



Royaume du Maroc
Académie Hassan II des Sciences et Techniques

«Restauration de la fertilité des sols : un défi mondial, une nécessité pour le Maroc»

Actes du séminaire organisé à Rabat
le 19 février 2016 à l'occasion de la célébration
du 10^{ème} anniversaire de l'installation
de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

**Edités en hommage à
Feu Pr Mohamed BADRAOUI**

(23 janvier 1955 - 16 avril 2019)
ancien Directeur de l'INRA
(Institut National de la Recherche Agronomique)





ROYAUME DU MAROC
ACADÉMIE HASSAN II DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Restauration de la fertilité des sols : un défi mondial, une nécessité pour le Maroc

Actes du séminaire organisé à Rabat
le 19 février 2016 à l'occasion de la célébration
du 10^{ème} anniversaire de l'installation
de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Edités en hommage à
Feu Pr Mohamed BADRAOUI
(23 janvier 1955 - 16 avril 2019)
ancien Directeur de l'INRA
(Institut National de la Recherche Agronomique)

Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Km 4, Avenue Mohammed VI (ex Route des Zaers)
Rabat, Royaume du Maroc

© Hassan II Academy Press

Dépôt Légal : 2022MO1806
ISBN : 978-9954-520-26-0

Réalisation : **AGRI-BYS S.A.R.L.**

Achévé d'imprimer : avril 2022
Imprimerie Lawne : 11, rue Dakar, Océan, 10040-Rabat, Maroc



**Sa Majesté le Roi Mohammed VI, que Dieu Le garde,
Protecteur de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques**

Avant-propos

La fertilité des sols reste l'un des principaux problèmes de l'agriculture auquel le Maroc essaye d'apporter une solution en développant de grands programmes par le biais du conseil agricole. L'extrême fragilité des sols ainsi que les menaces et les stress auxquels ils sont continuellement soumis sont en grande partie la conséquence des activités et pratiques humaines. Ressources non renouvelables, leur préservation est essentielle pour une sécurité alimentaire durable.

L'utilisation des biofertilisants constitue une alternative biologique et écologique importante, notamment en Afrique où la pauvreté domine et les moyens de préservation des sols et de l'environnement sont rares.

On estime qu'une bonne gestion durable des sols permettrait de produire 58% de plus de nourriture. Pour cela, il est nécessaire de renforcer la santé des sols en favorisant leur gestion optimale tout en s'appuyant sur la gestion de la matière organique.

Dans ce cadre, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, l'Ecole Normale Supérieure de l'Université Mohammed V de Rabat, et l'Association Marocaine de Microbiologie ont organisé, avec la participation de l'Institut National de la Recherche Agronomique, un Colloque International sous le thème : «Restauration de la fertilité des sols : un défi mondial, une nécessité pour le Maroc», le 19 février 2016 à Rabat.

Ce colloque a été programmé à l'occasion de la célébration du dixième anniversaire de l'installation de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques par Sa Majesté le Roi Mohammed VI.

Les travaux de ce colloque ont été articulés autour de thématiques relatant des stratégies d'amélioration durable de la fertilité des sols, dans le contexte du changement climatique, ainsi que de l'importance de la matière organique dans le sol pour une agriculture durable. A la lumière de la cartographie des sols au Maroc, présentée en conférence inaugurale par le regretté Si Mohamed BADRAOUI (alors Directeur de l'INRA), les experts étrangers (Sénégal et Espagne) et les représentants du secteur privé impliqué dans le domaine, ont apporté leur point de vue sur le domaine et notamment la promotion de la coopération nationale, africaine et internationale pour la restauration de la fertilité des sols des pays africains. De son côté, le représentant de la FAO au Maroc a présenté les recommandations de cette institution internationale émanant du rapport de la FAO suite aux manifestations organisées durant toute l'année 2015, déclarée «Année internationale des sols».

Le colloque s'est terminé par un débat, table ronde, sur la promotion de la coopération africaine pour la restauration de la fertilité des sols des pays africains et la contribution du secteur privé. Ont pris part à ce débat des chercheurs académiques nationaux et étrangers ainsi que des acteurs privés internationaux. Des recommandations importantes ont été formulées.

Enfin, la publication des conférences animées lors de ce colloque, a été jugée opportune pour rendre hommage à un grand chercheur, Feu Mohamed BADRAOUI, qui s'est investi à l'échelle nationale et internationale dans ce domaine et dont les contributions resteront des références.

Pr. Abdelkarim FILALI-MALTOUF
Membre Correspondant,
Académie Hassan II des Sciences et Techniques

Hommage à Feu Mohamed BADRAOUI

Je souhaiterais tout d'abord remercier l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques pour la publication de ces Actes de la journée «*Restauration de la fertilité des sols : un défi mondial, une nécessité pour le Maroc*» pour honorer la mémoire de notre regretté Mohamed BADRAOUI. Je suis également reconnaissant de l'opportunité qui m'est offerte de lui rendre cet hommage dont l'écriture fut pour moi très émouvante en raison de l'immense tristesse de ceux qui comme moi ont eu le bonheur de le côtoyer, de travailler avec lui et d'admirer l'homme qu'il a été dans sa manière aussi bien d'être que d'agir et d'incarner ce que peut être l'engagement avec le souci constant du bien commun.

Mohamed BADRAOUI a vécu, comme indiqué dans sa biographie sommaire, une carrière scientifique et professionnelle riche et féconde. Son parcours a oscillé entre la réflexion et l'action. La diversité des contributions réunies dans ces Actes constitue une fresque qui témoigne de son legs précieux et de ses apports inestimables aux sciences du sol aussi bien au niveau national qu'international. C'est un héritage extrêmement important qu'il nous laisse. Nous pouvons dire qu'aujourd'hui, il y a dans toutes les initiatives qu'il a entreprises ou semées cette culture de l'engagement, de la concertation et de l'action collective.

Sur un plan personnel, Si Mohamed était un ami proche et précieux dont les conseils et le soutien ont beaucoup compté pour moi, particulièrement à des moments importants notamment lors de la COP22 et le plaidoyer pour l'initiative de l'Adaptation de l'Agriculture Africaine «AAA» au niveau international et continental. Il était réaliste et indécorable.

Je suis profondément reconnaissant, alors que nous pleurons sa disparition, de pouvoir célébrer aussi sa vie et de saluer l'empreinte de son œuvre sur la communauté scientifique. Je forme l'espoir que ces Actes, au-delà de l'hommage qu'ils rendent au professeur Mohamed BADRAOUI, confèrent à leurs lecteurs le désir de poursuivre l'œuvre assurément inachevée mais combien passionnante qui fut la sienne.

Mohamed AIT KADI

Membre résident de l'Académie Hassan II
des Sciences et Techniques

Contexte

Il s'agit d'un recueil de conférences inédites, animées par d'éminents spécialistes, à l'occasion de la célébration du dixième anniversaire de l'installation, par Sa Majesté le Roi Mohammed VI - que Dieu Le garde-, de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Elles ont fait l'objet d'une journée organisée le vendredi 19 février 2016 à l'Ecole Normale Supérieure (ENS) de l'Université Mohammed V de Rabat, avec la participation de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), sur le thème: «Restauration de la fertilité des sols : un défi mondial, une nécessité pour le Maroc».

Outre des chercheurs et des universitaires, ont assisté et sont intervenues les personnalités suivantes :

Saaïd AMZAZI, Président de l'Université Mohammed V de Rabat.

Albert SASSON, Directeur du Collège des Sciences et Techniques du vivant, Académie Hassan II des sciences et techniques.

Mohammed BADRAOUI, Directeur de l'INRA, Maroc.

Hassan JAZIRI, Directeur de l'Ecole Normale Supérieure.

Achouri MOUJAHED, Directeur/conseiller Spécial du Directeur Général Adjoint, Département des ressources naturelles, FAO.

Mohamed Ait Kadi, membre résident, Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

Eulogio J. BEDMAR, CSIC, Granada, Espagne.

Diegane DIOUF, Université Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Sénégal.

Fikri EL YAHYAOUÏ, Valorhyze, Groupe Eléphant Vert, Maroc.

Abdelkarim FILALI-MALTOUF, membre correspondant, Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques a décidé de publier les travaux de ce séminaire et de les dédier à la mémoire du Professeur Mohamed BADRAOUI, ancien Directeur de l'INRA.

Sommaire

Feu Mohamed BADRAOUI - Biographie succincte	10
1. Fertimap: Un système d'information sur la fertilité des sols et un outil de raisonnement de la fertilisation des cultures au Maroc	
Mohamed BADRAOUI, Directeur général de l'INRA, Maroc.....	11
2. International year of Soils 2015- Sustainable Management of Soils	
Achouri MOUJAHED, directeur/conseiller spécial au Directeur Général Adjoint-Département des ressources naturelles, FAO.....	21
3. Biological alternatives to synthetic nitrogen fertilizers: from the Green revolution to the Microbial revolution	
Eulogio J. BEDMAR, Conseil Supérieur de la Recherche Scientifique (CSIC), Granada, Espagne.....	32
4. La matière organique dans le sol : un enjeu de taille pour une agriculture durable	
Fikri EL YAHYAOUÏ, Valorhyze, Groupe Eléphant Vert, Maroc.....	43
5. Changement climatique et stratégies d'amélioration durable de la fertilité des sols	
Diegane DIOUF, Université Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Sénégal.....	56
6. Programmes nationaux de recherche relatifs à la fertilité et à la fertilisation des sols	
Mustapha MISSBAH EL IDRÏSSI, ENS, Rabat.....	58

Feu Mohammed BADRAOUI

Biographie succincte

Pr BADRAOUI a été Directeur de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) de 2008 à 2019 (année de sa mort), après 3 années passées en tant que Directeur de la Lutte Contre la Désertification et de la Protection de la Nature au Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte Contre la Désertification (HCEFLCD). Titulaire du diplôme d'ingénieur agro-pédologue de l'IAV Hassan II en 1981, d'un doctorat es-Sciences agronomiques du même institut et d'un PhD en chimie, minéralogie et fertilité des sols de l'Université du Minnesota aux USA en 1988, Pr BADRAOUI avait occupé le poste d'enseignant-chercheur à l'IAV Hassan II entre 1981 et 2005.

Pr BADRAOUI s'est énormément investi aux niveaux national et international pour rehausser la prise de conscience des politiques sur l'importance des sols pour le développement économique et social durable des sociétés. Ainsi, dès 1992, il occupe le poste de président de l'Association marocaine des sciences du sol (AMSSOL), puis membre du groupe d'experts indépendants (point focal de l'Afrique) en appui au comité des sciences et technologies de la convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification entre 2003 et 2007, puis membre du premier panel technique international des sols créé en 2013 par la FAO dans le cadre du partenariat mondial sur les sols.

Pr BADRAOUI a été également membre permanent de l'Académie d'Agriculture de France de 2003 à 2019, membre du Board des directeurs du Centre International de Recherche sur les Zones Arides (ICARDA) et membre du Board des directeurs du Centre International de Développement des Engrais (IFDC). De 2010 à 2019, Pr BADRAOUI a siégé comme Administrateur et membre du comité d'investissement du fonds OCP pour l'Innovation en agriculture.

Fertimap: Un système d'information sur la fertilité des sols et un outil de raisonnement de la fertilisation des cultures au Maroc

M. BADRAOUI¹, R. BOUABID², R. BALAGHI¹, L. MOUGHLI³,
M. LAHLOU³, A. EL KANT⁴, R. MOUSSADEK¹

1- Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat

2- Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès

3- Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat

4- Groupe OCP, Casablanca

Résumé

Au Maroc, la problématique de la gestion de la fertilité des sols et de l'usage raisonné des fertilisants est un enjeu majeur pour l'amélioration de la productivité des cultures, notamment chez les petits et moyens agriculteurs. La connaissance des sols et de leur fertilité est requise non seulement à l'échelle de la parcelle, pour la maîtrise des apports des fertilisants, mais aussi à l'échelle territoriale afin de développer des formules régionales d'engrais adéquates. Elle est primordiale, non seulement pour rehausser la capacité productive des terres, mais aussi pour la préservation de l'environnement. Le projet «*Cartographie de Fertilité des sols cultivés du Maroc*», fruit d'un partenariat entre le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime et le Groupe OCP, est une initiative novatrice qui a pour but de répondre à ces défis à travers le développement d'un système innovant de compilation de l'information géo-spatialisée de la fertilité des sols et sa valorisation pour offrir des recommandations ciblées de fertilisations pour diverses cultures. Le système (fertimap.ma), accessible via le web, se veut comme un outil d'aide à la décision pour les agriculteurs et les conseillers agricoles; il représente également une base de données qui permet de mieux comprendre la variabilité de la fertilité des sols à grande échelle en vue de cibler des actions de développement adéquates, tel que prévu dans le cadre du Plan Maroc Vert.

1. Introduction

Au Maroc, l'agriculture constitue un secteur vital pour le développement économique et social. Les pouvoirs publics lui ont toujours accordé une priorité étant donné son importance pour assurer, du moins en partie, la sécurité alimentaire. Les

performances du secteur sont liées à de multiples facteurs, notamment, l'étendue des terres agricoles et leur qualité, le climat, les techniques de production adoptées par les agriculteurs, les technologies disponibles et les politiques d'appui. La superficie agricole utile, de l'ordre de 8.7 millions d'hectares, demeure limitée eu égard à la croissance démographique que connaît le pays.

Les sols marocains sont généralement caractérisés par une fertilité variable (chimique et organique) et les teneurs en certains éléments nutritifs des plantes sont souvent un facteur limitant pour assurer le potentiel de production agricole. L'usage des engrais à l'hectare reste relativement encore faible par rapport aux besoins des cultures pour assurer leur potentiel de production. En effet, la moyenne des quantités d'unités fertilisantes utilisées à l'échelle nationale ne dépasse guère 50 kg/ha (tous éléments confondus). A titre de comparaison, la consommation moyenne en engrais en Espagne et en France est d'environ 140 kg/ha. Cependant, dans certaines zones à agriculture intensive sous irrigation, on peut trouver plutôt des situations d'usage abusif des engrais azotés sur certaines cultures. Cette situation a des conséquences aussi bien sur la rentabilité que sur l'environnement.

La problématique de la gestion de la fertilité des sols et de l'usage raisonné des fertilisants est donc un enjeu majeur pour l'amélioration de la productivité des cultures, aussi bien pour les grandes cultures (notamment les céréales) qui représentent une denrée de base couvrant les 2/3 des terres cultivées annuellement, que pour les cultures à plus haute valeur ajoutée, qui représentent un important levier économique à l'échelle nationale et internationale. L'état de fertilité des sols à un moment donné est spatialement très variable. Cette variabilité est affectée par plusieurs paramètres liés notamment aux spécificités des agroécosystèmes, à la nature des sols et aux pratiques agricoles.

Plusieurs études agro-pédologiques ont été réalisées dans différentes zones du pays depuis l'indépendance pour des objectifs différents (remembrement, irrigation, aménagement agricoles, etc.). Ces études ont souvent débouché sur une cartographie des sols (accompagnée d'analyses sur quelques profils types), ainsi que sur une cartographie de leurs aptitudes agronomiques. Ces études sont d'une grande valeur, mais leurs résultats ne sont pas suffisants pour être exploités à des fins de recommandations d'usage raisonné des engrais. Des évaluations ponctuelles d'analyses de sols ont également été réalisées par certains Offices de Mise en Valeurs Agricoles et Directions Provinciales d'Agricultures, mais qui sont restées limitées et peu valorisées pour un conseil agricole ciblé en matière de fertilisation adéquate des principales cultures.

Il y a lieu de remarquer qu'actuellement le marché des engrais au Maroc comporte une vaste gamme de formules d'engrais. Certaines de ces formules ont été développées sur la base d'études, alors que d'autres sont introduites par différents distributeurs sans fondement scientifique préalable justifiant leur adaptabilité aux différentes cultures et/ou systèmes de cultures.

La connaissance des sols et de leur fertilité à l'échelle des différentes zones agricoles du pays, est un élément incontournable pour mieux gérer la fertilisation des cultures tout en préservant la capacité productive des terres à long terme. C'est dans cette perspective que s'inscrit l'initiative «**Cartographie de Fertilité des sols cultivés du Maroc**», fruit d'un partenariat entre le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime et le Groupe OCP, et qui a pour but de contribuer à l'amélioration de la productivité des cultures à travers le développement d'un système innovant permettant l'intégration des informations relatives aux sols et à leur états de fertilité et leur usage pour une utilisation raisonnée des fertilisants. Le projet, qui a démarré en 2010, s'inscrit dans le cadre du Plan Maroc Vert (PMV) et vise la consolidation du partenariat public-privé, le renforcement des capacités et le développement d'outils innovants d'appui au Conseil Agricole.

2. Structuration du projet et principaux acquis

Le projet carte de fertilité des sols cultivés du Maroc a été structuré en plusieurs composantes complémentaires qui convergent sur les quatre volets suivants :

- La compilation des cartes pédologiques existantes et réalisation des études pédologiques complémentaires pour les zones non encore cartographiées;
- L'évaluation de la fertilité des sols, élaboration des cartes thématiques et normes d'interprétation;
- L'élaboration d'une application de type Web-mapping présentant également des fonctions de type système expert;
- Le renforcement de capacité et dissémination des acquis.

L'exécution du projet a été confiée au consortium constitué de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), l'Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès (ENA) et l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV).

2.1. Compilation des études pédologiques existantes et cartographie complémentaires

La cartographie des sols représente un support de visualisation et de spatialisation des types de sol et de leur importance. La carte des sols est aussi un outil d'aide au conseil agricole, dans le sens où elle permet de faire une adéquation entre les caractéristiques des sols et leurs usages agronomiques possibles, en vue d'en tirer le meilleur profit tout en garantissant leur préservation.

La cartographie numérique des sols est devenue de nos jours une nécessité pour la modernisation de l'archivage et de l'utilisation de l'information pédologique. Lorsque la cartographie des sols est transcrite en format numérique, elle devient plus facile à partager et à utiliser. Si elle est mise en ligne (web-mapping ou SIG-web), elle devient davantage plus accessible aux différents usagers potentiels.

L'étude de la spatialisiation des sols et de leurs caractéristiques à travers l'usage de cartographies spécifiques est un moyen qui permet de répondre à plusieurs besoins en termes d'aménagement et d'utilisation rationnelle des terres agricoles. Plusieurs études pédologiques à différentes échelles ont été réalisées au Maroc, mais dont les rapports et les cartes sont restées dispersées au niveau de différents services (public ou privés). Sachant que ce genre d'information est d'une grande utilité pour différents utilisateurs, le projet a procédé à la collecte et à la compilation de la majorité des études pédologiques à différentes échelles réalisées à l'échelle du pays. Les cartes correspondantes ont été scannées, géo-référenciées et intégrées sous Systèmes d'Information Géographique (SIG). Le travail a consisté également en un traitement spatial pour assurer la contiguïté des zones cartographiées ainsi qu'une codification unique des unités cartographiques.

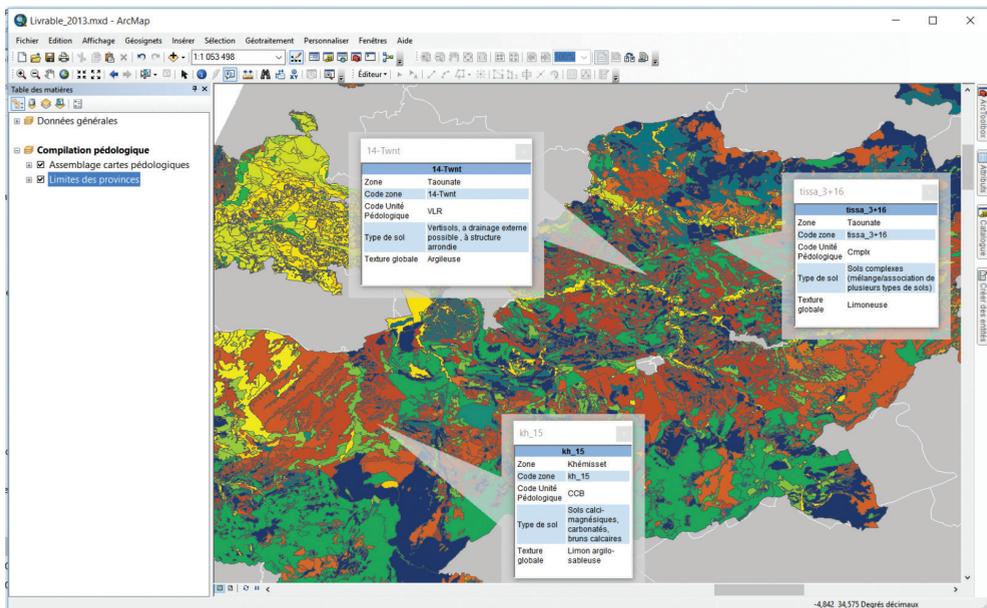


Figure 1 : Compilation des études pédologiques au 1:50.000

Jusqu'à présent, la compilation a permis de rassembler les cartes pédologiques couvrant près de 6,7 millions d'hectares sur une grande partie de la superficie agricole utile du pays. La base de données établie constitue un acquis important qui sert comme fond de base pour l'application fertimap décrite ci-après, mais elle représente également une information de valeur qui servira ultérieurement à réaliser des liens vers d'autres bases de données (ex : Plateforme «Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture du Maghreb»).

