Comment mettre au point un logiciel de fertilisation des grandes cultures: Compte rendu d'une expérience marocaine

Aït Houssa A.[1], Ouknider M.[2], Ben Mansour S.[3], Benbella M.[2], El Midaoui M.[2], Rajaa H.[3], Drissi S.[2], Amlal F.[1]

(Reçu le 10/12/2025; Accepté le 06/05/2026)

Résumé

Le Maroc, pays de la rive sud de la Méditerranée, présente des systèmes de culture fortement tributaires de la pluviométrie et des disponibilités en eau d'irrigation. À chaque étage climatique correspond un système plus ou moins spécifique, caractérisé par un niveau de productivité donné et des besoins propres en engrais. Cette dépendance étroite entre fertilisation et offre hydrique confère au zonage agroclimatique le statut de variable structurante de premier rang dans l'architecture et l'arborescence d'un logiciel d'aide à la décision en matière de fertilisation raisonnée. C'est sur ce postulat qu'est conçu, il y a une trentaine d'années, le premier logiciel marocain dédié à la fertilisation des grandes cultures et des fourrages. Outil convivial et complet, élaboré en plusieurs modules intégrant l'auto-contrôle des erreurs et la prévention des choix inappropriés lors de la saisie, l'interprétation des analyses de sol, le calcul des plans de fumure, le choix des engrais, la formulation des mélanges de type Bulk Blending ainsi que l'optimisation du coût de la fumure. Il est en outre doté d'aides contextuelles, consultables à tout moment, précisant la finalité de chaque information exploitée et les limites de son utilisation. Il offre également aux spécialistes des fertilisants la possibilité d'ajuster le paramétrage de base proposé lorsqu'ils estiment disposer de références plus adaptées. Conçu en adéquation avec les réalités agroclimatiques locales, ce logiciel se veut un outil de proximité au service de l'agriculteur, quel que soit son niveau technique: plan de fumure fondé sur l'analyse de sol lorsque celle-ci est disponible, mais aussi fumure de première approximation, de type «Mieux que rien», en cas d'analyse incomplète ou lorsque cette analyse fait totalement défaut. Le logiciel ayant été perdu entre-temps et sa conception n'ayant jamais été publiée, le présent article a pour objectif d'en présenter la démarche méthodologique à la communauté agronomique et, surtout, d'inspirer les initiatives souhaitant reprendre ce grand chantier avec un nouveau regard, en s'appuyant sur les bases de données les plus récentes et sur les avancées liées à l'essor de l'intelligence artificielle.

Mots clés: Logiciel d'aide à la décision, fertilisation raisonnée, systèmes de culture, plans de fumure, analyse du sol, Maroc

How to develop fertilization software for field crops: Account of a Moroccan experience

Abstract

Morocco, as a country on the southern shore of the Mediterranean, has farming systems heavily dependent on rainfall and irrigation water availability. Each climatic zone corresponds to a more or less specific system, characterized by a given level of productivity and its own fertilizer requirements. This close dependence between fertilization and water supply makes agroclimatic zoning a key structuring variable in the architecture and structure of decision-support software for optimizing fertilization. It was on this premise that the first Moroccan software dedicated to fertilizing field crops and forage was developed some thirty years ago. This user-friendly and comprehensive tool, developed in several modules, incorporates error checking and prevention of inappropriate choices during data entry, soil analysis interpretation, fertilization plan calculation, fertilizer selection, bulk blending formulation, and fertilization cost optimization. Furthermore, it features contextual "Help" sections, accessible at any time, explaining the purpose of each piece of information used and its limitations. It also offers fertilizer specialists the ability to adjust the suggested basic settings when they believe they have more suitable reference data. Designed to align with local agroclimatic realities, this software aims to be a readily accessible tool for farmers, regardless of their technical expertise: it provides fertilization plans based on soil analysis when available, as well as a "better than nothing" approach to initial fertilization in cases of incomplete or completely unavailable analysis. As the software has since been lost and its design was never published, this article aims to present its methodological approach to the agricultural community and, above all, to inspire initiatives wishing to revisit this major project with a fresh perspective, drawing on the latest databases and advances in artificial intelligence.

Keywords: Decision-support software, fertilization, field crops, farming systems, soil analysis, Morocco

INTRODUCTION

C'est au sein de la SASMA (Société Agricole de Services au Maroc) qu'est apparu, pour la première fois, le besoin d'automatiser l'élaboration des plans de fumure. C'est également dans cette entreprise qu'a vu le jour, dès 1986, le premier logiciel marocain dédié à la fertilisation des agrumes, donnant ainsi le tout premier coup d'envoi, à caractère historique, au développement de l'informatique de gestion technique agricole, lequel s'est ensuite progressivement étendu à d'autres filières. Investie de la mission d'encadrement technique des agrumes à l'échelle nationale, la SASMA devait entre autres établir, au début de chaque campagne, les plans de fumure destinés à des milliers de producteurs. Cette opération représentait une tâche particulièrement lourde et consommatrice de temps, d'autant plus qu'elle devait être exécutée dans des délais très courts, en ne disposant que de simples calculatrices de poche comme uniques outils de travail. Ainsi, au lieu de mobiliser leurs compétences sur des problématiques d'analyse, de diagnostic et de planification stratégique, les ingénieurs des Délégations Régionales se voyaient contraints de passer plusieurs semaines enfermés dans leurs bureaux, à calculer et à contrôler, parcelle après parcelle, les recommandations d'engrais avant leur transmission aux producteurs. Un exercice à répétition évoquant celui d'une véritable chaîne routinière industrielle.

Le second logiciel de fertilisation mis au point par les experts des Domaines Agricoles n'est arrivé que 10 ans plus tard pour répondre au besoin d'un espace beaucoup plus large- celui des grandes cultures et des fourrages- qui représente 4-5 Millions d'hectares. C'est de ce logiciel baptisé «Ibn Alawam Système FRGC», du nom du célèbre agronome d'Andalousie (mort en 1145), que traitera le présent article, en raison de la richesse et de la diversité des idées quelque peu originales qui ont guidé sa conception.

[1] Centre de Formation et de Recherches, Société Providence Verte, Louata, Sefrou, Maroc
[2] Département d'Agronomie et d'Amélioration des Plantes, École Nationale d'Agriculture de Meknès, Maroc
[3] Les Domaines Agricoles Fès-Meknès, Maroc

© Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires • p-ISSN: 2028-991X www.agrimaroc.org
https://doi.org/10.5281/zenodo.21102257

L'objectif étant prospectif et non rétrospectif, le texte sera rédigé au temps présent-historique et présenté comme si le logiciel devait être conçu pour la première fois, intégrant simultanément quelques idées nouvelles jusque-là non exploitées.

QUEL LOGICIEL POUR LE MAROC ET LES PAYS À CONTRAINTE HYDRIQUE SIMILAIRE ?

Les Cinq objectifs indissociables qui doivent servir de ligne de conduite pour le management raisonné de la fertilisation ou d'autres techniques de production, sont regroupés dans la matrice de référence M_0 à une seule ligne et cinq colonnes ci-dessous:

M0 = (PMax, *f* BQt, *f* COpt, *f* Ddur, *f* SS Dég Env.)

Dans cette écriture, PMax sous entend la recherche de la productivité maximale possible mais sous réserve (*f*: lire sous réserve de) d'une bonne qualité de la production (*f* BQt), d'un coût optimal (*f* COpt), de façon durable (*f* Ddur), et sans dégrader l'environnement (*f* SS Dég Env.).

Il s'agit d'une démarche d'ensemble, où aucun de ces éléments ne doit être négligé ou sacrifié. Dans le cas contraire, on ne respecte plus le concept de fertilisation dite raisonnée, parfois aussi désigné par les termes de fertilisation juste ou fertilisation optimale.

Au Maroc, pays déficitaire pour de nombreuses denrées et avec une population en croissance, la recherche du PMax est essentielle pour assurer la sécurité alimentaire et renforcer les filières exportatrices compétitives (agrumes, tomate, fruits rouges). Ce maximum plausible doit être adapté aux contraintes climatiques et hydriques locales. Par contre dans tous les cas, la recherche de PMax doit se faire sous réserve de:

- *f* BQt: qualité conforme aux exigences du marché,
- *f* COpt: coût et usage des intrants optimisés,
- *f* Ddur: préservation durable de la fertilité des sols,
- *f* SS Dég Env.: protection de l'environnement et limitation des pollutions.

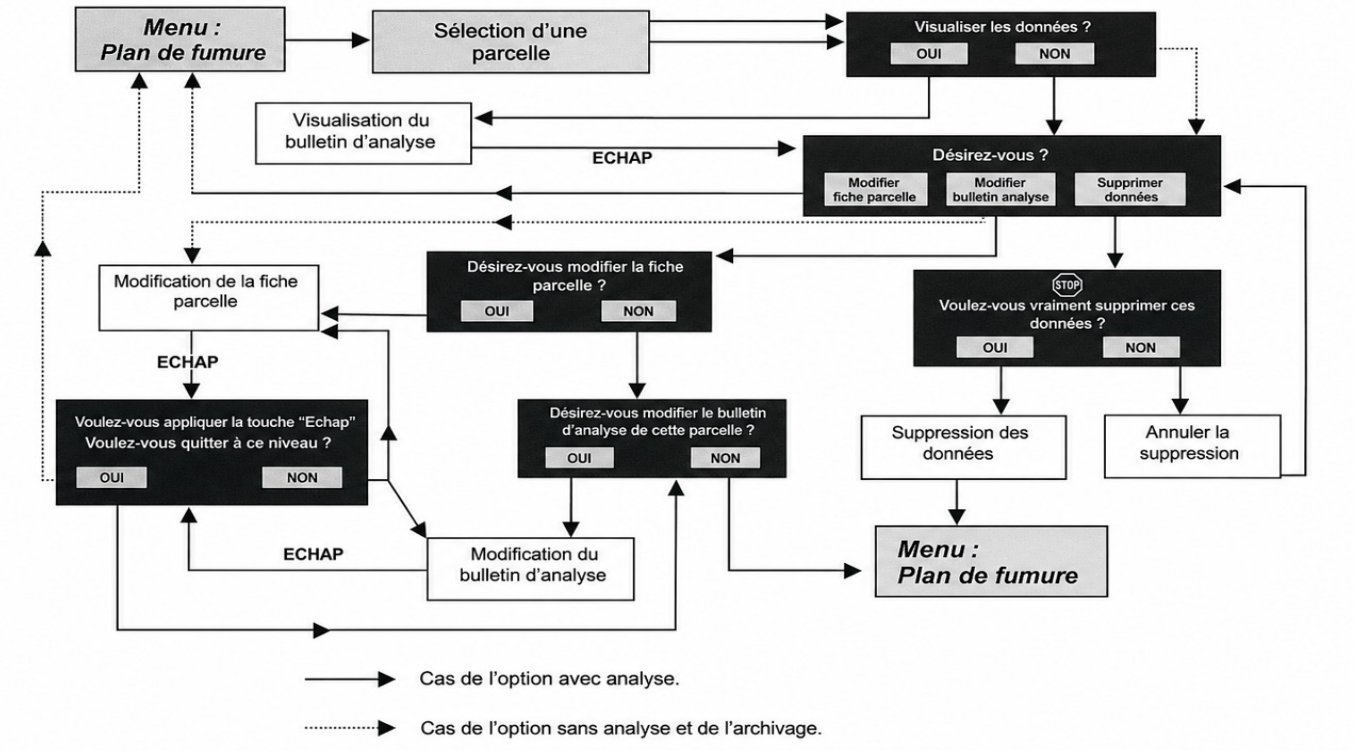
À titre d'exemple, pour le blé en irrigué ou en zones Bour favorables lors des bonnes années, l'objectif est d'atteindre un rendement de 50–60 q/ha avec un bon poids spécifique (Ps ≥ 79 kg/hL), tout en maintenant le coût des fertilisants dans une limite raisonnable (CF ≈ 3500–4000 Dh/ha), et en équilibrant les apports NPK selon les besoins de la culture. Cette approche permet à la fois de préserver la fertilité, d'assurer la durabilité du système et de protéger l'environnement contre la pollution, notamment contre l'excès d'azote. Sauf année à très fort lessivage, la fumure azotée doit être encadrée par l'intervalle [90-130 U/ha], exceptionnellement [140-160 U/ha].

