

Rapport final

Analyses d'images d'agrégats de sol et développement d'une application mobile pour quantifier l'état structural du sol



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

Co-auteurs : Abdoulaye Baniré Diallo, Ph. D., UQAM
Armand Bandiang Massoua, Candidat au doctorat, UQAM
Catherine Bossé, agr. B. Sc., IRDA
Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc., IRDA

Collaborateurs : Mohammed Abou Niang, Ph. D. IRDA.

Rapport présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

Date : Mars 2023

Projet IRDA # : 820 250



L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a été constitué en mars 1998 par quatre fondateurs, soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation (MEI).

L'Institut est une corporation de recherche à but non lucratif, qui travaille chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA a pour mission de soutenir le développement d'une agriculture durable au Québec en favorisant le recours à l'innovation et aux partenariats.

Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.



Partenaires



Ce rapport peut être cité comme suit :

Gasser, M.-O., Massoua, A. B., Diallo, A. B., Bossé, C., et Chavez Benalcazar, E. 2023. Analyses d'images d'agrégats de sol et développement d'une application mobile pour quantifier l'état structural du sol. Rapport final. IRDA et partenaires. 33 pages.

Équipe de réalisation du projet

Responsable scientifique : Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA
Chargés de projet : Armand Bandiang Massoua, candidat Ph. D., UQAM
Catherine Bossé, agr. B. Sc., IRDA

Équipe de rédaction du rapport

Armand Bandiang Massoua, Candidat Ph. D.
Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.
Abdoulaye Baniré Diallo, Ph. D.
Catherine Bossé, agr. B. Sc.
Eduardo Chavez Benalcazar, B. Sc.

Collaborateur IRDA

Mohammed Abou Niang, Ph. D. IRDA

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D., IRDA
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-2380, poste 650
Courriel : marc-o.gasser@irda.qc.ca

Remerciements

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Des remerciements s'adressent également à l'IRDA, qui a fourni une contribution importante dans le cadre de cette étude. Les auteurs remercient également les participants du projet et reconnaissent également l'appui technique fourni par le personnel de recherche de l'IRDA et les multiples Clubs-conseils, Groupes-conseils et firmes citées dans le rapport. Les auteurs remercient le département d'informatique de l'UQAM pour avoir facilité les activités de travail à l'Interne avec les étudiants de premier cycle.

L'IRDA tient également à remercier le comité suivi du MAPAQ :

Bruce Gélinas, Stéphane Martel, Odette Ménard, Ghislain Poisson, Louis Robert, Jacinthe Dessureault-Rompré et Janylène Savard.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux	iii
Liste des figures	iii
Contexte de l'étude	4
Activités réalisées	6
1. Mise en place et consultation d'un comité de suivi	6
2. Production d'un plan de travail	6
3. Production d'une analyse des applications mobiles et outils complémentaires	7
4. Mettre en œuvre la réalisation d'un ou de plusieurs outils approuvés par le MAPAQ	8
5. Proposition d'un plan de diffusion de l'outil et sa mise en œuvre	9
6. Bilan annuel	10
6.1 État d'avancement des tâches et activités	10
6.2 Tâches et activités de diffusion réalisées	10
7. Problématiques et enjeux observés ou anticipés	10
Développement de l'analyse d'images pour évaluer la qualité de la structure des sols	12
1. Résumé	12
2. Introduction/Revue de littérature	12
Problématique	12
3. Matériel et Méthodes	13
3.1. Images analysées à partir des données de l'EESSAQ	13
3.2. Description de l'algorithme	15
3.3. Prétraitement de l'image	16
3.4. Distribution des classes	17
3.5. Métrique d'évaluation	17
3.6. Entraînement du modèle	18
4. Résultats	19
5. Discussion	20
6. Conclusion	20
Développement de l'application mobile pour l'analyse de la qualité du sol	21
1. Plan de travail et revue des applications mobiles en sols	21
2. Analyse et planification des besoins	21

Livrables.....	22
Planification des sprints.....	22
3. Phases de développement	24
Conception des wireframes.....	24
Livraison de la version beta de l’application mobile	28
Développement de l’application d’analyse d’images.....	34
4. Plan de viabilisation de l’application mobile	35
Conclusion	36
Références.....	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Performances obtenues du modèle.....	19
Tableau 2 :	Activités associées au développement de l'application mobile.....	21
Tableau 3 :	État de développement de l'application au 28 février 2023.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Plan de travail initial et répartition des tâches.	7
Figure 2 :	Prise de photos d'échantillons de sols lors de l'échantillonnage dans le cadre de l'EESSAQ.	14
Figure 3 :	Révision des photos de l'EESSAQ pour la vérification de trois descripteurs pédomorphologiques (A) et la détermination de cinq classes de qualité structurale (B) avec une application PowerBI.	15
Figure 4 :	Exemple de pré-traitement des images avec la charte de couleurs.	16
Figure 5 :	Exemple de découpage des images.	16
Figure 6 :	Distribution des observations dans les trois classes de qualité structurale.	17
Figure 7 :	Inclusion de caractéristiques pédomorphologiques.	19
Figure 8 :	Principaux wireframes finaux discutés.....	24
Figure 9 :	Architecture de la base de données.....	25
Figure 10 :	Page de login de profil en version prototype.....	26
Figure 11 :	Page de la vue principale du prototype.	26
Figure 12 :	Calculateur d'indicateur visuel de qualité java.	27
Figure 13 :	Téléchargement de l'application, page principale et géoréférencement du profil de sol sur l'application mobile.....	29
Figure 14 :	Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des couches de sol pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.....	30
Figure 15 :	Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des propriétés de la couche Ap1 (1) pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.....	31
Figure 16 :	Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des propriétés dans la couche Ap1 (2) pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.....	32
Figure 17 :	Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des propriétés dans la couche Ap1 (3) pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.....	33
Figure 18 :	Étapes d'évaluation d'un profil de sols : Pointage final obtenu, globale ou par horizon pour le module d'évaluation visuelle.	34

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Le MAPAQ a mandaté l'IRDA en 2020 afin de réaliser le projet *Analyses d'images d'agrégats de sol et développement d'une application mobile pour quantifier l'état structural du sol*. L'objectif principal de ce projet était de maximiser les retombées potentielles des résultats obtenus dans le cadre de l'Étude de l'état de santé des sols agricoles du Québec (EESSAQ). Plus spécifiquement, ce projet visait à explorer le potentiel des images d'un sol défait sur un coroplaste au champ à révéler son état structural ou sa qualité physique en fonction du type de sol analysé pour finalement développer une application sur téléphone intelligent capable d'analyser et d'évaluer au champ la qualité physique d'un profil de sol.

Les objectifs visés par le développement d'une telle application mobile étaient de :

- Fournir aux agronomes et conseillers agricoles sur le terrain ainsi qu'aux producteurs agricoles un outil complémentaire pour comparer l'effet de pratiques agricoles et culturales sur la condition physique du sol;
- Améliorer la capacité des producteurs à prendre des décisions éclairées quant au choix des pratiques culturales à adopter et du trafic au champ;
- Tirer avantage des technologies reliées à la téléphonie cellulaire (imagerie, analyse de données, géoréférence, etc.) pour augmenter la capacité du producteur ou du conseiller sur le terrain à gérer l'information sur les champs et les sols en lien avec les applications déjà existantes (carnets de champ, PAEF, cartes de sols et autres attributs reliés au terrain);
- Faciliter l'apprentissage des connaissances générales sur les sols;
- Offrir une opportunité de collaborer à l'effort de collecte d'information sur la nature et l'état des sols;

L'outil serait ainsi utile aux chercheurs pour les projets de recherche axés sur la santé de sols et aurait aussi une vocation pédagogique pour la clientèle étudiante.

Les activités à réaliser par l'IRDA dans ce projet étaient les suivantes :

- Mettre en place et consulter un comité de suivi (incluant experts et analystes du MAPAQ et d'AAC) pour encadrer les travaux et définir la portée de l'application;
- Produire une analyse des outils complémentaires qui pourraient être conçus et proposer ceux qui semblent les plus prometteurs et cruciaux pour l'atteinte des objectifs du projet. Elle doit aussi regarder la possibilité de bonifier les outils déjà existants;
- Fournir un plan de travail pour la réalisation d'un ou de plusieurs outils;
- Mettre en œuvre la réalisation d'un ou de plusieurs outils approuvés par le MAPAQ. Cette étape implique l'utilisation de ressources spécialisées;
- Proposer un plan de diffusion de l'outil et le mettre en œuvre.

Ce rapport final présente les activités réalisées, le développement de l'analyse d'images pour évaluer la qualité de la structure des sols, le développement de l'application mobile pour l'analyse de la structure du sol et finalement une conclusion sur le développement futur à réaliser.

ACTIVITÉS RÉALISÉES

1. Mise en place et consultation d'un comité de suivi

Le comité de suivi était formé de Bruce Gélinas (MAPAQ), Stéphane Martel (MAPAQ), Odette Ménard (MAPAQ), Ghislain Poisson (MAPAQ), Louis Robert (MAPAQ) et Janylène Savard (MAPAQ). Le personnel de l'IRDA ainsi que les collaborateurs au projet assistaient aux réunions.

Le comité de suivi a été consulté à trois reprises soit le 17 juin 2021, le 16 février 2022 et le 12 octobre 2022.

L'objectif de la réunion du 17 juin 2021 visait à :

- Présenter l'état d'avancement de l'analyse d'images entrepris par M. Bandiang-Massoua, étudiant au doctorat sous la supervision d'Abdoulaye Baniré Diallo. La méthodologie d'identification et de la sélection des attributs pédo-morphologiques révélateurs de l'état structural du sol a été présentée.
- Présenter le plan de développement de l'application mobile proposée pour la prochaine année (sous la gouverne du professeur d'Abdoulaye Baniré Diallo).

L'objectif de la réunion du 16 février 2022 visait à :

- Présenter l'état d'avancement de l'analyse d'images par M. Bandiang-Massoua. Soit, la revue de littérature, la classification supervisée des images (annotations et étiquetage) qui sera réalisée par les étudiants de Mme Dessureault selon trois attributs (forme et dimension; angularité; rugosité) et la conception d'un modèle de classification.
- Présenter l'état d'avancement de l'application mobile durant la session d'automne 2021 et la reprise des travaux durant la session d'hiver 2022.

L'objectif de la réunion du 22 octobre 2022 visait à :

- Présenter l'évolution du projet et faire une validation de certains éléments techniques par le comité de suivi.

2. Production d'un plan de travail

Le plan de travail initial a été déposé au MAPAQ le 14 octobre 2020, revu en comité de suivi le 28 octobre 2020 et approuvé en janvier 2021.

Les tâches réalisées selon les échéanciers prévus seront présentées et discutées dans les Sections concernant les développements de l'analyse d'image et de l'application mobile.

