

***SPATIALIZATION METHODS OF CROP MODELS
AND METRICS FOR EVALUATING SPATIALIZED CROP MODEL
PERFORMANCES IN A PRECISION AGRICULTURE CONTEXT***

**MÉTHODES DE SPATIALISATION DES MODÈLES DE CULTURE
ET MÉTRIQUES D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES DES MODÈLES DE
CULTURE SPATIALISÉS DANS UN CONTEXTE D'AGRICULTURE DE PRÉCISION**

Thèse de Daniel **PASQUEL**¹

Analysée par Philippe **STOOP**²

Directeur de thèse : James **A. TAYLOR** (Directeur de recherche à l'INRAE)

Co-encadrants : Sébastien **ROUX** (Ingénieur de recherche à l'INRAE) et Bruno **TISSEYRE**
(Professeur Institut Agro/Montpellier SupAgro)

L'agriculture de précision est, avec l'agroécologie, une des principales pistes explorées pour réduire l'impact environnemental de notre agriculture, et donc de notre alimentation. Son objectif est de réduire l'utilisation des intrants (irrigation, fertilisation, protection phytosanitaire), en appliquant les règles de l'agriculture raisonnée, non plus à l'échelle parcellaire, mais à l'échelle intraparcellaire, pour moduler plus finement l'apport de ces intrants en fonction de l'hétérogénéité spatiale des cultures et du sol.

L'agriculture raisonnée s'appuie beaucoup sur des modèles prévisionnels, dits modèles de culture, qui permettent de prévoir le développement de la culture et donc ses besoins en intrants. L'agriculture de précision nécessite donc de spatialiser ces modèles de culture, qui pour la plupart ont été conçus pour simuler l'état moyen d'une parcelle culturale, ou tout au moins d'une surface cultivée homogène.

Beaucoup d'agriculteurs et de conseillers agricoles sont désormais habitués à raisonner à partir de cartes visualisant les hétérogénéités de leurs parcelles, que ce soit sur les consoles de leur tracteur ou les écrans d'outils d'aide à la décision. Toutefois, la validation de ces données spatialisées est loin de reposer sur des méthodes aussi avancées que celle des modèles de

¹ Thèse de doctorat pour obtenir le grade de docteur de l'Institut Agro Montpellier et de l'université de Montpellier, en sciences agronomiques, Ecole doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau, portée par les unités de recherche ITAP-Technologie et méthodes pour les agricultures de demain et MISTEA – Mathématiques, Informatique et statistique pour l'environnement et l'agronomie, présentée et soutenue le 05 octobre 2023.

² Membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France, section 9, « Agrofournitures ».

culture classiques, à leur échelle native. Sur ce sujet, la méthodologie scientifique est donc en retard sur la pratique du terrain, retard que cette thèse entend contribuer à combler.

Le premier chapitre de la thèse commence par un état de l'art sur la spatialisation des modèles de culture et l'évaluation de leur performance. Il se concentre sur les modèles de culture dits mécanistes (par opposition avec les modèles statistiques), ce qui est logique car c'est la catégorie de modèles la plus utilisée en agriculture de précision. En effet, ils se prêtent bien à la spatialisation, non seulement par spatialisation des données d'entrée, mais aussi par assimilation de données spatialisées, comme des indices de végétation calculés à partir d'images satellite. Cette partie bibliographique passe par l'inventaire des raisons qui poussent à spatialiser des modèles de culture, des différentes méthodes de spatialisation, et des causes d'erreur qui en découlent. D. Pasquel rappelle ensuite les principales métriques utilisées pour évaluer la performance des modèles :

- Les métriques aspatiales, c'est-à-dire l'écart mesuré point par point entre la variable simulée par le modèle et la variable observée, telles que la MAE (Mean Absolute Error) ou la RMSE (Root Mean Square Error)
- Les métriques spatiales, c'est-à-dire celles qui mesurent la concordance entre les variations spatiales de la variable simulée et celles de la variable observée, tels que le Z-Score ou l'indice de Cambardella.

En pratique, les modèles de culture utilisés en agriculture de précision étant initialement non spatialisés, ce sont surtout les métriques aspatiales qui sont familières aux modélisateurs, et elles restent souvent utilisées pour évaluer des modèles spatialisés. Mais D. Pasquel montre sur un exemple très clair en quoi elles ne sont pas suffisantes : à partir d'un même jeu de mesures spatialisées de potentiel hydrique foliaire d'une parcelle de vigne, trois « modèles » différents peuvent avoir exactement la même RMSE (donc la même performance dans une analyse aspatiale), et des performances spatiales (mesurées par le coefficient kappa de Cohen) très différentes. Or en agriculture de précision, il est nécessaire d'optimiser ces deux performances : la performance aspatiale, qui va garantir que l'on applique bien l'apport moyen d'intrant (en l'occurrence l'irrigation) correspondant au besoin moyen de la parcelle, et la performance spatiale (qui garantit que la modulation spatiale des intrants apportés est correcte). Il est intéressant de noter que cet exemple, très pédagogique, est basé non pas sur trois modèles différents, mais sur des données théoriques obtenues avec trois modes de bruitage des données réelles. Cela souligne indirectement une des grandes difficultés de ce sujet : la rareté des jeux de données spatialisées permettant de comparer des observations et des modèles spatialisés.