CADRE CONCEPTUEL GÉNÉRAL ET SOLUTIONS PROPOSÉES

Architecture de base du logiciel

Ibn Alawam système FRGC, n'était pas un simple outil d'interprétation des analyses de sol, comme on en rencontre couramment. Ce logiciel ambitieux intègre le plan de fu-mure détaillé, précisant les doses, les périodes d'apport et le choix de la nature de l'engrais. Il prend également en charge la formulation des fumures de fond et des Bulk Blending, avec leurs interdits, le calcul du coût et son optimisation, ainsi que l'archivage des plans de fumure et la possibilité d'adaptation du paramétrage de calcul. D'autres services pratiques sont aussi proposés, comme l'identification des sources d'approvisionnement au Maroc. En outre, le logiciel propose un module d'aides agronomiques consultable à tout moment à l'intention des utilisateurs qui souhaitent comprendre le rôle de chaque information utilisée, et la logique d'élaboration de chaque étape qu'elle soit structurelle du système de calcul ou paramétrable par l'utilisateur. Ainsi, le logiciel se positionne à la fois comme un assistant technique complet et comme un support pédagogique. Il est en mesure d'accompagner tous les niveaux d'expertise, du débutant à l'agronome confrmé.

Schéma illustrant quelques étapes à suivre pour visualiser, modifier ou supprimer les données de la fiche parcelle et du bulletin d'analyse



La mise au point d'un logiciel de fertilisation complet fait appel à une multitude de données - climatiques, pédologiques, culturales, analytiques, techniques, technologiques ou économiques - toutes potentiellement utiles à un moment donné pour construire l'outil recherché. La difficulté ne réside pas seulement dans l'accès à l'information, bien que celle-ci existe, mais surtout dans sa hiérarchisation et son articulation logique au sein d'un schéma de décision fiable.

La première difficulté à résoudre consiste à savoir si toutes les données doivent être introduites et traitées sur un même pied d'égalité, ou s'il existe, au sein de chaque bloc d'informations, des données clés, structurantes et déterminantes pour la conception et la qualité du logiciel.

Partant du principe que l'essentiel de l'espace concerné est celui de l'agriculture pluviale caractérisée à la fois par sa variabilité climatique (pluviométrique surtout) et de systèmes de culture, cette réflexion nous a conduits à considérer que certaines informations jouent un rôle pivot dans le raisonnement - en particulier celles qui conditionnent la validité et le champ d'application des autres - tandis que d'autres relèvent davantage de l'ajustement, de la modulation ou du contrôle de cohérence. C'est de cette distinction, entre données fondatrices et données d'accompagnement, que découle l'architecture conceptuelle

Le climat en tant que critère clé structurant

Au Maroc, il est impossible d'élaborer un logiciel de fertilisation crédible pour la grande culture sans la prise en compte du niveau d'aridité du climat et des possibilités d'irrigation. L'étage climatique, combiné à la présence ou non de l'irrigation, détermine en premier les cultures envisageables, puis leur niveau de productivité et, le cas échéant, leur qualité. Ce n'est qu'après la connaissance de ces 2 contraintes que l'essai de détermination des besoins en fertilisants prend un sens agronomique.

Eau (pluie) avec ou sans (irrigation) → (Culture, productivité, régularité, qualité) → Besoin en minéraux → calcul de la fumure, choix de l'engrais et modalités d'utilisation.

Cette logique de dépendance ascendante a conduit à retenir l'offre en eau (pluie et irrigation) comme critère structurant majeur, placé en tête de l'arborescence du logiciel proposé pour la fertilisation des grandes cultures dans le contexte du pays.

C'est un schéma de raisonnement qui part d'un facteur décisif en amont (pluie, irrigation), pour construire progressivement la raison d'être des décisions techniques situées en aval (besoins, dose, nature de l'engrais, modalités d'apport).

Les quatre postulats ou «4P» - cœur du logiciel

Postulat P1 - Une agriculture structurée par étage climatique

Au-delà des indices bioclimatiques classiques, notamment celui d'Emberger, et dans une logique résolument opérationnelle, la pluviométrie moyenne annuelle a été retenue comme critère central de différenciation des régions agricoles au Maroc. Ce paramètre permet de distinguer trois grands étages climatiques : l'aride ($P \leq 250$–300 mm/an), le semi-aride ($250 < P \leq 350$–400 mm/an) et le Bour favorable ($P \geq 400$–500 mm/an). À ces contextes pluviaux s'ajoutent deux situations transversales, indépendantes de l'étage climatique naturel, à savoir l'irrigué traditionnel et l'irrigué moderne (pivot, goutte-à-goutte). L'ensemble définit ainsi une matrice de cinq grands écosystèmes agricoles (A, SA, BV, IT, IM), chacun intégré dans l'architecture du logiciel afin de permettre un traitement différencié de la fertilisation selon le type d'écosystème considéré. Sur le plan méthodologique, ce postulat a des implications directes pour le contrôle-qualité et le traitement des informations. Structurée selon la logique du tableau cartésien, l'organisation des données facilite le croisement systématique des variables climatiques, des choix et modes de conduite des cultures, ainsi que des paramètres de fertilisation. Elle assure ainsi la cohérence des informations et la fiabilité des recommandations générées par le logiciel.

Dans les années 1990, l'intelligence artificielle, telle que nous la connaissons aujourd'hui, n'existait pas encore ou, du moins, n'était pas accessible à tous. Dans un souci de facilité de programmation et de gestion avec le langage «Basic» de l'époque, l'information est structurée et traitée au sein d'un tableau cartésien compartimenté, notamment pour le contrôle des erreurs et la vérification de pertinence.

Pour délibérer, chaque information d'indice i d'une ligne et d'indice j d'une colonne est croisée avec les autres et comparée à un référentiel de décision considéré comme fiable. Ce mécanisme garantit la cohérence des décisions du système malgré la simplicité des moyens informatiques utilisés et de leur niveau de performance limité.

À titre d'exemple, en poursuivant le raisonnement dans le compartiment «climat» du tableau cartésien, le second postulat des «4P» est le suivant:

Postulat P2 - Toutes les cultures ne sont pas possibles dans tous les étages climatiques

Toutes les cultures ne peuvent pas être implantées dans l'ensemble des étages climatiques du pays. Ce principe constitue un critère de premier niveau, permettant au logiciel de vérifier la pertinence et la crédibilité du choix cultural par rapport au contexte climatique concerné.

Certaines cultures, comme le riz, la canne à sucre, la luzerne, le bersim, et dans une certaine mesure la betterave sucrière, ne sont pas envisageables dans les trois premiers étages climatiques sans irrigation. Leur développement exige un apport en eau supérieur à ce que peut fournir la pluviométrie naturelle de ces zones. Lorsqu'elles sont proposées comme cultures dans ces contextes, le logiciel les refuse ou émet automatiquement des réserves.

Intégré dès la phase de saisie, le Postulat P2 agit comme un filtre de contrôle en temps réel, écartant toutes les combinaisons culture/climat incompatibles et assurant la cohérence agronomique du raisonnement dès le départ.

Le système ne se limite pas au simple choix de la culture. Une fois ce choix validé - ou, le cas échéant, corrigé puis réintroduit - il poursuit son analyse en évaluant la productivité envisagée, conformément au postulat P3 ci-après.

Postulat P3 - Tous les niveaux de rendement ne sont pas réalisables dans tous les étages climatiques

Même lorsque la culture est possible, tous les niveaux de rendement ne sont pas atteignables sans irrigation, en raison d'une offre en eau différente selon l'étage climatique.

Par exemple, pour le blé ou l'orge comme cultures, une proposition de rendement de 50–60 q/ha sera acceptée en zones irriguées (IT, IM) ou dans le Bour favorable (BV), mais sera accompagnée de commentaires de suspicion en semi-aride, rejetée catégoriquement en zone aride.

C'est le second filtre de contrôle en temps réel lors de la saisie, assurant que les rendements proposés restent cohérents avec le potentiel agronomique de chaque écosystème.

Culture (1) et productivité (2) acceptés, il faut maintenant emprunter le bon circuit pour la suite du traitement des données, le climat étant toujours le critère (le panneau indicateur) vers la bonne direction. Ce qui mène au postulat P4.

Postulat 4 - Des recommandations adaptées à chaque contexte d'offre hydrique

Les contextes aride, semi-aride, Bour favorable et irrigué ne relèvent pas d'une même logique productive. Chacun possède un potentiel de rendement, un régime hydrique et des contraintes agronomiques qui lui sont propres. Il en résulte que les normes d'interprétation des analyses de sol et les modalités d'élaboration des plans de fumure ne peuvent être uniformes. Elles doivent être spécifiquement définies pour chaque contexte agroclimatique.