PLAN DE TRAVAIL : RÉPARTITION DES TÂCHES		Mandat Valorisation des données de l'EESQAQ - Imagerie des agrégats de sol et développement d'une application mobile																																				
Prévision en date de Juillet 2020		2020									2021									2022									2023									
Étapes de réalisation du projet		avril	mai	juin	juill.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juill.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juill.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	
1	Mise en place et consultation d'un comité de suivi																																					
2	Analyse des outils et applications mobiles complémentaires																																					
3	Fournir un plan de travail pour la réalisation d'un ou de plusieurs outils																																					
4	Réalisation d'un ou de plusieurs outils approuvés par le MAPAQ																																					
5	Proposer un plan de diffusion de l'outil et le mettre en œuvre																																					
6	Embauche d'un étudiant au doctorat																																					
7	Encadrement de l'étudiant																																					
8	Échanges inter-institutionnel																																					
9	Revue de littérature et préparation de la proposition de thèse doctorale																																					
10	Cours et formations de l'étudiant																																					
11	Identification des attributs révélateurs de l'état structural du sol																																					
12	Analyses et interprétation des images d'agrégats																																					
13	Publication scientifique des résultats																																					
14	Développement et validation de l'application mobile																																					
15	Développement de solutions agronomiques à intégrer dans l'app. mobile																																					
16	Rapports d'étape, Rapport final et fiches synthèses. Application mobile																																					

Figure 1 : Plan de travail initial et répartition des tâches.

3. Production d'une analyse des applications mobiles et outils complémentaires

Cette analyse a été réalisée et présentée à l'intérieur du plan de travail précédemment présenté.

La revue des applications mobiles n'a révélé aucune application spécifiquement développée pour évaluer la qualité physique des sols à partir d'images d'agrégats de sols relevées au champ.

Les différentes applications mobiles qui étaient disponibles à la clientèle québécoise et en lien avec les sols se répartissaient sommairement dans les types d'applications suivantes :

- Carnet de note pour la gestion des champs et l'échantillonnage des sols
- Cartographie des sols, bases de données géoréférencées et clé d'identification pédologique des sols
- Outils de gestion de la compaction/machinerie, de la condition physique et de l'érosion de sols

L'application développée pourrait aussi s'appuyer sur une évaluation visuelle et tactile de certains paramètres pédomorphologiques du sol, comme l'indicateur visuel développé en parallèle par l'équipe de Catherine Bossé ou d'autres critères retenus dans les applications VESS, Structure de mottes ou Soil app comme la profondeur d'enracinement, la présence de couches compactes, l'odeur du sol, etc.

La définition de la condition physique du sol étant largement influencée par le type de sol, l'application devrait être développée en prévoyant différentes méthodes pour introduire cette information. L'analyse d'image pourrait en soi servir à identifier le type de sol (type de matériaux, texture, granulométrie, etc.) si le modèle est suffisamment bien entraîné. L'accès à la carte pédologique par géoréférencement (via Info-sols par exemple) pourrait permettre un choix parmi quelques séries de sols identifiées sur l'unité cartographique géoréférencée ou

dans la région à proximité. L'utilisateur pourrait encore sélectionner le type de sol selon une liste de choix ou encore à partir d'une clé d'identification de sols comme celui du système de classification des sols du Canada (via CSSC par exemple). Finalement, le choix du type de sol pourrait être dérivé d'une combinaison de ces méthodes.

Relié à un carnet de note comme AgPad, Geofolia, LaserAg l'utilisateur pourra géoréférencer et entreposer les images et les informations générées sur les sols pour plusieurs applications, dont la définition de zone homogène d'échantillonnage des sols, la comparaison de l'effet de pratiques agricoles sur les sols, l'ajustement des recommandations d'engrais dans le PAEF en fonction de l'état des sols ou leur susceptibilité, etc. Couplé avec Terranimo, l'utilisateur pourrait comparer l'effet du passage de machinerie lourde prévu par Terranimo à celui observé sur le terrain et interprété par l'application mobile, même si cette dernière est présentement entraînée sur les horizons de sol en surface, soit le Ap et le début du B.

Enfin, avec la collaboration et l'autorisation de l'utilisateur, celui-ci pourra contribuer au développement et à l'entraînement de l'application en identifiant certains traits (qualité structurale du sol) reliés à la reconnaissance (analyse d'image) des sols et aussi enrichir l'information et les bases de données sur les sols géoréférencés qui seront constituées. L'information et les images de sols géoréférencés pourront ainsi constituer une source de données pour différents usages, dont la cartographie des sols et les inventaires sur l'état de santé des sols.

Tout le code source développé pour l'application sera open access, les formats de données seront standards et l'application sera développée sous forme d'une restAPI (service web) qui permettra de l'interfacer dans tout type d'applications comme celle mentionnées ci-haut. À titre d'exemple, l'application pourrait être programmée et intégrée dans un carnet de champ comme Agpad, Geofolia (Siga-Isagri) ou Échantillonneur LaserAg (Logiag).

4. Mettre en œuvre la réalisation d'un ou de plusieurs outils approuvés par le MAPAQ

Cette activité a impliqué l'utilisation de ressources spécialisées. Le développement de l'interface de l'application a été confié à l'équipe du professeur Abdoulaye Baniré Diallo à l'Université du Québec à Montréal. Le développement d'une première version de l'application mobile a été réalisé à l'automne 2021 par un groupe d'étudiants du 1^{er} cycle en informatique à l'UQAM. Cette version visait à intégrer trois modules pour trois indicateurs de la qualité structurale de profils de sols, soit l'Indicateur de la qualité structurale de profils de sols par examen visuel (QSSEV) et la Qualité structurale de profils de sols révélée par analyse d'images (QSSAI) et finalement le VESS. Les travaux ont conduit à la production d'un organigramme des décisions à prendre et des champs à saisir pour au moins l'indicateur visuel.

L'interface de l'application devait guider l'utilisateur dans la prise de mesure. À toutes les étapes de la prise de mesure, des explications plus détaillées seraient disponibles. L'expérience utilisateur devait rester rapide et agréable pour les habitués, tout en permettant une bonne prise en charge pour les utilisateurs plus novices.

Le développement de l'application a été repris par un 2^e groupe d'étudiants du 1^{er} cycle en informatique à l'UQAM, à l'hiver 2022 pour intégrer davantage de composantes reliées à la définition des horizons de sols et à l'analyse d'images. Le développement a été repris en langage de programmation ouverte, par exemple PHP et MySQL sur Linux.

Il a été suggéré de présenter l'application mobile en deux modes, soit débutant ou expert. Mais à la vue du développement en cours, le niveau d'expertise serait apparemment dicté par le nombre de couches

diagnostiquées, selon le niveau d'intérêt ou d'expertise de l'utilisateur. Ainsi des pointages seraient présentés par couches de sols diagnostiquées et l'attention serait dirigée vers les couches ayant les plus faibles scores, afin de sensibiliser le producteur et l'intervenant à cette couche limitante et les interpeler pour y amener des correctifs. Un pointage global est aussi prévu pour qualifier le profil dans son ensemble et ainsi comparer son état général à des profils de même type de sols en condition de référence.

Le comité de suivi du MAPAQ a émis des avis partagés sur l'émission de recommandations ou de solutions à partir de l'application. Celle-ci pourrait difficilement offrir des pistes de solutions précises en fonction des types de sols et de l'état de santé des sols diagnostiqués, mais pourrait faire apparaître des « ALERTES » ou « ACTIONS REQUISES » devant un horizon ou une couche de sol trop dégradé. Elle pourrait aussi énumérer des causes possibles qui ont engendré sa dégradation, sans prétendre se substituer à l'agronome ou au producteur pour interpréter les phénomènes.

Après ces prototypes avec les étudiants pendant une année et demie. Le développement final de l'application mobile a été confié à une firme de consultant (Exeapps.com) en novembre 2022. Une version beta de l'application était en cours de développement en date du 31 mars 2023. Une version 1.0 serait déployée au printemps (mai-juin 2023) et une version terrain 2.0 serait déployée en août 2023 pour usage public.

La version beta a été développée sur des serveurs d'Amazon pour accélérer le développement. La version finale sera éventuellement hébergée sur les serveurs de Umbrella technologie au nom de l'IRDA, une fois les phases de développement terminées.

5. Proposition d'un plan de diffusion de l'outil et sa mise en œuvre

Le plan de diffusion inclut des présentations dans le cadre de journées de terrain organisées par l'IRDA ou et d'autres organismes. Dans le cadre du 25e anniversaire de l'IRDA, une demi-journée est prévue à la station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon à l'été de 2023, et l'application pourra être présentée à ce moment-là. Des présentations pourraient également se faire dans le cadre de webinaires en Santé des sols à la demande des organisations. Des présentations peuvent également être réalisées lors de journées de producteurs (St-Rémi, AgriVision, INPACQ, etc.). Toutefois la diffusion de l'outil doit passer avant tout par une phase de validation des différentes versions Beta, 1.0 et 2.0.

Des discussions et des recommandations ont eu cours concernant les réponses qui pourraient résulter de l'utilisation de l'outil ou les alarmes qui pourraient être soulevées.

Dans un projet sur la survie des luzernières de Maxime Leduc en collaboration avec LOGIAG, des formations ont été données pour relever les mêmes caractéristiques pédomorphologiques utilisées dans le module pour l'indicateur de la qualité structure de sols par évaluation visuelle (QSSEV), ainsi que des images pour le QSSAI. Une application mobile similaire a été développée pour enregistrer ces informations en attendant que notre application mobile soit fonctionnelle et opérationnelle pour donner les scores dans ces mêmes modules.

6. Bilan annuel

6.1 État d'avancement des tâches et activités

Les travaux d'analyse d'image et de développement de l'application mobile ont été réalisés entre janvier 2021 et mars 2023, mais ne sont pas terminés.

Le doctorant Armand Massoua a réalisé ses travaux pour le développement d'analyse d'images des agrégats de sols ainsi que les autres objectifs poursuivis dans le cadre de son doctorat en science des données et de l'informatique, à l'Université du Québec à Montréal avec le professeur Abdoulaye Baniré Diallo.

L'étudiant a procédé à l'analyse des images et au développement d'un interpréteur de la qualité structurale des profils de sol. Ses travaux sont présentés plus loin dans le rapport. Une première version du code Python pour réaliser ces analyses d'images était disponible en date 28 février 2023. L'intégration de l'API pour réaliser ces analyses d'image restait à programmer dans l'application mobile. Cette partie est donc complétée à 80 %.

Le développement de la coquille et des fonctionnalités de l'application mobile a été réalisé en partie en date du 31 mars 2023. Les étapes de développement et les niveaux atteints sont présentés au Tableau 3. Une version beta de l'application mobile est en cours de développement et sera disponible pour des tests à l'interne à partir d'avril 2023. Considérant l'ensemble des fonctionnalités à intégrer dans l'application, on peut considérer que son état d'avancement était complété à 50 % en date du 28 février 2023.

6.2 Tâches et activités de diffusion réalisées

Un webinaire et une formation pour utiliser le module dédié à la description visuelle de la qualité structurale du profil de sol ont été donnés en mars et septembre 2022 dans le cadre du projet sur la survie hivernale des luzernières de M. Maxime Leduc.

Un guide d'utilisation a été produit pour le module dédié à la description visuelle de la qualité structurale dans le cadre de l'activité 3 du mandat spécifique 2020-2023 sur la mise à jour des informations en pédologie.

