



Rapport de l'activité 2.1 du mandat Retombées de l'Étude sur
l'état de santé des sols agricoles du Québec

Optimisation de l'évaluation manuelle de la qualité de la structure des sols dans ProfilSol

Date : Février 2026

Responsable scientifique : Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.

Ce rapport a été produit à l'attention du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

No. de projet IRDA : 10009



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresses** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Marc-Olivier Gasser, Ph. D.
Chercheur en conservation des sols et l'eau
Responsable scientifique et auteur
T : 418 643-2380 p. 650
marc-o.gasser@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Eduardo Chavez M. Sc., IRDA
Mick Wu, Ph. D, IRDA
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc., IRDA
Marc-Olivier Gasser, Ph. D., IRDA

Équipe de réalisation

Mick Wu, Ph. D, IRDA
Eduardo Chavez M. Sc., IRDA
Marc-Olivier Gasser, Ph. D., IRDA
Jean-Benoît Mathieu, M. Sc., IRDA

Collaborateurs

Catherine Bossé, agr., IRDA

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries, de l'Alimentation du Québec



Ce rapport peut être cité comme suit :

Chavez, Eduardo; Wu, Mick; Gasser, Marc-Olivier; Mathieu, Jean-Benoît. 2026. Optimisation de l'indicateur de qualité structural de sols minéraux (IQPSM). Rapport concernant l'activité 2.1 du projet Retombées de l'ÉÉSSAQ. IRDA. 17 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) © Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

RÉSUMÉ

Cette étude visait à optimiser l'indicateur manuel de qualité de la structure utilisé dans l'application ProfilSol, en recalibrant les cotations et la pondération attribuées aux descripteurs pédomorphologiques. L'évaluation visuelle de 4 751 images de sols prises dans le cadre de l'ÉSSAQ a servi de données d'entraînement. L'approche utilisée repose sur une modélisation bayésienne hiérarchique utilisant des chaînes de Markov Monte Carlo (MCMC) afin de quantifier les relations non linéaires entre la qualité structurale observée et six descripteurs pédomorphologiques (type, classe et grade de structure, consistance, porosité fine et moyenne), tout en tenant compte de la variabilité liée au site d'échantillonnage, à l'évaluateur et à la reprise de l'évaluation, lors de l'analyse visuelle de l'image. Les modèles ont été ajustés par groupe textural et horizon lorsque la taille d'échantillon le permettait.

L'optimisation a permis d'établir des courbes de réponse non linéaires pour chaque catégorie de descripteur et de dériver des pondérations spécifiques, conduisant à un nouvel algorithme plus cohérent avec la perception visuelle de la qualité structurale de sols minéraux. De plus, ce nouvel algorithme permet de dissocier explicitement la classe de structure du type de structure et d'établir des cotations spécifiques à chaque combinaison groupe textural–horizon.

Le type de structure, en particulier la structure granulaire, ainsi que la classe et le grade de structure constituent les descripteurs les plus influents dans la majorité des groupes texturaux, avec des variations selon la profondeur. Les porosité fine et moyenne contribuent faiblement au score global. Enfin, des seuils de classification propres à chaque groupe textural et horizon ont été définis à l'aide d'un modèle ordinal, confirmant que l'interprétation du score dépend fortement du groupe textural et de l'horizon. Une amélioration de la prédiction de la qualité de la structure à partir de descripteurs pédomorphologiques qui peuvent être évalués dans un profil de sol, devrait permettre une meilleure appréciation de la condition physique du sol, un élément crucial à la santé des sols reconnus sous pression, tout en familiarisant les utilisateurs aux concepts utilisés en pédologie pour décrire la structure des sols.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	ANALYSES STATISTIQUES	2
2.1	Approche utilisée pour l'optimisation.....	2
2.2	Données pour la modélisation	3
2.3	Corrélations entre descripteurs	4
3	RÉSULTATS OBTENUS.....	5
3.1	Scores des catégories des descripteurs pédomorphologiques	5
3.2	Contribution des descripteurs pédomorphologiques	8
3.3	Seuils de qualité pour l'IQPSM2.....	8
4	FAITS SAILLANTS.....	8
5	CONCLUSION.....	9
6	RECOMMANDATIONS.....	9
7	RÉFÉRENCES	9
8	ANNEXE A – Diagnostiques des modèles	10
8.1	Convergence et mélange de chaînes.....	10
8.2	Cohérence entre chaînes et le nombre d'itérations effectives	11
8.3	Distribution postérieure des prédictions (posterior predictive-check).....	12
8.4	Exactitude des modèles	13
9	ANNEXE B – Scores des catégories des descripteurs	14

Liste des tableaux

Tableau 1. Nombre d'images évaluées à répétition utilisées pour la modélisation	3
Tableau 2. Variation entre classes de l'évaluation visuelle par reprise, évaluateur et site	4
Tableau 3. Contribution (%) des descripteurs dans l'IQPSM2 par groupe textural et horizon	8
Tableau 4. Seuils de qualité pour l'IQPSM2 par groupe textural et horizon	8
Tableau 5. Valeurs de Rhat pour vérifier la cohérence entre chaînes et le nombre d'itérations effectives	11
Tableau 6. Paramètres pour mesurer l'exactitude des modèles	13
Tableau 7. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQPSM2 pour les Argileux	14
Tableau 8. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQPSM2 pour les Limoneux	15
Tableau 9. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQPSM2 pour les Loameux	16
Tableau 10. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQPSM2 pour les Sableux	17

Liste des figures

Figure 1. Corrélations entre les descripteurs pédomorphologiques par groupe textural	5
Figure 2. Forme de relations pour les Argileux – Horizon Ap	6
Figure 3. Forme de relations pour les Argileux – Horizon B	6
Figure 4. Forme de relations pour les Limoneux – Deux horizons combinés	6
Figure 5. Forme de relations pour les Loameux – Horizon Ap	7
Figure 6. Forme de relations pour les Loameux – Horizon B	7
Figure 7. Forme de relations pour les Sableux – Deux horizons combinés	8
Figure 8. Diagnostique de convergence des modèles	11
Figure 9. Diagnostique de la distribution postérieure des prédictions des modèles	13

1 INTRODUCTION

Ce rapport décrit la démarche méthodologique utilisée pour optimiser l’algorithme de l’indicateur de qualité structurale des sols minéraux (IQPSM), actuellement intégré à l’application mobile [ProfilSol](#), qui permet d’évaluer la structure des sols minéraux en utilisant la méthode d’évaluation visuelle et tactile.

Dans sa version initiale, les catégories nominales des cinq descripteurs pédomorphologiques — type, classe et grade de la structure, consistance, ainsi que porosité fine et moyenne — ont été traduites en cotations numériques (de 0,5 à 10) et combinées à l’aide de pondérations entre descripteurs. Ces paramètres ont été établis en 2021-2022 par un groupe d’experts pédologues sur la base de leur jugement professionnel. La méthodologie associée à cet algorithme, les résultats appliqués aux horizons échantillonnés de l’Étude sur l’état de santé de sols agricole du Québec (ÉÉSSAQ) (Gasser et al., 2023), ainsi que les liens trouvés avec les principales propriétés physiques de sols, ont fait l’objet d’une publication dans la revue *Soil Tillage and Research* (Chavez Benalcazar et al., 2026).

L’algorithme de la version initiale (IQPSM1) reposait principalement sur une combinaison additive des descripteurs pédomorphologiques couramment utilisés par les pédologues pour caractériser la structure du sol. D’un point de vue mathématique, il correspond à la somme des cotes attribuées aux catégories de chaque descripteur, pondérées par leur pourcentage de contribution respectif :

$$\begin{aligned} \text{IQPSM1} = & (\text{Cotation TypeClasse Structure} \times \text{Contribution TypeClasse Structure}) \\ & + (\text{Cotation Grade Structure} \times \text{Contribution Grade Structure}) \\ & + (\text{Cotation Consistance} \times \text{Contribution Consistance}) \\ & + (\text{Cotation Porosité Fine} \times \text{Contribution Porosité Fine}) \\ & + (\text{Cotation Porosité Moyenne} \times \text{Contribution Porosité Moyenne}) \end{aligned}$$

Cet algorithme était appliqué indifféremment à tous les horizons (Ap1, Ap2 et B) dans la version initiale de l’IQPSM1. Toutefois, des paramètres distincts ont été définis selon les groupes texturaux : argileux, limoneux, loameux, sableux et squelettiques (ces derniers sans distinction de matrice texturale), afin de tenir compte des différences structurales entre types de sols.