L'inventaire des sols a été complété par la réalisation d'études pédologiques complémentaires sur les zones qui n'ont pas fait l'objet d'étude dans le passé. Cette action a ciblé dix zones sur environ 1,9 millions d'hectares. Elle a été basée sur une approche intégrant en grande partie des informations digitales (modèle numérique d'altitude, cartes lithologiques numérisées, occupation dérivée à partir des images satellitaires, etc.) A ce jour, la cartographie pédologique a été achevées sur quatre zones et les données correspondantes ont été éditées et intégrées dans la base de données sous SIG.

2.2. Evaluation de la fertilité des sols, cartographie thématique et normes d'interprétation

L'étude géo-spatialisée de des analyses des éléments nutritifs contenus dans sols représente la base pour une évaluation précise dans l'espace de l'état actuel de la fertilité des sols. Elle permet en particulier de répondre aux besoins suivants :

- Réaliser des interprétations fondées et proposer des apports raisonnés de fertilisants pour les principales cultures par rapport à des rendements escomptés raisonnables; Ceci se fera à travers un outil web accessible aux différents utilisateurs potentiels (conseillers agricoles, agriculteurs, distributeurs d'engrais, etc.)
- Etudier la variabilité constatée en vue de proposer des formules d'engrais appropriées selon les potentialités du milieu et le degré de technicité des agriculteurs (soit en maintenant les formules déjà existantes, soit en développant de nouvelles formules plus adaptées).

La démarche a consisté en un échantillonnage systématique des sols sur les zones ciblées en adoptant une densité moyenne de l'ordre d'un échantillon composite tous les 200 ha pour les zones d'agriculture pluviale (dites bour) et de l'ordre d'un échantillon composite tous les 50 ha pour les zones irriguées. Les points d'échantillonnage ont été relevés par GPS afin que leur position serve à l'interpolation surfacique des paramètres mesurés. Les paramètres mesurés comportent le pH, la matière organique, le phosphore assimilable et le potassium échangeable. La matière organique sert également à estimer la fourniture potentielle en azote minéral en se basant sur les coefficients de minéralisation déterminés par différentes études à l'échelle du pays.

Jusqu'à présent, le projet a touché 23 zones (Figure 2), avec un total de 26 000 échantillons prélevés et analysés. Ces zones couvrent près de 5,6 millions d'hectares et concernent 4 zones irriguées et 19 zones pluviales.

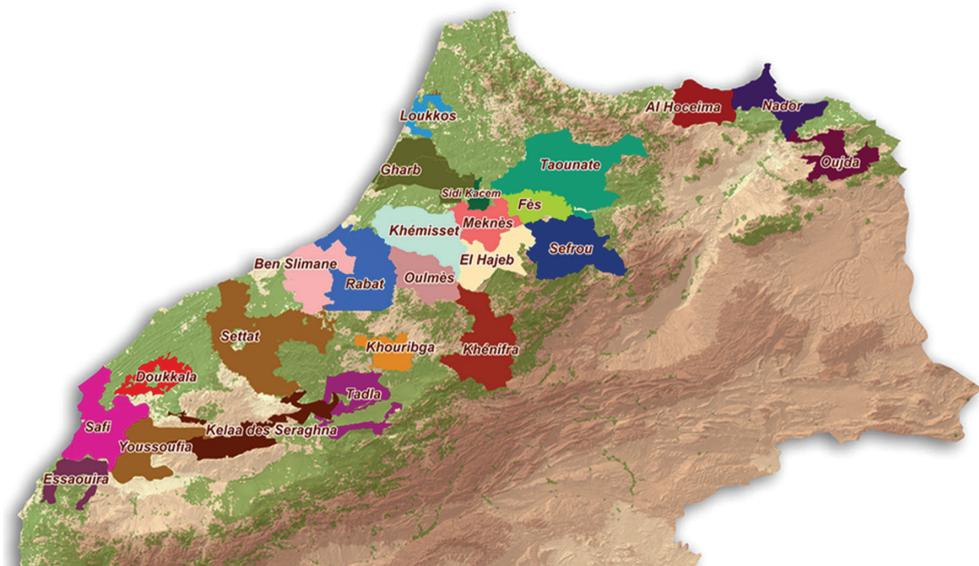
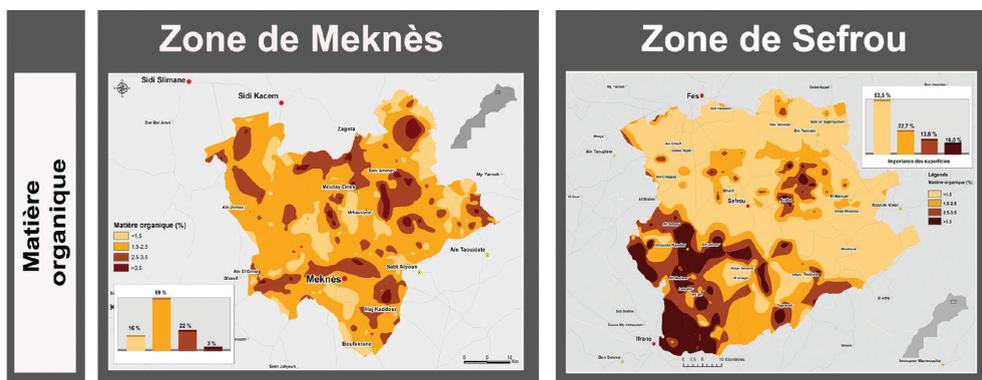
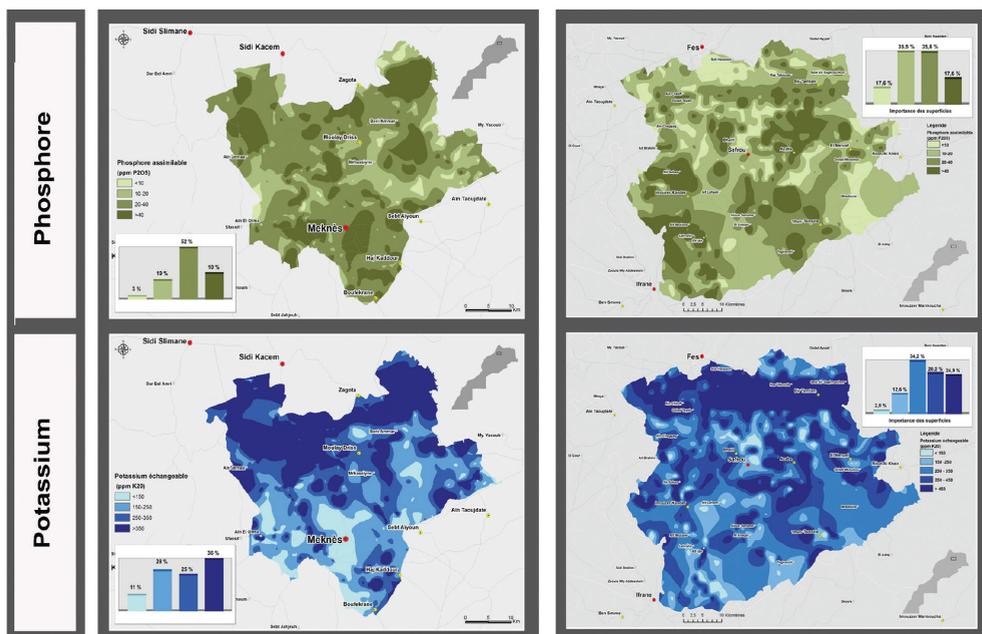


Figure 2 : Situation au Nord-Ouest du Maroc des 23 zones ayant été fait l’objet d’échantillonnage et d’analyse

Les cartes thématiques produites par la méthode d’interpolation basée sur l’approche de la pondération par l’inverse de la distance montrent qu’il y’a une variabilité importante au sein de chacune des zones étudiées, ainsi que des différences importantes d’une zone à l’autre. A titre d’exemple, la figure 3 illustre une comparaison de la variabilité des trois paramètres : matière organique, phosphore et potassium pour les deux zones de Mekkès et Sefrou.





Les données de fertilité obtenues ont été également analysées afin de prévoir de nouvelles formules d’engrais qui seront soumises pour validation avant leur fabrication par les unités du Groupe OCP. Toutefois, pour certaines zones et pour certaines cultures, telle que les céréales, des formules existantes resteraient éventuellement valables.

L’interprétation des résultats de fertilité des sols pour la proposition de recommandations en matière de fertilisation des cultures doivent se baser sur des normes adaptées à chaque culture et aux conditions particulières de chaque zone. Dans ce sens, le projet a comporté également une composante relative à cet aspect et qui a inclus deux volets, un premier volet relatif à la collecte et à l’analyse des résultats de la recherche relatifs à ces aspects, et un deuxième volet, relatif à la conduite de nouveaux essais sur le terrain sur les cultures pour lesquelles on ne dispose pas d’information. Ainsi, plusieurs essais ont été réalisés dans différentes zones et pour différentes cultures pour évaluer les réponses de celles-ci aux apports engrais selon la richesse des sols en éléments nutritifs, azote, phosphore et potassium. Les résultats obtenus, aussi bien des études antérieures que ceux des essais, ont été analysés pour en déduire les paramètres qui serviront pour les équations à intégrer dans l’application web fertimap décrite ci-dessous.

2.3. Application web d'information et de conseil : fertimap

La gestion de l'information cartographique relative au sol prend de la valeur lorsqu'elle est facilement accessible, et encore plus, lorsqu'elle est couplée avec des outils d'interprétation automatisés qui facilitent l'emploi à des utilisateurs non nécessairement spécialisés. Dans ce sens, le projet Carte de Fertilité a apporté l'innovation de développer une application qui permet de valoriser les différents résultats des axes décrits précédemment et les mettre à la disponibilité des utilisateurs à travers une interface web (www.fertimap.ma) qui offre les possibilités suivantes :

- L'utilisation d'un environnement sur carte avec un fond google-map de haute résolution permettant de naviguer et explorer les données disponibles;
- L'utilisation de la cartographie pédologique compilée sur l'ensemble de la zone étudiée, comme fond permettant la visualisation de la variabilité spatiale des différents paramètres de fertilité mesurés;
- L'exploration des données de fertilités, soit d'une manière généralisée à l'échelle des zones étudiées, soit d'une manière ponctuelle sur un endroit bien précis (avec l'introduction même des coordonnées géographiques précises);
- L'utilisation d'un outil «expert» d'interprétation des résultats de fertilité et de Conseil en Fertilisation (CF) pour différentes cultures sur la base des rendements potentiels escomptés;
- La visualisation de certaines information utiles à l'échelle zonale (données climatiques, quelques statistiques agricoles, localisation des centres de Conseil Agricoles, localisation des laboratoires d'analyses, etc.).

The screenshot displays the Fertimap web application. The main map shows the fertilization status of cultivated soils in Morocco, with various colors representing different fertility levels. A detailed panel titled 'Conseil en Fertilisation' is overlaid on the map, providing the following information:

Conseil en Fertilisation

Analyses

Données géographiques		Données Fertilité	
Longitude	5° 13' 13" W	Type de sol	Sols calco-magnésiques, carbonatés, bruns calciques
Latitude	33° 58' 13" N	Texture globale	Limonneuse
Altitude	33.9704	pH	7.78
Région	Meknes-Tafilalet	Matière organique(%)	1.89
Préfecture / Province	EL HAJEB	Phosphore assimilable (mg/kg P ₂ O ₅)	17.7
Commune	LAQSIR(R)	Potassium (mg/kg K ₂ O)	202.4

La formule régionale recommandée est : **18N-46P-00K**

Choisir culture : **Ble dur**

Rendement objectif : **60 qx/ha**

Recommandations

Élément	Rendement	Recommandations basées sur la formule régionale	Recommandations basées sur les formules disponibles :
N (kg N/ha)	201.86	• 1.88q/ha du 18N-46P-00K comme engrais de fond	• 1.92q/ha du TSP comme engrais de fond
P (kg P/ha)	86.4	• 5.09q/ha d'Ammonitrates comme engrais de couverture	• 6.12q/ha d'Ammonitrates comme engrais de couverture
K (kg K/ha)	0		pour un coût de 1524.82 dh/ha

Fertimap.ma est une application unique qui permet aux agriculteurs et aux conseillers agricoles de tirer profit de l'outil de conseil en fertilisation de deux manières :

- Quand on ne dispose pas de possibilité de réaliser les analyses de sols, l'outil fait appel aux données de fertilité obtenues à partir des analyses réalisées dans le cadre du projet (tel que décrit plus haut) et génère une moyenne pondérée qui reflète la fertilité moyenne des sols au point choisis. Cette moyenne est utilisée ensuite pour faire une requête d'apports d'engrais après avoir choisi la culture envisagée et le rendement escompté;
- Quand on dispose des analyses de sol, celles-ci peuvent être introduites manuellement pour obtenir le conseil en fertilisation, là aussi selon la culture et le rendement envisagé.

Dans les deux cas, le conseil en fertilisation est donné sous forme de quantité en unités fertilisantes des trois éléments azote, phosphore et potassium, mais aussi sous forme d'une combinaison parmi les engrais de base se trouvant sur le marché.

2.4. Renforcement de capacité et dissémination des acquis

Outre la réalisation des actions citées précédemment, l'un des objectifs du projet Carte de Fertilité des sols du Maroc était de renforcer les capacités des trois institutions du consortium chargé du travail ainsi que la dissémination des résultats, en particulier au profit des cadres et agents responsables du conseil agricole. A cet effet, des actions ciblées ont été orientées vers les aspects suivants :

- Renforcement des capacités humaines et matériel, notamment, des équipes chargées des travaux de terrain et des laboratoires chargés d'analyses dans les 3 institutions du consortium INRA-IAV Hassan II- ENA Meknès;
- Formation des équipes techniques chargées de la compilation cartographique (SIG, GPS, etc.);
- Formation au profit de cadres de différents services du Ministère de l'Agriculture et de conseillers agricoles sur les thématiques de fertilité des sols et fertilisation des cultures;
- Participation des experts des trois institutions dans différents événements de formation et de vulgarisation organisés au profit des agriculteurs (caravanes-OCP, journées de sensibilisation, écoles au champ, plateformes d'innovation, etc.).

L'appui aux équipes du consortium a permis en particulier de consolider un partenariat qui a abouti à la constitution d'une équipe mixte de recherche dont les membres sont déployés dans les différentes régions du Maroc. Il s'agit d'un «*pôle de compétence*» en matière de cartographie numérique des sols et de management de la fertilité des sols et de fertilisation des cultures.

2.5. Transfert d'expérience dans le cadre de collaboration Sud-Sud

Le modèle marocain de la carte de fertilité des sols est actuellement partagé avec plusieurs pays africains et aux îles des Caraïbes à travers des projets «pilotes» réalisés par les cadres et techniciens de ces pays dans le cadre de la coopération Sud-Sud. Des sessions de formations spécifiques sur des données locales, aussi bien au Maroc que dans les pays concernés, ont été dispensées aux techniciens africains sur toutes les opérations et étapes de réalisation des cartes de fertilité depuis la collecte des données de base disponibles jusqu'à la réalisation des cartes numériques en passant par le prélèvement des sols, les analyses au laboratoire et leur interprétation et l'élaboration de l'outil informatique sous SIG.

Les travaux réalisés jusqu'à présent ou en cours de réalisation concernent la Guinée Conakry, la Guinée Bissau, la Cote d'Ivoire et les Îles des Caraïbes.

3. Conclusions

Le projet «Carte de Fertilité» a permis de constituer une base de données sur la fertilité des sols, ainsi que de développer un système d'aide à l'interprétation des analyses et à la proposition de recommandations de fumures appropriées aux cultures. L'outil fertimap est considéré comme un support au conseil agricole et un instrument qui contribue à l'amélioration de la productivité des cultures et à la préservation de l'environnement.

Le projet reste conscient de l'importance de la nécessité d'extension de l'étude à toute la superficie agricole utile du pays ainsi qu'à la mise à jour continue des bases de données élaborées. C'est dans ce sens que des efforts de partenariat publics privés sont en cours d'exploration pour mettre en place des mécanismes permettant une veille et une pérennisation des acquis du projet.



International year of Soils 2015 - Sustainable Management of Soils

Moujahed ACHOURI

Director/Special Adviser to the FAO Deputy Director General- Natural Resources



M. Achouri MOUJAHED, Directeur/conseiller spécial pour le directeur-général adjoint FAO - coordonnateur des ressources naturelles depuis janvier 2016 et directeur de la division des terres et des eaux entre 2013 et 2015, de nationalité Tunisienne, spécialiste de la conservation des eaux et du sol ainsi que des sciences de la gestion des bassins versants, avec une large couverture des sciences et des disciplines connexes, techniques et socio- économiques. Il a commencé sa carrière professionnelle en 1982 dans le département des forêts du Ministère de l'agriculture en Tunisie, ingénieur principal spécialiste en aménagement des bassins versants.

Son expérience avec les organisations internationales a commencé en 1988, quand il a servi pour la FAO/PNUD en tant que conseiller technique principal. Il a rejoint la FAO en 1995 en tant que conseiller technique principal au Pakistan et depuis il a exercée au Pakistan, au Yémen, en Syrie, en Egypte et en Italie. Avant de rejoindre la Division des terres et des eaux en 2013, il a exercé au Caire en tant que Représentant régional adjoint FAO pour le Proche-Orient et Représentant de la FAO en Egypte. Entre 2007 et 2010, M. Achouri a rejoint le Département des forêts en tant que chef de service de la conservation des forêts, après une mission avec le département de la coopération technique de la FAO comme chef des opérations pour le proche orient et l'Afrique du Nord (2004-2007).

Introduction

Soils constitute the foundation of agriculture and, as the Secretary General of the United Nations recently noted, “Without healthy soils, life on earth is unsustainable”.

The International Year of Soils 2015 was declared by the 68th UN General Assembly with the slogan “*Healthy Soils for a healthy life*”. The IYS aims to be a platform for raising awareness of the importance of soils for food security and essential eco-system functions. The objectives of the IYS are:

- to create full awareness of civil society and decision makers about the fundamental roles of soils for human’s life;
- to achieve full recognition of the prominent contributions of soils to food security, climate change adaptation and mitigation, essential ecosystem services, poverty alleviation and sustainable development;
- to promote effective policies and actions for the sustainable management and protection of soil resources;
- to sensitize decision-makers about the need for robust investment in sustainable soil management activities aiming at healthy soils for different land users and population groups;
- to catalyse initiatives in connection with the SDG process and Post-2015 agenda;
- to advocate rapid enhancement of capacities and systems for soil information collection and monitoring at all levels (global, regional and national).

The celebration of the International Year of Soils 2015 has been a fundamental opportunity to raise awareness of the importance of soils for food security and nutrition and essential ecosystem functions.

The implementation of the IYS-2015 has been very positive as it has triggered events around the world, from global to local levels and soils are really in the news and back in the international agenda. The challenge however is on how to ensure that this momentum is kept beyond 2015 and be linked to sustainable soil management actions on the ground and with multiple benefits for all.

Sustainable Soil Management

Soils are critical for achieving food security and nutrition as approximately 95% of our food is produced in soils. Therefore, world food security and nutrition depend centrally on our sustainable management of soils. Yet, despite this obvious dependency on soils, we need to highlight the most serious issue of pervasive soil degradation. This is impacting negatively on the many soil functions which are not only critical to the production of food, but also for the provisioning of many ecosystem services.