7. Problématiques et enjeux observés ou anticipés

Pour le développement et l'interprétation de l'analyse d'image, il y a eu quelques problèmes dans l'amorce des travaux par l'étudiant au doctorat dû à des problèmes d'immigration qui ont causé un léger retard dans le démarrage. Une première approche a été tentée pour évaluer la structure à partir de la morphologie des agrégats avec un entraînement supervisé dans lequel l'étudiant aura investi la moitié de son temps. L'étudiant aura finalement opté pour une analyse strictement réalisée sur l'analyse d'image sans caractérisation morphologique préalable. Plusieurs modèles permettant d'analyser et d'interpréter la qualité de la structure de sol à partir d'images de sol sur coroplaste ont été développés.

Le développement de l'application mobile a connu plusieurs versions amorcées par deux cohortes d'étudiants au baccalauréat en informatique à l'UQAM suivi d'une version en cours de production par une firme de consultant engagée durant les mois de décembre 2022 à mars 2023 et qui devait être livrée en même temps que le dépôt de ce rapport. Voir le Tableau 2 qui présente les activités associées au développement de l'application mobile.

DÉVELOPPEMENT DE L'ANALYSE D'IMAGES POUR ÉVALUER LA QUALITÉ DE LA STRUCTURE DES SOLS

1. Résumé

Le but de cette partie du projet visait à fournir une analyse semi-automatisée des images qui sont prélevées en vue d'en faire une application pour produire un indice de qualité du sol. Pour cela, des approches de classification basée sur la vision par ordinateur ont été utilisées en vue de faire une preuve de concept de qualité. Puis d'inclure ce classifieur dans une application mobile qui serait utilisée sur le terrain. Les résultats sont suffisamment intéressants au niveau performance pour suggérer l'inclusion dans une version beta de l'application mobile.

2. Introduction/Revue de littérature

Problématique

La structure du sol résulte de l'agrégation des particules minérales et organiques sous différentes formes, grosseurs et niveaux de stabilité. Différents modèles conceptuels ont été proposés pour expliquer les mécanismes de formation de la structure à partir de l'agrégation des particules minérales à différents niveaux, allant de liens physico-chimiques aux processus biologiques liés aux organismes vivants et exsudats qu'ils produisent dans le sol : substances microbiennes, mycéliums et exsudats racinaires, etc. (Tisdale et Oades, 1982). Les mécanismes impliqués dans la formation de la structure du sol sont multiples et diffèrent selon les différents types de sol et par conséquent, la modélisation de l'état de la structure ne peut se réduire à un seul modèle unique (Tisdale et Oades, 1982; Strickland et al., 1988).

La structure du sol influence la stabilité de la surface, l'érodabilité, le degré de compaction et l'aération du sol. La taille, la forme et la stabilité des unités structurales contrôlent la distribution de la taille des pores qui, à son tour, détermine plusieurs propriétés physiques du sol telles que la conductivité hydraulique et thermique, la densité et la porosité, l'écoulement de l'eau et le transport des solutés dans le sol. La porosité d'air qui affecte la diffusivité des gaz est également contrôlée par la structure du sol. Elle est importante pour assurer l'oxygénation des racines et évacuer les flux de CO₂. L'agrégation du sol en différentes unités structurales affecte la rétention d'eau, la croissance des racines et la germination des semis. Une bonne structure protège également le carbone et l'azote de leur minéralisation. Finalement, l'état de la structure du sol conditionnent plusieurs processus essentiels à la croissance des plantes et au fonctionnement des écosystèmes.

Par conséquent, l'évaluation de la qualité de la structure des sols devrait être un paramètre d'importance en agronomie pour qualifier la santé des sols. Cette évaluation est toutefois souvent négligée en raison du manque d'expertise et de variables métriques pour la quantifier. Dans ce projet, nous avons cherché à utiliser l'intelligence artificielle pour analyser des images d'agrégats de sol et identifier différents niveaux de qualité de la structure des sols.

3. Matériel et Méthodes

Cette section décrit le matériel (images, données) et les méthodes d'interprétation utilisées pour qualifier la structure des sols à partir d'images.

3.1. Images analysées à partir des données de l'EESQAQ

Les images provenaient de l'Étude sur l'état de santé de sols agricoles du Québec (Gasser et al., 2023). Le projet visait à évaluer l'état des sols à partir d'un échantillonnage représentatif des principaux matériaux parentaux présents dans les diverses régions pédologiques du Québec. Les images ont été prises sur le terrain au moment de l'échantillonnage et de la caractérisation des sols. Un protocole d'échantillonnage et de caractérisation détaille les opérations réalisées jusqu'à la prise de sol et la prise d'image (Gasser et al., 2019). Brièvement, 71 séries de sols les plus communément cultivées ont été sélectionnées par une équipe pédologique et ont été étudiées sur six sites différents, soit sur quatre sites en culture et sur deux sites témoins dont le sol était en meilleur état physique. Sur chaque site, la série de sols a été validée à quatre endroits (point d'échantillonnage) espacés d'au moins 80 m l'un de l'autre. Dix-huit équipes ont été engagées en 2018 et 2019 pour réaliser par après l'échantillonnage et la caractérisation des sols. À chaque point d'échantillonnage, l'état de la surface du sol a été relevé et les sols ont été caractérisés et échantillonnés à trois profondeurs diagnostiques dans les horizons Ap et B. Les propriétés morphologiques ont été relevées dans le profil et des échantillons ont été prélevés pour déterminer en laboratoire les propriétés physiques (granulométrie, stabilité des agrégats, masse volumique apparente, macroporosité, inventaire de Cs-137), chimiques (pH eau et pH tampon SMP, CEC estimée, éléments P, K, Ca, Mg, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Na extraits en solution Mehlich-3) et biochimiques (C et N Leco, carbone actif, N minéralisable après incubation de 14 jours). La conductivité hydraulique a été mesurée au champ avec un infiltromètre de Guelph. L'érosion des sols a été évaluée avec l'inventaire de Cs-137.

Les images ont été prises au moment de la caractérisation des horizons dans le profil à chaque point d'échantillonnage. Une motte de sol a été déposée sur un coroplaste blanc de 30 x 30 cm sur lequel était aussi déposée une charte de couleur pour la calibration traitement de couleurs (voir Figure 2). La motte était légèrement défaits pour permettre d'exprimer la structure sans trop créer trop de pression et d'artéfacts. Deux règles placées sur le contour du coroplaste facilitaient la détermination des dimensions (classe de la structure) des agrégats déposés sur le coroplaste. Toutes les images ont été capturées avec un téléphone intelligent Samsung Galaxy A8 de modèle SM-A530W.



Figure 2 : Prise de photos d'échantillons de sols lors de l'échantillonnage dans le cadre de l'EESSAQ.

Lors de l'échantillonnage de l'EESSAQ, 4679 photos des échantillons de sols minéraux ont été relevées; cependant, seulement 4423 photos présentaient un niveau acceptable pour le traitement subséquent. Les 256 photos non retenues présentaient trois types de problème : 46 images trop floues, 124 images avec des mottes des sols mal distinguées et 86 photos perdues.

Durant l'été et l'automne 2022, les 4423 images retenues ont été analysées visuellement pour vérifier et valider les catégories de trois descripteurs pédomorphologiques inscrits par les équipes de terrain : le type, classe et grade de la structure (voir section A de la Figure 3) ainsi que pour déterminer cinq classes de qualité structurale par évaluation visuelle : très mauvaise, mauvaise, modérée, bonne et très bonne (voir section B de la Figure 3).

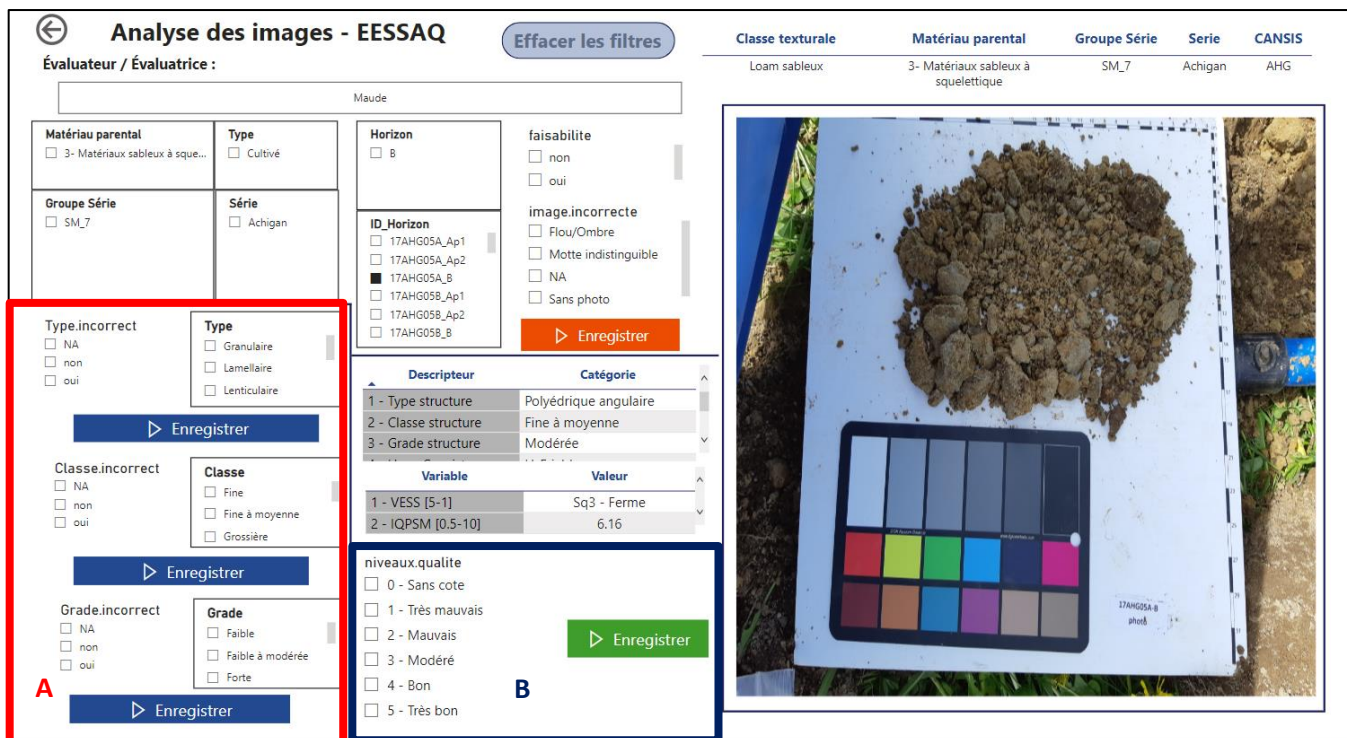


Figure 3 : Révision des photos de l'EESSAQ pour la vérification de trois descripteurs pédomorphologiques (A) et la détermination de cinq classes de qualité structurale (B) avec une application PowerBI.