En conséquence, lorsque l'étage climatique d'une parcelle est renseigné ou le type d'irrigué précisé, le logiciel active automatiquement le module correspondant. Le traitement des données et les recommandations qui en découlent sont ainsi ajustés aux contraintes et au potentiel réel du milieu.

Autres critères rattachables au climat et à l'irrigation

Outre les postulats précédents, d'autres critères, rattachables au climat et à l'irrigation, influencent directement les orientations de fertilisation. Leur intégration dans le logiciel complète le cadre général et permet d'ajuster plus finement les recommandations techniques, en particulier:

Le précédent cultural: soumis lui aussi au contrôle de faisabilité comme la culture envisagée, il fournit une estimation de l'espérance en reliquat azoté de départ et permet de corriger la fumure azotée par un coefficient spécifique partiel, soit de majoration de l'offre (jachère, légumineuses) ou de réduction (paille/paille).

L'aptitude à la minéralisation: elle traduit les conditions générales favorables ou non à la décomposition de l'humus pour fournir de l'azote minéral à partir de l'azote organique.

Les risques de pertes d'azote: par volatilisation ou lessivage, en interaction avec l'époque d'apport, les modalités d'irrigation, la texture et la profondeur du sol, ainsi que d'autres caractéristiques climatiques et pédologiques.

Au niveau de la programmation des corrections, le compartiment concerné du tableau cartésien traite neuf coefficients, notés C1 à C9, dans le cadre d'une combinaison à trois niveaux: faible, moyen et élevé. Cette approche conduit à une matrice décisionnelle de synthèse comprenant 27 cas de figure, conformément à la formule suivante:

N-Corrigé= Nbase corrigé (PC), corrigé (L), corrigé (V)

où:

N-base: valeur de référence du paramètre en année normale (soit 15 ppm),

PC: correction pour tenir compte du précédent cultural;

L: correction pour tenir compte du lessivage;

V: correction pour tenir compte de la volatilisation.

Les valeurs les plus faibles étant rattachables à leurs causes objectives et les plus élevées de même. C pour PC est le plus élevé derrière jachère (1), légumineuses (2), sol riche en MO (3), sol profond (4), et plus faible derrière paille/paille (5), sol pauvre en MO (6), peu profond (7),…

LES BLOCS D'INFORMATIONS PASSIVES POUR RENSEIGNER OU COMPLÉTER LE LOGICIEL

Pour mettre au point le logiciel, il est nécessaire de disposer d'un ensemble d'informations élémentaires couvrant l'identification de la parcelle, la culture envisagée, les caractéristiques du terrain, les analyses de sol et l'apport matière.

Bloc info-identification région: commune rurale, nom propriétaire, ferme, n° parcelle, coordonnées GPS.

Bloc Info cultures: une trentaine d'espèces qui sont par famille, les céréales à paille (orge, blé, triticale), le maïs et le sorgho (grain), les cultures industrielles (betterave, canne, tournesol), les différentes légumineuses alimentaires (fève, féverole, lentilles, petit pois, pois chiche), les cultures fourragères (maïs ensilage, luzerne, bersim, mélanges).

Culture envisagée, variété, rendement prévu, devenir des coproduits (paille, cannes, fanes, feuilles, collets), enfouis, exportés, brulés.

Bloc Info terrain: topographie (plat, pente), type de sol (R'mel, Tirs, Dehs, Hamri, calcaire, etc.), profondeur de la couche arable (sol superficiel, peu profond, profond) et charge en pierrosité (nulle, faible, moyenne, forte).

Bloc Info Analyses de sol: nom du préleveur, référence de l'échantillon, date et profondeur de prélèvement, granulométrie, matière organique, pH, calcaire total et actif, bases échangeables (Ca, Mg, K, Na), P-Olsen, azote minéral (NH_4^+, NO_3^-), oligo-éléments (Fe, Mn, Zn, Cu, B), CEC totale et salinité (EC, Na, Cl).

Bloc Info amendements: organiques (fumier, lisier, mélange fumier/lisier, fiente de volaille, gadoue) ou minéral (calciques ou magnésiens), avec indication de la quantité et de la qualité (bonne, moyenne, médiocre).

Bloc paramétrage des informations: matrice des fermes, des parcelles, matrice des engrais et des prix, matrices des produits d'amendements avec composition selon la qualité déclarée,….

Ces informations constituent la liste minimale nécessaire pour le fonctionnement du logiciel et pour permettre une analyse fiable du potentiel des parcelles.

MODULE DE CONTRÔLE-QUALITÉ DE L'INFORMATION

Celui-ci a pour objectif principal de protéger l'utilisateur contre les erreurs de saisie et de l'alerter en cas d'incohérence manifeste. Il vise également à le sensibiliser aux anomalies détectées par le système, par comparaison avec un référentiel jugé fiable - qui est le sien - intégrant notamment l'étage climatique, le contexte pédologique et les pratiques agronomiques plausibles. Ce contrôle s'applique à l'ensemble des données et paramètres introduits dans le système tels que le choix de la culture, le niveau de rendement visé, les résultats d'analyses de sol ou, plus généralement, toute mesure ou grandeur structurante du raisonnement agronomique. Il s'agit d'un contrôle syntaxique et logique, de type garde-fou algorithmique avec soit refus et blocage de saisie, un avertissement pour manque de cohérence ou de confirmation argumentée. Deux niveaux de contrôle :

Contrôle anti-erreur en temps réel (Anti-E)

Ce module exploite un langage de type binaire simple (Vrai/Faux) ou (possible/impossible) pour intercepter l'erreur

flagrante ou la proposition impossible avec blocage direct de saisie pour ne pas contaminer le système avec édition d'un message d'alerte en rouge (Tableau 1). Aucune tolérance, pondération ou interprétation n'est admise à ce stade.

Contrôle de conformité en différé (CC-diff.)

Le contrôle partiel ou exhaustif en différé intervient après la saisie, soit à la demande de l'utilisateur en cours d'introduction des données, soit automatiquement en fin de saisie. Il peut porter sur un critère particulier, sur l'ensemble des critères déjà renseignés ou sur toutes les données introduites. Contrairement au contrôle en temps réel, il ne vise pas l'élimination immédiate des informations suspectées, mais l'évaluation à posteriori de leur crédibilité avant de les confirmer.

Pour ce contrôle, le principe est de comparer chaque donnée à un intervalle de référence ΔPr = [minimum probable – maximum probable], dans lequel la valeur devrait normalement se situer. Le niveau de gravité de l'alerte éditée, est fonction de la distance qui sépare la valeur saisie de l'intervalle ΔPr: plus cette distance est grande, plus le message devient strict et plus sévère.

Schématiquement, dans l'élaboration de ce module, chaque grandeur est positionnée selon sa probabilité d'occurrence, ou plus concrètement, selon la distribution de fréquence observée sur le terrain (implicite ou explicite), compte tenu des autres sources de variation. Ce principe général peut être formalisé par la relation:

$$\text{Niveau d'alerte} = f(\text{distance à } \Delta Pr),$$

Avec la distance = 0 si la valeur est à l'intérieur de ΔPr, et distance > 0 si elle est en dehors ($|x| < \min$ ou $|x| > \max$).

La confiance à accorder à ΔPr dépend de la couverture en termes de nombre et de qualité des données dont on dispose. Dans les cas extrêmes, «CC-diff.)», peut renvoyer à «Anti-E», lorsque par exemple la donnée n'a jamais été observée historiquement sans toutefois qu'elle soit impossible. Ce qui suppose une base de données robuste.

Le tableau 2 présente la réaction de la machine pour des propositions de plus en plus hautes de l'utilisateur par rapport à un ΔPr objectif de productivité du blé en irrigué dans le contexte du Maroc.

Par rapport à ces alertes pour valeurs hautes, le système propose aussi des alertes symétriques pour des valeurs basses afin d'attirer l'attention de l'utilisateur que la valeur choisie est plus faible que le potentiel de l'écosystème, voici le genre de message inverse édité:

- 30 q/ha → Rendement de 30 q/ha en irrigué? Vérifiez que cela correspond bien au potentiel de votre parcelle.
- 20 q/ha → Rendement de 20 q/ha en irrigué? Êtes-vous sûr qu'il n'y a pas d'erreur ?

Dans le cas du Bour, favorable en particulier, il est possible d'affiner le contrôle de la valeur du rendement objectif Rdt en le rapportant à une approche basée sur l'analyse fréquentielle de la pluviométrie de la zone. La méthode dite de «Roue de raisonnement» consiste à prendre comme référence une année climatique favorable, considérée comme année d'origine d'indice N0, caractérisée par une pluviométrie bien répartie et des conditions globalement optimales pour l'expression du potentiel de la culture.

Une année très favorable étant, par nature, peu fréquente dans le contexte marocain, par conséquent, il est légitime de considérer que les suivantes ne peuvent être que moyennes à difficiles. Il en découle que l'objectif (Rdt) doit rester d'une valeur modérée et prudente, et en tout cas inférieure au potentiel observé en année exceptionnelle.

Lorsque c'est cette logique qui est retenue, l'algorithme doit intégrer un raisonnement probabiliste fondé à la fois sur la «projection du Rendement selon sa probabilité de réalisation» et sur la notion de «temps de retour», entendue comme une fréquence moyenne d'occurrence des années favorables. Ainsi, après une année favorable d'ordre N_0, la probabilité d'observer à nouveau une année de même niveau reste globalement faible à court terme et s'inscrit

Tableau 1: Illustrations de refus immédiat (avec *saisie bloquée*)

Exemple de saisie utilisateur	Réaction du système
Culture de riz en zone aride (sans irrigation déclarée)	Oh ! Riz en zone aride sans irrigation ? Message en rouge: «*Revoyez votre proposition !*» → Saisie bloquée
Rendement de blé = 150 q/ha	Oh ! Rendement de blé de 150 q/ha ? Message en rouge: «*Revoyez votre proposition !*» → Saisie bloquée
Matière organique (MO) = 0,0	Oh ! Sol agricole avec MO nulle ? Message en rouge: «*Revoyez votre analyse !*» → Saisie bloquée
pH acide déclaré dans un sol calcaire	Oh ! pH acide en sol calcaire ? Message en rouge: «*Revoyez votre analyse !*» → Saisie bloquée

Tableau 2: Contrôle en différé du rendement du blé (Ex. irrigué ou Bour favorable)

Rendement saisi (q/ha)	Position par rapport à ΔP	Message généré par le système
40 ≤ Rdt ≤ 60	À l'intérieur de ΔPr	Valeur plausible – affichage en vert, sans commentaire
Rdt = 70	Légèrement au-dessus de ΔPr	70 q/ha ? Êtes-vous sûr de pouvoir le réaliser ce rendement ?
Rdt = 80	Nettement au-dessus de ΔPr	Rendement exceptionnel ! Êtes-vous sûr de pouvoir l'atteindre ?
80 < Rdt ≤ 100	Très au-dessus de ΔPr	Chapeau si vous pouvez atteindre ce rendement !
Rdt > 100	Hors domaine de plausibilité	Rendement impossible, revoyez votre proposition !

dans une distribution de fréquence spécifique de chaque étage climatique. Ce temps de retour, variable selon les conditions agroclimatiques, peut être estimé à 3-4 ans en Bour favorable (BF), 5-6 ans en semi-aride (SA) et 7-10 ans en régions arides (A). Avec la remarque que les changements climatiques en cours sont susceptibles de modifier les fréquences établies à partir des séries climatiques du passé, introduisant ainsi une incertitude supplémentaire dans l'estimation des temps de retour. L'épisode sec de 2018–2026, s'il venait à se reproduire dans la durée, en constitue une première illustration.

