

CGMS-MAROC : LE SYSTÈME D'ALERTE À LA SÉCHERESSE ET DE PRÉVISION DES RENDEMENTS CÉRÉALIERS AU MAROC

Riad BALAGHI, Mouanis LAHLOU, Meriem ALAOURI



Table des matières

Résumé exécutif	1
Remerciements	3
Liste des abréviations	4
Glossaire	5
I. Introduction	7
II. Architecture fonctionnelle de CGMS-Maroc : des données aux prévisions de rendement 11	
1. Fonctionnement du Bloc 1 de CGMS-Maroc	14
1.1. Collecte des données de réanalyse météorologique ERA5	15
1.2. Extraction sur la zone géographique d'intérêt.....	16
1.3. La grille de référence	17
1.4. Interpolation spatiale des données ERA5	18
1.5. Collecte et traitement des données d'observation météorologique.....	25
1.6. Interpolation des données météorologiques des stations synoptiques	29
1.7. Correction des données de réanalyse ERA5	30
2. Fonctionnement du Bloc 2 de CGMS-Maroc	39
2.1. Collecte des données satellitaires : indices de végétation et d'humidité des sols	40
2.2. Harmonisation des données satellitaires sur la grille de référence de CGMS-Maroc	43
2.3. Élaboration du masque des cultures céréalières	44
2.4. Données statistiques agricoles : les enquêtes de terrain	46
2.5. Modèles de prévision des rendements.....	48
2.6. Prévision des rendements	60
2.7. Visualisation des résultat : l'interface utilisateur	63
III. Architecture informatique de CGMS-Maroc	74
1. Architecture du Bloc 1 : Infrastructure informatique de la base de données climatique	74
1.1. Architecture matérielle redondante	75
1.2. Environnement logiciel hautement sécurisé	76
1.3. Supervision et exploitations optimisées	76
2. Architecture du Bloc 2 : Intégration, analyse et visualisation de données multi-sources	77
IV. Feuille de route pour l'amélioration de CGMS-Maroc	80
1. Statistiques des rendements céréaliers	81
2. Masque céréaliier dynamique	82
3. Système collaboratif de suivi des cultures	83
4. Prévisions météorologiques saisonnières	84
5. Dissémination des résultats	87
6. Examen externe par les pairs	88
7. Renforcement des capacités	89
V. Conclusion	91
Bibliographie	93
Annexes	98



Copyright © INRA - Maroc. Tous droits de publication, sous quelque forme que ce soit et dans toute langue, sont réservés par l'INRA - Maroc. De courts extraits de ce document peuvent être reproduits sans autorisation, à condition que la source complète soit clairement indiquée. Pour toute correspondance éditoriale et toute demande de publication, reproduction ou traduction partielle ou intégrale de cette publication, veuillez-vous adresser à :

INRA Avenue Ennasr
BP 415 RP Rabat, Morocco
www.inra.org.ma

Tel : +212 537 77 09 55
Fax : +212 537 77 00 49



المعهد الوطني للبحث الزراعي
ⵎⴰⵔⴻⵏ ⵏ ⵉⵏⵔⴰⵏ ⵏ ⵉⵏⵔⴰⵏ ⵏ ⵉⵏⵔⴰⵏ
Institut National de la Recherche Agronomique

Institut National de la Recherche Agronomique
Division de l'Information et de la Communication

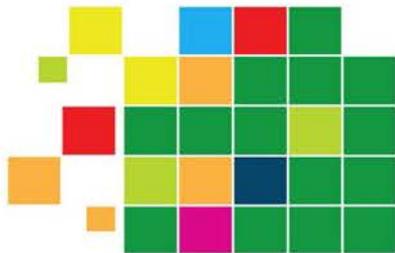
Edition 2024

Table des matières

Résumé exécutif	1
Remerciements	3
Liste des abréviations	4
Glossaire	5
I. Introduction	7
II. Architecture fonctionnelle de CGMS-Maroc : des données aux prévisions de rendement.	11
1. Fonctionnement du Bloc 1 de CGMS-Maroc	13
1.1. Collecte des données de réanalyse météorologique ERA5	14
1.2. Extraction sur la zone géographique d'intérêt	16
1.3. La grille de référence	16
1.4. Interpolation spatiale des données ERA5	18
1.5. Collecte et traitement des données d'observation météorologique	24
1.6. Interpolation des données météorologiques des stations synoptiques	27
1.7. Correction des données de réanalyse ERA5	28
2. Fonctionnement du Bloc 2 de CGMS-Maroc	36
2.1. Collecte des données satellitaires : indices de végétation et d'humidité des sols	37
2.2. Harmonisation des données satellitaires sur la grille de référence de CGMS-Maroc	40
2.3. Élaboration du masque des cultures céréalières	41
2.4. Données statistiques agricoles : les enquêtes de terrain	42
2.5. Modèles de prévision des rendements	44
2.6. Prévision des rendements	54
2.7. Visualisation des résultats : l'interface utilisateur	57
III. Architecture informatique de CGMS-Maroc	67
1. Architecture du Bloc 1 : Infrastructure informatique de la base de données climatique	67
1.1. Architecture matérielle redondante	68
1.2. Environnement logiciel hautement sécurisé	68
1.3. Supervision et exploitations optimisées	69
2. Architecture du Bloc 2 : Intégration, analyse et visualisation de données multi- sources	70
IV. Feuille de route pour l'amélioration de CGMS-Maroc	72
1. Statistiques des rendements céréaliers	73
2. Masque céréalière dynamique	74
3. Système collaboratif de suivi des cultures	75
4. Prévisions météorologiques saisonnières	76
5. Dissémination des résultats	79
6. Examen externe par les pairs	80
7. Renforcement des capacités	81
V. Conclusion	83
Bibliographie	85
Annexes	90

CGMS-Maroc, le système d'alerte à la sécheresse et de prévision des rendements céréaliers au Maroc

Riad BALAGHI, Mouanis LAHLOU, Meriem ALAOURI



CGMS-Maroc
National Crop Monitoring and Forecasting System

Résumé exécutif

Le Maroc est confronté à des défis croissants pour son agriculture céréalière pluviale, pilier de sa sécurité alimentaire, en raison de la raréfaction et de l'irrégularité accrues des précipitations sous l'effet du changement climatique. Avec des rendements en blé et orge fortement tributaires des aléas climatiques, la production nationale peine à satisfaire les besoins d'une population en augmentation. Pour relever ce défi, le pays a investi depuis 20 ans dans le développement du système novateur CGMS-Maroc (Crop Growth Monitoring System), outil d'aide à la décision pour le suivi des campagnes agricoles et la prévision des rendements céréaliers.

Un système intégré fruit d'un partenariat d'excellence

Née d'une collaboration stratégique entre institutions nationales (INRA, IAV Hassan II, DGM, ministère de l'Agriculture) et organismes internationaux réputés (JRC européen, Université de Liège, VITO, Alterra, etc.), la plateforme CGMS-Maroc mobilise les technologies les plus avancées en matière de collecte de données, modélisation agro-climatique et intelligence artificielle. Son architecture modulaire et intégrée repose sur 3 piliers : l'harmonisation de données multi-sources, la prédiction des rendements par modèles mathématiques et la diffusion des résultats via une interface Web ergonomique.

Processus opérationnel en 3 étapes clés

Le premier atout de CGMS-Maroc est de fusionner des données complémentaires pour disposer d'une information exhaustive sur l'état des cultures :

1. Les observations des stations météorologiques, précises mais localisées, sont combinées avec les réanalyses météorologiques.
2. Les séries historiques de rendements sont mesurés ponctuellement lors d'enquêtes.
3. Un processus d'interpolation et de contrôle qualité permet d'obtenir un jeu de données harmonisé, avec une résolution spatiale et temporelle adaptée pour caractériser finement la croissance des céréales à l'échelle infranationale.

Ce socle d'information est alors exploité par une palette de modèles mathématiques pour prévoir les rendements du blé et de l'orge par province. L'approche est résolument intégrative, combinant des techniques complémentaires :

- L'analyse fréquentielle identifie dans l'historique les années similaires à la campagne en cours pour une première estimation analogique.
- Les régressions linéaires multiples établissent les relations statistiques entre variables agrométéorologiques et rendements.
- Les algorithmes d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, forêts aléatoires) repèrent des motifs complexes et non linéaires échappant aux modèles classiques.

En interrogeant les données sous des angles complémentaires, CGMS-Maroc consolide des prévisions robustes de rendement, assorties d'un intervalle de confiance évoluant au fil de la campagne.

Pour faciliter l'appropriation des résultats par les décideurs, une interface utilisateur intuitive synthétise les paramètres clés via des outils interactifs de visualisation (cartes dynamiques, graphiques comparatifs). L'automatisation de l'édition des bulletins de suivi facilite leur diffusion régulière aux services agricoles déconcentrés. Des fonctionnalités avancées d'analyse rétrospective et de scénarisation permettent d'ajuster la conduite tactique des cultures.

Perspectives d'amélioration continue

Malgré sa reconnaissance par la FAO comme l'un des 5 meilleurs systèmes au monde, CGMS-Maroc maintient une dynamique volontariste de R&D pour rester à la pointe de l'état de l'art. Quatre axes prioritaires se dégagent :

1. Renforcer le réseau de stations météo automatiques, surtout en zones de montagne et arides, pour densifier la grille d'observations au sol à une maille < 10 km.
2. Développer un masque dynamique des cultures céréalières, remis à jour annuellement par télédétection, pour mieux isoler leur signal spécifique.
3. Intégrer des observations agronomiques collaboratives de terrain via une application mobile, pour enrichir le diagnostic par l'expertise située des acteurs locaux.
4. Impliquer davantage les utilisateurs dans la conception et l'évaluation du système, via un comité de pilotage multi-acteurs et une diffusion élargie des produits.

Contribution à la résilience de l'agriculture marocaine

A moyen terme, ces développements hisseront CGMS-Maroc aux standards des meilleures plateformes agronomiques intégrées. La finesse spatiotemporelle de son monitoring des céréales en fera un outil précieux pour promouvoir une intensification écologique adaptée aux potentialités de chaque terroir. Ses prévisions précoces et fiables de rendement éclaireront les arbitrages stratégiques en matière de souveraineté alimentaire (gestion des stocks, importations).

Au-delà du pilotage conjoncturel des campagnes, CGMS-Maroc a vocation à devenir l'outil central d'intelligence agronomique pour construire une céréaliculture marocaine durablement résiliente face au défi climatique. Ses données localisées sur le temps long seront un atout unique pour concevoir des politiques agricoles sur-mesure, évaluer l'impact des programmes d'aménagement et d'incitation, et catalyser l'innovation variétale et agronomique.

Outil fédérateur du continuum recherche-développement-conseil, CGMS-Maroc incarne cette synergie entre révolution numérique et savoirs agronomiques qui sera la clé d'une agriculture performante et durable, garante de la sécurité alimentaire du Maroc.

Remerciements

Nous souhaitons exprimer notre sincère reconnaissance aux institutions suivantes pour leur soutien déterminant dans le développement de CGMS-Maroc :

- L'Institut National de la Recherche Agronomique,
- L'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II,
- La Direction de la Stratégie et des Statistiques, au ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts,
- La Direction Générale de la Météorologie,
- La Coopération Technique Belge,
- L'Agence Française de Développement,
- L'Union Européenne, à travers son programme-cadre pour la recherche et le développement,
- Le Centre de Recherche Commun de la Commission Européenne,
- La Banque mondiale.

Liste des abréviations

ACP	Analyse en Composantes Principales
AJAX	Asynchronous JavaScript and XML
API	Application Programming Interface
AURELHY	Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie
CCD	Cold Cloud Duration (durée des nuages froids)
CGMS	Crop Growth Monitoring System (Système de suivi de la croissance des cultures)
CHIRPS	Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations
CST	CGMS Statistical Toolbox (outil statistique de prévision des rendements du CGMS)
DGM	Direction Générale de la Météorologie
DSS	Direction de la Stratégie et des Statistiques
ERA5	ECMWF ReAnalysis
ESA	Agence Spatiale Européenne
ET0	Évapotranspiration de référence
EVI	Enhanced Vegetation Index (indice de végétation amélioré)
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEWS NET	Famine Early Warning Systems Network
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
IDW	Méthode d'interpolation Inverse Distance Weighting
IAV	Institut Agronomique et Vétérinaire
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
JSON	JavaScript Object Notation
LAI	Indice de surface foliaire (Leaf Area Index)
MARS	Système européen de suivi des cultures (Monitoring Agricultural Resources System)
MLR	Modèle de régression linéaire (Multiple Linear Regression)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée (Normalized Difference Vegetation Index)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (agence océanique et atmosphérique américaine)
OGC	Open Geospatial Consortium
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
PostGIS	Extension du système de gestion de base de données PostgreSQL pour le stockage et le traitement des données spatiales.
REST	Representational State Transfer
RFE	Rainfall Estimation (estimation des précipitations)
RMSE	Erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error)
SWI	Indice d'humidité du sol (Soil Water Index)
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis
WOFOST	Modèle de simulation des cultures (WORLD FOOD STUDIES)

Glossaire

Application Programming Interface (API) : Ensemble de règles et de protocoles permettant à différents logiciels de communiquer entre eux.

Apprentissage automatique (Machine Learning) : Champ d'étude de l'intelligence artificielle qui utilise des techniques statistiques pour donner aux ordinateurs la capacité d'apprendre à partir de données, sans être explicitement programmés.

Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie : Méthode d'interpolation spatiale des données météorologiques qui prend en compte l'influence du relief sur les variables climatiques.

Asynchronous JavaScript and XML : Ensemble de technologies permettant de construire des applications Web dynamiques et interactives.

Données multi-sources : Fait référence à l'intégration de données provenant de différentes sources, telles que des stations météorologiques, des images satellitaires, des enquêtes de terrain, etc.

Forêts aléatoires (Random Forests) : Technique d'apprentissage automatique qui construit une multitude d'arbres de décision et les combine pour obtenir une prédiction plus précise et stable.

Framework : Ensemble cohérent de composants logiciels structurels qui sert à créer les fondations et les grandes lignes d'un logiciel.

Geospatial Data Abstraction Library : Bibliothèque logicielle traduisant et traitant des données géospatiales vectorielles et matricielles.

Indice de végétation : Mesure calculée à partir des valeurs de réflectance multi-spectrales et utilisée pour quantifier la vigueur et l'activité photosynthétique de la végétation, comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Interpolation spatiale : Processus d'utilisation de points avec des valeurs connues pour estimer les valeurs à d'autres points inconnus.

JavaScript Object Notation : Format de données textuelles léger, dérivé de la notation des objets du langage JavaScript, utilisé pour l'échange de données structurées.

Krigeage : Méthode géostatistique d'interpolation spatiale qui estime les valeurs manquantes en utilisant une moyenne mobile pondérée des valeurs connues en fonction de leurs distances respectives.

Mailles (ou pixels) : Plus petite unité d'information dans une image numérique, généralement carrée, à laquelle sont associées des valeurs de réflectance dans différentes longueurs d'onde.

Masque des cultures : Couche d'information géographique délimitant les zones occupées par une culture donnée (comme le blé ou l'orge) au sein d'un paysage.

Open Geospatial Consortium : Organisme international de normalisation qui développe et promeut des standards ouverts pour les données et services géospatiaux.

Régressions linéaires multiples : Technique statistique utilisée pour étudier la relation linéaire entre une variable dépendante (comme le rendement) et plusieurs variables indépendantes (indices météorologiques et de végétation).

Réseaux de neurones : Modèles de calcul de l'apprentissage automatique, inspirés par les réseaux de neurones biologiques, capables d'apprendre et de s'améliorer en utilisant un grand nombre d'unités de traitement interconnectées.

Résolution spatiale : Taille du plus petit objet pouvant être distingué sur une image. Plus la résolution est fine, plus les détails sont visibles.

Representational State Transfer : Style d'architecture logicielle pour les systèmes hypermédias distribués comme le World Wide Web

Téledétection : Technique d'acquisition d'informations sur un objet ou une zone depuis une certaine distance, généralement par des capteurs embarqués sur des satellites.

Temps réel : Capacité d'un système de délivrer des résultats immédiats au fur et à mesure de la collecte des données.

Validation croisée : Méthode statistique d'évaluation d'un modèle sur un échantillon test indépendant de l'échantillon d'entraînement, pour estimer ses performances en généralisation et détecter un éventuel surapprentissage.

Visualisation interactive : Représentation graphique permettant à l'utilisateur d'interagir avec les informations affichées, par exemple en zoomant, en sélectionnant des entités ou en affichant des détails au clic.

I. Introduction

Au Maroc, la gestion des risques climatiques revêt une importance cruciale, principalement en raison du climat semi-aride qui pose de grands défis pour l'agriculture, en particulier pour la céréaliculture. Au cours de la période 2001-2017, le pays a connu des précipitations annuelles moyennes d'environ 341 mm par campagne agricole (de septembre à mai de l'année civile suivante). Cependant, ces précipitations varient considérablement d'une année à l'autre, allant de 198 mm en 1994-1995 à 610 mm en 2009-2010 (Balaghi et al., 2012a). Les principales cultures céréalières au Maroc, notamment le blé dur, le blé tendre et l'orge, couvrent environ 4,96 millions d'hectares, soit 55 % des terres agricoles totales. Parmi ces cultures, les céréales pluviales représentent 91 % de la superficie et contribuent à hauteur de 81 % de la production céréalière totale, avec une répartition presque égale entre le blé tendre (36 %) et l'orge (38 %).



Malgré son importance économique, la céréaliculture au Maroc présente des rendements relativement faibles par rapport à d'autres régions de climat similaire. Les raisons de cette situation incluent, entre autres, un transfert technologique limité, un renforcement insuffisant des capacités, un accès limité aux informations climatiques, une utilisation insuffisante d'engrais et des superficies assurées limitées. Pour la période de 2001 à 2017, les rendements moyens des céréales pluviales étaient de 1,31, 1,41 et 0,96 tonne par hectare respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge (Source de données : DSS). Ces chiffres ont un impact significatif sur la sécurité alimentaire du Maroc, étroitement liée à la production céréalière et vulnérable aux variations des précipitations à l'échelle nationale (Balaghi et al., 2012a).

Au cours des dernières décennies, le Maroc a connu une augmentation considérable de la fréquence des campagnes agricoles sèches, passant d'une année sèche sur 15 années normales dans les années 1930 à 1970 à une année sèche sur trois au cours des deux dernières décennies (Figure 1). Ces sécheresses ont eu un impact significatif sur l'économie et l'agriculture du pays, mettant en évidence la nécessité cruciale d'une gestion efficace des risques climatiques, une priorité majeure de la politique agricole marocaine depuis les années 1980. Cette priorité se reflète dans les dernières stratégies pour le secteur agricole, à savoir le « Plan Maroc Vert » (2008-2020) et la stratégie actuelle « Génération Green » (2020-2030), qui intègrent des orientations stratégiques pour maîtriser les risques climatiques grâce au développement d'outils de gestion des risques efficaces et de programmes d'adaptation pour atténuer les impacts du changement climatique.

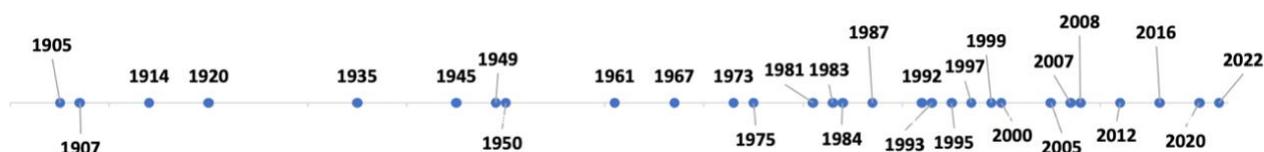


Figure 1 : Fréquence de la sécheresse au Maroc (Balaghi, non publié).

Pour relever ce défi, le pays a investi depuis 20 ans dans le développement du système novateur CGMS-Maroc¹ (Crop Growth Monitoring System), outil d'aide à la décision pour le suivi des campagnes agricoles et la prévision des rendements céréaliers.

Un système intégré fruit d'un partenariat d'excellence

La mise en place des fondements scientifiques du système CGMS-Maroc (Crop Growth Monitoring System) a débuté au début des années 2000 à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) (Balaghi et al., 2007 ; Balaghi et al., 2008 ; Narciso et Balaghi, 2009 ; Balaghi et al., 2010 ; El Aydam et al., 2010 ; El Aydam et Balaghi, 2011 ; Balaghi et al., 2012 ; Balaghi et al., 2012), mais son véritable développement technologique a pris son envol en 2011, avec le projet européen E-AGRI². Cette évolution a été possible grâce à une collaboration technologique avec des institutions de recherche internationales, dont l'Institut Flamand pour la Recherche et la Technologie (VITO), le Centre commun de recherche (JRC) de la Commission européenne, l'Institut de Recherche de l'Université de Wageningen (Alterra), et l'Université de Milan (UNIMI) (Confalonieri et al., 2013 ; De Wit et al., 2013 ; Balaghi et al., 2014 ; Bregaglio et al., 2015). Ce développement s'est poursuivi en 2014, dans le cadre du projet ACCAGRIMAG³ financé par le Fonds Français pour l'Environnement Mondial, et a été alimenté par de nombreuses recherches menées au Maroc (Jarlan et al., 2013 ; Benabdelouahab et al., 2016 ; Meroni et al., 2016 ; Bouras et al., 2020 ; Bouras et al., 2021 ; Mamassi et al., 2023).

Inspiré par le Système Européen de Suivi de Croissance des Cultures (CGMS) de la Commission Européenne (Boogaard et al., 1998 ; Supit et al., 1994 ; Van Diepen et al., 1989 ; Micale and Genovese, 2004 ; Lazar and Genovese, 2004 ; Genovese and Bettio, 2004, Baruth et al., 2007), le CGMS-Maroc a été développé de manière indépendante grâce à des collaborations fructueuses entre l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), la Direction Générale de la Météorologie (DGM), le Ministère de l'Agriculture (DSS) et l'Institut Agronomique et Vétérinaire (IAV) Hassan II du Maroc. Le système CGMS-Maroc a été classé par la FAO (FAO, 2016) comme l'un des cinq meilleurs systèmes de surveillance et de prévision des cultures au monde, à côté de ceux des États-Unis, de Chine, de Belgique et d'Afrique du Sud.

Opérationnel depuis près de deux décennies sous différentes versions, le CGMS-Maroc s'est révélé être un outil précieux pour éclairer les décisions du secteur agricole, grâce à sa capacité à fournir des prévisions et un suivi agrométéorologique en temps réel. Il repose sur une plateforme unifiée conçue pour répondre aux besoins locaux de l'agriculture marocaine. Il utilise un masque de culture pour filtrer les données des images satellitaires et exploite des techniques de pointe en apprentissage automatique, notamment l'intelligence artificielle, pour modéliser de manière prédictive les rendements. Les données météorologiques provenant des stations au sol sont intégrées à diverses données satellitaires, adoptant une approche intégrée. De plus, le CGMS-Maroc joue un rôle crucial dans le renforcement des capacités en formant une nouvelle génération d'agro-météorologistes marocains.

Le développement du CGMS-Maroc s'est appuyé sur les meilleures pratiques internationales, couvrant plusieurs aspects, tels que l'intégration de données multiples, l'utilisation avancée de la télédétection, l'implication d'analystes qualifiés, l'évaluation continue du système, la collaboration étroite entre les instituts, l'assurance qualité des données, l'engagement actif des utilisateurs finaux, ainsi que la gestion adaptative et l'évaluation approfondie des risques climatiques.

¹ <https://www.cgms-maroc.ma/>

² <https://www.e-agri.info/>

³ <https://www.ffem.fr/fr/carte-des-projets/accagrimg-adaptation-au-changement-climatique-de-lagriculture-du-maghreb>

Processus opérationnel en 3 étapes clés

Le premier atout de CGMS-Maroc est de fusionner des données complémentaires pour disposer d'une information exhaustive sur l'état des cultures :

- Les observations des stations météorologiques, précises mais localisées, sont combinées avec les réanalyses météorologiques.
- Les séries historiques de rendements sont mesurés ponctuellement lors d'enquêtes.
- Un processus d'interpolation et de contrôle qualité permet d'obtenir un jeu de données harmonisé, avec une résolution spatiale et temporelle adaptée pour caractériser finement la croissance des céréales à l'échelle infranationale.

Ce socle d'information est alors exploité par une palette de modèles mathématiques pour prévoir les rendements du blé et de l'orge par province. L'approche est résolument intégrative, combinant des techniques complémentaires :

- L'analyse fréquentielle identifie dans l'historique les années similaires à la campagne en cours pour une première estimation analogique.
- Les régressions linéaires multiples établissent les relations statistiques entre variables agrométéorologiques et rendements.
- Les algorithmes d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, forêts aléatoires) repèrent des motifs complexes et non linéaires échappant aux modèles classiques.

En interrogeant les données sous des angles complémentaires, CGMS-Maroc consolide des prévisions robustes de rendement, assorties d'un intervalle de confiance évoluant au fil de la campagne.

Pour faciliter l'appropriation des résultats par les décideurs, une interface utilisateur intuitive synthétise les paramètres clés via des outils interactifs de visualisation (cartes dynamiques, graphiques comparatifs). L'automatisation de l'édition des bulletins de suivi facilite leur diffusion régulière aux services agricoles déconcentrés. Des fonctionnalités avancées d'analyse rétrospective et de scénarisation permettent d'ajuster la conduite tactique des cultures.

Perspectives d'amélioration continue

CGMS-Maroc maintient une dynamique volontariste de R&D pour rester à la pointe. Quatre axes prioritaires de développement se dégagent :

1. Renforcer le réseau de stations météo automatiques, surtout en zones de montagne et arides, pour densifier la grille d'observations au sol à une maille < 10 km.
2. Développer un masque dynamique des cultures céréalières, remis à jour annuellement par télédétection, pour mieux isoler leur signal spécifique.
3. Intégrer des observations agronomiques collaboratives de terrain via une application mobile, pour enrichir le diagnostic par l'expertise située des acteurs locaux.
4. Impliquer davantage les utilisateurs dans la conception et l'évaluation du système, via un comité de pilotage multi-acteurs et une diffusion élargie des produits.

Contribution à la résilience de l'agriculture marocaine

A moyen terme, ces développements hisseront CGMS-Maroc aux standards des meilleures plateformes agronomiques intégrées. La finesse spatiotemporelle de son monitoring des céréales en fera un outil précieux pour promouvoir une intensification écologique adaptée aux potentialités de chaque terroir. Ses prévisions précoces et fiables de rendement éclaireront les

arbitrages stratégiques en matière de souveraineté alimentaire (gestion des stocks, importations).

Au-delà du pilotage conjoncturel des campagnes, CGMS-Maroc a vocation à devenir l'outil central d'intelligence agronomique pour construire une céréaliculture marocaine durablement résiliente face au défi climatique. Ses données localisées sur le temps long seront un atout unique pour concevoir des politiques agricoles sur-mesure, évaluer l'impact des programmes d'aménagement et d'incitation, et catalyser l'innovation variétale et agronomique.

Outil fédérateur du continuum recherche-développement-conseil, CGMS-Maroc incarne cette synergie entre révolution numérique et savoirs agronomiques qui sera la clé d'une agriculture performante et durable, garante de la sécurité alimentaire du Maroc.

Objectifs et plan du livre

Ce livre vise à présenter de manière détaillée le système CGMS-Maroc, qui s'est imposé comme outil innovant de référence pour la gestion des risques climatiques dans l'agriculture marocaine. Il fournira une description de l'architecture, des composantes technologiques et du fonctionnement de ce système. Seront notamment mises en lumière ses capacités en matière d'intégration de données hétérogènes et de modélisation prédictive des rendements céréaliers par l'intelligence artificielle.

Sur la base de cette présentation, ce livre formulera ensuite une feuille de route ambitieuse pour faire progresser CGMS-Maroc au niveau des meilleurs standards internationaux. Les recommandations proposées cibleront les points d'amélioration prioritaires pour optimiser les performances déjà élevées de ce système.

L'objectif est de promouvoir l'adoption élargie de CGMS-Maroc par l'ensemble des parties prenantes du secteur agricole, en en faisant une solution digitale de pointe pour relever les défis posés par l'accroissement des risques climatiques à la sécurité alimentaire du pays. Cette feuille de route stratégique visera à positionner CGMS-Maroc comme référence mondiale dans le monitoring avancé des cultures, tout en ouvrant des perspectives stimulantes pour son perfectionnement continu au service d'une agriculture marocaine durable et résiliente.

II. Architecture fonctionnelle de CGMS-Maroc : des données aux prévisions de rendement

Le système CGMS-Maroc repose sur une architecture avancée et une combinaison de données diverses pour surveiller la progression de la campagne agricole et prédire les rendements céréaliers au Maroc.

CGMS-Maroc est constitué de deux blocs séparés physiquement (Figure 2) :

1. **Un Bloc 1**, situé dans les centres de calcul de la DGM, qui assure les fonctions suivantes :
 - Collecte des données de réanalyse météorologique ERA5 (1.1).
 - Extraction sur la zone géographique d'intérêt (1.2).
 - Mise au format de la grille de référence (1.3).
 - Interpolation spatiale des données ERA5 corrigées (1.4).
 - Collecte et traitement des données d'observation météorologique (1.5).
 - Interpolation des données météorologiques des stations synoptiques (1.6).

Le Bloc 1 fournit ainsi en parallèle :

- a. Les données ERA5 de pluviométrie et de températures (max et min) à l'échelle du pays, interpolées puis corrigées par les données des stations synoptiques.
- b. Les données interpolées d'évapotranspiration potentielle calculées par interpolation géostatistique sur l'ensemble du pays à partir des données des stations synoptiques.

2. **Un Bloc 2**, situé sur un serveur public, qui assure les fonctions suivantes :
 - Collecte des données satellitaires : indices de végétation et d'humidité des sols (2.1).
 - Harmonisation des données satellitaires sur la grille de référence de CGMS-Maroc (2.2).
 - Élaboration du masque des cultures céréalières (2.3).
 - Collecte des données statistiques agricoles : les enquêtes de terrain (2.4).
 - Modèles de prévision des rendements (2.5).
 - Prévision des rendements à l'échelle des provinces (2.6).
 - Visualisation des résultats : l'interface utilisateur (2.7).

CGMS-Maroc réalise la prévision des rendements à l'échelle des provinces (2.6) en utilisant les paramètres suivants provenant du Bloc 1 : évapotranspiration potentielle interpolée à partir des données des stations synoptiques (1.6) ; et NDVI, LAI, SWI, pluviométrie, températures max et min de ERA5 interpolées et corrigées (1.7). Il utilise aussi les données de statistiques de rendements céréaliers par province (2.4).

Les modèles utilisés sont l'analyse de similarité, les régressions linéaires multiples et les algorithmes d'apprentissage automatique (2.5). Les variables prédictives de rendements sont issues des variables provenant du Bloc 1 et sont extraites pour chacune des 5 périodes du cycle des céréales (P0 à P5, voir Tableau 6). Ces périodes sont détectées par analyse des données EVI2.

Un élément clé de CGMS-Maroc est l'élaboration d'un masque dynamique des parcelles céréalières (2.3) par classification d'images satellitaires à haute résolution. Ce masque permet de filtrer spatialement les données météorologiques et d'indices de végétation pour ne conserver que l'information pertinente sur les zones de cultures.

Enfin, l'interface web utilisateur (2.7) de CGMS-Maroc permet de visualiser tous les paramètres de suivi de la campagne agricole issus du Bloc 1 ainsi que les prévisions réalisées. Elle propose des outils interactifs d'analyse et de visualisation des résultats sous forme de cartes, graphiques et tableaux de bord.

Cette architecture fonctionnelle intégrée, depuis la collecte des données multi-sources jusqu'à la visualisation des résultats de prévision de rendements, fait de CGMS-Maroc un puissant outil d'aide à la décision pour gérer les campagnes céréalières marocaines. Sa capacité à fusionner des informations hétérogènes, à les traiter par des modèles agrométéorologiques avancés, et à restituer des indicateurs synthétiques facilement interprétables, offre un support précieux pour guider les politiques agricoles et anticiper la sécurité alimentaire du pays.

Pour faciliter la lecture, il est important de noter que les processus clés décrits dans ce chapitre suivent le même ordre de numérotation que celui présenté dans la Figure 2 (Schéma synoptique du fonctionnement de CGMS-Maroc). Cette correspondance permettra au lecteur de se référer aisément à cette vue d'ensemble schématique pour mieux appréhender l'articulation et l'interdépendance des différentes composantes fonctionnelles de CGMS-Maroc.

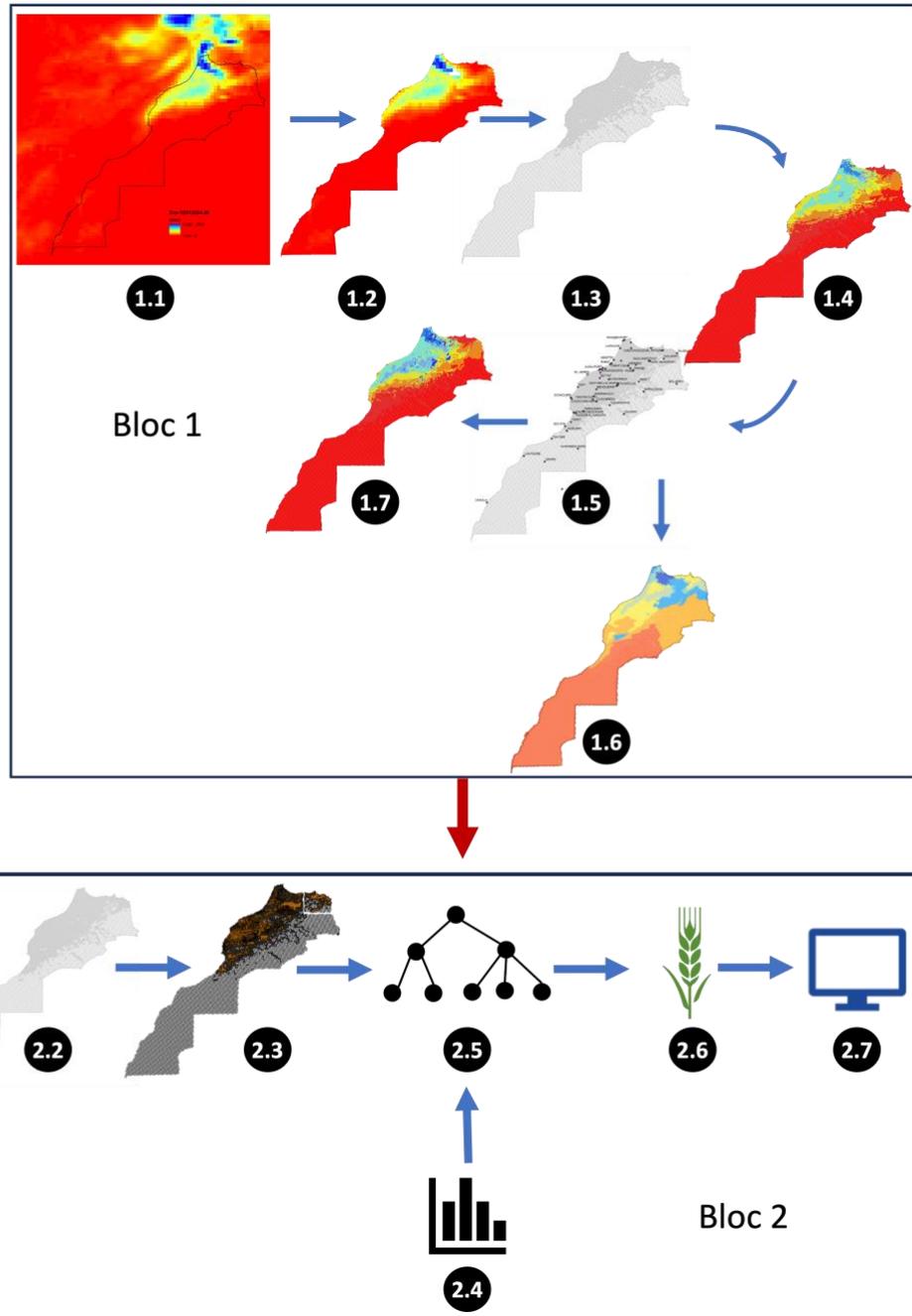


Figure 2 : Schéma synoptique du fonctionnement de CGMS-Maroc.

1. Fonctionnement du Bloc 1 de CGMS-Maroc

Le Bloc 1 de CGMS-Maroc constitue un maillon essentiel dans le fonctionnement global du système, en assurant la collecte, le traitement et l'intégration des données météorologiques nécessaires au suivi des conditions agro-climatiques et à la prévision des rendements céréalières au Maroc. Ce bloc, hébergé au sein de l'infrastructure de la DGM, est le pilier de la chaîne de traitement des données climatiques.

Le Bloc 1 s'appuie sur deux sources principales de données : les observations issues des stations météorologiques au sol de la DGM et les réanalyses météorologiques ERA5 (ECMWF ReAnalysis

5th generation⁴) produites par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme⁵ (CEPMMT, ou ECMWF en anglais). La combinaison de ces deux sources permet d'obtenir une couverture spatiale complète et une caractérisation détaillée des conditions météorologiques sur l'ensemble du territoire marocain.

Bien que les observations des stations synoptiques soient précises, elles souffrent d'une couverture spatiale limitée et inégale. Pour surmonter cette limitation, le Bloc 1 intègre les données de réanalyse ERA5 qui fournissent une estimation cohérente et spatialement continue des principales variables météorologiques (précipitations, températures) depuis 1981, avec une résolution spatiale d'environ 31 km.

L'un des défis majeurs du Bloc 1 consiste à harmoniser ces deux sources de données et à les rendre compatibles avec la grille de référence de CGMS-Maroc, qui sert de socle commun pour l'ensemble des analyses spatiales. Cela implique des étapes de pré-traitement, d'interpolation et de correction des biais, afin d'exploiter de manière optimale la complémentarité entre observations *in situ* et réanalyses.

Le produit final du Bloc 1 est un jeu de données météorologiques quotidiennes spatialisées à haute résolution, couvrant l'ensemble du Maroc sur une période s'étendant de 1981 à aujourd'hui. Ces données constituent un intrant crucial pour le Bloc 2 de CGMS-Maroc, permettant le suivi de la campagne agricole et l'estimation des rendements.

Au-delà de la simple fourniture de données, le Bloc 1 intègre des processus d'évaluation et de validation continus pour garantir la qualité et la fiabilité des informations météorologiques utilisées. Des analyses comparatives entre les données ERA5 corrigées et les observations des stations sont régulièrement menées pour quantifier les apports et identifier les axes d'amélioration.

Cette section II.1 propose une immersion technique dans les rouages du Bloc 1 de CGMS-Maroc, en détaillant les différentes étapes de la chaîne de traitement, depuis la collecte des données brutes jusqu'à la génération des produits finaux intégrés dans le système. Une attention particulière sera accordée aux méthodes d'interpolation spatiale, aux techniques de correction des biais et aux protocoles d'évaluation et de validation des données.

Cette description approfondie du Bloc 1 mettra en lumière son rôle central dans l'architecture de CGMS-Maroc et sa contribution décisive à la qualité et à la pertinence des informations fournies pour le suivi et la prévision des rendements céréaliers au Maroc.

1.1. Collecte des données de réanalyse météorologique ERA5

Le Bloc 1 de CGMS-Maroc intègre les données quotidiennes de réanalyse météorologique ERA5 sur un historique débutant le 1^{er} janvier 1981. Les données ERA5 sont produites par le CEPMMT. ERA5 représente l'état de l'art en matière de réanalyse climatique, offrant un jeu de données global, cohérent et à haute résolution.