La nouvelle version de l’IQPSM (IQPSM2) consistait à réentraîner l’algorithme et la pondération des descripteurs basé sur une évaluation visuelle de la structure du sol relevée sur 4 751 images de sols prises dans le cadre de l’ÉÉSSAQ. L’examen systématique de ces images, réalisé par l’équipe de pédologie et de conservation des sols de l’IRDA entre septembre 2022 et janvier 2026, a permis de classer les images de sols en cinq niveaux de qualité de la structure : très mauvais, mauvais, modéré, bon et très bon.

L’objectif principal du présent travail était donc d’optimiser l’algorithme de la version initiale (IQPSM1) afin de développer des spécifications plus fines, à la fois par groupe textural et par horizon pédologique et d’exploiter l’évaluation visuelle des horizons échantillonnés comme variable réponse fiable et robuste.

2 ANALYSES STATISTIQUES

2.1 Approche utilisée pour l'optimisation

L'optimisation des cotes attribuées aux descripteurs pédomorphologiques ainsi que leur pondération dans l'indice global de qualité des sols (IQPSM2) a été réalisée en quatre étapes :

1. **Modélisation des relations non linéaires** entre la qualité structurale du sol, évaluée visuellement, et les descripteurs pédologiques utilisant l'approche bayésienne « Monte Carlo Markov Chain (MCMC) » (McElreath, 2020) pour avoir des résultats robustes, et propager aisément les incertitudes. Pour chaque modèle, 8 chaînes de 1000 itérations ont été utilisées pour un total de 8000 estimés (distribution postérieure) des rangs, dont la variabilité représente le degré d'incertitude.

Des distributions à priori faiblement informatives « *loose priors* » ont été spécifiées afin de limiter leur influence sur les estimations et de permettre aux données d'informer principalement les paramètres du modèle. Les paramètres de l'algorithme MCMC (nombre d'itérations, période de chauffe, amincissement) ainsi que des valeurs initiales plausibles ont également été définis pour assurer la stabilité numérique et la convergence des chaînes.

Une approche exploratoire visant à utiliser des distributions à priori plus informatives, basées sur les pondérations subjectives attribuées aux descripteurs par des pédologues, a été testée. Toutefois, cette stratégie a entraîné des difficultés de convergence et n'a pas été retenue.

Les modèles ont été construits indépendamment pour chacun des quatre groupes texturaux : argileux, limoneux, loameux et sableux et deux horizons pédologiques (Ap et B). En raison du nombre limité d'observations dans certains cas (groupes limoneux et sableux, avec moins de 1 000 observations), la distinction entre horizons n'a pas été prise en compte pour ces deux groupes. De plus, le groupe textural squelettique (plus 35 % de fragments > 2mm en volume) n'a pas été intégré dans l'analyse en raison du faible nombre d'observations au sein de ce groupe.

Le modèle générique utilisé pour construire l'IQPSM2 est représenté de la façon suivante :

Évaluation Visuelle \sim Type Structure + Classe Structure + Grade Structure + Consistance + Por. Fine + Por. Moyenne + (1|site) + (1|reprise) + (1|évaluateur)

Ce modèle utilise les six descripteurs pédomorphologiques comme effets fixes et les facteurs site, reprise et évaluateur comme effets aléatoires.

Le facteur « site » a été intégrée comme un effet aléatoire aux modèles afin de tenir compte de la structure hiérarchique des données, mais aussi parce que ce facteur apporte une variabilité lors de l'évaluation. Les images étaient évaluées la plupart du temps dans un ordre systématique (année d'échantillonnage, série de sols, numéro de site, point d'échantillonnage, horizon), peu importe la période d'évaluation, ce qui a pu introduire un biais dans l'évaluation visuelle.

Le facteur « reprise » a aussi été pris en compte comme effet aléatoire, pour considérer la variabilité liée à la reprise de l'évaluation d'une même image. Ces différences générées entre reprise pouvaient provenir de l'influence du contexte d'évaluation, notamment les conditions d'observation, l'affichage à l'écran, les paramètres du logiciel utilisé, les objectifs d'évaluation, les consignes ainsi que la prise en compte ou non d'une structure naturellement inexistante. Par exemple, en 2022, des structures particulière ou polyédrique sub-angulaire ont été attribuées aux sols sableux dans l'horizon B, ce qui les a classés parmi les cinq niveaux de qualité de structure, tandis qu'en 2025 et 2026, on les a jugés naturellement sans structure donc sans classe de qualité possible.

Le facteur « évaluateur » a été inclus comme effet aléatoire pour considérer la variabilité inhérente aux évaluateurs. Chaque évaluateur possède sa propre approche et peut accorder une importance différente à la qualité de la structure observée selon le groupe textural et l’horizon. Ces deux dernières informations étaient les seules fournies aux évaluateurs, afin de limiter ces biais d’interprétation.

Le modèle générique a été utilisé pour tous les groupes texturaux sauf pour le groupe sableux. La porosité fine et moyenne étant inexistante ou très difficile à relever sur le terrain dans le groupe sableux, ces deux descripteurs ont été retirés du modèle de ce groupe (Guimarães et al., 2011; Brady and Weil, 2016; Chavez Benalcazar et al., 2026).

2. **Validation des modèles.** Les modèles ont été validés en examinant différents diagnostics de l’algorithme MCMC : graphiques de convergence et mélange de chaînes; calcul de paramètres pour vérifier la cohérence entre chaînes et le nombre d’itérations effectives; graphiques des distributions postérieures des prédictions (posterior predictive check) et le calcul de paramètres pour mesurer l’exactitude des modèles. Les diagnostics des modèles sont présentés à l’ANNEXE A – Diagnostics des modèles.
3. **Extraction des courbes de réponse (cotations des catégories) et des pondérations de chaque descripteur.** Les cotations de catégories de descripteurs pédomorphologiques correspondent aux coefficients associés aux niveaux de chaque descripteur pour chaque modèle bayésien. Les coefficients représentent simultanément la forme (non linéaire) de la relation et la pondération (ou degré de contribution en %) des descripteurs dans une combinaison additive entre descripteurs. La pondération des descripteurs est implicite; plus la cote est élevée, plus elle a de poids dans le score total de l’IQPSM2.
4. **Obtention des seuils de qualité** pour définir cinq classes (très mauvais, mauvais, modéré, bon et très bon) pour les scores de l’IQPSM2. Ces seuils de qualité ont été dérivés de l’évaluation visuelle de chaque échantillon et d’un modèle linéaire généralisé mixte (GLMM) spécifié avec une variable réponse ordinaire. Pour chaque descripteur, un effet fixe non linéaire contraint à la monotonie a été ajusté afin de représenter la relation attendue avec les niveaux de qualité de la structure du sol.

2.2 Données pour la modélisation

L’évaluation visuelle des 4 751 images de sols échantillonnés dans l’EESSAQ ont permis de classer la qualité structurale de sols en cinq niveaux de qualité : très mauvais, mauvais, modéré, bon et très bon. Certaines images ont été analysées à répétition (reprise) entre septembre 2022 et janvier 2026 par différents évaluateurs. Le Tableau 1 présente le nombre d’images évaluées (parfois à répétition) pour chaque modèle optimisé par groupe textural et horizon.

Tableau 1. Nombre d’images évaluées à répétition utilisées pour la modélisation

Groupe Textural	Horizon	Très mauvais	Mauvais	Modéré	Bon	Très bon	Somme
Argileux	Ap	80	422	867	927	456	2752
Argileux	B	132	454	485	383	88	1542
Limoneux	Deux horizons	34	145	233	319	117	848
Loameux	Ap	34	220	683	1082	587	2606
Loameux	B	53	207	534	572	112	1478
Sableux	Deux horizons	13	67	238	303	45	666

Certaines images jugées inadéquates — notamment les images floues, les mottes de sol indistinguables ou les échantillons sans structure (fréquents pour les sols sableux dans l’horizon B) — ont été exclues, leur évaluation étant considérée comme potentiellement non fiable. Par ailleurs, dans chaque groupe textural, les évaluations visuelles réalisées à répétition, mais peu fréquentes dans le groupe ou par des évaluateurs trop peu fréquents ont aussi été retirées. Cette étape a été réalisée pour assurer une estimation plus robuste des effets aléatoires, ces situations peu fréquentes rendant leur estimation instable et susceptibles d’introduire des biais importants en raison d’un plan d’observation non équilibré (évaluateur-reprise-site-descripteurs).

Le Tableau 2 présente les écarts types entre classes d'évaluation selon les reprises, les évaluateurs et le site d'échantillonnage. Les écarts-types indiquent que l'effet « reprise » constitue généralement la principale source de variabilité des classes d'évaluation, soulignant l'influence du contexte d'observation et de l'évolution des critères au cours du temps. L'effet « site » demeure également important pour l'ensemble des groupes texturaux, reflétant l'hétérogénéité intrinsèque des sols. La variabilité du facteur « évaluateur » est globalement plus faible, bien qu'elle augmente pour les horizons B, en particulier dans les sols argileux et loameux, qui apparaissent comme les situations les plus incertaines. À l'inverse, l'horizon Ap des sols loameux présente la plus faible variabilité, indiquant une bonne reproductibilité des évaluations pour ce type de sols et horizon.

Tableau 2. Variation entre classes de l'évaluation visuelle par reprise, évaluateur et site

Groupe Textural	Horizon	Écart-type (Reprise)	Écart-type (Évaluateur)	Écart-type (Site)
Argileux	Ap	0,48	0,47	0,48
Argileux	B	0,79	0,66	0,56
Limoneux	Deux horizons	0,63	0,28	0,58
Loameux	Ap	0,56	0,14	0,49
Loameux	B	0,57	0,50	0,58
Sableux	Deux horizons	0,64	0,42	0,51

2.3 Corrélations entre descripteurs

Une étape préalable à l'ajustement des modèles reliant les descripteurs pédomorphologiques à l'évaluation visuelle a consisté à examiner les corrélations simples entre les six descripteurs. La Figure 1 présente ces corrélations pour chaque groupe textural (tous horizons confondus). Aucune corrélation forte (> 0,75) n'ayant été observée, l'ensemble des variables a été conservé et considéré comme des facteurs indépendants dans les modèles.



Figure 1. Corrélations entre les descripteurs pédomorphologiques par groupe textural

3 RÉSULTATS OBTENUS

En fonction des modèles utilisés, d'un point de vue mathématique, à l'instar de l'algorithme de l'IQPSM1, l'IQPSM2 correspond à la somme des cotations attribuées aux catégories de chaque descripteur, pondérées par leur pourcentage de contribution respectif. La principale différence entre les deux algorithmes réside dans la dissociation de la classe de structure et du type de structure, afin d'en analyser les effets de manière indépendante :

$$\begin{aligned} \text{IQPSM2} = & (\text{Cotation Type Structure} \times \text{Contribution Type Structure}) \\ & + (\text{Cotation Classe Structure} \times \text{Contribution Classe Structure}) \\ & + (\text{Cotation Grade Structure} \times \text{Contribution Grade Structure}) \\ & + (\text{Cotation Consistance} \times \text{Contribution Consistance}) \\ & + (\text{Cotation Porosité Fine} \times \text{Contribution Porosité Fine}) \\ & + (\text{Cotation Porosité Moyenne} \times \text{Contribution Porosité Moyenne}) \end{aligned}$$

3.1 Scores des catégories des descripteurs pédomorphologiques

Les scores obtenus pour chaque catégorie des descripteurs pédomorphologiques, par groupe textural et par horizon sont présentés en détail dans l'ANNEXE B – Scores des catégories des descripteurs. Les figures suivantes présentent visuellement les scores des catégories ainsi que leur contribution dans l'IQPSM2.

- Le type de structure « Granulaire » contribue fortement à la définition de l'IQPSM2 dans tous les groupes texturaux et horizons, basée sur une augmentation marquée de la qualité structurale des sols évaluée visuellement.
- Les classes de structure « Fine » et « Moyenne » contribuent aussi plus fortement à l'IQPSM2 que les classes « Sans structure », « Très grossière » ou « Grossière ».
- Le grade de la structure contribue aussi à la définition de l'IQPSM lorsqu'il est plus fort, mais surtout dans l'horizon Ap des groupes texturaux loameux et argileux.
- La catégorie « très abondant » pour les deux types de porosité présente une pente légèrement ascendante, indiquant une amélioration de la qualité structurale; toutefois, l'ampleur demeure marginale pour tous les cas.

Par ailleurs, la similarité des contributions entre certaines catégories de descripteurs combinée à la présence d'intervalles de confiance très larges, suggère soit une catégorisation excessive, soit un manque d'information discriminante. Ces similarités entre catégories ont été observées dans les cas suivants :

- « Sans structure » et « Très grossière » du descripteur « Classe de Structure » pour tous les groupes texturaux.
- « Meuble » et « Friable » du descripteur « Consistance » pour tous les groupes texturaux sauf les argileux.
- « Particulaire » et « Polyédrique subangulaire » des sols Loameux à l'horizon Ap.

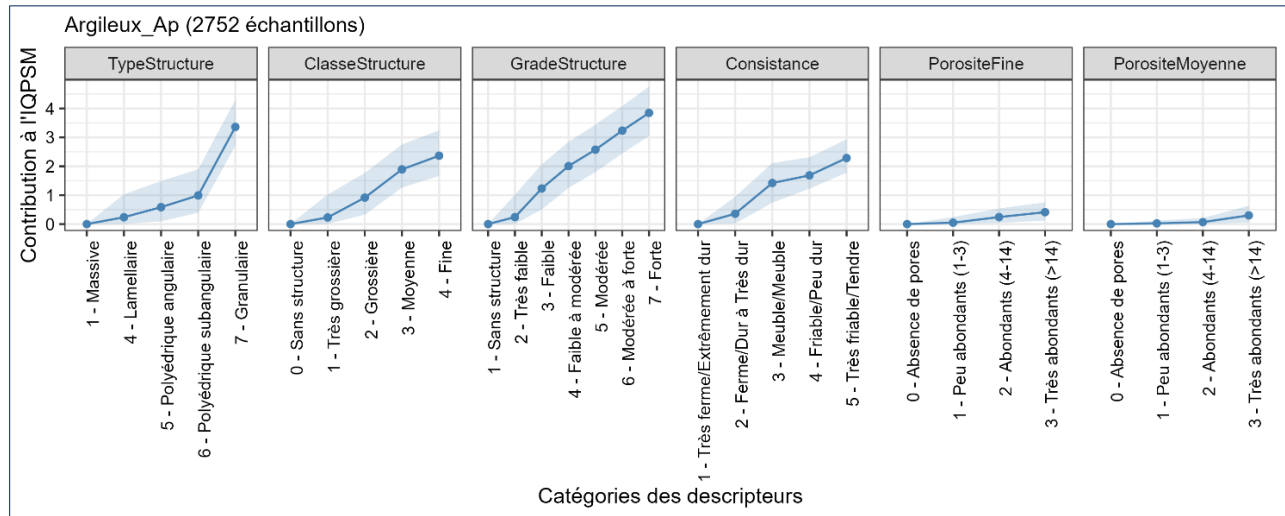


Figure 2. Forme de relations pour les Argileux – Horizon Ap

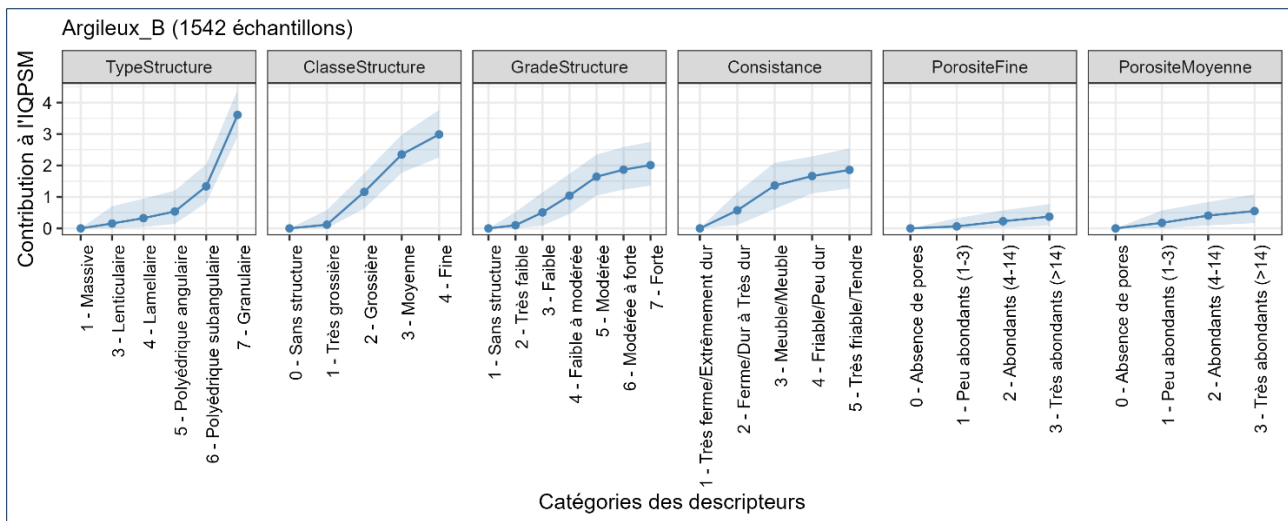


Figure 3. Forme de relations pour les Argileux – Horizon B

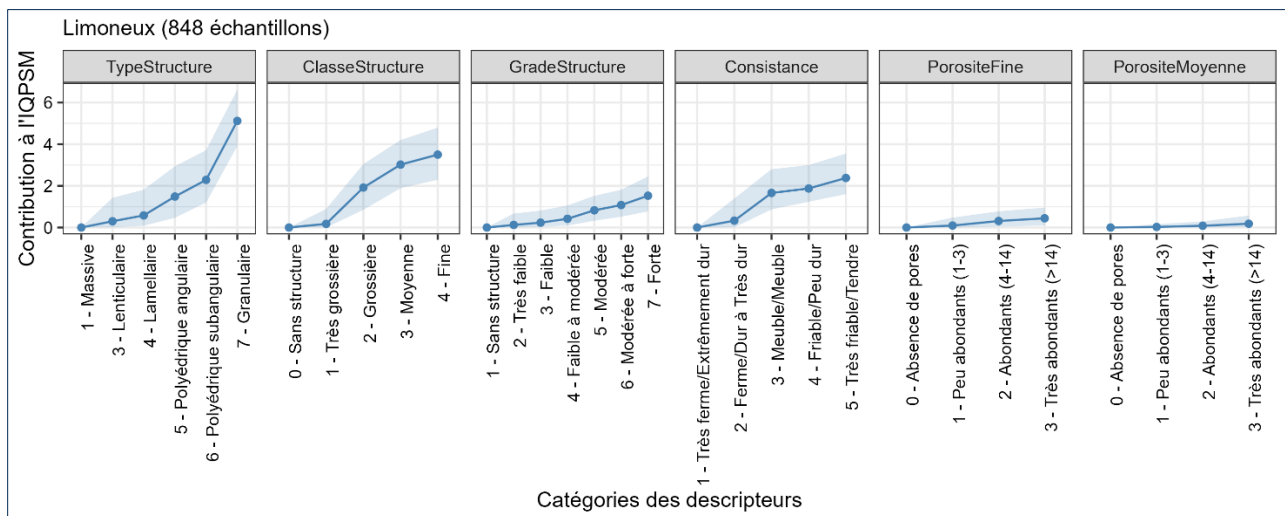


Figure 4. Forme de relations pour les Limoneux – Deux horizons combinés

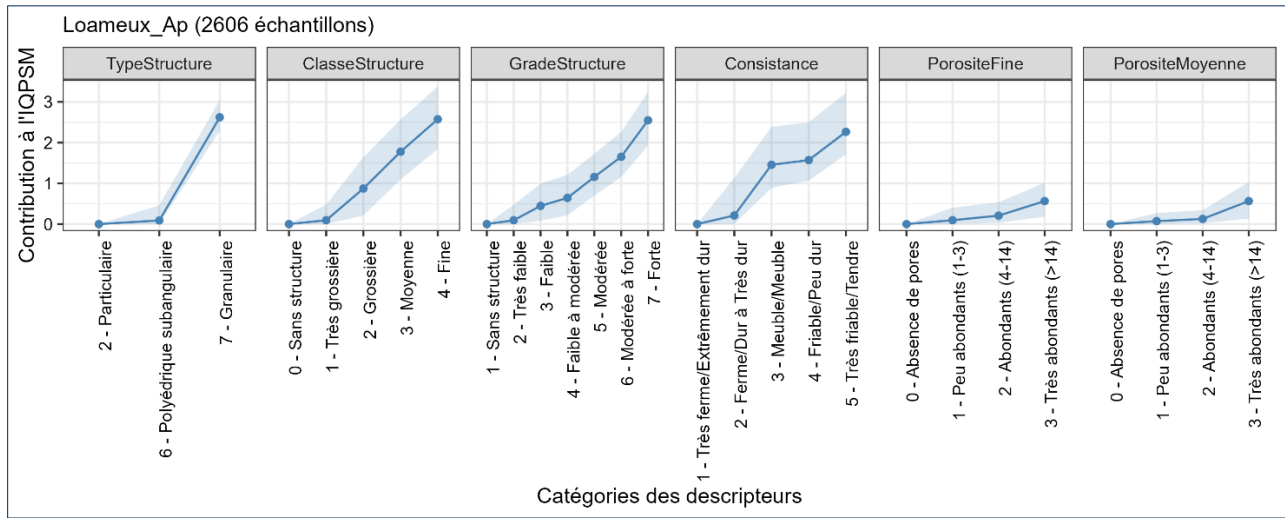


Figure 5. Forme de relations pour les Loameux – Horizon Ap

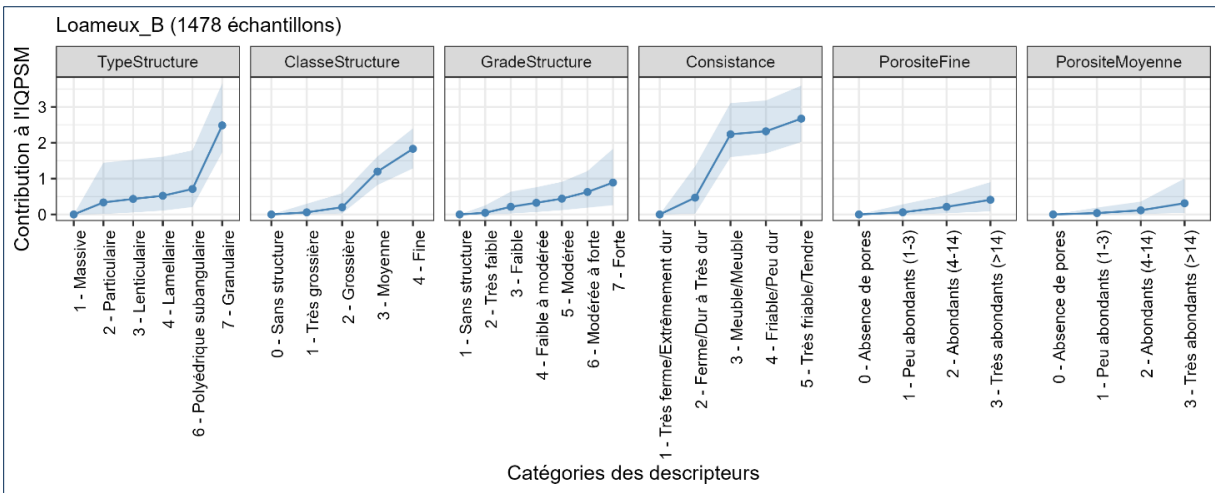


Figure 6. Forme de relations pour les Loameux – Horizon B

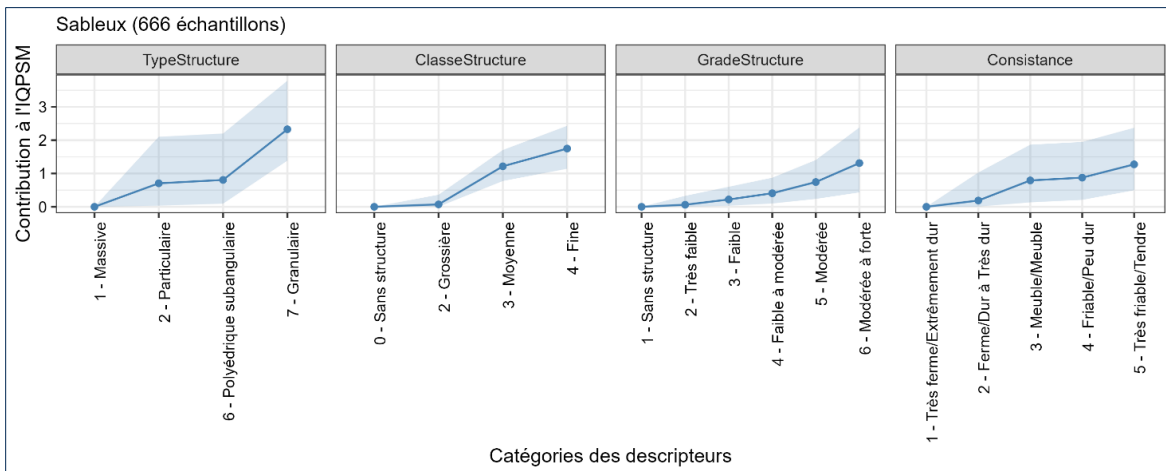


Figure 7. Forme de relations pour les Sableux – Deux horizons combinés

3.2 Contribution des descripteurs pédomorphologiques

Le Tableau 3 présente la contribution en pourcentage des descripteurs pédomorphologiques dans l’algorithme de l’IQPSM2 selon le groupe textural et l’horizon. Ces pondérations ont été extraites des valeurs à partir des sommes des scores maximaux des catégories pour chaque descripteur (voir l’ANNEXE B – Scores des catégories des descripteurs)

Les descripteurs « Type de Structure » et « Classe de Structure » constituent les facteurs les plus influents dans la majorité des groupes texturaux et horizons. Toutefois, dans les sols argileux, le « Grade de Structure » devient le facteur principal dans l’horizon Ap, tandis que « Type de Structure » et « Classe de Structure » prédominent conjointement dans l’horizon B. Dans les sols loameux, la contribution des descripteurs est plus équilibrée dans l’horizon Ap, mais dans l’horizon B, la « Consistance » devient le facteur le plus déterminant. Les descripteurs de porosité (fine et moyenne) contribuent beaucoup moins (généralement < 5 %) à l’IQPSM dans les groupes où elles sont intégrées.

Tableau 3. Contribution (%) des descripteurs dans l’IQPSM2 par groupe textural et horizon

Groupe Textural	Horizon	Type Structure	Classe Structure	Grade Structure	Consistance	Porosité Fine	Porosité Moyenne	Somme%
Argileux	Ap	27	19	31	18	3,3	2,4	100
Argileux	B	32	26	18	16	3,3	4,8	100
Limoneux	Deux horizons	39	27	12	18	3,4	1,4	100
Loameux	Ap	24	23	23	20	5,0	5,0	100
Loameux	B	29	21	10	31	4,8	3,6	100
Sableux	Deux horizons	35	26	20	19	NA	NA	100

3.3 Seuils de qualité pour l’IQPSM2

Le Tableau 4 présente les seuils de qualité de l’IQPSM2 en cinq classes qualitatives (très mauvais à très bon) pour chaque groupe textural et horizon. Les valeurs seuils diffèrent selon le groupe textural et l’horizon, ce qui confirme que la relation entre le score IQPSM2 et la perception visuelle de la qualité structurale n’est pas universelle, mais dépend du contexte pédologique. Les plages de scores sont généralement plus élevées dans les textures fines (argileux et limoneux) que dans les sols plus grossiers (loameux et sableux), indiquant que pour une même classe de qualité de structure, les sols fins accumulent des contributions plus importantes dans cet indicateur global de la structure de sol. Les intervalles entre classes ne sont pas symétriques, ce qui reflète la nature ordinaire du modèle : certaines transitions (par exemple de modéré à bon) nécessitent une augmentation plus importante du score que d’autres.

Tableau 4. Seuils de qualité pour l’IQPSM2 par groupe textural et horizon

Groupe Textural	Horizon	Très mauvais	Mauvais	Modéré	Bon	Très Bon
Argileux	Ap	≤ 0,851	0,851 - 4,545	4,545 - 7,628	7,628 - 10,962	10,962 - 12,57
Argileux	B	≤ 1,029	1,029 - 4,426	4,426 - 7,255	7,255 - 10,936	10,936 - 11,39
Limoneux	Deux horizons	≤ 2,391	2,391 - 5,491	5,491 - 8,101	8,101 - 12,027	12,027 - 13,15
Loameux	Ap	≤ 0,65	0,65 - 2,225	2,225 - 5,18	5,18 - 9,082	9,082 - 11,14
Loameux	B	≤ 1,02	1,02 - 1,939	1,939 - 4,944	4,944 - 7,31	7,31 - 8,60
Sableux	Deux horizons	≤ 0,732	0,732 - 1,03	0,732 - 3,421	3,421 - 4,95	5,66 - 6,66

4 FAITS SAILLANTS

- La faible corrélation observée entre les descripteurs pédomorphologiques a permis leur inclusion dans les modèles d’optimisation, indiquant qu’ils capturent des dimensions complémentaires de la structure du sol plutôt que des informations redondantes.

- Le processus d'optimisation a conduit au développement d'un nouvel algorithme permettant de dissocier explicitement la classe de structure du type de structure et d'établir des cotations spécifiques à chaque combinaison groupe textural–horizon (à l'exception des sols limoneux et sableux).
- La qualité structurale apparaît principalement déterminée par les caractéristiques morphologiques de la structure (type, classe et grade), avec des variations selon la profondeur, tandis que les indicateurs de porosité y contribuent faiblement. Ces résultats suggèrent que, dans une future évolution de l'IQPSM, la collecte systématique de descripteurs de la porosité pourrait être évitée sans compromettre la calibration du modèle.

5 CONCLUSION

L'objectif de ce travail consistait à optimiser les facteurs de pondération appliqués sur les catégories de descripteurs pédomorphologiques dans l'algorithme de l'IQPSM en se servant de scores obtenus de l'évaluation visuelle de 4751 images de sol prises dans le cadre de l'ÉÉSSAQ. Cette approche a conduit à l'estimation de nouvelles cotations et pondérations, tout en générant des modèles plus spécifiques aux horizons Ap et B, notamment dans les sols argileux et loameux, les deux groupes texturaux ayant un nombre suffisant d'observations pour le faire. Une amélioration de la prédiction de la qualité de la structure à partir de descripteurs pédomorphologiques devrait permettre une meilleure appréciation de la condition physique du sol, un élément essentiel à la santé des sols, tout en familiarisant les utilisateurs aux concepts utilisés en pédologie pour décrire la structure des sols.

6 RECOMMANDATIONS

- L'évaluation de la qualité de la structure à partir d'images a été réalisée la plupart du temps dans un ordre systématique (année d'échantillonnage, série de sols, numéro de site, point d'échantillonnage, horizon), introduisant des biais possiblement importants. Dans des prochaines campagnes d'évaluation visuelle, les images devraient défiler de façon plus aléatoire en fournissant aux évaluateurs uniquement le groupe textural et l'horizon du sol à évaluer.
- L'exercice pourrait être repris pour développer des modèles plus spécifiques aux horizons Ap et B de sols loameux, limoneux et sables en recherchant davantage d'observations dans ces sols.

7 RÉFÉRENCES

Brady, N., and R. Weil. 2016. The nature and properties of soils. Fifteenth edition. Pearson, Columbus.

Chavez Benalcazar, E., M.-O. Gasser, J. Dessureault-Rompré, G.-M. Wu, J.-B. Mathieu, et al. 2026. Soil structure assessment using pedomorphological descriptors – SSAPD in Quebec. *Soil Tillage Res.* 256: 106812. doi: 10.1016/j.still.2025.106812.

Gasser, M.-O., Bossé C., Clément, C.C., Bernard, C., Grenon., L., Mathieu, J.-B., Tremblay, M.-E. 2023. Rapport 1 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec : État de santé des principales séries de sols cultivées. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 190 pages.

Guimarães, R.M.L., B.C. Ball, and C.A. Tormena. 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure: Visual evaluation of soil structure. *Soil Use Manag.* 27: 395–403. doi: 10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x.

McElreath, R. 2020. Statistical rethinking: a Bayesian course with examples in R and Stan. Second Edition. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton.

8 ANNEXE A – Diagnostiques des modèles

Trois types de diagnostics ont été utilisés pour valider les modèles développés : convergence, cohérence entre chaînes et le nombre d'itérations effectives, distribution postérieure des prédictions. De plus l'exactitude des prédictions a été aussi calculé pour chaque modèles.

8.1 Convergence et mélange de chaînes

La Figure 8 présente les diagnostics de convergence des modèles bayésiens pour chaque groupe textural et horizon, en distinguant les trois composantes de variance (reprise, évaluateur et site). Les distributions a posteriori des écarts-types apparaissent globalement unimodales et bien définies, sans asymétrie extrême ni multimodalité marquée, ce qui indique une estimation stable des paramètres. Les traces des chaînes MCMC montrent un bon mélange des chaînes, sans dérive apparente ni tendance systématique, suggérant une convergence satisfaisante des échantillonnages. Les distributions a posteriori des effets fixes associés aux descripteurs ne sont pas présentées ici, mais elles montrent des comportements similaires à ceux observés pour les effets aléatoires, avec des formes unimodales et une bonne convergence des chaînes.

Par ailleurs, le nombre effectif d'itérations (de l'ordre de $\sim 2\,000$ à $8\,000$ selon les paramètres) est élevé, ce qui confirme une précision adéquate des estimations et une faible autocorrélation résiduelle.

Dans l'ensemble, ces éléments indiquent que les modèles convergent correctement et que les estimations des composantes de variance peuvent être interprétées avec confiance.

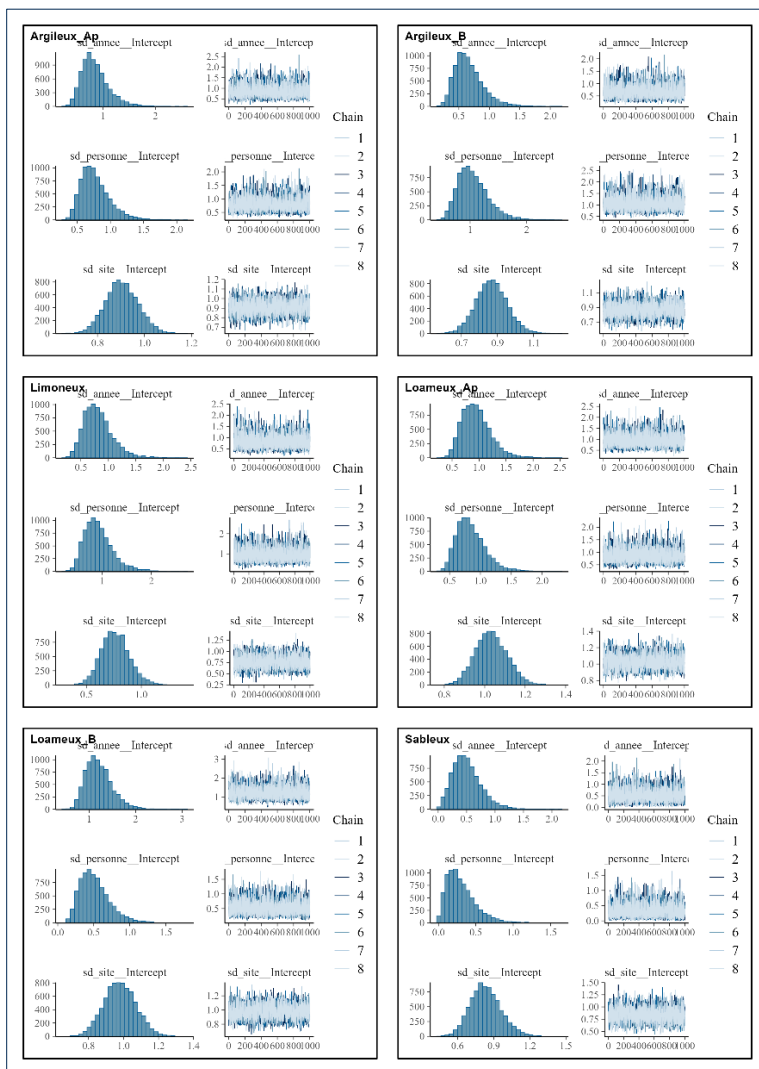


Figure 8. Diagnostique de convergence des modèles

8.2 Cohérence entre chaînes et le nombre d'itérations effectives

Les valeurs de \hat{R} (Rhat) présentées dans le Tableau 5 sont très proches de 1 pour l'ensemble des paramètres et des groupes texturaux (toutes $< 1,01$), ce qui indique une excellente cohérence entre les chaînes MCMC et confirme que la convergence des modèles a été atteinte. Cette stabilité concerne à la fois les paramètres structurels (intercepts et effets des descripteurs) et les composantes de variance associées aux effets aléatoires (site, reprise et évaluateur).

L'absence de valeurs élevées de Rhat suggère que les chaînes sont bien mélangées et qu'il n'existe pas de dépendance marquée entre elles, ce qui garantit la fiabilité des estimations postérieures. Les valeurs manquantes (NA) pour certains descripteurs dans le groupe sableux reflètent simplement l'absence de ces variables dans ce sous-ensemble et non un problème de convergence.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que le nombre d'itérations effectives est suffisant et que les distributions postérieures peuvent être interprétées avec confiance pour l'ensemble des groupes texturaux et des paramètres du modèle.

Tableau 5. Valeurs de Rhat pour vérifier la cohérence entre chaînes et le nombre d'itérations effectives

Facteur	Argileux_Ap	Argileux_B	Limoneux	Loameux_Ap	Loameux_B	Sableux
Intercept [1]	1,002	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001
Intercept [2]	1,002	1,001	1,002	1,001	1,002	1,001
Intercept [3]	1,002	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001
Intercept [4]	1,002	1,001	1,001	1,001	1,002	1,001
Type Structure	1,001	1,001	1,000	1,001	1,001	1,002
Classe Structure	1,001	1,000	1,000	1,001	1,002	1,001
Grade Structure	1,001	1,001	1,000	1,001	1,000	1,001
Consistance	1,004	1,000	1,001	1,002	1,002	1,000
Porosité Fine	1,001	1,000	1,001	1,000	1,001	NA
Porosité Moyenne	1,000	1,001	1,000	1,001	1,000	NA
Écart-type (site)	1,002	1,001	1,004	1,003	1,002	1,002
Écart-type (reprise)	1,001	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001
Écart-type (évaluateur)	1,001	1,000	1,001	1,000	1,001	1,000

8.3 Distribution postérieure des prédictions (posterior predictive-check)

La Figure 9 compare, pour chaque groupe textural, la distribution des valeurs prédites par le modèle (Y_{rep}) à la distribution observée (Y) des cinq classes de qualité d'évaluation visuelle.

Dans l'ensemble des groupes texturaux, les barres observées et les points avec intervalles de crédibilité se superposent largement, ce qui indique que le modèle reproduit correctement la forme et la dispersion des distributions observées. Les classes « bon » et « très bon » sont bien capturées pour tous les scénarios, et aucune classe ne présente d'écart systématique important entre observations et prédictions.

L'absence de divergence notable entre les distributions suggère donc un bon ajustement global du modèle, sans biais évident dans la reproduction des fréquences. Autrement dit, le modèle est capable de générer des données plausibles au regard des données réelles pour l'ensemble des groupes texturaux.

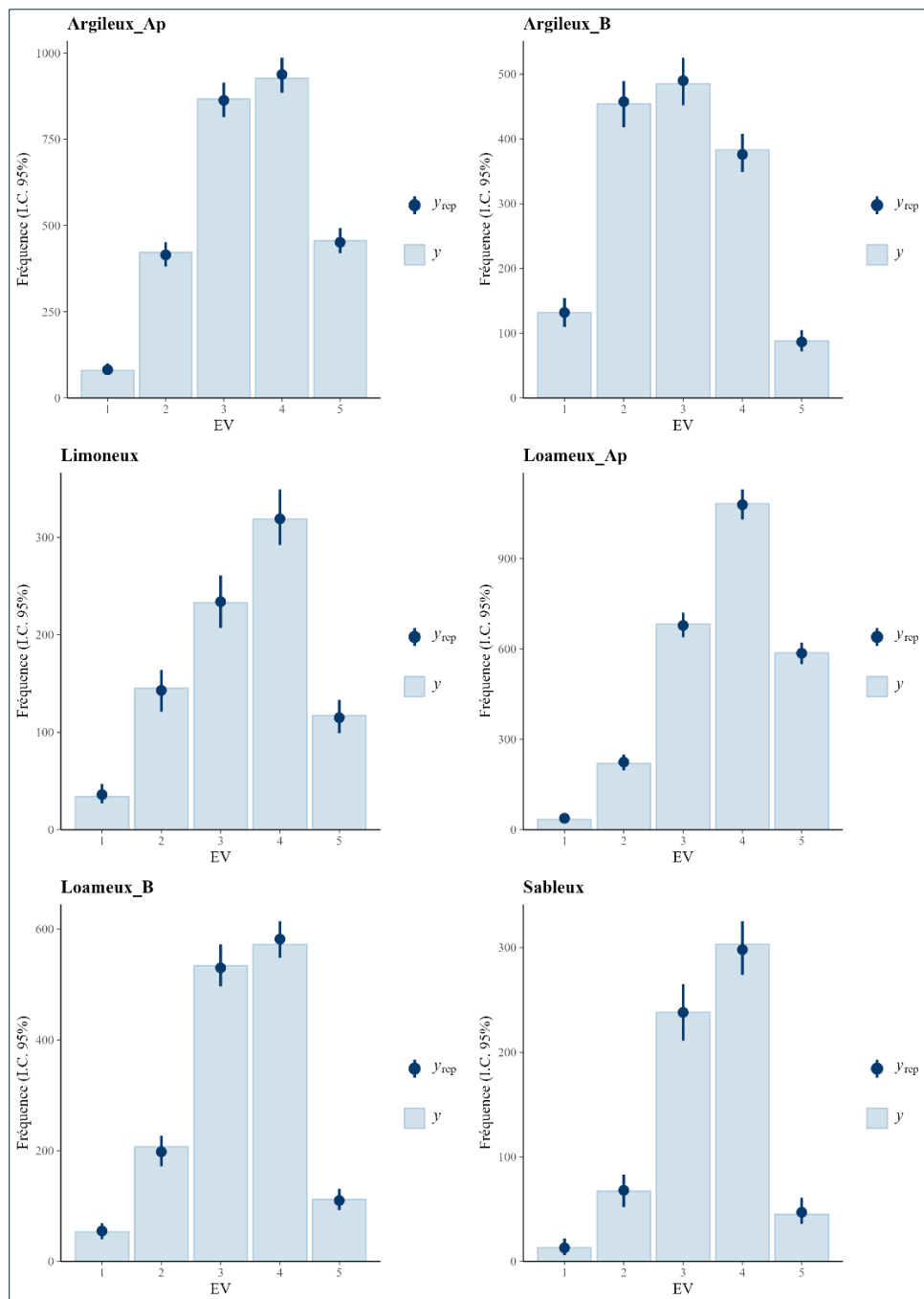


Figure 9. Diagnostique de la distribution postérieure des prédictions des modèles

8.4 Exactitude des modèles

Le Tableau 6 présente les paramètres permettant d'évaluer la capacité prédictive des modèles bayésiens pour chaque groupe textural et horizon.

Les modèles prédisent exactement la classe d'évaluation visuelle entre 39 % et 43 % du temps selon les groupes texturaux et horizons. Ce niveau d'exactitude est cohérent avec une variable ordinaire comportant plusieurs classes indiquant que le modèle capture bien la variabilité, mais que l'incertitude intrinsèque de l'évaluation visuelle limite la précision parfaite. D'ailleurs, les performances sont très similaires entre les groupes texturaux, ce qui suggère une stabilité des modèles.

Quant à la tolérance d'une classe d'évaluation visuelle, l'exactitude varie entre 87 % et 91 %, ce qui indique que la grande majorité des prédictions sont très proches des observations. Cela montre que le modèle reproduit correctement la position relative des classes, même lorsqu'il ne prédit pas exactement la classe.

Les valeurs de Pareto k sont toutes bien inférieures à 0,5 (k max \approx 0,31), indiquant que l'approximation « leave-one-out (LOO) » est fiable, c'est-à-dire, que les prédictions hors échantillon sont robustes.

Tableau 6. Paramètres pour mesurer l'exactitude des modèles

Groupe Textural	Horizon	Exactitude_valeur	Exactitude_1classe	Pareto(k)_médiane	Pareto(k)_max
Argileux	Ap	0,4291	0,9074	-0,169	0,2498
Argileux	B	0,3978	0,8758	-0,1528	0,1773
Limoneux	Deux horizons	0,4015	0,8718	-0,1604	0,2063
Loameux	Ap	0,4218	0,9015	-0,1629	0,3066
Loameux	B	0,3968	0,8722	-0,1439	0,2350
Sableux	Deux horizons	0,4285	0,8947	-0,1185	0,1485

9 ANNEXE B – SCORES DES CATÉGORIES DES DESCRIPTEURS

Tableau 7. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQPSM2 pour les Argileux

Descripteur	Catégories	Horizon Ap			Horizon B		
		IC-Inf	IC-Sup	Score	IC-Inf	IC-Sup	Score
Type Structure	1 - Massive	0	0	0	0	0	0
	3 - Lenticulaire	NA	NA	NA	0,01	0,7	0,16
	4 - Lamellaire	0,01	1,03	0,24	0,05	0,94	0,33
	5 - Polyédrique angulaire	0,1	1,49	0,59	0,14	1,2	0,54
	6 - Polyédrique subangulaire	0,4	1,9	0,99	0,82	2,03	1,34
	7 - Granulaire	2,72	4,29	3,36	2,92	4,4	3,61
Classe Structure	0 - Sans structure	0	0	0	0	0	0
	1 - Très grossière	0,01	1,02	0,23	0	0,58	0,12
	2 - Grossière	0,33	1,77	0,92	0,64	1,75	1,16
	3 - Moyenne	1,26	2,75	1,89	1,77	2,98	2,35
	4 - Fine	1,67	3,24	2,37	2,26	3,76	2,99
Grade Structure	1 - Sans structure	0	0	0	0	0	0
	2 - Très faible	0,01	1,01	0,24	0	0,51	0,1
	3 - Faible	0,51	2,06	1,23	0,09	1,14	0,51
	4 - Faible à modérée	1,25	2,84	2,01	0,46	1,73	1,04
	5 - Modérée	1,8	3,44	2,57	1,05	2,34	1,64
	6 - Modérée à forte	2,45	4,08	3,23	1,24	2,59	1,87
	7 - Forte	3,05	4,76	3,85	1,36	2,75	2,01
Consistance	1 - Très ferme/Extrêmement dur	0	0	0	0	0	0
	2 - Ferme/Dur à Très dur	0,02	0,94	0,36	0,11	1,14	0,57
	3 - Meuble/Meuble	0,75	2,11	1,42	0,62	2,08	1,36
	4 - Friable/Peu dur	1,23	2,31	1,69	1,12	2,29	1,66
	5 - Très friable/Tendre	1,78	2,93	2,29	1,27	2,54	1,86
Porosité Fine	0 - Absence de pores	0	0	0	0	0	0
	1 - Peu abondants (1-3)	0	0,24	0,05	0	0,32	0,06
	2 - Abondants (4-14)	0,04	0,54	0,24	0,03	0,57	0,23
	3 - Très abondants (>14)	0,12	0,75	0,41	0,09	0,77	0,37
Porosité Moyenne	0 - Absence de pores	0	0	0	0	0	0
	1 - Peu abondants (1-3)	0	0,12	0,02	0,01	0,57	0,18
	2 - Abondants (4-14)	0,01	0,21	0,07	0,1	0,84	0,41
	3 - Très abondants (>14)	0,06	0,64	0,3	0,17	1,08	0,55

Somme des scores maximaux pour tous les descripteurs des Argileux - Horizon Ap : 12,57

Somme des scores maximaux pour tous les descripteurs des Argileux - Horizon B : 11,39

Tableau 8. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQSM2 pour les Limoneux

Descripteur	Catégories	IC-Inf	IC-Sup	Score
Type Structure	1 - Massive	0	0	0
	3 - Lenticulaire	0,01	1,42	0,3
	4 - Lamellaire	0,09	1,81	0,58
	5 - Polyédrique angulaire	0,47	2,94	1,49
	6 - Polyédrique subangulaire	1,2	3,71	2,29
	7 - Granulaire	3,93	6,62	5,12
Classe Structure	0 - Sans structure	0	0	0
	1 - Très grossière	0,01	0,89	0,18
	2 - Grossière	0,85	3,04	1,92
	3 - Moyenne	1,89	4,2	3,02
	4 - Fine	2,29	4,79	3,5
Grade Structure	1 - Sans structure	0	0	0
	2 - Très faible	0	0,67	0,12
	3 - Faible	0,03	0,81	0,23
	4 - Faible à modérée	0,1	1,05	0,42
	5 - Modérée	0,33	1,52	0,83
	6 - Modérée à forte	0,52	1,81	1,08
	7 - Forte	0,78	2,45	1,53
Consistance	1 - Très ferme/Extrêmement dur	0	0	0
	2 - Ferme/Dur à Très dur	0,01	1,39	0,33
	3 - Meuble/Meuble	0,87	2,79	1,66
	4 - Friable/Peu dur	1,24	3	1,87
	5 - Très friable/Tendre	1,61	3,55	2,38
Porosité Moyenne	0 - Absence de pores	0	0	0
	1 - Peu abondants (1-3)	0	0,47	0,09
	2 - Abondants (4-14)	0,05	0,77	0,31
	3 - Très abondants (>14)	0,1	0,96	0,44
Porosité Moyenne	0 - Absence de pores	0	0	0
	1 - Peu abondants (1-3)	0	0,16	0,03
	2 - Abondants (4-14)	0,01	0,29	0,08
	3 - Très abondants (>14)	0,02	0,57	0,18

Somme des scores maximaux pour tous les descripteurs des Limoneux : 13,15

Tableau 9. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQPSM2 pour les Loameux

Descripteur	Catégories	Horizon Ap			Horizon B		
		IC-Inf	IC-Sup	Score	IC-Inf	IC-Sup	Score
Type Structure	1 - Massive	NA	NA	NA	0	0	0
	2 - Particulaire	0	0	0	0,01	1,44	0,34
	3 - Lenticulaire	NA	NA	NA	0,06	1,53	0,43
	4 - Lamellaire	NA	NA	NA	0,11	1,61	0,52
	6 - Polyédrique subangulaire	0	0,46	0,09	0,21	1,79	0,71
	7 - Granulaire	2,3	3,04	2,62	1,74	3,65	2,48
Classe Structure	0 - Sans structure	0	0	0	0	0	0
	1 - Très grossière	0	0,48	0,09	0	0,3	0,06
	2 - Grossière	0,21	1,64	0,87	0,03	0,59	0,2
	3 - Moyenne	1,1	2,56	1,78	0,82	1,62	1,2
	4 - Fine	1,85	3,38	2,57	1,29	2,4	1,83
Grade Structure	1 - Sans structure	0	0	0	0	0	0
	2 - Très faible	0	0,47	0,09	0	0,25	0,05
	3 - Faible	0,08	0,99	0,45	0,03	0,63	0,21
	4 - Faible à modérée	0,22	1,21	0,64	0,07	0,76	0,33
	5 - Modérée	0,71	1,73	1,16	0,12	0,91	0,44
	6 - Modérée à forte	1,15	2,26	1,65	0,19	1,21	0,63
	7 - Forte	1,93	3,24	2,55	0,26	1,83	0,89
Consistance	1 - Très ferme/Extrêmement dur	0	0	0	0	0	0
	2 - Ferme/Dur à Très dur	0,01	1,13	0,21	0,02	1,34	0,47
	3 - Meuble/Meuble	0,89	2,39	1,46	1,6	3,11	2,24
	4 - Friable/Peu dur	1,07	2,5	1,57	1,71	3,18	2,32
	5 - Très friable/Tendre	1,71	3,22	2,26	2,02	3,59	2,67
Porosité Fine	0 - Absence de pores	0	0	0	0	0	0
	1 - Peu abondants (1-3)	0	0,4	0,1	0	0,28	0,06
	2 - Abondants (4-14)	0,04	0,53	0,21	0,03	0,54	0,21
	3 - Très abondants (>14)	0,18	1,01	0,56	0,09	0,9	0,41
Porosité Moyenne	0 - Absence de pores	0	0	0	0	0	0
	1 - Peu abondants (1-3)	0	0,27	0,07	0	0,19	0,04
	2 - Abondants (4-14)	0,02	0,34	0,13	0,01	0,36	0,12
	3 - Très abondants (>14)	0,14	1,03	0,56	0,05	1	0,31

Somme des scores maximaux pour tous les descripteurs des Loameux – Horizon Ap : 11,14

Somme des scores maximaux pour tous les descripteurs des Loameux – Horizon B : 8,6

Tableau 10. Scores des catégories des descripteurs pour l'IQPSM2 pour les Sableux

Descripteur	Catégories	IC-Inf	IC-Sup	Score
Type Structure	1 - Massive	0	0	0
	2 - Particulaire	0,03	2,1	0,71
	6 - Polyédrique subangulaire	0,09	2,2	0,81
	7 - Granulaire	1,39	3,78	2,33
Classe Structure	0 - Sans structure	0	0	0
	2 - Grossière	0	0,36	0,07
	3 - Moyenne	0,78	1,7	1,22
	4 - Fine	1,14	2,43	1,75
Grade Structure	1 - Sans structure	0	0	0
	2 - Très faible	0	0,33	0,06
	3 - Faible	0,03	0,6	0,22
	4 - Faible à modérée	0,1	0,87	0,41
	5 - Modérée	0,24	1,4	0,74
	6 - Modérée à forte	0,43	2,38	1,31
Consistance	1 - Très ferme/Extrêmement dur	0	0	0
	2 - Ferme/Dur à Très dur	0,01	1,03	0,19
	3 - Meuble/Meuble	0,13	1,86	0,79
	4 - Friable/Peu dur	0,21	1,95	0,88
	5 - Très friable/Tendre	0,5	2,37	1,27

Somme des scores maximaux pour tous les descripteurs des Sableux : 6,6