Le module applique à l'analyse de sol une logique de contrôle analogue à (Anti-E) et CC-diff., bien que ses possibilités soient plus limitées. Le système parcourt le bulletin et le compare à sa base de données et signale, lorsqu'il en a la capacité, toute valeur jugée suspecte. Le référentiel utilisé à cette fin, appelé à être enrichi pour stabiliser l'indicateur (ΔPr-sol), a exploité une base actualisée de plus de 6 000 échantillons, ce qui est insuffisant. Les plages de valeurs observées vont de 2 à 65 % pour le taux d'argile, avec la possibilité d'affiner le diagnostic à partir de la texture déclarée dans les cas flagrants. Dans le contexte marocain, des pH inférieurs à 6 sont rares et doivent aussi être vérifiés. Les teneurs en MO s'étendent de 0,40 % dans les sols sableux ou les matériaux minéraux bruts à 3–4 % dans les sols à humus calcique. En début de culture, l'azote minéral se situe généralement entre 5 et 35 ppm. Selon le type du sol, le phosphore assimilable (Olsen) varie entre 5 et 120 ppm et le potassium échangeable entre 50 et 1200 ppm. De façon générale, lorsque les analyses proviennent d'un laboratoire sérieux et reconnu, les erreurs analytiques sont rares et la précision élevée. En cas d'écart important par rapport aux valeurs observées d'habitude, la vérification doit porter en priorité sur l'échantillonnage au champ.

Interprétation des analyses de sol

À l'échelle mondiale, les laboratoires s'accordent généralement sur le cœur du métier de l'analyse incluant les méthodes employées et la précision des mesures. Ainsi, un même échantillon de sol envoyé à plusieurs laboratoires et traité selon la même méthode - par exemple le potassium échangeable (Kéch) par l'acétate d'ammonium ou le phosphore disponible par la méthode d'Olsen - fournit en règle générale des résultats très proches.

Par contre, c'est au niveau de l'interprétation des résultats que peuvent apparaître des divergences, chaque laboratoire s'appuyant sur son expérience et sur des référentiels agronomiques propres qui lui servent de guide pour évaluer la fertilité du sol.

Granulométrie et texture du sol

En tant que telle, la granulométrie constitue l'un des critères les moins problématiques à interpréter, car son évaluation repose sur des référentiels largement partagés. Le diagnostic est établi à partir du triangle des textures, emprunté soit au GEPPA, à l'USDA ou en utilisant des triangles apparentés avec une vingtaine de classes texturales. Celles-ci couvrent un continuum allant des argiles lourdes aux limons purs et aux sables purs, ainsi qu'à des textures intermédiaires telles que argilo-limoneuse, limono-argileuse, argilo-sableuse, sablo-argileuse ou argilo-limono-sableuse.

Dans un logiciel d'interprétation, le plus important ce n'est pas la composition granulométrique elle-même mais ses conséquences agronomiques comme par exemple la difficulté ou la facilité de préparation du terrain (1), de levée des semences (2), de l'enracinement des cultures (3), la réserve en eau qu'elle peut emmagasiner (4), le drainage ou le ressuyage (5), ….

Pour la facette fertilité, il y a la réserve minérale (N, P, K, Ca, Mg,…) qu'elle peut en partie mettre à la disposition de la plante ou la part qu'elle peut lui soustraire de l'engrais par les phénomènes de perte provisoire ou définitive par lessivage, rétrogradation ou fixation. Le tableau 3 donne un extrait du genre de message programmable autour de la granulométrie après analyse.

A partir de la granulométrie, le logiciel a aussi la possibilité d'opérer des estimations de première approximation si la donnée est manquante, telle que la valeur approchée de la CEC ou de HCC.

Éditions complémentaires à la demande

Parmi les éditions complémentaires générées à la demande, le système fournit des informations relatives à la sensibilité du sol à la battance ainsi qu'un indice empirique de plasticité inspiré des principes des limites d'Atterberg, établis à partir des deux modèles empiriques suivants.

a- Stabilité de la structure et battance

$$R = (1{,}5\ L_f + 0{,}75\ Lg)/\ (A + 10\ MO),$$

Indice empirique dans lequel on attribut aux limons fins (L_f) une action dispersante deux fois plus importante que celle des limons grossiers (Lg) et à la (MO) une action stabilisante dix fois celle de l'argile (A). Avec comme limites d'interprétation pour R:

$R > 2 \rightarrow$ sol très battant; $1{,}8 < R < 2 \rightarrow$sol battant; $1{,}6 < R < 1{,}8 \rightarrow$ assez battant; $1{,}4 < R < 1{,}6 \rightarrow$ peu battant et $R < 1{,}4 \rightarrow$ non battant.

Tableau 3: Exemples de textures de référence et implications agronomiques

Texture dominante	Comportement physique	Contraintes agronomiques majeures	Caractéristiques chimiques	Types de messages à l'édition
Argile lourde	Très faible perméabilité, forte rétention en eau	Préparation du lit de semences difficile, enracinement contraint, drainage et ressuyage lents	CEC élevée, fort pouvoir fixateur	Risque de fixation (P, K). Azote à gérer avec prudence. Irrigation peu fréquente, doses modérées
Limoneuse	Perméabilité moyenne à faible en surface	Battance, croûtage, difficultés de levée, sensibilité à la pluie et à l'aspersion	CEC moyenne	Travail du sol et irrigation à adapter. Fractionnement recommandé des apports azotés
Sableuse	Très forte perméabilité, très faible rétention en eau	Stress hydrique rapide, réserve utile faible (Hcc < 40 mm)	CEC faible, pauvre en MO, peu tamponnée	Irrigation à faible dose et forte fréquence. Fertilisation très fractionnée. Forte sensibilité à la lixiviation (N, K, Mg)

Le complément d'informations pour la gestion de l'irrigation en cas d'aspersion ou de pivot, la modification à apporter au sprinklers, la manière de gérer la levée étant expliqué dans le module «Help» du logiciel.

b- Indice de plasticité

Celui-ci est déterminé par la relation empirique proposé par Rémy:

IP = 50 log (A/100) – 10 log (MO/1,5), avec comme intervalles pour l'interprétation :

IP < 5 → sol très peu plastique; 5 < IP < 12,5 → sol peu plastique; 12,5 < IP < 25 → assez plastique; 25 < IP < 40 →fortement plastique et IP > 40 très fortement plastique.

Matière organique du sol et azote minéral

Au Maroc, la teneur en matière organique (MO) des sols est étroitement liée aux grands groupes texturaux et demeure globalement faible à moyenne. Cette situation résulte à la fois des faibles restitutions organiques au sol et des vitesses élevées de minéralisation dans les zones chaudes irriguées, comme dans le Tadla, le Haouz, le Souss ou les oasis. Les sols à dominante argileuse ou argilo-limoneuse présentent généralement des teneurs en MO plus élevées que les sols sablo-limoneux ou sableux, ces derniers étant souvent caractérisés par des niveaux très bas de matière organique en raison de leur faible capacité à stabiliser les résidus organiques. L'interprétation de la MO doit donc être raisonnée de manière relative, en tenant compte simultanément de la texture, du climat et du régime hydrique. Ainsi, en sol lourd, une teneur en MO comprise entre 1,5 et 2 % peut être considérée comme légèrement faible, tandis qu'en sol sableux, la même teneur correspond à un niveau confortable à élevée.

Au-delà de son rôle physico-chimique, la matière organique constitue une source potentielle d'azote minéral, dont l'importance dépend essentiellement de la vitesse de minéralisation. Celle-ci détermine la fraction annuelle d'azote organique susceptible d'être transformée en formes minérales disponibles pour les cultures. Dans le contexte marocain, caractérisé par des températures élevées et, en zones irriguées, par une humidité du sol favorable à l'activité biologique, le coefficient de minéralisation K_2 peut être estimé entre 1 et 2 % de l'azote organique, voire 3 à 4 % dans les conditions très favorables de certains systèmes irrigués intensifs, les valeurs les plus faibles correspondant aux contextes contraignants.

La dynamique de l'azote minéral (Nm= NH_4^+ + NO_3^-) est particulièrement difficile à maîtriser en sols du climat méditerranéen. La valeur mesurée dépend, entre autres, du moment de la mesure. Les prospections effectuées à ce sujet dans différentes régions du Maroc durant la période d'avant le semis des céréales, croisées avec d'autres études, montrent les niveaux suivants:

Niveau faible: Nm ≤ 5-10 ppm; Niveau moyen: 10 ≤ Nm ≤ 20 ppm; Niveau élevé: 20 ≤ Nm ≤ 30 ppm, niveau très élevé Nm>> 30 ppm.

pH, calcaire total et calcaire actif

Les sols marocains sont presque toujours neutres à alcalins, avec un pH ≈ 7–8,5, rarement <6. Quoi que programmé pour traiter toute la gamme de pH, par la force des choses, le système éditera donc fréquemment un message indiquant que le sol est à pH alcalin ou très alcalin, utile surtout pour l'évitement des cultures sensibles (fruits rouges) et pour la disponibilité de certains nutriments (Fe, Mn, P). Les valeurs programmées pour l'interprétation sont les suivantes:

≤ 5 pH très acide; 5-6,5: pH acide; 6,5-7,5: pH neutre; 7,5-8,5 pH alcalin; pH > 8,5 pH très alcalin

On considère généralement qu'un sol est non calcaire lorsque le calcaire total est inférieur à 1 % ou (10 ‰), faiblement calcaire lorsque ce taux est inférieur à 10 %, modérément calcaire pour des valeurs comprises entre 10 et 20 %, calcaire élevé entre 20 et 40 % et très calcaire au-delà de 40 %. Bien que peu déterminant en soi, le calcaire total constitue la base du calcaire actif, qui peut limiter l'absorption du phosphore et des oligo-éléments et provoquer des chloroses ferriques chez les cultures sensibles.