Plusieurs études récentes ont en effet démontré l'utilité des produits de réanalyse météorologique pour estimer les précipitations au Maroc, malgré certains biais à corriger (Beck et al., 2017 ; Benkirane et al., 2023 ; Hanchane et al., 2023 ; Najmi et al., 2023 ; Tuel et al., 2023). Par exemple, Salih et al. (2022) a montré de bonnes performances des produits satellitaires PERSIANN, CDR et ERA5 pour estimer les précipitations annuelles dans le bassin de Tensift au Maroc, notamment en basse altitude et pendant les années humides. Ces produits satellitaires se sont avérés proches des observations au sol des stations météorologiques.

⁴ Les données ERA5 sont disponibles sur <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>

⁵ <https://www.ecmwf.int>

Les réanalyses ERA5 sont le fruit d'une assimilation complexe d'observations météorologiques provenant d'une multitude de sources, telles que les satellites, les stations au sol, les bouées océaniques et les mesures aéroportées. Ces observations sont combinées de manière optimale avec des modèles climatiques avancés, à travers une technique appelée "assimilation de données variationnelle quadridimensionnelle" (4D-Var). Cette approche permet de recalculer les conditions météorologiques passées de façon cohérente et physiquement réaliste, en tirant parti de toutes les informations disponibles.

La particularité d'ERA5 réside dans sa capacité à fournir une image complète et homogène de l'atmosphère, des surfaces continentales et des océans, et ce, de manière continue depuis 1979. Les données sont disponibles à une résolution spatiale d'environ 31 km (0,28125° de résolution horizontale) et couvrent l'ensemble du globe avec une fréquence horaire. A titre d'exemple, la Figure 3 présente la carte de pluviométrie au 19 janvier 2024.

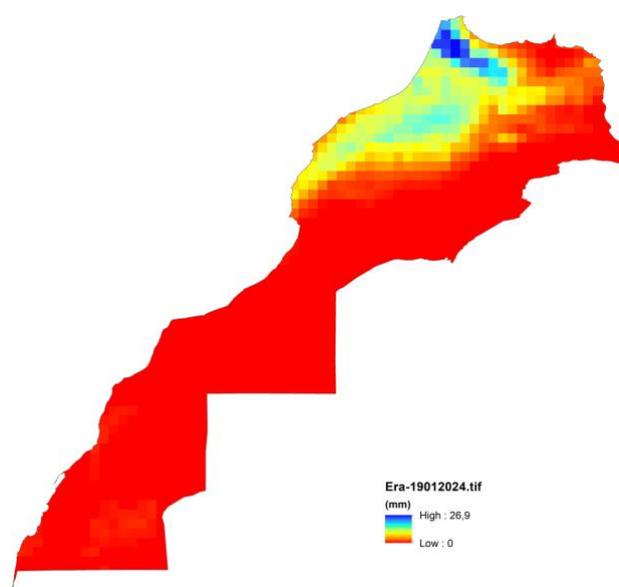


Figure 3 : Réanalyse météorologique ERA5 des précipitations du 19 janvier 2024.

Parmi les nombreuses variables disponibles dans ERA5, CGMS-Maroc se concentre sur deux paramètres clés pour le suivi agrométéorologique : les précipitations et les températures (maximales et minimales). Les précipitations sont estimées à partir de l'analyse des champs d'humidité atmosphérique et des processus de condensation et de convection dans le modèle. Les températures, quant à elles, sont obtenues en combinant les observations de surface avec les profils verticaux de température issus du modèle atmosphérique.

Les données ERA5 brutes, à leur résolution spatiale native d'environ 31 km, sont collectées dans le Bloc 1 de CGMS-Maroc directement depuis les serveurs du CEPMMT, via l'interface de programmation (API) du Climate Data Store (CDS) de Copernicus. Cette étape de collecte automatisée permet de récupérer régulièrement les dernières mises à jour des réanalyses et de maintenir une base de données climatiques à jour au sein du système.

Les données ERA5 concernent trois paramètres :

- **Température maximale à 2 mètres depuis le dernier post-traitement** : la température maximale de l'air mesurée à 2 mètres au-dessus de la surface de la terre, de la mer ou des eaux intérieures depuis la dernière fois que le paramètre a été archivé dans une prévision particulière.

- **Température minimale à 2 mètres depuis le dernier post-traitement** : La température minimale de l'air mesurée à 2 mètres au-dessus de la surface de la terre, de la mer ou des eaux intérieures depuis que le paramètre a été archivé pour la dernière fois dans une prévision particulière. La température mesurée à 2 mètres est calculée en interpolant entre le niveau le plus bas du modèle et la surface de la Terre, en tenant compte des conditions atmosphériques. Ce paramètre est exprimé en kelvins (K).
- **Précipitation totale** : Ce paramètre représente l'eau liquide et congelée accumulée, comprenant la pluie et la neige, qui tombe à la surface de la Terre. Il est la somme de la précipitation à grande échelle et de la précipitation convective. La précipitation à grande échelle est générée par le schéma des nuages dans le Système de Prévision Intégré (IFS Integrated Forecasting System⁶) du CEPMMT. Le schéma des nuages représente la formation et la dissipation des nuages et des précipitations à grande échelle dues aux changements dans les quantités atmosphériques (telles que la pression, la température et l'humidité) prédites directement par l'IFS à des échelles spatiales de la taille de la maille de grille ou plus grandes. La précipitation convective est générée par le schéma de convection dans l'IFS, qui représente la convection à des échelles spatiales plus petites que la maille de grille. Ce paramètre n'inclut pas le brouillard, la rosée ou les précipitations qui s'évaporent dans l'atmosphère avant d'atteindre la surface de la Terre. Ce paramètre est accumulé sur une période de temps particulière qui dépend des données extraites. Pour la réanalyse, la période d'accumulation est d'une heure se terminant à la date et à l'heure de validité.

1.2. Extraction sur la zone géographique d'intérêt

Après l'acquisition des données ERA5 brutes à l'échelle globale, l'étape suivante consiste à extraire les informations pertinentes pour la zone géographique d'intérêt, à savoir le territoire marocain. Cette extraction ciblée permet de réduire le volume de données à traiter et de se concentrer sur la région d'étude.

Le processus d'extraction s'appuie sur les limites géographiques précises du Maroc, définies par ses frontières terrestres et maritimes. Dans le cas de CGMS-Maroc, ces limites sont représentées sous forme d'un fichier shapefile, un format couramment utilisé pour stocker des données géographiques vectorielles. Le shapefile contient les coordonnées des frontières du Maroc dans un système de référence géographique donné, tel que le WGS84 (World Geodetic System 1984).

Lors de l'extraction, une attention particulière est portée à la cohérence spatiale des données. Des contrôles qualité sont réalisés pour vérifier que les points de grille ERA5 sélectionnés couvrent de manière exhaustive et sans discontinuité l'ensemble du territoire marocain, tel que défini par le shapefile des frontières. Il est également important de s'assurer de la compatibilité des systèmes de référence géographique utilisés par les données ERA5 et le shapefile.

L'utilisation d'un shapefile pour représenter les limites géographiques du Maroc offre une grande précision et une flexibilité dans le processus d'extraction des données ERA5. Elle permet de s'adapter facilement à d'éventuelles modifications des frontières ou à des besoins spécifiques en termes de zone d'étude.

1.3. La grille de référence

La grille de référence est un élément fondamental du système CGMS-Maroc, fournissant un cadre spatial harmonisé pour l'intégration de données multi-sources. Elle sert de base commune

⁶ <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model>

pour le stockage, le traitement et l'affichage des informations météorologiques (ERA5) et satellitaires (NDVI⁷, LAI⁸, SWI⁹).

Lors des premières phases de développement de CGMS-Maroc, la grille était constituée de mailles carrées uniformes de 9 km de côté (Allard et al., 2014). Cependant, pour mieux répondre aux besoins spécifiques du suivi agricole, la configuration actuelle de la grille a été optimisée. Désormais, elle est composée de mailles de tailles variables, avec une résolution de 4,5 km dans les zones agricoles et de 9 km dans les autres régions du pays (Figure 4). Cette adaptation permet d'affiner la précision des analyses dans les zones d'intérêt agricole, tout en optimisant les performances de calcul et de stockage du système.

Le choix de la résolution spatiale dans les zones agricoles a fait l'objet d'une attention particulière. L'objectif était de trouver un équilibre entre la nécessité de capturer la variabilité locale des conditions agrométéorologiques et les contraintes liées aux capacités de traitement du serveur CGMS-Maroc. La maille de 4,5 km s'est avérée être un compromis optimal, garantissant une interpolation fiable des données ERA5 (voir section suivante), tout en maintenant des temps de calcul raisonnables.

Au total, la grille de référence de CGMS-Maroc compte 16 819 mailles, couvrant l'ensemble du territoire marocain. Chaque maille constitue une unité élémentaire pour la gestion et l'analyse des données. Grâce à cette structure, il est possible d'assurer une cohérence spatiale entre les différentes sources d'information intégrées dans le système, facilitant ainsi leur fusion et leur exploitation conjointe.

Un atout majeur de la grille de référence réside dans sa capacité à servir de support pour l'agrégation spatiale des données à différentes échelles administratives. Les informations contenues dans chaque maille peuvent être agrégées pour générer des indicateurs à l'échelle des communes, des provinces ou du pays tout entier. Cette flexibilité est essentielle pour adapter les analyses aux besoins des différents utilisateurs et décideurs.

Chaque maille de la grille contient une multitude d'attributs, incluant des données météorologiques (précipitations, températures) et satellitaires (indices de végétation, humidité du sol). De plus, grâce à l'intégration d'un masque agricole, chaque maille est caractérisée par la proportion de terres cultivées qu'elle contient. Cette information est précieuse pour affiner les analyses en se focalisant sur les zones de production agricole.

Les données météorologiques quotidiennes, issues des stations au sol, sont interpolées sur la grille de référence en tenant compte de divers facteurs tels que la distance aux stations, l'altitude, les barrières climatiques, la proximité de la mer et les similitudes climatiques entre les sites. Cette interpolation permet d'estimer les valeurs des paramètres météorologiques pour chaque maille, y compris dans les zones dépourvues de stations, assurant ainsi une couverture spatiale complète.

⁷ Indice de végétation par différence normalisé (en anglais, Normalized Difference Vegetation Index).

⁸ Indice de surface foliaire (en anglais, Leaf Area Index).

⁹ L'indice d'humidité du sol (en anglais, Soil Water Index).

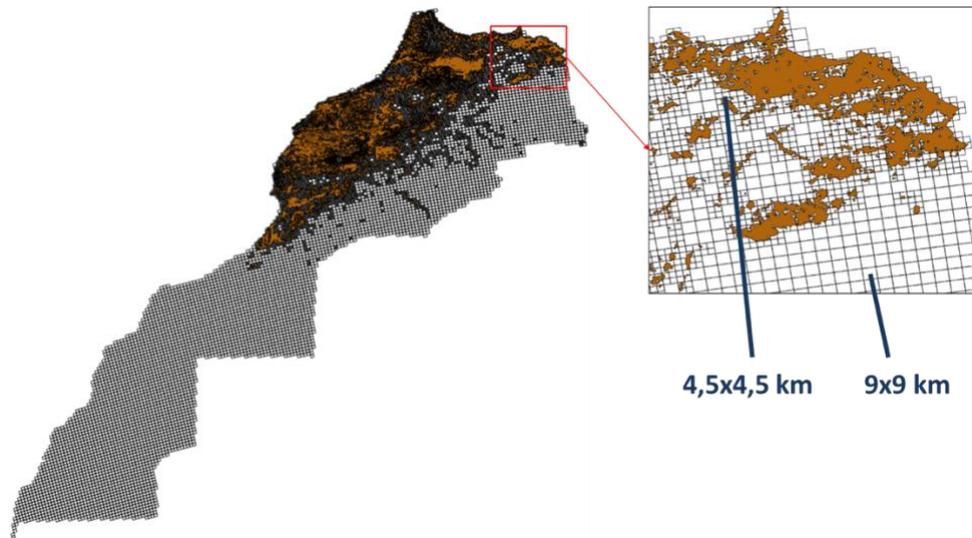


Figure 4: La grille de référence de CGMS-Maroc (les terres agricoles sont indiquées en couleur marron) (Balaghi et al., 2014).

1.4. Interpolation spatiale des données ERA5

L'objectif de l'interpolation est de générer des champs météorologiques quotidiens spatialement continus et à haute résolution à partir des données ERA5, de manière à pouvoir suivre l'évolution de la campagne agricole en tout point du territoire marocain. Pour réaliser cette interpolation, le système CGMS-Maroc met en œuvre une technique géostatistique adaptée aux spécificités des données de réanalyse.

Les données ERA5 sont fournies sous forme de pixels organisés dans une grille régulière couvrant l'ensemble du globe. Chaque pixel représente une zone d'environ 31 km de côté et contient les valeurs des différentes variables météorologiques (précipitations, températures, etc.). Cependant, cette résolution spatiale native est insuffisante pour capturer la variabilité locale des conditions agrométéorologiques. L'interpolation vise donc à affiner cette résolution sur la grille de référence, pour atteindre une maille de 4,5 km dans les zones d'intérêt agricole et de 9 km ailleurs.

L'approche d'interpolation, adoptée pour les données ERA5, a été mise en œuvre en 2011 dans le cadre du projet E-AGRI pour interpoler les données issues des 44 stations synoptiques de la DGM. Elle s'appuie sur une méthode de pondération inverse à la distance (IDW, Inverse Distance Weighting), inspirée des travaux de Beek et al. (1991) et van der Voet et al. (1994), combinée à une prise en compte de l'effet du relief, des barrières climatiques et de la distance par rapport à la mer.

Le processus d'interpolation des données ERA5 se déroule en deux étapes principales :

- Pour chaque maille de la grille de référence de CGMS-Maroc, on identifie les pixels ERA5 environnants dans un rayon donné (par exemple, 100 km). Une pondération est attribuée à chaque pixel ERA5 en fonction de sa distance au centre de la maille cible, selon le principe de l'IDW. Plus un pixel est proche, plus son poids est important.
- La valeur de la variable météorologique à interpoler (précipitations, températures) est estimée au centre de chaque maille de la grille en calculant une moyenne pondérée des valeurs des pixels ERA5 sélectionnés. Une correction est appliquée pour tenir compte de l'effet de l'altitude, en utilisant un gradient vertical spécifique à chaque variable (par exemple, $-0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ pour la température).

Pour guider cet algorithme d'interpolation et améliorer la prise en compte du relief, plusieurs couches d'informations géographiques sont utilisées (Figure 5) :

- Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) permettant de caractériser l'altitude en chaque maille. Celui-ci est issu des données GTOPO30¹⁰ à 30 secondes d'arc de résolution (~1 km).
- Une grille de distance à la mer calculée pour chaque maille en utilisant la méthode AURELHY¹¹ (Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydro- météorologie, voir Annexe 3) implémentée dans le langage R.
- Une partition du domaine en grandes zones climatiques homogènes tenant lieu de barrières infranchissables, définie sur la base des travaux de Knippertz et al. (2003) à partir de critères topographiques et météorologiques.

Le protocole d'interpolation est appliqué de manière indépendante pour chacune des variables météorologiques d'intérêt : précipitations, températures maximales et minimales. Les champs quotidiens haute résolution ainsi générés sont ensuite intégrés dans la base de données de CGMS-Maroc pour être utilisés dans les étapes suivantes, dans le Bloc 2 de CGMS-Maroc, pour la modélisation et la prévision des rendements.

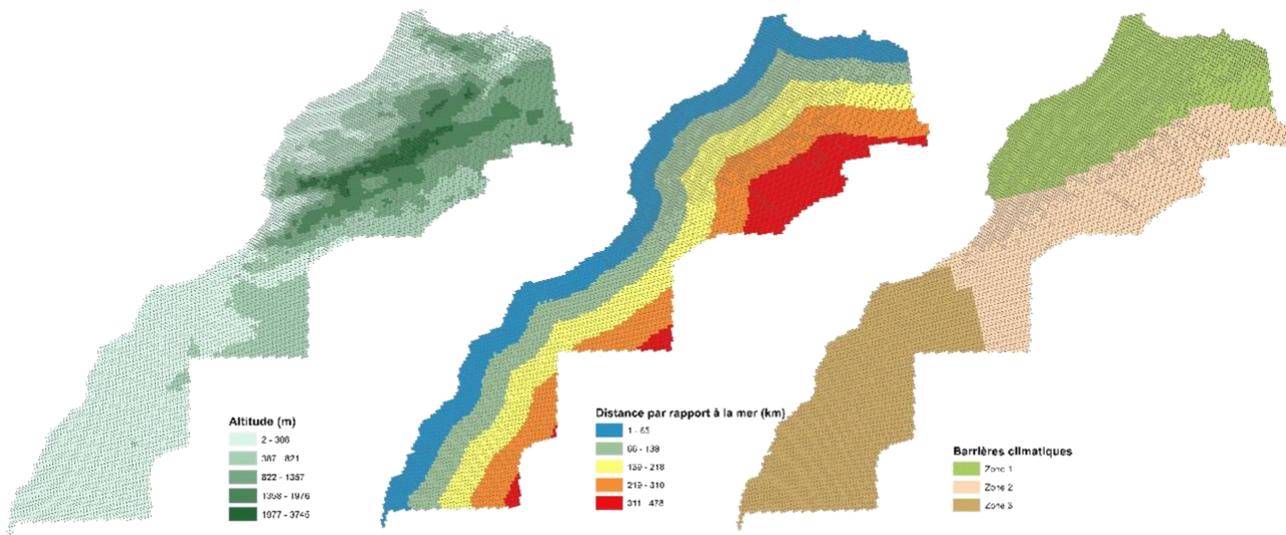


Figure 5 : Les attributs permettant l'interpolation spatiale des données ERA5 : Altitude (à gauche), distance par rapport à la mer (au centre) et barrières climatiques (à droite).

¹⁰ USGS EROS Archive - Digital Elevation - Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) <https://doi.org/10.5066/F7DF6PQS>

¹¹ La méthode AURELHY utilise le relief pour améliorer la cartographie des précipitations. La méthode s'articule autour des 3 points suivants : (1) Reconnaissance automatique de la liaison statistique existant entre les précipitations et le relief environnant ; (2) Utilisation optimale de cette liaison statistique aux points où l'on ne dispose pas de valeur mesurée ; (3) Génération d'une carte régionale des précipitations, intégrant les effets dus au relief.

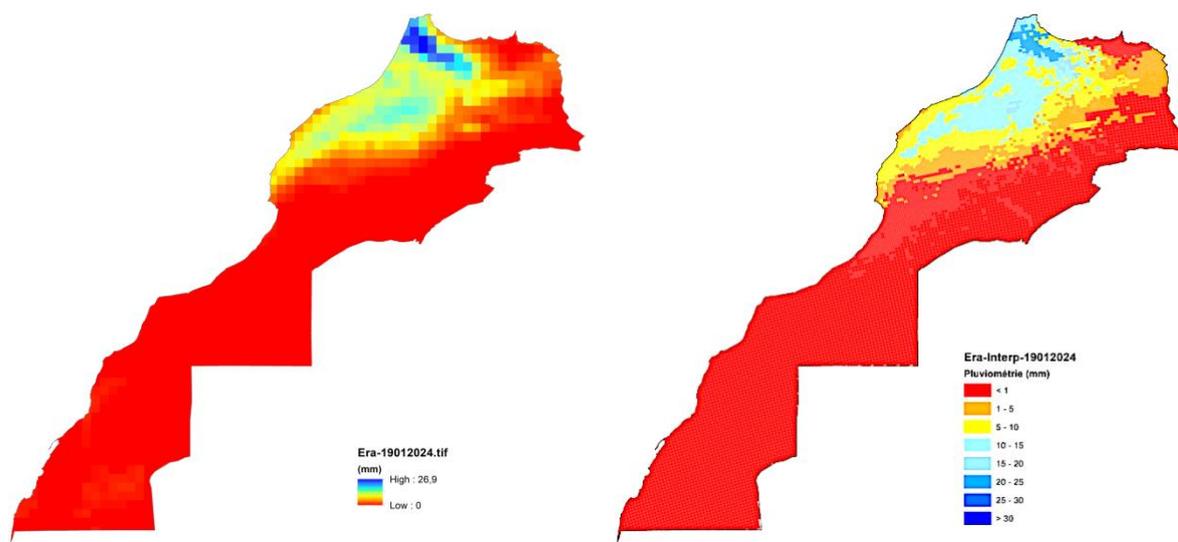


Figure 6 : Réanalyse météorologique ERA5 des précipitations du 19 janvier 2024. Image native (à gauche) et interpolée sur la grille de référence (à droite).

Évaluation des données ERA5 interpolées

Une analyse comparative a été réalisée entre les données de précipitations issues de la réanalyse ERA5, interpolées sur la grille de référence de CGMS-Maroc, et les observations des 44 stations synoptiques de la DGM. Cette étude a porté sur les cumuls pluviométriques annuels sur une période de six ans, de 2016 à 2021 (Figure 7). L'objectif principal de cette évaluation était de démontrer la pertinence et l'intérêt de l'intégration opérationnelle des données ERA5 dans CGMS-Maroc, afin de combler les lacunes de la couverture spatiale des stations au sol et d'améliorer la représentativité des champs pluviométriques utilisés pour le suivi agro-climatique.

Il est important de noter que la station d'Ifrane, située à une altitude de 1800 mètres et dans une zone au relief complexe, a été volontairement exclue de l'analyse. En effet, les produits de réanalyse comme ERA5, ainsi que les estimations satellitaires telles que CHIRPS, rencontrent des difficultés pour restituer avec précision les précipitations en terrain montagneux ou fortement accidenté. Cependant, comme il sera détaillé dans la section suivante, des méthodes de correction spécifiques ont été développées pour atténuer ces biais locaux et assurer une meilleure représentativité des champs ERA5, même dans ces contextes topographiques défavorables.

Pour évaluer la concordance entre ERA5 et les observations, une table de correspondance a été élaborée, permettant de mettre en relation les cumuls pluviométriques annuels mesurés à chaque station avec les valeurs des mailles ERA5 colocalisées géographiquement. Cette approche a permis une comparaison directe et quantitative des deux jeux de données.

Les résultats de l'analyse révèlent une corrélation significative entre les cumuls annuels de précipitations issus d'ERA5 et ceux enregistrés par les stations, avec des coefficients de détermination (R^2) systématiquement supérieurs à 0,79. Les nuages de points représentant les valeurs appariées suivent globalement la première bissectrice (droite identité), indiquant qu'ERA5 capture de manière fiable la variabilité interannuelle des précipitations, sans biais systématique marqué.

Quelques divergences sont néanmoins observées pour les années exceptionnellement pluvieuses. Dans ces situations, ERA5 tend à sous-estimer les forts abatements d'eau dans les régions septentrionales du pays, tandis qu'il surestime les cumuls dans les zones arides. Ces écarts peuvent s'expliquer par la résolution spatiale native d'ERA5 (31 km), qui ne permet pas de

résoudre finement les processus locaux influençant la distribution des précipitations intenses. Cependant, ces biais restent limités et ne remettent pas en cause la valeur ajoutée globale des réanalyses pour le suivi des conditions pluviométriques à l'échelle du pays.

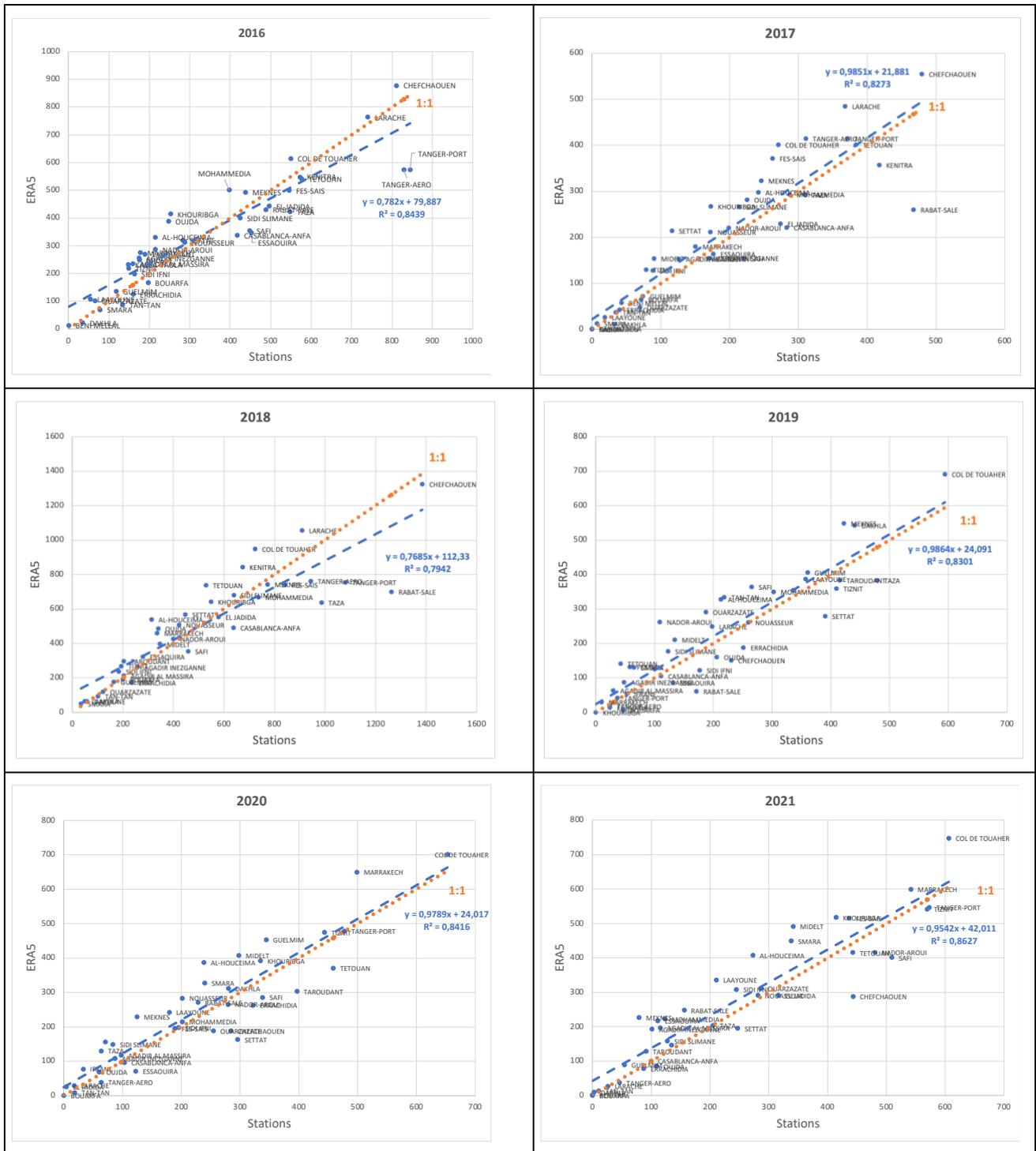


Figure 7 : Corrélation entre les données ERA5 et les données des stations synoptiques de la DGM.

La Figure 8 présente une comparaison des cumuls pluviométriques sur la saison agricole 2018-2019 (1^{er} septembre 2018 au 31 mai 2019) issus des données ERA5 et de l'interpolation des

observations des stations synoptiques de la DGM. L'analyse visuelle de ces cartes met en évidence la nette supériorité d'ERA5 pour restituer finement la distribution spatiale des précipitations à l'échelle du pays.

En effet, la carte issue des réanalyses fait clairement ressortir les principaux éléments du relief marocain, tels que les chaînes montagneuses du Moyen Atlas, du Haut Atlas, de l'Anti-Atlas et du Rif. Ces obstacles orographiques, par les effets de soulèvement et d'abri qu'ils induisent, sont des facteurs clés de la répartition des précipitations. ERA5, grâce à sa résolution spatiale plus fine (31 km contre des distances inter-stations souvent supérieures à 100 km), permet de résoudre ces interactions complexes entre atmosphère et topographie.

De plus, les gradients pluviométriques majeurs du pays, orientés nord-sud et ouest-est, sont fidèlement capturés par ERA5. On retrouve les maxima de précipitations dans le nord du pays (Rif, Moyen Atlas), soumis aux perturbations atlantiques, et une décroissance progressive vers le sud et l'intérieur des terres, marqués par l'aridité saharienne. Les contours des différentes zones climatiques sont ainsi restitués de manière cohérente.

A l'inverse, la carte interpolée à partir des seules stations peine à représenter ces structures spatiales fines. Le faible nombre de points de mesure et leur répartition inégale conduisent à un lissage excessif des champs, gommant les détails liés à l'orographie. Les transitions entre zones climatiques sont floues et les noyaux pluviométriques locaux induits par le relief ne sont pas résolus.

Ces résultats démontrent tout l'intérêt d'intégrer les données ERA5 dans CGMS-Maroc pour disposer d'une information pluviométrique à la fois complète et détaillée sur le plan spatial. Ils confirment la capacité des réanalyses à combler les lacunes des réseaux d'observation conventionnels, en particulier dans les régions montagneuses et les zones peu instrumentées. La prise en compte de l'ensemble des observations disponibles et leur assimilation dans un modèle physique de haute résolution spatiale confèrent à ERA5 un net avantage par rapport à une simple interpolation des données ponctuelles.

Néanmoins, malgré ces atouts indéniables, il reste souhaitable de procéder à une correction locale des biais d'ERA5 par les observations in situ (voir section II.1.7). En effet, les réanalyses, du fait de leur caractère global, peuvent présenter des écarts systématiques avec la climatologie spécifique de chaque région. Un ajustement statistique ciblé, basé sur les séries historiques des stations, permettra d'affiner encore la restitution des détails locaux et de tirer le meilleur parti des deux sources d'information.

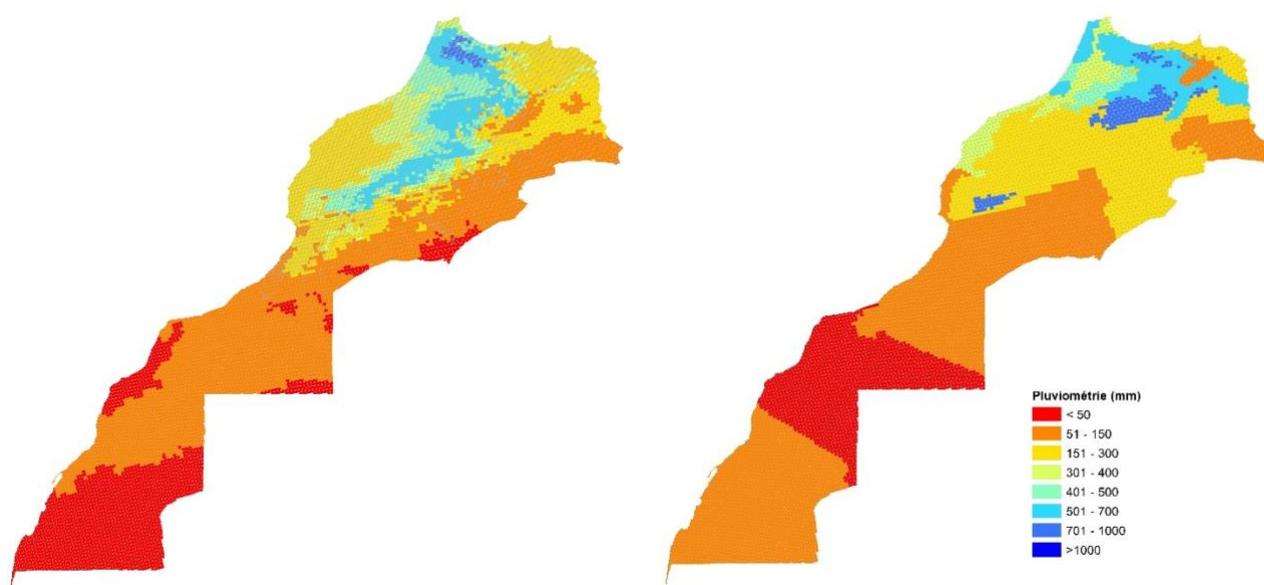


Figure 8: Précipitations totales pendant la saison agricole, du 1^{er} septembre 2018 au 31 mai 2019. Données ERA5 à gauche et données interpolées à partir des stations synoptiques à droite.

La Figure 9 propose une comparaison similaire pour les températures moyennes sur la saison agricole 2018-2019. Dans ce cas, on constate une grande cohérence entre les champs spatialisés issus d'ERA5 et de l'interpolation des stations synoptiques. Les deux cartes restituent fidèlement les gradients thermiques induits par l'altitude (refroidissement dans les zones montagneuses) et la continentalité (réchauffement vers l'intérieur des terres), ainsi que les influences océaniques sur les franges littorales. Les performances des deux approches sont ici bien plus proches que pour les précipitations.

Cette similarité s'explique par le caractère moins variable et plus facilement interpolable du champ de température. Étroitement lié à des facteurs géographiques stables (altitude, latitude, distance à la mer), il présente généralement des structures spatiales plus régulières et progressives que les précipitations, davantage influencées par des processus atmosphériques locaux et intermittents. De fait, un réseau de stations même modérément dense permet souvent une cartographie satisfaisante des températures par simple interpolation.

Ainsi, dans le cas des températures, l'apport d'ERA5 pour le suivi au sein de CGMS-Maroc est moins décisif que pour les précipitations. Les observations seules suffisent généralement à produire des champs thermiques réalistes. L'adoption des températures ERA5 sera donc surtout motivée par un souci de cohérence et d'homogénéité des intrants plutôt que par un gain substantiel en termes de résolution ou de précision spatiale.

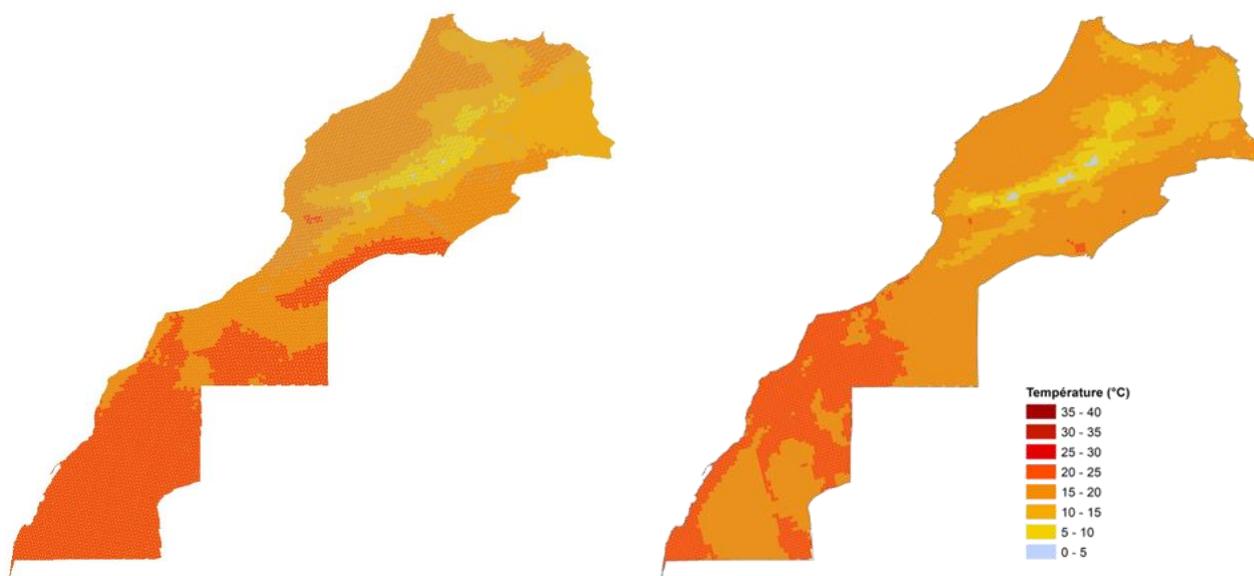


Figure 9 : Températures moyennes pendant la saison agricole, du 1^{er} septembre 2018 au 31 mai 2019. Données ERA5 à gauche et données interpolées à partir des stations synoptiques à droite.

En conclusion, cette analyse met en lumière l'apport différencié des réanalyses ERA5 en fonction des variables météorologiques. Pour les précipitations, largement tributaires des effets locaux du relief et présentant une forte variabilité spatiale, ERA5 offre une nette valeur ajoutée par rapport à la seule interpolation des observations conventionnelles. Pour les températures, au comportement spatialement plus régulier et prévisible, le gain est moindre mais l'intégration d'ERA5 garantit une cohérence d'ensemble des champs atmosphériques.

Dans tous les cas, une correction statistique locale par les séries historiques des stations reste souhaitable pour gommer les éventuels biais et adapter les réanalyses aux spécificités climatiques marocaines. C'est donc une approche hybride, combinant la couverture exhaustive et la résolution des réanalyses avec l'ancrage aux réalités de terrain des observations in situ, qui permettra in fine la caractérisation agrométéorologique la plus fine et la plus fiable pour les besoins de prévision des rendements de CGMS-Maroc.

1.5. Collecte et traitement des données d'observation météorologique

Dans le Bloc 1, procède également à la collecte et au traitement des données météorologiques quotidiennes observées, telles que la pluviométrie, les températures, la vitesse du vent, la durée d'insolation et l'humidité, issues d'un réseau de 44 stations synoptiques en surface de la DGM (Figure 10, voir liste en Annexe 1). Ces données sont disponibles depuis 1981 dans la base de données du système. Afin de garantir la fiabilité et la cohérence des informations, les données brutes sont soumises à des contrôles qualité rigoureux, conformément aux normes établies par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Ce processus vise à identifier et à éliminer toute valeur erronée ou douteuse, pouvant résulter de dysfonctionnements des capteurs ou d'erreurs de transmission. Au-delà des paramètres directement mesurés, le Bloc 1 intègre également le calcul de variables agronomiques spécifiques, telles que la tension de vapeur, le rayonnement global et l'évapotranspiration de référence.

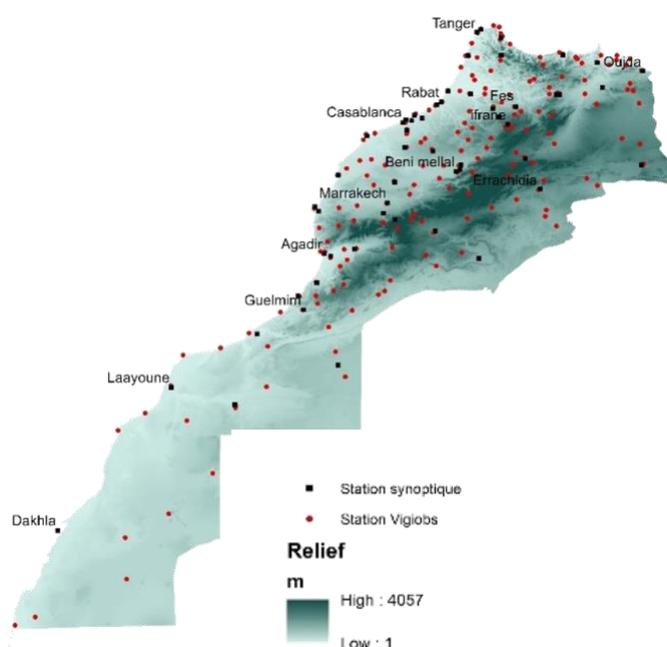


Figure 10 : Réseau des 194 stations météorologiques de la DGM (en bleu le réseau synoptique et en rouge le réseau VigiObs).

Ces données climatologiques sont ensuite insérées dans la table METDATA de la base de données du système CGMS-Maroc (Tableau 1), pour leur traitement en temps quasi-réel (Allard et al., 2014). METDATA est alimentée par une combinaison de deux messages météorologiques, envoyés par les stations météorologiques de la DGM, via son système de communication. Ces messages sont décodés pour extraire les paramètres météorologiques requis, notamment les précipitations, les températures, la durée d'insolation, la vitesse du vent à 10m, la température de point de rosée et la nébulosité (couverture nuageuse).

Tableau 1 : Table METADATA de CGMS-MAROC contenant les données météorologiques de la DGM.