3.2. Description de l'algorithme

Dans le cadre de ce projet qui a pour but la prédiction de la qualité de la structure à travers l'analyse d'images, le choix naturel s'est porté vers les algorithmes de l'intelligence artificielle (IA) capables d'extraire des motifs riches pour la prédiction. Pour ce faire, plusieurs algorithmes de l'IA basés sur les réseaux neuronaux convolutifs ont été utilisés et programmés dans l'environnement de développement Python (van Rossum et Drake, 2009). Tous les fichiers de programmation Python (notebooks) sont disponibles sur demande.

Les algorithmes utilisés au début sont ResNet34, EfficientNet_b3 et MobileNet_V2, ils font partie des modèles les plus populaires pour la classification des images. Vu les contraintes concernant ce projet qui sont la faible quantité de données disponibles pour l'entraînement des modèles et le déploiement du modèle choisi pour être utilisé sur les téléphones mobiles, et aussi pour éviter de sur-ajuster le modèle pendant la phase d'entraînement, nous avons décidé de choisir l'architecture du modèle MobileNet_V2. L'architecture du MobileNet_V2 est un réseau de neurones convolutifs (CNN) conçu pour être efficace en termes de calcul et adapté au déploiement sur des appareils mobiles. Le modèle consiste en une série de convolutions séparables en profondeur, un type de convolution qui donne de bons résultats sur les appareils à ressources limitées. Le modèle comprend également des connexions résiduelles, qui contribuent à améliorer le flux d'informations dans le réseau et à réduire le risque de gradients évanescents. En plus, le modèle a un nombre relativement faible de paramètres par rapport aux autres qui en ont des dizaines voire centaines de million de paramètres, ce qui réduit le risque de surajustement et facilite l'apprentissage.

3.3. Prétraitement de l'image

Correction des couleurs des images

La correction des couleurs est un processus qui consiste à ajuster les couleurs d'une image pour obtenir l'aspect souhaité ou pour corriger toute incohérence de couleur. Cette étape a été réalisée grâce à la charte de couleur posée à côté des agrégats lors de la prise des images.

Dans le contexte des algorithmes de réseaux neuronaux, la correction des couleurs est effectuée en prétraitant les images d'entrée avant de les introduire dans le réseau. Cela permet de s'assurer que les images d'entrée ont une distribution cohérente des couleurs et ne provoquent pas de comportement inattendu dans le réseau.



Figure 4 : Exemple de pré-traitement des images avec la charte de couleurs.

Découpage des images

Cette étape consiste à débarrasser l'image des objets non nécessaires se trouvant dans celle-ci. Elle nous permet surtout de garder que les agrégats essentiels pour la tâche de caractériser par les algorithmes de l'IA. Nous avons utilisé l'outil de traitement d'images GIMP pour accomplir cette tâche. Voir les figures ci-dessous.



Figure 5 : Exemple de découpage des images.

Regroupement des images par classe

Lors de la phase d'annotation des images, cinq classes de qualité structurale (très mauvaise, mauvaise, modérée, bonne, et très bonne) représentant les différents types de la qualité de la structure ont été retenues. Au cours des expériences, nous nous sommes rendu compte que le modèle entraîné avait du mal à bien séparer ces différentes classes. Cela est potentiellement dû au fait que les descripteurs des images qui sont extraits par le modèle ne sont pas suffisamment riches pour les séparer convenablement. Ayant constaté cela, nous avons fait un regroupement des images. Nous sommes passés des cinq classes du départ à trois classes (très mauvaise et mauvaise, modérée, et enfin bonne et très bonne). Les classes dans les deux extrêmes ont été regroupées dans des classes commune pour avoir trois classes (mauvaise, modérée, et bonne). Ce petit changement a donné un coup de pouce au modèle pour améliorer sa performance en termes de précision.

3.4. Distribution des classes

La figure ci-dessous montre clairement que le jeu de données de ces images est mal équilibré. Plus de 56 % des images de sols ont une bonne structure et seulement 13 % des images présentent une mauvaise structure, selon les évaluateurs qui ont qualifié les sols à partir des descripteurs pédomorphologiques et les images.

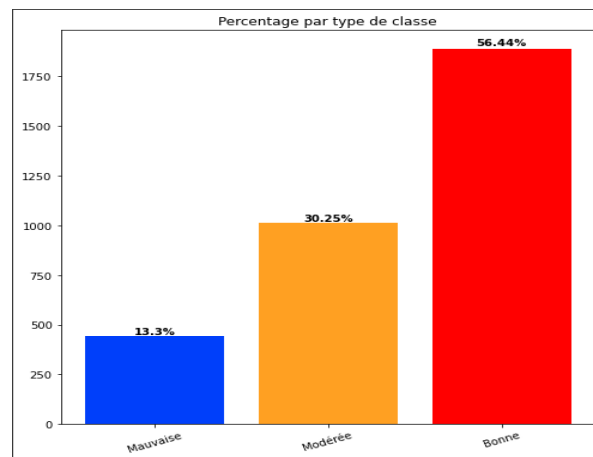


Figure 6 : Distribution des observations dans les trois classes de qualité structurale.

3.5. Métrique d'évaluation

Pour l'évaluation de la performance des modèles entraînés, nous avons utilisé des métriques telles que la précision et le score F1. Et surtout l'accent est mis sur le score F1. Le score F1 est une mesure de la précision d'un modèle qui tient compte à la fois de la précision et du rappel. La précision est une mesure du nombre de prédictions positives faites par le modèle qui sont réellement vraies, tandis que le rappel est une mesure du nombre d'instances positives réelles correctement identifiées par le modèle. Dans notre cas de données non balancées, où il y a un nombre disproportionné d'instances d'une classe par rapport à une autre, l'utilisation du score F1 est un bon choix car il équilibre la précision et le rappel.

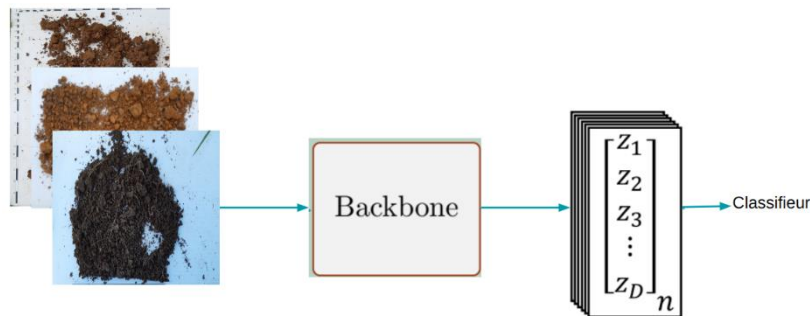
3.6. Entraînement du modèle

Nous avons dans un premier temps procédé à la division du jeu de données en deux ensembles. Un ensemble de 85% du jeu de données pour la phase l'entraînement du modèle et les 15% restants pour la phase de test du modèle. Cet ensemble de données de test nous permet de valider la performance du modèle sur un jeu de données autre que celui pour son entraînement. La performance finale rapportée est celle basée sur celui-ci.

Nous avons décidé de formuler le problème comme un problème de classification multi-classes, et nous avons optimisé l'entropie croisée qui est la fonction de perte. Cette fonction de perte d'entropie croisée mesure la différence entre les probabilités prédites par modèle et les classes réelles issues de l'annotation.

L'entraînement du modèle s'est fait de deux manières différentes:

- **Approche 1: Image seulement** : Ici nous avons utilisé seulement les images pour entraîner le modèle pour la prédiction de la qualité de la structure.



Le "Backbone" représente le modèle utilisé pour extraire les motifs riches représentant la sémantique de l'image. Enfin, un classifieur est utilisé sur ces motifs pour prédire la qualité de la structure.

- **Approche 2: Image + certaines caractéristiques** pédomorphologiques : Pour cette approche nous avons combiné les images et certaines caractéristiques pédomorphologiques que sont le groupe textural, le grade, et la consistance.

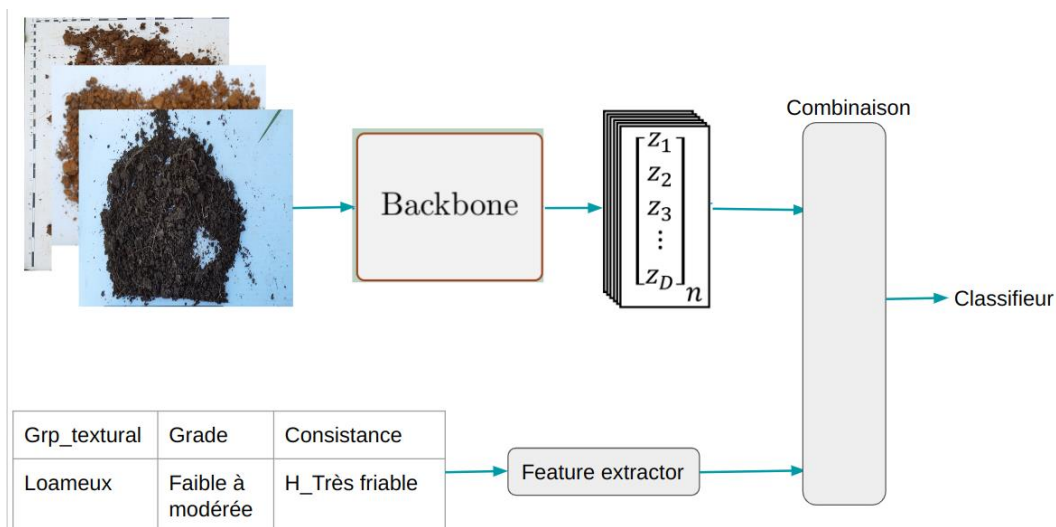


Figure 7 : Inclusion de caractéristiques pédomorphologiques.

Dans cette deuxième approche, les motifs extraits des caractéristiques pédomorphologiques sont combinés à ceux des images, puis sont passés à un classifieur pour la prédiction de la qualité de la structure.

4. Résultats

Les performances du modèle en termes de précision (accuracy) et du score F1 sont rapportées dans le Tableau 1 ci-dessous. L'Approche 1 désigne l'image seulement et l'Approche 2 désigne l'image + certaines caractéristiques pédomorphologiques.

Tableau 1 : Performances obtenues du modèle.

		Validation	Test
Approche 1	Accuracy	73,3 %	71,4 %
	F1 score	65,5 %	61,0%
Approche 2	Accuracy	75,2 %	75,3 %
	F1 score	69,2 %	70,2 %

Les résultats du modèle sur l'ensemble du test ont montré une précision de 75,3 % et un score F1 de 70,2 % pour l'Approche 2. Ces résultats indiquent que le modèle a été capable de classer correctement les images dans les trois classes représentant la qualité de la structure avec une précision relativement élevée, mais qu'il y avait encore place à amélioration en termes de score F1.

5. Discussion

Dans le Tableau 1 qui récapitule les résultats, nous pouvons voir que l'ajout de certaines caractéristiques pédomorphologiques ont permis d'améliorer grandement la performance du modèle. L'Approche 2 sera utilisée pour la suite de la discussion.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet indiquent que le modèle MobileNet_V2 a réussi à obtenir une bonne précision dans la classification des images d'agrégats de sol en trois classes différentes représentant la qualité de la structure. Toutefois, le score F1 de 70,2 % montre qu'il est encore possible de l'améliorer. Le score F1 prend en compte à la fois la précision et le rappel, et un score F1 plus faible indique que le modèle peut faire plus de prédictions faussement positives ou faussement négatives.