Il en découle les questions de recherche qui vont guider la suite du travail :

(I). Comment effectuer une évaluation et une comparaison pertinentes des performances des modèles de culture spatialisés à différentes échelles spatiales ?

(i) Les méthodes actuellement utilisées pour évaluer les performances des modèles de culture spatialisés sont-elles efficaces ?

(ii) La prise en compte de la composante spatiale des sorties du modèle améliore-t-elle son évaluation ?

(II) La calibration spatiale de paramètres spécifiquement sélectionnés du modèle de culture est-elle une méthode efficace de réduction d'échelle des modèles existants pour permettre la modélisation à l'échelle intra-parcellaire ?

(i) La délimitation des unités de gestion potentielles à partir de données auxiliaires à haute résolution peut-elle aider à une approche de calibration spatiale ? Comment la relation entre les données auxiliaires et la variable agronomique d'intérêt influence-t-elle cela ?

(ii) Existe-t-il un compromis entre l'échelle spatiale de modélisation à l'échelle intra-parcellaire et le bruit apporté par les erreurs de mesure des données utilisées pour l'étape de calibration et d'évaluation des modèles de culture spatialisés ?

(iii) La complexité des modèles de culture augmente-t-elle la difficulté de réduction d'échelle de leurs prédictions ?

Dans le chapitre 2, D. Pasquel propose une nouvelle métrique pour l'évaluation des modèles de culture spatialisés. Cette partie repose sur le cas d'étude déjà utilisé au 1^{er} chapitre : une série temporelle de mesures spatialisées de potentiel hydrique foliaire, sur une parcelle de vigne du Centre INRAE de Pech Rouge (Aude). Le doctorant mesure cette fois la performance du modèle Walis, qui simule ce potentiel hydrique, spatialisé ici en fonction de zonages définis selon les mesures de trois variables auxiliaires potentiellement corrélées avec le stress hydrique (résistivité électrique du sol, diamètre du tronc et vigueur de la végétation), cette spatialisation étant réalisée à plusieurs échelles différentes (caractérisées par le nombre de zones d'irrigation différenciées retenues à partir des sorties du modèle). Cette évaluation de la performance est réalisée en utilisant différentes métriques spatiales et aspatiales trouvées dans la bibliographie. Il apparaît qu'elles donnent des résultats contradictoires entre elles, le modèle trouvé comme optimal pour chaque métrique dépendant de l'échelle de spatialisation retenue. Parmi les différentes métriques testées, c'est la Balanced Accuracy (BA, moyenne de la sensibilité et de la sélectivité de la segmentation par le modèle des zones de potentiel hydrique retenues) qui donne les résultats les plus cohérents entre les différentes échelles. C'est donc de la BA que D. Pasquel s'inspire ensuite, pour proposer une nouvelle métrique moins dépendante de l'échelle : le SBA (Spatial Balanced Accuracy). Pour tenter de le résumer simplement, le SBA fait la synthèse des BA obtenues pour le modèle sur une large gamme d'échelles de spatialisation. Pour valider cette nouvelle métrique, le doctorant reprend la méthode utilisée au chapitre 1 (génération de « modèles » théoriques obtenus en ajoutant différentes formes de bruit à un modèle initial). Il constate ainsi que, dans ce contexte, le SBA est bien la seule métrique qui permet d'identifier sans ambiguïté le modèle le plus performant, indépendamment de l'échelle de spatialisation.

Disposant ainsi d'un indicateur de performance intégrant à la fois l'erreur spatiale et l'erreur aspatiale, D. Pasquel peut passer dans le chapitre 3 à l'étape suivante du travail : vérifier dans quelle mesure une calibration spatialisée, basée sur cette métrique, permet d'améliorer les performances d'un modèle de culture spatialisé, par rapport à une calibration classique, visant à minimiser une métrique d'erreur non spatiale comme la RMSE. Dans ce chapitre, il continue à travailler sur le même cas d'usage que précédemment (le modèle Walis appliqué à la même parcelle INRAE de Pech Rouge), en complétant les comparaisons de modèles par des données théoriques. Il s'agit donc d'un cas d'un modèle de culture relativement simple, et dont la variable d'intérêt, le potentiel hydrique foliaire, présente une structure spatiale très variable dans le temps : quasi uniforme en absence de stress hydrique, elle peut devenir très fortement spatialisée, en fonction des hétérogénéités du sol, quand le stress augmente. De plus, la

spatialisation de ce modèle est basée sur la mesure de variables auxiliaires dont le degré de corrélation avec la variable calculée est très variable : forte dans le cas des variables constitutives de la réserve hydrique du sol, plus indirecte dans le cas des mesures sur la plante (diamètre du tronc, vigueur de la végétation). Sur ce cas d'espèce, D. Pasquel constate que l'intérêt d'une calibration spatiale dépend du contexte : elle améliore bien la performance du modèle si la variable modélisée a une forte structure spatiale, et est fortement corrélée avec la variable auxiliaire utilisée pour la spatialisation, mais la dégrade dans le cas contraire.