Variable	Description	Unité
DAY	Date	DATE
MAXIMUM_TEMPERATURE	Température maximale quotidienne	°C
MINIMUM_TEMPERATURE	Température minimale quotidienne	°C
VAPOUR_PRESSURE	Tension de vapeur moyenne quotidienne	HPA
WINDSPEED	Vitesse moyenne quotidienne du vent à 10 m	m/s
RAINFALL	Cumul quotidien des précipitations	mm
SUNSHINE	Durée d'insolation quotidienne	H
CLOUD_DAYTIME_TOTAL	Moyenne quotidienne de la couverture nuageuse	oktas
RAD_MEA	Rayonnement global quotidien	KJ.m-2.d-1

1.5.1. Calcul de la tension de vapeur moyenne quotidienne

La tension de vapeur moyenne quotidienne (E_a) est nécessaire au calcul de l'évapotranspiration de référence par la méthode de Penman-Monteith. Elle n'est pas mesurée directement par les stations synoptiques mais est dérivée de la température de point de rosée T_{dew} quand cette dernière est disponible. Dans le cas contraire, E_a est estimée en supposant que la température minimale diffère peu de T_{dew} sur les zones côtières. Concernant les stations à l'intérieur du pays, l'approximation $T_{min} \sim T_{dew}$ n'est pas valable. De ce fait, une correction empirique par régression linéaire est réalisée entre E_a estimée et E_a observée.

1.5.2. Calcul du rayonnement global

La mesure du rayonnement global se heurte à un obstacle majeur en raison de sa rareté. Lorsque des données d'observation directes font défaut, le rayonnement global doit être estimé à partir de variables indirectes telles que la durée d'ensoleillement, la couverture nuageuse et/ou la température. Pour ce faire, l'une des trois méthodes est généralement employée : Ångström, Supit ou Hargreaves. En alternative, les données de rayonnement global peuvent être obtenues à partir du produit DSSF¹² (Down-welling Short-wave Surface Flux) pour chaque station météorologique au sein de CGMS-Maroc, exploitant les archives de la série chronologique de Meteosat Seconde Génération. Les valeurs de DSSF offrent un calibrage spécifique pour chaque station synoptique et sont utilisées pour affiner les modèles de rayonnement global intégrés dans CGMS-Maroc, tels que Ångström, Supit, et Hargreaves.

Un défi associé à l'utilisation des constantes des modèles de rayonnement (telles que les constantes d'Ångström, Supit et Hargreaves) réside dans la disponibilité limitée des estimations du rayonnement global. Pour pallier ce manque, des données de rayonnement global ont été extraites des archives des satellites Meteosat de première et seconde génération, offrant une compilation des estimations du rayonnement global depuis 1983 jusqu'à aujourd'hui. La validation de ces estimations issues des données Meteosat Seconde Génération (MSG) a confirmé leur fiabilité.

Pour faciliter l'analyse, deux scripts Python ont été développés par Alterra (De Wit et al., 2014) dans le cadre du projet E-AGRI et adoptés par la DGM pour calculer les coefficients d'Ångström et Hargreaves. Ces scripts nécessitent une table de "DONNÉES D'ÉTALONNAGE DU RAYONNEMENT" structurée comme suit :

- Wmo_no : numéro de la station météorologique

¹² Flux de surface du rayonnement solaire descendant.

- Jour : date de l'observation
- Ensoleillement : durée d'ensoleillement mesurée
- Temp_min : température minimale observée
- Temp_max : température maximale observée
- Rayonnement_global : rayonnement global mesuré.

Les résultats, consignés dans une base de données, servent à estimer le rayonnement global pour une utilisation ultérieure (voir Annexe 2).

1.5.3. Calcul de l'évapotranspiration de référence

Les données météorologiques quotidiennes reçues des stations synoptiques de la DGM ne contiennent pas l'évapotranspiration de référence (ET₀). Ce paramètre est calculé par CGMS-Maroc à l'aide de la formule de Penman (Penman, 1948). Pour E₀, ES₀ et ET₀, des valeurs d'albédo de 0,05, 0,15 et 0,20 sont respectivement utilisées. La demande en évaporation est déterminée par la pression de vapeur, la vitesse du vent et la rugosité de la surface. Pour les canopées de cultures (ET₀), une valeur de rugosité de surface de 1,0 est utilisée, tandis que pour une surface d'eau libre et pour le sol nu humide (E₀, ES₀), une valeur de 0,5 est prise.

1.5.4. Qualité de la densité du réseau de stations météorologiques

Le réseau de stations météorologiques de la Direction de la Météorologie Nationale (DGM), bien que de qualité, présente une couverture spatiale inégale sur le territoire marocain. Cela limite la fiabilité des systèmes d'alerte à la sécheresse et de prévision des rendements céréaliers qui en dépendent.

Une étude réalisée en 2017 dans le cadre du projet ACCAGRIMAG (Alaouri et al., 2017) a permis d'évaluer la qualité du réseau de stations synoptiques de la DGM à des fins de prévision des rendements céréaliers. L'étude s'est focalisée sur le paramètre de pluviométrie, qui est le plus important pour prédire les rendements des cultures pluviales au Maroc. Cette étude s'est appuyée sur une méthode de validation croisée¹³ "leave-one-out," qui consiste à retirer une station du réseau à la fois, puis à utiliser les autres stations pour estimer les précipitations totales à la station retirée, un paramètre crucial pour prédire la production céréalière au Maroc. L'étude a révélé des écarts significatifs (< -20% ou > +20%) entre les valeurs réelles et interpolées des précipitations dans près de 700 communes rurales, soulignant la nécessité d'étendre le réseau de stations, notamment dans les régions arides, montagneuses, accidentées, ainsi que dans les zones disposant d'un réseau limité, situées dans le sud et l'est du Maroc.

Bien que le réseau ait été étendu à 194 stations supplémentaires en 2014, appelée le réseau VigiObs (Figure 10), la densité moyenne d'une station pour 3550 km² reste loin des recommandations de l'OMM. Selon ces recommandations, le Maroc nécessiterait idéalement un réseau 5 fois plus dense pour une couverture optimale, soit plus de 1000 stations sur l'ensemble du territoire agricole, avec une station pour chaque 100 à 250 km² dans les zones montagneuses et une station pour chaque 600 à 900 km² dans les plaines (Tableau 2). La mise en place d'un réseau aussi vaste représenterait donc un investissement considérable et pourrait posant ainsi un défi financier.

¹³ Technique évaluant la performance d'un modèle statistique sur des données indépendantes des données d'entraînement.

Tableau 2: Nombre minimum de stations météorologiques automatiques requises dans chaque zone géographique, pour répondre au besoin d'informations météorologiques précises pour l'agriculture au Maroc (Source : Atlas de l'agriculture marocaine¹⁴, 2009).

Zone	Superficie (Km ²)	Nombre
Montagnes	112 000	560
Plaines semi-arides et humides	111 170	445
Hauts plateaux	47 620	48
Pre-Sahara et Sahara	439 210	0
TOTAL	710 850	1 052

1.6. Interpolation des données météorologiques des stations synoptiques

Pour pallier la faible densité du réseau de stations météorologiques de la DGM et obtenir des champs continus de données dans l'espace, CGMS-Maroc utilise la même méthodologie d'interpolation que pour les données ERA5 de réanalyse.

Les résultats de la procédure d'interpolation sont stockés dans la table GRID_WEATHER de la base de données de CGMS-Maroc. Actuellement, les mailles d'interpolation des variables météorologiques quotidiennes sont disponibles sur tout le territoire national depuis le 01/01/1987 jusqu'à aujourd'hui.

Bien que la méthode IDW soit simple à mettre en œuvre, elle a montré des limites dans certaines régions du Maroc, notamment les zones arides, montagneuses, et celles situées à l'est du pays (Figure 11), où le réseau synoptique est épars. Les forts gradients locaux de précipitations liés à la topographie et aux effets de site ne sont pas correctement représentés, en particulier dans les régions où la densité de stations DGM est la plus faible.

Il est important de noter que l'adoption d'autres techniques d'interpolation plus complexes, comme le krigeage, ne garantit pas nécessairement une amélioration par rapport aux résultats actuellement obtenus avec IDW, principalement en raison de la contrainte posée par la faible densité des stations. Cependant, l'émergence de diverses sources de données pluviométriques satellitaires gratuites, bien qu'elles présentent une résolution spatiale moyenne et certaines erreurs d'estimation, a ouvert de nouvelles perspectives.

Face à ces limites, CGMS-Maroc s'est récemment orienté vers l'utilisation des données de réanalyses météorologiques ERA5 corrigées par les données recueillies des stations terrestres comme on le verra dans la section suivante. Cette approche combinée a le potentiel d'améliorer significativement la cartographie des précipitations à travers le Maroc, contribuant à l'amélioration de l'estimation spatiale des précipitations, renforçant ainsi la fiabilité de CGMS-Maroc.

¹⁴ <https://www.agriculture.gov.ma/sites/default/files/ATLASsynthese.pdf>

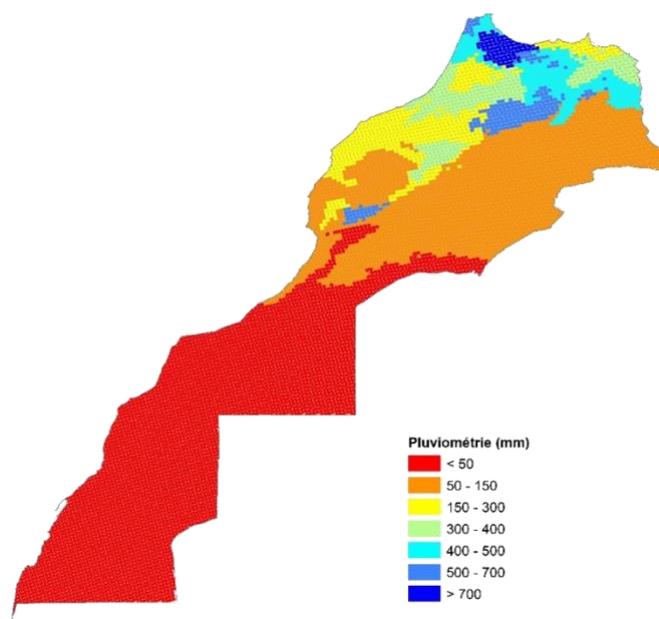


Figure 11 : Spatialisation de la pluviométrie totale de saison agricole de septembre 2019 à fin juin 2020 par CGMS-Maroc à partir des stations synoptiques de la DGM.

1.7. Correction des données de réanalyse ERA5

Dans le cadre du système CGMS-Maroc, les données de précipitations ERA5 interpolées sont corrigées de manière à réduire les écarts entre les valeurs des données ERA5 et les observations des stations synoptiques, et obtenir ainsi des estimations plus précises et fiables des précipitations à l'échelle locale.

La méthode de correction s'appuie sur l'élaboration d'un ratio spécifique, destiné à ajuster les valeurs de précipitations ERA5. Ce ratio est calculé à partir d'un champ de base de pluviométrie, lui-même issu des archives des précipitations et construit via la méthode de « forêts aléatoires ». Cette approche permet de prendre en compte les particularités climatiques locales et d'ajuster les estimations de précipitations provenant des réanalyses afin qu'elles correspondent mieux aux conditions réelles observées par les stations météorologiques.

Ce processus s'appuie sur les données climatologiques normales pour la période 1981-2010, rendues spatiales grâce aux archives de 44 stations météorologiques de la DGM et traitées par la méthode AURELHY. Cette dernière est reconnue pour son aptitude à intégrer les effets du relief sur la distribution spatiale des précipitations et à générer des cartographies de haute résolution.

Face à la diversité climatique des régions marocaines, le champ de base est également personnalisé par l'algorithme de forêts aléatoires selon la saison et la zone climatique uniforme, définies par l'indice De Martonne (Figure 12 et Annexe 4). Cette démarche permet d'obtenir des estimations de précipitations qui reflètent avec précision les conditions climatiques locales et la variabilité spatiale et temporelle à travers le pays, en accord avec les observations des stations.

Les variables prises en compte par l'algorithme de forêts aléatoires incluent :

- Les caractéristiques géographiques (longitude, latitude, altitude, distance par rapport à la mer), qui ont un impact sur la distribution des précipitations ;
- Les classifications en zones climatiques uniformes ;

- Le ratio des normales de précipitations annuelles observées par rapport à celles dérivées des données ERA5 pour la période de référence 1981-2010 ;
- Les saisons (automne, hiver, printemps, été) ;
- Les cumuls mensuels de précipitations observés en comparaison avec ceux de ERA5.

L'algorithme de forêts aléatoires est ensuite utilisé pour prédire les moyennes des précipitations mensuelles pour les zones de la grille de référence CGMS-Maroc qui ne disposent pas directement de mesures, en utilisant les données spatiales des caractéristiques géographiques et climatiques. Cette méthode génère des champs de précipitations de base couvrant les six zones climatiques homogènes identifiées au Maroc, en minimisant les écarts avec les observations des stations.

Les précipitations quotidiennes ERA5 interpolées sur chaque maille de la grille de référence CGMS-Maroc pour la période 1981-2023 sont ajustées en utilisant la moyenne mensuelle des précipitations estimée par le modèle de forêts aléatoires pour chaque maille correspondante. Cette correction permet de générer des séries de données de précipitations quotidiennes d'ERA5 ajustées, qui sont ensuite soumises à une évaluation en utilisant les observations des stations synoptiques de la DGM. L'objectif est de s'assurer que les données ERA5 corrigées se rapprochent au mieux des valeurs observées, réduisant ainsi les biais et les erreurs.

1.7.1. Création d'un champ de référence des précipitations à partir des mesures au sol

Le champ de base pour les précipitations, qui repose sur des estimations de la moyenne mensuelle des cumuls de précipitations au niveau des points de grille de référence du CGMS-Maroc, est élaboré grâce à l'algorithme de forêts aléatoires. Ce processus s'appuie sur les données climatologiques normales pour la période 1981-2010 (Figure 12), spatialisées grâce aux archives de 44 stations météorologiques de la DGM et traitées par la méthode AURELHY. Cette dernière est reconnue pour son aptitude à intégrer les effets du relief sur la distribution spatiale des précipitations et à générer des cartographies à haute résolution.

Pour tenir compte de la diversité climatique des régions marocaines, le champ de base est également personnalisé par l'algorithme de forêts aléatoires selon la saison et la zone climatique homogène, définies par l'indice de De Martonne (Figure 12 et Annexe 4). Cette approche permet d'obtenir des estimations de précipitations qui reflètent avec précision les conditions climatiques locales et la variabilité spatio-temporelle à travers le pays.

Les variables prises en compte par l'algorithme de forêts aléatoires incluent :

- Les caractéristiques géographiques (longitude, latitude, altitude, distance par rapport à la mer), qui influencent la distribution des précipitations ;
- Les classifications en zones climatiques homogènes ;
- Le ratio des normales de précipitations annuelles observées par rapport à celles dérivées des données ERA5 pour la période de référence 1981-2010 ;
- Les saisons (automne, hiver, printemps, été) ;
- Les cumuls mensuels de précipitations observées en comparaison avec celles estimées par ERA5.

Pour permettre l'application efficace de l'algorithme de forêts aléatoires, les données des stations météorologiques sont segmentées en deux ensembles : un ensemble d'entraînement (70% des données) et un ensemble de test (30% des données). L'algorithme est alors entraîné pour établir des modèles reliant les moyennes des précipitations mensuelles aux caractéristiques géographiques et climatiques pertinentes, en se focalisant sur les zones et saisons spécifiques correspondant aux données collectées.

Une fois entraîné, l'algorithme de forêts aléatoires est utilisé pour prédire les moyennes des précipitations mensuelles pour les zones de la grille de référence CGMS-Maroc ne disposant pas de mesures directes, en s'appuyant sur les données spatiales des caractéristiques géographiques et climatiques. Cette méthode permet de générer des champs de précipitations de fond couvrant les six zones climatiques homogènes identifiées au Maroc. L'analyse de l'algorithme révèle que l'altitude et le rapport entre les normales annuelles des précipitations observées et celles estimées par ERA5 sont les deux facteurs principaux, contribuant à plus de 90% à l'exactitude des prédictions mensuelles de précipitations du modèle.

Pour affiner les prédictions pour chaque zone climatique et saison, une étude approfondie des hyperparamètres du modèle de forêts aléatoires a été menée. Cette optimisation a impliqué une analyse exhaustive des combinaisons possibles d'hyperparamètres, tels que la profondeur maximale des arbres, le nombre minimal d'échantillons requis pour un nœud feuille, le nombre minimal d'échantillons nécessaire pour diviser un nœud et le nombre total d'arbres composant la forêt. Un processus de validation croisée itératif a été mis en place pour tester l'efficacité de différentes configurations d'hyperparamètres, visant à trouver un équilibre optimal entre la complexité du modèle et sa capacité de généralisation.

L'efficacité de l'algorithme de forêts aléatoires est validée en confrontant ses prévisions aux données de précipitations réelles de l'ensemble de test, à l'aide d'indicateurs statistiques clés tels que le coefficient de corrélation, le biais et l'erreur quadratique moyenne. Les résultats montrent que les prédictions de l'algorithme affichent un coefficient de corrélation remarquablement élevé, compris entre 0,8 et 0,91 lors de la validation croisée, démontrant ainsi une grande précision du modèle par rapport aux mesures réelles des pluviomètres.

Ainsi, la création d'un champ de référence des précipitations à partir des mesures au sol, basée sur l'algorithme de forêts aléatoires, permet d'obtenir des estimations fiables et spatialement détaillées des moyennes mensuelles de précipitations sur l'ensemble du territoire marocain. Cette approche tire parti de la richesse des archives climatologiques, tout en intégrant les effets du relief et les spécificités des différentes zones climatiques. La validation du modèle atteste de sa capacité à reproduire fidèlement les patterns spatiaux et temporels des précipitations, offrant ainsi une base solide pour la correction des données ERA5 dans le système CGMS-Maroc.

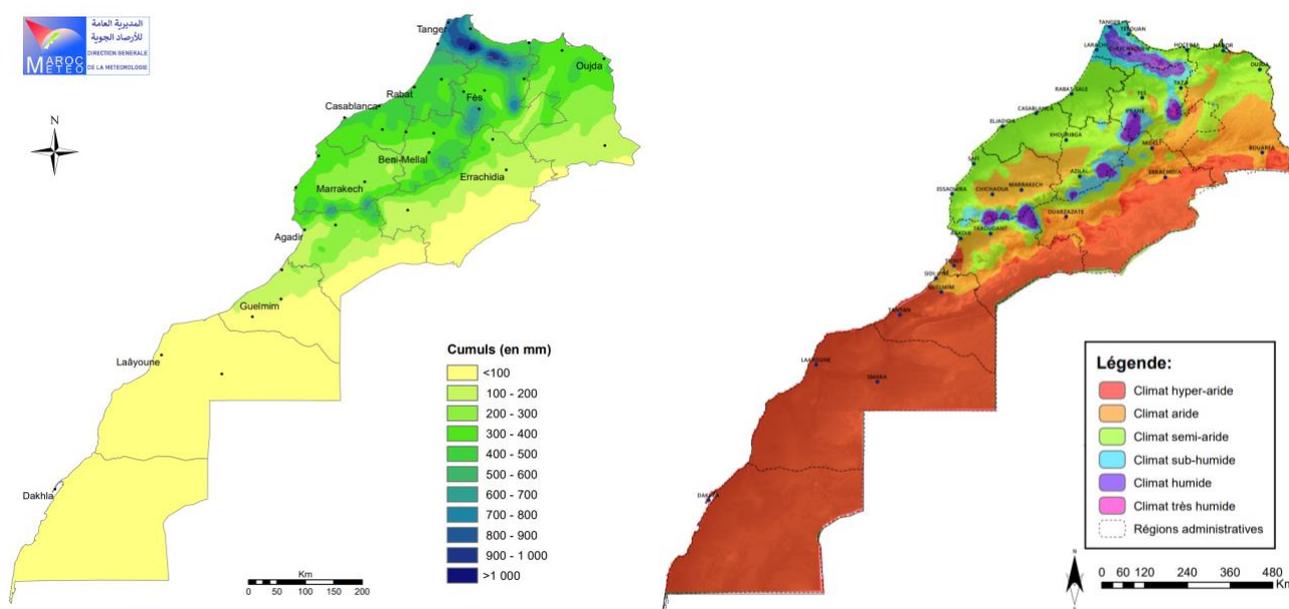


Figure 12 : Normale du cumul pluviométrique annuel au Maroc par la méthode d'AURELHY (à gauche) et zonage climatique selon l'indice de De Martonne (droite) sur la période 1981-2010 (à droite) (source : DGM).

1.7.2. Correction des grilles pluviométriques quotidiennes d'ERA5

Les précipitations quotidiennes ERA5 interpolées sur chaque cellule de la grille de référence CGMS-Maroc pour la période 1981-2023 sont ajustées en utilisant la moyenne mensuelle des précipitations estimée par le modèle de forêts aléatoires pour chaque cellule correspondante. La correction est effectuée selon la formule suivante pour chaque cellule de la grille et pour chaque jour j de la période étudiée, où i varie de 1 à 16819, représentant le nombre total de cellules de la grille :

$$P_{EraCor,j,i} = P_{Era,j,i} \times \frac{P_{RF,m,i}}{P_{Era,m,i}} \quad i = (1,2, \dots, 16819)$$

- $P_{EraCor,j,i}$ désigne la pluviométrie quotidienne d'ERA5 corrigée pour le jour j et la cellule de grille i ,
- $P_{Era,j,i}$ est la pluviométrie quotidienne d'ERA5 interpolée pour le jour j et la cellule de grille i ,
- $P_{RF,m,i}$ représente la pluviométrie mensuelle moyenne estimée par le modèle de forêt aléatoire pour le mois m et la cellule de grille i , basée sur les données d'observation et les caractéristiques géographiques et climatiques associées pour la période 1981-2022,
- $P_{Era,m,i}$ est la pluviométrie mensuelle moyenne d'ERA5 pour le mois m et la cellule de grille i sur la même période.

Cette méthode de correction a permis de générer des séries de données de précipitations quotidiennes d'ERA5 ajustées pour toute la période de 1981-2024 sur la grille de référence de CGMS-Maroc. Les données corrigées ont été soumises à une évaluation rigoureuse en utilisant les observations des stations météorologiques de la DGM pour la période 2010-2022, intentionnellement omise durant la phase de développement du modèle pour servir de phase de validation externe.

Une analyse comparative détaillée a confronté ces données ajustées aux observations des stations synoptiques de la DGM, en mettant l'accent sur la moyenne des totaux mensuels des précipitations sur cette période étendue. L'objectif était d'évaluer la précision et l'utilité opérationnelle des données ERA5 corrigées dans le cadre spécifique du système CGMS-Maroc, visant à améliorer les corrections apportées tout en examinant les améliorations potentielles par rapport aux méthodes d'interpolation existantes, qui peuvent être limitées par les déficiences des mesures pluviométriques en surface.

Pour cette évaluation, une table de correspondance a été préparée pour analyser les corrélations entre les totaux annuels de précipitations mesurés par les stations et ceux estimés pour les cellules correspondantes de la grille ERA5 et ERA5-corrigée. Les résultats ont montré une amélioration significative, avec des coefficients de corrélation pour les cumuls annuels des précipitations entre ERA5 et les mesures des stations qui ont augmenté de 0,65 à 0,93 suite à la correction, soulignant l'efficacité de cette méthode d'ajustement.

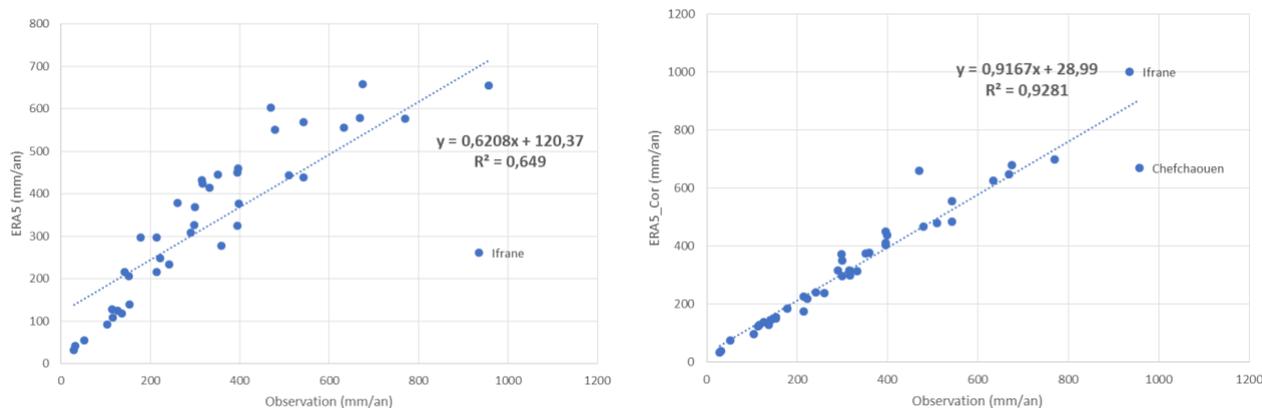


Figure 13 : Corrélation entre la moyenne de la pluviométrie totale annuelle de ERA5, ERA5 corrigée et les observations au niveau des stations météorologiques (moyenne 2010-2022).

L'efficacité de cette correction a été évaluée de manière approfondie. Les analyses couvrent des comparaisons sur des bases mensuelles (Tableau 3), saisonnières (Tableau 4) et zonales (Tableau 5), reflétant ainsi la diversité climatique du Maroc.

a. Analyse mensuelle

Les modifications apportées aux données ERA5 ont significativement renforcé la correspondance avec les observations mensuelles réelles, manifestant une réduction du biais et diminuant l'écart moyen entre les estimations ERA5 et les mesures effectives. Cette évolution marque une nette amélioration de la précision des données. Par ailleurs, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) a vu une baisse généralisée sur l'ensemble des mois, reflétant une cohérence accrue entre les données ajustées et les observations. Cette amélioration est d'autant plus remarquable durant la saison pluvieuse, où, malgré une hausse du biais et du RMSE potentiellement attribuable à une variabilité et à une intensité des précipitations qui ont augmenté, les ajustements démontrent leur efficacité.

De manière significative, les coefficients de corrélation post-correction révèlent une harmonie renforcée avec les données réelles, avec des augmentations notables allant de 0.85 à 0.90 pour le mois de janvier, illustrant une conformité améliorée avec les observations terrain. De plus, les réductions observées tant au niveau du biais qu'au niveau du RMSE confirment une précision améliorée et une congruence renforcée des données corrigées par rapport aux mesures observées.

Tableau 3 : Corrélation entre la pluviométrie totale mensuelle de ERA5, ERA5 interpolée et corrigée et les observations au niveau des stations météorologiques par mois (2010-2022).

Mois	Données ERA5			Données ERA5 corrigées		
	Coeff. Corrélation	Biais	RMSE	Coeff. Corrélation	Biais	RMSE
1	0,85	-5,49	28,54	0,90	-0,90	22,54
2	0,81	-1,93	24,46	0,86	0,87	21,48
3	0,80	-0,45	26,06	0,84	-1,32	23,63
4	0,76	1,69	20,51	0,82	-0,08	17,56
5	0,76	3,64	16,21	0,78	0,56	14,68
6	0,70	2,24	7,48	0,72	-0,36	5,97
7	0,44	1,16	4,03	0,50	0,17	3,05

8	0,51	0,86	5,46	0,56	-0,05	4,95
9	0,68	2,17	10,65	0,70	0,58	9,48
10	0,77	0,52	19,20	0,78	0,28	19,03
11	0,85	-4,84	27,72	0,88	1,13	24,97
12	0,85	-7,75	32,58	0,88	-1,71	27,27

b. Analyse saisonnière

La méthode de correction a permis des progrès remarquables sur les données ERA5 saisonnières, de façon notable durant l'hiver (décembre, janvier et février). Cette période a vu une réduction significative du biais et une élévation du coefficient de corrélation, témoignant d'une adéquation renforcée entre les prévisions corrigées et les mesures réelles. Les améliorations s'étendent à toutes les saisons, se manifestant par des hausses dans les coefficients de corrélation et des diminutions dans le biais et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Ces ajustements ont permis de mieux aligner les données ERA5 corrigées avec les observations concrètes, rendant ainsi les estimations saisonnières plus fidèles à la réalité observée.

Tableau 4 : Corrélations entre la pluviométrie totale mensuelle de ERA5, ERA5 interpolée et corrigée et les observations au niveau des stations météorologiques par saison (2010-2022).

Saison	Données ERA5			Données ERA5 corrigées		
	Coeff. Corrélation	Biais	RMSE	Coeff. Corrélation	Biais	RMSE
SON	0,84	-0,60	20,18	0,86	0,65	18,75
DJF	0,84	-5,02	28,68	0,88	-0,56	23,88
MAM	0,78	1,67	21,20	0,83	-0,26	18,88
JJA	0,63	1,43	5,90	0,66	-0,09	4,87

c. Analyse zonale

L'examen des corrections appliquées selon les différentes zones climatiques met en lumière un progrès notable dans l'exactitude des estimations pluviométriques. C'est particulièrement vrai dans la zone humide, où le biais a été significativement atténué. Cette progression est observée uniformément à travers toutes les zones, y compris dans les régions arides et semi-arides, traditionnellement difficiles à quantifier en raison de leur précipitation sporadique et souvent limitée. Les ajustements ont conduit à une amélioration universelle, caractérisée par une hausse significative des coefficients de corrélation ainsi qu'une diminution marquée du biais et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), illustrant l'efficacité de ces corrections pour affiner les prévisions de pluie et les aligner avec les spécificités climatiques propres au Maroc.

Tableau 5 : Corrélations entre la pluviométrie totale mensuelle de ERA5, ERA5 interpolée et corrigée et les observations au niveau des stations météorologiques par zone climatique (2010-2022).

Zone	Données ERA5			Données ERA5 corrigées		
	Coeff. Corrélation	Biais	RMSE	Coeff. Corrélation	Biais	RMSE
Zone humide	0,66	-23,94	64,05	0,74	-4,85	51,20
Zone subhumide	0,91	-3,77	23,42	0,91	-1,15	21,68
Zone semi-aride	0,88	1,30	15,80	0,89	0,88	14,97
Zone aride	0,86	2,21	10,33	0,87	-0,21	9,53
Zone hyper aride	0,76	-0,09	5,95	0,74	0,21	6,61

L'ensemble de ces évaluations atteste de l'amélioration majeure apportée à la fiabilité des données ERA5 ajustées, validant ainsi leur applicabilité et leur pertinence face à la variété climatique du Maroc.

Les graphiques présentés dans la Figure 14 démontrent l'effet significatif de la correction apportée aux données ERA5, révélant des améliorations notables à travers toutes les localités examinées. Dans ces graphiques, ERA5 corrigé (ERA_COR) s'aligne de façon impressionnante avec les observations réelles (OBS), soulignant une amélioration considérable de la précision, en particulier pendant les périodes de précipitations maximales. Les ajustements permettent aux données corrigées de refléter avec précision la variabilité intra-annuelle, reproduisant les cycles de précipitations caractéristiques des divers climats marocains avec une grande fidélité. Cette concordance améliorée avec les observations réelles illustre l'efficacité des corrections entreprises, renforçant la fiabilité des données ERA5 pour les études climatiques et hydrologiques dans le contexte marocain.

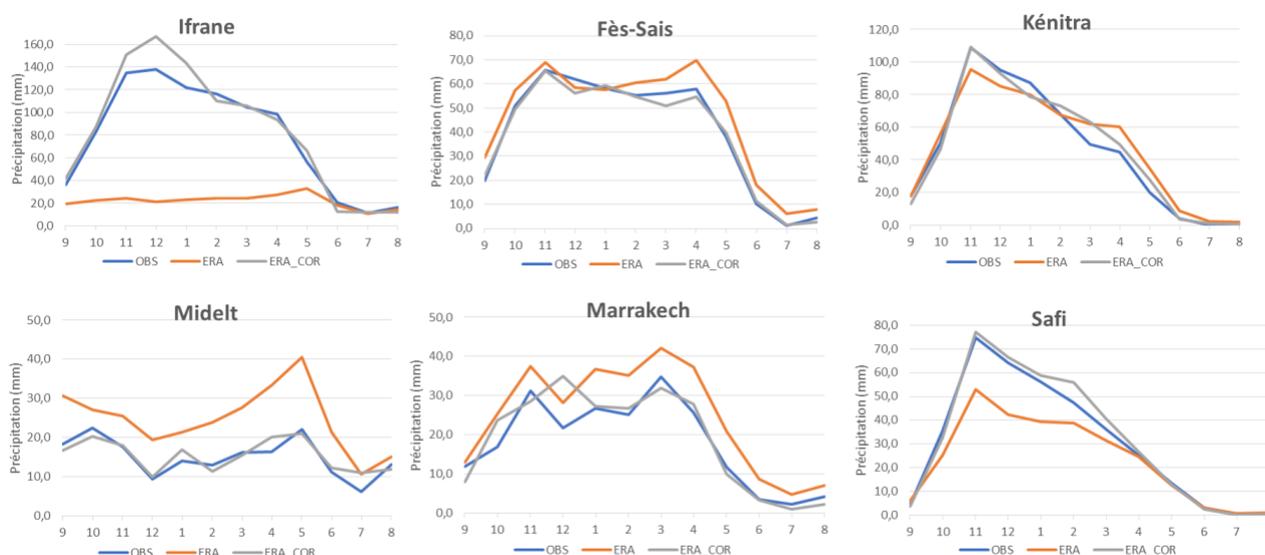


Figure 14 : Cycle saisonnier de la pluviométrie totale mensuelle selon les observations des stations météorologiques, les données ERA5 interpolées, les données ERA5 interpolées et corrigées.

d. Analyse spatiale des précipitations au Maroc : Des observations interpolées aux données ERA5 corrigées

L'analyse spatiale des précipitations au Maroc, en comparant les observations interpolées et les données ERA5 corrigées, met en évidence une amélioration significative dans la précision de la cartographie pluviométrique au Maroc, comme on peut le voir sur les exemples de pluviométrie annuelle (Figure 15) et journalière (Figure 16). Les disparités observées dans la représentation spatiale des précipitations soulignent l'importance d'une approche sophistiquée pour refléter la complexité des climats marocains.

La première carte, basée sur les précipitations interpolées à partir d'un réseau de stations limité, peine à représenter la diversité des zones climatiques du Maroc. Cette approche mathématique révèle ses limites, particulièrement dans les zones éloignées des stations de mesure, où elle échoue à représenter les nuances topographiques et climatiques locales, menant à une image imparfaite de la distribution des précipitations.

En comparaison, les données ERA5 marquent une nette amélioration en dessinant les frontières des différentes zones agroécologiques du pays. Toutefois, cette estimation a tendance à minimiser les précipitations, reflétant potentiellement une intégration insuffisante des données locales spécifiques dans le modèle global de réanalyse.

Le saut qualitatif est manifeste avec les données ERA5 corrigées, qui affinent considérablement la représentation des précipitations, s'alignant plus fidèlement sur les conditions climatiques réelles et les spécificités géographiques du Maroc. Cela indique que les techniques de correction employées ont efficacement incorporé les variables locales, offrant ainsi une estimation pluviométrique qui respecte les gradients climatiques et topographiques complexes du pays.

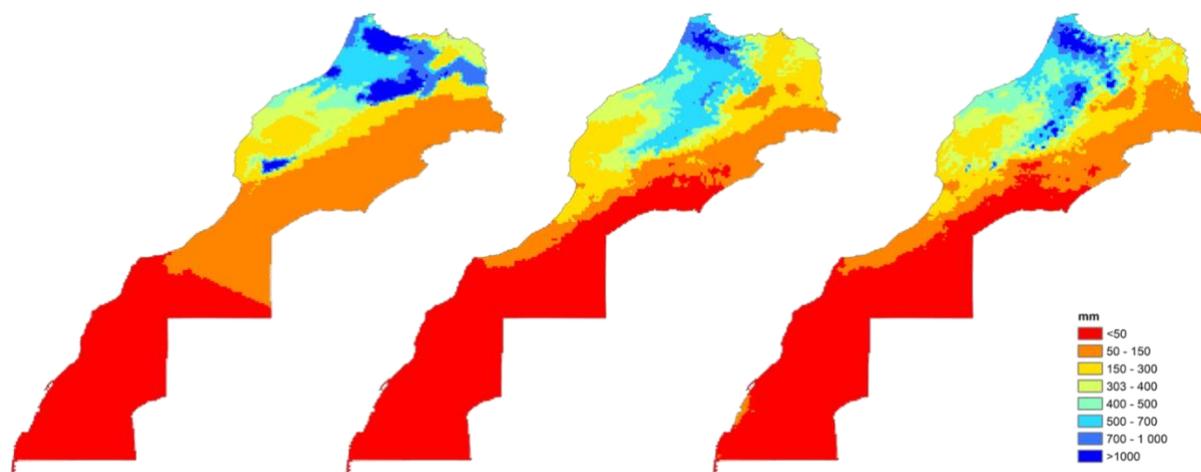


Figure 15 : Cartographie des précipitations à l'aide des données interpolées à partir des stations synoptiques de la DGM (à gauche), ERA5 (au centre) et ERA5 corrigées (à droite). Exemple de pluviométrie totale du 1^{er} septembre 2017 au 31 mai 2018.

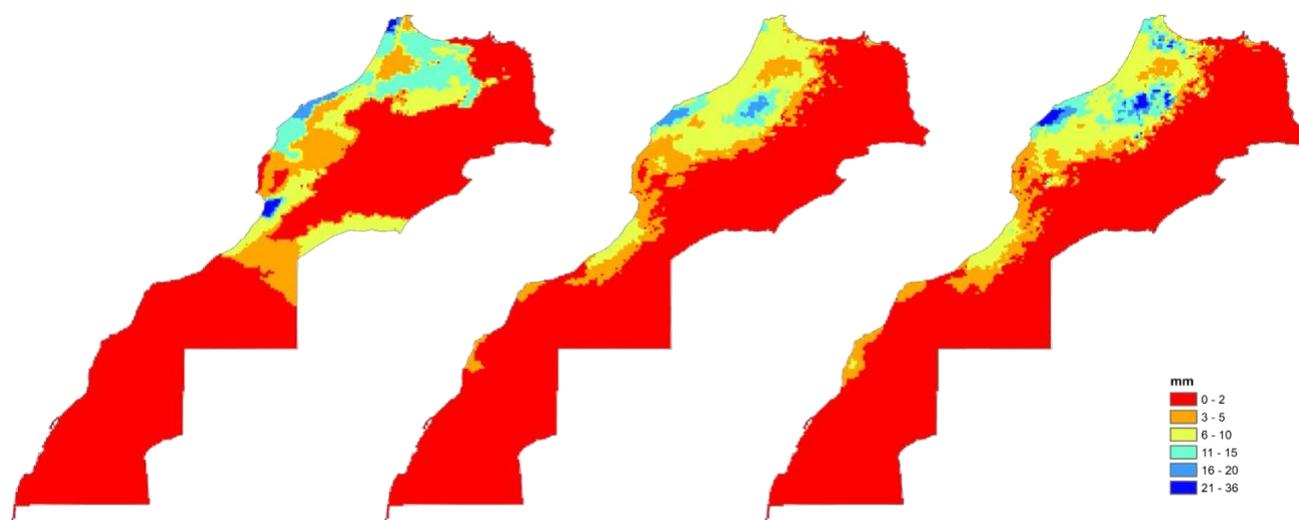


Figure 16 : Cartographie des précipitations à l'aide des données interpolées à partir des stations synoptiques de la DGM (à gauche), ERA5 (au centre) et ERA5 corrigées (à droite). Exemple du cumul pluviométrique journalier du 1^{er} décembre 2023.

Cette précision améliorée dans la cartographie des précipitations, surtout à l'échelle journalière, est cruciale pour comprendre la dynamique météorologique et ses implications directes sur l'agriculture. Les ajustements apportés aux données ERA5 dans les cartographies produites,

permettant une représentation quotidienne des précipitations qui se rapproche au plus près de la réalité.