Une explication possible du score F1 plus faible malgré l'utilisation de l'apprentissage par transfert avec un modèle pré-entraîné, pourrait être la taille limitée de l'ensemble de données utilisé pour entraîner le modèle. Les modèles d'apprentissage profond nécessitent généralement de grandes quantités de données pour obtenir de bonnes performances, et les 4679 images utilisées dans ce projet peuvent ne pas avoir été suffisantes pour entraîner complètement le modèle pour le pousser vers des performances très élevées.

Le déséquilibre des classes dans l'ensemble de données pourrait être une autre explication possible de ce score F1 plus faible. Si le nombre d'images dans une classe est beaucoup plus ou moins élevé que le nombre d'images dans les autres classes, le modèle peut être biaisé en classant les images dans la classe la plus dominante.

En dernier lieu, la qualité des images collectées peut être en cause. Nous avons constaté sur plusieurs images, la présence d'ombres dues à la silhouette de la personne prenant la photo. Sur d'autres la présence de main sur les agrégats, des chaussures sur le côté de l'image, etc. Par ailleurs, la mesure de la qualité structurale réalisée par les évaluateurs comporte également une certaine erreur. Un certain nombre d'images mal classifiées devraient être réévaluées pour vérifier si les images sont conformes et si le pointage des évaluateurs est conforme et stable.

6. Conclusion

En conclusion, les résultats de ce projet montrent que le modèle a été capable d'atteindre une bonne précision dans la classification des images d'agrégats de sol en trois classes différentes représentant la qualité de la structure. Cependant, des améliorations sont encore possibles, et des travaux futurs peuvent être effectués pour améliorer encore les performances du modèle.

Sur la base des résultats de ce projet, il existe plusieurs domaines de travail futur pour améliorer la performance du modèle de classification des images d'agrégats de sol.

- Collecter davantage de données. Cette fois-ci avec une petite formation des échantillonneurs dans la prise d'image de qualité;
- Utiliser d'autres architectures plus performantes, mais beaucoup plus gourmandes en données;

DÉVELOPPEMENT DE L'APPLICATION MOBILE POUR L'ANALYSE DE LA QUALITÉ DU SOL

1. Plan de travail et revue des applications mobiles en sols

À la demande du MAPAQ un plan de travail et une analyse des applications mobiles ayant pour objet les sols a été réalisées en début de mandat. Le document (voir Annexe1 IRDA-ImagerieAppMobile-Résumé-Apps.pdf) a été transmis le 14 octobre 2021

2. Analyse et planification des besoins

Cette activité a impliqué l'utilisation de ressources spécialisées. L'analyse des besoins s'est effectuée via les développements des interfaces de l'applications confiés à l'équipe du professeur Abdoulaye Baniré Diallo à l'Université du Québec à Montréal. Ainsi, comme indiqué plus haut, deux groupes d'étudiants ont permis d'identifier et faire des preuves de concept sur les besoins. Les besoins ont été basées sur les trois indicateurs de la qualité structurale de profils de sols, soit l'Indicateur de la qualité structurale de profils de sols par examen visuel (QSSEV) et la Qualité structurale de profils de sols révélée par analyse d'images (QSSAI) et finalement le VESS. Le Tableau 2 présente les activités associées au développement de l'application mobile.

Après ces prototypages avec les étudiants pendant une année et demie. Nous avons confié le développement final de l'application mobile a une firme de consultant (Exeapps) qui finalise une version qui sera hébergé sur les serveurs de Umbrella technologie au nom de l'IRDA.

Tableau 2 : Activités associées au développement de l'application mobile

Activités	Statut	Échéance
Analyse des besoins	Réalisé	Septembre 2021
Conception des wireframes	Utilisation des projets thématiques UQAM - Réalisé	Décembre 2021
Conception de la coquille	Utilisation des projets thématiques UQAM - Réalisé	Décembre 2021
Validation par les équipes et comités	Réalisé	Janvier 2022
Développement d'application	Firme Exeapps embauchée – en cours	Avril 2023
Tests internes	En cours	Mars 2023
Livraison version beta	À venir	Avril 2023
Tests avec des utilisateurs externes (MAPAQ et conseillers)	À venir	Avril 2023
Phase 2 (éventuelle)	Ajout des fonctionnalités tirés du feedback	Été 2023
Diffusion sur plateforme App Store et Android Studio	À venir	Août 2023
Agriréseau et Webinaires	À venir	Septembre 2023

Le projet de développement a donc été divisé en trois phases nommées sprints. À la fin de chaque sprint, un rapport de sprint serait fourni. Ce rapport permet de faire le bilan et de discuter de l'avancement du projet : ce qui a bien été, ce qui a posé un problème, les solutions proposées ou mises en œuvre. À la fin du projet, une application mobile fonctionnelle, un manuel d'utilisateur et un rapport final serait fourni.

Livrables

- Comptes utilisateurs permettant de limiter l'accès à l'information (utilisateur terrain, conseiller/pédologue, administrateur) ;
- Interface pour guider l'utilisateur dans la mesure des caractéristiques pédomorphologiques ;
- Analyse des descripteurs (manuels et IA) ;
- Visualiser les rapports générés dans l'application ;
- Historique de rapport, classe par géolocalisation, date ;
- Exporter les données du rapport vers :
 - o Un format destiné à être lu par un humain (i.e. PDF) ;
 - o Un format plus facile à manipuler dans un logiciel (i.e. JSON, .XLS).
- Implémenter un rôle de conseiller/pédologue qui peut gérer plusieurs comptes utilisateurs.
 - o Il permet de faire des notes supplémentaires.
- Implémenter un rôle "Administrateur", qui aurait la capacité de rajouter des recommandations conditionnelles (i.e. si sol de type argileux et de faible granulométrie, recommander XYZ) ;
- Ajuster la pondération des descripteurs de sol dans l'algorithme de calcul de l'indicateur visuel de la qualité structurale du profil du sol et de les réinitialiser aux valeurs initiales ;
- Faire les mises à jour du serveur.

Planification des sprints

Sprint 1

Objectif : Analyse du projet, sélection de la technologie, modélisation de l'application, implémentation de la base de données, conception et intégration de l'interface utilisateur.

Livrable : Une implémentation fonctionnelle de l'interface utilisateur pour que les clients valident si l'expérience utilisateur répond aux besoins spécifiés durant l'analyse.

Tâches :

- Établir la liste des descripteurs de sols qui se mesurent manuellement ;
- Établir le rôle de l'analyse d'image par intelligence artificielle dans l'application ;
- Modéliser le calcul de l'IVQPS à partir des caractéristiques pédomorphologiques ;
- Déterminer le contenu et concevoir la présentation des rapports d'analyse dans l'application ;
- Établir le format des données exportées des rapports ;
- Modéliser la base de données ;
- Établir des protocoles de communication avec l'intelligence artificielle ;
- Implémenter une maquette d'interface utilisateur.

Documentation :

- Diagrammes de classe de l'application ;
- Diagrammes de la base de données pour enregistrer les utilisateurs et les rapports d'analyses ;
- Diagramme d'activité pour modéliser l'algorithme de calcul de l'indicateur visuel de la qualité structurale du profil du sol ;
- Maquette de l'interface utilisateur.

Sprint 2

Objectif : Permettre au client de créer un compte dans l'application et de procéder à une analyse de sol à l'aide de l'intelligence artificielle et de caractéristiques pédomorphologiques.

Livrable : Une version fonctionnelle d'une partie de l'application pour que les clients expérimentent le processus de création d'un rapport.

1. Les clients doivent pouvoir créer un compte dans l'application ;
2. Les clients doivent pouvoir lancer la création d'un nouveau rapport géolocalisé ;
3. Les clients doivent être accompagnés par l'application dans la prise d'une photo pour l'analyse d'image d'agrégat de sol par l'intelligence artificielle ;
4. L'application doit expliquer à l'utilisateur comment mesurer adéquatement chacune des caractéristiques pédomorphologiques.

Tâches :

- Implémenter l'authentification, la création de compte et la connexion ;
- Acquisition de données "brutes" (frontend / backend)
 - o Implémenter un guide de mesures manuelle des caractéristiques pédomorphologiques ;
 - o Implémenter l'envoi de photos vers l'IA et un retour des annotations ;
- Programmer une communication avec l'IA et la BD ;
- Implémenter le traitement asynchrone des données (recevoir une réponse de l'IA).

Sprint 3

Objectif : Permettre au client de consulter l'historique de ses rapports, d'ouvrir un rapport pour en afficher les détails et d'exporter des données de l'application.

Livrables : Une première version fonctionnelle de l'application.

- Le client peut consulter la liste de ses rapports par date ou géolocalisation ;
- Le client a accès aux notes IVQPS de chaque rapport ;
- Le client peut consulter ses résultats d'analyse d'agrégat de sol par l'intelligence artificielle ;
- Le client peut exporter ses résultats.

Tâches :

- Transformation/analyse des données brutes en données présentables dans un rapport

- Utiliser l’algorithme fourni pour calculer la note pondérée globale ;
- Calculer aussi les autres métriques : porosité fine, porosité grossière, type/classe structure, grade structure, consistance) ;
- Mise en forme des informations calculées ;
- Gérer l’exportation aux formats offerts (PDF, CSV, json).

3. Phases de développement

La phase de développement se fait en fonction des sprints et outputs indiqués. Ici, nous présentons les livrables évalués au cours des différentes phases.

Conception des wireframes

Plusieurs wireframes, traduisant les layouts d’analyse, ont été réalisés et validés avec les équipes internes du projet, les étudiants de l’UQAM, les professionnels et pédologues de l’IRDA.

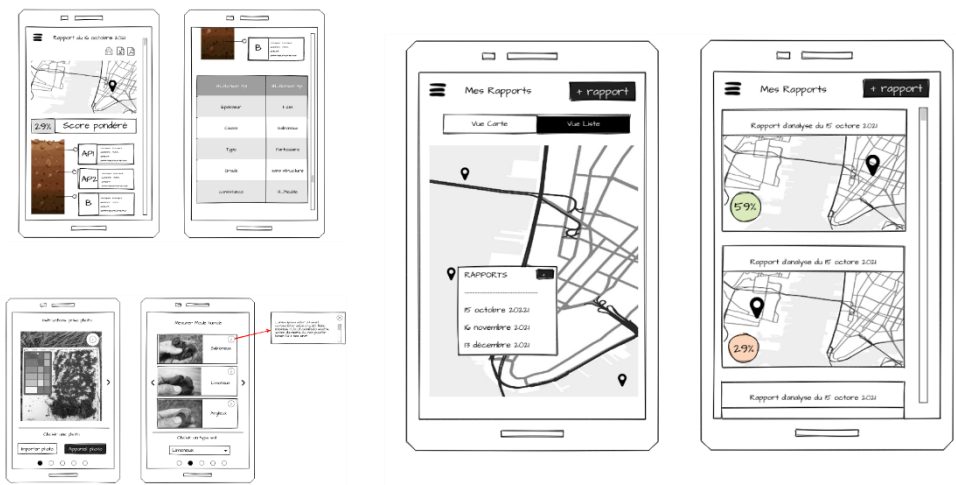


Figure 8 : Principaux wireframes finaux discutés.