Le calcaire actif ($CaCO_3$ A), fraction soluble du carbonate, est interprété selon la grille ouverte de risque du genre ci-dessous, avec une mention spéciale de refus de la culture pour les espèces calcifuges sensibles comme le Lupin, le haricot et d'autres espèces, à partir de 1-2 %:

- Très faible (0–1 %) → faible risque
- Faible (1–3 %) → risque moyen à faible
- Moyen (3–5 %) → risque modéré
- Élevé (5–7 %) → risque important
- Très élevé (>>7 %) → grand risque de blocage des nutriments et chlorose ferrique

Cette approche permet au logiciel d'alerter l'utilisateur sur les risques liés à l'alcalinité du sol et à sa teneur en calcaire actif, facilitant ainsi le choix des cultures adaptées et la planification des amendements nécessaires.

Phosphore assimilable selon la méthode Olsen

Malgré la place de premier plan qu'occupe le Maroc dans la production et l'exportation du phosphate, les références nationales relatives à l'expérimentation et au test du phosphore sur les cultures demeurent paradoxalement limitées. Dans les années 1990, le croisement des données disponibles avec les observations de terrain (relation P-Olsen / rendement) a permis d'établir des seuils indicatifs d'interprétation (Tableau 4), ultérieurement relevés de façon conventionnelle à la hausse avec l'apparition du superintensif en irrigué.

Tableau 4: Seuils d'interprétation des teneurs du sol en phosphore

Étage climatique	Aride	Semi-aride	Bour favorable/Irrigué	Superintensif/Irrigué
P Olsen (ppm P_2O_5)	10–15	15–20	20–25	30–40

Les teneurs confortables en P_2O_5 (ppm, méthode Olsen) retenues sont: La valeur inférieure de l'intervalle s'applique aux sols à texture fine et structurée («terrains ayant du corps»), tandis que la valeur supérieure concerne les sols plus grossiers, peu profonds ou à forte charge de pierrosité.

Bases échangeables à l'acétate d'ammonium

Bien que le système intègre des normes d'interprétation pour le calcium (Ca) et le magnésium (Mg), l'expérience de terrain a montré que leur utilité reste limitée. Les sols du Maroc sont naturellement très bien pourvus en Ca et Mg, y compris dans certaines formations traditionnellement considérées comme non calcaires. Les analyses réalisées à l'échelle des diffé-

rentes régions montrent que le système propose très rarement un amendement calcaire ou magnésien. Par conséquent, sur le plan agronomique, l'interprétation de ces éléments demeure d'intérêt secondaire et n'a généralement pas d'impact majeur sur les décisions de fertilisation.

Des quatre bases échangeables, c'est le potassium- élément important du trio majeur NPK, qui fait l'objet d'une norme d'interprétation modulable selon l'étage agroclimatique. La valeur la plus élevée étant réservée à l'irrigué et la plus faible à l'aride strict. En conditions irriguées, le modèle empirique de base programmée est:

$$\text{Kéch (ppm ou mg/kg)} = \text{Argile (‰)} + 30$$

Ce qui signifie que pour un sol avec un taux d'argile de 20 % (ou 200‰), le niveau normal sera de 230 ppm et pour un sol avec 40% (ou 400 ‰), 430 ppm.

Le second modèle empirique de correction spécifique programmé, pour tenir compte du pouvoir fixateur d'après les recherches disponibles sur les sols du Maroc est:

$$\text{PF (\%)} = 0{,}050 \text{ argile (‰)} + 12$$

En passant au Bour favorable puis aux étages plus contraignants, la norme est réduite de façon conventionnelle en diminuant la pente de la droite (0,80 en BV, 0,60 en SA et 0,40 en aride strict), traduisant une certaine moindre capacité de ces étages à valoriser des niveaux élevés de potassium.

Oligo-éléments

C'est sur cet aspect de la fertilisation que le Maroc a fait des progrès substantiels en matière de recherches scientifiques même si les nouvelles références établies sont loin d'être stabilisées de façon définitive. L'interprétation des oligo-éléments, proposée pour l'extraction avec la méthode au DTPA - particulièrement adaptée aux sols alcalins - repose sur les plages de référence suivantes: fer 10–20 ppm, manganèse 3–8 ppm, zinc 0,70–1,40 ppm et cuivre 0,20–0,40 ppm. Pour le bore, déterminé par extraction à l'eau chaude, la norme retenue est 0,40–0,60 ppm.

Salinité du sol

Dans les laboratoires agricoles de routine, la salinité est généralement déterminée sur l'extrait 1/5 et non sur pâte saturée, qui est la méthode de référence internationale.

Selon l'expérience acquise au Maroc, les normes d'interprétation de la conductivité électrique (EC, mmhos/cm) pour les cultures sensibles à moyennement tolérantes sont :

- $EC \leq 0{,}20 \rightarrow$ salinité très faible
- $0{,}20 < EC \leq 0{,}30 \rightarrow$ salinité faible
- $0{,}30 < EC \leq 0{,}40 \rightarrow$ salinité moyenne
- $0{,}40 < EC \leq 0{,}60 \rightarrow$ salinité élevée
- $EC > 0{,}60 \rightarrow$ salinité très élevée

Parallèlement, le système fournit l'interprétation des teneurs en chlore et en sodium, éléments généralement bien corrélés à la conductivité électrique.

Amendements et fertilisation

Amendement organique

Connaissant la MO actuelle du sol, le système calcule l'amendement organique brut à partir du seuil recherché et de la formule:

$$AO = \Delta MO \times Ms = 10^4 \times E \times Da \times (MOo - MOa) \times 10^{-2}$$

Où:

AO= quantité d'amendement organique à apporter (t/ha)

ΔMO = augmentation souhaitée de la teneur en matière organique du sol (%)

Ms = masse de sol correspondant à la couche arable (kg/ha), généralement calculée pour les 20 à 30 premiers centimètres.

Da: densité apparente en t/m^3.

Et: l'épaisseur de la couche arable en m.

Exemple, soient:

MOa= 1,8 % la MO actuelle du sol, MOo= 2,5 % le seuil auquel on veut arriver, E = 0,30 m l'épaisseur de la couche arable, et Da = 1,30 t/m^3, alors AO = 27,3 t/ha. Résultat à corriger en fonction de la qualité du produit utilisée, sa teneur en Carbone, le rendement humique et surtout de l'humidité du produit qui peut dépasser parfois 60-70 %.

Pour l'évolution du carbone du sol sur le long terme, des modèles de prévision, le plus souvent de type exponentiel existent. Bien qu'intéressants sur le plan théorique ou pour l'analyse des tendances, leur utilisation pratique reste limitée en raison du manque de données de paramétrage locales fiables pour les calibrer.

Exemple de modèle programmable

La variation du niveau organique sur le long terme est souvent décrite par une équation différentielle simple. Pour le cas avec apport pour atteindre une MO cible, l'équation est:

$$MO(t) = MO_S + (MO_O - MO_S)\, e^{-kt}$$

avec:

$MO(t) \rightarrow MO_S$ lorsque $t \rightarrow \infty$

Si $MO_O > MO_S$, la MO diminue vers MO_S

Si $MO_O < MO_S$, la MO augmente vers MO_S

En prenant l'hypothèse d'une masse de sol de 3500 t/ha, une valeur actuelle de MO_O= 1,8%, une valeur cible MO_S= 2,5 %, une vitesse de minéralisation K = 2 %, on démontre qu'il faudrait un apport ≈ 6,37 t/ha/an pour remonter le niveau en 5 ans et ≈ 3,37 t/ha/an en 10 ans.

Amendement calcaire

Au Maroc, les sols acides sont quasi inexistants. L'algorithme de calcul du besoin en chaux a néanmoins été intégré au logiciel par précaution, afin de traiter d'éventuels cas ponctuels et, le cas échéant, de permettre l'utilisation du système dans des contextes étrangers. Bien qu'il existe au moins une vingtaine de formules pour estimer la recalcification et la correction du pH, la formule retenue ici prend en compte à la fois le pH et l'importance du complexe argilo-humique du sol:

$$AMC = 0{,}02\ (pHc - pHa)\ (A + 5\ MO)$$

où:

AMC représente la quantité de calcaire à apporter (t/ha), le pHc, la valeur cible de pH, pHa la valeur actuelle mesurée de pH, A la teneur en argile (‰), et MO la teneur en matière organique. Ce qui donne pour une terre à 350 ‰ d'argile, 20 ‰ de MO, un pHa = 5,5 et un pHa de 7,0, un apport de calcaire AMC ≈ 13,8 t/ha.

Amendement de la magnésie (Mg)

Le Mg échangeable est interprété en fonction soit de l'argile, soit de la CEC et pour certaines espèces arboricoles en fonction du risque d'antagonisme avec K.

Du fait de la compétition sol/plante pour le Mg, et de la concurrence entre cations sur le complexe adsorbant, l'augmentation de la teneur en argile ou de la CEC doit s'accompagner d'un niveau de Mg proportionnellement plus élevé, afin de maintenir un taux de saturation suffisant et garantir une alimentation correcte de la plante.

Les relations retenues, bornées inférieurement par la valeur Mg min = 60-80 ppm en sols légers sont:

$$Mg\ (ppm) = 14{,}52 + 0{,}26\ Argile\ (‰)$$

Ou encore

$$Mg\ (ppm) = 12{,}81 + 0{,}37\ CEC\ (meq/kg)$$

Dans les sols du Maroc, si on met de côté les formations sableuses franches, le complexe est en général largement saturé en Mg. Comme pour le calcium, en pratique, il est rare que le système édite une correction effective en magnésium.

CALCUL DES PLANS DE FUMURE

Fertilisation azotée

Détermination de la dose

Entre l'approche expérimentale et la méthode du bilan, c'est cette dernière qui a été retenue pour l'estimation informatique de la fumure azotée. Le principe de calcul consiste à confronter le besoin total de la culture en azote (N) à l'offre du milieu (reliquat sol, minéralisation et eau d'irrigation) et à apporter la différence éventuelle par l'engrais.

L'algorithme de calcul programmé fait appel à la formule ci-dessous:

$$F\ (U\ ou\ kg/ha) = [(Rdt \times Pr + Nrf + Np) - (Nrd + Nm + Nei)]$$

avec

Rdt: rendement cible, par exemple 50-60 q/ha pour les céréales en année climatique favorable ou en irrigué.