L'intégration de ces données corrigées dans le système CGMS-Maroc se révèle être un atout précieux, garantissant une visualisation plus exacte et fiable des précipitations. Cette avancée est particulièrement avantageuse dans les régions initialement confrontées à des erreurs significatives, ouvrant des perspectives optimistes pour le suivi des campagnes agricoles, la prévision des rendements et la planification agricole adaptative. L'analyse minutieuse par mois, par zone climatique et par saison met en exergue le rôle crucial de la correction des données ERA5 pour une météorologie appliquée précise, armant les agriculteurs d'informations fiables pour optimiser la gestion des cultures, anticiper les impacts pluviométriques, et maximiser la productivité et la durabilité des systèmes agricoles.

2. Fonctionnement du Bloc 2 de CGMS-Maroc

Le Bloc 2 de CGMS-Maroc constitue le cœur du système, où convergent les données multi-sources collectées et traitées par le Bloc 1, pour produire des informations à haute valeur ajoutée sur l'état des cultures céréalières et prévoir leurs rendements. Situé sur un serveur public, ce bloc assure des fonctions clés allant de l'intégration des données météorologiques et satellitaires à la modélisation prédictive, en passant par l'élaboration du masque des parcelles cultivées.

Un premier enjeu du Bloc 2 est de collecter et d'harmoniser les données de télédétection pertinentes pour le suivi de la croissance des céréales. Deux types d'indices sont particulièrement exploités : les indices de végétation (NDVI, LAI), qui renseignent sur la vigueur et le développement des couverts végétaux, et l'indice d'humidité des sols (SWI), qui capture l'état hydrique des parcelles. Ces données satellitaires, par nature spatialisées mais à des résolutions variables, sont projetées sur la grille de référence de CGMS-Maroc pour être combinées de façon cohérente avec les autres sources d'information.

Un deuxième aspect critique est l'élaboration d'un masque des cultures céréalières réalisé par classification d'images satellitaires à haute résolution. Ce masque permet de filtrer spatialement les données météorologiques et d'indices de végétation pour ne conserver que l'information pertinente sur les zones de cultures. Il est essentiel pour éviter les confusions avec d'autres types d'occupation du sol et pour affiner le diagnostic sur l'état réel des parcelles de blé et d'orge.

Le Bloc 2 intègre également les statistiques agricoles issues des enquêtes de terrain réalisées par la DSS. Ces enquêtes offrent des observations de référence sur les rendements céréalières aux échelles provinciales. Ces données sont essentielles pour calibrer et valider les modèles de prévision développés dans CGMS-Maroc.

Trois approches complémentaires sont développées pour anticiper les rendements céréalières : l'analyse de similarité, qui identifie dans le passé des années aux profils climatiques proches de la campagne en cours ; les régressions linéaires multiples, qui estiment statistiquement les rendements à partir d'indices agro-climatiques ; et les algorithmes d'intelligence artificielle, en particulier les forêts aléatoires, qui repèrent des motifs complexes et non linéaires dans les données. Cette combinaison de méthodes permet de générer des prévisions robustes, en explorant les relations entre climat et rendement sous différents angles.

Enfin, le Bloc 2 inclut une interface utilisateurs riche et conviviale pour visualiser les résultats des analyses sur des supports cartographiques interactifs. Cet outil de datavisualisation permet une exploration intuitive des indicateurs de suivi et des prévisions de rendement à différentes échelles spatiales et temporelles. Il facilite l'appropriation des informations produites par CGMS-Maroc par les décideurs et les acteurs de terrain.

Cette section II.2 propose une immersion dans les processus et les méthodes qui fondent la puissance d'analyse du Bloc 2 de CGMS-Maroc. Chaque étape de la chaîne de traitement sera détaillée, depuis l'intégration des données satellitaires jusqu'à la prévision des rendements en passant par l'élaboration des masques des cultures. Un accent particulier sera mis sur les

approches de modélisation mobilisées et sur les atouts de l'interface de visualisation. Ce faisant, nous mettrons en lumière comment le Bloc 2 transforme le flux de données du Bloc 1 en informations directement actionnables pour la gestion des risques agricoles et l'anticipation des niveaux de production céréalière au Maroc.

2.1. Collecte des données satellitaires : indices de végétation et d'humidité des sols

CGMS-Maroc recueille les indices de végétation NDVI et le LAI et l'Indice d'Humidité des Sols (Soil Water Index) à partir de la plateforme Copernicus¹⁵.

2.1.1. Les indices de végétation

Les indices de végétation utilisés dans CGMS-Maroc sont le NDVI et le LAI, collectés à partir du Service de surveillance des terres de Copernicus (Figure 17, Figure 17). Ces indices de végétation sont largement utilisés à l'échelle mondiale et au Maroc pour surveiller la dynamique de la végétation et prévoir les rendements des cultures. Dans la littérature, on trouve des dizaines d'indices de végétation différents, mais seul un très petit nombre est utilisé en pratique. Ils se présentent sous la forme d'expressions très basiques (différence simple ou ratio simple) ou de formules beaucoup plus complexes. Ils sont classés en familles d'indices en fonction de la prise en compte ou non de facteurs externes à la couverture végétale, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau de la végétation, etc.

a. L'indice de végétation par différence normalisé

Le NDVI est l'un des indices de végétation les plus couramment utilisés dans le monde. Il est calculé en utilisant les réflectances dans les bandes rouges et proches infrarouges du spectre électromagnétique selon la formule suivante, où NIR est la réflectance dans la bande proche infrarouge et Red est la réflectance dans la bande rouge :

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Les valeurs du NDVI varient entre -1 et +1. Une valeur élevée de NDVI (proche de +1) indique une forte densité de végétation, tandis qu'une valeur faible (proche de -1) indique une faible densité de végétation ou une absence de végétation.

¹⁵ <https://www.copernicus.eu/>

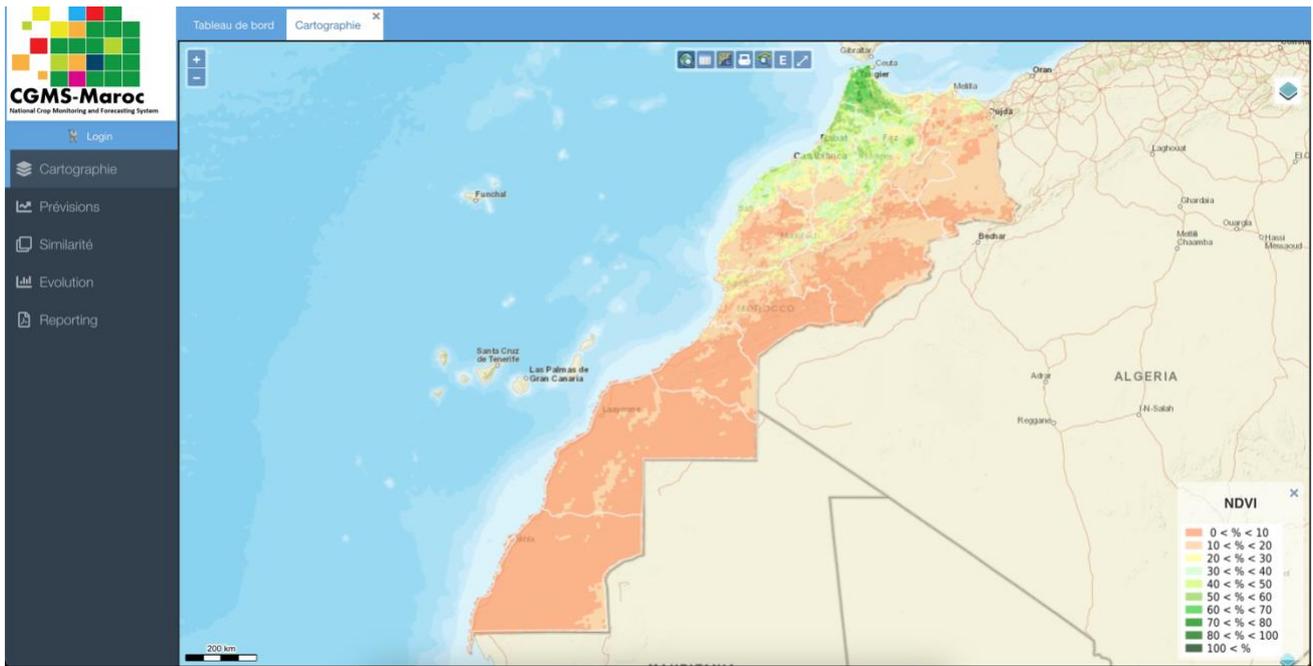


Figure 17 : Cartographie du NDVI moyen de janvier à mars 2024 à l'échelle de la grille de référence.

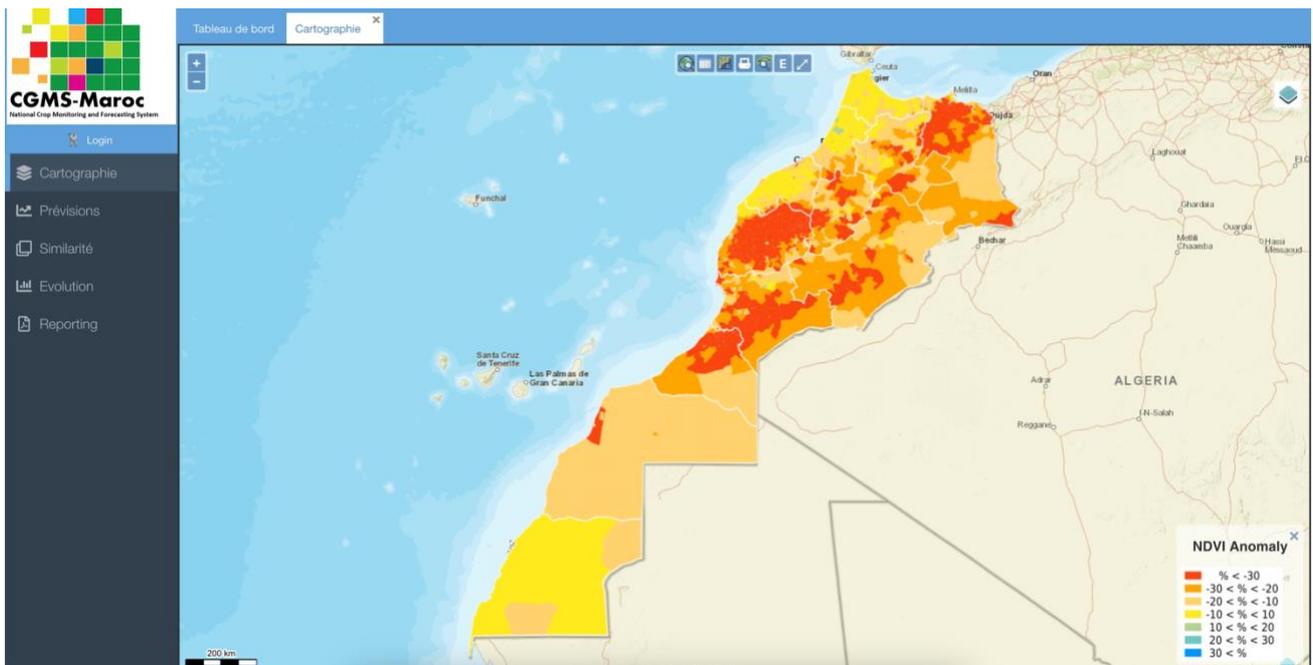


Figure 18 : Cartographie de l'écart de NDVI par rapport à la moyenne à long terme, pour la période du 1^{er} janvier au 31 mars 2023 à l'échelle communale.

b. L'Indice de Surface Foliaire

L'Indice de Surface Foliaire (LAI) représente une variable environnementale cruciale régissant les échanges de flux d'énergie, de masse et de quantité de mouvement entre la surface terrestre et l'atmosphère. Il joue un rôle déterminant dans l'interception de l'énergie solaire pour la photosynthèse, tout en définissant la surface disponible pour les échanges de gaz et d'eau entre la plante et l'atmosphère. Le LAI, exprimé comme la superficie totale des feuilles de la canopée par unité de surface au sol, varie de 0 (sol nu) à plus de 10 (forêt dense). Cet indice revêt une

importance majeure dans divers modèles, tels que ceux dédiés à la productivité des écosystèmes, aux modèles climatiques mondiaux, à l'hydrologie, à l'écologie, et bien d'autres.

En télédétection spatiale, le LAI est défini comme la moitié de la surface totale des feuilles de la canopée par unité de surface au sol, principalement dans le contexte de l'interception de la lumière. La surface foliaire projetée représente souvent le critère central pour l'interception du rayonnement, étant influencée par la distribution des angles des feuilles.

2.1.2. L'indice d'humidité du sol

L'indice d'humidité du sol (Soil Water Index, SWI) est un produit novateur fourni par le programme Copernicus, qui joue un rôle essentiel dans la surveillance et l'évaluation des conditions d'humidité du sol à l'échelle mondiale. Cet indice trouve des applications cruciales dans divers domaines, allant de l'agriculture à la gestion des ressources en eau, en passant par l'étude de la résilience des écosystèmes face au changement climatique.

Le SWI se distingue par sa capacité à fournir des informations précises et actualisées sur le contenu en eau de la couche superficielle du sol, jusqu'à une profondeur de 5 cm. Pour générer cet indice, des données provenant de plusieurs capteurs micro-ondes, tels que Sentinel-1 et ASCAT, sont combinées et analysées afin d'estimer le pourcentage volumétrique d'eau dans le sol. Le SWI est exprimé en pourcentage, avec des valeurs comprises entre 0% (sol complètement sec) et 100% (sol saturé en eau).

Au Maroc, le SWI est disponible à une résolution spatiale d'environ 12,5 km, ce qui permet une analyse fine des conditions d'humidité du sol à l'échelle régionale. Cette résolution, bien que plus grossière que celle disponible en Europe (1 km), reste suffisamment détaillée pour fournir des informations pertinentes à l'échelle de nombreuses communes rurales marocaines, dont la superficie moyenne avoisine les 141 km².

L'un des atouts majeurs du SWI réside dans sa haute fréquence temporelle. Grâce à une disponibilité quotidienne, cet indice offre un suivi en quasi temps réel de l'évolution de l'humidité du sol. Cette caractéristique est particulièrement précieuse pour détecter rapidement les épisodes de sécheresse ou les impacts des événements pluvieux, permettant ainsi une réactivité accrue dans la gestion des cultures et des ressources en eau.

Sur le plan technique, l'algorithme à la base du SWI s'appuie sur un modèle d'infiltration à deux couches, qui décrit la relation dynamique entre le profil d'humidité du sol en surface et son évolution verticale au fil du temps. Ce modèle repose sur l'hypothèse que la teneur en eau de la couche profonde est influencée par les conditions d'humidité de la couche superficielle, elles-mêmes dépendantes de l'historique des précipitations.

La formule de calcul de SWI est la suivante :

$$SWI(t_n) = \frac{\sum_i^n SSM(t_i) e^{-\frac{t_n-t_i}{T}}}{\sum_i^n e^{-\frac{t_n-t_i}{T}}} \quad \text{for } t_i \leq t_n$$

Dans cette formule, où $t_i \leq t_n$, t_n étant le moment de l'observation de la mesure actuelle, et t_i représentant le moment de l'observation des mesures précédentes (les deux étant donnés en jours julien), on suppose que la teneur en eau de la couche plus profonde est contrôlée par les conditions d'humidité dans la couche de surface et donc par l'historique des précipitations. Le paramètre T , appelé la longueur de temps caractéristique, représente l'échelle de temps des variations de l'humidité du sol en unités de temps $T = L/C$, où L est la profondeur de la couche de réservoir et C est une constante pseudo-diffusive représentative pour la région.

En d'autres termes, ce paramètre T indique à quelle vitesse l'humidité du sol change en réponse aux précipitations passées. Plus T est petit, plus le sol réagit rapidement aux précipitations récentes, tandis que plus T est grand, plus le sol conserve la mémoire des précipitations passées sur une période plus longue.

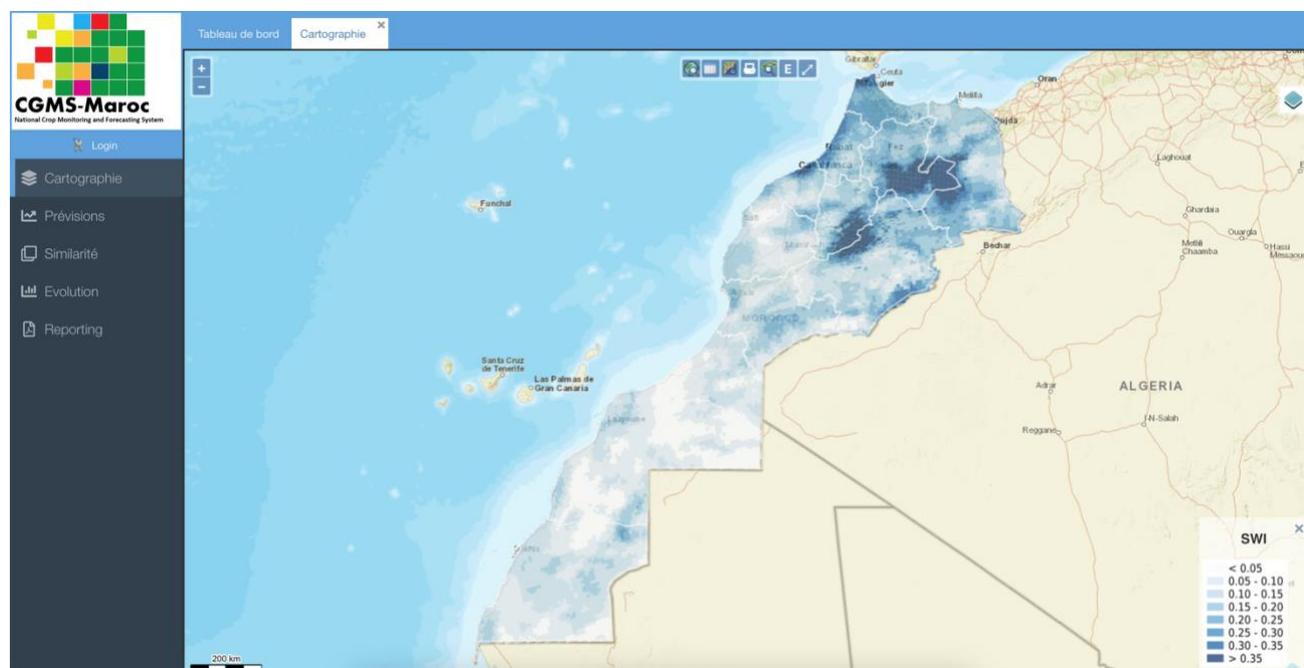


Figure 19 : Indice moyen d'humidité des sols sur la période du 1^{er} septembre 2023 au 1^{er} mars 2024.

2.2. Harmonisation des données satellitaires sur la grille de référence de CGMS-Maroc

Les données satellitaires, telles que les indices de végétation (NDVI), l'indice foliaire (LAI) et l'indice d'humidité du sol (SWI), sont des sources d'information précieuses pour le suivi de l'état des cultures et des conditions agrométéorologiques dans le système CGMS-Maroc. Cependant, pour tirer pleinement parti de ces données, il est essentiel de les intégrer de manière cohérente avec les autres sources d'information du système, notamment les données météorologiques interpolées. C'est là qu'intervient le processus d'harmonisation des données satellitaires sur la grille de référence de CGMS-Maroc.

La grille de référence de CGMS-Maroc, composée de mailles régulières de 4,5 km dans les zones agricoles et de 9 km ailleurs, sert de cadre spatial commun pour l'intégration des différentes sources de données. Pour adapter les images satellitaires à cette grille, CGMS-Maroc utilise une approche similaire à la fonction "Zonal Statistics" d'ArcGIS, un outil couramment utilisé en géomatique pour extraire des statistiques récapitulatives à partir de données raster en utilisant une couche vectorielle de zones.

Le processus d'harmonisation des données satellitaires se déroule en plusieurs étapes clés. Tout d'abord, pour chaque maille de la grille de référence, le système identifie les pixels des images satellitaires qui la recouvrent, totalement ou partiellement. Ensuite, il calcule la valeur moyenne des pixels concernés, en tenant compte de leur surface de recouvrement. Ainsi, un pixel entièrement inclus dans une maille aura un poids plus important dans le calcul de la moyenne qu'un pixel qui ne recouvre que partiellement la maille.

Cette approche permet de gérer efficacement les différences de résolution spatiale entre les images satellitaires et la grille de référence. Elle garantit que la valeur attribuée à chaque maille reflète fidèlement les informations contenues dans les pixels qui la recouvrent, même si ceux-ci ne correspondent pas parfaitement aux limites de la maille.

L'harmonisation des données satellitaires est particulièrement importante pour les produits à basse résolution, comme l'indice d'humidité du sol (SWI), dont les pixels sont plus grands (12,5 km) que les mailles de la grille. Dans ce cas, la prise en compte de la surface de recouvrement de chaque pixel est essentielle pour obtenir une valeur représentative à l'échelle de la maille.

Une fois le processus d'harmonisation terminé, chaque maille de la grille de référence se voit attribuer une valeur pour chaque indice satellitaire (NDVI, LAI, SWI). Ces valeurs, désormais intégrées à la grille, peuvent être utilisées en conjonction avec les autres données du système, comme les données météorologiques interpolées ou les données de réanalyse ERA5, pour suivre l'état de la végétation et des conditions de croissance des cultures.

2.3. Élaboration du masque des cultures céréalières

Le masque céréaliier revêt une importance capitale pour le filtrage spatio-temporel des données météorologiques et des indices de végétation. En se limitant aux zones de culture, il permet de ne conserver que les informations météorologiques et satellitaires pertinentes pour la céréaliculture. Cette approche permet de réduire considérablement les perturbations spectrales provenant d'autres types d'utilisation des terres, tels que la végétation naturelle, les plans d'eau ou les infrastructures. En conséquence, les corrélations statistiques entre les données satellitaires d'indices de végétation, d'humidité et météorologiques, et les rendements agricoles sont considérablement améliorées.

La Figure 20 présente le masque des zones agricoles pluviales (dites zones « bour ») élaboré pour CGMS-Maroc dans le but d'optimiser les prévisions des rendements céréaliers. La délimitation spatiale des terres agricoles pluviales a été réalisée en combinant deux sources d'information :

- La catégorisation des terres agricoles en 10 classes d'utilisation distinctes, comprenant des villages, des étendues d'eau, des forêts, de grandes villes, des zones non cultivées, des pâturages, de petites villes, des plantations fruitières, des terres irriguées et des terres pluviales. Ce processus a été mis en œuvre à l'aide d'images SPOT 5 VHR à une résolution spatiale de 2,5 mètres.
- Une carte des terres agricoles, appelée "GICropV2", créée spécifiquement par l'Institut flamand de recherche technologique (VITO) dans le cadre du projet E-AGRI². Cette carte présente une résolution spatiale de 1 km.

Cette démarche repose sur l'hypothèse que les zones agricoles reflètent de manière assez fidèle les zones où les céréales sont cultivées, étant donné que les céréales occupent la grande majorité des terres agricoles pluviales. En effet, la superficie agricole utile au Maroc se limite à 8,7 millions d'hectares, sur une superficie totale de 710 850 km², dont 81% est cultivée en mode pluvial. La superficie des terres agricoles est principalement couverte par les céréales (59%) et les plantations fruitières (16%), dont principalement l'olivier (1,073 million d'hectares en 2019) (Figure 21). En revanche, les légumineuses alimentaires n'occupent que 3 % des terres agricoles, tandis que les terres en jachère ne représentent que 12 % des superficies, ce qui indique un système de culture principalement basé sur la rotation des cultures céréalières.

Notant que la catégorisation de la DSS ne couvrait pas entièrement l'ensemble des terres agricoles nationales, la carte GICropV2, bien que moins précise, a été utilisée pour compléter l'information disponible. La carte des cultures pluviales, résulte ainsi de la fusion de ces deux sources d'information.

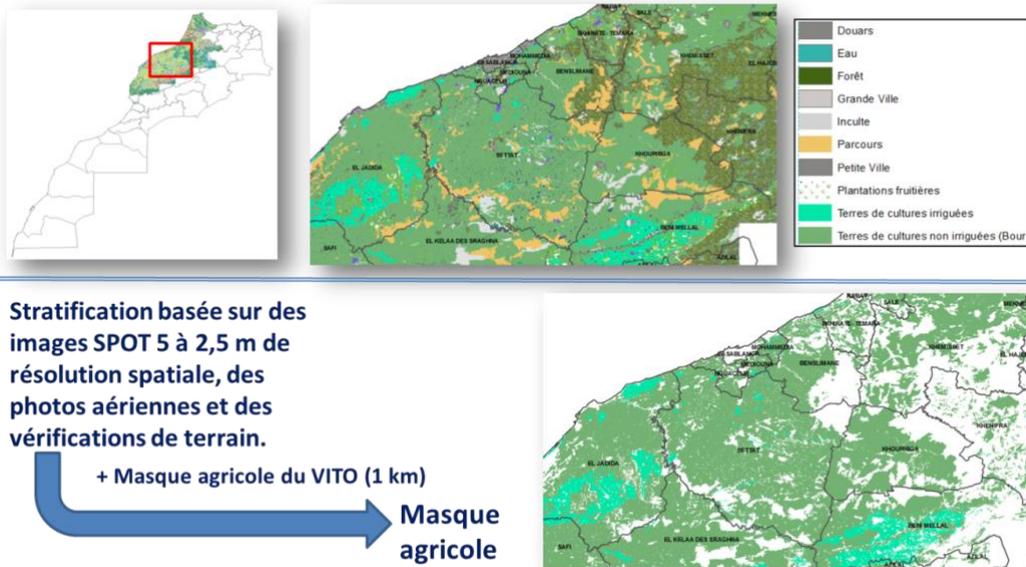


Figure 20 : Masque agricole du Maroc (Balaghi et al., 2017).

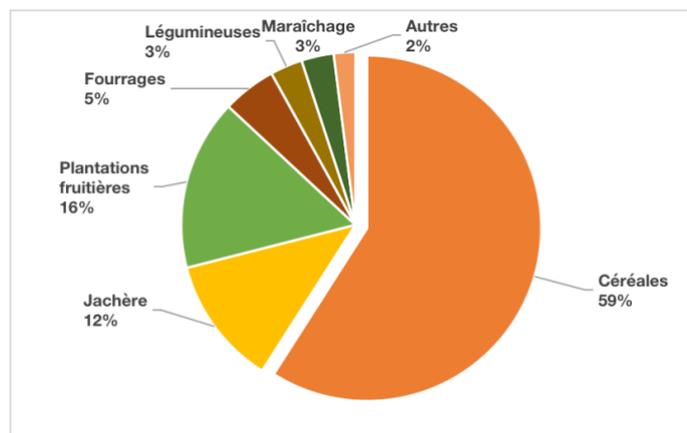


Figure 21: Occupation de la superficie agricole (MAPMDREF, 2018).

2.4. Données statistiques agricoles : les enquêtes de terrain

Le système CGMS-Maroc réalise actuellement les prévisions de rendements céréaliers à l'échelle des provinces à partir des statistiques disponibles à cette échelle spatiale. Les données de statistiques agricoles sont collectées selon un plan d'échantillonnage scientifiquement robuste. En règle générale, un plan d'échantillonnage demeure valide pendant une durée de 10 à 15 ans, sauf en cas de changements significatifs dans la structure du paysage agricole. Ils doivent être optimisés, en tenant compte des coûts de mise en œuvre et de la précision souhaitée. La précision accrue engendre des coûts plus élevés, tandis qu'une précision moindre est plus abordable. L'expertise implique de créer un plan d'échantillonnage où le coût par unité d'échantillonnage est le plus bas possible, et la précision, la plus haute.

Au Maroc, comme dans de nombreux pays à travers le monde - des États-Unis à l'Europe en passant par l'Asie - les statistiques agricoles, incluant les superficies et les productions, sont généralement produites selon un plan d'échantillonnage aréolaire stratifié. L'échantillonnage aréolaire stratifié se distingue comme une méthode d'échantillonnage probabiliste où la population cible, ici la production agricole, est divisée en sous-groupes non chevauchants, ou

strates (exemple : strate en culture non irriguées, strate arboricole, strate forêts, etc.) (Figure 22). Les strates sont souvent définies via l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale, et l'échantillonnage est ensuite effectué au sein de chaque strate, assurant ainsi que l'échantillon reflète adéquatement les divers sous-groupes de la population.

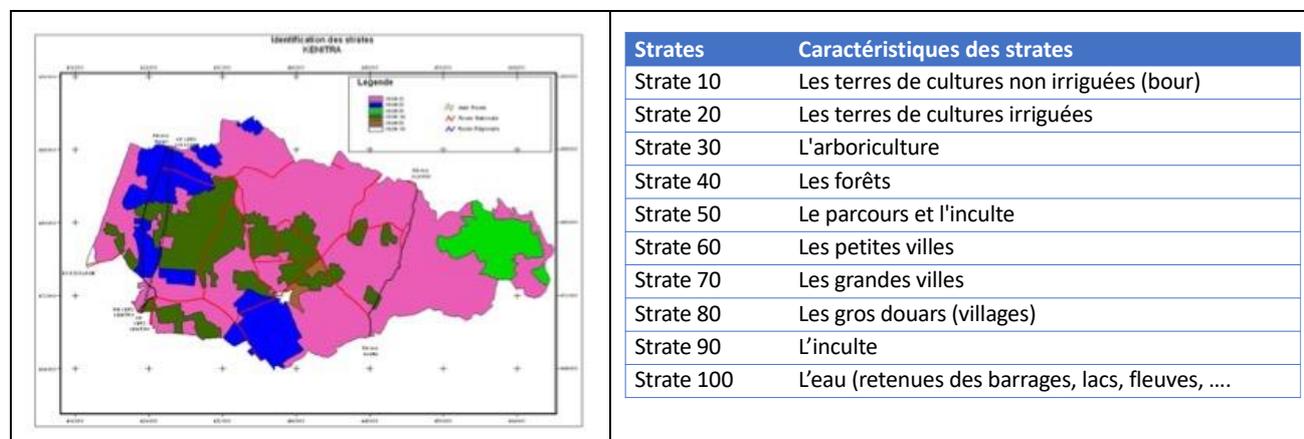


Figure 22 : Exemple de stratification utilisée au Maroc (Source² : DSS).

La Direction de la Stratégie et des Statistiques (DSS) du ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts a la charge de cette tâche depuis 1975. Elle est non seulement responsable de la production des statistiques agricoles mais supervise également la conception et la réalisation des enquêtes, la gestion des équipes régionales, ainsi que l'analyse et la publication des résultats. Les services statistiques provinciaux, quant à eux, sont responsables du remplissage des questionnaires relatifs à leurs échantillons de zones, et du contrôle ainsi que de la saisie des données collectées.

L'information gérée et mise à disposition par la DSS est vaste. Elle englobe la production des principales cultures, le profil démographique du cheptel (âge, sexe et race), le commerce extérieur, et également les prix de production des principales céréales et légumineuses, et des olives. Elle inclut également les prix de gros des principaux fruits et légumes.

Pour les céréales en particulier, la DSS fournit des données relatives aux superficies et aux rendements du blé tendre, du blé dur, et de l'orge, abordant ainsi 40 provinces du pays et remontant jusqu'à 1978. La production provinciale est calculée en multipliant le rendement par la superficie cultivée, tous deux estimés par échantillonnage.

Le processus d'échantillonnage aréolaire opéré par la DSS se fait sur 3.000 Unités Secondaires de Sondage (USS), également appelées segments, juste avant la moisson, précisément entre le 10 février et le 30 mars de chaque campagne agricole, qui elle-même débute soit en septembre, soit en octobre, dépendant de l'arrivée des premières pluies. La méthode a évolué depuis 2008, intégrant des techniques modernes de télédétection par satellite et de Système d'Information Géographique (SIG), améliorant de ce fait la précision des estimations.

Les strates homogènes sont ensuite fractionnées en unités d'échantillonnage, normalement en deux phases. D'abord, les Unités Primaires d'Échantillonnage (PSU) sont délimitées. Ensuite, un petit échantillon de PSU est sélectionné, qui est par la suite subdivisé en Unités Secondaires d'Échantillonnage (SSU). La taille des PSU et des SSU est flexible, dépendant de la précision souhaitée et des moyens d'enquête disponibles. Dans le cas des grandes cultures pluviales (dites en « Bour ») au Maroc, la taille des SSU est de 30 hectares (Figure 23).

Size of the Primary Sampling Units (PSU)

Stratum ID	Area of the PSU (hectares)
10, 20 and 30	500 < < 1000
40 and 50	2000 < < 4000
60	20 < < 40
70	10 < < 20
80	40 < < 80

Size of the Secondary sampling Units (SSU)

Stratum ID	Size of the SSU (hectare)
10	30
20	30
30	30
40	200
50	200
60	2
70	1
80	4



Figure 23 : Unités primaires et secondaires d'échantillonnage provincial au Maroc (Source Error! Bookmark not defined. : DSS).

2.5. Modèles de prévision des rendements

Avant le développement du système CGMS-Maroc, la prévision des rendements céréaliers s'effectuait de manière fragmentée à travers un outil statistique spécifique, le CGMS Statistical Tool (CST). Cet outil a été conçu dès 1994 par l'Université de Wageningen (Hoek et al., 2009), aux Pays Bas, pour le Centre de Recherche Commun (JRC) de la Commission Européenne, avec pour objectif de prévoir les rendements des cultures à l'échelle de l'Union Européenne. Adapté au contexte marocain dans le cadre du projet E-AGRI, le CST permettait d'estimer les rendements céréaliers en se basant sur trois catégories de données :

- Les simulations du modèle agronomique WOFOST (WORLD FOOD STUDIES), spécifiquement calibré pour les conditions marocaines (Confalonieri et al., 2013 ; Bregaglio et al., 2015). Ces simulations offraient des indicateurs pertinents sur la croissance et le développement des cultures.
- Les données pluviométriques annuelles, recueillies dès le mois de septembre par les stations météorologiques.
- Les indices de végétation extraits d'images satellites, tels que le NDVI, qui reflètent l'état des couvertures végétales.

Le CST permettait d'effectuer les prévisions en utilisant une Analyse en Composantes Principales (ACP) spécifique, dite "de scénarios", et des modèles de régression linéaire multiple¹⁶. Toutefois, son module de régression linéaire avait des limitations, ne permettant de sélectionner qu'un nombre restreint de variables prédictives et ce, manuellement. Ces prévisions étaient réalisables à diverses échelles spatiales, allant des provinces aux zones agroécologiques, voire à l'échelle nationale, et s'étalaient de fin février à fin avril.

¹⁶ Méthode statistique modélisant la relation entre une variable cible et plusieurs variables explicatives.

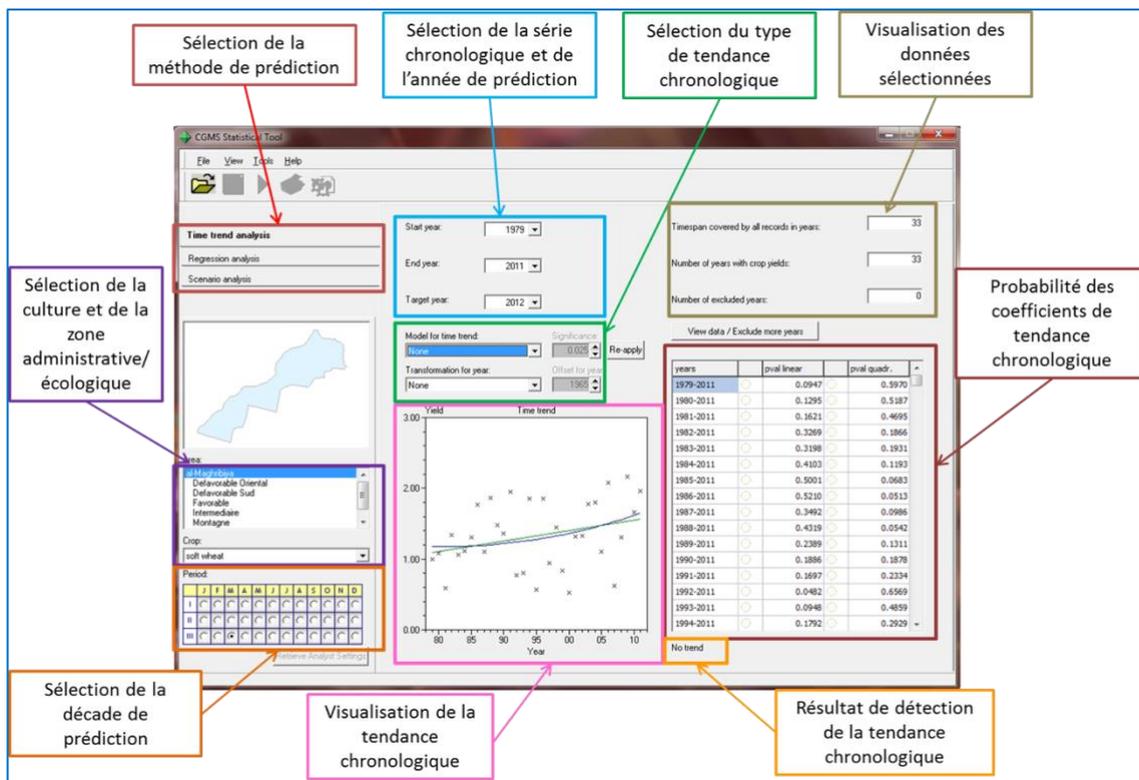


Figure 24 : Le logiciel CGMS Statistical Toolbox d'analyse statistique pour la prévision des rendements céréaliers adapté au Maroc (Balaghi et al., 2012a).

L'avènement de CGMS-Maroc a marqué une évolution majeure par rapport au CST. En effet, ce nouveau système a fusionné et automatisé dans une interface unifiée l'ensemble des outils de prévision développés jusqu'alors. Mais surtout, il a étendu le champ des possibles en intégrant les toutes dernières avancées dans trois domaines complémentaires: (1) les techniques d'analyse de similarité pour identifier les années passées aux conditions proches, (2) les régressions linéaires multiples pour modéliser statistiquement les relations entre variables agro-climatiques et rendements, et (3) les algorithmes d'intelligence artificielle tels que les "forêts aléatoires" (Random Forests) capables d'apprendre des données historiques par eux-mêmes.

2.5.1. Approche de modélisation dans CGMS-Maroc

L'approche privilégiée dans le développement de CGMS-Maroc repose sur la sélection de modèles de prévision des rendements, alliant robustesse tout en demeurant en adéquation avec la qualité des données disponibles. L'objectif principal est de mettre en place des modèles explicites, vérifiables, et suffisamment flexibles pour s'adapter aux spécificités de l'agriculture céréalière au Maroc.

Le développement des modèles de prévision des rendements céréaliers dans CGMS-Maroc repose sur cinq principes fondamentaux :

- **Pertinence** : Bien cerner les besoins des utilisateurs au sein du Ministère de l'Agriculture afin d'orienter le développement de modèles adaptés au contexte marocain.
- **Parcimonie** : Favoriser des modèles simples, n'intégrant des niveaux de complexité supplémentaires que de manière progressive et lorsque cela est clairement justifié. Partir de données de petite taille, mais de haute qualité.
- **Robustesse** : Imposer un contrôle rigoureux de la qualité des données employées pour l'entraînement et la validation des modèles. Identifier et gérer les erreurs, les incertitudes, et les valeurs aberrantes de manière proactive.

- **Pragmatisme** : Reconnaître les limitations inhérentes aux données disponibles et maintenir une approche pragmatique en ce qui concerne la portée des modèles. L'objectif est de représenter fidèlement les processus agro-climatiques plutôt que de rechercher uniquement une précision statistique.
- **Adaptabilité** : Ajuster constamment les modèles en fonction de l'évolution des connaissances et des pratiques agricoles. Conserver un ensemble de données diversifié et représentatif des conditions réelles pour refléter au mieux la réalité du terrain.