Une base de données correspondant aux wireframes acceptés et les besoins établis a été proposée. La Figure 9 ci-dessous présente l’architecture de cette base de données.

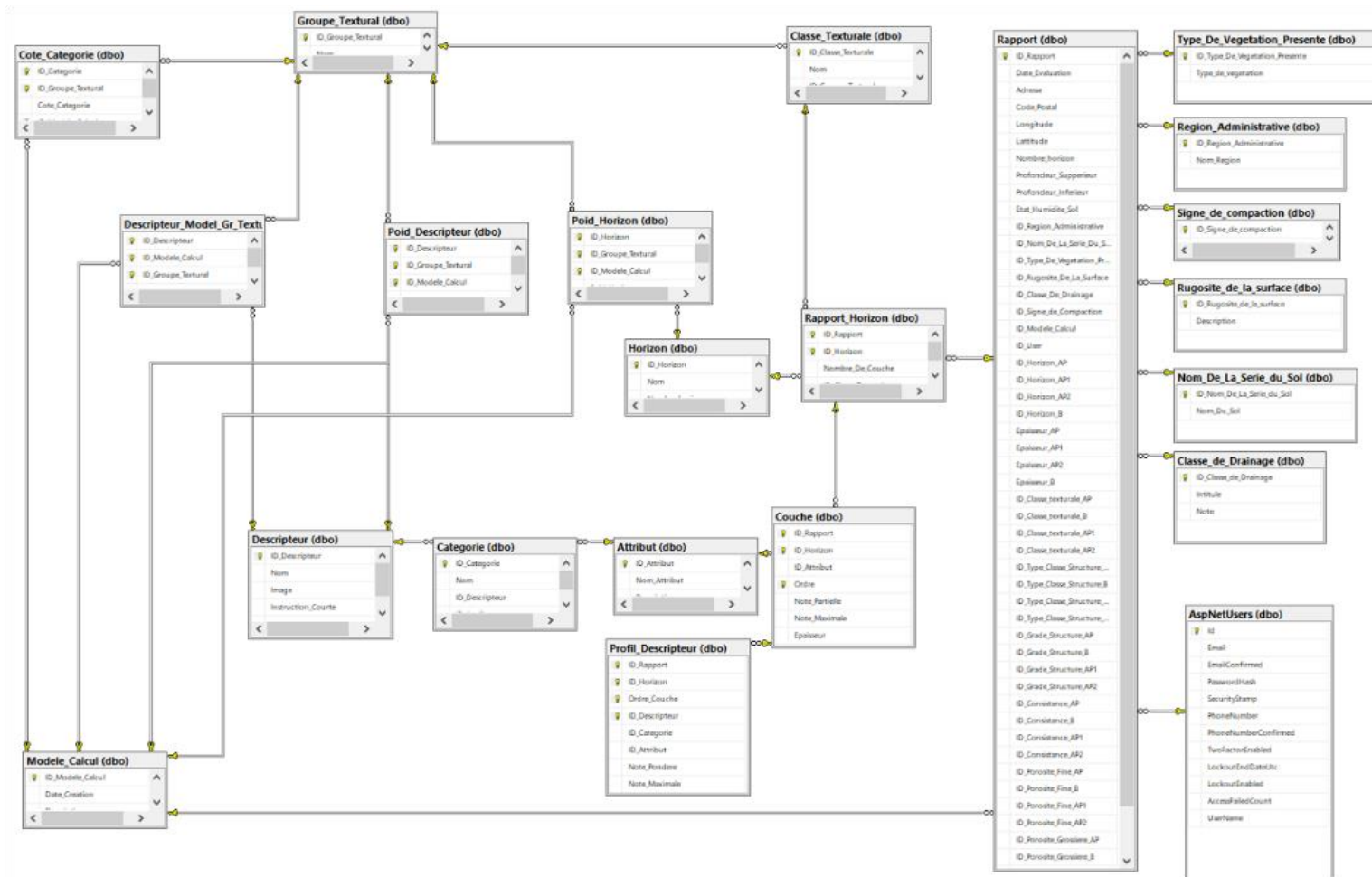


Figure 9 : Architecture de la base de données.

Par la suite, plusieurs prototypages d'application ont été conçus en utilisant spring boot en version web et non mobile dans un premier temps. Les interfaces de cette application sont présentées dans les deux figures ci-dessous réalisées par le premier groupe d'étudiant. La Figure 10 présente un visuel de la page d'authentification du profil en version prototype tandis que la Figure 11 présente une vue principale du prototype.

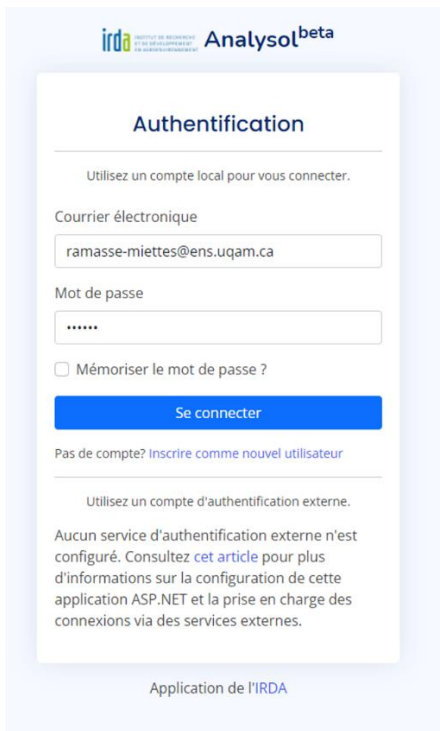


Figure 10 : Page de login de profil en version prototype.

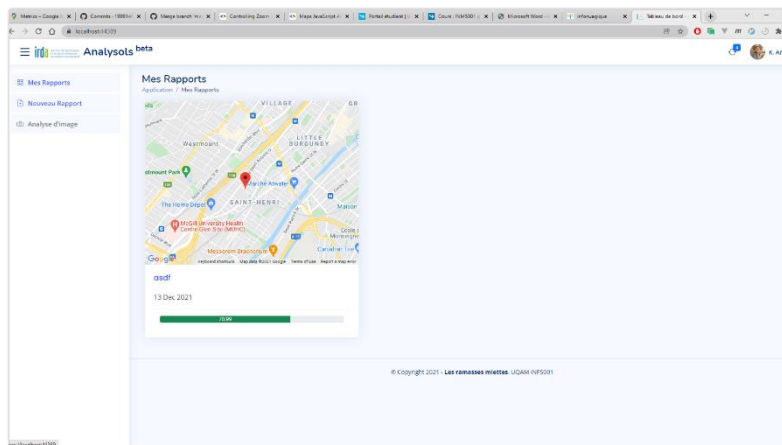


Figure 11 : Page de la vue principale du prototype.

Puis une console d'analyse et de calcul de l'indicateur visuel de qualité physique du sol a été réalisée en utilisant une application java (Figure 12).

```
E:\ecole\UQAM\INM5001-Atelier\code\Application_Console\Indicateur\VisuelQualiteStructSol\bin\Debug\netcoreapp3.1\Indicateur\VisuelQualiteStructSol.exe
=====
CALCUL DE L'INDICATEUR VISUEL DE QUALITÉ PHYSIQUE DU SOL
=====
Combien d'horizon sont évalués (2 ou 3) ?
Réponse: 2
|SAISIE DE DONNÉES POUR L'HORIZON_AP1|
Épaisseur de l'HORIZON_AP1 (en cm):
Réponse: 120
Indiquer le niveau d'humidité:
-----
1 = Sec
2 = Humide
Réponse: 2
Indiquer la classe texturale:
-----
1 = Argile Sableuse
2 = Argile Limoneuse
3 = Argile
4 = Argile lourde
5 = Loam Argileux
6 = Loam Limono-Argileux
7 = Loam Sablo-Argileux
8 = Loam Limoneux
9 = Limon
10 = Loam
11 = Loam Sableux
12 = Sable Loameux
13 = Sable
14 = Squelettiques
Réponse:
```

Figure 12 : Calculeur d'indicateur visuel de qualité java.

Livraison de la version beta de l'application mobile

L'application sera accessible à cette adresse url : <http://profilsols.org> pour les directives et disponible sur App Store et Android Studio pour téléchargement mobile. Cependant, l'application doit être validée dans une première étape par l'équipe de l'IRDA et par des analystes du MAPAQ avant cette dernière étape et le paiement associé à l'hébergement sur ces plateformes d'accessibilités d'applications doit être réalisé.

En attendant, une version beta sur internet sera disponible à la même adresse url : <http://profilsols.org> à partir du 17 mars 2023, pour fin de démonstration et de validation par l'équipe de l'IRDA.

L'état actuel de développement de l'application en date du 28 février est fourni au Tableau 3. Tous les items seront complétés dans une version 1.0 déployée au cours du printemps pour validation avec des analystes du MAPAQ et des conseillers sur le terrain. Principalement les items au-dessus de 80% sont complétés, la partie restante concerne les validations et tests en déploiement réel et le feedback des utilisateurs principaux. Il est divisé en deux parties: le backend et frontend. La Figure 12 présente les layouts de l'application exécutée sur mobile iPhone.

Tableau 3 : État de développement de l'application au 28 février 2023.

Module	Pourcentage complété
Backend	
Création des API	90%
Création du modèle de base de données	90%
Création de l'application de gestion	20%
Intégration avec l'appli AI pour les résultats	10%
Calcul des résultats basé sur les formules dans Excel	30%
Frontend	
Page d'accueil	30%
Page Gestion du profil utilisateur	40%
Page de création des profils	80%
Page création des rapports	40%
Page de gestion des couches et horizons	80%
Page Choisir l'humidité	80%
Page capture de Photo des couches	80%
Page saisie des Groupes Texturaux	80%
Classe Structure	80%
Grade Structure	80%
Consistance	80%
Porosité Fine et Grossière	80%
Page Résultat Final	60%