Pr: prélèvement unitaire en azote pour produire 1 q de grain, typiquement 2,8-3 kg/q.

Nrd: azote résiduel au sol au départ (avant semis), environ 35-40 kg/ha.

Nrf: azote résiduel au sol à la récolte, environ 45–50 kg/ha.

Nm: azote d'apport organique externe et azote minéralisable net pendant la campagne, environ 60–80 kg/ha.

Np: azote susceptible d'être perdu (volatilisation ou lessivage), généralement 5–10 %.

Nei: azote apporté par l'eau d'irrigation (variable en fonction de la concentration et la dose utilisée).

Exemple:

$$F\ (U\ ou\ kg/ha) = [(60 \times 2{,}8 + 45) - (35 + 70)]/(0{,}90) \approx 130\ U/ha$$

Choix de l'engrais-Époque d'épandage

Pour la grande culture d'une manière générale, la liste de référence d'engrais azotés disponibles sur le marché, pour opérer le choix est très limitée et se compose du sulfate d'ammoniaque 21 %, de l'ammonitrate HD 33,5 % et de l'urée 46 %.

En sol sablonneux avec saisie de la mention «risque élevé de lessivage», la préférence portera sur le sulfate d'ammoniaque (1); il en est de même s'il s'agit d'une culture exigeante en soufre comme le colza, en terres calcaires avec risque de volatilisation, la machine recommandera d'éviter l'urée (2). Lorsqu'aucune contre-indication n'est signalée lors de la saisie, le système proposera un choix technique libre entre les trois engrais, avec possibilité de les départager par la suite, via l'option «Analyse du coût».

Avec l'édition de la dose, le système édite aussi d'office les époques d'épandage. Pour les céréales à paille par exemple, ce serait l'épandage au Semis/Tallage/Montaison ou Tallage/ Début/Mi-Montaison ou encore Tallage/Mi/ Fin-Montaison en fonction du niveau de l'azote de départ dans le sol, de l'évolution réelle de la végétation et des conditions climatiques comme l'explique le Help agronomique du système (Tableau 4). Pour une valeur confortable de Nrd (>> 15-20 ppm), ce sera Zéro N au semis, pour Nrd faible ce sera un apport au semis et zéro au tallage si le peuplement-pied est très bon (>> 400 pieds/m^2).

Bornage et gestion prudente de l'azote

Pour de nombreuses raisons liées à la dynamique de l'élément dans le sol, aux risques de pollution élevés qu'il comporte, la gestion de la fertilisation azotée est beaucoup plus compliquée que ne l'est celle du PK ou des autres éléments, particulièrement en conditions de climat méditerranéen. Au centre de cette difficulté se trouve le caractère aléatoire de la plupart des termes du bilan utilisés pour le calcul, à commencer par le rendement espéré par rapport au rendement effectif final réalisé. Vous prévoyez 50 q/ha; la sécheresse s'installe et vous ne réalisez que 30, voire 10 q/ha. Vous intégrez dans vos calculs une mesure d'azote de départ (Nrd) équivalente à 45 U/ha; deux à trois semaines plus tard, une très forte pluie arrive, et une bonne partie de cet azote est déjà hors de portée des racines. Vous tablez sur une minéralisation modérée de 60 U/ha; des conditions très favorables s'installent comme en 2018 ou 2026 et le sol en produit de quoi couvrir 50 % de votre objectif initial de Rdt. Ainsi, à chaque étape du calcul, une incertitude de plus intervient. C'est précisément cette variabilité - climatique, biologique et agronomique - qui impose de raisonner l'azote non pas comme une valeur figée et définitive, mais selon une logique de bornage et d'ajustement continu.

Tableau 4: Époques indicatives d'apport de l'engrais azoté pour quelques cultures

Culture	Stades ou périodes d'apport de l'azote (N)
Orge – Triticale	Semis / Redressement (fin tallage) / Mi-montaison
Maïs	Semis / Stade 5–6 feuilles / 2-3 nœuds formés
Betterave sucrière	Semis / 70^e jour après levée / 110–160^e jour après levée
Luzerne intensive (>7–8 coupes/an)	Une coupe sur deux (alternance: une coupe avec N, une coupe sans N ou avec PK)

Aucun laboratoire crédible dans le monde ne peut prétendre fournir une fertilisation prévisionnelle figée pour l'azote. Dans le cadre du d'Ibn Alawam système FRGC développé au Maroc, l'édition de la recommandation est systématiquement accompagnée du message d'alerte suivant, avec renvoi au «Help Agronomique» du logiciel pour consulter les détails:

«Ce plan de fumure vous est donné à titre indicatif; il doit encore être adapté en fonction des conditions réelles de la campagne si celles-ci s'écartent beaucoup de vos prévisions».

Pour prévenir toute recommandation aberrante, le système intègre un mécanisme de bornage pouvant suspendre l'édition d'une dose jugée anormalement basse ou excessive. En conditions normales - parcelles irriguées ou années favorables en Bour - les apports d'azote sont encadrés par les bornes [90–130 U/ha], extensibles à [140–160 U/ha] lorsque la pluviométrie hivernale est élevée et le risque de lixiviation important, comme en 2025/26, où le premier apport de N de fond, a été suivi dans le Bour favorable de 500–600 mm de pluie en 70–80 jours.

La fumure phospho-potassique

L'algorithme prévoit le calcul de trois types de doses: la dose de redressement (FR) en cas de sol pauvre (surtout en irrigué et en Bour favorable), la dose d'entretien (FE) lorsque le sol est normalement pourvu, et la dose réellement appliquée, dite fumure de l'année (FA).

Pour le redressement, la formule de calcul est:

$$F_R = Ms \times (\Delta P \text{ ou } \Delta K) / (1 - C)$$

où:

Ms représente la masse de sol de l'horizon exploité, ΔP ou ΔK l'écart (déficit à combler) entre la teneur cible et la teneur actuelle mesurée au sol, et C le coefficient de majoration lié à la rétrogradation pour le phosphore ou à la fixation pour le potassium.

La dose d'entretien F_E est déterminée par la formule:

$$F_E = (Rdt \times Ex) - R_S$$

où Rdt est le rendement prévisionnel, Ex l'exportation unitaire en P ou K (par quintal ou par tonne de production) et R_S, les restitutions au sol (pailles, fanes, collet, feuilles, fumier, lisier, fiente…).

La dose annuelle F_A appliquée par la formule:

$$F_A = (F_R / T) + F_E$$

où T représente le nombre d'années ou de cultures (cas des systèmes intensifs ou superintensifs avec 2 ou 3 productions/an dits 2P ou 3P) sur lequel le redressement est réparti.

Le système prévoit, le cas échéant, des impasses temporaires avec $F_A = 0$, limitées dans le temps et conditionnées par une surveillance régulière de l'évolution de la fertilité et des niveaux de productivité.

C'est le cas de certaines terres, comme les Dehs du Gharb, où le potassium a été supprimé de la fertilisation depuis les années 1990, ou de certains Groupes avec des parcelles de grandes cultures dont le phosphore assimilable dans le sol dépasse 80-100 ppm.

ENGRAIS DE FOND / OPTIMISATION DU COÛT

Ce module, doté de plusieurs sous-options, peut être utilisé tant par le fermier que par le fabricant de Bulk Blending, avec toutefois une responsabilité réglementaire différente selon l'usage: un mélange destiné à un usage interne n'engage aucune responsabilité judiciaire, tandis que du vrac destiné à la vente doit respecter la réglementation en vigueur.

Le module analyse la matrice des coûts des engrais disponibles sur le marché, en ramenant les prix à l'unité fertilisante (N, P_2O_5, K_2O, etc.), puis détermine la combinaison optimale d'engrais pour satisfaire la formule recommandée au coût minimal. Il identifie ensuite le mélange correspondant et édite sa composition détaillée en intégrant les contraintes techniques, notamment de compatibilité physique ou chimique.

Du fait de la grande diversité des cas de figure programmés, il est impossible de les présenter tous ici. Mais donnons-en une illustration partielle.

Mélange pour usage interne à la ferme

Fumure betterave à sucre: 250-110-280S, dont fumure de fond 50-110-280S.
Engrais à mélanger: ammonitrate 33,5 %; DAP 18-46-0; sulfate de potasse 50 %.
Mélange recommandé: [20 kg – 239 kg – 560 kg]/ha.

Coût unitaire fertilisant (C(UF)): calculé comme le prix par quintal divisé par la teneur en élément fertilisant.

Exemples:

SA 21 % à 255 Dh/q → C(UF) N = 255 ÷ 21 ≈ 12,14 Dh/U

AM 33,5 % à 370 Dh/q → C(UF) N = 370 ÷ 33,5 ≈ 11,04 Dh/U

DAP 18-46-0 à 280 Dh/q → C(UF) P_2O_5 = (280 - 18 × 12,14) ÷ 46 ≈ 1,34 Dh/U

SKG 50 % à 820 Dh/q → C(UF) K_2O = 820 ÷ 50 = 16,40 Dh/U.

Même si cela n'altère en rien la procédure de calcul, précisons que ces prix sont indicatifs et doivent être interprétés avec prudence, notamment en raison des subventions de l'État qui peuvent fausser le coût de certains engrais tels que le DAP ou l'ammonitrate.

Vrac pour la commercialisation - Culture de betterave

Dans le cas du Bulk Blending destiné à la commercialisation, le système procède par étapes successives et structurées:

• Il identifie, dans sa base de données, les engrais physiquement et chimiquement compatibles, éliminant d'emblée toute combinaison susceptible d'entraîner des réactions indésirables, des prises en masse ou des ségrégations excessives à l'épandage.

Tableau 5: Bulk Blending 5-10-30 (+1 % sécurité)

Composant	% garanti	Quantité (kg)	Contribution utile (kg)
Sulfate de potasse	50 % K_2O	606,0	303,0 K_2O
DAP (18-46-0)	18 % N – 46 % P_2O_5	219,6	39,5 N + 101 P_2O_5
Ammonitrate	33,5 % N	32,8	10,0 N
Charge (MI)*	—	141,6	—
Total	—	1000 kg	

• Il réalise ensuite la mise à mille (formulation ramenée à 1000 kg), base standard du vrac commercial.

• Il explore toutes les combinaisons mathématiquement possibles permettant d'atteindre la formule cible.

• Il compare enfin les coûts par combinaison, retient les solutions techniquement conformes, puis sélectionne celle qui optimise le coût tout en respectant les contraintes de sécurité et de tolérance.

À titre d'illustration, le tableau 5 présente un exemple de mélange proche de l'équilibre pour une formule 5-10-30 destinée à la culture de la betterave, avec une marge de sécurité de +1 % lors des mélanges.