2.5.2. Une approche diversifiée pour la prévision des rendements

CGMS-Maroc met en œuvre une méthodologie de prédiction des rendements céréaliers qui s'appuie sur un éventail diversifié de techniques. Cette approche multicouche permet d'élaborer des prévisions fiables tout en évaluant l'incertitude inhérente à ces dernières, une étape cruciale étant donné la complexité et les nombreuses sources d'incertitudes liées tant à la qualité des données qu'aux simplifications nécessaires pour modéliser des phénomènes naturels complexes.

1. **Analyse de Similarité** : Cette première catégorie explore les archives historiques pour identifier des années antérieures présentant des conditions similaires à l'année actuelle. Bien que cette méthode puisse fournir des indications précieuses, elle repose sur la qualité des données historiques et sur l'hypothèse que les relations entre variables restent constantes dans le temps.
2. **Modélisation des relations agro-climatiques** : Deux approches sont envisagées pour modéliser les interactions entre les variables agro-climatiques et les rendements céréaliers :
 - a. Régressions statistiques classiques : Les méthodes telles que la régression linéaire multiple offrent un cadre explicite pour modéliser les relations entre les variables et les rendements. Elles se distinguent par leur robustesse, bien qu'elles puissent parfois simplifier la complexité des interactions réelles.
 - b. Algorithmes d'Apprentissage Automatique : Les techniques avancées, comme les réseaux de neurones et les forêts aléatoires, sont capables d'identifier des schémas non linéaires et complexes qui échappent souvent aux modèles de régression traditionnels. Toutefois, elles peuvent être sensibles aux données erronées et au surajustement, réagissant de manière excessive à des anomalies dans les données et aboutissant à des modèles excessivement complexes.

L'exploitation de cette gamme variée de modèles est essentielle pour évaluer la solidité des prévisions de rendements céréaliers produites par CGMS-Maroc. L'avantage de cette approche réside dans la génération de divers scénarios de prévision, embrassant ainsi un spectre large d'incertitudes potentielles. La convergence des résultats issus de ces modèles différents renforce la confiance dans les prévisions obtenues. À l'inverse, des divergences significatives entre les modèles signalent des zones d'incertitude qui doivent être prises en compte. Cette pluralité d'approches éclaire les décideurs en intégrant naturellement les incertitudes dans le processus décisionnel, une considération vitale pour anticiper les rendements agricoles avec une marge de confiance raisonnée.

a. L'analyse de similarité : Une méthode basée sur l'expérience passée pour estimer les rendements céréaliers

L'analyse de similarité vise à identifier la campagne passée la plus proche de la campagne agricole actuelle, en se basant sur un indice agro-climatique clé tel que la pluviométrie (Balaghi et al., 2012a). Le postulat est que des conditions initiales similaires conduisent à des rendements

comparables. Néanmoins, une simple transposition directe des rendements antérieurs négligerait les progrès techniques réalisés dans l'intervalle.

Il est donc essentiel d'ajuster les rendements de la campagne jugée similaire pour intégrer ces progrès lorsqu'il existe. Au Maroc, la forte variabilité interannuelle des précipitations complique la détection d'une tendance régulière des rendements pluviaux (Balaghi et al., 2012a). Cependant, en analysant l'évolution sur la période 2001-2022, on constate des gains moyens significatifs entre la période 2001-2010 et la période 2011-2022 correspondant à la mise en œuvre de la stratégie agricole « Plan Maroc Vert » (2008-2020). Ainsi, les rendements des blés ont progressé par paliers d'environ 4 quintaux par hectare, tandis que ceux de l'orge ont augmenté de près de 2 quintaux par hectare (Figure 25).

Ces gains traduisent l'impact diffus du progrès technique et fournissent des ordres de grandeur utiles pour ajuster les rendements de la campagne analogue. Cet ajustement technologique vient compléter la similarité climatique par une perspective agronomique prospective. Il la transforme en projection prospective, venant enrichir les prévisions d'un système comme CGMS-Maroc.

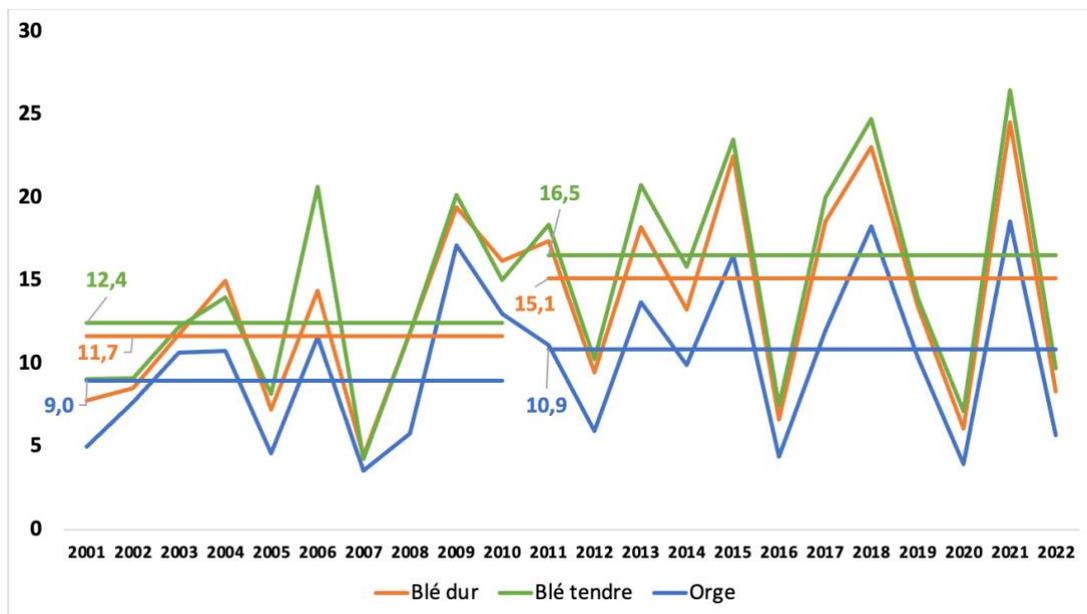


Figure 25 : Évolution des rendements céréaliers en grain, en zones pluviales sur la période 2001-2022 à l'échelle nationale.

L'avantage de l'analyse de similarité réside dans sa simplicité d'utilisation et dans son faible besoin en données. Cependant, elle ne tient pas compte des interactions complexes entre divers facteurs environnementaux, comme l'effet combiné de la pluviométrie et de la température au cours de la campagne agricole relation. De plus, elle peut ne pas produire de résultats significatifs si la campagne agricole actuelle diffère considérablement des campagnes passées, par exemple en raison de conditions climatiques nettement plus sèches ou humides que celles historiquement enregistrées.

Malgré ces limites, l'analyse de similarité offre rapidement une estimation supplémentaire des rendements. Combinée à des approches plus sophistiquées, elle renforce la qualité des prévisions en s'appuyant sur l'expérience concrète des campagnes passées. Cette méthode, qui repose sur la comparaison directe avec des situations déjà rencontrées, fait appel à l'expertise et à la mémoire de l'analyste, établissant ainsi un lien concret avec la réalité sur le terrain.

À titre d'exemple, l'analyse de similarité pour la campagne agricole 2022-2023 est effectuée et la province de Benslimane. La Figure 26 présente les résultats de l'analyse de similarité effectuée par CGMS-Maroc, se basant sur la pluviométrie cumulée par décennie pour la période s'étendant du 1er octobre 2022 au 31 mai 2023, spécifiquement pour la province de Benslimane. La figure montre les courbes d'évolution de la pluviométrie cumulée pour chaque décennie de la campagne agricole en cours, ainsi que celles des cinq campagnes les plus similaires du point de vue de la pluviométrie (avec indication des années de récolte correspondantes).

Il ressort de cette analyse que la campagne de 2013-2014 présente la plus grande similarité en termes de pluviométrie. Ensuite, la campagne de 2006-2007 arrive en deuxième position, et ainsi de suite jusque la campagne la plus éloignée des cinq, celle de 2015-2016. Les rendements céréaliers observés lors de la campagne 2013-2014 étaient de 23,2 quintaux par hectare pour le blé dur, 23,1 quintaux par hectare pour le blé tendre et 23,7 quintaux par hectare pour l'orge. Ces rendements observés en 2013-2014 fournissent directement une indication pour 2022-2023, sans ajustement nécessaire puisqu'il n'y a pas eu de progrès technologique sur la période récente 2011-2022. Ces estimations sont ensuite utilisées pour calculer la production de ces céréales pour la campagne actuelle, en multipliant ces rendements par la superficie actuellement cultivée.

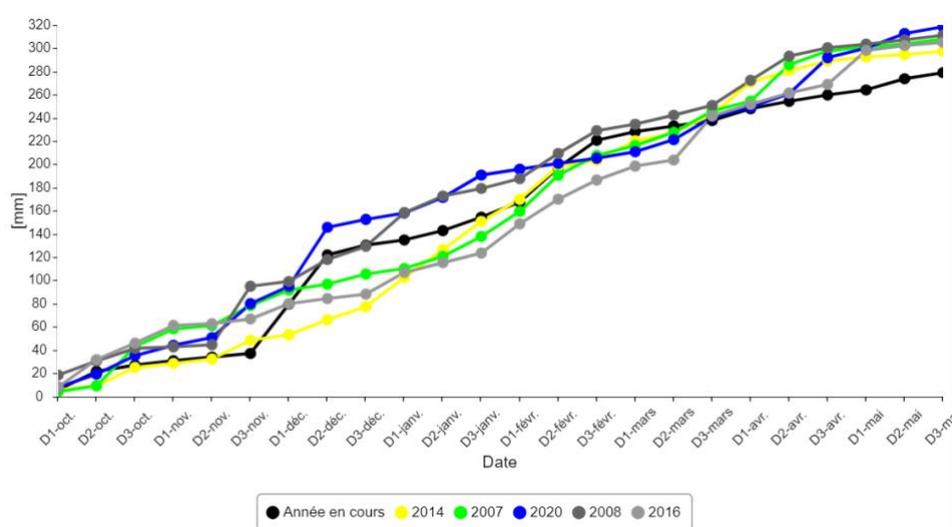


Figure 26 : Analyse de similarité dans CGMS-Maroc, sur la base de la pluviométrie cumulée, entre le 01/10/2013 et le 15/04/2014, pour la province de Benslimane.

b. Les modèles de relations entre variables agro-climatiques et rendements céréaliers

CGMS-Maroc met en œuvre une modélisation prédictive des rendements céréaliers adaptée aux spécificités agro-climatiques régionales. Que ce soit via des régressions statistiques ou de l'apprentissage automatique, les modèles sont élaborés à l'échelle provinciale.

Cycle des céréales

Afin d'optimiser la corrélation avec les rendements céréaliers, les variables explicatives, météorologiques ou satellitaires, sont calculées uniquement sur la période du cycle phénologique des céréales. En l'absence de données phénologiques exhaustives à l'échelle nationale, les cycles sont estimés par une méthode de télédétection développée par la NASA (Li et al., 2014).

Cette approche exploite les séries temporelles d'indices de végétation MODIS pour générer un profil théorique de l'EV12 (indice de végétation amélioré à deux bandes) pour chaque pixel, à partir des cartes d'occupation du sol MCD12Q2 Land Cover Dynamics. Les dates clés du cycle

phénologique (levée, maturité, etc.) sont ensuite déterminées selon des points de passage caractéristiques sur ce profil EVI2 (15%, 50% ou 90% de l'amplitude) (Tableau 6).

$$EVI2 = 2.5 * ((NIR - Red)/(NIR + 2.4 * Red + 1))$$

Tableau 6: Estimation des dates des différents stades phénologiques à partir du profil de l'indice EVI2.

Stade	Description	Calcul
Greenup	Levée	Date à laquelle EVI2 a franchi pour la première fois 15% de l'amplitude du segment EVI2
MidGreenup	50% du pic de développement de la culture	Date à laquelle EVI2 a franchi pour la première fois 50% de l'amplitude du segment EVI2
Maturity	Maturité	Date à laquelle EVI2 a franchi pour la première fois 90% de l'amplitude du segment EVI2
Peak	Pic de développement de la culture	Date à laquelle EVI2 a atteint le maximum de l'amplitude du segment EVI2
Senescence	Sénescence	Date à laquelle EVI2 a franchi pour la dernière fois 90% de l'amplitude du segment EVI2
MidGreendown	50% du dépérissement de la culture	Date à laquelle EVI2 a franchi pour la dernière fois 50% de l'amplitude du segment EVI2
Dormancy	Récolte	Date à laquelle EVI2 a franchi pour la dernière fois 15% de l'amplitude du segment EVI2

Six périodes phénologiques sont alors distinguées (P0 à P5), pour optimiser l'extraction des indices satellitaires les plus corrélés au rendement (Figure 27):

- P0 : Cycle complet (de la levée à la récolte)
- P1 : Levée à mi-croissance
- P2 : Mi-croissance à maturité
- P3 : Maturité à sénescence
- P4 : Sénescence à mi-dépérissement
- P5 : Mi-dépérissement à récolte

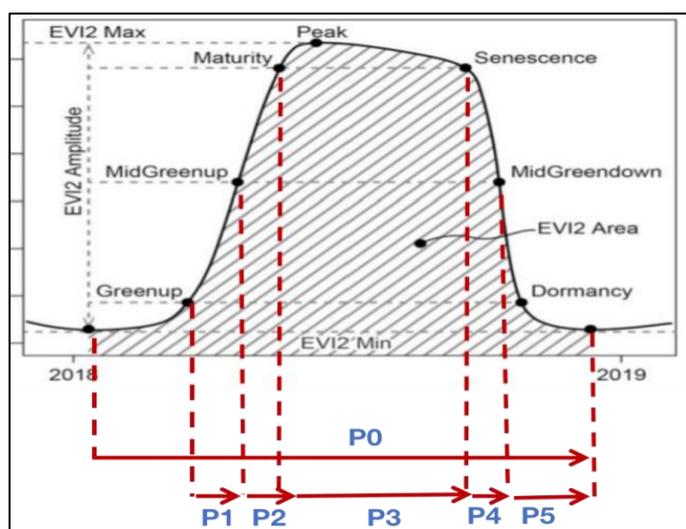


Figure 27: Profil théorique de l'indice EVI2, indiquant les différents stades phénologiques des cultures et périodes d'extraction des indices (P0 à P5).

Cette méthode fournit des estimations objectives des dates clés du cycle des céréales au niveau de chaque Unité Spatiale, optimisant les corrélations avec les rendements dans CGMS-Maroc. Elle est simple à utiliser, automatisée et flexible malgré certaines limites. Elle améliore la compréhension de la phénologie des cultures au Maroc et guide la sélection des indices satellitaires pertinents.

La régression linéaire : Une modélisation explicite des relations variables-rendements

Outre l'analyse de similarité, CGMS-Maroc utilise des modèles de régression linéaire multiple (MLR) pour prévoir les rendements des principales céréales (blé dur, blé tendre et orge) pour chaque province. Ces modèles sont construits en exploitant :

- Les données historiques de rendements observés à l'échelle des segments d'échantillonnage du réseau de suivi national.
- Des indices agrégés calculés à la même échelle à partir de variables météorologiques (précipitations, températures, ET0, ...) et d'indices agro-climatiques issus de l'imagerie satellite (NDVI, LAI, SWI...).

Cette approche par régression linéaire multiple permet de relier statistiquement les fluctuations historiques des rendements aux variations des facteurs agro-climatiques déterminants, afin de prévoir les rendements des céréales à l'échelle de chaque province.

Processus de développement des modèles

Le processus de développement des modèles de régression linéaire multiple s'articule comme suit :

1. **Calcul des indices** : Pour chaque céréale et chaque province, une série de d'indices potentiels est calculée à partir des données météorologiques et satellitaires, prenant en compte leur évolution tout au long du cycle des céréales identifié plus haut.
2. **Création de tableaux de correspondance** : Pour chaque céréale et province disposant d'au moins huit années de données de rendement observé, garantissant ainsi une validité statistique, des tableaux de correspondance sont établis. Ces tableaux relient les rendements observés aux indices agrégés par province.
3. **Élaboration des modèles** : Pour chaque céréale et province, un processus séquentiel de construction des modèles est adopté :
 - a. Exclusion aléatoire de 20% des saisons agricoles parmi l'ensemble (N) des saisons disponibles.
 - b. Utilisation de la méthode "Stepwise" pour identifier un modèle de régression linéaire en s'appuyant sur les 80% de saisons restantes, en retenant uniquement les indices les plus corrélés et non redondants. Le modèle avec la valeur de coefficient de détermination¹⁷ (R-carré) la plus élevée est retenu. Il est important de noter que des R-carrés élevés ne garantissent pas nécessairement une forte capacité prédictive (Balaghi et al., 2012a), d'où l'étape suivante de validation croisée.
 - c. Mise en place d'une méthodologie de validation croisée en calculant les paramètres du modèle identifiés à l'étape 3.b pour N-1 saisons agricoles, en excluant une saison à chaque itération (Balaghi et al., 2008). À la fin de cette étape, l'erreur quadratique moyenne (RMSE), qui mesure la précision des prévisions par rapport aux valeurs observées, est calculée.

¹⁷ Mesure de la variance expliquée par un modèle statistique.

- d. Après dix répétitions des étapes 3.a à 3.c, dix modèles prédictifs sont obtenus. Le modèle affichant la plus faible RMSE est sélectionné.

En appliquant cette méthodologie, des modèles MLR sont élaborés pour chaque céréale et chaque US. La qualité de ces modèles prédictifs est systématiquement évaluée en fonction de divers critères, notamment le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (en tonnes par hectare) et l'erreur relative en pourcentage, entre autres.

Assurance qualité pour une modélisation robuste

La robustesse de la modélisation MLR joue un rôle crucial pour garantir des prévisions précises et fiables. Le système CGMS-Maroc suit un schéma d'assurance qualité complet conçu pour évaluer et améliorer la robustesse de la modélisation MLR basée sur les données météorologiques et satellitaires au niveau national (Tableau 7). Le schéma englobe divers aspects, notamment la collecte de données, le prétraitement, la sélection de variables, la construction de modèles, les hypothèses de modélisation, l'évaluation des performances, l'analyse de sensibilité, la mise à jour des modèles, la documentation et l'examen par les pairs. Le schéma intègre des indicateurs clés de performance pour évaluer quantitativement l'efficacité de chaque aspect. En outre, des considérations sur la programmation sont fournies pour guider la mise en œuvre du schéma à l'aide de techniques de programmation efficaces et optimisées.

Tableau 7: Cadre d'assurance qualité pour une modélisation statistique robuste des rendements des cultures.

Aspect	Description	Indicateurs clés de performance	Considérations sur la programmation
Collecte des données	S'assurer de la collecte de données météorologiques et satellitaires précises et fiables auprès de sources réputées. Utiliser des protocoles standardisés pour la collecte des données afin de maintenir la cohérence. Vérifier la qualité des données, y compris la précision, la justesse et l'exhaustivité. Gérer les données manquantes de manière appropriée (par ex. interpolation, imputation de données).	Précision et justesse des données, exhaustivité des données, gestion des données manquantes	Mettre en œuvre des algorithmes efficaces de récupération et de traitement des données. Automatiser les procédures de collecte de données. Gérer efficacement les grandes quantités de données.
Prétraitement des données	Effectuer des étapes approfondies de prétraitement des données, incluant le nettoyage, la détection des valeurs aberrantes et leur suppression ou correction. Standardiser les données à une échelle cohérente pour éliminer les biais potentiels dus aux différentes unités de mesure.	Taux de détection des valeurs aberrantes, Précision de la standardisation des données.	Développer du code pour le nettoyage automatique des données et la détection des valeurs aberrantes. Mettre en œuvre des fonctions de standardisation des données pour assurer une mise à l'échelle cohérente. Optimiser les algorithmes de prétraitement pour l'efficacité de calcul.
Sélection de variables	Effectuer une analyse approfondie des variables pour sélectionner les prédicteurs les plus pertinents pour la modélisation des rendements céréaliers. Considérer à la fois les variables météorologiques et satellitaires en fonction de leur pertinence biologique, de leur significativité	Précision de la sélection de variables, significativité des prédicteurs, résultats de l'analyse des corrélations.	Mettre en œuvre des algorithmes de sélection automatique de variables. Développer des fonctions pour calculer la significativité statistique et les coefficients de corrélation. Optimiser les procédures de sélection de variables pour la vitesse et la précision.

	statistique et de leur corrélation avec le rendement céréalier. Utiliser les connaissances du domaine et des techniques statistiques (régression pas à pas (Stepwise) pour la sélection de variables.		
Construction de modèles	Utiliser des techniques de modélisation appropriées (régression multiple, etc.) pour construire le modèle de prévision des rendements céréaliers. Valider le modèle à l'aide de techniques adéquates telles que la validation croisée, la validation par échantillonnage, ou le bootstrap. Évaluer la qualité d'ajustement du modèle, y compris des mesures comme le R-carré, le R-carré ajusté, et l'analyse des résidus.	Précision du modèle (R^2 , R^2 ajusté), Résultats de l'analyse des résidus, Précision de la validation.	Développer des fonctions ou classes pour la construction et l'évaluation des modèles. Optimiser les algorithmes d'ajustement de modèle pour l'efficacité. Mettre en œuvre des techniques de validation en utilisant des bibliothèques de programmation ou du code personnalisé.
Hypothèses de modélisation	Vérifier les hypothèses de la technique de modélisation choisie (linéarité, indépendance, homoscédasticité, etc.) et traiter les violations à l'aide de transformations appropriées ou de techniques de modélisation robustes si nécessaire.	Résultats de la vérification des hypothèses, précision de la transformation.	Mettre en œuvre des fonctions pour vérifier les hypothèses des modèles et détecter les violations. Développer du code pour transformer les variables et gérer les relations non linéaires. Utiliser des algorithmes de modélisation robustes lorsque les hypothèses ne sont pas respectées.
Performance du modèle	Évaluer la performance du modèle en évaluant sa précision et sa justesse prédictives. Utiliser des mesures telles que l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation (Pearson r) entre les rendements céréaliers prédits et observés. Comparer les performances du modèle à d'autres modèles de référence ou aux données historiques.	RMSE, Coefficient de corrélation, comparaison des performances avec des modèles de référence	Mettre en œuvre des fonctions pour calculer les mesures de performance. Développer du code pour la comparaison avec les modèles de référence. Optimiser les calculs pour l'efficacité computationnelle.
Analyse de sensibilité	Effectuer une analyse de sensibilité pour évaluer la robustesse du modèle et identifier les prédicteurs influents. Faire varier les variables d'entrée dans des plages plausibles et observer l'impact sur la sortie du modèle. Identifier les sources potentielles d'incertitude et quantifier leur effet sur les prédictions du modèle.	Résultats de l'analyse de sensibilité, évaluation de l'influence des prédicteurs, quantification de l'incertitude	Développer des fonctions ou scripts pour l'analyse de sensibilité. Automatiser la variation des variables d'entrée et l'observation des sorties du modèle. Mettre en œuvre des méthodes de quantification de l'incertitude (simulations de Monte Carlo, etc.).
Mise à jour du modèle	Mettre régulièrement à jour le modèle en incorporant de nouvelles données et en affinant le processus de sélection de variables et de construction du modèle. Effectuer une validation	Fréquence de mise à jour, précision de la validation du modèle, taux de	Créer des scripts ou workflows pour la mise à jour automatique des modèles. Mettre en œuvre des procédures pour l'intégration de nouvelles données et le

	et un réétalonnage du modèle pour s'assurer qu'il reste précis et fiable au fil du temps. Surveiller les changements dans les sources de données et ajuster les étapes de prétraitement en conséquence.	succès du réétalonnage.	réentraînement du modèle. Développer des fonctions pour la validation et le réétalonnage des modèles.
Documentation	Maintenir une documentation détaillée de toutes les étapes de l'analyse, y compris les sources de données, les procédures de prétraitement, les critères de sélection de variables, les spécifications du modèle et les mesures d'évaluation. Documenter toutes les hypothèses faites pendant l'analyse. Reporter clairement les limites et les incertitudes associées au modèle.	Exhaustivité de la documentation, clarté des hypothèses et limites.	Inclure des commentaires et annotations dans le code pour une meilleure compréhension. Documenter les scripts de traitement et d'analyse des données. Préparer des rapports clairs et complets résumant les étapes de programmation et les résultats.

Les algorithmes d'apprentissage automatique : Des dépendances variables-rendements non linéaires et complexes

Enfin, CGMS-Maroc utilise les algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning) pour prévoir les rendements céréaliers. L'apprentissage automatique désigne un ensemble de techniques algorithmiques permettant aux ordinateurs d'apprendre à partir de données, sans être explicitement programmés à cet effet. Plutôt que d'appliquer des règles prédéfinies, les algorithmes d'apprentissage automatique analysent les données pour en extraire des modèles mathématiques et des relations statistiques. Ils utilisent ensuite ces modèles pour faire des prédictions ou prendre des décisions lorsqu'ils sont confrontés à de nouvelles données.

Parmi les méthodes d'apprentissage automatique, les forêts aléatoires (random forests) sont des algorithmes particulièrement performants (Breiman, 2001). Leur principe consiste à combiner un grand nombre d'arbres de décision, qui sont des modèles représentant une séquence de règles "Si condition ALORS décision". Chaque arbre de décision est entraîné sur un sous-ensemble aléatoire des données d'entraînement. En agrégeant les prédictions de tous ces arbres légèrement différents, les forêts aléatoires lissent leur tendance au surapprentissage et améliorent considérablement la robustesse et la précision des prévisions.

Dans CGMS-Maroc, les forêts aléatoires sont utilisées en complément des régressions linéaires multiples et des méthodes d'analyse de similarité pour prédire les rendements céréaliers. Contrairement aux régressions linéaires qui supposent des relations linéaires entre variables, les forêts aléatoires peuvent capturer des dépendances hautement non linéaires et complexes. Elles ne nécessitent pas de sélection manuelle des variables et gèrent un très grand nombre de prédicteurs potentiels. Cependant, cette flexibilité se fait au détriment de l'interprétabilité (Tableau 8).

Grâce à leur capacité à détecter des motifs que les techniques conventionnelles ne peuvent identifier, les forêts aléatoires sont très utilisées en apprentissage automatique malgré leur complexité algorithmique. Couplées à l'expertise de l'analyste, elles offrent des perspectives intéressantes pour des applications telles que la prévision des rendements agricoles dans CGMS-Maroc.

Une récente étude (Bouras et al., 2021) a montré le fort potentiel de l'algorithme d'apprentissage automatique forêts aléatoires pour la prévision précoce des rendements céréaliers à l'échelle provinciale au Maroc, en combinant différentes sources de données satellitaires, météorologiques et d'indices de végétation. Les performances statistiques par rapport aux

régressions linéaires témoignent de la capacité des forêts aléatoires à modéliser les relations complexes entre ces prédicteurs environnementaux et les rendements.

Tableau 8 : Comparaison des méthodes de modélisation entre régression linéaire et forêts aléatoires.

Critère	Régression linéaire	Forêts aléatoires
Hypothèses	Relation linéaire entre variables prédictives et variable à prédire	Aucune hypothèse sur la forme de la relation
Non-linéarité	Ne peut modéliser que des relations linéaires	Peut capturer des relations non linéaires complexes
Nombre de variables	Adapté pour un nombre limité de variables prédictives pour éviter le surapprentissage	Peut gérer un très grand nombre de variables prédictives
Données aberrantes	Sensible aux valeurs aberrantes qui peuvent fausser le modèle	Robuste grâce à l'agrégation sur de nombreux arbres
Interprétabilité	Les coefficients sont facilement interprétables	Difficile d'interpréter l'importance des variables
Régularisation	Risque de surapprentissage élevé	Intrinsèquement régularisé, pas de surapprentissage
Implémentation	Algorithme simple à mettre en œuvre	Nécessite une importante puissance de calcul
Prédiction	Bonne performance sur des problèmes linéaires simples	Excellente performance sur une large gamme de problèmes

2.6. Préviation des rendements

La capacité du CGMS-Maroc à prédire les rendements céréaliers aux niveaux provincial et national a été testée par rapport aux rendements officiels observés des céréales (blé tendre, blé dur et orge) pour 22 saisons agricoles, de 2000-2001 à 2021-2022 (Figure 28). Les rendements céréaliers ont été prévus à l'aide de modèles de régression linéaire ainsi que de deux techniques d'apprentissage automatique (Forêts Aléatoires et Extra Trees).

L'utilisation des techniques d'apprentissage automatique pour la prédiction des rendements céréaliers dans CGMS-Maroc a conduit à des améliorations par rapport à l'utilisation des modèles de régression linéaire traditionnels. Cependant, une partie de l'erreur de prédiction restante résulte d'incohérences dans les statistiques céréalières ou des facteurs non mesurés à ces échelles spatiales, comme les dates de semis, les pratiques culturales, les variétés utilisées, etc.

De plus, des améliorations significatives ont été obtenues en intégrant les données de réanalyse ERA5 interpolées et corrigées des précipitations et de la température en comparaison avec l'interpolation spatiale des données des stations synoptiques, soulignent ainsi la valeur des produits satellitaires ERA5 qui offrent une couverture spatiale complète du terrain, là où le réseau de stations est insuffisant.

Les variables satellitaires prédictives utilisées, dans les algorithmes d'apprentissage automatique ainsi que les modèles de régression, sont les indices de végétation (NDVI, LAI), les données ERA5 de précipitations et de températures, les données d'évapotranspiration de référence (ET0) interpolées ainsi que l'indice d'humidité du sol (SWI).

Les résultats montrent que les modèles élaborés démontrent une capacité élevée à prédire les rendements céréaliers au niveau provincial. Avec les méthodes de régression linéaire, 80% des coefficients de détermination (R^2) en validation croisée varient de 0,59 à 0,95, soulignant la

robustesse des prédictions. Les modèles de forêts aléatoires affichent une performance plus élevée, avec des R^2 en validation croisée compris entre 0,83 et 0,93.

En moyenne, sur les données de rendements prévus au niveau provincial, les valeurs de R^2 en cross validation atteignent 0,79 pour les régressions linéaires et 0,88 pour les algorithmes d'apprentissage automatique.

L'analyse de l'importance des variables prédictives dans les modèles de régression au niveau des provinces révèle une fréquence des prédicteurs suivants, dans l'ordre d'importance : les précipitations issues de la réanalyse ERA5, l'indice foliaire (LAI), les températures minimale et maximale d'ERA5, l'indice de végétation NDVI et l'humidité du sol (SWI).

Le rendement moyen prévu pour chaque céréale au niveau national a été calculé en pondérant les rendements prévus au niveau provincial par la superficie moyenne de cette céréale sur les deux dernières années de la série temporelle.

La mise en œuvre de techniques en intelligence artificielle au sein de CGMS-Maroc a marqué un progrès décisif vers une prévision affinée des rendements céréaliers. En exploitant des volumes croissants de données climatiques, agronomiques et de télédétection, des algorithmes comme les Random Forests ou Extra Trees identifient des relations complexes entre facteurs environnementaux et productivité des cultures.

Cependant, la comparaison aux modèles statistiques établis soulève des enseignements nuancés. Certes, sur les millésimes moyens, l'apprentissage automatique surpasse la régression linéaire classique. Mais lors des années exceptionnelles de sécheresse ou d'abondantes précipitations, cette tendance s'inverse.

On peut supposer que l'inertie des techniques d'intelligence artificielle à prédire les années anormales tient à un manque de cas similaires dans leur base d'apprentissage. Avec l'allongement des séries chronologiques, l'arrivée de nouvelles campagnes exceptionnelles devrait enrichir leurs capacités de généralisation. D'autant que leur architecture évolutive tolère facilement l'ingestion de nouvelles sources de données.

A contrario, les modèles linéaires parviennent sans doute à une limite structurelle pour intégrer des effets non-linéaires. Mais leur simplicité facilite toujours l'interprétation agronomique des résultats. Dans CGMS-Maroc, la complémentarité des approches prédit donc de notables progrès vers une prévision robuste en tout millésime.

Il est important de noter que l'utilisation de ces trois approches de modélisation complémentaires permet de fournir des limites d'incertitude sur les prédictions de rendement (zone bleue ombrée sur la Figure 28). La gamme d'estimations des modèles de régression, Extra Trees et Random Forests établit des limites de confiance pratiques pour la planification agricole.

Une validation externe encourageante provient de la comparaison avec le système de surveillance de la croissance des cultures exploité par le Centre de recherche conjoint de l'Union européenne (JRC) (trait rouge dans la Figure 28). De manière encourageante, le CGMS-Maroc présente des performances similaires sur la période 2007-2023, renforçant sa robustesse.

Cependant, lors de saisons de culture très singulières, comme l'année extrêmement pluvieuse 2009-2010 ou la saison 2020-2021, caractérisée par des précipitations moyennes mais bien réparties, tant le CGMS-Maroc que le système du JRC échouent à prédire avec précision les rendements céréaliers. Cela souligne le défi de capturer des schémas météorologiques sans précédent et des réponses complexes des cultures même pour des systèmes de prévision avancés.

Il est essentiel de souligner que quel que soient les modèles de prévision utilisés, le rôle de l'analyste demeure primordial pour évaluer de manière critique les résultats de prédictions des rendements générés. En effet, les indicateurs agro-climatiques employés dans les modèles ne sont que des proxies imparfaits de l'état réel de la saison agricole, ne prenant pas en compte de nombreux facteurs locaux pouvant affecter la croissance et le développement des cultures (maladies, ravageurs, stress abiotiques...). De plus, les modèles statistiques et d'intelligence

artificielle mobilisés ont eux-mêmes des limitations intrinsèques et dépendent de la richesse des jeux de données ayant permis leur calibration.

Ainsi, l'analyste conserve un rôle critique pour évaluer avec un regard critique les sorties des modèles, en mettant en perspective les prévisions de rendements avec les conditions réelles observées sur le terrain. Son expertise agrométéorologique affinée au fil des campagnes lui permet de relativiser les résultats des modèles et de juger de leur plausibilité à l'aune de son expérience concrète. Cette validation empirique des prédictions algorithmiques par le diagnostic humain reste indispensable pour garantir la justesse et la fiabilité des prévisions délivrées par CGMS-Maroc aux utilisateurs finaux.

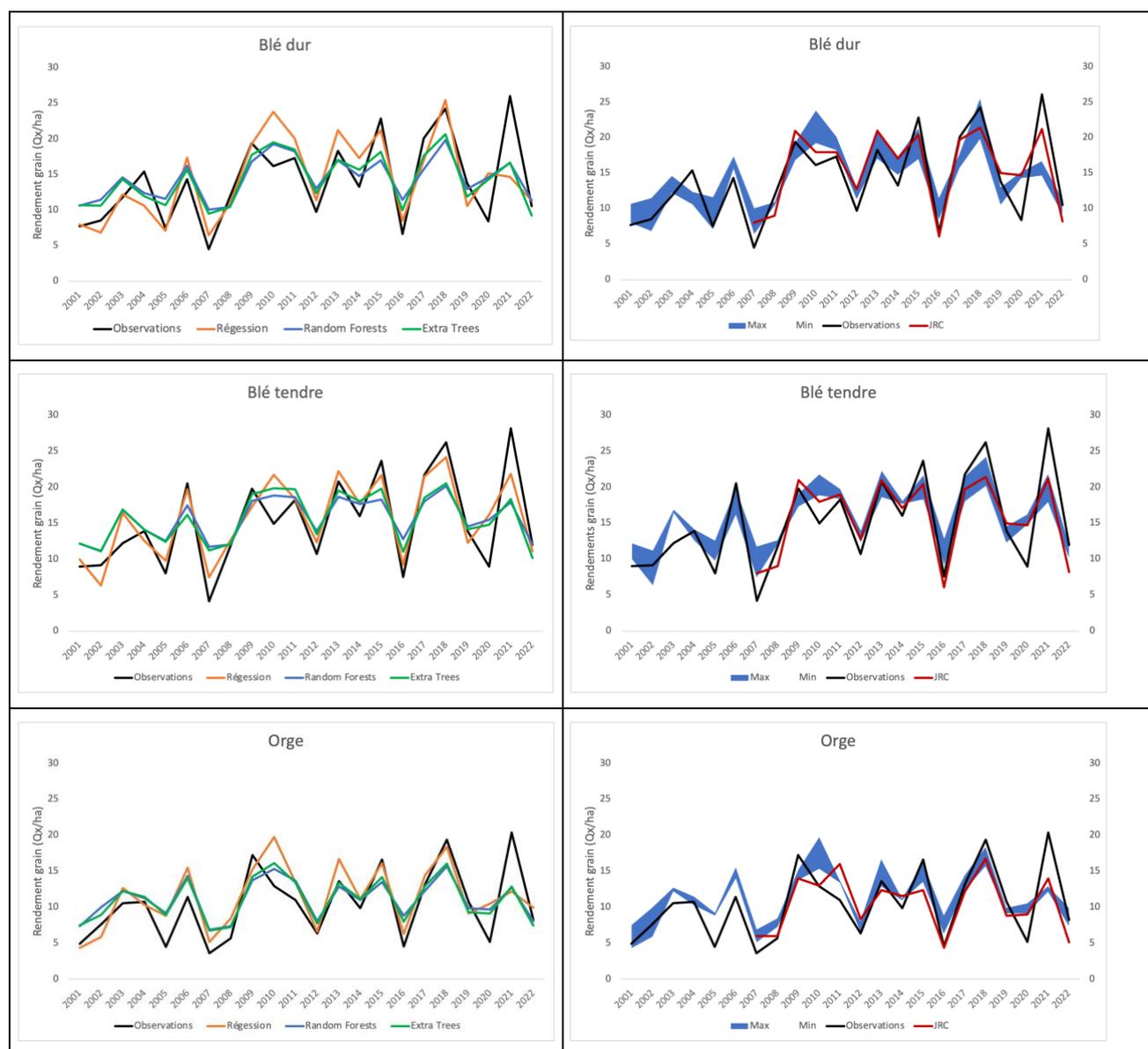


Figure 28 : Rendements céréaliers observés et prévus à l'aide de modèles de régression, de Random Forests et Extra Trees au niveau national.

2.7. Visualisation des résultats : l'interface utilisateur

La première interface utilisateur de CGMS-Maroc a été développée dans le cadre du projet E-AGRI (Allard et al., 2013). L'interface utilisateur était une application cartographique sur internet conviviale (Figure 29). Elle fonctionnait sur un navigateur web grâce à un plugin Flash Player. Cette interface a été développée avec des outils informatiques comme Adobe Flex et LuigiOS. Ils permettaient de créer des applications web avancées avec des cartes interactives.

Le fonctionnement de l'interface suivait une logique en trois parties :

- Le modèle : il contient les données et les fonctions pour y accéder.
- La vue : elle permet de visualiser les données sous forme de cartes et graphiques.
- Le contrôleur : il fait le lien entre le modèle et la vue.

Toute l'information dont a besoin l'interface était lue depuis la base de données. L'interface permettait d'afficher deux types de données : des données raster (comme une grille) et des données vectorielles (comme les unités administratives). Les serveurs génèrent les images ou cartes correspondantes qui sont ensuite affichées. L'interface combine simplicité et fonctionnalités avancées pour que les utilisateurs puissent consulter facilement les données.

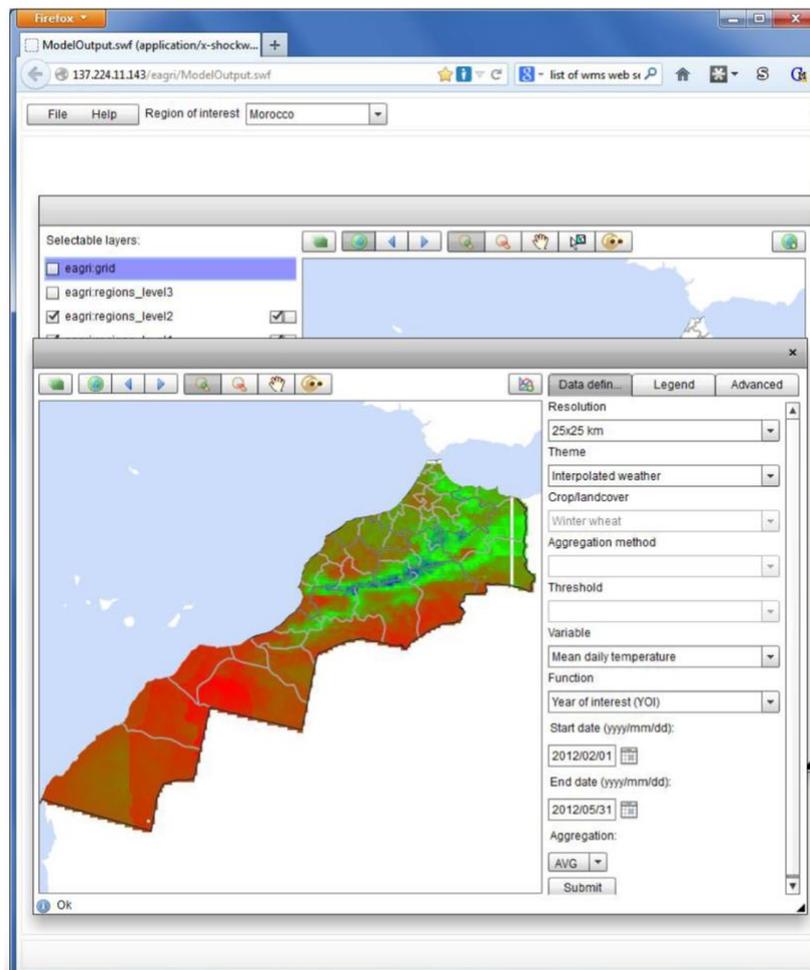


Figure 29 : Première interface utilisateur CGMS-Maroc, montrant la température moyenne quotidienne au Maroc du 1^{er} février au 31 mai 2012.

Depuis, une nouvelle interface utilisateur a été développée, bénéficiant des dernières avancées technologiques et d'une expérience utilisateur améliorée. Elle a été repensée pour être plus ergonomique, intuitive et conviviale. L'objectif est de proposer aux utilisateurs un outil moderne et facile à prendre en main pour visualiser et analyser les données agricoles. La nouvelle interface facilite la navigation, la sélection des indicateurs, la superposition des couches d'information et l'interprétation des cartes et graphiques. Elle tire parti des technologies web récentes comme HTML5, JavaScript et CSS3 pour offrir une meilleure réactivité et des fonctionnalités avancées. Cette nouvelle interface utilisateur résulte d'un travail approfondi pour proposer la meilleure expérience possible aux utilisateurs finaux du système CGMS-Maroc. Elle améliore significativement l'ergonomie et l'utilisabilité par rapport à la version initiale décrite plus haut.

L'interface d'accueil est organisée en sections modulaires interconnectées. Un menu latéral adaptatif permet de naviguer entre les fonctionnalités en fonction des besoins et privilèges de chaque profil utilisateur (Figure 30) :

- **Section 1 - Sélection administrative** : Cette section comprend un menu déroulant pour choisir le niveau géographique d'analyse (national ou régional) qui dynamisera les visualisations des autres sections.
- **Section 2 - Tableau de bord** : Le tableau de bord présente des graphiques à jauges des anomalies par rapport à la moyenne décennale pour donner une vue d'ensemble rapide. Les valeurs quantitatives sont accompagnées des données de campagnes passées similaires pour faciliter l'interprétation contextuelle. Une carte et un graphique temporel complètent l'analyse.
- **Section 3 - Indicateurs de pluie et de température** : Cette section affiche de manière synthétique les cumuls pluviométriques et températures moyennes de la campagne en cours, comparés aux normales décennales. Ces indicateurs essentiels sont ainsi accessibles immédiatement.
- **Section 4 - Sélecteur d'indicateurs** : Un menu déroulant permet de choisir parmi les précipitations, températures, NDVI ou SWI l'indicateur à visualiser sur la carte et les graphiques des sections suivantes, offrant une analyse ciblée.
- **Section 5 – Cartographie** : Une carte interactive présente les écarts de l'indicateur sélectionné au niveau municipal pour la campagne agricole en cours par rapport aux 10 dernières années. Des infobulles affichent les valeurs précises au survol.
- **Section 6 - Analyse de similarité** : Cette section comprend des graphiques temporels comparant le déroulement de la campagne aux données historiques des années antérieures similaires du point de vue pluviométrique.
- **Section 7 – Administration** : Cette section est dédiée aux fonctionnalités d'administration et de gestion des utilisateurs : création/suppression de comptes, attribution de rôles/droits, journaux d'activités.

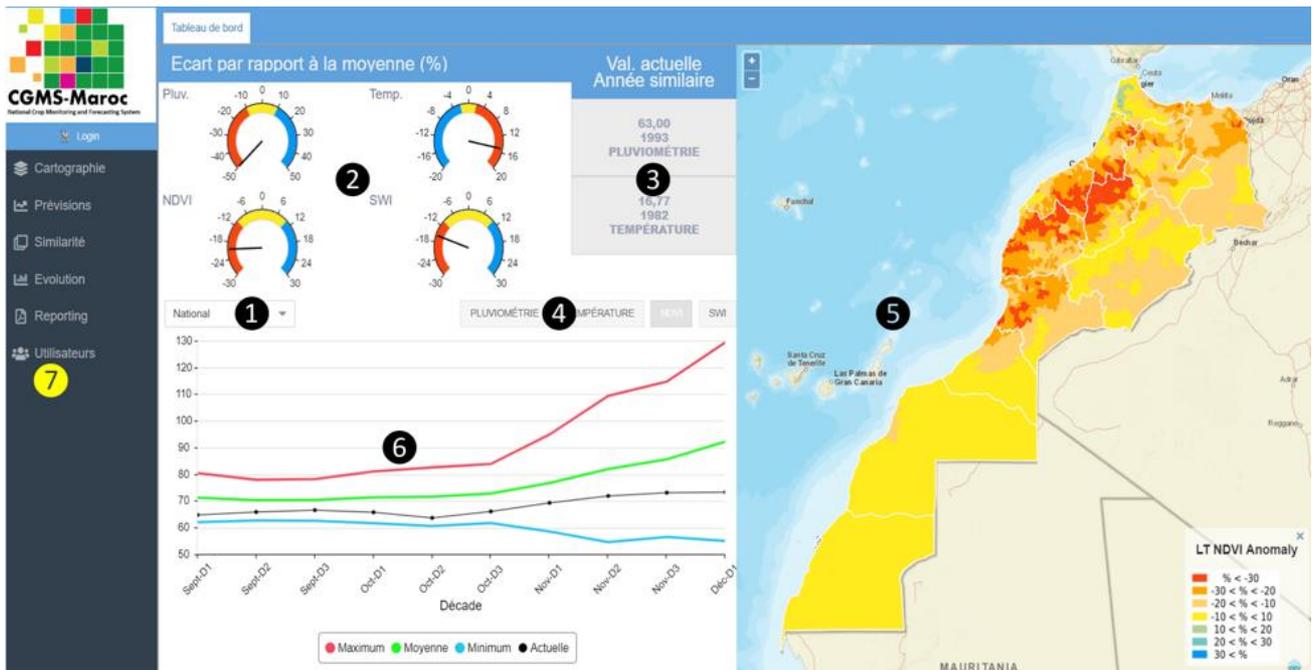


Figure 30 : Nouvelle interface de CGMS-Maroc.

Actuellement, CGMS-Maroc offre une vaste gamme de fonctionnalités pour aider les analystes à explorer et à accéder à des informations essentielles durant la saison agricole. Sa fonctionnalité de cartographie propose des statistiques complètes sur les paramètres météorologiques et satellitaires, permettant aux utilisateurs de personnaliser leur analyse et de prédire avec précision les rendements pour chacune des céréales : blé tendre, blé dur et orge. La fonctionnalité d'analyse de similarité renforce les prédictions en identifiant les saisons passées présentant des conditions climatiques similaires. Grâce à la fonctionnalité d'analyse intra-saisonnière, les utilisateurs peuvent surveiller en temps réel les données météorologiques et satellitaires tout au long de la saison de croissance, ce qui leur permet d'obtenir des informations précieuses sur la croissance des cultures et les conditions environnementales. De plus, le rapport automatique de CGMS-Maroc génère des rapports détaillés, comprenant des indicateurs essentiels aux échelles administratives de la région, de la province ou de la commune rurale, facilitant la prise de décision en agriculture. Ces fonctionnalités donnent aux utilisateurs une exploration des données améliorée, une analyse historique, des capacités de surveillance en temps réel et un soutien complet à la prise de décision pour les opérations agricoles en agriculture.

Les données satellitaires dans CGMS-Maroc offrent une grande flexibilité d'analyse et de visualisation. Elles peuvent être affichées à leur résolution native ou agrégées à différentes échelles administratives selon les besoins. Le système permet également des traitements avancés comme l'analyse de similarité entre saisons, le suivi temporel au cours de la campagne, et la cartographie thématique.

Les données de précipitations, températures et indices de végétation sont agrégées au niveau provincial en excluant les zones non agricoles identifiées par télédétection. Cette agrégation fournit des variables explicatives pour la modélisation statistique. Les prévisions de rendement résultant des modèles sont finalement restituées sous forme de cartes, graphiques et rapports. Ces produits synthétiques et visuels facilitent l'interprétation par les décideurs et autres utilisateurs finaux. Ils permettent une prise de décision éclairée en matière de politique agricole et de sécurité alimentaire. L'objectif est de fournir à ces acteurs une information précise et exploitable facilement.

2.7.1. Cartographie

CGMS-Maroc propose une fonctionnalité de cartographie qui présente des statistiques liées à divers paramètres météorologiques et satellitaires, tels que la valeur actuelle, la moyenne, le cumul, le minimum, le maximum, l'écart par rapport à la moyenne à long terme, l'écart par rapport à l'année précédente et l'écart par rapport à une année spécifique (Figure 31). Ces statistiques peuvent être affichées de manière conviviale et consultées à l'échelle de la grille d'interpolation ou agrégées à une échelle administrative, telle que la commune rurale, la province ou la région. La fonctionnalité de cartographie offre également des fonctionnalités permettant aux utilisateurs de personnaliser leur analyse. Les utilisateurs peuvent spécifier la période d'intérêt, calculer et afficher différentes statistiques pour l'ensemble du pays ou uniquement pour les zones agricoles déterminées à partir du masque agricole. Le masque agricole est un outil essentiel qui identifie les zones sous production agricole, permettant des prévisions de rendement à un niveau plus granulaire. De plus, la fonctionnalité de cartographie offre les fonctionnalités habituelles de zoom avant et arrière, de zoom sur une zone particulière, d'ajout de fonds de carte, d'interrogation d'un élément de carte, etc. Les utilisateurs peuvent également télécharger l'image cartographiée au format image.

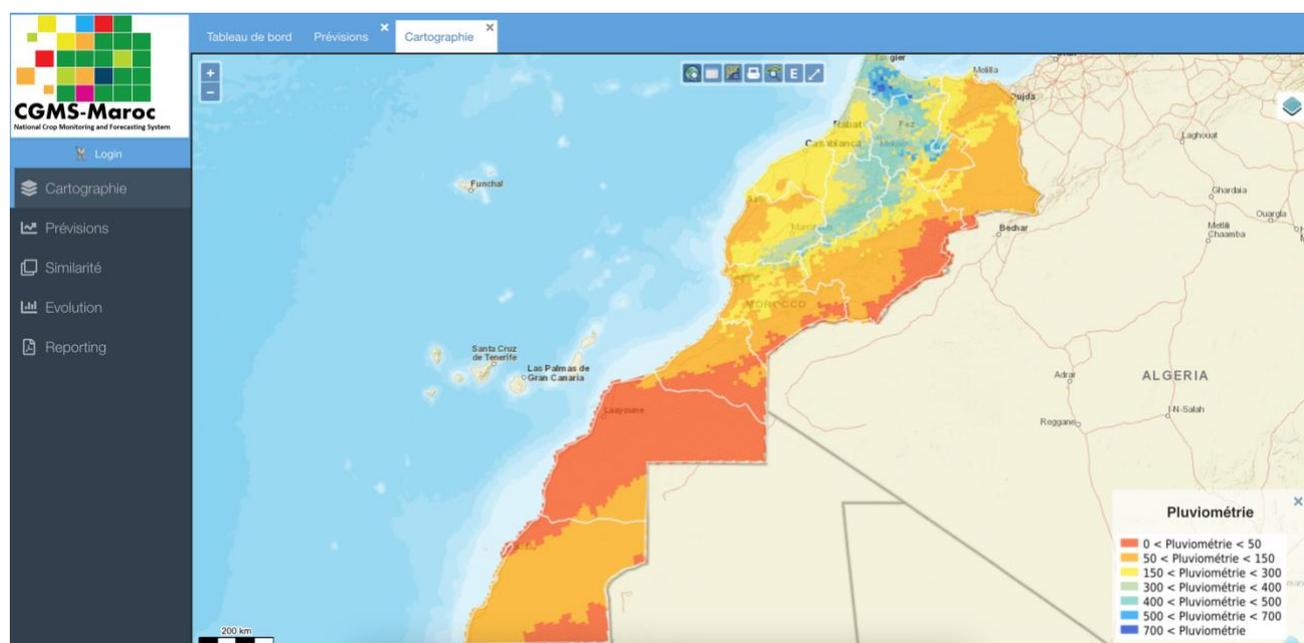


Figure 31 : Exemple d'affichage de la pluviométrie du 1^{er} septembre 2022 au 31 mai 2023 à partir de la fonctionnalité de cartographie de CGMS-Maroc.

2.7.2. Analyse de similarité

L'analyse de similarité, dont la Figure 32 présente un exemple pour la saison agricole 2022-2023, est une fonctionnalité de CGMS-Maroc permettant d'évaluer l'état d'une campagne agricole en cours en la comparant à des campagnes passées similaires. Cette approche repose sur le calcul de la distance euclidienne entre les valeurs d'un indicateur agro-climatique clé, comme la pluviométrie cumulée, observées pendant la saison en cours et celles enregistrées lors des campagnes précédentes.

Dans l'exemple présenté, l'analyse se concentre sur la pluviométrie cumulée par décennie du 1^{er} octobre 2022 au 31 mars 2023. Pour chaque saison passée, la distance euclidienne moyenne est calculée en comparant les valeurs de précipitations cumulées pour chacune des 18 décades

de cette période. Les saisons historiques sont ensuite classées par ordre croissant de distance, la saison la plus proche étant considérée comme la plus similaire à la campagne actuelle.

En plus de l'analyse de similarité, CGMS-Maroc offre également la possibilité de réaliser une analyse de comparaison (Figure 33). Cette dernière se concentre sur une seule variable, généralement la pluviométrie cumulée, et permet de comparer directement les valeurs finales de cet indicateur pour différentes campagnes agricoles. Par exemple, dans le cas de la saison 2022-2023, l'analyse de comparaison révèle que la pluviométrie cumulée du 1^{er} octobre au 31 mars (234 mm) est presque identique à celle enregistrée pendant la campagne 2001-2002 (232 mm), tandis que la saison 2007-2008 affiche un cumul de 247 mm sur la même période.

Bien que l'analyse de comparaison fournisse des informations intéressantes, elle ne capture pas la dynamique temporelle de l'indicateur étudié. C'est là que réside toute la puissance de l'analyse de similarité : elle ne se limite pas à comparer les valeurs finales, mais prend en compte l'évolution de l'indicateur tout au long de la saison. Ainsi, deux campagnes agricoles peuvent afficher des cumuls pluviométriques proches, mais avec des distributions temporelles très différentes, impactant de manière distincte le développement des cultures.

Il est important de souligner que cette méthode est très flexible et peut s'appliquer à divers indicateurs agrométéorologiques tels que l'indice d'humidité du sol (SWI), la température, le NDVI ou le LAI. Cependant, il est crucial de noter que l'analyse de similarité basée sur différents indicateurs peut aboutir à l'identification de saisons similaires différentes. Par exemple, l'année la plus proche en termes de températures n'est pas forcément la plus proche en termes de précipitations. Dans ce cas, l'expertise agronomique est essentielle pour interpréter les résultats et déterminer l'indicateur le plus pertinent en fonction des caractéristiques spécifiques de la région et des cultures étudiées.

De plus, il est théoriquement possible de réaliser une analyse de similarité en combinant plusieurs indicateurs. Bien que cette fonctionnalité ne soit pas encore disponible dans CGMS-Maroc, elle pourrait offrir une évaluation plus complète de la similarité entre les saisons. Toutefois, la mise en œuvre d'une telle approche nécessiterait de pondérer chaque indicateur en fonction de son importance relative, en s'appuyant sur les connaissances agronomiques et les spécificités locales.

L'un des principaux atouts de l'analyse de similarité est sa capacité à traduire des données complexes en une information simple et intelligible. En identifiant les campagnes agricoles passées les plus proches, elle offre aux analystes et aux décideurs une référence concrète pour évaluer les perspectives de la campagne en cours. Cette approche valorise l'expérience et la mémoire des experts, qui peuvent ainsi rapidement situer les conditions actuelles par rapport aux situations déjà rencontrées.

Toutefois, il convient de noter que si l'analyse de similarité fournit des repères précieux, elle ne dispense pas d'un examen approfondi de la spécificité de chaque campagne. Les conditions météorologiques, les pratiques culturelles et le contexte socio-économique propres à chaque saison doivent être pris en compte pour affiner l'interprétation des résultats.

Au-delà de cet outil d'analyse, CGMS-Maroc enrichit l'expérience utilisateur en permettant non seulement de télécharger ces graphiques analytiques mais aussi d'afficher et de télécharger les valeurs numériques sous-jacentes à ces analyses (Figure 34).



Figure 32 : Analyse de similarité de la campagne agricole 2022-2023 sur la base de la pluviométrie cumulée du 1^{er} octobre 2022 au 31 mars 2023.

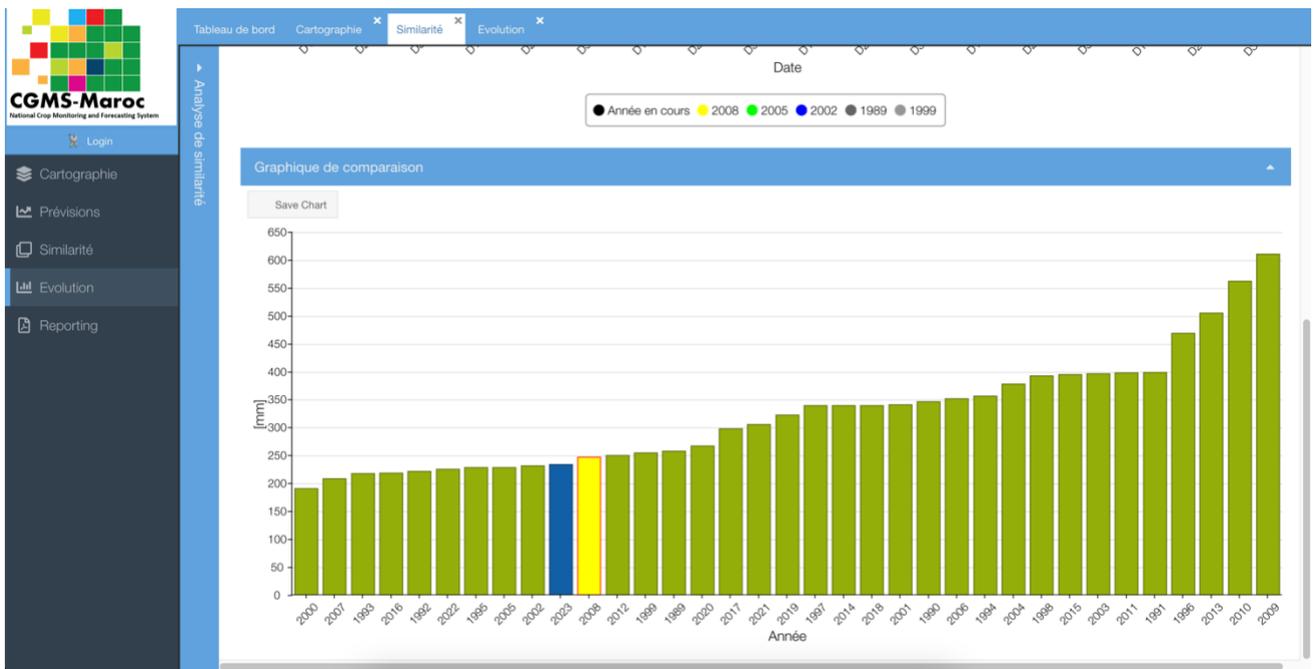


Figure 33 : Analyse de comparaison de la campagne agricole 2022-2023 sur la base de la pluviométrie cumulée du 1^{er} octobre 2022 au 31 mars 2023.

date	this_year	2008	2005	2002	1989	1999
D1-oct.	29.00	43.00	15.00	51.00	24.00	44.00
D2-oct.	54.00	53.00	17.00	58.00	57.00	44.00
D3-oct.	54.00	70.00	61.00	60.00	58.00	44.00
D1-nov.	54.00	70.00	81.00	74.00	66.00	47.00
D2-nov.	62.00	70.00	89.00	82.00	72.00	47.00
D3-nov.	63.00	119.00	97.00	86.00	115.00	50.00
D1-déc.	93.00	119.00	121.00	90.00	125.00	65.00
D2-déc.	147.00	120.00	122.00	119.00	125.00	65.00
D3-déc.	147.00	133.00	149.00	154.00	125.00	89.00
D1-janv.	148.00	175.00	149.00	155.00	136.00	103.00
D2-janv.	160.00	178.00	150.00	155.00	138.00	131.00
D3-janv.	174.00	178.00	155.00	156.00	149.00	153.00
D1-févr.	175.00	179.00	171.00	157.00	166.00	157.00
D2-févr.	186.00	199.00	171.00	172.00	171.00	167.00
D3-févr.	225.00	227.00	200.00	172.00	209.00	202.00
D1-mars	232.00	228.00	226.00	198.00	211.00	211.00
D2-mars	234.00	236.00	228.00	220.00	237.00	240.00
D3-mars	234.00	247.00	229.00	232.00	258.00	255.00

Figure 34 : Affichage des valeurs de l'analyse de similarité dans CGMS-Maroc.

2.7.3. Analyse intra-saisonnière

La fonctionnalité d'analyse intra-saisonnière de CGMS-Maroc est un outil permettant un suivi en temps réel de l'évolution des conditions agrométéorologiques tout au long de la campagne agricole. Cette approche dynamique offre une vision détaillée de la progression de la saison, en s'appuyant sur une variété d'indicateurs clés tels que la pluviométrie, les températures, l'indice d'humidité du sol (SWI), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) ou l'Indice de Surface Foliaire (LAI) (Figure 35).

L'un des principaux atouts de l'analyse intra-saisonnière réside dans sa capacité à fournir des informations actualisées à un pas de temps fin, journalier, décadaire ou mensuel. Cette haute résolution temporelle permet de suivre de près les fluctuations des conditions agrométéorologiques et leur impact potentiel sur le développement des cultures. Les utilisateurs peuvent ainsi détecter rapidement les éventuels écarts par rapport aux tendances habituelles, qu'il s'agisse de déficits pluviométriques, de vagues de chaleur ou de stress hydrique.

L'interface de CGMS-Maroc facilite l'exploration et l'interprétation des données intra-saisonnières. Les utilisateurs peuvent sélectionner les indicateurs pertinents pour leur analyse et visualiser leur évolution sous forme de graphiques interactifs. Cette représentation visuelle permet de saisir d'un coup d'œil les tendances, les anomalies et les seuils critiques pour chaque paramètre suivi.

L'analyse intra-saisonnière tire également parti de la spatialisation des données au sein de CGMS-Maroc. Les indicateurs sont disponibles à différentes échelles géographiques, depuis la commune rurale jusqu'au niveau national, en passant par les provinces et les régions. Cette granularité spatiale permet d'affiner le diagnostic en tenant compte des spécificités locales, telles que les microclimats, les types de sols ou les pratiques culturales. Les décideurs peuvent ainsi cibler leurs interventions et adapter leurs stratégies en fonction des conditions prévalant dans chaque zone.

Pour tirer pleinement parti de l'analyse intra-saisonnière, il est essentiel de la coupler avec l'expertise agronomique et la connaissance du terrain. Les indicateurs fournis par CGMS-Maroc doivent être interprétés à la lumière des caractéristiques spécifiques des cultures, des stades phénologiques et des itinéraires techniques. Cette approche intégrée permet d'affiner le

diagnostic et d'anticiper les éventuels impacts sur les rendements, la qualité des produits et la gestion des ressources.

Enfin, l'analyse intra-saisonnière ouvre la voie à une agriculture de précision, en permettant des interventions ciblées et opportunes. Par exemple, la détection précoce d'un déficit hydrique peut déclencher la mise en place de mesures d'irrigation de complément, tandis que l'identification de conditions favorables au développement de ravageurs peut guider le déploiement de traitements phytosanitaires appropriés. Cette gestion fine et réactive est un atout majeur pour optimiser les performances des cultures et minimiser les risques.

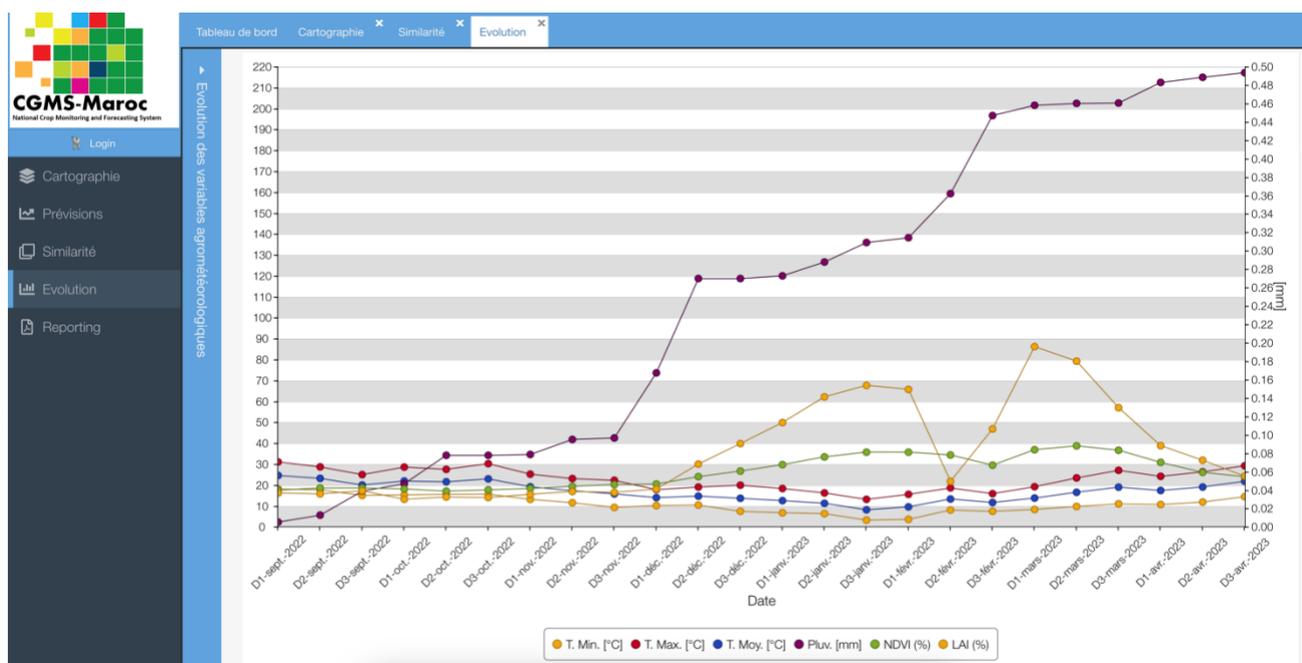


Figure 35 : Fonctionnalité d'analyse intra-saisonnière de CGMS-Maroc.

2.7.4. Génération automatique des prévisions de rendements

La fonction de prédiction des rendements céréaliers de CGMS-Maroc constitue l'une de ses caractéristiques les plus novatrices et cruciales. Dès la fin du mois de février, cette fonctionnalité est activée pour anticiper les rendements des trois principales céréales d'automne : le blé dur, le blé tendre, et l'orge, au niveau provincial, là où la céréaliculture existe (Figure 36).

Trois méthodes principales sous-tendent la prédiction des rendements dans CGMS-Maroc, chacune apportant une perspective distincte sur les estimations de production. Premièrement, l'analyse de similarité compare la saison en cours avec les saisons précédentes pour identifier des tendances de rendement basées sur les conditions agrométéorologiques similaires. Cette approche intègre une dimension historique précieuse dans l'évaluation des rendements attendus.

Ensuite, les régressions linéaires servent à modéliser la relation entre les indicateurs climatiques (pluviométrie et températures), d'humidité des sols (SWI) et de végétation (NDVI) et les rendements céréaliers, offrant des prévisions basées sur des corrélations statistiques établies. Cette méthode s'appuie sur des données historiques pour formuler des estimations précises des rendements en fonction des conditions actuelles.

La troisième méthode fait appel aux techniques d'apprentissage automatique, qui analysent de grands volumes de données pour déceler des modèles complexes et non linéaires inaccessibles aux approches traditionnelles. Cette méthode tire parti de la puissance de calcul des serveurs pour fournir des prévisions de rendement plus précises.

CGMS-Maroc permet également d'agrégier ces prévisions au niveau national, en pondérant les rendements provinciaux par la superficie de chaque province. À partir du mois de mars, et ce, jusqu'à la fin de la saison agricole en juin, les prévisions de rendement sont réactualisées quotidiennement. Cette mise à jour continue est rendue possible grâce à l'intégration automatique des dernières données satellitaires, reçues en temps réel. Cette caractéristique assure que les prévisions de rendement restent à la fois actuelles et pertinentes, reflétant fidèlement l'évolution des conditions sur le terrain.

Pour assurer la disponibilité immédiate de ces prévisions, CGMS-Maroc a adopté une stratégie de calcul nocturne. Les calculs, potentiellement longs et complexes, sont programmés pour s'exécuter durant la nuit par le serveur du Bloc 2 de CGMS-Maroc. Cette organisation permet non seulement d'optimiser les ressources de calcul disponibles mais aussi de garantir que les résultats soient prêts à être consultés instantanément dès le début de la journée suivante.

Campagne	Région ↑	Province	Superficie Moy 2 ans (Ha)	Regression		Machine Learning		Similarité	
				Modèle	Ren... Qx/Ha	Ren... Qx/Ha	Production Qx	A _i	Ren... Qx/Ha
2023-2024	Béni Mellal-Khénifra	Azilal	31080	pluv_std,pluv_P2,rfe_P2,tmin_amplitude	4.36	10.16	315 638	2008	11.62
2023-2024	Béni Mellal-Khénifra	Béni Mellal	21186	pluv_std,rfe_P2,lai_CV,lai_P0	4.87	8.50	180 144	2010	19.03
2023-2024	Béni Mellal-Khénifra	Khénifra	31500	pluv_P1,pluv_P2,lai_P2,rfe_P2	6.20	9.42	296 681	2015	17.55
2023-2024	Béni Mellal-Khénifra	Khouribga	17278	pluv_std,lai_CV,pluv_P2,rfe_std	4.79	2.04	35 194	2007	0.10
2023-2024	Drâa-Tafilalet	Midelt	5688	pluv_P0,pluv_cv,ndvi_P0,tmin_P1	13.79	10.28	58 480	2015	17.32
2023-2024	Drâa-Tafilalet	Ouarzazate	2225	rfe_P1,tmin_amplitude,pluv_P0,pluv_P2	14.12	8.59	19 118	2004	9.20
2023-2024	Fès-Meknès	Boulemane	8299	rfe_P2,pluv_P0,rfe_P0,lai_P0	7.46	4.84	40 175	2008	16.49
2023-2024	Fès-Meknès	El Hajeb	9787	pluv_P3,ndvi_P3,rfe_P1,tmin_amplitude	18.44	21.68	212 205	2010	17.59
2023-2024	Fès-Meknès	Fès	1125	pluv_P2,lai_P1,lai_CV,rfe_P1	21.32	14.61	16 438	2007	1.40
2023-2024	Fès-Meknès	Ifrane	8725	lai_P2,lai_amplitude,ndvi_P0,lai_CV	20.08	19.19	167 424	2016	18.28
2023-2024	Fès-Meknès	Meknès	10005	rfe_P1,lai_P2,tmax_P3,ndvi_P1	19.26	15.90	159 123	2003	16.02
2023-2024	Fès-Meknès	Saïrou	12975	pluv_P1,tmin_std,lai_P0,ndvi_P0	12.97	19.01	246 595	2020	10.80
2023-2024	Fès-Meknès	Tacountate	50750	lai_P2,tmin_std,ndvi_P1,tmin_P3	18.48	13.08	663 858	2006	18.49
2023-2024	Fès-Meknès	Taza	51650	ndvi_P1,lai_P3,rfe_P1,ndvi_P0	22.50	15.12	781 090	2013	21.90
2023-2024	Grand Casablanca-...	Benslimane	17398	lai_P2,ndvi_P0,pluv_P2,pluv_P3	7.45	6.36	110 629	2012	8.12
2023-2024	Grand Casablanca-...	Berrechid	25780	lai_P1,rfe_P1,lai_P2,tmax_P1	11.10	15.85	408 596	2019	12.00
2023-2024	Grand Casablanca-...	El Jadida	22818	rfe_P1,rfe_std,pluv_P3,tmin_P1	3.59	4.20	95 846	2008	4.23

Figure 36 : Fonctionnalité de prévision de rendements des céréales (blé dur, blé tendre et orge) au niveau provincial.

2.7.5. Rapports automatiques

CGMS-Maroc offre une manière pratique de générer automatiquement un rapport en un seul clic via sa fonctionnalité de reporting, fournissant des indicateurs saisonniers essentiels tels que les précipitations, la température et les indices de végétation pour chaque région administrative (Figure 37). Ce rapport est spécialement conçu pour aider les directions agricoles régionales, offrant un aperçu détaillé de la saison agricole dans chaque province ou commune de la région. Plus en détail, ces rapports automatiques sont conçus pour simplifier le suivi des conditions agricoles et environnementales dans chaque région. Ils fournissent des informations clés, notamment les données météorologiques telles que les précipitations et la température, ainsi que les indices de végétation qui sont cruciaux pour évaluer la vitalité des cultures. L'interface de CGMS-Maroc permet de générer ces rapports en un seul clic, ce qui permet d'économiser du temps et des efforts. Une fois générés, ils sont disponibles au format PDF, ce qui les rend faciles à partager avec toutes les parties prenantes concernées.



Figure 37 : Fonctionnalité de reporting automatique de CGMS-Maroc.

III. Architecture informatique de CGMS-Maroc

L'architecture informatique de CGMS-Maroc est le socle technologique qui permet au système d'intégrer de manière fluide et efficace les flux de données hétérogènes, d'appliquer des modèles mathématiques complexes et de diffuser les résultats via des interfaces conviviales. C'est la colonne vertébrale invisible qui garantit la performance, la fiabilité et l'évolutivité de l'ensemble.

La séparation physique des deux blocs de CGMS-Maroc répond à des impératifs de sécurité et de performance. Elle permet de confiner les traitements lourds liés aux données météorologiques dans un environnement maîtrisé, tout en exposant les fonctionnalités de consultation et d'analyse sur une plateforme ouverte et accessible.

Mais au-delà de cette segmentation, c'est bien l'intégration étroite entre ces deux blocs qui fait la force de CGMS-Maroc. Des protocoles d'échange standardisés et des mécanismes de synchronisation assurent une circulation continue et bidirectionnelle des données et des résultats. Cette architecture orientée services favorise l'interopérabilité et facilite l'ajout ou l'amélioration de modules fonctionnels.

Une attention particulière a été portée à la scalabilité et à la résilience du système. L'utilisation de technologies de containerisation et d'orchestration permet de gérer finement l'allocation des ressources en fonction de la charge. Des mécanismes de basculement et de réplication garantissent une haute disponibilité, même en cas de panne ponctuelle.

La sécurité n'a pas été négligée, avec la mise en place de mesures de protection à plusieurs niveaux : firewalls, chiffrement des communications, contrôle d'accès par rôle, monitoring des activités suspectes... L'objectif est de protéger l'intégrité et la confidentialité des données sensibles, tout en maintenant un haut niveau de service.

Sur le plan logiciel, CGMS-Maroc s'appuie sur une combinaison de composants open source éprouvés et de développements spécifiques. Le choix de standards ouverts et de formats interopérables facilite l'interfaçage avec des systèmes tiers et l'adaptation à de nouveaux besoins. Une approche DevOps favorise la collaboration entre équipes de développement et d'exploitation pour des mises en production agiles et sécurisées.

Cette architecture modulaire et extensible confère à CGMS-Maroc une grande plasticité pour intégrer de nouvelles sources de données (objets connectés, applications mobiles...), enrichir ses capacités d'analyse (intelligence artificielle, big data...) et diversifier ses canaux de diffusion (API, chatbots...). Elle lui permet d'évoluer en phase avec les avancées technologiques et les attentes croissantes des utilisateurs.

Ce chapitre propose une immersion dans l'architecture informatique qui conjugue puissance, agilité et ouverture. Il détaillera ses principes structurants, ses composants clés et ses choix technologiques, sans occulter les défis de son exploitation au quotidien. Il montrera comment ce socle technologique à la fois robuste et flexible fournit à CGMS-Maroc les fondations nécessaires pour remplir durablement sa mission d'aide à la décision agronomique face aux aléas climatiques.

1. Architecture du Bloc 1 : Infrastructure informatique de la base de données climatique

Le Bloc 1 est hébergé sur deux serveurs dédiés situés dans le centre de calcul de la DGM, au sein du rack attribué au Centre National du Climat (CNC). Ce datacenter constitue le cœur de l'infrastructure informatique de la DGM, abritant les ressources matérielles critiques pour le fonctionnement de l'ensemble de ses systèmes. Il a été conçu pour offrir un environnement hautement contrôlé et sécurisé, garantissant un haut niveau de disponibilité, de performance et de redondance des équipements.

Au cours des dernières années, la DGM a entrepris une mise à niveau significative des performances techniques et environnementales de son centre de calcul. Cette modernisation a permis d'atteindre plusieurs objectifs clés :

- La conformité aux normes les plus exigeantes des datacenters modernes, avec une certification Tier III+++ selon le standard TIA 942 ;
- Un taux de disponibilité proche de 100%, grâce à des mesures poussées de sécurisation et de redondance des installations ;
- Le renouvellement complet des infrastructures techniques (électricité, refroidissement, détection incendie, câblage...) ;
- L'adoption de technologies innovantes et éco-responsables, telles que l'extinction incendie par brouillard d'eau, la climatisation par free-cooling et confinement des allées, et l'éclairage basse consommation par LED.

Tous les racks¹⁸ sont sécurisés par des portes verrouillées pour contrôler strictement les accès physiques aux serveurs. Ils bénéficient d'une alimentation électrique redondante et communiquent via un réseau à très haut débit en fibre optique. Le refroidissement efficace des machines est assuré par une climatisation de précision soufflant l'air traité par un faux-plancher.

L'implémentation technique et opérationnelle du Bloc 1 de CGMS-Maroc repose sur une infrastructure informatique robuste hébergée au sein du centre de calcul sécurisé de la DGM. Cette infrastructure assure la disponibilité, la performance et la sécurité de l'ensemble des composants logiciels et matériels sous-jacents à la chaîne de traitement des données météorologiques.

1.1. Architecture matérielle redondante

Le cœur du dispositif est constitué de deux serveurs physiques identiques de type IBM System x3650, offrant une redondance matérielle complète. Dotés de processeurs Intel Xeon multicœurs et de 32 Go de RAM, ils disposent d'une puissance de calcul et d'une capacité mémoire adaptées aux traitements intensifs réalisés quotidiennement.

Le stockage des données est assuré par des baies de disques montées en RAID-5, garantissant à la fois des performances d'accès élevées et une tolérance aux pannes. La capacité utile atteint 584 Go par serveur et peut être étendue par ajout de disques à chaud.

Les serveurs sont interconnectés au réseau local de la DGM par des liens Ethernet Gigabit redondants, autorisant des débits de 1 Gb/s en full-duplex. Ils sont alimentés électriquement par deux arrivées distinctes, chacune secourue par un onduleur, éliminant tout risque de coupure.

L'ensemble des équipements est hébergé dans deux baies, chacune disposant d'un contrôle d'accès par badge et d'une surveillance vidéo. La climatisation maintient une température constante par confinement des allées froide et chaude.

1.2. Environnement logiciel hautement sécurisé

Les serveurs fonctionnent sous le système d'exploitation Red Hat Enterprise Linux en version 6, réputé pour sa stabilité et ses performances. La configuration du système a été durcie selon les meilleures pratiques de sécurité pour minimiser la surface d'attaque.

¹⁸ Un rack informatique, également connu sous le nom de baie de serveur, est une structure physique destinée à abriter des équipements électroniques, des ordinateurs et des serveurs, ainsi que d'autres dispositifs de réseau et de télécommunication.

Un accès aux serveurs nécessite un passage par un bastion d'authentification et l'utilisation du protocole SSH¹⁹. Seuls les comptes nominatifs des administrateurs dûment habilités sont autorisés à s'y connecter, avec une traçabilité complète des sessions.

Le logiciel antiviral est mis à jour quotidiennement. Un pare-feu applicatif filtre les flux entrants et sortants en n'autorisant que les services nécessaires au fonctionnement de CGMS-Maroc. Les mises à jour de sécurité critiques des composants logiciels sont appliquées chaque semaine.

La base de données est gérée par le système de gestion Oracle Database en version 11g. Son schéma a été optimisé pour répondre aux requêtes complexes de l'application avec des temps de réponse inférieurs à 100 ms. La volumétrie actuelle est estimée à 80 Go avec une croissance prévisionnelle de 15% par an.

Les développements spécifiques sont réalisés en langage C++ en s'appuyant sur des bibliothèques éprouvées. Le code source est documenté et des revues régulières sont menées pour vérifier l'absence de failles. Des tests unitaires et d'intégration sont exécutés à chaque mise en production pour valider l'absence de régression.

1.3. Supervision et exploitations optimisées

L'ensemble des éléments d'infrastructure ainsi que les processus métiers sont supervisés en temps réel par l'outil Centreon, qui consolide les données de monitoring système et applicatif. Des alertes sont remontées en cas de franchissement des seuils sur la consommation CPU, mémoire ou disque, les temps de réponse ou le statut des batchs²⁰.

Une astreinte 24/7 des équipes d'exploitation et un support éditeur sont prévus pour assurer un délai d'intervention maximal de 4h en cas d'incident de sévérité 1. Le help desk utilisateur est assuré en horaires de bureau avec un engagement de réponse en moins de 2h.

Un portail documentaire en ligne fournit aux exploitants toutes les procédures opérationnelles, les manuels administrateur, les cahiers de recette et les plans de reprise d'activité. Il centralise également les demandes d'évolution et les rapports d'incident pour faciliter le dialogue avec les équipes de développement.

Un comité de pilotage mensuel réunit les responsables métiers et techniques pour faire le point sur les indicateurs de tenue en condition opérationnelle du système et arbitrer les priorités d'évolution. Cette gouvernance collégiale permet d'assurer dans la durée un alignement optimal de la feuille de route technique avec les attentes des utilisateurs.

L'hébergement des serveurs du Bloc 1 au sein du data center de la DGM offre un haut niveau de disponibilité et de sécurité. Ce choix permet à l'équipe infrastructure de se concentrer sur son cœur de métier et de bénéficier des engagements contractuels de qualité de service de la DGM. La localisation des données sur le territoire national garantit par ailleurs le respect de la souveraineté sur cet actif stratégique.

¹⁹ Le protocole SSH est une méthode de communication sécurisée utilisée pour accéder à distance à des serveurs et des systèmes informatiques avec cryptage des données et authentification des utilisateurs.

²⁰ C'est une méthode de traitement des données où les instructions sont exécutées en groupe ou "par lot" sans intervention de l'utilisateur.

2. Architecture du Bloc 2 : Intégration, analyse et visualisation de données multi-sources

L'architecture informatique du Bloc 2 de CGMS-Maroc (Figure 38) est structurée en six compartiments fonctionnels distincts mais interconnectés, garantissant une séparation claire des responsabilités tout en assurant une collaboration de l'ensemble.

1. Le premier compartiment, dédié à la récupération des données (Data Retrieval), collecte automatiquement les données brutes provenant de quatre sources principales : données météorologiques et agrométéorologiques quotidiennes de la DGM, données satellitaires issues de Copernicus et Modis, et statistiques agricoles de fin de saison du DSS. Des scripts planifiés interrogent les APIs²¹ et les répertoires de ces fournisseurs pour alimenter le système en données fraîches.
2. Le second compartiment (Preprocessing) prend en charge le prétraitement des données collectées. Cette étape cruciale vise à corriger, filtrer, homogénéiser et restructurer les données brutes pour les rendre conformes au modèle de données cible. Des bibliothèques spécialisées comme GDAL²² sont mises à profit pour le traitement des données géospatiales. Les données prétraitées sont ensuite chargées dans la base de données centrale.
3. Le troisième compartiment est le serveur de base de données (Database Server), véritable colonne vertébrale du système. Basé sur PostgreSQL et son extension spatiale PostGIS²³, il a été finement optimisé, notamment via une refonte des index, pour encaisser les requêtes lourdes. Il structure les données en quatre types de tables : référentiels géographiques, données brutes par maille, agrégats par entité administrative, et statistiques agricoles. Une API REST²⁴/JSON²⁵ permet l'interrogation et la mise à jour de ce référentiel.
4. Le quatrième compartiment (Postprocessing) orchestre les traitements métiers et scientifiques appliqués quotidiennement aux données. Implémentés en Python, ces workflows calculent des indicateurs et statistiques à diverses échelles, exécutent des modèles agronomiques, et génèrent des produits cartographiques. À partir du 1er février, des modèles prédictifs basés sur les machines learning estiment les rendements en croisant données historiques et conditions en cours.
5. Le cinquième compartiment regroupe les applications côté serveur (Server-side Apps). Une application métier Python y est déployée pour exposer les services de calcul et les APIs. Elle s'interface avec MapServer pour produire des cartes et des services géographiques conformes aux standards de l'OGC²⁶. Un serveur web Apache fait office de frontal pour intercepter les requêtes clientes, les router vers l'application métier, et retourner les réponses après traitement.

²¹ Application Programming Interface : ensemble de règles et de protocoles permettant à différents logiciels de communiquer entre eux.

²² Geospatial Data Abstraction Library : bibliothèque logicielle traduisant et traitant des données géospatiales vectorielles et matricielles.

²³ PostGIS : extension du système de gestion de base de données PostgreSQL pour le stockage et le traitement des données spatiales.

²⁴ Representational State Transfer : style d'architecture logicielle pour les systèmes hypermédias distribués comme le World Wide Web

²⁵ JavaScript Object Notation : format de données textuelles léger, dérivé de la notation des objets du langage JavaScript, utilisé pour l'échange de données structurées.

²⁶ Open Geospatial Consortium : organisme international de normalisation qui développe et promeut des standards ouverts pour les données et services géospatiaux.

- Le sixième et dernier compartiment est dédié aux applications côté client (Client-side Apps). Une application web monopage²⁷ (SPA) fait office d'interface utilisateur conviviale et ergonomique. Développée avec les frameworks²⁸ JavaScript ExtJS et OpenLayers, elle offre des composants interactifs riches comme une cartographie dynamique, des tableaux et graphiques de données, ainsi que des outils d'export et d'impression. L'interface communique avec le serveur via des appels AJAX²⁹/JSON pour un rendu fluide côté client. Un portail web responsive sert de point d'entrée unique à la plateforme.

Les six compartiments collaborent pour orchestrer le flux de données, depuis leur collecte jusqu'à leur restitution à l'utilisateur final. L'architecture orientée services et modulaire facilite le passage à l'échelle et l'évolutivité de la plateforme par simple ajout de modules ou ressources.

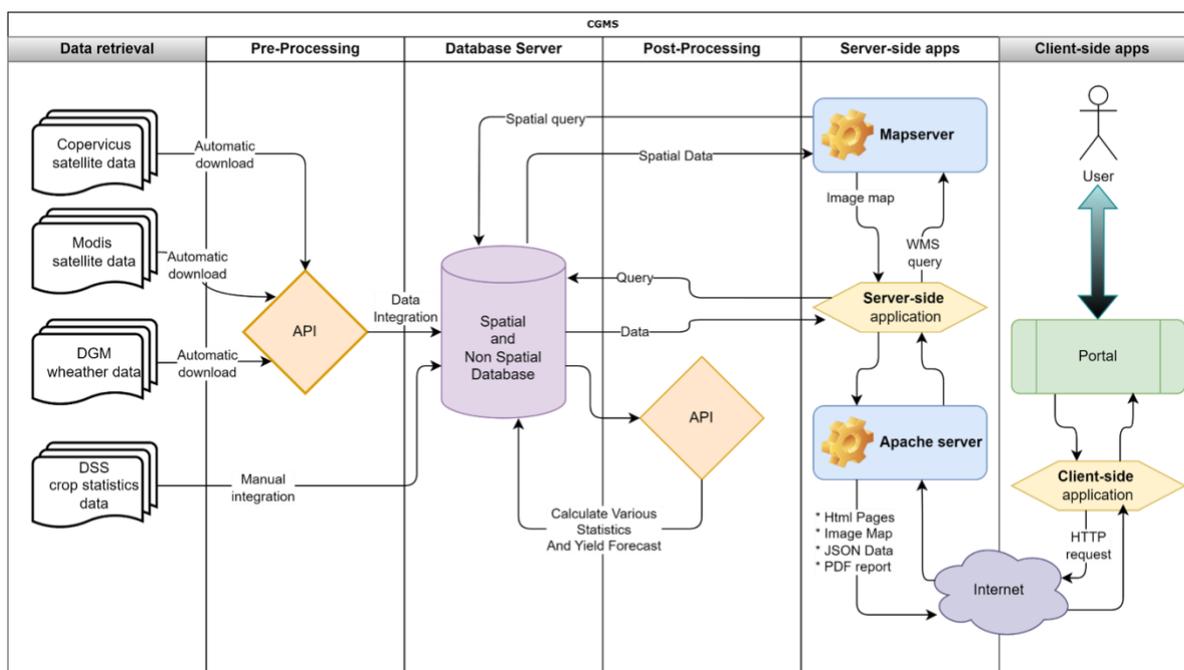


Figure 38 : Architecture informatique du Bloc 2 de CGMS-Maroc.

²⁷ Application web accessible via une page web unique qui permet de fluidifier l'expérience utilisateur en évitant le rechargement des pages.

²⁸ Framework : ensemble cohérent de composants logiciels structurels qui sert à créer les fondations et les grandes lignes d'un logiciel.

²⁹ Asynchronous JavaScript and XML : ensemble de technologies permettant de construire des applications Web dynamiques et interactives.

IV. Feuille de route pour l'amélioration de CGMS-Maroc

CGMS-Maroc est devenu un système opérationnel de référence répondant aux attentes du ministère de l'Agriculture et suivant les meilleurs standards internationaux. Toutefois, face à l'accélération du changement climatique, et dans le cadre de la stratégie "Génération Green" du Maroc, une feuille de route ambitieuse s'impose pour consolider CGMS-Maroc en tant qu'outil d'aide à la décision de pointe pour la gestion des cultures en contexte de sécheresse récurrente.

De nombreux systèmes technologiques de suivi et de prévision des rendements agricoles ont émergé dans le monde, constituant des références pertinentes pour CGMS-Maroc (Tableau 9). On peut citer le Système Européen MARS³⁰, CropWatch³¹ développé par l'Académie Chinoise des Sciences, l'outil américain USDA-FAS³², le CRAFT³³ du CGIAR ou encore l'Integrated Canadian Crop Yield Forecaster³⁴ (ICCYF).



Ces systèmes démontrent les potentialités des technologies modernes - intelligence artificielle, télédétection par satellite, modélisation numérique - pour améliorer le suivi et la prévision des rendements à différentes échelles. Leur approche intégrée fusionnant diverses données météorologiques, agronomiques et satellitaires fournit des informations très détaillées sur l'état des cultures en temps réel.

Chaque système présente des forces spécifiques. Ainsi, le MARS européen se distingue par la grande précision de ses prévisions au niveau national. CropWatch assure une surveillance continue et émet des bulletins de référence. L'outil canadien ICCYF fournit des mises à jour en temps réel. Quant au CRAFT, il génère des scénarios interactifs aux échelles locales.

Ces succès reposent sur plusieurs piliers : l'intégration de données multi-sources, l'utilisation de la télédétection satellitaire, l'implication d'analystes experts, l'évaluation continue des performances, et la diffusion publique régulière des résultats.

Ces bonnes pratiques inspirent des pistes d'amélioration de CGMS-Maroc, tant au niveau des données recueillies, des modèles de prévision que de l'implication des parties prenantes. À court terme, les recommandations prioritaires sont : optimiser les statistiques de rendement, fusionner les données météorologiques, développer un masque de culture dynamique, transformer

³⁰ <https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/>

³¹ <http://www.cropwatch.com.cn/>

³² <https://www.fas.usda.gov/>

³³ Le CGIAR est le plus grand réseau mondial de recherche agricole pour un futur sans faim. Il s'agit d'un partenariat scientifique regroupant des centaines d'organisations à travers le monde avec pour objectif d'accélérer l'innovation agricole au service de la sécurité alimentaire.

³⁴ https://www.statcan.gc.ca/en/statistical-programs/document/5225_D1_T9_V1

CGMS-Maroc en système collaboratif, renforcer l'évaluation par les pairs et améliorer la diffusion publique.

La mise en œuvre de cette feuille de route ambitieuse positionnera CGMS-Maroc comme système de tout premier plan au niveau international. Il deviendra une référence au service de l'agriculture durable face aux défis posés par le changement climatique.

Tableau 9 : Résumé des caractéristiques et atouts clés de chaque système de prévision de rendement.

Système	Organisme	Données utilisées	Méthodologie	Couverture	Points forts
CGMS-Maroc	INRA, IAV Hassan II, DGM (Maroc), DSS	Données météo, télédétection, statistiques agricoles	Régression linéaire, apprentissage automatique	Maroc	Plateforme unifiée, masque de culture dynamique
MCYFS	JRC (Commission Européenne)	Données météo, télédétection, modèle WOFOST	Modèles statistiques et agrométéorologiques	Union Européenne	Prévisions précises au niveau national
CropWatch	Institute of Remote Sensing and Digital Earth (Chine)	Données météo, télédétection	Modèles statistiques et apprentissage automatique	International	Surveillance en temps réel, bulletins trimestriels
USDA-FAS	Département de l'Agriculture des États-Unis	Données météo, télédétection	Régression, années analogues	International	Vaste gamme de produits d'information
CRAFT	CCAFS	Données météo, télédétection, modèles de cultures	Simulations de modèles de cultures	Asie du Sud	Scénarios interactifs, prévisions au niveau local
ICCYF	Agriculture Canada	Données météo, télédétection	Modèles statistiques et de séries chronologiques	Canada	Mises à jour en temps réel, système d'alerte

1. Statistiques des rendements céréaliers

Le système CGMS-Maroc réalise actuellement les prévisions de rendements céréaliers à l'échelle des provinces car les statistiques disponibles à cette échelle spatiale. Étant donné que les provinces englobent de multiples communes et que toutes les communes ne sont pas représentées dans la base de données de la DSS, la construction de modèles statistiques précis pour la prévision des rendements céréaliers à l'échelle communale est difficile. Le projet ACCAGRIMAG a cherché à remédier à ces limites en spatialisant les rendements pour toutes les communes, dans le but de prédire les rendements à l'échelle des communes rurales à l'aide du système CGMS-Maroc (Figure 39). Un modèle géostatistique a été développé pour comprendre les relations spatiales entre les rendements dans les unités échantillonnées. Bien que prometteur, ce modèle géostatistique a révélé des erreurs relatives surpassant 10% dans diverses zones agricoles, révélant des imprécisions dues tant au manque d'échantillons qu'aux données absentes pour certaines campagnes agricoles. Pour améliorer la précision des prévisions de

rendement à l'échelle communale, il sera essentiel d'envisager des stratégies d'échantillonnage plus fines.

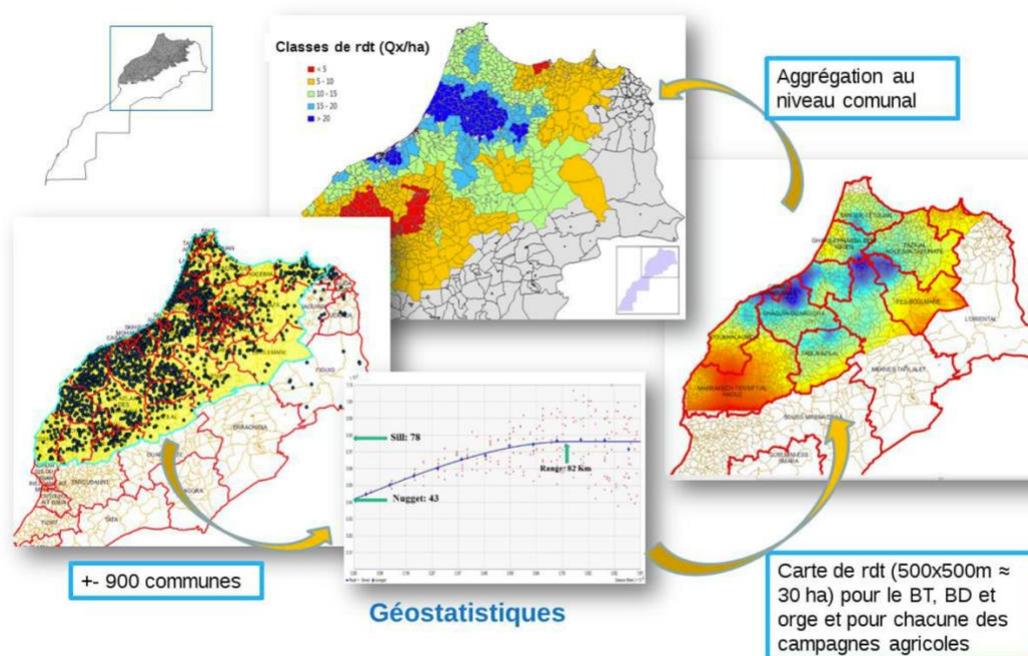


Figure 39 : Spatialisation des données de rendements observés à partir des unités d'échantillonnage (Balaghi et al., 2017).

Pour améliorer la précision de la prévision des rendements à plus petite échelle administrative au Maroc, il est essentiel de prendre en compte des stratégies d'échantillonnage plus complètes et systématiques. La complémentarité des données existantes avec des sources et des méthodes alternatives, telles que les données de télédétection ou les techniques d'apprentissage automatique, peut fournir des informations supplémentaires et améliorer la précision des prévisions à des échelles plus fines. Ces approches peuvent contribuer à capturer les variations à petite échelle des conditions météorologiques, des indices de végétation et d'autres facteurs ayant un impact sur les rendements des cultures.

2. Masque céréalier dynamique

Les masques de culture jouent un rôle essentiel dans le filtrage spatio-temporel des données satellitaires pour l'analyse agricole. Plusieurs initiatives mondiales ont généré des cartes d'occupation des sols, comme les produits GLC2000 (Mayaux et al., 2004) et GlobCover (Tchunte et al., 2011 ; Neumann et al., 2007), références majeures malgré des limitations en termes de précision et de résolution spatiale.

L'initiative GlobCover³⁵ de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a par exemple fourni une carte, à 300 mètres de résolution spatiale, des types d'occupation des sols au Maroc. Néanmoins, la fiabilité de ces bases de données spatiales est affectée par le peu de données terrain de

³⁵ http://due.esrin.esa.int/page_project68.php

validation. Surtout, ces masques restent figés à une date donnée, alors que les assolements varient fortement d'une campagne à l'autre sous l'influence des conditions agro-climatiques.

Un enjeu crucial est donc le développement de masques de culture dynamiques, remis à jour chaque année par traitement automatisé d'images satellitaires à haute résolution temporelle. Cette adaptation saisonnière est indispensable pour refléter l'évolution spatio-temporelle des zones agricoles. Au Maroc, l'évolution des assolements céréaliers à travers les stratégies agricoles du "Plan Maroc Vert" et de "Génération Green" rend obsolète le masque statique de CGMS-Maroc.

Seul un masque dynamique annuel peut tracer fidèlement les fluctuations des zones céréalières sous l'effet du climat. Sa production nécessite néanmoins des efforts méthodologiques considérables, par traitement de séries temporelles d'images satellites et intégration de données de vérification terrain. Ce masque dynamique représente un enjeu méthodologique majeur pour optimiser les performances de CGMS-Maroc.

3. Système collaboratif de suivi des cultures

Les données météorologiques recueillies par les stations au sol constituent une composante cruciale pour la prévision des rendements des cultures pluviales dans des systèmes tels que CGMS-Maroc. Parallèlement, les indices satellitaires, notamment le NDVI, jouent un rôle tout aussi essentiel, permettant de décrire de manière efficace l'impact des conditions météorologiques sur la végétation. La disponibilité d'images satellites à résolution moyenne, telles que celles fournies par le programme Copernicus, accroît davantage la pertinence de ces données pour la surveillance à grande échelle. Cependant, bien que les données spatiales apportent une perspective macroscopique précieuse, elles peuvent occulter des détails locaux qui exercent une influence significative sur les rendements.

Il est impératif de noter que les rendements des cultures, à l'échelle des parcelles, dépendent d'une multitude de facteurs locaux, parfois difficiles à appréhender via la télédétection. Parmi ces facteurs, on compte les conditions météorologiques locales, les stress d'origine biotique (tels que les maladies et les ravageurs) et abiotique (comme les vents forts, la grêle, le sirocco), la topographie, la nature des sols, et les pratiques culturales (comprenant le choix des variétés, la fertilisation, les traitements phytosanitaires, etc.). Ces éléments, bien que de portée microscopique, jouent un rôle déterminant et peuvent influencer de manière substantielle la précision des prévisions, en particulier aux échelles fines.

Par conséquent, un système de surveillance des cultures performant se doit d'harmoniser les données spatiales avec des informations locales d'une granularité plus fine. Dans cette optique, l'enrichissement de CGMS-Maroc au moyen de données quantitatives et qualitatives collectées via des applications mobiles représente une stratégie judicieuse : ces données pourraient englober à la fois des observations humaines et des informations issues de capteurs au sol (Figure 40). Le crowdsourcing s'impose comme une alternative intéressante pour diversifier davantage les sources de données. La mise en place d'un mécanisme de rétroaction des utilisateurs constituerait une manière efficiente d'accélérer la collecte participative d'informations.

Une telle interaction bidirectionnelle apporterait des avantages substantiels : elle rehausserait à la fois la collecte de données et l'affinement des modèles prédictifs de CGMS-Maroc. Ces données partagées faciliteraient les échanges de connaissances entre les différentes régions et favoriseraient la résolution collaborative des problèmes. La documentation détaillée des risques biotiques et abiotiques, ainsi que des meilleures pratiques agricoles, sous forme de guides destinés aux agriculteurs et aux conseillers, pourrait, une fois intégrée dans les modèles, contribuer de manière significative à l'amélioration du suivi local des cultures et des prévisions de rendement. Par conséquent, cela encouragerait également la promotion des bonnes pratiques agricoles à l'échelle nationale.

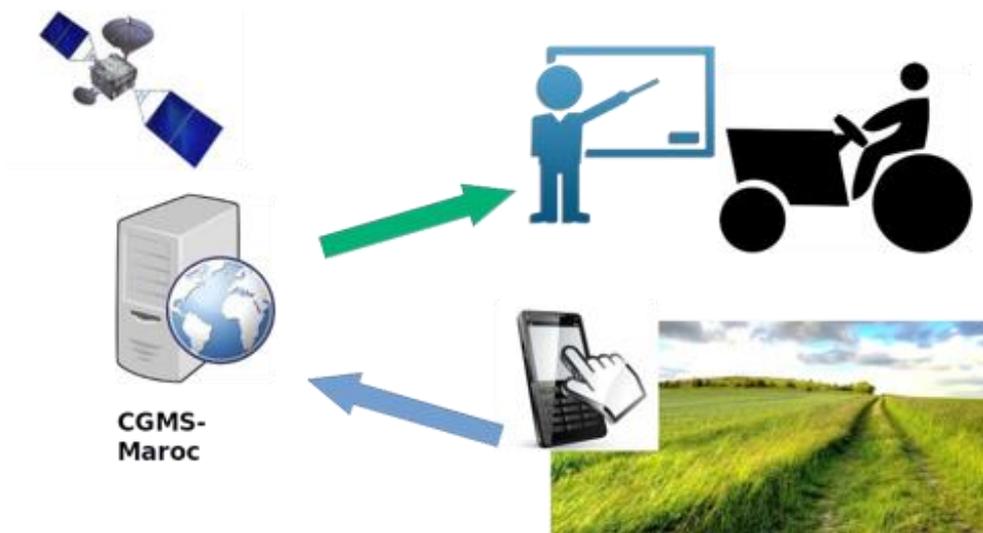


Figure 40 : Schéma de système collaboratif pour CGMS-Maroc.

4. Prévisions météorologiques saisonnières

Les prévisions saisonnières consistent à prédire des paramètres météorologiques tels que les températures moyennes et les totaux de précipitations pour les quatre prochains mois. Il ne s'agit pas de prévisions traditionnelles détaillant des conditions météorologiques spécifiques (comme le type de temps, les températures minimales et maximales quotidiennes, la force et la direction du vent, etc.). Au contraire, elles fournissent une prédiction des grandes tendances météorologiques pour une saison donnée. Cette tendance est exprimée en termes de trois scénarios types correspondant à trois classes : au-dessus, en dessous ou près de la moyenne. Cela se traduit par des termes tels que "chaud," "normal," ou "froid" pour la température, et "humide," "normal," ou "sec" pour les précipitations (Figure 41 et Figure 42). Par exemple, l'objectif serait de déterminer si l'hiver à venir sera plus froid ou plus humide que la normale, ou simplement proche de la moyenne saisonnière.

L'intégration de prévisions météorologiques saisonnières dans les systèmes de suivi et de prévision des cultures, tels que le CGMS-Maroc, fournit des informations anticipatives et opportunes à un éventail d'acteurs, notamment les agriculteurs, les conseillers agricoles, les décideurs politiques, et bien d'autres. Cela contribue à la promotion de pratiques agricoles durables et résilientes de plusieurs manières.

- **Amélioration de la planification et de la prise de décision** : Les prévisions météorologiques saisonnières fournissent aux agriculteurs et aux conseillers agricoles des données essentielles qui éclairent leurs processus de planification et de prise de décision. Cela englobe les décisions concernant les périodes de semis, un aspect essentiel au Maroc avec des implications significatives sur les rendements céréaliers.
- **Gestion des risques** : En ayant un aperçu de la météo de la saison à venir, ces prévisions permettent aux agriculteurs de mieux gérer les risques liés à des événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses, les inondations ou les vagues de chaleur. Ils peuvent mettre en œuvre des mesures préventives pour minimiser les pertes potentielles.
- **Optimisation des ressources** : Les prévisions saisonnières aident à optimiser l'utilisation de ressources telles que l'eau et les engrais. Par exemple, en prévision d'une saison sèche, les agriculteurs peuvent adopter des pratiques de conservation de l'eau ou opter pour des cultures plus résistantes à la sécheresse. À l'inverse, une prévision de saison humide peut

inciter à se préparer aux maladies et aux ravageurs potentiels qui prospèrent dans de telles conditions.

- **Prévision des rendements des cultures** : Les prévisions météorologiques saisonnières peuvent être intégrées dans les modèles de cultures pour prédire les rendements des cultures bien à l'avance. Cette capacité est cruciale pour la planification de la sécurité alimentaire et la prévision des marchés de produits agricoles.

Les services climatiques constituent un élément central des activités de la DGM, fournissant un soutien essentiel à divers secteurs socio-économiques. Cette gamme de services s'est élargie pour inclure les prévisions saisonnières, avec la production de bulletins de prévisions saisonnières débutant en 1996. Ces bulletins ont émergé de la participation de la DGM à deux projets internationaux d'importance, le projet El Masifa soutenu par l'Union européenne et le projet Al Moubarak financé par l'USAID. À partir de 2012, la DGM a commencé à produire des prévisions saisonnières probabilistes en s'appuyant sur le modèle climatique océan-atmosphère ARPEGE-Climat V5.2, un modèle à l'échelle spatiale d'environ 55 km. Ces prévisions ont été continuellement améliorées au fil du temps, aboutissant à la création de bulletins de prévisions intra-saisonnières, à la fois mensuels et hebdomadaires, en 2020.

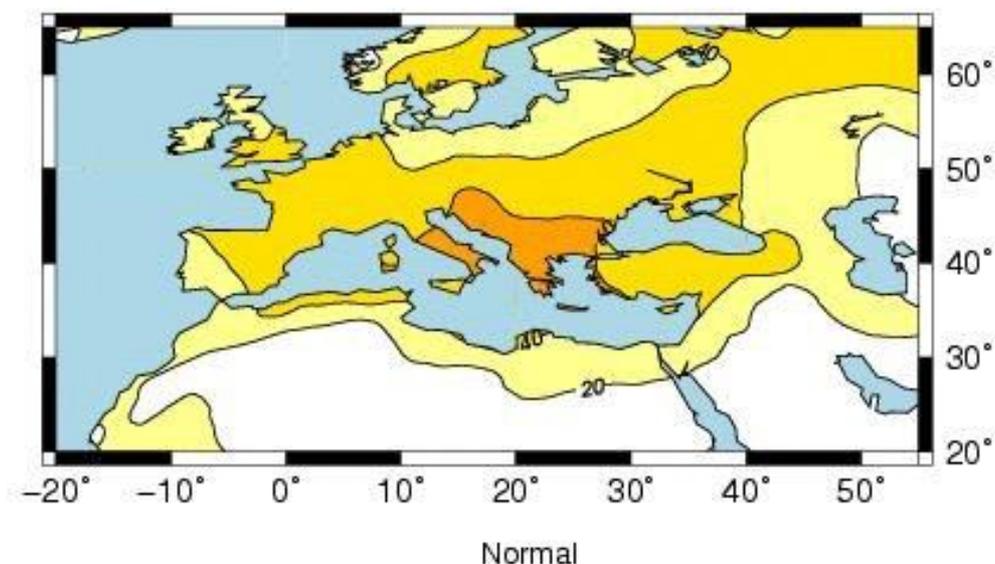


Figure 41 : Probabilité de saison en-dessous de la normale pour février, mars et avril 2021 (Source: DGM).

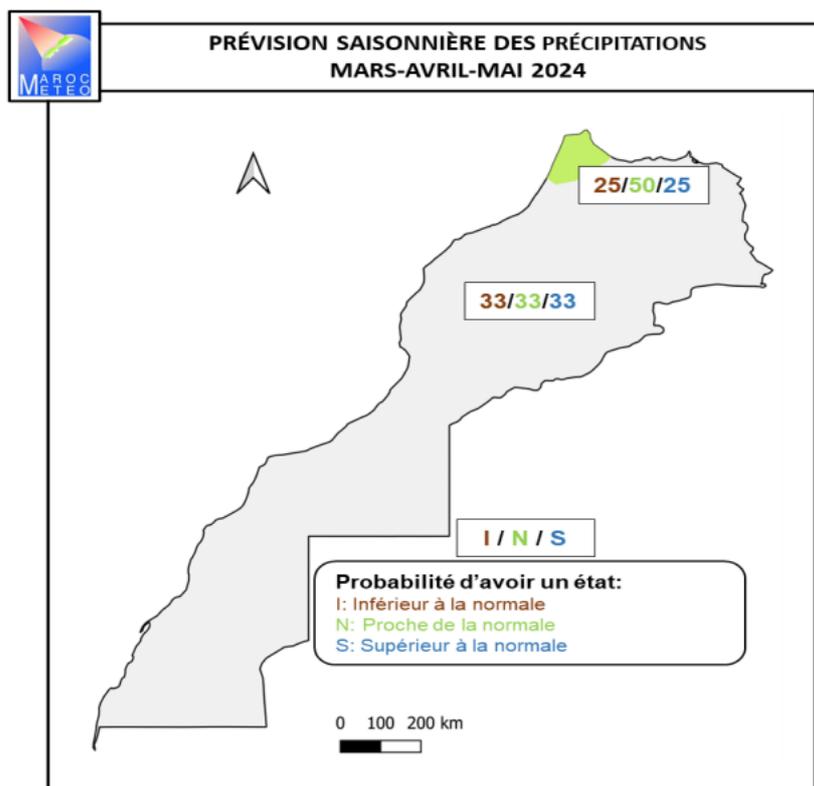


Figure 42 : Probabilité de saison proche de la normale pour à l'extrême nord du Maroc mars, avril, mai 2024 (Source : DGM).

La prévision intra-saisonnière revêt une importance cruciale pour la gestion et la planification agricoles au Maroc, ainsi que pour l'estimation des rendements céréaliers. Les prévisions à court et moyen terme fournissent des informations essentielles pour le suivi des cycles de croissance des cultures, permettant d'optimiser les stratégies d'irrigation, de fertilisation et de protection phytosanitaire. Elles éclairent les décisions tactiques des agriculteurs et des gestionnaires de l'eau pour atténuer les impacts d'événements météorologiques extrêmes et maximiser la productivité.

Dans cette optique, les cartes présentées en Figure 43 offrent un aperçu des prévisions intra-saisonnières générées par le modèle WRF (Weather Research & Forecasting Model), un modèle atmosphérique de pointe largement utilisé par la communauté scientifique. WRF intègre ici les données du modèle "Extended-Range ER-M-climate" développé par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF), une référence mondiale en matière de modélisation climatique.

L'un des atouts majeurs de cette approche réside dans l'application d'une technique de descente d'échelle dynamique. Cette méthode sophistiquée permet d'affiner considérablement la résolution spatiale des prévisions, passant d'une maille d'environ 36 km dans le modèle global de l'ECMWF à une définition de 12 km spécifiquement adaptée au contexte marocain. Ce gain en précision est particulièrement précieux pour capturer la forte variabilité topographique et climatique qui caractérise le pays.

Cette résolution affinée ouvre de nouvelles perspectives pour appréhender finement les particularités météorologiques locales et leur influence sur les cultures. Elle permet de mieux anticiper des phénomènes critiques tels que les épisodes de gel, de sécheresse, de vagues de chaleur ou de précipitations intenses, qui peuvent affecter significativement le développement et le rendement des céréales. Grâce à cette échelle spatiale fine, les modèles identifient des structures atmosphériques de méso-échelle qui échappent traditionnellement aux modèles globaux.

Autre avantage notable, les prévisions WRF couvrent un horizon intra-saisonnier étendu, jusqu'à quatre semaines. Les résultats sont intelligemment structurés par semaine (semaines 1, 2, 3 et 4), offrant aux agriculteurs et aux gestionnaires une vision à moyen terme des conditions à venir. Cette profondeur de prévision élargit considérablement la fenêtre d'anticipation et d'action par rapport aux prévisions météorologiques classiques. Elle ouvre la voie à une planification opérationnelle proactive des interventions au champ et des allocations de ressources.

En combinant résolution spatiale fine et portée temporelle longue au sein d'une chaîne de modélisation intégrant les meilleurs modèles mondiaux et régionaux, ces prévisions intra-saisonniers s'imposent comme un outil précieux d'aide à la décision pour l'agriculture marocaine. Elles contribueront à renforcer la résilience et la productivité des exploitations en fournissant une information anticipatrice et localisée sur les risques et opportunités agro-climatiques. Reste à accompagner leur appropriation par les agriculteurs et conseillers pour libérer tout leur potentiel sur le terrain.

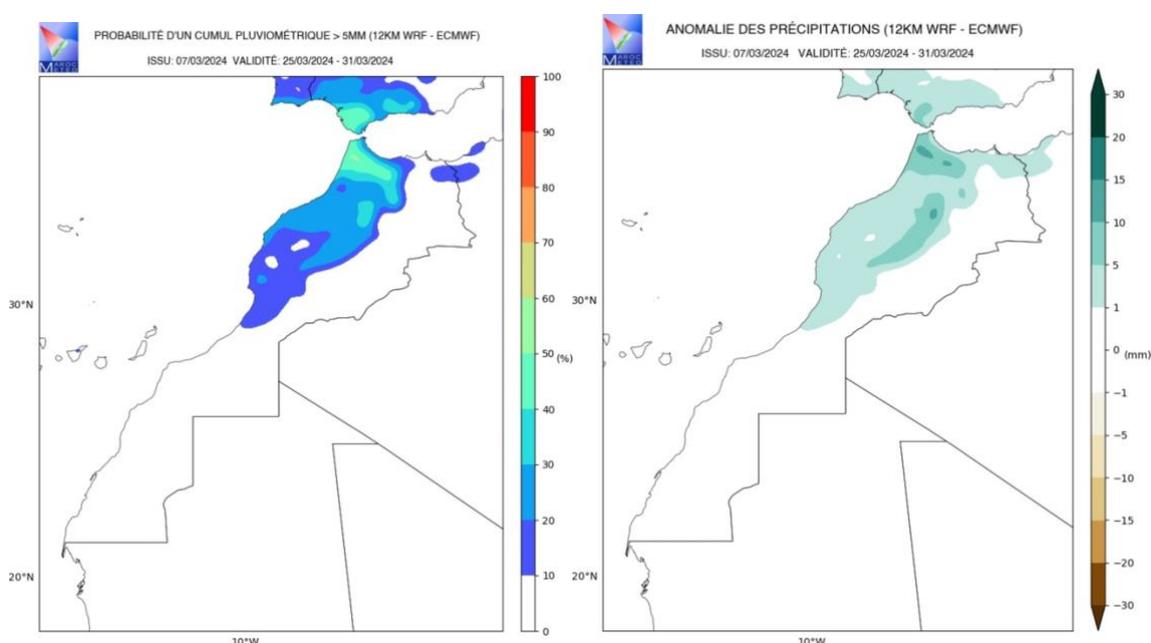


Figure 43 : Probabilité d'un cumul pluviométrique > 5mm et l'anomalie des précipitations du 25 au 31 mars 2024, prévision intra saisonnière établie le 07 mars 2024 (Source : DGM).

5. Dissémination des résultats

Actuellement, CGMS-Maroc fournit quantité d'informations pour le suivi de la campagne agricole et la prévision des rendements céréaliers au profit des services du ministère de l'Agriculture. En un simple clic, les utilisateurs peuvent accéder à des indicateurs saisonniers essentiels tels que les précipitations, la température et les indices de végétation adaptés à chaque région administrative.

Cependant, la décision d'élargir l'utilisation de CGMS-Maroc au-delà des services du ministère de l'Agriculture implique d'autres mesures. Elle nécessite non seulement une stratégie globale pour accroître la sensibilisation aux capacités de la plateforme, mais aussi la fourniture d'une formation essentielle pour une utilisation efficace. Avec une stratégie de diffusion planifiée, le CGMS-Maroc a le potentiel de devenir une ressource pour l'ensemble des acteurs du secteur agricole. Il pourrait jouer un rôle central dans la gestion des risques climatiques, l'augmentation des rendements des cultures, la promotion de pratiques agricoles durables et la stimulation de

la croissance économique globale dans le secteur agricole du pays. En donnant aux parties prenantes les données et les outils nécessaires pour prendre des décisions éclairées, le CGMS-Maroc pourrait contribuer de manière significative à la résilience et au succès du paysage agricole marocain.