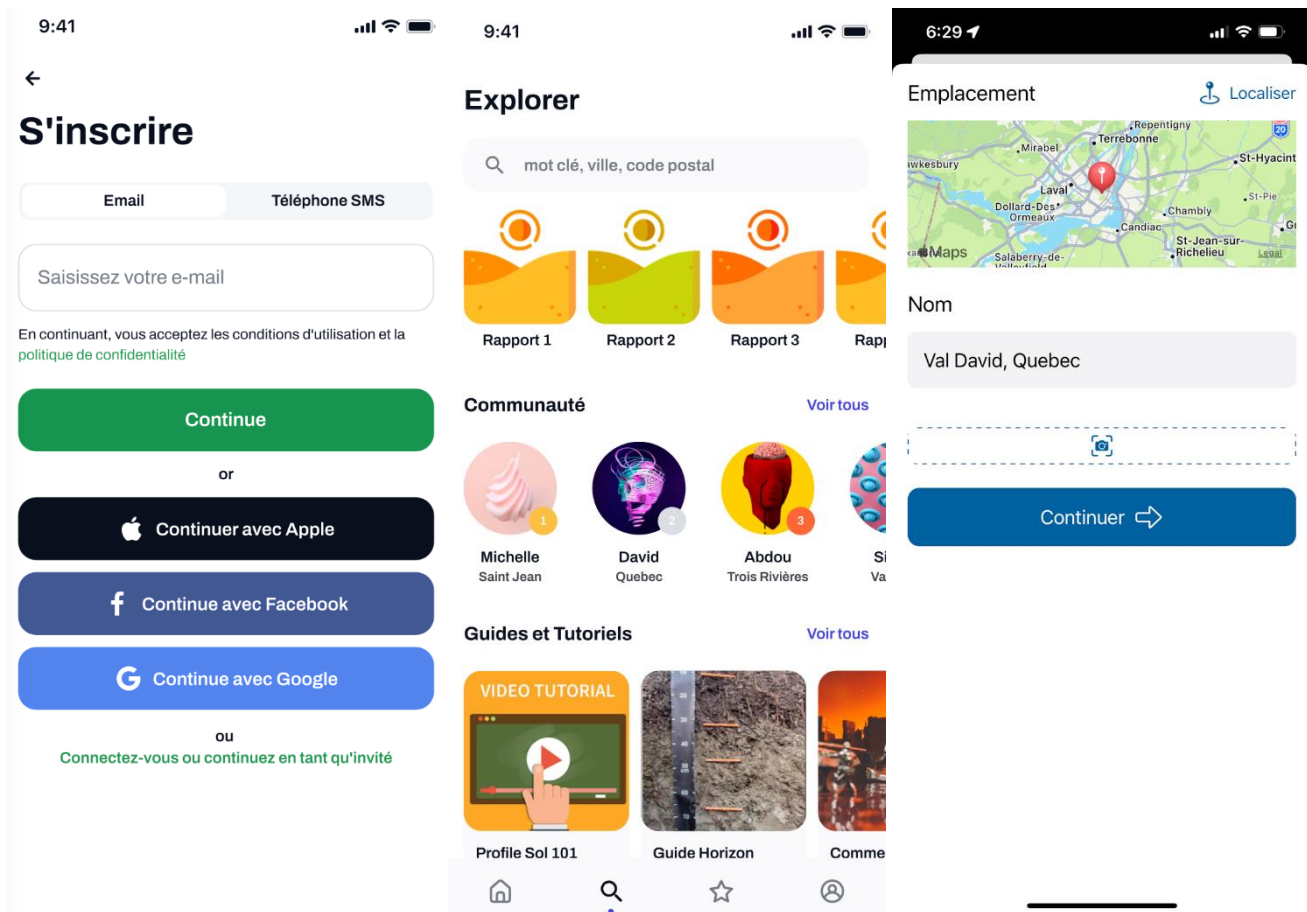


Figure 13 : Téléchargement de l'application, page principale et géoréférencement du profil de sol sur l'application mobile.

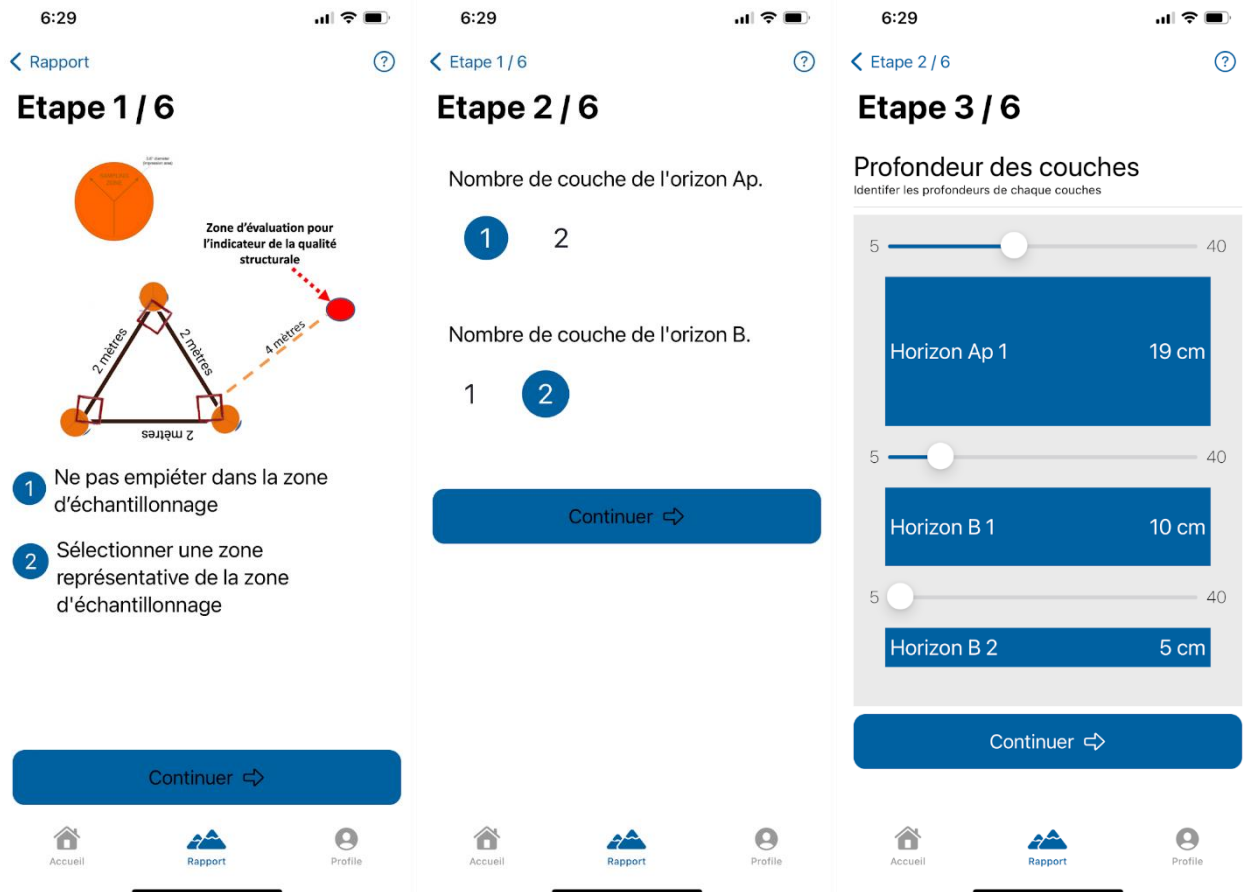


Figure 14 : Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des couches de sol pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle..

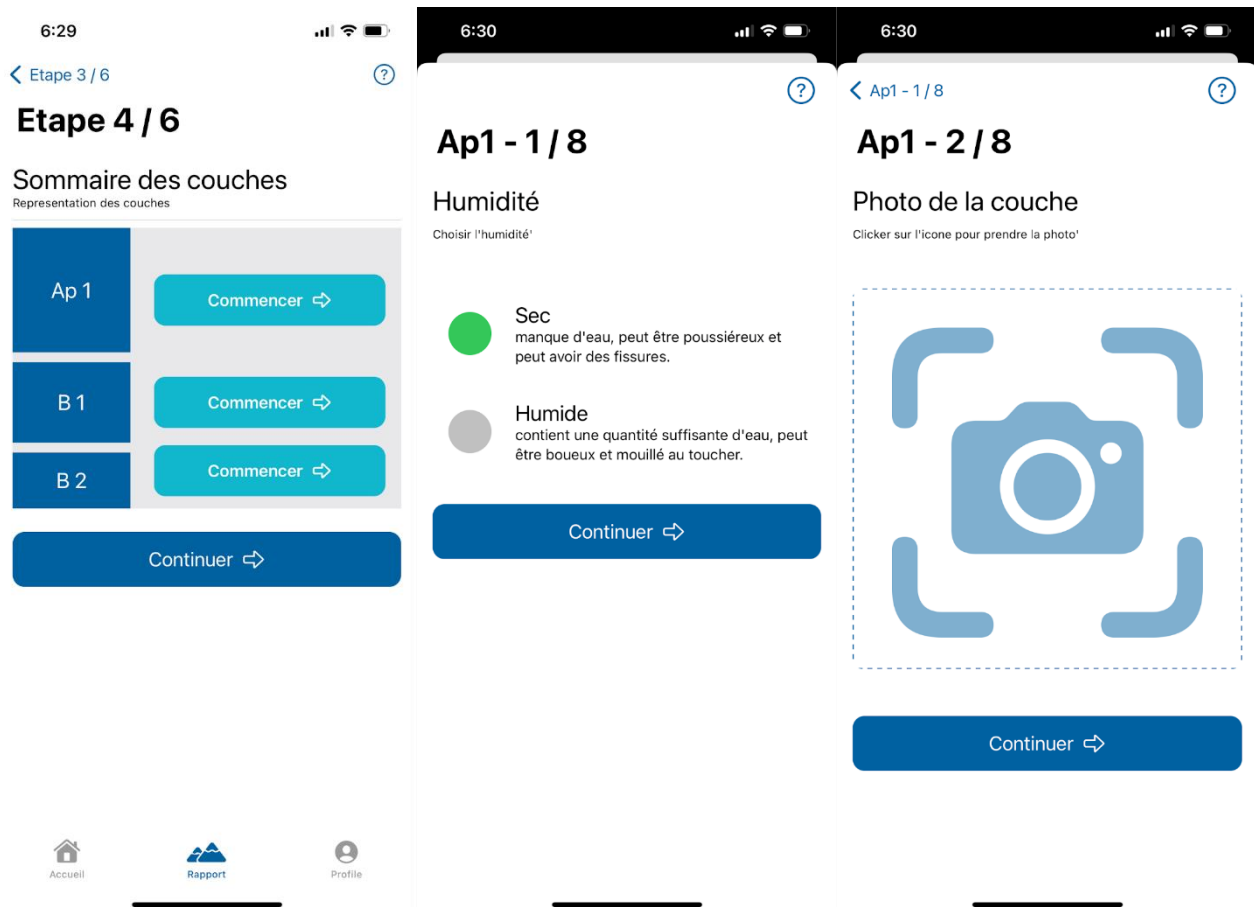


Figure 15 : Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des propriétés de la couche Ap1 (1) pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.