La charge le plus souvent utilisée au Maroc du temps de Fertima était l'hyper 32.

Le tableau 6 compare deux types de mélanges possibles pour fabriquer le Bulk destiné à la betterave: le premier centré sur le DAP, le second sur le 14-28-14C avec un prix hypothétique de 1100 Dh/q. Il met en évidence un écart de coût d'environ 25 % en faveur du mélange à base de 14-28-14C. Cette comparaison reste une illustration simplifiée, l'algorithme explorant en réalité toutes les combinaisons possibles avant de déterminer à la fois le mélange optimal et le coût minimal correspondant.

Dans le calcul du prix de revient d'un Bulk Blending, l'acheteur et le fabricant disposent d'informations de nature différente, ce qui conduit à des estimations et interprétations distinctes du coût des unités fertilisantes.

Prix vu par l'acheteur: celui-ci ne connaît que le prix des engrais bruts et les proportions du mélange. Il répartit le différentiel Δ au prorata des unités (N, P_2O_5, K_2O) pour estimer le coût moyen. Il s'agit donc d'une approximation indirecte.

Prix vu par le fabricant: ce dernier à une vue à 360° sur l'opération; il connaît les coûts réels des matières premières, qui peut d'ailleurs être inférieur à celui proposé à un agriculteur, du fait du volume commandé, mais aussi le coût de l'opération de mélange, de la logistique et des autres frais, ainsi que sa marge. Il peut ainsi déterminer le coût de revient réel et fixer le prix de vente en toute connaissance de cause.

ARCHIVAGE DES INFORMATIONS

Ibn Alawam Système FRGC dépasse le simple rôle de plateforme d'interprétation et de calcul des plans de fumure. Il assure également l'archivage des données saisies et leur réutilisation pour analyse et comparaison. Par exemple, pour:

• Suivre l'évolution de la fertilité d'un terrain entre deux périodes et vérifier si la stratégie adoptée a atteint ses objectifs: stabilisation de la fertilité sur un terrain initialement fertile, efficacité d'une fumure de redressement, ou estimation de la baisse de fertilité en cas d'impasse prolongée.

• Conserver et rappeler l'ancien plan de fumure pour sa correction ou lors de la campagne suivante, facilitant le suivi historique et la planification. Le plan de fumure de l'année suivante Ns est calculé en fonction de celui de l'année précédente Np et de l'écart, en plus ou en moins, entre le Rdt réalisé par rapport au Rdt cible.

• Archiver les apports de fumier et autres matières organiques, et les exploiter année après année selon un coefficient d'utilisation adapté, notamment pour tenir compte de la minéralisation de l'azote.

• Archiver le coût des matières: fumier, amendements, engrais, …

AIDE AGRONOMIQUE POUR ASSISTER L'UTILISATEUR

Le Service «Help Agronomique», accessible par simple clic, constitue l'une des originalités les plus marquantes du système. Véritable assistant intégré, il associe à chaque critère une aide structurée - plus de quarante aides détaillées - expliquant clairement le quand, le pourquoi et le comment des critères ou paramètres de calcul utilisés et des décisions agronomiques.

Ainsi, pour l'échantillonnage du sol par exemple, la rubrique «Help» met à la disposition de l'utilisateur les règles à suivre pour réaliser un prélèvement pertinent et fiable. Elle précise la période de prélèvement, la profondeur d'échantillonnage selon le type de sol et ou la séquence sur le long terme de préparation de la parcelle, le nombre minimal de carottes à prélever ainsi que l'outil approprié. Elle décrit également la méthode de zonage et de constitution de groupes de parcelles représentés par un même échantillon composite, particulièrement utile lors d'opérations d'échantillonnage à grande échelle - région agricole ou ensemble structuré d'exploitations - où l'échantillonnage individuel de toutes les parcelles n'est ni possible ni économiquement justifié.

Pour la texture du sol, l'information contenue dans «Help» dépasse aussi la simple classification granulométrique ou le lien qu'elle a avec la fertilité et la fertilisation. On peut y trouver des éléments pour affiner le choix du matériel d'accompagnement pour le travail du sol, compte tenu de l'indice de plasticité, le choix du bon moment d'intervention, des indications pour gérer l'irrigation et le drainage. Pour la capacité d'échange cationique (CEC), il explicite la signification pratique d'un niveau élevé ou faible de ce critère et indique comment exploiter cette information pour ajuster les corrections potassiques ou magnésiennes.

Pour la MO et l'azote, le texte rappelle la signification d'une valeur faible ou forte de ce critère, le lien avec le comportement du sol, l'impact sur la minéralisation de l'azote et le lien de cette dernière avec les conditions plus ou moins favorables de ce phénomène dans les conditions de chaque écosystème agroclimatique. Concernant le calcaire actif, l'aide précise ses conséquences agronomiques - notamment le blocage du phosphore et des oligo-éléments - identifie les cultures sensibles et propose des stratégies de contournement adaptées.

Eu égard à la fumure azotée en climat méditerranéen, «Help» traite les impondérables liés à la forte variabilité interannuelle, en particulier en agriculture pluviale, et fournit du conseil pour gérer les années atypiques, très sèches ou très pluvieuses, l'enjeu économique lié à celles-ci, selon que la décision prise a été de diminuer ou d'arrêter l'apport (année très sèche) ou au contraire d'augmenter celui-ci (année très pluvieuse).

Tableau 6: Comparaison du coût de deux mélanges pour un engrais de formule 5-10-30

Mélange	Coût de base (Dh/t)	+10 %* frais	+15 %* marge	Coût final (Dh/t)
14-28-14C + sulfate de potasse + charge (MI 300 Dh/t)	8149	8964	10309	10309
DAP + ammonitrate + sulfate de potasse (cas du tableau 5)	10837	11921	13710	13710

*****Coût final = Coût de base (Matières premières + Coûts industriels + Logistique) + Frais commerciaux + Marge*

Les algorithmes de calcul des fumures phospho-potassique sont également expliqués de manière critique, en soulignant les limites des normes utilisées et le degré de confiance que permet la base de données disponible au niveau local. Il y a aussi un Help qui accompagne l'utilisateur, qu'il soit fermier ou fabricant de Bulk, dans le choix des engrais, la maîtrise des mélanges - en évitant les incompatibilités chimiques ou physiques - et l'optimisation du coût de la fumure ou du mélange. Ainsi conçu, le Service Help ne se contente pas seulement d'assister le calcul: il éclaire la décision et renforce la rigueur agronomique de l'utilisateur.

PARAMÉTRAGE DU LOGICIEL

Le logiciel est conçu selon une architecture organisée autour de deux blocs complémentaires. Le premier, qualifié d'organique- véritable noyau du système - relève du domaine de l'expertise spécialisée. Il correspond à la structure scientifique et algorithmique qui régit le fonctionnement du programme et qui, de ce fait, n'est pas accessible à la modification par l'utilisateur lambda (λ). Ce bloc assure la cohérence d'ensemble, la stabilité des procédures de calcul et la fiabilité des résultats produits. Il joue également un rôle de garde-fou en évitant des interventions susceptibles, à terme, d'altérer le système, de l'éloigner de sa conception d'origine et d'en compromettre l'efficacité.

La seconde partie, en revanche, est paramétrable et peut faire l'objet d'ajustements ou de modifications. Elle offre à l'utilisateur une latitude contrôlée pour adapter l'outil à ses propres réalités techniques et économiques. Sont ainsi configurables, sous forme de matrices organisées par objet, les éléments les plus évolutifs du système ou susceptibles de varier selon les contextes: les prix des engrais - qui changent d'une année à l'autre et d'une région à une autre -, la composition des fumiers, lisiers et autres amendements organiques, ainsi que les coefficients de correction de la fumure azotée (effet du précédent cultural, risques de lessivage ou de volatilisation, etc.).Ce dispositif permet de tester de nouvelles hypothèses, d'intégrer des données locales actualisées et d'explorer des scénarios technico-économiques spécifiques ou jugés plus pertinents.

Toutefois, bien que le système laisse la main à l'utilisateur, il fonctionne comme une plateforme opérationnelle sécurisée: le paramétrage initial est mémorisé et peut être réactivé à tout moment. Ainsi, en cas de dérive, d'erreur d'appréciation ou de test non concluant - lorsque l'utilisateur se sent perdu ou constate que le raisonnement se dégrade plutôt que de s'améliorer - un simple clic permet de revenir instantanément au référentiel d'origine. Une architecture qui concilie la souplesse d'adaptation avec la préservation de l'intégrité scientifique du système.

Comme pour les autres rubriques, la classification des amendements selon leur qualité est consultable dans le «Help». La bonne correspond à un fumier récent, bien décomposé et riche en éléments fertilisants, la moyenne à un fumier courant ou standard, et la médiocre à un fumier ancien, lessivé, stocké longtemps ou provenant d'une litière pailleuse (Tableau 7).

Tableau 7: Exemple de sous-matrice paramétrable par l'utilisateur (kg/t Matière Brute)

Qualité du fumier	N total	P_2O_5	K_2O
Bonne	4–6	3–4	6–8
Moyenne	3–4	2–3	4–6
Médiocre	2–3	1.5–2	3–4

OPTION PLAN DE FUMURE SANS ANALYSES

Cette option s'avère nécessaire car, au Maroc, la majorité des exploitants cultivent de petites parcelles morcelées et tout le monde n'est pas disposé à financer une analyse individuelle. Il fallait donc choisir entre une analyse collective ou, pour ceux qui refusent d'y adhérer, un plan de fumure de première approximation, de type «mieux que rien», établi par groupe d'exploitants partageant un même écosystème. Basé sur l'apport d'entretien, ce plan peut être ajusté à la baisse, par exemple pour le potassium dans les Dehs riches en K, ou à la hausse pour les sols sableux côtiers pauvres en nutriments ou pour les rendzines à couche arable très mince. Une fois calculé, ce plan permet l'utilisation complète de tous les autres modules du système sans restriction.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Avec le premier logiciel de la SASMA en 1986, dédié aux agrumes, suivi dix ans plus tard par Ibn Alawam Système FRGC pour la grande culture et les fourrages, le Maroc peut être considéré comme l'un des pionniers de l'informatisation de la décision agronomique en Afrique. Entre ces deux jalons, l'émergence plus récente d'ERP conçus au Maroc et aujourd'hui en voie de déploiement à l'étranger (Bee One d'Agri-data comme exemple), illustre également le potentiel du pays à faire de l'informatisation de l'agriculture un véritable levier d'innovation, tant au niveau national qu'à l'international, en capitalisant sur le savoir-faire productif accumulé.