Dans le domaine de la recherche et de l'éducation, le CGMS-Maroc offre un riche réservoir de données et de capacités. Il fournit une plateforme complète pour l'analyse prédictive des rendements des cultures, facilitant des études approfondies sur les impacts de divers facteurs tels que le changement climatique, la santé des sols et les maladies des cultures. Les données du système, couvrant les conditions météorologiques et les conditions des cultures, ouvrent la voie à la recherche interdisciplinaire, comblant le fossé entre l'agriculture et la climatologie. De plus, la plateforme peut servir d'outil éducatif précieux, permettant aux étudiants et aux chercheurs de se familiariser avec l'agrométéorologie avancée, favorisant une compréhension approfondie du domaine et encourageant le développement de compétences.

6. Examen externe par les pairs

CGMS-Maroc devrait mettre en place un mécanisme complet d'examen externe par les pairs pour compléter l'assurance qualité interne et fournir une évaluation indépendante des données, des modèles, des prévisions et des processus du système.

Un panel d'experts en provenance de domaines pertinents tels que l'agronomie, les sciences climatiques, la télédétection, les statistiques et l'informatique devrait être constitué. Les membres du panel seraient des experts reconnus dans leurs domaines et seraient sélectionnés en consultation avec les principales universités agricoles et les institutions de recherche au Maroc. De plus, les partenariats académiques permettraient le renforcement des capacités et permettraient à CGMS-Maroc de rester à la pointe des avancées scientifiques pertinentes pour son domaine.

Les principales responsabilités de ce panel consisteront à :

- Examiner en profondeur les sources de données utilisées par CGMS-Maroc : robustesse, représentativité, biais potentiels ;
- Évaluer la solidité des méthodologies et hypothèses sous-jacentes aux modèles prédictifs : choix des variables, techniques de modélisation, validation ;
- Vérifier la rigueur des procédés de validation pour l'évaluation des modèles : métriques statistiques, benchmarks de référence ;
- Contrôler l'interprétation et la communication des résultats et prévisions : clarté, transparence, actionnabilité pour les utilisateurs ;
- Formuler des recommandations pour améliorer les processus, workflows et la documentation.

Le panel d'experts pourrait se réunir régulièrement, au moins deux fois par an, pour examiner les progrès et fournir des recommandations en temps opportun. Des examens spéciaux supplémentaires pourraient être entrepris après des mises à jour majeures du système ou avant des jalons opérationnels importants. Les commentaires du panel d'experts seraient sollicités lors de réunions virtuelles, d'examens sur site, de collaborations dans le cadre de projets de recherche, de projets d'étudiants et de discussions en classe.

Tous les membres du panel seraient tenus de signer des accords de non-divulgence pour protéger les données ou les méthodes propriétaires utilisées dans CGMS-Maroc. Les commentaires du panel seraient entièrement documentés et intégrés dans les cycles de développement futurs pour une amélioration continue du système.

En plus du panel d'experts, CGMS-Maroc rechercherait un examen par les pairs en participant à des conférences académiques, en publiant dans des revues à comité de lecture et en

interagissant avec la communauté scientifique élargie. Des évaluations externes rigoureuses sur l'ensemble du flux de travail de surveillance et de prévision des cultures renforceront la crédibilité et la transparence du système.

7. Renforcement des capacités

Pour concrétiser les axes d'amélioration identifiés et faire évoluer CGMS-Maroc vers une plateforme agronomique de référence, un effort conséquent devra être consenti en matière de renforcement des capacités humaines. Le déploiement opérationnel des innovations technologiques (sensor web, applications mobiles, modèles d'apprentissage profond...) et méthodologiques (approches participatives, traitements big data...) envisagées nécessitera en effet des compétences pointues encore rares dans le panorama actuel des équipes.

Un programme ambitieux de formation continue et de recrutement ciblé s'avère donc indispensable pour doter CGMS-Maroc des ressources expertes au diapason de ses ambitions stratégiques. Deux volets sont à distinguer :

- Un volet technique axé sur l'acculturation des ingénieurs et analystes aux techniques émergentes de la science des données (fouille et visualisation de données, apprentissage automatique...), de la géomatique (SIG, télédétection...) et de l'ingénierie logicielle (développement web et mobile, interopérabilité...). Il s'agira de leur permettre de maintenir et de faire évoluer l'architecture du système, d'intégrer de nouveaux algorithmes prédictifs, d'optimiser l'ergonomie des interfaces et d'assurer une meilleure circulation des données.
- Un volet thématique orienté vers la consolidation des connaissances agronomiques, écophysiologicals, climatologiques et socio-économiques des chargés de projet et d'études. L'objectif est qu'ils aient la capacité d'explorer de nouvelles approches de modélisation intégrative des agrosystèmes, de définir des indicateurs plus pertinents, d'analyser finement les sorties du système et d'accompagner les acteurs dans l'utilisation des services informationnels.

Concrètement, trois modalités complémentaires seront à actionner. D'abord, la conception de parcours de formation continue, en présentiel ou à distance, spécifiquement adaptés aux profils et expertises à renforcer : data scientists, géomaticiens, modélisateurs, agronomes, conseillers agricoles... Certains modules fondamentaux seront mutualisés pour favoriser une culture commune et une compréhension partagée des enjeux et approches de CGMS-Maroc.

Ensuite, le recrutement, selon les opportunités, de profils experts sur les technologies et thématiques nouvellement investies par la plateforme pour apporter des compétences immédiatement opérationnelles. L'établissement d'une cartographie dynamique des compétences facilitera l'identification des besoins prioritaires en recrutement.

Enfin, le tissage de partenariats avec des universités et écoles d'ingénieur permettra d'attirer des talents, via l'accueil de stagiaires ou de doctorants sur des projets de R&D stratégiques pour la feuille de route d'évolution de CGMS-Maroc. Ces collaborations contribueront aussi à faire connaître les potentialités du système auprès des futurs diplômés et faciliteront un recrutement ultérieur des meilleurs profils.

Ce programme de montée en compétences techniques et thématiques profitera aussi de synergies avec les actions prévues de renforcement des partenariats scientifiques nationaux et internationaux. L'insertion dans des réseaux d'excellence favorisera les échanges d'expériences, le partage de bonnes pratiques et le développement professionnel des équipes de CGMS-Maroc. La participation croisée de chercheurs extérieurs et d'agents de CGMS-Maroc à des projets collaboratifs, à des séminaires ou à des séances de travail communes sera un vecteur privilégié de diffusion et d'appropriation de savoirs et savoir-faire.

En investissant significativement et durablement dans son capital humain, à la fois par des actions de formation interne et un recrutement ambitieux de nouvelles expertises, CGMS-Maroc se donnera les moyens d'aborder avec succès son évolution vers une plateforme agronomique intégrée, hautement performante et ouverte sur son écosystème. La constitution d'une équipe pluridisciplinaire de haut niveau, régulièrement mise à jour des dernières innovations technologiques et scientifiques, facilitera la diffusion et l'appropriation des produits et services par une communauté élargie et diversifiée d'utilisateurs. Cette démarche proactive de développement des compétences s'affirme comme un pilier central de la stratégie de transformation de CGMS-Maroc en catalyseur d'un écosystème partenarial d'innovation numérique pour une agriculture durable et résiliente au Maroc et en Afrique.

V. Conclusion

Au terme de cet ouvrage, le système CGMS-Maroc s'affirme comme un outil incontournable pour le suivi des campagnes céréalières et la prévision des rendements au Maroc. Né d'un partenariat scientifique de long terme entre institutions nationales et internationales, il incarne la synergie entre recherche agronomique, technologies numériques et aide à la décision sur le terrain. Les performances de ce système intégré, tant en termes de puissance prédictive, de réactivité que de convivialité, le hissent au niveau des meilleurs dispositifs mondiaux de monitoring des cultures.

Il est important de souligner que CGMS-Maroc est le fruit d'un cheminement depuis une recherche doctorale initiale jusqu'à un outil opérationnel de référence. Cette trajectoire illustre de façon éclatante le rôle moteur de l'université et de la recherche dans l'innovation agricole. En offrant un cadre propice à l'exploration de nouvelles approches, en nourrissant des collaborations interdisciplinaires et en favorisant le développement sur le temps long, la recherche scientifique et technique a été un terreau fertile pour l'éclosion et la maturation de CGMS-Maroc. Cette success-story rappelle combien l'investissement dans une recherche agronomique d'excellence, connectée aux besoins des acteurs de terrain, est crucial pour relever les défis complexes posés par le changement climatique à nos systèmes alimentaires.

Mais au-delà de la prouesse technique, c'est bien la finalité de service de CGMS-Maroc qui fonde sa valeur ajoutée pour l'agriculture marocaine. En fournissant dès le cœur de la campagne des prévisions fiables et actualisées de production de blé et d'orge, il permet d'éclairer les arbitrages stratégiques pour orienter les itinéraires techniques, anticiper les besoins d'irrigation ou d'intrants, calibrer les flux logistiques. Surtout, il permet aux décideurs d'initier à temps les mesures préventives ou correctives nécessaires pour atténuer les impacts d'épisodes de sécheresse préjudiciables à la sécurité alimentaire nationale. Outil d'intelligence agronomique, CGMS-Maroc s'impose comme un maillon essentiel du dispositif de veille et d'alerte pour la souveraineté céréalière du Royaume.

Loin de constituer un aboutissement, la maturité opérationnelle actuelle de CGMS-Maroc ouvre au contraire un vaste champ des possibles pour renforcer encore ses capacités. L'intégration continue de données météorologiques et satellitaires à haute résolution, l'intégration des prévisions saisonnières du climat, la mise à jour dynamique des parcelles, l'ouverture à des observations collaboratives de terrain et l'interopérabilité avec des modèles agronomiques et économiques font partie des priorités de développement. En s'appuyant sur les dernières avancées de la science des données, tout en cultivant une interaction étroite avec les communautés d'utilisateurs, CGMS-Maroc a tous les atouts pour s'imposer comme la plateforme de référence pour la caractérisation multiscalaire et multidimensionnelle des agrosystèmes marocains.

Cependant, l'expérience de CGMS-Maroc soulève aussi des questions plus larges sur le rôle que les systèmes d'alerte précoce agricole sont appelés à jouer au Maroc où le changement climatique bouleverse les conditions de production. Face à l'intensification des extrêmes climatiques, l'évolution des aires et calendriers de culture, et la nécessité d'une aide à la décision à plus long terme, CGMS-Maroc devra continuer à s'adapter. Cela impliquera un renforcement de ses capacités d'observation en temps réel, une actualisation constante de ses algorithmes pour intégrer de nouvelles dynamiques agro-climatiques, et un couplage accru avec des modèles et scénarios prospectifs pour explorer une diversité de futurs possibles.

À l'aune de ces défis, CGMS-Maroc apparaît non plus comme un simple outil technique, mais comme une véritable infrastructure de résilience territoriale. Sa capacité à collecter, traiter et valoriser en continu un vaste ensemble de données pour éclairer les stratégies d'adaptation en fait un prototype des géo-observatoires du 21^{ème} siècle. Son évolution devra donc se faire en lien étroit avec tous les acteurs concernés : scientifiques, décideurs, et surtout usagers finaux (assureurs, agriculteurs, conseillers), pour co-construire des services climato-intelligents adaptés aux réalités du terrain.

Au-delà de son périmètre national, CGMS-Maroc a vocation à évoluer en hub d'innovation numérique ouvert et connecté à l'international. Son infrastructure technologique constitue un environnement de choix pour expérimenter de nouvelles approches de modélisation prédictive, en mobilisant télédétection, apprentissage automatique, modèles de cultures et savoirs locaux. L'établissement de partenariats avec des programmes scientifiques d'envergure favorisera la montée en compétence de la recherche agronomique marocaine aux meilleurs standards méthodologiques. Cette dynamique d'excellence contribuera au rayonnement de CGMS-Maroc comme pilier d'une diplomatie scientifique influente sur les enjeux globaux de sécurité alimentaire et climatique.

Catalyseur du partage des données, des modèles et des bonnes pratiques, CGMS-Maroc jouera aussi un rôle fédérateur à l'échelle régionale. En ouvrant son infrastructure à des institutions du pourtour méditerranéen et d'Afrique confrontées à des défis agro-environnementaux similaires, il facilitera l'émergence d'analyses comparatives des impacts du changement climatique. Cette mise en réseau des systèmes d'information agricoles renforcera l'intégration scientifique entre pays du Sud. Au confluent de l'open data, de l'open science et de l'open innovation, CGMS-Maroc préfigure ainsi un nouveau mode de création collaborative des savoirs au service de la co-construction de politiques agricoles climato-intelligentes.

Incubateur technologique mais aussi creuset de synergies partenariales, CGMS-Maroc a tous les atouts pour fédérer une communauté pluridisciplinaire d'experts en agronomie, écologie, climatologie, sciences des données, unis par un objectif : accélérer la transformation des systèmes agricoles et alimentaires vers plus de résilience et de durabilité. En facilitant le continuum entre recherche de pointe, aide à la décision politique, conseil technique et pratiques de terrain, il ouvre la voie à une innovation ouverte, embarquée et partagée.

Cette dynamique de co-construction des savoirs et des solutions par et pour l'ensemble des parties prenantes fait de CGMS-Maroc bien plus qu'un outil : un bien commun au service de la souveraineté alimentaire et de la résilience des territoires. Son modèle inspirera, n'en doutons pas, de nombreux autres projets de plateformes agronomiques fédératives multi-acteurs en Afrique et sur d'autres continents. Puisse ainsi essaimer une nouvelle génération de systèmes d'intelligence agricole privilégiant les approches intégratives, territoriales et participatives !

C'est à la condition de cette ouverture accrue aux partenariats multi-acteurs que CGMS-Maroc pourra jouer pleinement son rôle d'outil d'anticipation et d'action au service du monde agricole. Ainsi, il tracera la voie vers un réseau national, voire international, de systèmes intégrés d'intelligence agronomique, brique essentielle pour ériger une agriculture résiliente et durable au Maroc comme sur toute la planète.

A l'heure des changements globaux, cet impératif de synergie entre technologies de rupture et savoirs ancrés dans la réalité des contextes locaux sera la clé pour relever le défi climatique et démographique au Sud. En traçant cette voie innovante de l'agroécologie numérique, CGMS-Maroc éclaire les chemins d'une transition écologique des systèmes agricoles qui soit socialement inclusive et économiquement performante.

Bibliographie

- Alaouri, M., Balaghi, R., El Hairech, T., 2017. Évaluation de l'interpolation des cumuls pluviométriques dans CGMS-Maroc pour renforcer le réseau météorologique. Centre National du Climat. Direction de la Météorologie Nationale. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17606.40002>
- Allard de Wit, Jappe Franke, Hugo de Groot, Bas vanMeulebrouk. 2013. E-AGRI VIEWERS FOR ANALYSIS AND VISUALISATION OF WEATHER AND CROP INDICATORS. Crop Monitoring as an E-agricultural tool in Developing Countries (E-AGRI). https://www.e-agri.info/pdf/documents/D26%201_E-AGRI_Viewers.pdf
- Allard de Wit, Riad Balaghi, Tarik El Hairech, Dong Qinghan. 2014. CGMS PILOTING REPORT Morocco. Crop Monitoring as an E-agricultural tool in Developing Countries (E-AGRI). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.16120.83203>
- Balaghi, R., 2006. Wheat grain yield forecasting models for food security in Morocco. PhD. Thesis. Liege University. Belgium. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10632.43520>
- Balaghi R., Tychon B., Jlibene M., Mrabet R., 2007. Gestion du risque de sécheresse agricole au Maroc. Sécheresse 18, 1-8. <https://www.jle.com/10.1684/sec.2007.0088>
- Balaghi R., Tychon B., Eerens H., Jlibene M. 2008. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 10, 438 – 452. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.12.001>
- Balaghi R., Badjeck M.-C., Bakari D., De Pauw E., De Wit A., Defourny P., Donato S., Gommès R., Jlibene M., Ravelo A.C., Sivakumar M.V.K., Telahigue N. and Tychon B., 2010. Managing Climatic Risks for Enhanced Food Security: Key Information Capabilities. World Climate Conference - 3. Procedia Environmental Sciences 1, 313–323. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.020>
- Balaghi, R., Jlibene, M., Tychon, B., Eerens, H., 2012a. La prédiction agrométéorologique des rendements céréaliers au Maroc. Institut National de la Recherche Agronomique (Rabat, Maroc). ISBN: 978- 9954-0-6676-8.
- Balaghi R., Tahri M., El Hareich T. 2012b. Bulletin de prévision de la récolte céréalière. Campagne agricole 2011-2012.3p. <https://www.inra.org.ma/sites/default/files/docs/environ/bullprev1112fr.pdf>
- Balaghi, R., El Hairech, T., Lahlou, M., Arrach, R., 2014. Projet « Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture du Maghreb ». Dispositif d'acquisition des données. Définition des modèles de gestion efficace des risques climatiques. Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, Maroc. 57p. <http://dx.doi.org/10.13140/2.1.4658.4000>
- Baruth, B., Genovese, G. & Leo O. (eds). 2007. CGMS version 9.2. User manual and technical documentation. EU-IRC Publication, Ispra, Italie. http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC40605/regno_jrc40605_cgms_final_version%5B1%5D.pdf
- Beck, H. E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, A. I. J. M., Weedon, G. P., Brocca, L., Pappenberger, F., Huffman, G. J., and Wood, E. F.: Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 6201–6217, <https://doi.org/10.5194/hess-21-6201-2017>, 2017.
- Beek, E.G., 1991. Spatial interpolation of daily meteorological data. Theoretical evaluation of available techniques. Report 53.1, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, pp 43. <https://edepot.wur.nl/360405>
- Belay, H.; Melesse, A.M.; Tegegne, G. Merging Satellite Products and Rain-Gauge Observations to Improve Hydrological Simulation: A Review. Earth 2022, 3, 1275–1289. <https://doi.org/10.3390/earth3040072>

- Benabdelouahab, T., Balaghi, R., Hadria, R., Lionboui, H., & Tychon, B. (2016). Assessment of vegetation water content in wheat using near and shortwave infrared SPOT-5 Data in an irrigated area. *Journal of Water Science*, 29, 97-107. <https://doi.org/10.7202/1036542AR>
- Benkirane, M.; Amazirh, A.; Laftouhi, N.-E.; Khabba, S.; Chehbouni, A. Assessment of GPM Satellite Precipitation Performance after Bias Correction, for Hydrological Modeling in a Semi-Arid Watershed (High Atlas Mountain, Morocco). *Atmosphere* 2023,14,794. <https://doi.org/10.3390/atmos14050794>
- Bijaber, N.; El Hadani, D.; Saidi, M.; Svoboda, M.D.; Wardlow, B.D.; Hain, C.R.; Poulsen, C.C.; Yessaf, M.; Rochdi, A. Developing a Remotely Sensed Drought Monitoring Indicator for Morocco. *Geosciences* 2018, 8, 55. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020055>
- Boogaard, H.L., Diepen, C.A. van, Rötter, R.P., Cabrera, J.M.C.A., Laar, H.H. van, 1998. WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical Document 52, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, pp 144.
- Bouras E. H., Jarlan, L., Er-Raki, S., Albergel, C., Richard, B., Balaghi, R., Khabba, S., 2020. Linkages between Rainfed Cereal Production and Agricultural Drought through Remote Sensing Indices and a Land Data Assimilation System: A Case Study in Morocco. *Remote Sens.* 2020, 12(24), 4018; <https://doi.org/10.3390/rs12244018>
- Bouras, E.h.;Jarlan,L.; Er-Raki, S.; Balaghi, R.; Amazirh, A.; Richard, B.; Khabba, S. Cereal Yield Forecasting with Satellite Drought-Based Indices, Weather Data and Regional Climate Indices Using Machine Learning in Morocco. *RemoteSens.* 2021,13,3101. <https://doi.org/10.3390/rs13163101>
- Bregaglio, S., Frasso, N., Pagani, V., Stella, T., Francone, C., Cappelli, G., Acutis, M., Balaghi, R., Ouabbou, H., Paleari, L., Confalonieri, R. New multi-model approach gives good estimations of wheat yield under semi-arid climate in Morocco. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 157–167 (2015). <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0225-6>
- Breiman, L. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chipanshi, A., Zhang, Y., Kouadio, L., Newlands, N., Davidson, A., Hill, H., Warren, R., Qian, B., Daneshfar, B., Bedards, F., Reichert, G., 2015. Evaluation of the integrated Canadian crop yield forecaster (ICCYF) model for in-season prediction of crop yield across the Canadian agricultural landscape. *Agric. For. Meteorol.* 206, 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.007>
- Confalonieri, R., Bregaglio, S., Cappelli, G., Francone, C., Carpani, M., Acutis, M., El Aydam, M., Niemeyer, S., Balaghi, R., Dong, Q., 2013. Wheat modeling in Morocco unexpectedly reveals predominance of photosynthesis versus leaf area expansion plant traits. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 393–403 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0104-y>
- Diepen, C.A. van, Wolf, J., Keulen, H. van, 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5:16-24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1989.tb00755.x>
- El Aydam M., Baruth B., Balaghi R. MARS Agrometeorological Vol. 18 No. 7 - Crop Monitoring in Morocco. 2010. <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/Bulletins-Publications/MARS-Agrometeorological-AGRI4CAST-INRA-Morocco-30-06-2010-Vol.18-No.-7>
- El Aydam M., Balaghi R., 2011. MARS Agrometeorological Vol. 19 – Special Issue. Crop Monitoring in Morocco. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC64691/lbam11s01enc_26082011.pdf
- El Alaoui El Fels, A., Saidi, M.E. & Alam, M.J.B. Rainfall Frequency Analysis Using Assessed and Corrected Satellite Precipitation Products in Moroccan Arid Areas. The Case of Tensift Watershed. *Earth Syst Environ* 6, 391–404 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00290-x>

- FAO, 2016. Crop Yield Forecasting: Methodological and Institutional Aspects Current practices from selected countries (Belgium, China, Morocco, South Africa, USA) with a focus on AMIS crops (maize, rice, soybeans and wheat). FAO, Rome.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066 (2015). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gadoudali, F. and Messouli, M. (2020) 'Evaluation of multiple satellite-derived rainfall products over Morocco', *Int. J. Hydrology Science and Technology*, Vol. 10, No. 1, pp.72–89.
- Genovese, G., Bettio, M. (eds). 2004. Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System. Volume 4. Statistical data collection, processing and analysis. In: European Communities (ISBN 92-894-8183-8).
- Hanchane, M.; Kessabi, R.; Krakauer, N.Y.; Sadiki, A.; El Kassoui, J.; Aboubi, I. Performance Evaluation of TerraClimate Monthly Rainfall Data after Bias Correction in the Fes-Meknes Region (Morocco). *Climate* 2023, 11, 120. <https://doi.org/10.3390/cli11060120>
- Hersbach, H. et al. (2020). The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- He Sun, Tandong Yao, Fengge Su, Zihua He, Guoqiang Tang, Ning Li, Bowen Zheng, Jingheng Huang, Fanchong Meng, Tinghai Ou, Deliang Cheng, 2022. Corrected ERA5 Precipitation by Machine Learning Significantly Improved Flow Simulations for the Third Pole Basins. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-22-0015.1>
- Jarlan, L., Abaoui, J., Duchemin, B., Ouldbba, A., Tourre, Y. M., Khabba, S., Le Page, M., Balaghi, R., Mokssit, A., Chehbouni, G., 2013. Linkages between common wheat yields and climate in Morocco (1982-2008). *Int J Biometeorol*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-013-0753-9>.
- Kaptué Tchuenté, A.T., Roujean, J.L., and De Jong, S.M. (2011). Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *Int J Appl Earth Observation Geoinf* 13, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.11.005>
- Karmouda, N.; Kacimi, I.; ElKharrim, M.; Brirhet, H.; Hamidi, M. Geo-Statistical and Hydrological Assessment of Three Satellite Precipitation Products over Ouergha Basin (Northern Morocco). *Arab. J. Geosci.* 2022, 15, 235.
- Knippertz, P., Christoph, M. & Speth, P. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorol Atmos Phys* 83, 67–88 (2003). <https://doi.org/10.1007/s00703-002-0561-y>
- Lazar, C. and G. Genovese (eds). 2004. Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System. Volume 2. Agrometeorological data collection, processing and analysis. In: European Communities (ISBN 92-894-8181-1).
- Li, L.; Friedl, M.A.; Xin, Q.; Gray, J.; Pan, Y.; Frolking, S. Mapping Crop Cycles in China Using MODIS-EVI Time Series. *Remote Sens.* 2014, 6, 2473–2493. <https://doi.org/10.3390/rs6032473>
- Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7 (1–2), 51–73. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(91\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0169-7722(91)90038-3)
- Mamassi, A., Balaghi, R., Devkota, K.P. et al. Modeling genotype × environment × management interactions for a sustainable intensification under rainfed wheat cropping system in Morocco. *Agric & Food Secur* 12, 22 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40066-023-00428-2>
- Mayaux, P., Bartholomé, E., Fritz, S., Belward, A., 2004. A new land-cover map of Africa for the year 2000. *Journal of Biogeography* 31, 861–77. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2004.01073.x>

- Meroni, M., Fasbender, D., Balaghi, R., Dali, M., Haffani, M., Haythem, I., Hooker, J., Lahlou, M., Lopez-Lozano, R., Mahyou, H., Ben Moussa, M., Sghaier, N., Wafa, T., Leo, O. Evaluating NDVI Data Continuity Between SPOT-VEGETATION and PROBA-V Missions for Operational Yield Forecasting in North African Countries," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 54, no. 2, pp. 795-804, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2466438>
- Micale, F. and G. Genovese (eds). 2004. Methodology of the MARS Crop Yield Forecasting System. Volume 1. Meteorological data collection, processing and analysis. In: European Communities (ISBN 92-894-8180-3).
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50:3. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- M. van der Velde, L. Nisini., 2019. Performance of the MARS-crop yield forecasting system for the European T Union: Assessing accuracy, in-season, and year-to-year improvements from 1993 to 2015. *Agricultural Systems* 168 (2019) 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.06.009>
- Najmi et al., (2023). Evaluation of PERSIANN-CCS-CDR, ERA5, and SM2RAIN-ASCAT rainfall products for rainfall and drought assessment in a semi-arid watershed, Morocco. *Journal of Water and Climate Change* (2023) 14 (5): 1569–1584. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.461>
- Narciso G., Balaghi R. MARS Bulletin Morocco - Morocco Joint Crop Bulletin - 09 06 2009 Vol. 1 No. 1. <https://www.inra.org.ma/sites/default/files/docs/environ/bullprev0809en.pdf>
- Nashwan, M.S.; Shahid, S.; Wang, X. Assessment of Satellite-Based Precipitation Measurement Products over the Hot Desert Climate of Egypt. *Remote Sens.* 2019, 11, 555. <https://doi.org/10.3390/rs11050555>
- Neumann, K., M. Herold, A. Hartley, and C. Schmullius, 2007. Comparative assessment of CORINE2000 and GLC2000: Spatial analysis of land cover data for Europe, *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9, 425–437.
- Óscar Mirones, Joaquín Bedia, Sixto Herrera, Maialen Iturbide, and Jorge Baño Medina, Refining Remote Sensing precipitation Datasets in the South Pacific: An Adaptive Multi-Method Approach for Calibrating the TRMM Product. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1402>
- Penman, H.L. (1948) Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 193, 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Rachdane, M.; Khalki, E.M.E.; Saidi, M.E.; Nehmadou, M.; Ahbari, A.; Trambly, Y. Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products in Sub-Saharan Morocco. *Water* 2022, 14, 3336. <https://doi.org/10.3390/w14203336>
- Salih, W.; Chehbouni, A.; Epule, T.E. Evaluation of the Performance of Multi-Source Satellite Products in Simulating Observed Precipitation over the Tensift Basin in Morocco. *Remote Sens.* **2022**, 14, 1171. <https://doi.org/10.3390/rs14051171>
- Shelia, V., Hansen, J., Sharda, V., Porter, C., Aggarwal, P., Wilkerson, C.J., Hoogenboom, G., 2019. A multi-scale and multi-model gridded framework for forecasting crop production, risk analysis, and climate change impact studies. *Environ. Model. Softw.* 115, 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.006>
- Steven Hoek, Paul W. Goedhart and Wies Akkermans. 2009. The CGMS Statistical Tool for yield forecasting. <https://edepot.wur.nl/11218>
- Supit, I., Hooijer, A.A., Van Diepen, C.A., Edts, 1994 (reprint 1996). System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Volume 1: Theory and Algorithms. EUR Publication N° 15959 EN of the Office for Official Publications of the EC. Luxembourg, 146 pp.
- Tchunte, A.T.K., Roujean, J.L., De Jong, S.M., 2011. Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African

continental scale. *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, 13, 207-219. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.11.005>

Tuel, A., El Moçayd, N. Evaluating extreme precipitation in gridded datasets with a novel station database in Morocco. *Stoch Environ Res Risk Assess* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02437-w>

Van der Goot, E., 1998. Spatial interpolation of daily meteorological data for the Crop Growth Monitoring System (CGMS). In: M. Bindi, B. Gozzini (eds). *Proceedings of seminar on data spatial distribution in meteorology and climatology*, 28 September - 3 October 1997, Volterra, Italy. EUR 18472 EN, Office for Official Publications of the EU, Luxembourg, p 141-153.

Van der Voet P., Van Diepen C.A., Oude Voshaar J., 1994. Spatial interpolation of daily meteorological data: a knowledge-based procedure for the region of the European Communities. Report 53.3, 118 pp, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands. <https://edepot.wur.nl/362153>

Wu, B., Meng, J., Li, Q., Yan, N., Du, X., Zhang, M., 2014. Remote sensing-based global crop monitoring: experiences with China's CropWatch system. *Int. J. Digit. Earth* 7, 113–137. <http://dx.doi.org/10.1080/17538947.2013.821185>

Z. Q. Ma, D. Ghent , X. Tan , K. He , H. Y. Li , X. Z. Han , Q. T. Huang , and J. Peng , , 2019. Long-Term Precipitation Estimates Generated by a Downscaling-Calibration Procedure Over the Tibetan Plateau From 1983 to 2015. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019EA000657>

Annexes

Annexe 1 : Liste des stations synoptiques de la DGM utilisées dans CGMS-Maroc.

Numéro OMM de la station	Emplacement	Date de mise en service
60155001	CASABLANCA-ANFA	01/03/1911
60127001	TAZA	01/01/1918
60250001	AGADIR INEZGANNE	01/03/1921
60150001	MEKNES	01/01/1924
60230001	MARRAKECH	01/01/1930
60195001	MIDELT	01/01/1931
60100001	TANGER-PORT	01/01/1931
60265001	OUARZAZATE	01/02/1931
60318001	TETOUAN	01/01/1935
60115001	OUJDA	01/01/1941
60220001	ESSAOUIRA	01/01/1941
60165001	EL JADIDA	01/11/1944
60135001	RABAT-SALE	01/05/1947
60190001	KASBA-TADLA	01/03/1949
60101001	TANGER-AERO	01/01/1950
60120001	KENITRA	01/01/1951
60185001	SAFI	01/07/1954
60160001	IFRANE	01/06/1956
60107001	AL-HOUCEIMA	01/01/1960
60191001	BENI MELLAL	01/01/1960
60200001	BOUARFA	01/01/1960
60141001	FES-SAIS	01/01/1961
60105001	LARACHE	01/02/1962
60096001	DAKHLA	01/07/1963
60060001	SIDI IFNI	01/01/1969
60156001	NOUASSEUR	01/01/1970
60210001	ERRACHIDIA	01/01/1973
60285001	TAN-TAN	01/11/1974
60033001	LAAYOUNE	01/01/1976
60340001	NADOR	01/01/1976
60252001	AGADIR AL MASSIRA	01/01/1978
60136001	SIDI SLIMANE	01/07/1979
60270001	TIZNIT	01/11/1982
60178001	KHOURIBGA	01/02/1984
60335001	SMARA	01/01/1987
60146001	MOHAMMEDIA	01/10/1989
60280001	GUELMIM	01/05/1990
60253001	TAROUDANT	01/01/1992
60106001	CHEFCHAOUEN	01/08/1994
60237001	OUKAIMDEN	01/08/1996

60177001	SETTAT	01/10/1999
60125001	COL DE TOUAHER	01/01/2002
60101002	TANGER-VILLE	01/01/2002
60340002	NADOR-AROUI	01/02/2002

Annexe 2 : Coefficients Angstrom and Hargreaves coefficients des stations de la DGM utilisés pour calculer le rayonnement global dans CGMS-Maroc.

WMO_NO	ANGSTROM_A	ANGSTROM_B	HARGREAVES_A	HARGREAVES_B
60033001	0.412	0.356	0.035	8.384
60060001	0.358	0.441	0.021	13.131
60096001	0.412	0.356	0.035	8.384
60100001	0.317	0.467	0.053	3.429
60101001	0.317	0.467	0.053	3.429
60101002	0.317	0.467	0.053	3.429
60105001	0.287	0.509	0.045	5.056
60106001	0.174	0.639	0.047	2.096
60107001	0.289	0.533	0.05	4.284
60115001	0.336	0.45	0.048	2.573
60120001	0.285	0.504	0.045	4.604
60125001	0.65	0.098	0.038	6.681
60127001	0.288	0.599	0.046	4.53
60135001	0.289	0.499	0.044	5.238
60136001	0.081	0.68	0.032	4.571
60141001	0.274	0.513	0.046	2.91
60146001	0.305	0.485	0.035	9.282
60150001	0.286	0.506	0.047	3.288
60155001	0.305	0.485	0.036	8.14
60156001	0.355	0.453	0.044	4.162
60160001	0.209	0.586	0.049	2.785
60165001	0.305	0.485	0.036	8.14
60177001	0.264	0.525	0.045	3.795
60178001	0.287	0.494	0.047	4.061
60185001	0.351	0.43	0.047	5.08
60190001	0.304	0.483	0.046	3.089
60191001	0.285	0.508	0.043	3.89
60195001	0.334	0.455	0.038	6.642
60200001	0.403	0.413	0.046	4.835
60210001	0.355	0.43	0.042	5.767
60220001	0.351	0.43	0.047	5.08
60230001	0.291	0.508	0.042	5.113
60237001	0.288	0.599	0.046	4.53
60250001	0.345	0.445	0.032	9.689
60252001	0.384	0.403	0.051	2.84
60253001	0.369	0.43	0.036	7.236
60265001	0.355	0.43	0.042	5.767
60270001	0.374	0.41	0.037	8.237
60280001	0.412	0.356	0.035	8.384
60285001	0.412	0.356	0.035	8.384
60318001	0.242	0.552	0.039	5.599
60335001	0.412	0.356	0.035	8.384
60340001	0.123	0.649	0.041	1.059
60340002	0.123	0.649	0.041	1.059

Annexe 3 : Méthode AURELHY

La méthode AURELHY (Analyse Utilisant le Relief pour l'Hydrométéorologie) est une technique d'interpolation spatiale développée par Météo-France. Elle est spécialement conçue pour prendre en compte l'influence du relief sur les variables météorologiques, telles que les précipitations et les températures. Cette méthode est particulièrement utile dans les régions montagneuses où le relief peut avoir un impact significatif sur le climat local.

L'approche AURELHY utilise des modèles numériques de terrain pour représenter la topographie et applique des algorithmes d'interpolation pour estimer les valeurs des variables météorologiques entre les stations d'observation. Elle permet de produire des cartes météorologiques à haute résolution spatiale, offrant une représentation plus précise des conditions météorologiques sur un terrain complexe.

La méthode AURELHY est souvent utilisée pour la cartographie des normales climatologiques, la prévision des précipitations et des températures, et l'analyse des événements météorologiques extrêmes dans les régions montagneuses.

La méthode AURELHY nous donne une information par point de grille à partir des données observées d'un réseau de stations météorologiques. Cette méthode passe par 3 étapes ;

1. La première étape consiste à chercher les 15 vecteurs propres par l'analyse des composantes principales, environ 90% de la variance du relief est expliquée. Pour chaque point de grille, un « paysage » est calculé comme l'ensemble des altitudes des 121 points d'un domaine carré de 50 km de maille 5 km centré sur le point. L'altitude du point central est ensuite retranchée. Une analyse en composantes principales est réalisée sur l'ensemble des paysages relatifs ainsi obtenus en chaque point du territoire afin de déterminer les 15 premiers vecteurs propres. Les 15 composantes principales et l'altitude lissée du point composent les 16 prédicteurs du champ météorologique aux points de mesure. Ils sont classés par sélection progressive ascendante, et un critère d'arrêt obtenu à partir du test de Fisher permet de retenir les prédicteurs pertinents.
2. La deuxième étape permet d'élaborer l'équation de régression. L'équation de régression ainsi établie sur l'échantillon des points de mesure est appliquée en tout point de grille.
3. La troisième méthode sert à corriger les valeurs de la régression calculées par le krigeage des résidus. En chaque point de mesure, on calcule la différence (appelée résidu) entre la valeur mesurée et la valeur calculée par régression. Le résidu est ensuite interpolé par krigeage.

Enfin, le champ climatologique reconstitué est calculé, en chaque point de grille, comme la somme des deux termes obtenus par régression et krigeage des résidus.

Annexe 4 : Indice de De Martonne

L'indice de Martonne est un indice climatique qui sert à caractériser l'aridité ou l'humidité d'un climat. Il a été introduit par le géographe français Emmanuel de Martonne en 1926. Cet indice est utile pour évaluer la sécheresse d'une région et est calculé à partir des précipitations et des températures moyennes sur une période donnée (généralement mensuelle ou annuelle).

La formule pour calculer l'indice de Martonne est la suivante :

$$I = \frac{P}{T+10}$$

où

P représente la quantité totale des précipitations (en millimètres) sur la période concernée, et

T la température moyenne (en degrés Celsius) sur cette même période.

L'indice augmente avec la quantité de précipitations et diminue avec la température moyenne, ce qui signifie qu'un indice élevé indique un climat plus humide, tandis qu'un indice bas indique un climat plus sec. L'indice de Martonne permet donc de classer les climats en différentes catégories d'aridité et d'humidité, ce qui est particulièrement utile dans les études géographiques et environnementales.



Riad BALAGHI est chercheur en agroclimatologie à l'Institut National de la Recherche Agronomique du Maroc, où il a occupé plusieurs postes à responsabilité. Ingénieur agronome diplômé de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II de Rabat, il est titulaire d'un doctorat en Sciences de l'Environnement de l'Université de Liège, Belgique.

Initiateur et coordinateur du système CGMS-Maroc de suivi et prévision des rendements céréaliers depuis son lancement, Riad BALAGHI est un expert en gestion des risques climatiques agricoles, adaptation au changement climatique, prévision agrométéorologique et assurance indicielle. Il a aussi piloté des projets nationaux d'envergure en agriculture numérique pour la fertilisation raisonnée des cultures et les changements climatiques.

Mouanis LAHLOU est Docteur Ès-Sciences en Sciences Agronomiques de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV) et Ingénieur en Biométrie de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux en Belgique. Il est enseignant-chercheur et Chef de département de Statistique et Informatique appliquées à l'IAV.

Mouanis LAHLOU est responsable du développement informatique de l'interface utilisateur ainsi que des modules d'intelligence artificielle pour la prévision des rendements céréaliers de CGMS-Maroc. Il a été impliqué dans de nombreux projets intégrant des systèmes d'information géographique pour la gestion des ressources naturelles et agricoles au Maroc.



Meriem ALAOURI est ingénieure météorologiste diplômée de l'École Hassania des Travaux Publics (EHTP) de Casablanca. Elle est actuellement responsable de l'entité Banque de données climatologiques au sein du Centre National du Climat à la Direction Générale de la Météorologie (DGM).

Meriem ALAOURI est notamment responsable des modules de collecte, d'analyse et de développement des bases de données météorologiques de CGMS-Maroc. Elle a également été membre de plusieurs groupes d'experts de l'Organisation Météorologique Mondiale, notamment sur la gestion des risques agrométéorologiques et les services climatiques pour l'agriculture.