Sustainable management of the world's agricultural soils and sustainable production have become imperative for reversing the trend of soil degradation and ensuring current and future global food security.

We take soils for granted, but 33 percent of soil is moderately to highly degraded due to erosion, nutrient depletion, acidification, salinization, compaction and chemical pollution.

This is especially worrying since soil is a finite resource which loss and degradation is not recoverable within a human lifespan. In fact, it can take up to 1 000 years to form one centimeter of soil, and the current rate of soil degradation threatens the capacity to meet the needs of future generations.

In order to reverse the continuous degradation of soils, there is a need for all stakeholders to take bold actions that translate to policies and practices that ensure the protection of soils and their sustainable management. Soil management is sustainable if the supporting, provisioning, regulating, and cultural services provided by soil are maintained or enhanced without significantly impairing either the soil functions that enable those services or biodiversity.

FAO work on soils

Food insecurity remains a major challenge, as there are today some 805 million people facing hunger and malnutrition. Population growth, climate change and fast evolving human diets and lifestyles are putting further pressure on our natural resources, especially soils, threatening our capacity to sustain production increases and ecosystem services provision.

Achieving food security and nutrition for all is at the heart of FAO's mission. Thus, soils constitute a major priority as we need to ensure healthy and fertile soils for the production of food, fodder, feed and fuel for today's and future generations. Yet, fertile soils are limited in extent and increasingly threatened by degradation and other competing uses.

Human pressures on soil resources are reaching critical limits, inherently reducing or eliminating soil functions critical to human well-being. Soil degradation, is a pervasive process that in its various forms affects all the regions, mainly smallholders and family farmers. There is an urgent need for concerted efforts to ensure the sustainable management of soils for sustainability, food security and nutrition for all.

The maintenance or enhancement of global soil resources is essential if humanity's overarching need for food security and nutrition, climate change adaptation and mitigation and overall sustainable development is to be met.

We, in FAO and our members are committed towards actions, and these are guided via Global Plans of Action that are implemented at local level. The soils community

should join efforts in order to revert the alarming soil degradation (estimated at 33% globally) and thus support the achievements of the Sustainable Development Goals. Indeed, soils are critical for the implementation of the SDGs and this constitutes a recognition of the role of this silent ally, and investing on it will be a clear signal of commitment towards a real future we all want.

Various soil management technologies and approaches were developed and successfully implemented in many countries of the world. Notably, local knowledge and local practices have shown us that managing soil as a living resource can guarantee its sustainability. With the challenge of feeding a growing population and ensuring food security and nutrition for all, there should be creative ways of producing more and better quality food while at the same time avoiding negative impact to the environment and its natural resources.

Main findings of the IYS-2015

In a context in which agricultural production will have to increase by 60% globally by 2050 in order to meet food demand alone, sustainable soil management practices can help in producing up to 58% more food. Such increase is particularly important in regions such as South Asia, the Near East and North Africa, where there is little room for expansion of arable land.

The International Year of Soils has triggered an important soil momentum at all levels. Our challenge will be to transform that momentum into actions to promote sustainable soil management in the field. That will be only possible if a proper soil governance is in place and if investment is substantially increased to support these actions.

The six key messages for the international year are:

- Healthy soils are the basis for healthy food production;
- Soils are the foundation for vegetation which is cultivated or managed for feed, fibre, fuel and medicinal products;
- Soils support our planet's biodiversity and they host a quarter of the total;
- Soils help to combat and adapt to climate change by playing a key role in the carbon cycle;
- Soils store and filter water, improving our resilience to floods and droughts;
- Soil is a non-renewable resource; its preservation is essential for food security and our sustainable future.

Key results of the IYS- 2015

The World Soil Charter- The first World Soil Charter (WSC) was conceived, negotiated and adopted by FAO member countries in 1981. The GSP Partners

considered that the thirteen principles listed in the charter are still valid, but needed to be updated and revised in light of the scientific knowledge gained over the past 30 years, especially with respect to new issues such as soil pollution and its consequences for the environment, climate change adaptation and mitigation and urban sprawl impacts on soil availability and functions. The Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS) was tasked to produce a new version of this WSC making use of wide consultations within the international soil community in order to assist with the process. Coinciding with 2015 the International Year of Soils, member countries during the 39th FAO Conference unanimously endorsed the new World Soil Charter as a vehicle to promote and institutionalize sustainable soil management at all levels.

Link to the WSC (available in the UN languages):

<http://www.fao.org/globalsoilpartnership/highlights/detail/en/c/330570/>

Status of the World's Soil Resources- The report, prepared during the IYS- 2015, synthesizes the work of more than 200 soil scientists from 60 countries. It provides a global perspective on the current state of the soil, its role in providing ecosystem services, and the threats to its continued contribution to these services.

Links to the report:

Technical summary

<http://www.fao.org/documents/card/en/c/39bc9f2b-7493-4ab6-b024-feeaf49d4d01/>

Main report

<http://www.fao.org/documents/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50/>

Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management (VGSSM) - In December 2015 - during the celebration of the International Year of Soils - the 153rd FAO Council supported the development of Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management (VGSSM) with the aim of facilitating the implementation of the World Soil Charter and to promoting effective and sustainable soil management in all regions.

Main finding of the Status of the World's Soil Resources Report

The report provides a benchmark against which our collective progress to conserve this essential resource can be measured. The specific threats considered in the report are soil erosion, compaction, acidification, contamination, sealing, salinization, waterlogging, nutrient imbalance (e.g. both nutrient deficiency and nutrient excess), and losses of soil organic carbon (SOC) and of biodiversity.

Key figures:

Soil Erosion

- Erosion is ranked as the most important threat to the soil in Africa, Asia, Latin America and the Caribbean, North America, and the Near East and North Africa.
- Annual crop losses due to erosion have been estimated at 0.3% of crop yields. If erosion continues at this rate, a total reduction of over 10 percent could take place by the year 2050.
- Erosion on croplands and intensively grazed land is 100 to 1,000 times the natural background rate.
- The annual cost of fertilizer to replace nutrients lost to erosion is US\$110-US\$200 billion.

Soil Salinization

- An estimated 760,000 km² of land worldwide are affected by human-induced salinity – an area larger than all the arable land in Brazil.
- Ill-designed, large-scale irrigation projects are the main cause of human-made salinization.
- Increasing soil salinity takes an estimated 3,000 to 15,000 km² of irrigated cropland out of production every year and decreases the production potential of much more land.

Soil Contamination

- Soil contamination damages food security, both because toxic levels of contaminants reduce crop yields and because crops that are produced can be unsafe to consume.
- Nearly a fifth of the farmland in China (19.4%) is contaminated with heavy metals.
- Over 130 million people worldwide routinely consume well-water with arsenic concentrations that exceed WHO recommendations
- More than 2.5 million potentially contaminated sites have been identified in Europe, of which 340,000 are expected to be contaminated.

Soil Acidification

- Around 30 percent of the topsoil and 75 percent of subsoil on the world's ice-free land are affected by acidity.
- The most acidic top soils in the world are located in areas of South America that have experienced deforestation and intensive agriculture.

- The main causes of human-induced acidification are acid deposition (commonly called acid rain) and massive application of ammonium-based fertilizers.
- Use of high-nitrogen fertilizers and high rates of product removal increase soil acidity in intensive agricultural areas.

Soil Sealing

- Land take and soil sealing are regarded as the greatest threat to soil functions in Europe and Eurasia.
- Over 70% of the land take in the European Union between 1990 and 2000, and over half of the take between 2000 and 2006 consumed agricultural land.
- In 2000, urban areas covered 657,000 km², equivalent to almost 4% of the arable land on the planet.
- Between 1990 and 2006, the total extent of urban area worldwide increased by 58,000 km².

Soil Compaction

- Soil compaction has degraded up to 330,000 km² in Europe.
- Worldwide compaction has degraded an estimated 680,000 km² of soil, or around 4% of the total land area.
- Soil compaction can reduce crop yields by as much as 60 percent.
- Cattle trampling and insufficient cover of top soil by natural vegetation or crops account for compaction of 280,000 km² in Africa and Asia.
- The damage caused by soil compaction is long-lasting or even permanent. A one-time compaction event can lead to reduced crop yields up to 12 years later.

Nutrient imbalance

- The greatest obstacle to improving food production and soil function in many degraded landscapes is the lack of nutrients, especially nitrogen and phosphorus, and organic inputs.
- In Africa, all but three countries mine more nutrients from the soil every year than are returned through use of fertilizer, crop residues, manure, and other organic matter.
- In other areas, oversupply of nutrients contaminates soil and water resources and contributes to greenhouse gas emissions.
- In 2010, nitrogen oxide emissions from agricultural soils caused by the addition of synthetic fertilizers were the equivalent of 683 million tons of CO₂.

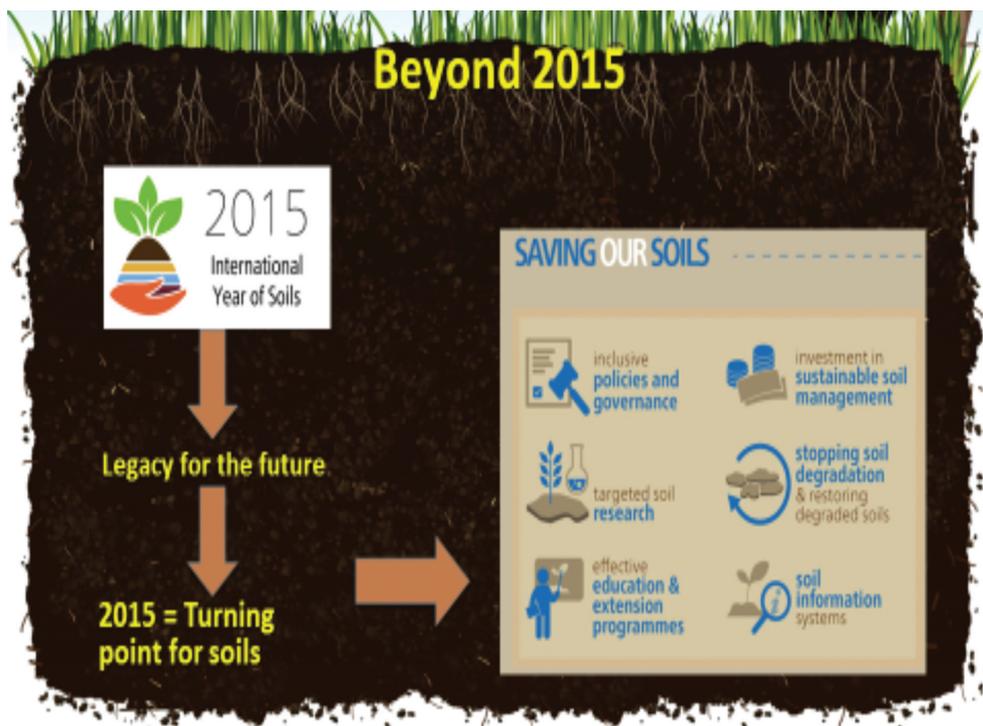
Summary of status and trend of soil threats by region

Region	Soil erosion	Organic carbon change	Nutrient imbalance	Salinisation	Soil sealing	Loss of biodiversity	Soil pollution	Acidification	Compaction	Water logging
Sub-Saharan Africa	Poor	Poor	Poor	Fair	Good	Fair	Good	Poor	Good	Good
Asia	Poor	Poor	Poor	Poor	Poor	Fair	Poor	Poor	Poor	Fair
Europe and Eurasia	Fair	Poor	Poor	Poor	Poor	Fair	Poor	Poor	Fair	Fair
Latin America and the Caribbean	Poor	Poor	Poor	Poor	Fair	Poor	Fair	Fair	Poor	Fair
Near East and North Africa	Very Poor	Poor	Good	Fair	Very Poor	Poor	Very Poor	Good	Poor	Good
North America	Fair	Fair	Poor	Good	Fair	Good	Good	Poor	Fair	Good
Southwest Pacific	Fair	Fair	Fair	Good	Good	Good	Good	Fair	Fair	Good

Why it is important to stop degradation of soils?

Nine billion people are expected to populate the world in 2050. Feeding the planet is an issue that will only become more serious because of the increasing imbalance between the availability and demand for land and water resources.

The International Year of Soils is a turning point for soils that needs to be given further attention and coordinated efforts for the sustainable management of soils.



Plan of Action

Unsustainable soil management depletes the soil, affecting its ability to produce healthy food that contains all the necessary nutrients for a healthy person.

The renewed recognition of the central role of soil resources as a basis for food security and their provision of key ecosystem services, including climate change adaptation and mitigation, has triggered numerous regional and international projects, initiatives and actions. Despite these numerous emergent activities, there is need for coordination and partnership to create a unified and recognized voice for soils.

Conscious of that fact, FAO members established in 2012 the Global Soil Partnership (GSP) with the aim to promote sustainable soil management at all levels. The GSP constitutes an agenda for action beyond 2015 and it has proved that it could constitute a deliver mechanism for this strategic but silent resource and to bring the international community together in responding to the challenge of managing and protecting healthy soils worldwide.

The GSP pillars of action are:

- 1- Promote sustainable management of soil resources for soil protection, conservation and sustainable productivity;

- 2- Encourage investment, technical cooperation, policy, education awareness and extension in soil;
- 3- Promote targeted soil research and development focusing on identified gaps, priorities and synergies with related productive, environmental and social development actions;
- 4- Enhance the quantity and quality of soil data and information: data collection (generation), analysis, validation, reporting, monitoring and integration with other disciplines;
- 5- Harmonization of methods, measurements and indicators for the sustainable management and protection of soil resources.

Awareness raising constitutes a key dimension in this process. However, the International Year of Soils and the World Soil Day (5 December) will only be successful if the global soil science community facilitates the wide sharing of soils knowledge with all concerned stakeholders, demonstrating the critical roles and contributions of sustainable soil management to the sustainable development agenda. Comprehensive action is needed at all levels: internationally, regionally, nationally and also locally, to reverse alarming trends, if our world is to assure sustained food production and ecosystem services provision for future generations.

With the new Sustainable Development Goals, members are committing to end hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture by 2030. However, this needs to be done while protecting, restoring and promoting the sustainable use of our terrestrial ecosystems while we combat climate change and its impacts. The role of soils in achieving these new Goals is clear: sustainable soil management is a pre-requisite for achieving the SDGs.

Conclusion and the way forward

Giving this silent ally a voice became one of the main goals of the IYS global campaign. We do believe that this has been, to some extent, achieved and that we are left at the end of the year with the challenge of turning the year's outcomes into concrete actions. In this regard, FAO's Global Soil Partnership (GSP) is already implementing actions in all the regions to promote the sustainable management of our global soils. Their actions will continue well beyond 2015!

As FAO Director-General, José Graziano da Silva said at the opening of the IYS- 2015 "healthy soils are critical for global food production, but we are not paying enough attention to this important silent ally." Calling soils "a nearly forgotten resource", Graziano da Silva called for more investment in sustainable soil management and awareness raising activities.

Celebrating the World Soil Day, 5 December 2015, the Un Secretary General highlighted that “The challenge before us is clear. The United Nations Food and Agriculture Organization estimates that about 33 per cent of global soils are already degraded. This trend must be reversed through sustainable soil management practices. Soils are the foundation of food systems. They are critical for achieving food security and nutrition... Let us promote sustainable soil management rooted in proper soil governance and sound investments. Together, we can promote the cause of soils, a truly solid ground for life.”

The FAO Assistant Director General, Regional Representative for Asia and the Pacific outlined “I think researchers are doing a good job in developing new technologies, but transferring these technologies to farmers should be our focus. Scientists do research from their perspective, but it is the farmers’ perspective that should be kept in mind while researching on agri-forestry issues. Farmers themselves are scientists... they know how to take care of soil, natural water resources - the need is to work with them in their fields to strengthen integration between research, extension and farmers. Farmer-centric approach is key to the success of climate smart agriculture and FAO is focused towards its realization.”

Awareness raising will continue with the World Soil Day to be celebrated every 5th December, the World Soil Prize to be established under the GSP aegis. With the **Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management** that are under preparation and soils explicitly mentioned in the Sustainable Development Goals (SDGs) for the first time, strong foundations are in place for more to happen. We need to keep the momentum of the year going: 2015 may be over, but our soils still need us as much as we need them.

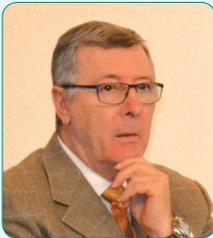
References

- Environmental Earth Sciences, February 2016- Healthy soils: a prerequisite for sustainable food security, R.V. Rojas, M. Achouri, J. Maroulis, L. Caon
- FAO, 2015- Status of the World’s Soil Resources Report
- FAO, 2015- World Soil Charter
- Global Soil Week, Berlin, April 2015- Healthy soils are the foundation of food production, M. Achouri
- Adjacent Government, November 2014- Sustainable soil management: a global effort, M. Achouri
- Reuters, July 2014- ‘Peak soil’ threatens future global food security.

Biological alternatives to synthetic nitrogen fertilizers: from the Green revolution to the Microbial revolution

Eulogio GOMEZ BEDMAR

Department of soil Microbiology and Symbiotic Systems
Estación Experimental del Zaidín, CSIC
E-419; 18080-Granada, Spain



Lieu de travail actuel : Station expérimentale Zaidin, CSIC (conseil supérieur de la Recherche Scientifique), Granada, Espagne.

- Spécialité : Microbiologie du Sol et systèmes symbiotiques.

- Doctorat à l'Université de Grenade / 1978.

- 1981-1984. Professeur adjoint au Département d'agronomie, Université de Davis, Californie, USA.

- 1985. Chercheur puis Directeur de recherche à la station expérimentale Zaidín, du CSIC de Granada.

- Intérêts : Etude de la dénitrification en utilisant des bactéries symbiotiques *Bradyrhizobium japonicum* comme modèle pour étudier le processus à la fois dans la nature et en symbiose avec les légumineuses. Facteurs environnementaux intégrés, les gènes et les enzymes de l'étude, et les processus redox impliqués dans la dénitrification, en accordant une attention particulière à l'identification de régulateurs de transcription qui contrôlent l'expression de l'activité et la caractérisation du mécanisme moléculaire de ces régulateurs.

En outre, il vise à analyser le métagénome, y compris l'abondance relative, la diversité et l'activité fonctionnelle des populations de bactéries dénitrifiantes dans des échantillons environnementaux, essentiellement de l'eau et des sédiments contaminés par des nitrates.

Il s'intéresse aux interactions plantes-bactéries-environnement, la régulation et l'interrelation de la fixation de l'azote et la dénitrification, analyse des facteurs et régulateurs impliqués dans la réduction des émissions de protoxyde d'azote de gaz à effet de serre par des bactéries symbiotiques associées aux légumineuses.

Abstract

Currently, nitrate contamination of the environment, including soil, water, sediment and atmosphere, is becoming more intense and frequent. Although the origin of this pollution is very diverse, it is noteworthy that caused by liquid and solid urban wastes, livestock and industrial activities, wastewater and, above all, the contamination produced during agricultural practices due to the intensive use of nitrogen fertilizers, either urea, ammonium or nitrate. The excess nitrate cannot be removed by denitrification, the process by which nitrate/nitrite is reduced to molecular dinitrogen via the formation on nitric oxide and nitrous oxide. Nitrate accumulation, in turn, results in profound changes in the N cycle at both local and global ecosystems.

Although the use of nitrogen fertilizers has given rise to a significant increase in food production, it also causes undesirable side effects, among them environmental nitrate pollution and the release of greenhouse gases, mainly nitrous oxide, into the atmosphere.

Are there alternatives to the massive use of N-fertilizers? Two possibilities will be discussed: a) the biological nitrogen fixation process by the rhizobia-legume symbiotic association and b) the utilization of plant growth promoting rhizobacteria as plant biofertilizers.

Legumes, together with actinorhizal plants, are unique among living beings because of their ability to establish symbiotic associations with N_2 -fixing soil bacteria known by the generic name of rhizobia. A consequence of the bacteria-plant interaction, a symbiosis-specific organ, the nodule, is formed where N_2 -fixation takes place. This ability makes legumes the most important protein source for developing countries, the second source of food worldwide, and a highly relevant component for animal feed and fodder. Because legumes can grow in poor soils of low fertility, they can be used as pioneer plants for recovery and revegetation processes and in phytoremediation of degraded soils.