Aujourd'hui, le contexte offre une opportunité stratégique majeure. Les contraintes techniques qui pesaient autrefois sur la conception logicielle - lourdeur des développements, faiblesse des langages, délais de mise au point - ont pratiquement disparu. Grâce à l'émergence de l'intelligence artificielle, la puissance des environnements de programmation modernes et la disponibilité d'outils de modélisation performants réduisent considérablement les barrières technologiques et facilitent la réalisation. Autrement dit, la difficulté n'est plus d'ordre informatique.

D'autre part, le Maroc dispose aujourd'hui d'une expertise solide en agronomie, fruit de plusieurs décennies d'expérience de terrain. Les compétences scientifiques nécessaires pour concevoir des systèmes avancés d'aide à la décision, que ce soit en fertilisation ou dans d'autres domaines des techniques agricoles, existent bel et bien. L'enjeu ne réside donc plus principalement dans la capacité à élaborer des algorithmes, avec toute la prudence requise, mais dans la qualité et la disponibilité des bases de données destinées à les alimenter. C'est précisément là que le bât blesse.

Eu égard aux conditions naturelles du Maroc, certains «vieux-nouveaux» concepts comme l'agroforesterie, l'agriculture écologique ou biologique, ainsi que la permaculture, bien qu'ils présentent un certain intérêt, ne peuvent se substituer aux systèmes de culture conventionnels en tant que socle de la souveraineté alimentaire du pays. Ils peuvent apporter des contributions utiles dans des contextes spécifiques, mais relèvent davantage de systèmes de niche, difficilement extensibles à grande échelle. D'abord pour une question de contrainte climatique étant donné que les zones arides et semi-arides ne se prêtent pas à l'arboriculture, l'un des deux piliers de l'association binaire «arbres + cultures» de l'agroforesterie. Sans s'étendre davantage sur le sujet, pour intéressants qu'ils soient, ces nouveaux concepts de

production ne devraient pas mobiliser une part excessive de l'énergie des agronomes consacrée au développement agricole ni primer sur les enjeux fondamentaux liés à la production alimentaire de masse. Les données naturelles et les enjeux fondamentaux des diverses régions du monde n'étant toujours pas les mêmes, il ne faudrait surtout pas vouloir sauter les étapes, sous prétexte de vouloir rester aligné sur les tendances internationales en matière de recherche. Veille sur ce qui se passe à l'étranger et promotion de l'innovation doivent aller de pair avec le besoin du pays d'assurer les denrées de base pour sa population.

Au Maroc, le nombre d'essais rendus publics sur la fertilisation et les engrais demeure historiquement limité, au regard des 8 à 10 millions d'hectares cultivés et de leur forte variabilité climatique, pédologique et culturale, y compris pour le phosphore, alors que le pays occupe une position stratégique mondiale dans cette filière. Cette lacune devient particulièrement critique dès lors que l'on souhaite-comme certains y pensent le faire à partir du Maroc- de développer des outils adaptés à de vastes régions agroécologiques ou continentales.

En définitive, la problématique n'est plus véritablement d'ordre technologique, mais relève avant tout de la dimension expérimentale du sujet et de l'investissement en temps et en financement que le Maroc est prêt à lui consacrer pour progresser plus rapidement. La relance d'un programme structuré d'essais agronomiques au champ apparaît ainsi comme une condition essentielle pour toute démarche sérieuse visant l'informatisation avancée des plans de fumure.

À l'échelle nationale, des progrès substantiels ont été accomplis dans le domaine de la fertilisation des agrumes, des grandes cultures et, dans une certaine mesure, de l'arboriculture. Par contre, les connaissances disponibles sur les cultures maraîchères de plein champ demeurent relativement limitées. Or, ces cultures couvrent une grande diversité d'espèces destinées à l'approvisionnement du marché intérieur et, pour certaines d'entre elles, à l'exportation. Cette situation souligne l'importance, pour pouvoir informatiser la fertilisation de cette filière, d'accélérer l'acquisition de données expérimentales fiables au niveau local.

Sans base de données expérimentales solides, la sophistication algorithmique risque de demeurer théorique ou de faire des propositions à la production qui risque de s'éloigner de la réalité du terrain. Une pomme de terre ou de la carotte d'arrière saison à Guigou n'est pas forcément du copie-collé sur la Chaouia ou le Saïs.

À l'inverse, celle-ci adossée à une base de connaissances robuste, elle peut devenir un puissant levier de modernisation et de souveraineté technique.

Sur quels aspects le Maroc a-t-il encore besoin de compléments d'essais au champ? En réalité, presque sur l'ensemble des sujets, bien que les niveaux de priorité varient, comme le montre la synthèse de l'évolution des connaissances sur la fertilisation au Maroc au cours des trois dernières décennies. L'idée centrale à retenir est que le Maroc n'a pas encore atteint un niveau de connaissances suffisant pour se désengager des expérimentations classiques sur les engrais, contrairement à certains pays occidentaux qui ont déjà franchi cette étape pour s'orienter vers d'autres priorités. Une telle transition ne peut s'inscrire dans une continuité logique qu'à condition d'avoir atteint, pour chaque thématique, un niveau de maîtrise tel que les nouvelles expérimentations n'apportent plus que des gains marginaux limités en termes de progrès scientifique ou agronomique. Or, ce seuil n'est pas encore atteint au Maroc. À cela s'ajoute une contrainte spécifique aux climats méditerranéens, à savoir une forte variabilité interannuelle des conditions climatiques, qui complique la stabilité et la reproductibilité des résultats expérimentaux, contrairement à certaines régions du monde où les conditions sont plus régulières.

Le champ d'investigation reste vaste. Pour l'azote, on peut citer notamment la stabilisation des données relatives à l'azote minéral initial du sol selon les années climatiques types, l'évaluation de la minéralisation de la matière organique par grands types d'écosystèmes, ainsi que la quantification expérimentale des corrections à apporter à la fumure pour tenir compte des pertes par volatilisation et par lessivage ou pour valoriser la minéralisation en bonne année climatique.

Pour l'interprétation du phosphore et du potassium dans le sol, il serait également nécessaire de passer des références provisoires actuelles à des normes établies sur la base d'un peu plus d'expérimentations, différenciées selon les étages climatiques, types de sols et les systèmes de culture.

Pour les oligo-éléments, bien que le Maroc ait, ces dernières années, publié plus d'une vingtaine d'articles apportant un éclairage utile, les données disponibles restent insuffisantes comme base scientifique robuste, empêchant de trancher définitivement certaines questions, notamment l'établissement des seuils du sol pour prévenir les carences.

Bien entendu, ces insuffisances n'empêchent pas le lancement du développement de logiciels dotés d'un paramétrage évolutif. Le démarrage peut s'appuyer sur les références issues de la littérature agronomique disponible, nationale ou étrangère, tout en prévoyant une mise à jour progressive de la base de données, au fur et à mesure de l'acquisition et de la validation de nouvelles références locales.

Une autre voie est celle des «matrices de référence», construites à partir d'enquêtes de terrain et d'analyses de sol réalisées chez des producteurs pionniers, eu égard au double avantage qu'elle offre: celui, d'une part, d'écourter les délais d'obtention des standards techniques et, d'autre part, de les établir à partir de situations réelles de la production. Toutefois, malgré l'intérêt de cette démarche qui reste de toute première approximation, elle ne peut s'affranchir de l'expérimentation, qui in fini demeure l'outil essentiel de validation en agronomie.

L'acquisition rapide de bases de données performantes, quelle qu'en soit la méthode, permet d'associer dès le départ, les possibilités offertes par les outils numériques à un processus d'amélioration continue fondé sur l'expérience et sur les données locales. Elle contribue également à inscrire la gestion de la fertilisation dans une perspective de durabilité, en favorisant des apports plus précis, mieux ajustés aux besoins réels des cultures et aux caractéristiques des sols.

En améliorant la précision des recommandations, ces outils participent à la réduction des excès d'engrais, à la limitation des fuites vers l'eau et l'atmosphère, et donc à une meilleure protection de l'environnement. L'informatisation raisonnée des plans de fumure devient ainsi non seulement un levier d'efficacité technique et économique, mais aussi un instrument au service d'une agriculture respectueuse de l'environnement plus responsable et durable.

Enfin, il est important de souligner que la fertilisation n'est qu'une des nombreuses facettes techniques de la production agricole. Quelle que soit la sophistication des modèles ou des programmes d'optimisation, l'efficacité des engrais reste conditionnée par la maîtrise en même temps des autres pratiques culturales. Un champ correctement fertilisé ne valorise pleinement l'apport d'engrais que si l'ensemble des choix techniques - variétal, désherbage, irrigation, densité de semis et autres opérations culturales - est optimisé. À titre d'illustration, l'engrais appliqué sur une parcelle de betterave non désherbée profitera avant tout aux mauvaises herbes plutôt qu'à la culture cible.

Peut-être qu'à l'avenir, des logiciels interactifs intégrant toutes les facettes de la production représenteraient une avancée inédite dans la gestion des pratiques agricoles.

DOCUMENTS CONSULTÉS ET/OU EXPLOITÉS

Dossier agronomique de base pour l'élaboration du Logiciel sur les Agrumes : Aït Houssa A., Idrissi A., Lekchiri A. SASMA 1986.

Normes d'interprétation des analyses de sol par la SASMA.

IPAS: Guide du logiciel sur l'interprétation personnalisée de l'analyse de sol: SCPA- Aspach-Le-bas Haut Rhin-France.

L'analyse de terre: Réalisation d'un programme d'interprétation automatique. J-C Rémy et A.Marin-Laflèche. *Ann. Agron.*, 1974, 25: 607-632.

Méthodes de Mesure des propriétés physiques des engrais granulés dans le groupe GP: AZF- Recherches Procédés Engrais. BP 204-76120-grand Quevilly- Groupe Elf Atochem- France.67 p.

Azote Juste: Fertilisons mieux ensemble. Chambre d'agriculture CALVADOS/AZF- Grande Paroisse Groupe Elf Atochem-France.53 p.

Diverses thèses de Doctorat Es Sciences et de 3ème cycle.

Divers guides et documents techniques sur la fertilisation et les engrais.

Divers rapports internes sur les analyses de sol et de végétaux. Direction des domaines Agricoles-Casablanca- Maroc.

Divers rapports internes sur les analyses de sol et de végétaux. Direction du Groupe ProvidenceVerte-Rabat Maroc.

Amendements calciques et magnésiens: CELAC, 41 Avenue de Friedland-Paris 8°- France: 20 p.