La dernière question de recherche était de savoir si la complexité du modèle de culture influe sur la performance de sa spatialisation. Elle est abordée dans le chapitre 4, où D. Pasquel passe à un autre cas d'étude, sur du blé dur en Italie. Ici la variable modélisée était le rendement, simulé par le modèle APSIM, et la variable auxiliaire utilisée pour la définition du zonage de spatialisation était la résistivité électrique du sol. Le même comportement a été observé avec ce modèle complexe qu'avec le modèle plus simple Walis : la calibration spatialisée n'améliore les performances du modèle spatialisée que si elle est réalisée avec des données où la variable d'intérêt est fortement spatialisée et fortement corrélée avec la variable auxiliaire utilisée pour la descente d'échelle du modèle.

Dans le chapitre 5, D. Pasquel passe à la discussion des résultats obtenus et aux perspectives de prolongation de son travail. Il souligne qu'à ce stade, le SBA, dont il a bien démontré l'intérêt par rapport aux métriques déjà existantes, ne peut encore être utilisé que comme métrique relative, pour comparer différents modes de spatialisation d'un même modèle dans un contexte donné, mais pas encore pour des comparaisons de modèles différents dans des contextes variés. Cela nécessiterait en particulier d'améliorer son interprétabilité, et la quantification de son résultat, qui pour l'instant ne se prête pas à une analyse statistique.

Il ajoute, à juste titre, que l'un des intérêts majeurs de cette nouvelle métrique est aussi de se prêter à une évaluation des spatialisations de modèles par assimilation de données. C'est effectivement un mode de spatialisation majeur en agriculture de précision, en particulier l'assimilation de données d'imagerie satellitaire, et qu'il n'a pas eu l'opportunité de tester pendant cette thèse, probablement faute de jeu de données adéquat. L'approfondissement des techniques de calibration spatiale est également un enjeu important, pour lequel la création de jeux de données sur des parcelles instrumentées dans ce but, par une large gamme de capteurs intraparcellaires, permettrait de progresser en testant une plus grande variété de variables auxiliaires se prêtant à la spatialisation.

Ce travail de thèse est parfois déroutant en première lecture, en particulier parce qu'il peut donner le sentiment d'une relative déconnexion entre la réflexion théorique du début, très axée sur l'asymétrie de l'état de l'art entre montée et descente d'échelle des modèles de culture, et les travaux innovants qui suivent, où cette problématique est finalement secondaire. Les deux rapporteurs ont d'ailleurs émis des réserves justifiées sur la pertinence de considérer l'échelle parcellaire comme l'échelle « native » des modèles de cultures, qui définirait de façon univoque ce que sont une montée et une descente d'échelle du modèle. Le doctorant répond implicitement à cette objection dans la suite de ses travaux, où l'on voit bien que, finalement, c'est plus la définition de zones opérationnelles de traitement par segmentation de la variable de sortie du modèle qui nécessite l'introduction de métriques spatiales, que le changement d'échelle proprement dit. Toutefois, cette assimilation du changement d'échelle à une segmentation plus fine de la variable d'intérêt ne va pas de soi, et aurait mérité une explicitation et une discussion plus approfondie. Par ailleurs, s'il est légitime que le doctorant ait travaillé

essentiellement à évaluer la nouvelle métrique qu'il a créée, on se demande parfois s'il n'aurait pas été possible d'obtenir des résultats équivalents avec une calibration spatialisée basée sur une fonction objectif combinant une métrique spatiale et une métrique aspatiale, ce qui laisserait au modélisateur plus de latitude que le SBA pour pondérer l'importance qu'il accorde respectivement aux deux erreurs spatiales et aspatiales.

Mais les légères réserves qu'inspire cette thèse remarquable sont les conséquences de sa richesse et de la complexité du sujet abordé. Elles sont également dues aux contraintes de la thèse « par articles », qui ont figé dès les premières publications le contenu du 1^{er} chapitre, qui aurait sans doute été rédigé différemment à la lueur des travaux qui ont suivis. Elles ne doivent pas occulter les grandes qualités de ce travail, qui entreprend de combler une lacune scientifique majeure de l'agriculture de précision, telle qu'elle est diffusée sur le terrain.

C'est à ce titre que l'analyse de cette thèse est publiée sur le site de l'Académie d'agriculture de France, et dans le Mensuel, afin de valoriser ces travaux.