The bacteria that colonize the area around the plant roots, the rhizosphere, are called rhizobacteria. Within them, those that are beneficial to plants are known by the acronym PGPR (for Plant Growth Promoting Rhizobacteria) and play key roles for plant growth and development such as (a) biological control of pathogens, (b) increased bioavailability of minerals, c) phytohormones production, d) dinitrogen fixation, (e) phyto-stimulation, f) ACC deaminase activity, g) cellulase production, ... etc. Only an estimated 2-5% of bacteria from the rhizosphere are PGPRs.

Both, the legume/rhizobia-based dinitrogen fixation process and utilization of PGPRs constitute clear, feasible mechanisms to diminish, if not to abolish, abusive use of nitrogen fertilizers.

INTRODUCTION

After carbon (C), hydrogen (H) and oxygen (O₂), nitrogen (N) is the fourth most abundant element in the biomass, where it is part of essential compounds such as amino acids, proteins, nucleic acids, hormones, etc. N is present in large amounts around the Earth's surface, making up to about 80 percent of its atmosphere. With the exception of water, N is also the most common limiting element in agriculture, and productivity of many ecosystems is limited by the availability of nitrogen. Despite its abundance in the atmosphere, readiness of N in a form suitable for plant and animal consumption is a major constraint to life on our planet. Most of the N in the atmosphere is found in the form of dinitrogen gas (N₂), which is inaccessible to eukaryotes and many bacteria. Diazotrophic microorganisms, mainly bacteria, contain the enzyme nitrogenase, which converts bio-unavailable N₂ gas to bio-available ammonia (NH₄⁺). This process is called biological nitrogen fixation (BNF), and initiates the N cycle in the biosphere.

Ammonia is subsequently incorporated into cellular biomass mainly via the glutamine synthetase-glutamate synthase (GS-GOGAT) pathway. Alternatively, glutamate dehydrogenase (GDH) may also be involved in aerobic ammonium assimilation. In addition to its incorporation into organic nitrogen compounds, ammonia can be oxidized to nitrate (NO₃⁻) by nitrifying bacteria in a two-step process called nitrification. During nitrification, the enzymes ammonia mono-oxygenase and nitrite oxidoreductase (nitrite oxidase) oxidize ammonia to nitrite (NO₂⁻) and nitrite to nitrate, respectively. Finally, denitrification is the process by which nitrate becomes N₂, which returns to the atmosphere, thus closing the N cycle in the biosphere. Denitrification is an alternative form of respiration in which bacteria sequentially reduce nitrate or nitrite to N₂ by the intermediates nitric oxide (NO) and nitrous oxide (N₂O) when oxygen concentrations are limiting.

It is estimated that BNF provides between 90 and 130 Tg N per year (Tg = Teragram = 1 billion grams). In addition to nitrate from BNF, industrial manufacture of ammonium by the Haber-Bosch, urea by the Wöhler pathway and nitrate by the chemical nitrate synthesis are processes which also contribute to total NO₃⁻ content with some additional 140 Tg per year, which results in a considerable increase in soil nitrate concentration. This excess nitrate cannot be removed by denitrification, resulting in its accumulation in soil, water and sediments. This large increase in N load in the environment, in turn, leads to serious alterations in the cycling of N and will likely cause severe damage to environmental services at local, regional and global scales. The chemical synthesis of N-fertilizers together with the use of improved plant varieties gave rise to the so-called green revolution. This resulted in increased crop yields that allowed growth of the world population from about 1.5 billion in 1960 to more than 7 billion nowadays and this is expected to increase to approximately 8 billion some time around the year 2020. However, although synthesis of chemical fertilizers helped to diminish famine in many regions, the social and environmental costs have been important.

Bacteria capable of achieving complete denitrification, this is the conversion of nitrate/nitrite to N_2 , are scarce. Most of them do not possess, or do not express, the complete set of enzymes required to carry out each one of the reduction steps that comprise denitrification. It is therefore a paradox that being the only known biological process to remove excess nitrates that pollute soil and water ecosystems, denitrification is also a mechanism whose gaseous intermediate N_2O have an enormous impact on air pollution. N_2O in the atmosphere can be converted to NO which can act as a precursor for other chemical compounds which fall to the Earth surface as constituents of the so-called acid rain.

Although the human perturbation of the N cycle due to the increased production of N-fertilizer and of oxidized reactive N compounds originating from fossil fuel combustion have led to an unprecedented accumulation of nitrogen oxides (mainly N_2O) in the biosphere, there is evidence that suggests that most N_2O originates from microbial denitrification activity in soil and water contaminated with nitrates. More than half the fertilizer applied to the soil ends up in rivers, lakes and seas, contributing to eutrophication and massive growth of algae on offshore continental platforms. Hence, excess nitrates affects not only terrestrial and marine ecosystems, but also contributes to the release to the atmosphere of greenhouse gases involved in climate change.

ALTERNATIVES TO UTILIZATION OF NITRIGEN FERTILIZERS

Biological nitrogen fixation

The 2011 Edinburg Declaration on reactive nitrogen species recognized the negative impacts of contaminant nitrates on human health, climate and biodiversity, water, soil and air quality, and claimed for a variety of options to reduce polluting emissions from industry, transport and agriculture. Among the alternatives to diminish nitrate contamination, it is worth to pay attention to the BNF process which, opposite to the industrial process, has significantly lower economic and environmental costs. On a global scale BNF is crucial from the environmental and agricultural points of view, just second to photosynthesis in importance for the maintenance of the biosphere.

The ability to reduce the inert atmospheric N_2 to ammonia is restricted to some prokaryotes which contain nitrogenase, the enzyme responsible for breaking the strong triple bond within the N_2 molecule to produce ammonium. The process requires high doses of energy and the nitrogenase is rapidly inactivated by oxygen. It was in 1888 when Hellriegel and Wilfarth uncovered the microbial origin of the root nodules of legumes, and two years later, in 1890, Beijerinck isolated the bacteria from nodules and named it *Bacillus radicolica*; today they are well known with the name of *Rhizobium* and include diverse families of the Alphaproteobacteria. In 2001, however, other genera of the Alphaprotobacteria were described which do not belong to the order Rhizobiales but establish N_2 -fixing symbioses with legumes. Also in 2001, members of genus *Burkholderia* and *Cupriavidus* of the Betaproteobacteria

were shown to fix N_2 mainly in symbiosis with tropical legumes such as *Mimosa*. So far, although members of the Gammaproteobacteria have been found within nodules, nodulation and N_2 fixation have not been demonstrated. The actinomycete *Frankia* also establishes N_2 -fixing symbiosis with at least 8 dicotyledoneous plant families and 25 genera. There are approximately 200 actinorhizal woody plant species where the specificity of the association, in contrast to the *Rhizobium*-legume symbiosis, is rather low. This gives the actinorhizal symbiosis a special interest in relation to the potential extension of the nitrogen fixing ability to other systems. The lack of exhaustive genetic information on both bacteria and plant partners hinders the study and understanding of these systems.

Some non-symbiotic microorganisms, e.g. *Azotobacter*, *Clostridium*, etc., also have the ability to fix N_2 . According to current data the distribution of nitrogen fixation and nitrogenase-like sequences among microbial genomes are much more common than previously thought. Although free-living N_2 fixers globally contribute to the incorporation of an important amount of nitrogen to the biosphere, their agricultural significance is low. The reason is the shortage of glucose equivalents in the soil to cover the high energy requirements of the nitrogenase and the cost of protecting the enzyme from oxygen. In addition, the ammonia fixed is not directly transferred from bacteria to plants and it is only just after cellular death that N may become available. Between symbiotic and free-living N_2 -fixers there exist associative symbioses in which N_2 -fixing bacteria colonize plant surfaces and can even invade root intercellular spaces; however no specialised N_2 -fixing structures are formed and ammonia cannot be directly transferred to the plant.

The quantity of nitrogen needed for agriculture is projected to increase in the next decades, which could lead to greater environmental pollution. Lesser dependence on fertilizer N and more attention to practices that favour BNF in farming systems shall benefit both agriculture and the environment. Considering the potential of BNF to reduce the excess application of chemically fixed nitrogen and its impact on the environment, a number of actions should be considered to improve exploitation of this biological process, among them: a) the optimal use of known nitrogen-fixing systems; b) development of new fixing plant-microbe associations; c) transfer of the nitrogen-fixing ability to non-fixing organisms.

There are a number of approaches to improve BNF by legumes, such as wider legume adoption, plant breeding and selection and inoculant usage. The adoption of legumes in farming systems has to be a thoughtful decision that should evaluate the actual needs and social demands, as well as the biotic and abiotic interactions that may limit crop productivity. In addition, it should consider not only profitability but also the greater environmental sustainability that legume nitrogen fixation provides, especially in intercropping and crop rotations. Moreover, since nitrogen-fixing plants have substantially lower requirements of N fertilization and therefore consume less fossil energy, the use of legumes for feedstock provision to bio-refineries should be considered.

Nodulation with the best nitrogen-fixers rhizobia must be assessed to maximize BNF by legumes. In soils devoid or with low numbers of the compatible rhizobia, inoculation with superior strains is required. Selection of the inoculant strain must consider not only bacterial compatibility and high nitrogen-fixing efficiency with the available legume genotypes, but also its adaptation to the prevalent soil and environmental conditions in each region, particularly when one or several abiotic constraints (such as drought, acidity, etc.) may limit the symbiotic activity and survival of the inoculant. In addition, the need of periodical re-inoculation must be also assessed, as this practice may ensure highest productivities. The situation becomes more complex when high numbers of nodulating rhizobia exist in soil. In these cases, it must be assessed that the selected legume genotype can effectively nodulate with the native populations. When the native rhizobia are poor nitrogen fixers, then two actions should be taken: select legume genotypes that show no interaction with the soil rhizobia and select an effective and competitive inoculant. In soils with high rhizobial numbers, competition for nodulation becomes a key aspect of inoculant success. Soil rhizobia compete with the inoculant for nodule occupancy, thereby reducing the success of the later and decreasing nitrogen fixation rates and plant productivity when the soil competitors are poor fixers. Inoculant selection has to be viewed as a continued task that needs to keep pace with legume improvement to always maintain nitrogen fixation at the highest. As new cultivars are developed or soil and environmental conditions change, new inoculant needs will arise.

Regarding the possibilities to extend nitrogen fixation ability to non-fixing plants is the exploitation of the *Rhizobium*-legume and the actinorhizal systems as models to obtain novel plant-microbe nitrogen-fixing symbioses. In the two above systems bacteria fix nitrogen inside root nodules where low oxygen and abundant carbon sources are provided. However, several aspects must be taken in consideration to develop novel types of bacteria-plant symbioses, such as signal exchange and recognition by the symbionts, the control of the plant defence responses, nodule organogenesis and efficient N₂ fixation and ammonium assimilation.

Plant-growth-promoting bacteria

Together with BNF, a potential way to decrease negative environmental impacts resulting from continued use of chemical fertilizers is inoculation with plant-growth-promoting bacteria (PGPB). These bacteria exert beneficial effects on plant growth and development, and many different genera have already been commercialized for use in agriculture.

Soil is replete with microscopic life forms including bacteria, fungi, actinomycetes, protozoa and algae, of which bacteria are by far the most common. In general, bacteria are generally not evenly distributed in soil and the concentration of bacteria that is found around the roots of plants, this is the rizosphere, is typically much greater than in the rest of the soil, and this is the reason why these bacteria are generally referred to as plant growth promoting rhizobacteria (PGPR). Abundance

of rhizobacteria is due to the presence of nutrients including sugars, amino acids, organic acids, and other molecules from plant root exudates that may account for up to a third of the carbon that is fixed by a plant. From the perspective of a plant, its interaction with soil bacteria may be beneficial, neutral or harmful, though the effect that a particular bacterium has on a plant may change as the conditions change. It is also possible for a particular bacterium to affect different plants disparately. The bacteria that can promote plant growth include those that are free-living, those that form specific symbiotic relationships with plants such as *Rhizobia* sp. and *Frankia* sp., bacterial endophytes that can colonize the interior tissues of a plant, and cyanobacteria. Notwithstanding the differences between those bacteria, they all utilize the same mechanisms. PGPR may promote plant growth directly usually by facilitating resource acquisition or modulating plant hormones levels, or indirectly by decreasing the inhibitory effects of various pathogenic agents on plant growth and development, that is, by acting as biocontrol bacteria.

The best-studied mechanisms of bacterial plant growth promotion include providing plants with resources/nutrients that they lack, such as fixed nitrogen, iron and phosphorus. Many agricultural soils lack a sufficient amount of one or more of these compounds so that plant growth is suboptimal. To obviate this problem and obtain higher plant yields, farmers have become increasingly dependent of chemical sources of N and P. It would obviously be advantageous if efficient biological means of providing N and P to plants could be used to substitute for at least a portion of the chemical N and P that is currently used.

Nitrogen fixation

In addition to *Rhizobia* sp., a number of free-living bacteria are able to fix N_2 and provide it to the plants. It is generally believed that free-living bacteria provide only a small amount of what the fixed nitrogen that the bacterially-associated host plant requires. The *nif* genes are responsible for synthesis of nitrogenase, and include structural genes, genes involved in activation of the Fe protein, Fe-Mo cofactor biosynthesis, electron donation and regulatory genes required for the synthesis and function of the enzyme. In most diazotrophic bacteria, the *nif* genes are organized in a cluster of around 20-24 kilobases with seven operons encoding some 20 proteins. Because of the complexity of this system, genetic strategies to improve nitrogenase fixation have been elusive and even though it was believed that after isolation and characterization of the *nif* genes it would be possible to genetically engineer improvement in nitrogen fixation, these ideas have not yet been achieved.

Certain non-legume crops such as sugarcane and rice can directly benefit from BNF through association with bacterial diazotrophs that are capable to infect, multiply and spread inside the roots and aerial parts of the plants, without causing a health damage or ecological threat to their hosts. Several these diazotrophic endophytes, among them members of genera *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum*, *Burkholderia*

and *Azoarcus*, have been characterised and in some cases nitrogen fixation inside the host and plant gains of atmosphere-derived nitrogen demonstrated. Although progress has been made on the understanding of this type of beneficial plant-microbe interaction, the contribution of single species to the host nitrogen balance is still unclear. Nevertheless, it is likely that the historically sustained long-term cultivation of sugarcane or rice without significant additions of N fertilizer may benefit from complex endophytic and rhizospheric microbial consortia. A poorly understood interaction between plant genotype and soil and environmental conditions seem to determine the contribution of endophytic BNF to plant productivity and, therefore, more knowledge is needed to fully understand BNF in these important crops and to extend their benefits to other agriculturally important (e.g. graminaceous) species.

Phosphate solubilization

Although the amount of phosphorous in the soils is generally quite high, most of this phosphorous is insoluble and, therefore, not available to support plant growth. In addition, much of the soluble inorganic phosphorous that is used as chemical fertilizer is immobilized soon after it is applied so that it becomes unavailable to plants. The limited bioavailability of phosphorous from the soils together with the fact that this element is essential for plant growth means that the inability to obtain sufficient phosphorous often limit plant growth. Thus, solubilization and mineralization of phosphorous by phosphate-solubilizing bacteria is an important trait in PGPR. Inorganic phosphorous can be solubilised by the action of low molecular weight organic acids such as gluconic and citric acid, and mineralization of organic phosphorous occurs through the synthesis of a variety of different phosphatases, catalyzing the hydrolysis of phosphoric esters. Interestingly, ability to solubilise and mineralize phosphate can coexist in the same bacterial strain.

Iron sequestration

Despite its abundance on earth, in aerobic soils, iron is not readily assimilated by either bacteria or plants because ferric ion or Fe^{+3} , which is the predominant form in nature, is only sparingly soluble so that the amount of iron available for assimilation by living organisms is extremely low. Microorganisms and plants require a high level of iron, and obtaining sufficient iron is even more problematic in the rhizosphere where plants, bacteria and fungi compete for iron. To survive with such a limited supply of iron, bacteria synthesize low-molecular mass molecules with an exceptionally high affinity for Fe^{+3} , the so called siderophores, as well as membrane receptors able to bind the Fe-siderophore complex, thereby facilitating iron uptake by microorganisms. Of about known 500 siderophores, the chemical structure of more than 250 of these compounds have been determined.

Cytokinins and gibberellins

Several studies have shown that many PGPR can produce either cytokinins or gibberellins or both, and plant-growth promotion by those molecules has been reported. A detailed understanding, however, of the role of bacterially-synthesized hormones and how the bacterial production of these plant hormones is regulated is scarcely known. Accordingly, much of what it is believed to be the role of bacterial cytokinins and gibberellins is based on our knowledge on plant physiological studies following addition of purified hormones to plants. It is also known that phytopathogens can also produce cytokinins in higher amounts than PGPR so that the effect of the PGPR on plant growth is stimulatory while the effect of the cytokinins from pathogens is inhibitory.

Indoleacetic acid

Indoles-3-acetic acid (indoleacetic acid, IAA) is the most common and scientifically studied naturally-occurring auxin. IAA affects plant cell division, extension and differentiation; it also stimulates seed and tuber germination, increases the rate of xylem and root development, controls processes of vegetative growth, initiates lateral and adventitious root formation, mediates response to light, gravity and florescence, affects photosynthesis, pigment formation, biosynthesis of various metabolites and resistance to stressful conditions. It is well known that IAA concentrations affect the physiology of plants in different ways. Plant responses to IAA vary from one type of plant to another where some plants are more or less sensitive to IAA. There are also differences regarding the particular tissue involved, e. g. roots versus shoots, and as a function of the developmental stage of the plant. In this sense, it is important to note that the endogenous pool of plant IAA may be altered by the acquisition of IAA that has been produced by soil bacteria, which, in turns, may determine whether bacterial IAA stimulates or suppresses plant growth.

Ethylene and ACC deaminase activity

Ethylene is a plant hormone with a wide range of biological activity at very low concentration. It may affect plant growth and development by promoting root initiation, inhibiting root elongation, promoting fruit ripening, promoting flower wilting, stimulating seed germination, promoting leaf abscission, activating the synthesis of other plant hormones, inhibiting nodulation by rhizobial species, inhibiting mycorrhizae-plant interactions, and responding to both biotic and abiotic stresses. The ethylene produced as a response to various stresses is called 'stress ethylene' and describes the increase in ethylene synthesis associated with various environmental stresses, among others extremes of temperatures, high light, flooding, drought, the presence of toxic metals and organic pollutants, radiations, wounding, insect predation, high salt, various pathogens including viruses bacteria and fungi.

After the discovery in soil bacteria of the enzyme 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase, it was evident that this enzyme was a common feature of many PGPR. Participation of ACC deaminase in plant growth is based on colonization of seeds or roots by PGPR and that in response to tryptophan and other small molecules in seed or root exudates the bacteria synthesise and secrete IAA. This bacterial IAA, together with endogenous plant IAA, can either stimulate plant growth or induce the synthesis of plant enzyme ACC deaminase that converts S-adenosyl methionine to ACC the immediate precursor of ethylene in all higher plants. A portion of the newly synthesized ACC is excluded from seeds or plant roots, taken up by the PGPR and converted by ACC deaminase to ammonia and α -ketobutyrate, compounds that are readily assimilated. As a direct consequence of the activity of the enzyme, the amount of ethylene produced by the plant is reduced and, therefore, root or seed colonization by PGPR that synthesise ACC deaminase prevents plant ethylene levels from becoming growth inhibitory. In the short term, a visible effect of seed or root inoculation with ACC-deaminase-producing bacteria is the enhancement of plant root elongation and promotion of shoot growth. Nodulation by rhizobia of legumes and mycorrhizal establishment in the host plant induce local increases in ethylene content and, a result, by lowering the local ethylene content in these plants, ACC deaminase-producing bacteria can increase the extent of both rhizobial nodulation and mycorrhizal colonization.

Biocontrol

Synthesis of a range of different antibiotics is the PGPR trait that is most often associated with the ability of the bacterium to prevent the proliferation of plant pathogens (generally fungi). This ability is of considerable interest in terms of the complementary objectives of developing and understanding of some of the mechanisms used by the control bacteria and utilizing these bacteria commercially instead of chemical pesticides. Depending too much on antibiotic-producing bacteria as biocontrol agents may become a problem as with the increase use of these strains, some phytopathogens may develop resistance to specific antibiotics.