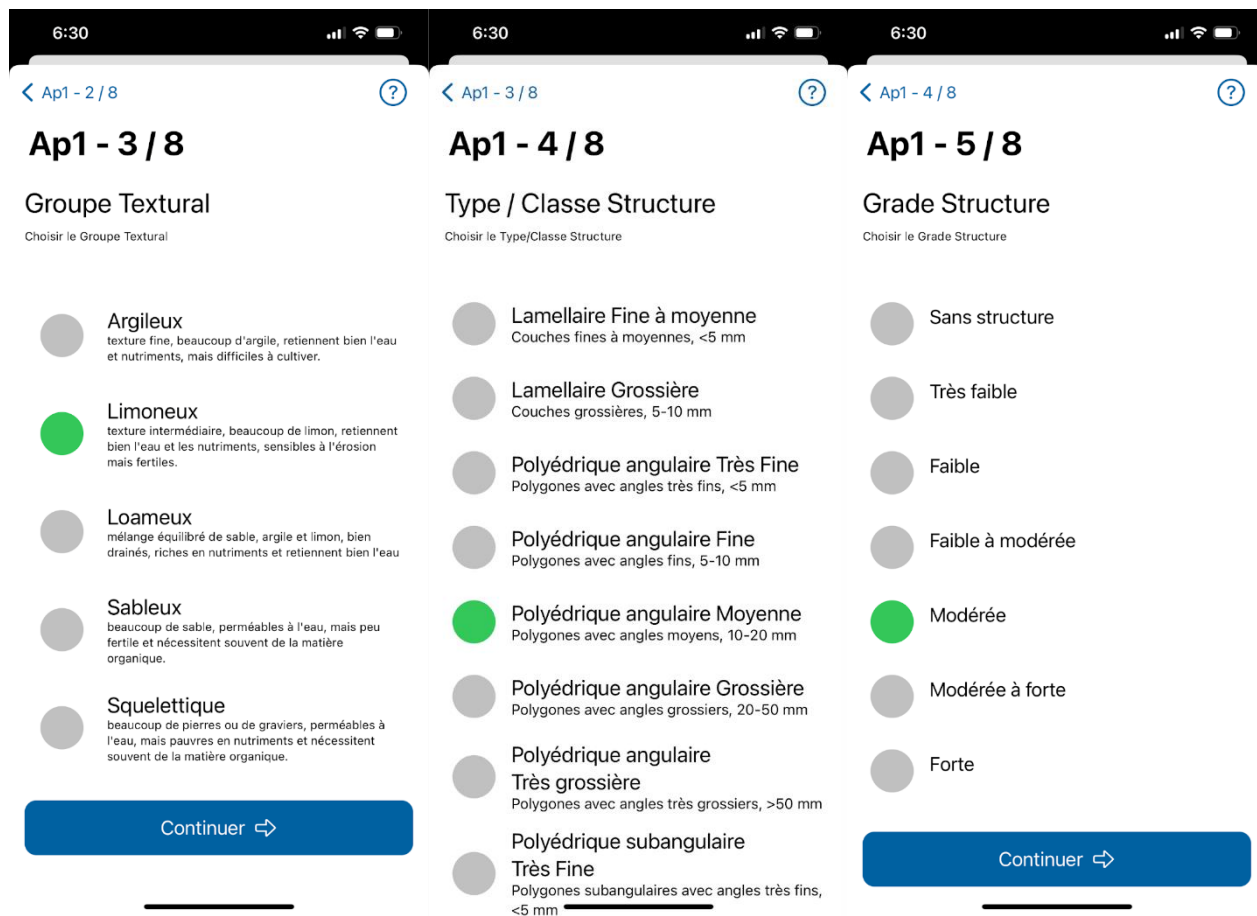


Figure 16 : Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des propriétés dans la couche Ap1 (2) pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.

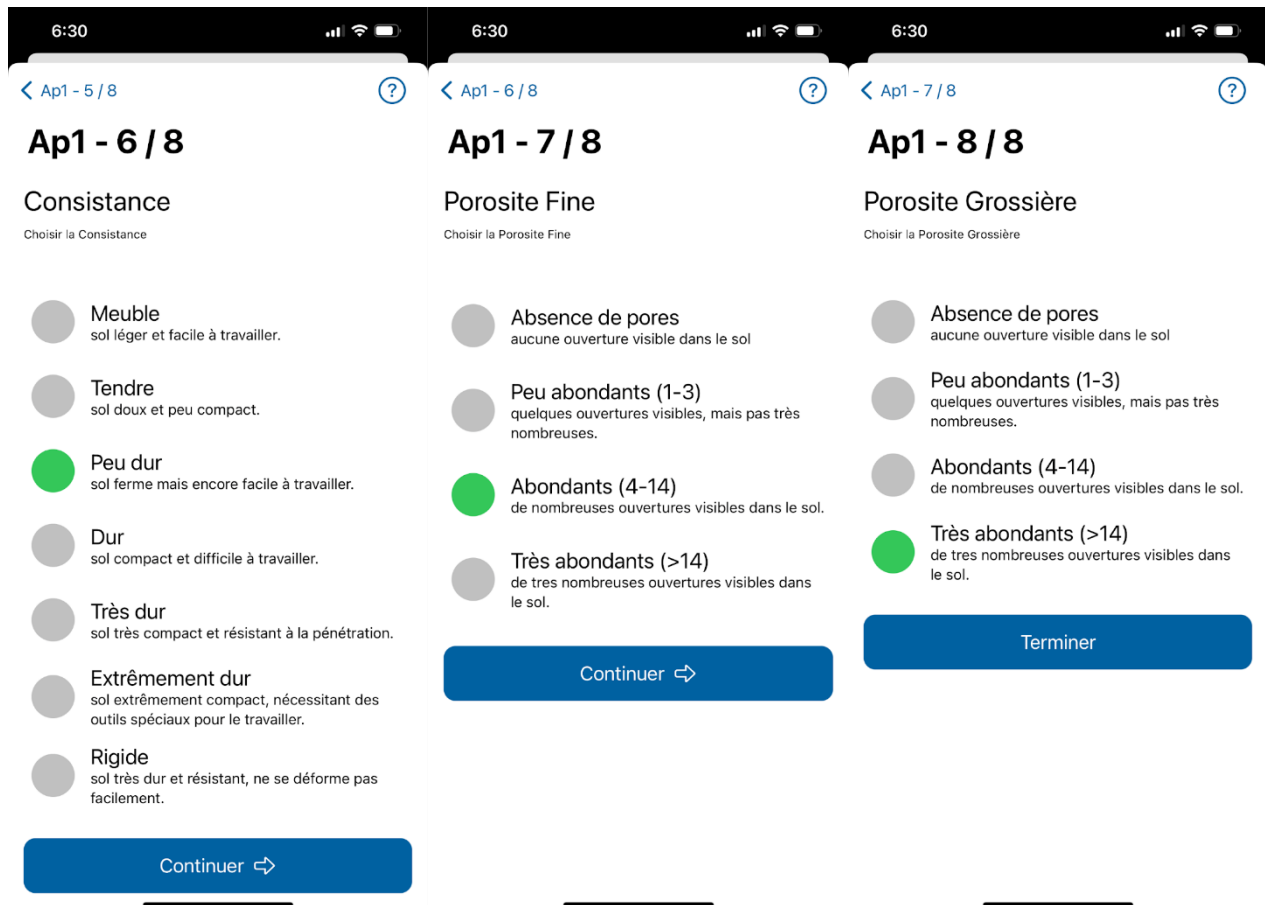


Figure 17 : Étapes d'évaluation d'un profil de sol : définition des propriétés dans la couche Ap1 (3) pour les modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.



Figure 18 : Étapes d'évaluation d'un profil de sols : Pointage final obtenu, globale ou par horizon pour le module d'évaluation visuelle.

Développement de l'application d'analyse d'images

Notons que l'inclusion du module d'analyse d'images en temps réel dans l'application, n'a pas été complétée et nécessite plusieurs itérations avec les équipes pour s'assurer de sa fonctionnalité effective. Les travaux étaient toujours en cours en date du 28 février 2023. Selon les développeurs, il n'y avait aucune contrainte technique, seulement des questions de disponibilités en temps pour réaliser les travaux. La version 1.0 distribuée au printemps 2023 pour la première phase d'évaluation de l'application sur le terrain avec les analystes du MAPAQ et les conseillers sur le terrain inclurait les deux modules d'analyse d'image et d'évaluation visuelle.

4. Plan de viabilisation de l'application mobile

L'application proposée sera accessible gratuitement à la communauté après les tests de validation des experts (pédologues, conseillers expérimentés) pendant une période d'un an. Après ce délai, un plan de pérennisation de l'application devra être établi avec le MAPAQ. Cela permettra d'avoir une stratégie pour maintenir le développement, la croissance de la base de données et la mise à jour des logiciels de l'application. Dans le cadre de ce plan, plusieurs options sont en cours de discussion:

- Obtenir le financement du MAPAQ ou de toute autre source (AAC, fondations, etc.) pour maintenir l'application totalement gratuite.
- Mettre de la publicité discrète et ciblée sur les pages principales de l'application;
- Proposer des options payantes de navigation avancées et de stockage supplémentaires;

CONCLUSION

Ce projet visait 1) à explorer le potentiel des images d'un sol défait sur un coroplaste au champ à révéler son état structural ou sa qualité physique en fonction du type de sol analysé; 2) à développer le cas échéant une application mobile sur téléphone intelligent capable d'analyser et d'évaluer au champ la qualité physique d'un profil de sol.

Le projet visait aussi à maximiser les retombées potentielles des résultats obtenus dans le cadre de l'Étude de l'état de santé des sols agricoles du Québec (EESSAQ). Plus spécifiquement, les activités à réaliser consistaient à :

- Mettre en place et consulter un comité de suivi (incluant experts et analystes du MAPAQ et d'AAC) pour encadrer les travaux et définir la portée de l'application;
- Produire une analyse des outils complémentaires qui pourraient être conçus et proposer ceux qui semblent les plus prometteurs et cruciaux pour l'atteinte des objectifs du projet. Elle doit aussi regarder la possibilité de bonifier les outils déjà existants;
- Fournir un plan de travail pour la réalisation d'un ou de plusieurs outils;
- Mettre en œuvre la réalisation d'un ou de plusieurs outils approuvés par le MAPAQ. Cette étape implique l'utilisation de ressources spécialisées;
- Proposer un plan de diffusion de l'outil et le mettre en œuvre.

Les travaux de l'étudiant au doctorat Armand Massoua ont démontré la faisabilité d'évaluer par Intelligence Artificielle la qualité de la structure des sols à partir d'une image prise au champ d'un échantillon de sol ou d'une motte de sol défait sur un coroplaste. Les résultats de ce projet montrent que le modèle a été capable d'atteindre une bonne précision dans la classification des images d'agrégats de sol en trois classes différentes représentant la qualité de la structure. Cependant, des améliorations sont encore possibles, et des travaux futurs peuvent être effectués pour améliorer encore les performances du modèle, soit :

- Collecter davantage de données. Cette fois-ci avec une formation des échantillonneurs pour la prise d'image de qualité;
- Utiliser d'autres architectures plus performantes, mais beaucoup plus gourmandes en données;

RÉFÉRENCES

- Acton D.F. et Gregorich, L.J. 1995. La santé de nos sols : vers une agriculture durable au Canada. Agriculture et agro-alimentaire Canada. Publication 1906/F. <http://www.archive.org/details/lasantdenossolsvOOgreg>
- He, K., Zhang, X., Ren, S. et Sun, J. 2016. Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. pp. 770-778.
- Gasser, M.-O., Bossé C., Clément, C.C., Bernard, C., 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. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Québec. 197. 186 pages.
- Gasser, M.-O., Allard, F., Bernard, C., Bossé, C. et Tremblay, M.-E. 2019. Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec – Protocole pour l'échantillonnage des sols. IRDA. 35 p. Disponible sur demande.
- Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A. et Chen, L. C. 2018. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. pp. 4510-4520.
- Tan, M., & Le, Q. 2019. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning*. pp. 6105-6114. PMLR.
- Van Rossum, G., & Drake, F. L. 2009. Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace.