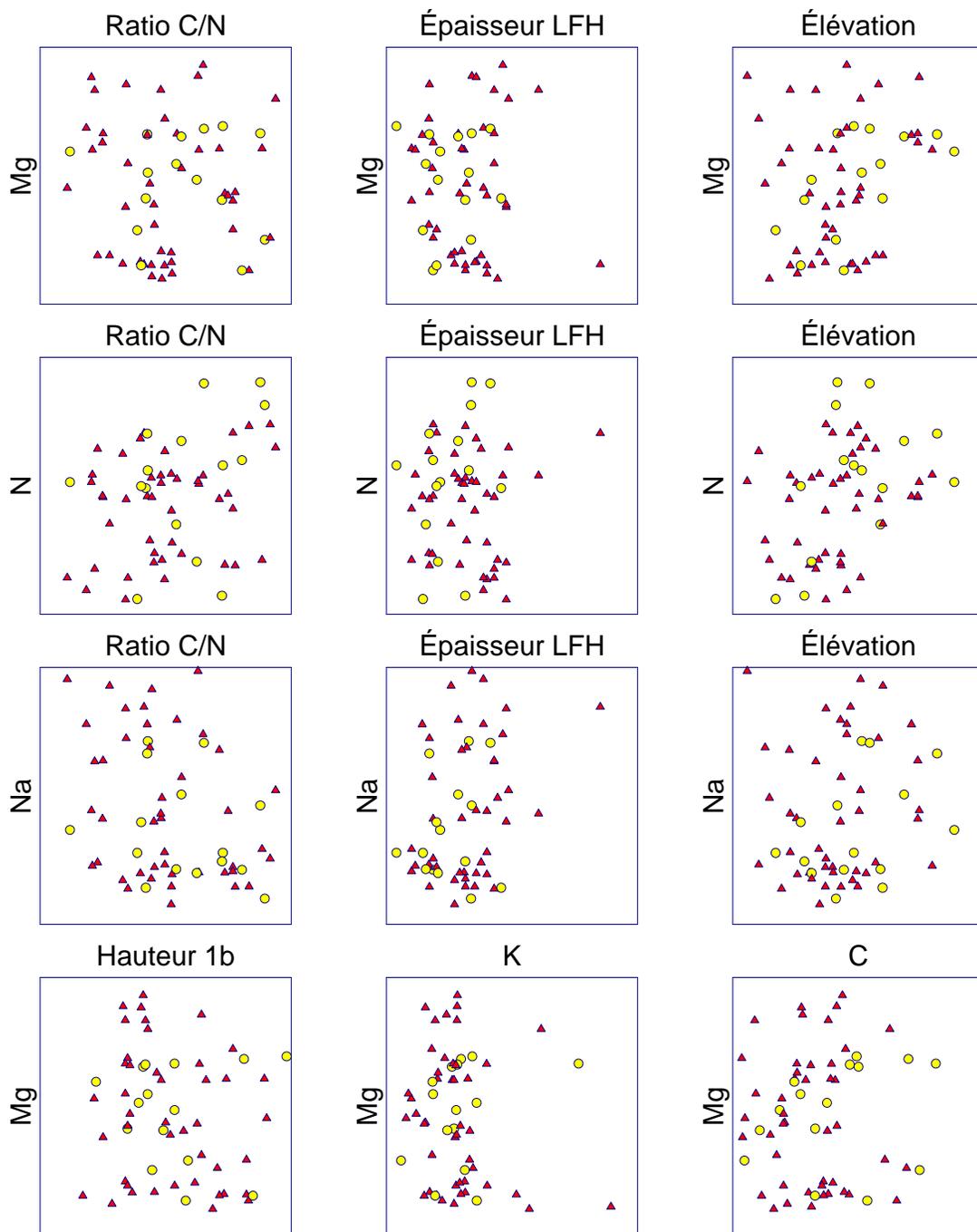


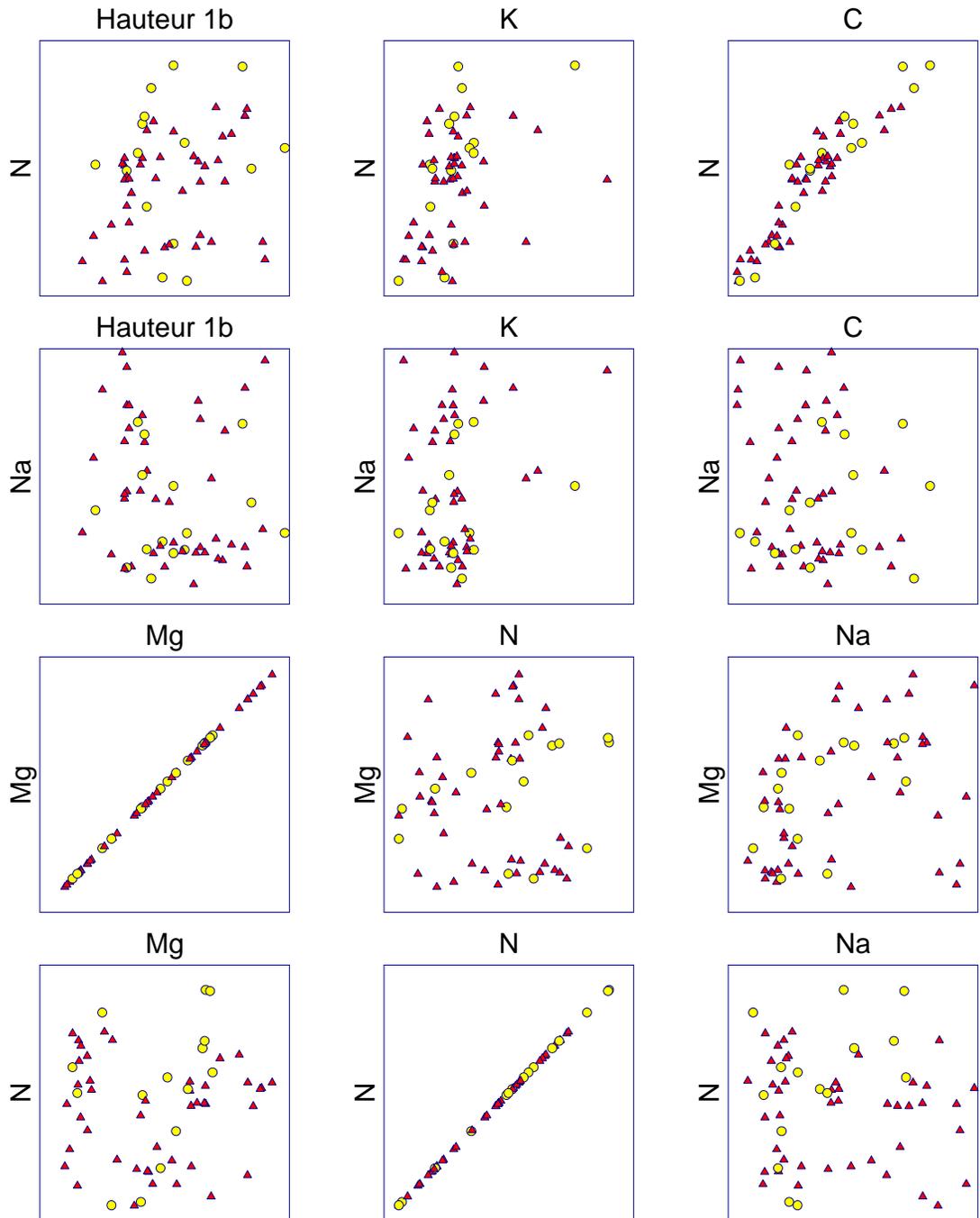


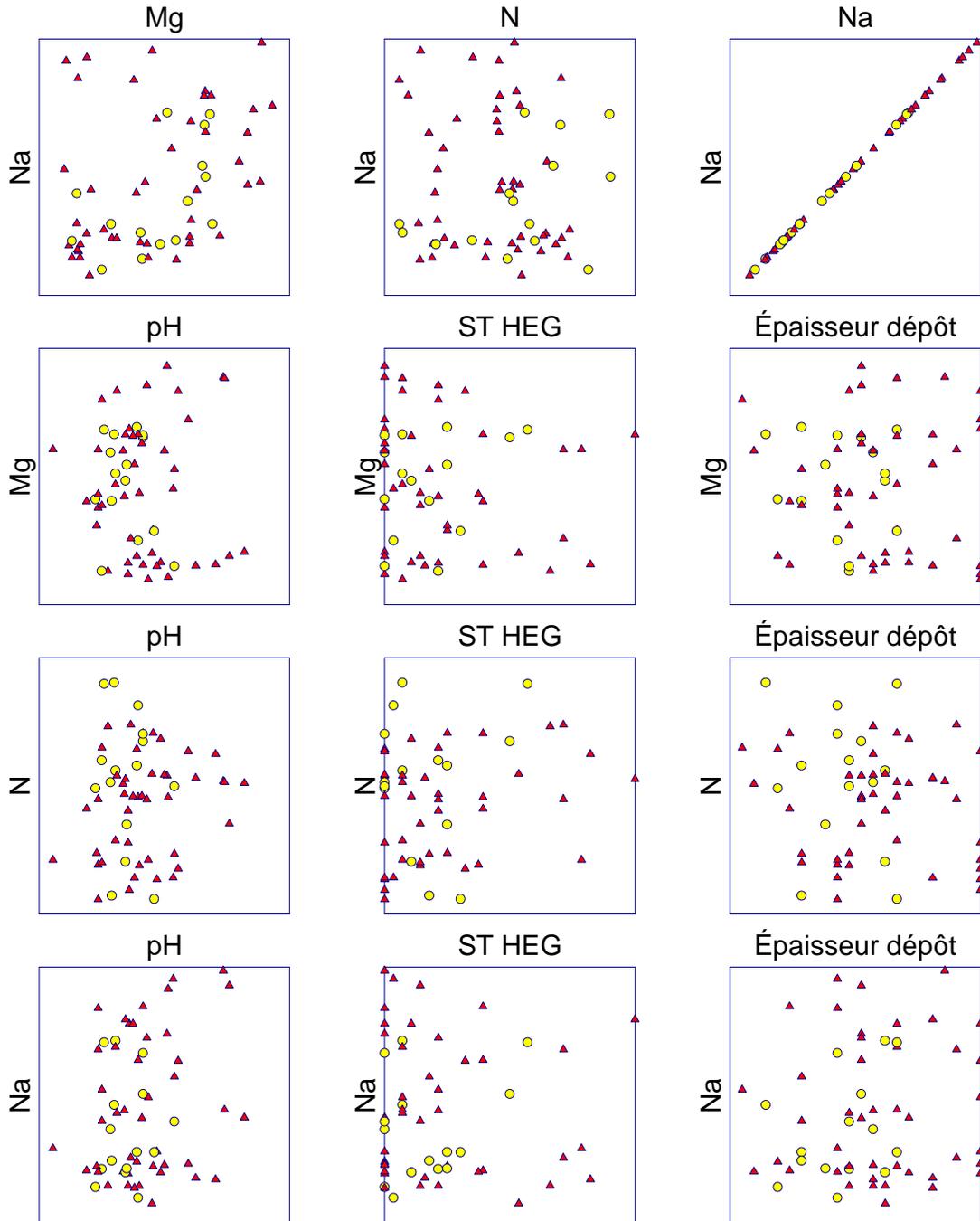


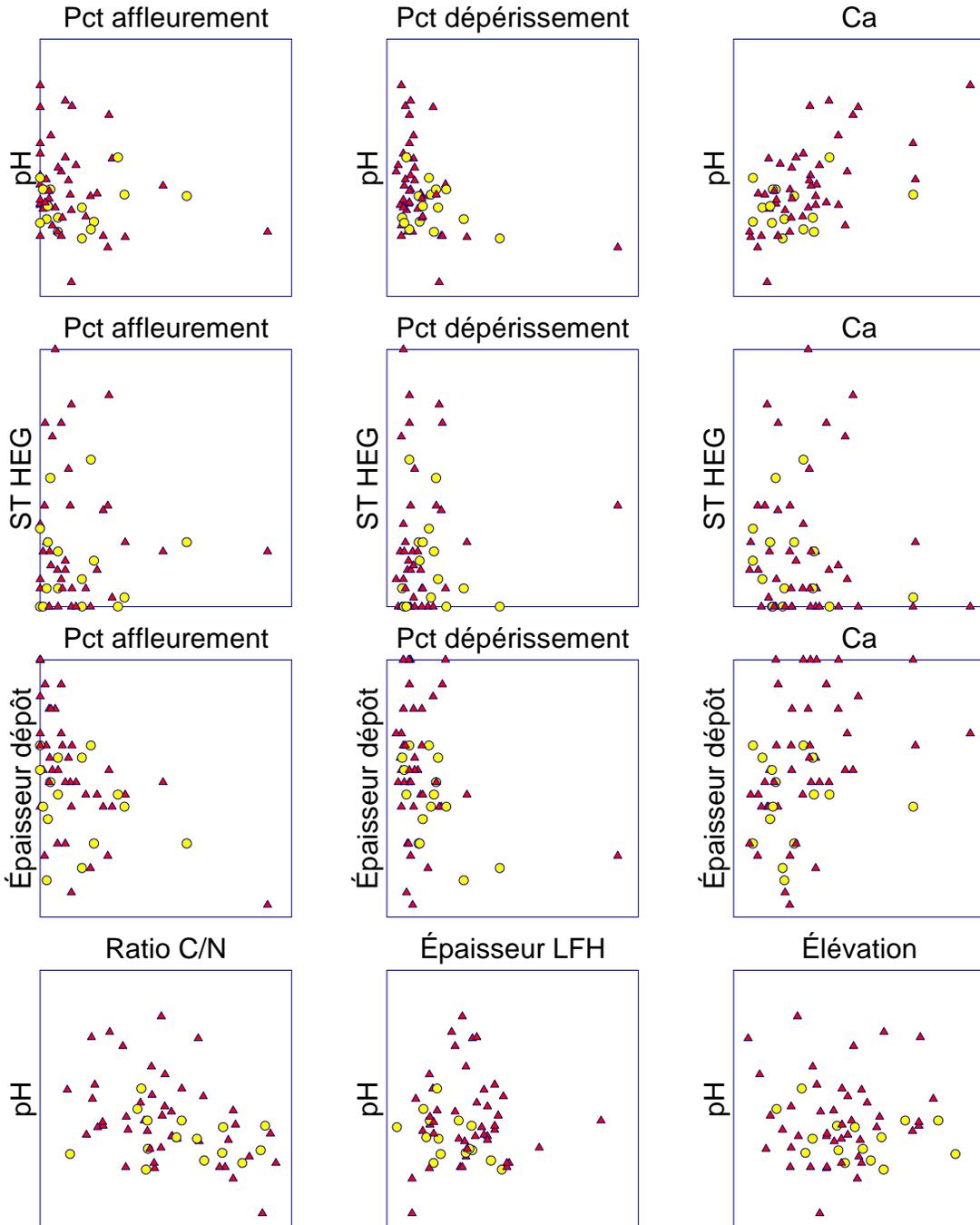


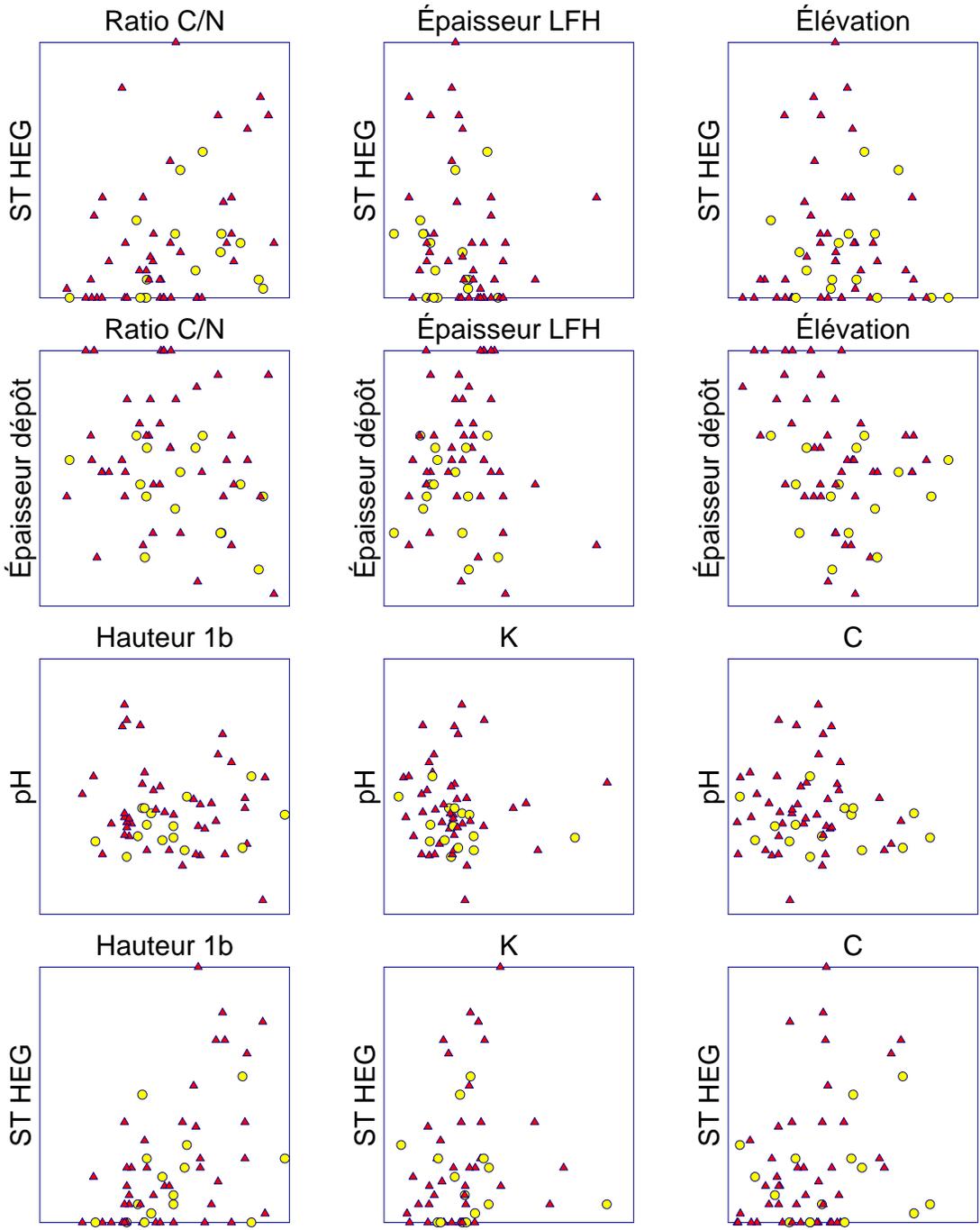


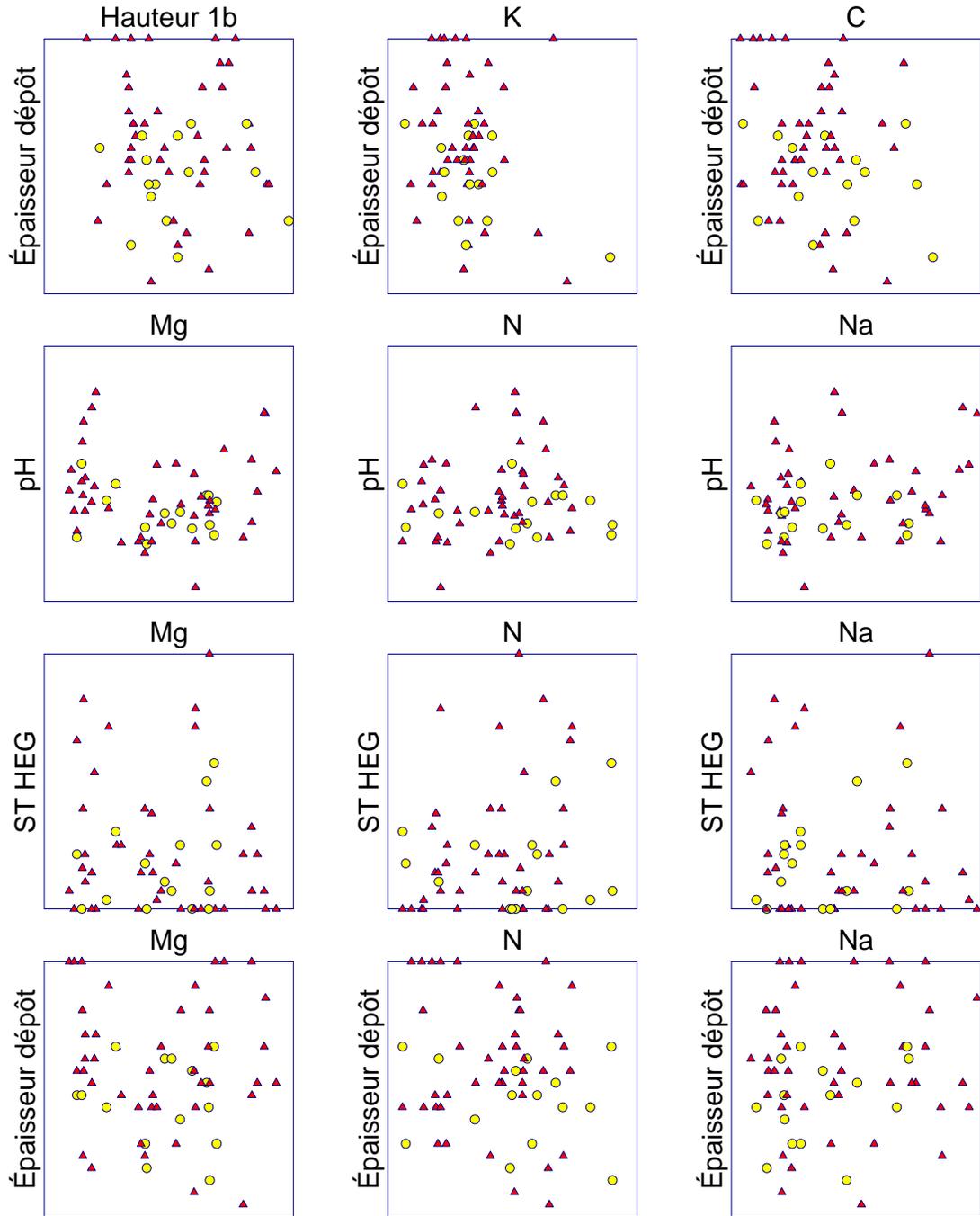


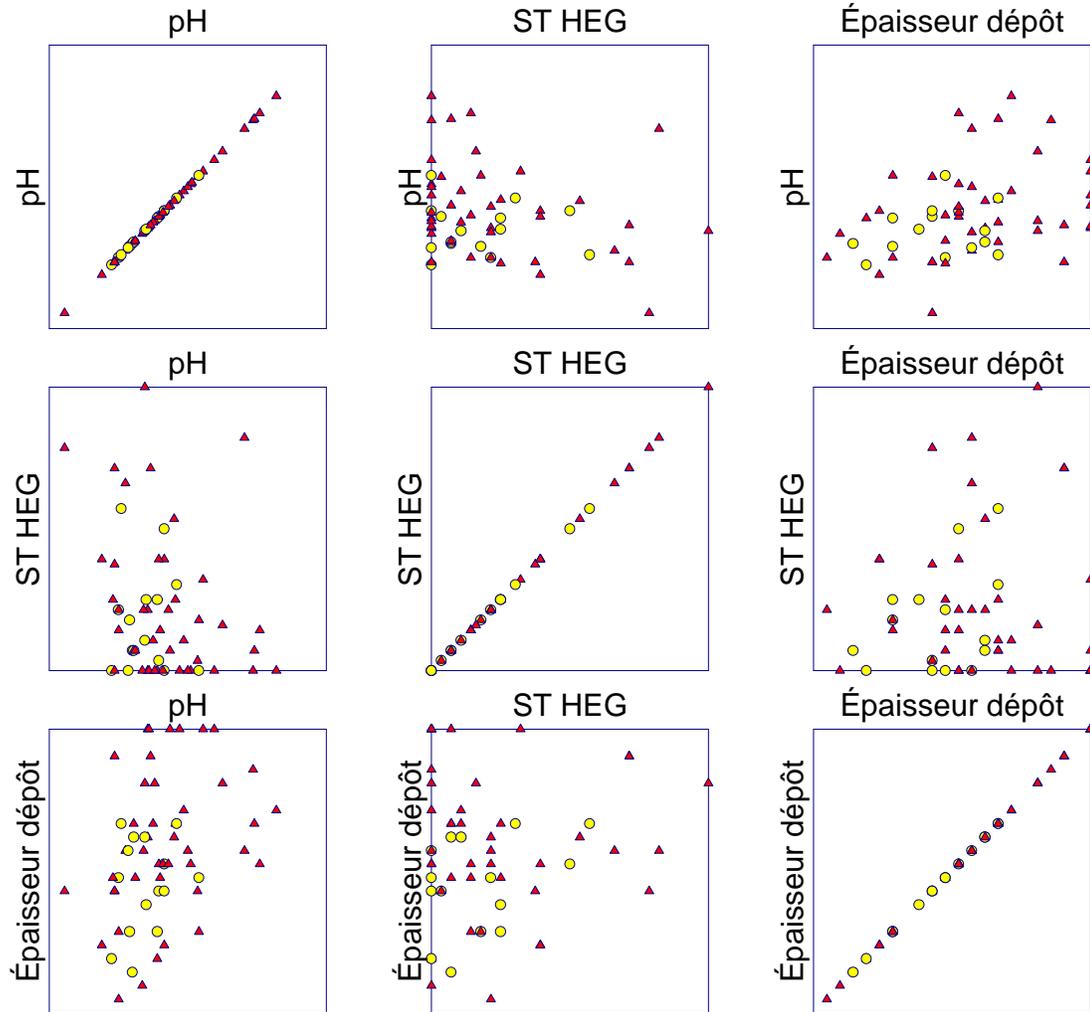












Annexe 3 : Graphiques ayant servi à l'analyse visuelle pour le bois blanc