Some biocontrol bacteria produce enzymes including chitinases, cellulases, β -glucanases, proteases and lipases that can lyse a portion of the cell walls of many pathogenic fungi and, accordingly, to act as PGPR.

Induced systemic resistance

Bacteria that induce systemic resistance (ISR) that is phenotypically similar to the systemic acquired resistance (SR) that occurs when plants activate their defense mechanisms in response to infection by a pathogenic agent have can also be considered as PGPR. ISR-positive plants react faster and more strongly to pathogens attack by inducing defense mechanisms. ISR does not target specific pathogens, rather it may be effective at controlling diseases caused by different pathogens. ISR involves jasmonate and ethylene signaling within the plant and these hormones stimulate the host plant's defenses in response to a range of pathogens.

Prospects

It is widely accepted that application of N fertilizers has decisively contributed to pace food production with human population growth in the last decades. There is also a consensus that this has been at a high environmental cost that is no longer sustainable. Besides a better use efficiency of current N fertilizers, the biological process of nitrogen fixation must be better exploited as a more sustainable technology to reduce the undesired effects of N fertilization of agricultural crops. Rhizobial inoculation programs are approaches at hand, like are biofertilizers based on plant growth promoter rhizospheric and endophytic bacteria that help to reduce the needs of N fertilization in important crops like cereals. Engineering in cereals the capacity to fix nitrogen, either by themselves or in symbiosis with nitrogen-fixing microbes, are attractive future options that nevertheless require more intensive and internationally coordinated research efforts. Since N_2 fixation is more energy-demanding than the more simple nitrate or ammonium assimilation, nitrogen-fixing plants may be less productive. This handicap may be neutralized by enhancing photosynthetic efficiency and applying crop management practices to allow optimal use of soil resources.



Vue de l'audience

La matière organique dans le sol : Un élément clé pour une agriculture durable et résiliente

Fikri EL YAHYAOUÏ

Coordinateur de Projets et Veille Scientifique, VALORHYZE SA,
GROUPE ÉLÉPHANT VERT, Commune de Mejjat, site Agropolis GI5-6,
Meknès, Maroc



Fikri EL YAHYAOUÏ est, depuis Avril 2015, en charge de la coordination de projets et de la veille scientifique à VALORHYZE SA : Une filiale du GROUPE ÉLÉPHANT VERT, entièrement dédiée à la Recherche et au Développement de bio-intrants pour une agriculture saine et durable, notamment des produits pour (i) la nutrition et la protection des plantes (compost, bio fertilisants, biostimulants) et (ii) leur protection (biofongicides, bioinsecticides).

De formation Agronomique (Horticulture), Fikri EL YAHYAOUÏ a élargi sa formation en Biochimie, Biologie Moléculaire et Physiologie Végétale (Perpignan et Poitiers). Il a obtenu un Doctorat à l'INP/ENSAT (Institut National Polytechnique/ Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse) où il a travaillé sur l'isolement et la caractérisation de gènes impliqués dans la biosynthèse d'arôme chez le melon. Ensuite, il s'est intéressé aux mécanismes moléculaires intervenants dans l'interaction plantes/microorganismes. Notamment, l'étude du transcriptome racinaire d'une légumineuse modèle (*Medicago truncatula*) pour identifier les gènes et les réseaux de régulation impliqués dans la nodulation et la fixation de l'azote atmosphérique par *Sinorhizobium meliloti* (INRA-Toulouse, 5^{ème} PCRD).

Fikri EL YAHYAOUÏ a également travaillé sur la mise en place d'un test d'identification et de quantification de certaines espèces de *Fusarium sp*, dont certaines sont aflatoxinogènes et affectent la qualité sanitaire des graines de maïs lors du stockage (Biogemma SA- France).

Par ailleurs, en partenariat avec une société privée (BiotechMarine - Fr), il a aussi travaillé sur la stimulation des défenses naturelles chez les plantes (*M. truncatula*), traitées avec des extraits d'algues marines en vue de développement de produits naturels pour la protection des cultures, les SDN (Stimulateurs des Défenses Naturelles).

De 2006 à 2015, Fikri EL YAHYAOUÏ a occupé le poste de Directeur Scientifique et Technique chez PROTENIA SA, une CRO (Contract Research Organisation) dédiée à l'ingénierie et la production de protéines recombinantes à façon (Enzymes, hormones, anti-corps, vaccins recombinants, etc).

1. Résumé

L'essentiel de l'alimentation humaine et animale provient du sol, une fine couche de quelques cm dans laquelle les racines des plantes se développent et puisent l'essentiel des éléments dont elles ont besoin, notamment, l'eau, l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et divers ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{4-} , Fe^{2+} , ...). Le sol est également un lieu de vie pour divers macro-et microorganismes qui participent à la structuration et l'enrichissement du sol et donc à sa fertilité. L'action du climat et de l'homme est également primordiale. Elle peut être dans le sens d'une dégradation ou d'une amélioration de la fertilité des sols. En effet, depuis plusieurs décennies, les sols sont de plus en plus dégradés et fatigués à cause de plusieurs facteurs tels que la mauvaise gestion des sols (agriculture intensive), la baisse voire la disparition de la matière organique dans les sols, l'érosion, la pollution chimique, l'urbanisation, etc.

Naturellement, les sols sont à la base de notre sécurité alimentaire, du maintien des écosystèmes, de la biodiversité et la protection de l'environnement (séquestration du carbone et des polluants chimiques). De plus, certains besoins industriels sont également basés sur le sols et les cultures, notamment les biomatériaux (biocarburant, bois, cellulose, caoutchouc, ...). A l'évidence, pour une agriculture productive et résiliente, nous devons au moins maintenir la fertilité de nos sols, voire l'améliorer pour compenser les surfaces perdues ou dégradées, mais aussi pour compenser les besoins toujours croissants pour l'alimentation et l'industrie.

Plusieurs pistes sont proposées par des experts internationaux, mais l'apport et la restitution de la matière organique (MO) aux sols (2-5%) demeure essentielle et conditionne l'efficacité des autres mesures.

2. Le sol est un patrimoine de l'humanité

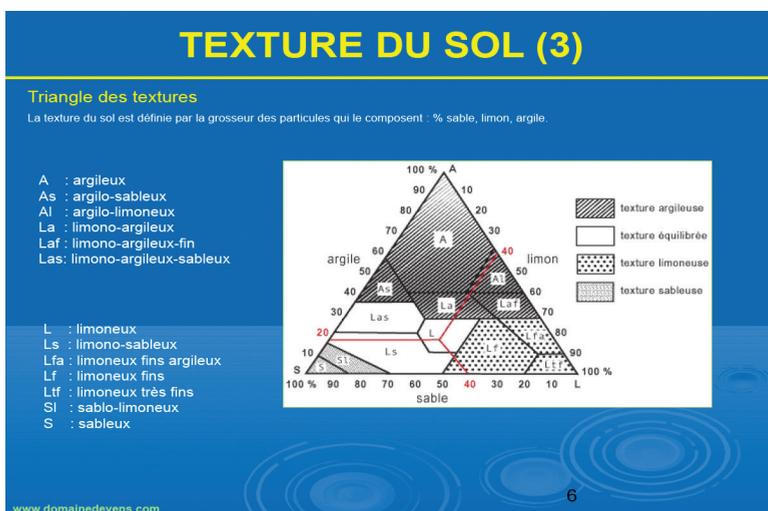
Le sol est considéré comme l'épiderme des continents. Il s'est formé à partir de la roche mère, solide et massive, sous l'effet de facteurs physiques et chimiques (le chaud/froid, pluies, vent, ruissellement des eaux,...), mais aussi sous l'effet d'action d'organismes vivants (bactéries, champignons, algues, racines, ...). Naturellement, la formation du sol (pédogenèse) est un processus lent et continu. Il s'étale sur plusieurs milliers d'années (Il faut environ 2 000 ans pour former seulement 10 cm de terre), mais le sol peut être dégradé ou détruit seulement en quelques années voire en quelques minutes. Il est important de souligner que la dégradation des sols a des conséquences locales (sur site) comme la baisse des rendements, mais souvent les conséquences hors-site, sont plus importantes. A titre d'exemple, le ruissellement et l'érosion causent des dégâts plus importants en aval (inondations, colmatage des barrages, destruction des routes et habitations, ...).

Les facteurs de destruction ou de dégradation des sols agricoles sont nombreux (FAO, 2015): l'érosion, l'extension des villes au détriment des sols arables, épuisement des nutriments, augmentation de l'acidité, de la salinité des sols, sans oublier des

pollutions chimiques qui réduisent la biodiversité et la fertilité des sols ou rendent leurs récoltes impropres à la consommation (métaux lourds). En agriculture, le sol est une précieuse pellicule de 25-100 cm de profondeur. Elle sert de support et de garde-manger pour les cultures et divers macro- et micro-organismes du sol (biodiversité). L'essentiel de notre nourriture provient de l'agriculture et donc des sols, d'où l'intérêt d'en prendre le plus grand soin et d'œuvrer en faveur des sols fertiles, sains et stables.

3. La texture du sol

Dans une situation normale, le sol est composé de 4 familles d'éléments : éléments minéraux, matière organique, liquide (solution du sol = eau + soluté) et gazeux (air, CO₂, CH₄, ...). La texture du sol est la résultante entre la proportion des éléments minéraux fins : argile (< 2 µm), limons (2-50 µm), sable (50 µm - 2 mm) (Cf Fig.1).



**Figure 1 : Triangle des textures du sol (d'après le Département de l'Agriculture USDA- USA).
A : argileux; As : argilo-sableux; Al : argilo-limoneux; La : limono-argileux;
Laf : limono-argileux-fin; Las : limono-argileux-sableux; L : limoneux;
Ls : limono-sableux; Lfa : limoneux fins argileux; Lf : limoneux fins;
Ltf : limoneux très fins; Sl : sablo-limoneux; S : sableux**

Pour rappel, les argiles sont des structures en feuillets de petites tailles, ayant une très grande surface développées et des charges négatives. Lorsque les argiles sont hydratées et leurs charges neutralisées, notamment par des cations tels que le Ca²⁺, elles forment des colloïdes et flocculent ce qui permet d'avoir un sol léger, perméable à l'eau et à l'air, avec atténuation du phénomène de retrait et de fissuration des sols après dessiccation. Grâce à leur capacité d'échange cationique (CEC), les argiles ont la capacité de fixer et de libérer les nutriments, limitant ainsi les lessivages. La CEC

est également l'un des mécanismes de l'épuration/adoucissement de l'eau chargée en sels et en divers produits chimiques, notamment les pesticides et divers polluants. Il convient de noter que la CEC d'un sol varie selon le type et la teneur en argile et en matière organique.

Le limon et les sables sont des particules (constitués de débris très fins (50 μm à 2 mm), de quartz, de mica et de feldspath. Leur rôle immédiat est essentiellement physique (porosité des sols). Selon, leurs natures, ils peuvent libérer aussi des éléments minéraux pour la plante.

4. La structure du sol

La structure du sol est la façon dont sont agencés ses éléments fins (argile, limon et sable). Les particules de sable et de limon sont incorporées dans des agrégats liés via l'argile, l'humus (une forme stable de MO) et le calcium. En effet, l'humus et l'argile, de charges négatives, sont liés par des ponts cationiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} ...) et forment le complexe argilo-humique (CAH). Les diverses particules et agrégats sont également maintenus grâce à une sorte de colles biologiques secrétées par les microorganismes du sol (exemple : Exo-polysaccharides secrétés par les bactéries, la glomaline secrétée par certains champignons).

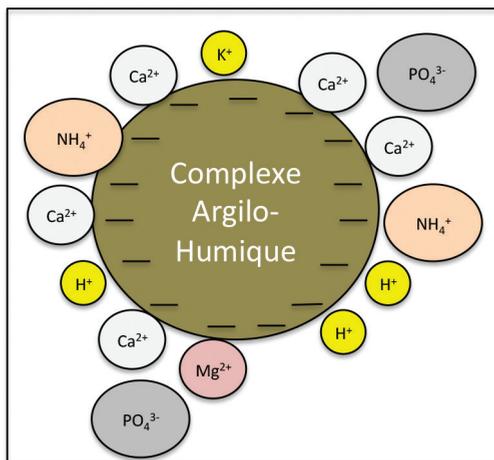


Figure 2 : Présentation schématique du complexe argilo-humique (CAH) et de son pouvoir de rétention d'ions.

Plusieurs CAH s'agglomèrent pour former de petites structures de 0,2-2 mm, appelées «agrégats», en incorporant de la matière organique (MO) en décomposition, des microorganismes et des radicules et des particules minérales fines. Ces agrégats s'organisent à leur tour pour former des mottes. L'architecture 3-D de ces agrégats (taille et forme) détermine l'essentiel des propriétés physiques du sol, telle que la

porosité, la résistance à la battance, à la compaction et à l'érosion. A titre d'exemple, dans un sol de texture équilibrée, les agrégats sphériques ou arrondis, forment une structure dite grumeleuse, idéale pour les agronomes et les agriculteurs car elle permet :

- une bonne aération, circulation et rétention de l'eau et des nutriments (la capacité de rétention en eau et la CEC);
- un bon développement des racines et de l'activité biologique, notamment la microfaune et la microflore;
- un travail du sol facile et une résistance à l'érosion et à la compaction (formation d'une semelle par le passage des engins).

En revanche, pour un sol sableux, de structure particulière, poreuse et très drainante, la capacité de rétention d'eau et des nutriments (lessivage) est très limitée. De plus, en cas de pente et de forte précipitation, l'érosion peut être spectaculaire (formation de rigoles et de ravins). L'apport de MO stable telle que le compost et le fumier améliore sa capacité de rétention en eau et en nutriments.

Par ailleurs, les sols limoneux sont difficiles à aérer. En effet, après de fortes pluies sur un sol nu, il y a souvent formation d'une croûte superficielle dure (croûte de battance), difficile à traverser à la levée des semis. Cette croûte réduit également les échanges gazeux entre les racines et l'atmosphère et limite l'infiltration des eaux de pluie et donc favorise le ruissellement et l'érosion.

Les sols argileux retiennent bien l'eau et les ions, mais sont compacts, mal drainés et difficiles à travailler. De plus, la vie biologique y est perturbée à cause du manque et d'une mauvaise circulation de l'air. L'apport de MO et de calcium, permet d'améliorer la structure et les propriétés des sols argileux.

5. Concept de la fertilité des sols

Agronomiquement parlant, un sol est dit «fertile» lorsqu'il a la capacité à garantir une bonne croissance et vigueur des végétaux pendant plusieurs cycles culturaux, avec des apports de fertilisants calculés sur des exportations. Mais le sol ne doit en aucun cas n'être considéré que comme support physique, comme cela fut le cas depuis plus de cinquante ans avec la révolution des engrais chimiques. La fertilité du sol est aussi associée à la notion du contexte et de l'utilisation du sol. En d'autres termes, selon les exigences des cultures et des conditions climatiques. Scientifiquement parlant, un sol fertile est un sol riche en éléments nutritifs, ayant une bonne structure permettant une bonne aération et rétention de l'eau et des nutriments. C'est aussi un sol où l'activité biologique est intense.

Avec l'avènement de l'agriculture intensive (la révolution verte), et pendant longtemps, les sols ont été considérés comme de simples supports de cultures. D'ailleurs cette vision simpliste de la fonction du sol a été, entre autres, à l'origine du «paradigme» de la culture hors-sol où les plantes sont nourries grâce à des solutions nutritives à base d'engrais chimiques. A l'évidence, l'apport massif de fertilisants chimiques, a permis d'augmenter significativement des rendements et de lutter contre la faim et/ou la sous-alimentation dans beaucoup de pays. Cependant, après plus de 50 ans d'agriculture conventionnelle, intensive, basée quasi-exclusivement sur les engrais de synthèse, les pesticides chimiques, mais aussi, basée sur des variétés ultra performantes; les rendements ont atteint des records. Mais, soudain, dans certains pays industrialisés et pour certaines cultures comme le blé, les rendements ont commencé à stagner, c'est le plateau de fertilité, (Coudurier *et al.* 2013), voire diminuer! L'éternelle question revient de nouveau : Serions nous toujours capables de produire suffisamment de nourriture pour notre espèce?

Force est de constater qu'il y a véritablement de quoi semer un vent de panique. D'un côté, le plateau de fertilité, la dégradation et la disparition des sols arables, les méfaits de la déforestation pour augmenter les surfaces agricoles, et de l'autre côté, une augmentation soutenue de la population mondiale (9 Milliards en 2050) et les besoins industriels en biomatériaux. Les experts et même les agriculteurs s'accordent à dire que la dégradation des sols est fortement associée à deux facteurs étroitement liés entre eux : la disparition de la MO dans les sols et leur érosion. En effet, après 40-50 ans d'agriculture intensive, le taux de MO est passé de 4 à moins de 1% dans certaines régions, à raison d'une baisse d'environ 0,1%/an (Badraoui *et al.*, 2000).

A l'évidence, la fertilité des sols est une propriété fragile et pour souligner son importance et l'urgence d'en prendre soin; l'organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) a déclaré 2015 «année internationale des sols» et elle a publié un rapport alarmant sur la situation des sols agricoles dans le monde (FAO, 2015). Ce rapport, de 648 pages, a fait état d'une détérioration significative des sols. En effet, 33% des sols mondiaux sont modérément ou gravement dégradés. En Afrique, la situation est plus alarmante car 40% des terres sont dégradées et 83% des populations rurales, sub-sahariennes, dépendent de la terre pour leur subsistance.

6. Importance de la matière organique dans l'agriculture durable

La matière organique (MO) dans le sol est l'ensemble de constituants et de molécules formés par des organismes vivants (végétaux, animaux, divers microorganismes). Dans les sols cultivés, la MO peut présenter de 1-10%. Sa classification est basée plutôt sur sa forme et son évolution, plus que sur son origine (cf encadré 1).

Encadré 1 : Classification et formes de matière organique dans le sol

La matière organique vivante (MOV), reconnaissable : Constituée de végétaux, animaux, et microorganismes vivants. Cette biomasse est biologiquement active (pédofaune et pédoflore). Grâce aux mécanismes de sécrétion et d'exsudation; les organismes vivants libèrent dans le sol des molécules ayant diverses actions (nutrition, signalisation, défense, structuration du sol, etc). Quelques exemples de molécules libérées : les acides aminées (aa), acides organiques, les sucres, les hormones, les hormones et diverses molécules bioactives.

La matière organique «fraîche» (MOF), partiellement reconnaissable : Constituée de résidus végétaux, de cadavres animaux et leurs déjections et exudats, sans oublier les débris microbiens et leurs métabolites. La durée de séjour de la MOF dans le sol est d'environ 1 mois. Sa décomposition est assurée par les animaux décomposeurs et détritivores (verre de terre, etc) mais aussi par les microorganismes du sol (champignons, bactéries). En effet, généralement, 80-90% de la MOF est dégradée via deux processus distincts: (i) la minéralisation dite primaire, libérant divers nutriments (NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , ...), et (ii) l'humification aboutissant à la formation de composés humiques stables (l'humus).

La matière organique transitoire (MOT) ou labile ou amorphe, non reconnaissable: Correspond aux produits intermédiaires et aux petites molécules issus de l'évolution de la MOF sous l'action de la biomasse microbienne. La durée de séjour dans le sol est d'environ 1 an.

La matière organique stable ou liée (MOS), non reconnaissable : Correspond essentiellement à l'humus, brun foncé à noir qui dégage une odeur de sous-bois. Il s'agit de molécules polymérisées, provenant de l'évolution des matières précédentes, notamment la lignine et la cutine. L'humus représente 70-90% de la MO totale. Sa dégradation (minéralisation secondaire) est lente (généralement, 0,5-2% /an). L'humus est un acteur fondamental dans l'amélioration et le maintien de la fertilité et la structure des sols. Il est stable (10-100 ans).

Grace aux macro- et micro-organismes du sol; la MO fraîche est majoritairement transformée en éléments nutritifs suivant un processus appelé minéralisation primaire (environ 80-90% de la MO fraîche). Le reste est transformé en humus selon le processus d'humification. A son tour, et toujours grâce aux microorganismes du sol, l'humus est décomposé en éléments nutritifs via la minéralisation secondaire (0,5-2%/an). Pour faire simple, on peut dire que la minéralisation primaire est importante pour la fertilisation à court terme (cycle d'une culture), tandis que la minéralisation secondaire intervient dans la fertilité à moyen et à long terme. On comprend donc plus facilement l'intérêt de protéger l'activité et la diversité biologique du sol et de maintenir sa teneur en MO à des niveaux corrects. Il convient de souligner que divers facteurs peuvent influencer la vitesse et la qualité de la dégradation de MO (humification et minéralisation) :

- Les facteurs environnementaux tels que: la température, l'aération, l'humidité du sol, la présence d'inhibiteurs de métabolisme (métaux lourds, pesticides chimiques, etc.);
- Le pH est un facteur important à surveiller et à corriger en cas de déviation. Il affecte l'activité microbienne. A titre d'exemple, plus le sol est acide, plus la minéralisation de l'humus est faible;
- Le teneur en argile : L'argile en liant l'humus, le protège et ralentit sa minéralisation;
- La qualité de la MO : Taille et forme des résidus, rapport C/N des résidus ou du sol complet;
- La composition de la MO : Sucres, amidon et protéines simples sont les moins stables dans le sol. L'hémicellulose, la cellulose, les cires, les huiles et les résines sont moyennement stables. En revanche, la lignine, les composés phénoliques et la chitine sont les plus lents à être dégradés;
- Les pratiques culturales : le travail du sol et des arrosages fréquents accélèrent la dégradation, voire la perte de la MO (forte minéralisation).

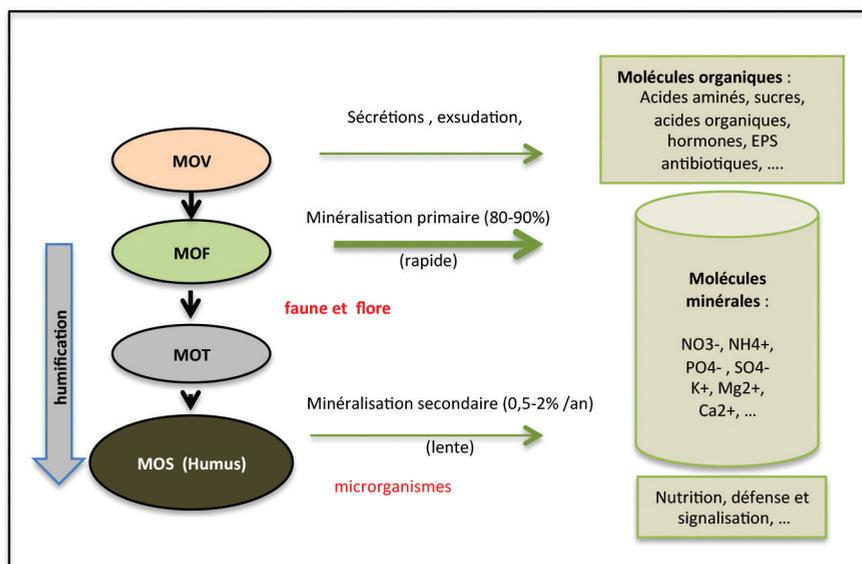


Figure 3 : Schéma simplifié de l'évolution de la matière organique dans le sol.

MOV : matière organique vivante; **MOF** : matière organique fraîche;
MOT : matière organique transitoire; **MOS** : matière organique stable.

Les principales fonctions et «vertus» de la MO dans le sol, sont connues depuis très longtemps. En effet, la MO, fraîche ou décomposée, est une source de nutriments et d'énergie pour la pédoflore et la pédofaune, fortement utiles pour le travail et la structuration du sol (verres de terre), pour le processus d'humification

et la minéralisation de la MO, mais aussi pour la croissance des plantes (fixation de l'azote atmosphérique, solubilisation de phosphate, effet PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobia), et la protection des plantes contre leurs maladies et ravageurs (effet SDN : Stimulateur des Défenses Naturelles des plantes). Les macro- et micro-microorganismes participent à la réorganisation de la MO et réduisent le lessivage des nutriments.

Par ailleurs, l'humus représente l'essentiel de la MO dans le sol (80-90% de la MO totale), et possède une capacité d'échange cationique (CEC) d'environ 5 fois celle de l'argile. Cette propriété limite l'infiltration des molécules chimiques (engrais, pesticides et divers polluants) dans la nappe phréatique, réduisant aussi l'eutrophisation des lacs et rivières. L'humus étant stable, il constitue un véritable garde-manger pour les plantes puisqu'il assure une libération régulière des nutriments grâce à une minéralisation très lente (0,5-2%/an). De plus, l'humus est un élément clé dans la formation du CAH et des agrégats, essentiels à la structuration du sol. Aussi, la MO dans le sol est une forme de stockage du carbone (Eswaran et al. 1993). Elle permet donc de réduire les émissions de CO₂ et ses effets sur la dérégulation climatique, souvent à l'origine de sécheresse, d'inondation et d'érosion des sols. D'ailleurs l'initiative 4 pour 1000 (les sols pour la sécurité alimentaire et le climat), lancée par la France, vise à augmenter le taux de MO dans les sols de 0,4% /an. Les principaux rôles de la MO dans le sol, sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Résumé des principaux rôles de la matière organique dans le sol

Formes de la MO	Effets
MO vivante (pédofaune et pédoflore)	<ul style="list-style-type: none"> • Transformation de la biomasse morte (humification, minéralisation,) • Réorganisation de la MO (déminalisation) et limitation du lessivage des engrais • Fixation d'azote atmosphérique (N-Fix) et solubilisation du P et K, • Effet PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobia), et effet SDP (Stimulateur des Défenses des Plantes) • Secrétions de substances organiques : acides aminés, sucres, enzymes, ... • Travail du sol, aération, drainage (vers de terre, racines, ...) • Structuration et stabilisation du sol • Détoxification des sols • Equilibre et maîtrise des populations des ennemies des cultures (insectes, pathogènes) • ...

MO fraîche et transitoire	<ul style="list-style-type: none"> • Source d'énergie et de nutriments pour les macro- et micro-organismes du sol • Source de nutriments et de diverses substances nécessaires aux plantes et aux organismes du sol • Protection contre le compactage et l'érosion • Augmentation de la porosité des sols : sols aérés, légers, moins compacts, meilleure infiltration et circulation de l'eau et de l'air, ... • Réchauffement du sol et amélioration du métabolisme de la pédoflore et pédofaune • ...
MO stable = humus	<ul style="list-style-type: none"> • Libération lente et progressive de nutriments pour les cultures (fertilité à moyen et long terme) • Formation du CAH et augmentation de la CEC: « garde manger » des plantes • Structuration et protection du sol (CAH) : agrégats stables permettant une bonne aération, rétention d'eau, drainage des excès d'eau, la résistance à la battance, à la compaction et à l'érosion • Réduction de la toxicité des polluants : rétention des ETM (Eléments Traces Métalliques), pesticides • Stockage du carbone et réduction de l'effet de serre et de changement climatique • Les acides organiques constituant l'humus solubilisent et dégradent la roche-mère, participant ainsi à la formation continue des sols

Malgré son importance, la MO dans les sols arables a atteint des taux très bas, voire inquiétants (moins de 1-1,5%), surtout dans les zones irriguées où l'agriculture intensive est développée. Dans le cadre du Plan Maroc Vert, le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (MAPM) et l'Office Chérifien des Phosphates (OCP), ont initié un vaste programme de cartographie de la fertilité des sols agricoles du Royaume. Le dosage de la MO est l'un des paramètres étudiés. Les résultats partiels sont illustrés sur la carte (cf Figure 4).

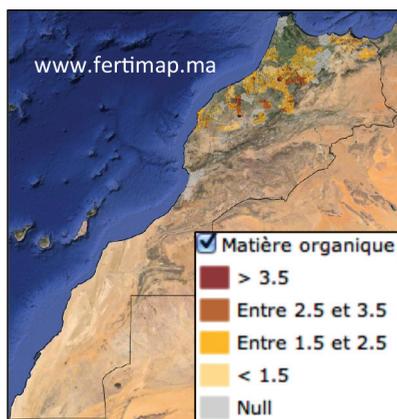


Figure 4 : Cartographie partielle de la teneur en matière organique dans les principales régions agricoles au Maroc (au 04/2016). Le travail se poursuit encore pour couvrir tout le territoire du Royaume. Les chiffres expriment la teneur en MO (%)

On constate qu'au Maroc, certaines régions sont pauvres en MO en raison du climat et/ou la texture du sol qui ne favorise pas l'accumulation de la MO. Il y a aussi d'autres facteurs tels que l'agriculture intensive irriguée et/ou des pratiques culturales qui ne permettent pas la restitution de la MO au sol (El Oumlouki et al, 2014, Badraoui et la, 2000). À titre d'exemple, il n'est pas rare de voir que la moisson des céréales comme le blé se fait à ras du sol, la paille est ramassée pour le bétail. De plus, le peu de chaume restant, est paturé, enfoui ou brûlé ce qui prive les sols d'une MO précieuse.

À noter que la teneur optimale en MO dépend du taux d'argile et du calcaire. Idéalement, elle doit être autour de 3% car elle est primordiale, à la fois pour le maintien de la fertilité et la stabilité des sols, mais aussi pour la protection de l'environnement et la santé humaine et donc au final, elle est essentielle pour une agriculture saine, durable et résiliente.

7. La matière organique est essentielle pour la reconstitution des sols dégradés

Avant l'apparition et l'usage des engrais chimiques, la fertilité des sols était maintenue ou améliorée grâce aux apports de diverses MO (fumier, litière, déchets verts, etc.). Mais, avec l'augmentation des surfaces cultivées et une production en mode intensif, les amendements organiques ont été pratiquement abandonnés. Après quelques décennies d'utilisation d'intrants chimiques sur les sols; le constat est alarmant et sans appel : une diminution de la MO dans les sols, des problèmes d'érosion, de dégradation des sols, la baisse de la fertilité et aussi de la biodiversité dans nos sols. Cette situation nous interpelle collectivement et nous incite à prendre (ou reprendre) conscience de certaines notions telles que : l'agriculture durable, l'agriculture raisonnée, l'agriculture de conservation et même un retour à l'agriculture biologique.

Le sol est en réalité une entité vivante, un véritable bioréacteur dont la puissance d'énergie délivrée, traduit le niveau de fertilité et de vitalité du sol. La dégradation de cette fertilité aboutit à des baisses importantes de rendements. La restauration de la fertilité des sols vise fondamentalement la restitution des propriétés physico-chimiques et/ou biologiques du sol. Il s'agit d'un processus lent, parfois associé à des investissements lourds et très onéreux. Les cas les plus fréquents concernent des amendements organiques et/ou minéraux, associés à des pratiques culturales qui préservent la fertilité et la stabilité des sols. Voici quelques actions curatives et préventives pour restaurer ou maintenir la fertilité des sols :

- Maintenir la végétation et mieux gérer les rotations des cultures;
- Utilisation raisonnée et prudente des intrants chimiques (engrais et pesticides);
- Adapter les outils du travail du sol pour réduire la perturbation du sol (structure, faune et flore);
- Utilisation de variétés efficaces;
- Apport de microorganismes bénéfiques;
- Accroître la teneur en MO dans le sol et la diversifier;
- La vulgarisation, l'éducation et la sensibilisation;
- Les systèmes d'information sur les sols;
- Les programmes de recherches sur les sciences du sol.

En agriculture durable, la gestion du sol doit permettre de maintenir constante sa stabilité, sa fertilité et sa vitalité, c'est à dire l'ensemble de ses caractéristiques biologiques, physiques et chimiques au cours des cycles successifs d'exploitation. Pour cela, la matière organique (MO) joue un rôle central dans le maintien de ces caractéristiques. La compréhension de son rôle et la maîtrise des apports permettent de garantir un sol fertile, riche en éléments nutritifs, bien structuré permettant une bonne aération et rétention de l'eau et des nutriments et, ayant une réserve nutritive progressivement bio-disponible. C'est aussi un facteur déterminant pour maintenir des activités biologiques intenses dans le sol (macro-/microfaune, macro-/micro-flore).

8. Conclusions et perspectives

L'agriculture intensive, la mauvaise gestion de la fertilité des sols, l'activité industrielle galopante et le réchauffement climatique ont largement contribué à la dégradation des sols et l'effondrement de leurs bilans humiques. Ces phénomènes deviennent visibles après plusieurs décennies. Il va de soit que les mesures correctives s'étalent aussi sur plusieurs années. De ce fait, on peut considérer le sol comme une ressource naturelle non renouvelable, ou difficilement renouvelable, à l'échelle humaine.

Depuis la fin du siècle dernier (années 90), on assiste à un regain d'intérêt pour l'apport ou la restitution de la MO au sol, car non seulement cela permet la réduction des engrais chimiques mais aussi (i) la structuration des sols, (ii) la réduction de la pollution des nappes phréatiques et l'eutrophisation des lacs et rivières, (iii) le recyclage et la valorisation des déchets (sous-produits) organiques générés par diverses activités humaines et industrielles et enfin, (iv) le stockage du carbone dans le sol afin de réduire le réchauffement climatique. Les agriculteurs sont de plus en plus sensibilisés à la nécessité de rehausser le niveau de matière organique dans leurs sols grâce aux techniques culturales telles que les engrais verts, le semis direct, etc. (sans labour), mais aussi grâce à divers produits organiques obtenus par eux-mêmes ou disponibles sur le marché, notamment le compost et ses dérivés. En effet, le compost apporte des quantités non négligeables de macro-et microéléments aux cultures. Il améliore les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol et donc, *in fine*, améliore sa fertilité et sa stabilité.

Naturellement, l'apport de MO au sol ne doit en aucun cas être perçu comme un simple geste de bonne pratique de l'agriculture. La collecte de MO, sa transformation et sa distribution, sont une composante essentielle en faveur de l'économie circulaire, la protection de l'environnement, mais aussi en faveur de la fertilité des sols et finalement, en faveur d'une agriculture saine et durable. Par ailleurs, en raison de ces enjeux, il appartient aussi aux pouvoirs publics et aux organisations professionnelles de sensibiliser les agriculteurs et de prendre des mesures incitatives pour encourager les investissements et l'utilisation de bio-intrants dans l'agriculture pour la restauration et le maintien de la fertilité et la vitalité des sols. En fin, nous ne pouvons imaginer un projet aussi ambitieux et quasi-universel, tel que l'agriculture durable, sans incitation et soutien significatif des pouvoirs publics en faveur des programmes de Recherche et Développement et de l'Innovation.

9. Références bibliographiques

- Badraoui, M., Agbani M., Brahim Soudi B., Evolution de la qualité des sols sous mise en valeur intensive au Maroc, Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, 2-3 Novembre 2000.
- Coudurier, B., Georget, M., Guyomard, H., Huyghe, C., Peyraud, JL.: Vers des agricultures à hautes performances, vol. 4 : Analyse des voies de progrès en agriculture conventionnelle par orientation productive. Rapport-INRA-pour-CGSP-VOLUME-2013.
- El Oumlouki K., Moussadek R., Zouahri A., Dakak H., Chati M., El amrani M. Étude de la qualité physico-chimique des eaux et des sols de la région Souss Massa, (Cas de périmètre Issen), Maroc : J. Mater. Environ. Sci. 5 (S2) (2014) 2365-2374.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E. & Reich, P. 1993. Organic carbon in soils of the world. Soil Science Society of America J., 57: 192-194.
- FAO, 2015. Status of the World's Soil Resources, Main report. ISBN 978-92-5-109004-6.

Changement climatique et stratégies d'amélioration durable de la fertilité des sols

Diegane DIOUF

Université Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Sénégal



Diegane DIOUF, Université Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Sénégal.

Maître de Conférences, Université Cheikh Anta Diop, 1993-2016 (23 ans).

Directeur du Laboratoire Commun de Microbiologie IRD/ISRA/UCAD.

Chef division de la propriété intellectuelle et de la valorisation des résultats de recherche; Direction de la Recherche, Université Cheikh Anta DIOP, septembre 2009-Aujourd'hui (6 ans 6 mois) Dakar.

- DEA, Botanique / Biologie végétale, 1993-1995
- Doctorate (Doctorat 3^e cycle), Plant Physiology, 1996-1999
- Doctorate (Doctorat d'Etat), Plant Physiology / Microbiology, 2004-2010
- Master's degree, Droit de la propriété intellectuelle à l'Université Yaoundé II (en partenariat avec l'OAPI et l'OMPI), 2011-2012

Centres d'intérêt : Recherche en microbiologie environnementale, Physiologie Végétale, Droit de la propriété intellectuelle Valorisation des résultats de la recherche, Initiatives pour le développement local.

Résumé

La fertilité d'un sol peut être conçue comme son aptitude naturelle ou acquise à assurer de façon durable la production végétale. Le sol assure de multiples fonctions notamment la production de rendements de haute qualité, la transformation des éléments nutritifs et la contribution aux cycles biogéochimiques. Devant l'importance du problème posé par la dégradation des sols dans un contexte de changements climatiques, les investigations se sont multipliées à l'échelle mondiale pour proposer des stratégies de récupération des terres dégradées. Ainsi, les modes de gestion des sols qui permettent de maintenir, voire augmenter, les fonctions du sol sont nécessaires.

La communication présentera quelques stratégies scientifiquement éprouvées de lutte contre la dégradation des sols et qui peuvent être classées en quatre types d'actions: hydromécaniques, chimiques, biologiques et biomécaniques. Nous analyserons ensuite des expériences de savoirs locaux et traditionnels de gestion durable des sols développés par les sociétés pour la prévention ou la récupération des sols agricoles dégradés et, au final, pour leur sécurité alimentaire. Ces différentes stratégies sont pour l'essentiel basées sur deux approches : d'une part, la modification de l'environnement pour favoriser la croissance des plantes; et d'autre part, la sélection de plantes adaptées à ces terres dégradées.

Cependant, quelle que soit la stratégie retenue, elle doit tenir compte des facteurs qui ont conduit à la dégradation des sols et être adaptée aux contextes socioéconomiques et environnementaux locaux. Ainsi, la mise en valeur des terres dégradées nécessite une approche intégrée et participative dans le cadre d'un partenariat multi-institutionnelle et pluridisciplinaire.



Programmes nationaux de recherche relatifs à la fertilité et à la fertilisation des sols

Mustapha MISSBAH EL IDRISSE

Ecole Normale Supérieure, Rabat



Mustapha MISSBAH EL IDRISSE est Professeur de l'enseignement supérieur C, a intégré l'université Mohammed Premier en septembre 1990 comme maître-assistant où il a assuré l'enseignement et ses recherches en microbiologie jusqu'à Mai 2012.

Actuellement, il est à l'Ecole Normale Supérieure, Université Mohamed V de Rabat qu'il a rejoint en 2012.

Il a eu son Doctorat de 3^{ème} Cycle en microbiologie industrielle, en 1990 à l'Université Mohamed V, et un Doctorat d'Etat en 1998 sur la fixation symbiotique de l'azote chez quelques légumineuses arborescentes à l'Université Mohamed Premier, Oujda.

Ses activités de recherche portent principalement sur :

- La caractérisation et l'écologie des bactéries nodulant les légumineuses spontanées du Maroc;
- L'utilisation des symbioses fixatrices d'azote pour la lutte contre la désertification;
- L'amélioration de la production agricole dans les milieux arides et semi arides par l'utilisation des symbioses fixatrices d'azote.

Comme principales responsabilités qu'il a assuré.

- Chef d'unité de Microbiologie de 1994 à 2000;
- Directeur du Laboratoire de Microbiologie Appliquée, 2000 – 2005;
- Responsable de l'Option «GESTION» du master Ecologie et Gestion de l'environnement de 2007 à 2011.

- Président de l'Association Africaine pour la Fixation Biologique de l'Azote depuis Novembre 2014;
- Secrétaire Général de l'Association Marocaine de Microbiologie (AMM) depuis 2005;
- Membre de l'Association Internationale IFA : ISEKI FOOD ASSOCIATION depuis Septembre 2008;
- Membre de l'Association marocaine d'Agronomie depuis 2009;
- Il a participé à la conception et réalisation d'une dizaine de Projets de recherche nationaux et internationaux.

Il a participé à l'organisation d'un grand nombre de manifestations scientifiques nationales et internationales (congrès, séminaires, journées scientifiques...etc.) dont le dernier congrès de l'Association Africaine pour la Fixation Biologique de l'Azote (AABNF) en novembre 2014.

Il a à son actif, plus d'une quinzaine de publications indexées et une cinquantaine de communications nationales et internationales.

Résumé

Les biofertilisants sont des préparations ou des substrats contenant des microorganismes qui peuvent être appliqués au niveau de la rhizosphère et/ou sur la plante en substitution aux fertilisants de synthèse. Ils améliorent la santé du sol, diminuent la pollution générée par l'utilisation des produits agrochimiques et n'ont aucun effet néfaste sur la santé humaine et animale.

Les microorganismes qui composent les biofertilisants peuvent avoir la capacité de synthétiser des substances stimulant la croissance de la plante, ou de fixer l'azote atmosphérique, ou de solubiliser le fer et le phosphate inorganique, ils améliorent ainsi la tolérance au stress dû à la sécheresse, à la salinité, ainsi qu'aux métaux lourds et aux excès de pesticides. Ils peuvent avoir la capacité de diminuer ou de prévenir les effets causés par des phytopathogènes. Certains microorganismes peuvent cumuler les deux avantages précités.

La recherche dans ce domaine est relativement bien développée à l'échelle nationale, plusieurs équipes et laboratoires relevant d'établissement universitaires aussi bien qu'appartenant à des institutions de recherche ou d'enseignement supérieur ne relevant pas d'Universités, sont impliquées dans la recherche sur les biofertilisants. Le niveau de compétence est élevé, plusieurs thèses et recherches approfondies sont menées.

Suite à une première analyse non exhaustive, basée principalement sur les publications ainsi que les communications faites dans les derniers congrès tenus au Maroc, nous avons présenté l'état de l'art dans le domaine. En conclusion, la majorité des équipes en sont encore au stade de tests préliminaires en matière de caractérisation des isolats, de production à l'échelle du laboratoire d'inocula pour les différentes expérimentations pionnières et de mener des essais pilotes sur le terrain. Il n'existe pas encore d'unité de production d'inoculum microbien à l'échelle industrielle.

De plus, différentes équipes travaillent sur la même thématique et aucune collaboration à l'échelle nationale n'est promue ni encouragée. Le manque de communication, de réseautage et d'une bonne volonté de coopération freinent les échanges et privent notre pays de récupérer ce manque à gagner en termes de développement de procédés adaptés aux conditions locales et/ou régionales marocaines. Par ailleurs, les opportunités de collaborations internationales, développées surtout avec les pays du nord, n'ont pas eu d'impacts réels et pratiques pour l'amélioration des sols marocains.

La promotion des interactions profitables entre les chercheurs nationaux et avec la communauté scientifique internationale dans le domaine nous permettra de dégager des stratégies et actions pratiques et durables pour le bien de notre pays. La production d'inoculum microbien devrait faire l'objet de projets de partenariat entre les chercheurs universitaires et les entreprises privées.

Les recherches sur la thématique de la biofertilisation doivent être encouragées par les autorités de compétence. Ainsi, les programmes de recherche nationaux et les programmes de coopération internationale devraient en tenir compte. A titre d'exemple, le plan Maroc Vert vise à encourager les cultures des légumineuses. L'inoculation de ces plantes fixatrices d'azote atmosphérique, par les bons rhizobiums compatibles et les bonnes pratiques culturales devraient assurer l'autosuffisance du pays en légumineuses

ACQUIS DE L'INRA EN MATIÈRE DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE POUR L'AMÉLIORATION DE LA PRODUCTION AGRICOLE AU MAROC

*Pr. Mohamed BADRAOUI,
Dr. Rachid DAHAN & Dr. Riad BALAGHI*

**Institut National de la Recherche Agronomique
(Rabat - Maroc)**



La mise en œuvre de la nouvelle stratégie de développement agricole du Maroc, dénommée «**Plan Maroc Vert**», demande un effort d'accompagnement technologique et scientifique des producteurs pour atteindre les objectifs d'amélioration de la productivité et de la compétitivité des principales cultures. Pour répondre à ce besoin, la recherche agronomique doit mettre à la disposition des pouvoirs publics et des producteurs privés les acquis scientifiques et technologiques à même de répondre aux impératifs du développement agricole durable.

Les orientations et objectifs généraux des programmes de recherche agronomique à l'INRA s'articulent autour de cinq volets : i) l'amélioration de la productivité des cultures et de la qualité des produits agricoles, notamment le développement et la valorisation des produits de terroir, ii) la gestion durable des systèmes de production et des ressources naturelles, notamment l'eau, le sol et la biodiversité, iii) l'étude et le suivi de l'impact des changements climatiques sur la production agricole, iv) les études du milieu socio-économique et institutionnel et de l'impact des politiques agricoles et, enfin v) le renforcement des activités de recherche-développement à travers la valorisation des acquis par l'assistance technique, le renforcement des capacités des producteurs et le transfert de technologies.

Notre contribution a pour objectif de présenter les acquis de l'INRA en matière d'amélioration durable de la production agricole au Maroc. Ces acquis s'articulent autour du programme stratégique d'obtentions variétales, pour lequel l'INRA est le leader national, ainsi que d'autres aspects à caractère horizontal tels que la réalisation des cartes de vocation agricole des terres qui ont déjà couvert 5 millions d'hectares dans les zones d'agriculture pluviale, la mise en place d'un système opérationnel marocain de prévision des récoltes des céréales, l'évaluation des impacts des changements climatiques sur l'agriculture marocaine d'ici à la fin du 21^{ème} siècle, la conservation des ressources phyto-génétiques à travers la mise en place d'une banque de gènes disposant de plus de 22 000 accessions, les techniques d'aridoculture et le machinisme agricole.

1. Introduction

L'agriculture occupe une place importante dans l'économie nationale et une position centrale dans le développement du monde rural. Actuellement, elle est confrontée à des défis dus à de nombreux changements internes et externes. Parmi ces défis, figurent la mondialisation de l'économie, les mutations socio-économiques que connaît la société marocaine, les dimensions de la qualité de la vie et la protection de l'environnement et des ressources naturelles couplées au changements climatiques au niveau planétaire et l'enchérissement, jamais connu, de l'énergie. Dans ces conditions, la stratégie de développement agricole doit intégrer les impératifs de l'environnement national et international et les contraintes spécifiques à l'agriculture marocaine.

L'acquisition de la connaissance à travers la recherche scientifique et sa traduction en technologies innovantes se situe à l'amont de la création des richesses des nations. **L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)** est un organisme dont les missions et les attributions sont d'une importance stratégique pour le développement agricole du Maroc (Loi de création 40-80). Dans cette loi de création, l'INRA a, entre-autres, des missions stratégiques visant la conduite de recherches scientifiques, techniques, économiques et sociales, l'élaboration de procédés agroalimentaires et la valorisation des produits, la commercialisation des résultats de recherche, les études et travaux, et la diffusion de l'information et conseils pour vulgarisateurs, agriculteurs et professionnels.

Parmi les axes stratégiques de l'INRA figurent la caractérisation et la conservation des ressources naturelles: eau, sol et agro-biodiversité, la création variétale et l'amélioration des races animales, le développement de paquets technologiques pour une meilleure productivité des filières et la qualité des produits, la valorisation des produits agricoles, les études socioéconomiques et d'impact, et la recherche-développement et le transfert de technologies.

De plus, L'INRA a une **organisation déconcentrée** qui lui permet d'assurer une couverture nationale pour une recherche de proximité à travers ses dix Centres Régionaux de la Recherche Agronomique, des Conseil Régionaux Consultatifs d'Orientation de la Recherche, de 23 Domaines Expérimentaux couvrant les différents agro-éco-systèmes du pays, de 10 Services de Recherche-Développement servant d'interface entre les chercheurs et les partenaires, de 26 Unités de Recherche en charge des activités de recherche, le tout géré au niveau central par la Direction et le Secrétariat Général, l'Inspection Générale, trois Divisions et 11 Départements.

Les organes de gouvernance et de concertation de l'INRA consistent en un Conseil d'Administration, un Comité Technique, un Conseil National d'Orientation de la Recherche, en plus des 10 Conseil Régionaux d'Orientation de la Recherche.

Les acquis de recherches prédisposent l'INRA à assurer un rôle d'accompagnement et de production d'informations et de technologies pour **la mise en œuvre du Plan Maroc Vert** dans ses dimensions régionale et nationale ainsi que pour les projets de développement inscrits dans le cadre des deux piliers de ce plan.

Cette contribution a pour objectif de partager les principaux acquis de recherche sur l'amélioration de la production végétale au Maroc.

2. Acquis de l'INRA en matière de recherche scientifique dans le domaine de la production agricole

A. Caractérisation et conservation des ressources naturelles

1. Les cartes de longueur de la période de croissance

La Longueur de la Période de Croissance (LPC) est définie comme étant la période de l'année durant laquelle les conditions climatiques sont favorables à la croissance et au développement des cultures. Elle se calcule en additionnant les jours durant lesquels l'humidité disponible (somme des précipitations et de la réserve en eau du sol) est supérieure à la moitié de l'évapotranspiration potentielle¹ et durant lesquels la température est supérieure au zéro de croissance². La réserve utile des sols a été estimée à partir de la carte mondiale des sols réalisée par la FAO-Unesco à l'échelle 1:5000000.

Les cartes de LPC délimitent des zones homogènes dans lesquelles les conditions climatiques de pluviométrie et de température sont favorables à un certain nombre de cultures. Des cartes de LPC ont été réalisées pour différents niveaux de probabilité d'occurrence de la LPC afin de tenir compte de la forte variabilité interannuelle de la pluviométrie qui caractérise notre pays. Le zonage peut alors être utilisé comme base méthodologique pour l'évaluation et l'utilisation des ressources en terres. Dans la figure 1 est présentée la carte de la LPC en année moyenne, c'est-à-dire pour une probabilité d'occurrence de la LPC d'une année sur deux, calculée sur la série d'observations de 1971 à 2000. A l'échelles du pays, on remarque que les zones favorables sont concentrées essentiellement dans les parties nord et côtière du pays, selon le gradient d'humidité et de température. On démontre que la LPC est fortement corrélée aux rendements céréaliers au Maroc. Les zones où la LPC est importante sont aussi les zones où l'on peut s'attendre à des rendements céréaliers élevés. On considère, par exemple, que les zones dans lesquelles la LPC moyenne est inférieure à 60 jours sont inaptes à l'agriculture. La LPC sert ainsi de base à la réalisation des cartes de vocation agricole des terres (CVAT).

2. Les Cartes de Vocation Agricole des Terres

Les Cartes de Vocation Agricole des Terres (CVAT) sont des outils d'aide à la décision pour la gestion optimale des ressources naturelles (eau et sol) du pays. En particulier, les CVAT peuvent servir de base pour l'identification des bassins de production, la réalisation des cartes de fertilité des sols et pour l'orientation des politiques publiques d'appui/subventions. La vocation agricole des terres pluviales a été déterminée sur la base de critères climatiques et pédologiques selon la méthodologie standard publiée en 1976 par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Cette méthodologie consiste à établir, pour chaque culture, des classes d'aptitude des terres à l'agriculture selon le double critère climatique et pédologique. Le programme de Cartes de Vocation Agricole des Terres (CVAT) est réalisé par l'INRA depuis 1998. Actuellement, le programme a réalisé près de 5.5 millions d'hectares dans les zones pluviales. Par exemple, d'après ces cartes, la région

¹ Somme de l'eau évaporée par le sol et transpirée par les plantes.

² Le zéro de croissance est la température la plus basse au dessus de laquelle la croissance est positive et en dessous de laquelle la croissance est nulle. Ce zéro de croissance est assez variable selon les espèces végétales. (Par exemple, 0°C pour le blé).

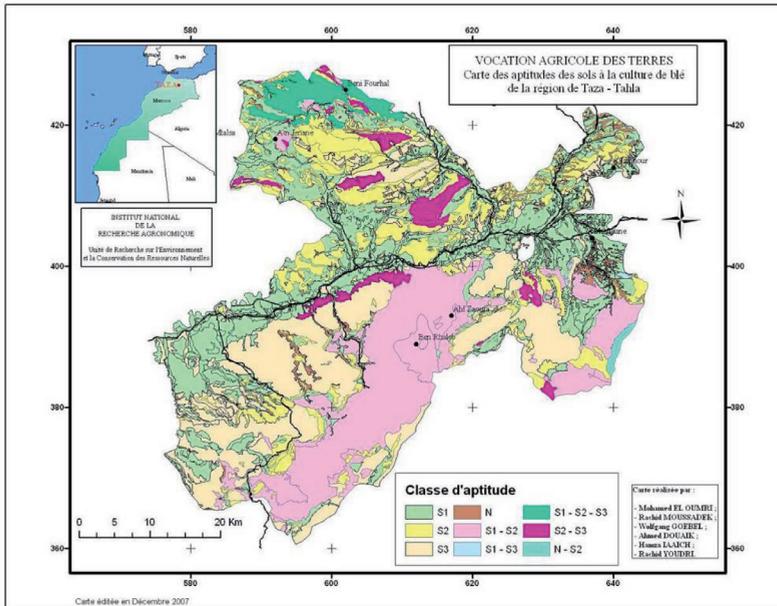


Figure 2 : Carte de vocation agricole pour la région Taza – Tahla. Cette carte présente les classes d’aptitude des sols de cette région à la culture de blé : S1, S2, S3, N et leurs associations.
 Aptitude S1 : Aptitude agricole élevée, S2 : Aptitude agricole moyenne,
 S3 : Aptitude agricole marginale, N : Inapte.

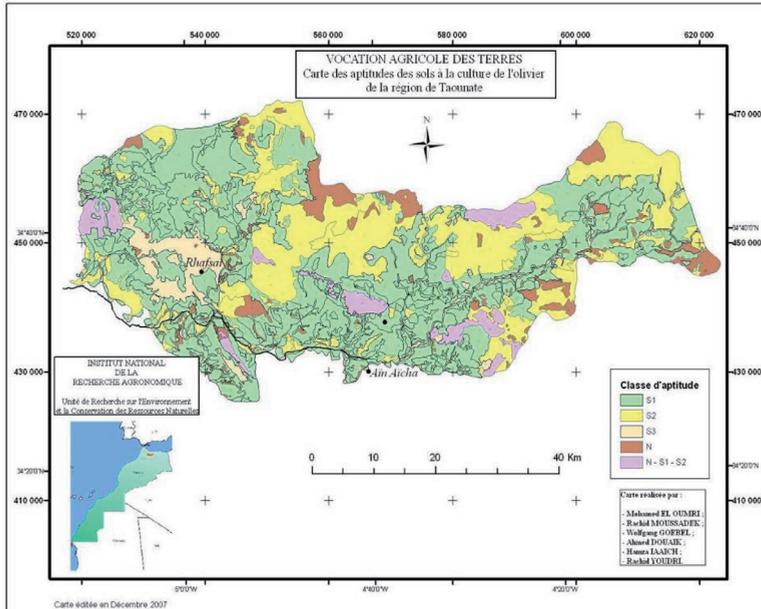


Figure 3 : Carte de vocation agricole pour la région Taounate – Ghafsai. Cette carte présente les classes d’aptitude des sols de cette région à la culture de l’olivier : S1, S2, S3, N et leurs associations.
 Aptitude S1 : Aptitude agricole élevée, S2 : Aptitude agricole moyenne,
 S3 : Aptitude agricole marginale, N : Inapte.

B. La prédiction des rendements agricoles

1. La variabilité de la production agricole

La production agricole dépend essentiellement de la pluviométrie dans notre pays malgré les efforts consentis pour réduire la vulnérabilité de l'agriculture vis-à-vis du climat, notamment par une politique de construction de barrage initiée à la fin des années 60. Les terres agricoles pluviales représentant toujours 85% de la superficie mise en culture, soit 8,2 millions d'hectares. Les rendements de blé demeurent faibles et variables comparativement aux pays du pourtour méditerranéen (figure 4).

Cette variabilité des rendements, et donc de la production, a des répercussions négatives sur la gestion des stocks alimentaires et semenciers en fin de campagne agricole. Disposer d'une information fiable et précoce sur l'état des cultures et sur les rendements attendus est un moyen de planification des importations ou des stocks pour la sécurité alimentaire. La prédiction des rendements permet aussi de disposer d'une source d'information indépendante, complémentaire aux statistiques agricoles classiques. Elle permet aussi de disposer d'un outil de partage de l'information avec différentes administrations et avec les agriculteurs.

2. La gestion du risque climatique et la prédiction des rendements agricoles

Les technologies de production en milieux arides qui ont été développées par l'INRA, depuis le début des années 80, apportent des solutions pour augmenter et stabiliser les rendements. Ces technologies peuvent être diffusées à grande échelle par des actions de vulgarisation et de promotion. Parmi ces technologies, on peut citer les variétés résistantes à la sécheresse, l'irrigation d'appoint, le semis direct et la fertilisation. Récemment, l'INRA a mis l'accent sur le suivi de la sécheresse et la prévision des rendements agricoles afin d'anticiper les situations de crises alimentaire.

L'INRA a innové en montrant qu'il est possible de prédire les rendements céréaliers de façon relativement précise par l'utilisation de l'indice de végétation par différence normalisée *ou* Normalized Difference Vegetation Index (**NDVI**) avec des méthodologies statistiques relativement simples d'utilisation. Le NDVI est un indicateur de la vigueur de la végétation qui est mesuré, à partir des satellites d'observation de la terre, à intervalles de temps réguliers et en tous points du territoire national. Il reflète l'état de divers facteurs environnementaux tels que la pluviométrie, la température, l'évapotranspiration, le bilan en eau des sols, les maladies et parasites. Il est particulièrement adapté au suivi de la végétation dans les zones arides et semi-arides où les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à 600 mm.

Avant fin février, toute prédiction est aléatoire mais s'améliore au fur et à mesure de l'avancement de la campagne agricole. L'erreur de prédiction du rendement décroît, de façon continue, de près de 28% en fin février à 15% en fin avril (figure 5). A la fin du mois d'avril, l'erreur de prédiction du rendement du blé au niveau national est en moyenne inférieure à 2 Qx/ha, variant de 0.05 à 3.7 Qx/ha selon les années. Cette précision est relativement importante si l'on considère la très forte variabilité interannuelle des rendements du blé au Maroc, de l'ordre de 35%, par rapport l'Espagne par exemple où il est de 18% (figure 4).

La précision de la prédiction dépend aussi des zones agro-écologiques. C'est dans les zones favorable et intermédiaire, zones dans lesquelles se concentre la production céréalière, que la prédiction est la meilleure (figure 7). La prédiction du rendement céréalier national à partir du NDVI a été testée sur deux années consécutives, 2007 et 2008. En 2007, l'écart entre le rendement prédit et le rendement obtenu par les statistiques officielles a été inférieur à 0.5 quintal/ha pour le blé dur et l'orge et de 1.4 quintal/ha pour le blé tendre. En 2008, cet écart a été pratiquement nul pour le blé tendre, de 1.5 quintal/ha pour le blé dur et de 2.4 quintaux/ha pour l'orge.

Il a été également montré qu'il est possible de réaliser de meilleures prédictions par l'utilisation de plusieurs modèles concomitants faisant intervenir des prédictions à partir de NDVI et de facteurs climatiques. Le suivi de l'état de la campagne agricole ou la réalisation de prédictions des rendements agricoles, de façon opérationnelle, nécessite divers sources de données qui peuvent être apportées par la collaboration inter-institutionnelle. Par exemple, la collaboration entre l'INRA et le centre commun de recherche de l'Union Européenne (Joint Research Center : JRC), a permis de réaliser le premier bulletin agro-météorologique de suivi de la campagne agricole 2008-2009.

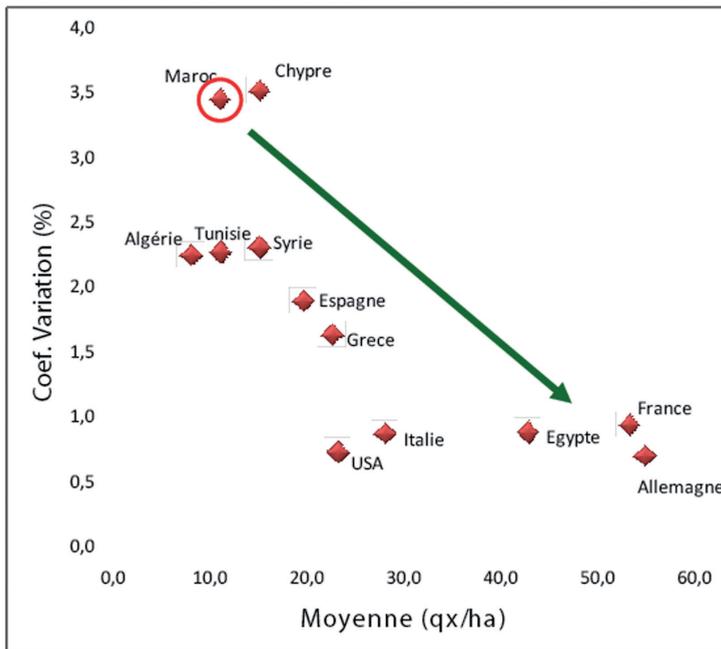


Figure 4 : Rendement moyen et coefficient de variation du blé dans quelques pays du pourtour méditerranéen et dans le monde, de 1961 à 2007 (source de données : FAOSTAT).

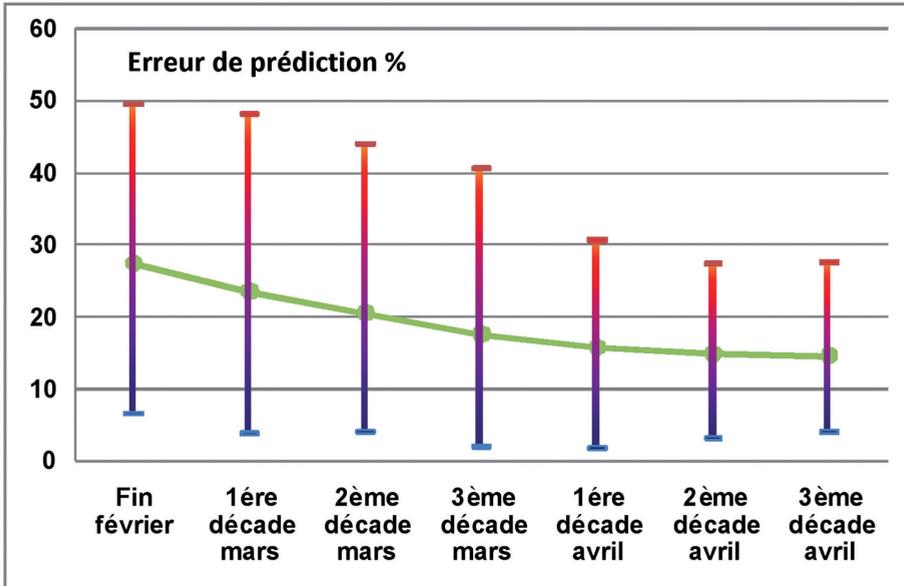


Figure 5 : Réduction de l'erreur de prédiction du rendement national du blé tendre à partir du NDVI au cours de la saison agricole.

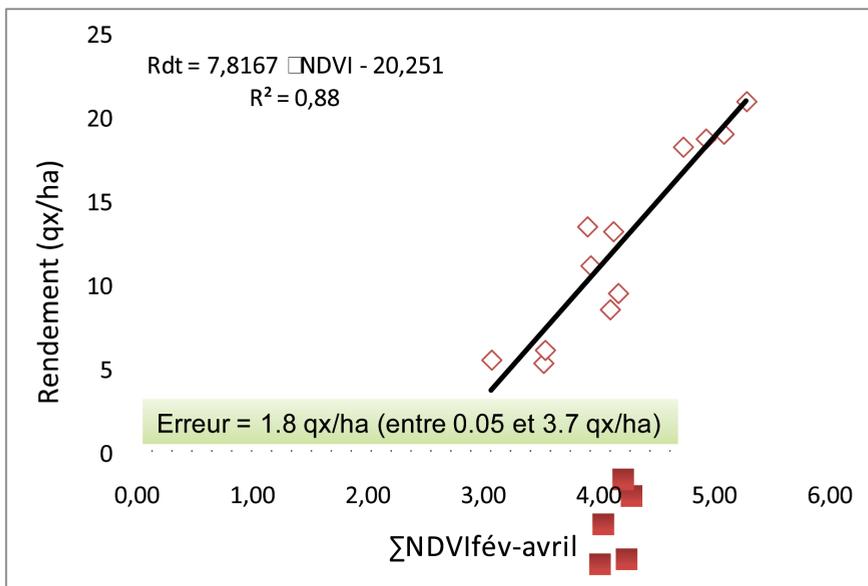


Figure 6 : Prédiction du rendement du blé tendre au niveau national à partir du NDVI cumulé de février à avril.

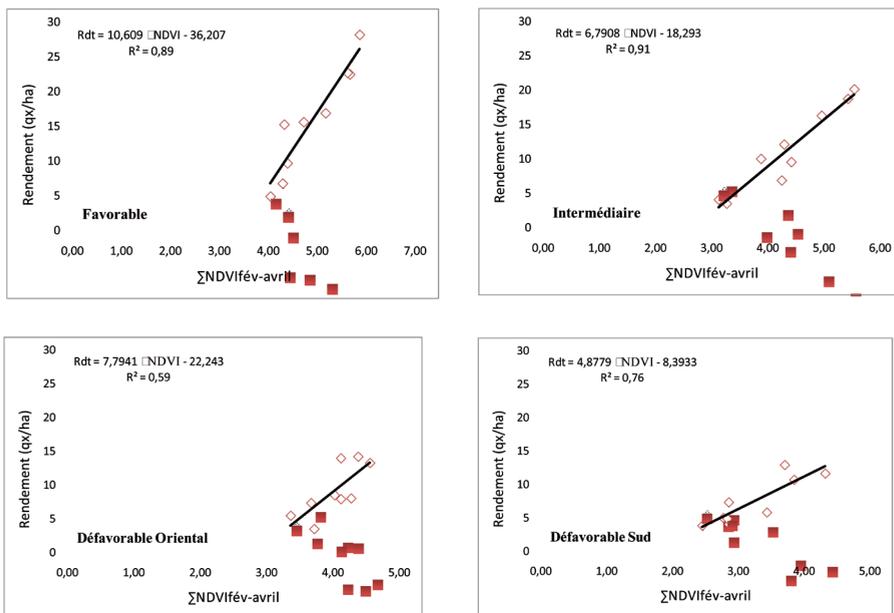


Figure 7 : Modèles de prévision du rendement du blé tendre pour quatre zones agro-écologiques à partir du NDVI (SPOT-VEGETATION) décadaire cumulé de février à avril.

C. Impact des changements climatiques sur l'agriculture marocaine

1. Les futurs possibles

Toutes les projections climatiques convergent vers l'avènement d'un climat plus chaud et plus aride dans la région méditerranéenne. Les projections sont calculées par les climatologues à partir de modèles atmosphériques qui transforment des hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre (notamment le CO₂) en projections climatiques. Les modèles sont en fait des représentations simplifiées et manipulables de l'atmosphère terrestre qui tournent sur de super ordinateurs produisant des informations à l'échelle planétaire, sur des mailles atmosphériques de l'ordre de 250 km de côté. Les projections climatiques se basent sur des représentations de ce que pourrait être le monde à l'horizon 2100. Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) a appelé *scénarios* ces représentations du futur, qui conduisent chacun à des trajectoires d'émissions mondiales de gaz à effet de serre très différentes. Cependant, il faut bien comprendre que les scénarios ne sont ni des prédictions ni des prévisions, mais ne sont qu'une partie plausible des futurs possibles.

2. Traduire les changements climatiques en impacts sur l'agriculture

L'INRA a entrepris, en collaboration avec des institutions nationales et internationales, des études prospectives originales pour quantifier les impacts des changements climatiques sur notre agriculture d'ici à la fin du 21^{ème} siècle. L'objectif de ces études est de déterminer les options techniques d'adaptation de notre agriculture pour faire face aux changements climatiques, de manière à ce que notre pays soit prémuni contre les situations éventuelles de crise. Les projections climatiques établies par le GIEC, sur des mailles de 250 x 250 km² au

niveau planétaire, ont été ramenées à une échelle spatiale assez fine (de l'ordre de la centaine de km²³) qui puisse être compatible avec la superficie du pays. Ensuite, les projections spatiales ont été traduites en projections de rendements agricoles et en impacts sur l'aptitude des terres à l'agriculture.

2.1. Impacts sur les rendements agricoles

Afin de déterminer l'impact des changements climatiques sur les rendements agricoles, une cinquantaine de cultures pluviales et irriguées ont été considérées, dans les six zones agro-écologiques du Maroc, pour deux scénarios climatiques A2 et B2 et à quatre horizons de temps : 2000 (période actuelle, couvrant de 1979 à 2006), 2030 (de 2011 à 2040), 2050 (de 2041 à 2070) et 2080 (de 2071 à 2099). La méthodologie a consisté à développer, pour chaque culture et pour chacune des zones agro-écologiques, **une fonction de rendement** qui est, en fait, un modèle agro-climatique qui lie empiriquement les rendements agricoles au bilan hydrique préalablement spatialisé sur l'ensemble du pays. Le progrès technologique moyen observé au niveau de chacune des zones agro-écologiques ainsi que l'effet fertilisant du CO₂ atmosphérique sur les cultures ont été tous deux pris en compte dans les fonctions de rendement. Finalement, les rendements futurs sont obtenus en appliquant les conditions climatiques futures (modèle HadCM3 et deux scénarios d'émissions A2 et B2) aux fonctions de rendement ainsi établies.

<i>Scénario A2</i>	<i>Scénario A1B</i>	<i>Scénario B2</i>
Il s'agit d'un scénario pessimiste qui décrit un monde où la population mondiale est en rapide augmentation, avec une croissance économique forte qui repose sur des technologies polluantes dans un monde devenu plus protectionniste avec des inégalités croissantes entre le Nord et le Sud. Recours persistant aux énergies fossiles, croissance économique inégale selon les régions.	Il s'agit d'un scénario intermédiaire qui prévoit une intensification des échanges internationaux avec une croissance rapide basée sur les nouvelles technologies ainsi que les autres formes de technologies. Le scénario A1B est plus favorable que le scénario A2 à partir de 2050. Les émissions de CO ₂ sont stabilisées à partir de 2100.	Il s'agit d'un scénario optimiste qui décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales, dans un sens de viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2. Il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse.

³ Ceci correspond à des mailles de 10 km de côté.

2.2. Impacts sur l'aptitude des terres à l'agriculture en zones pluviales

L'aptitude des terres à l'agriculture en zones pluviales a été déterminée sur la base de critères climatiques et pédologiques selon la méthodologie standard de la FAO qui a été publiée en 1976. Cette méthodologie permet d'évaluer les potentialités et les limites des ressources en terres pour le développement agricole. Elle consiste à établir, pour chaque espèce, des classes d'aptitude des terres à l'agriculture selon le double critère climatique et pédologique, partant de l'hypothèse que l'aptitude des terres devrait être modifiée sous l'effet des changements climatiques.

L'aptitude des terres a été déterminée, selon le critère climatique sur la base du calcul de la longueur de la période de croissance (LPC). La LPC est définie comme étant la période de l'année durant laquelle les conditions climatiques sont favorables à la croissance et au développement des plantes. Cette période se calcule en additionnant les jours pendant lesquels les précipitations sont supérieures à la moitié de l'évapotranspiration potentielle⁴ (ETP) et pendant lesquelles la température reste supérieure au zéro de croissance⁵. La LPC a été calculée, sur l'ensemble du pays, en spatialisant les données de pluviométrie et d'ETP mesurées au niveau de 22 stations synoptiques marocaines représentatives de l'hétérogénéité géographique du territoire (figure 9). Trois stations algériennes et une station mauritanienne ont été ajoutées au réseau marocain pour améliorer l'interpolation spatiale aux frontières

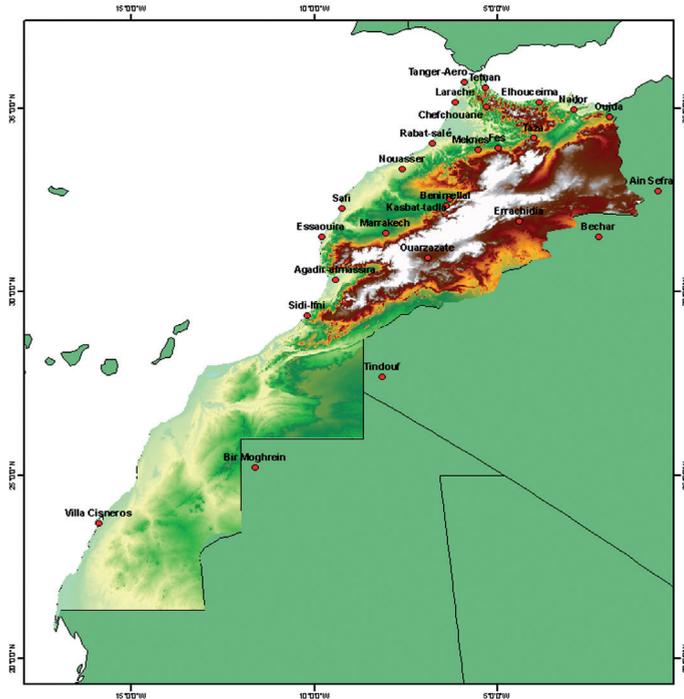


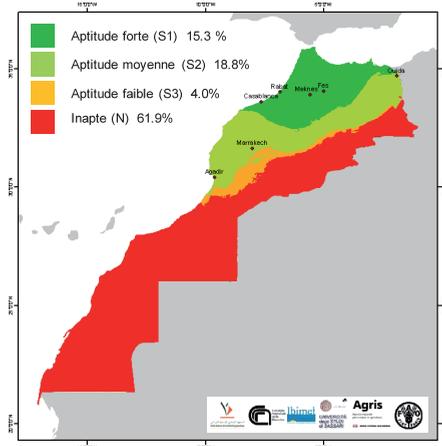
Figure 9 : Répartition territoriale des stations climatiques utilisées sur fond topographique.

⁴ Somme de l'eau évaporée par le sol et transpirée par les plantes.

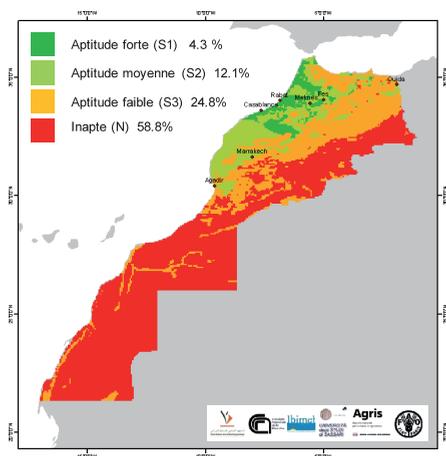
⁵ Le zéro de croissance est la température la plus basse au dessus de laquelle la croissance est positive et en dessous de laquelle la croissance est nulle. Ce zéro de croissance est assez variable selon les espèces végétales. (Par exemple, 0°C pour le blé).

L'aptitude des terres selon le critère pédologique a été déterminée par la classification des sols selon la méthodologie établie par le Service de conservation des sols du Département de l'Agriculture des Etats-Unis - USDA. La carte FAO-Unesco à l'échelle 1:25 000 000 a servi comme base pour délimiter les unités de sol. Dans le système de l'USDA, les unités cartographiques des terres sont groupées principalement d'après leur capacité à produire des cultures courantes et des plantes fourragères sur une longue période de temps, sans pour autant causer la détérioration du sol.

Selon le critère climatique, le pourcentage de la superficie nationale qui est apte à la culture de blé est de 34.1%, alors que les classes d'aptitude faible ou les classes inaptes représentent 66% du territoire national (figure 10a). Par contre, selon le critère pédoclimatique, les superficies qui ont une aptitude forte ou moyenne ne représentent que 16.4% (figure 10b).



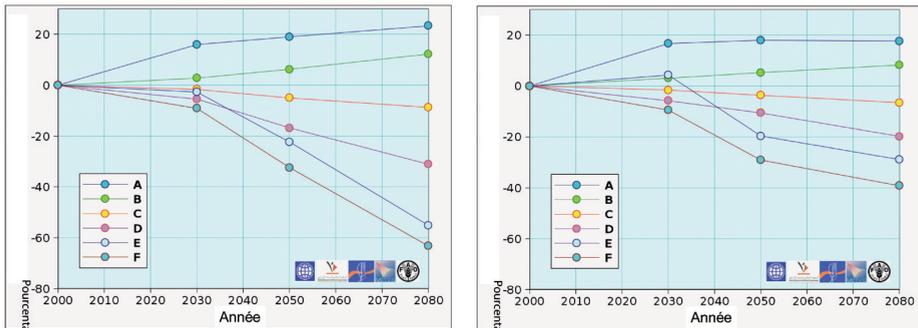
Figures 10 : Cartes d'aptitude des terres à la culture de blé au Maroc pour la période actuelle (moyenne 1973-2006) selon les critères : climatique.



Figures 10 : pédoclimatique (10b à droite). La superficie occupée par chacune des classes d'aptitude est indiquée en pourcentage de la superficie nationale.

2.3. Les impacts des changements climatiques sur les productions agricoles

Les projections climatiques sur le Maroc indiquent que l'aridité va progressivement augmenter en raison de la diminution de la pluviométrie et de l'augmentation de la température. Il faut garder à l'esprit que les modèles climatiques prédisent mieux les moyennes que les valeurs extrêmes. Cela veut dire que, si en moyenne l'aridité va augmenter, certaines années peuvent être sporadiquement très pluvieuses. L'augmentation de l'aridité va donc avoir des répercussions négatives sur les rendements agricoles surtout à partir de 2030. Toutes les cultures ne seront pas aussi vulnérables aux changements climatiques. Dans les figures 11a et 11b, on peut remarquer que les cultures pluviales (non irriguées) seront particulièrement affectées par les changements climatiques. Dans une optique où l'eau d'irrigation continuera à être disponible en quantités suffisantes, les cultures irriguées continueront à voir leurs rendements augmenter malgré les changements climatiques. On suppose que l'augmentation de température, couplée à une irrigation qui assure les besoins des cultures, accélérera la croissance des plantes cultivées et donc augmentera les récoltes. Cependant, la disponibilité en eau d'irrigation, même en cas d'augmentation de l'aridité du climat marocain, est une hypothèse qui reste encore à vérifier. De manière générale, les rendements agricoles resteront plus ou moins stables jusqu'à l'horizon 2030, puis baisseront assez rapidement au-delà de cette date, de façon plus marquée dans le cas du scénario A2 (figure 11a) que dans celui du scénario B2 (figure 11b). Toutes les zones agro-écologiques ne seront pas affectées de la même manière par les changements climatiques. Les zones agro-écologiques favorables et intermédiaires seront les plus vulnérables aux changements climatiques.



Figures 11a (gauche) et 11b (droite): Pourcentage de réduction des rendements agricoles selon les scénarios A2 et B2, jusqu'à l'horizon 2100 (L'adaptation par le progrès technologique actuel n'est pas prise en compte ici). Les cultures sont rassemblées en «groupes d'impact» A à F qui peuvent être caractérisés comme suit : A: *Légumineuses irriguées et fourrages*; B: *Arboriculture fruitière irriguée et cultures légumières*; C: *Fourrages et cultures légumières*; D: *Céréales pluviales et légumineuses*; E: *Céréales d'automne pluviales*; F: *Autres cultures pluviales*.

3. Les impacts des changements climatiques sur l'aptitude des terres à l'agriculture en zones pluviales

Les terres les plus vulnérables perdront leur vocation à être cultivées en raison des changements climatiques (figure 12). Ce sont les terres les plus arides, principalement au sud et à l'est, qui seront le plus touchées et la zone orientale devient presque entièrement inapte à la culture de blé. Les zones les plus épargnées sont celles situées au nord du pays où la pluviométrie est relativement élevée. Selon le scénario A1B, la superficie des terres qui ont une aptitude

forte ou moyenne à la culture de blé passeront de 16.4% du territoire national, actuellement, à 14.1% en 2050 et 10.5% en 2100. Par contre, les terres à aptitude faible ou inaptes à la culture de blé qui occupent actuellement 83.6% de la superficie du pays, ne représenteront que 85.9% en 2050 et 96.5% en 2100.

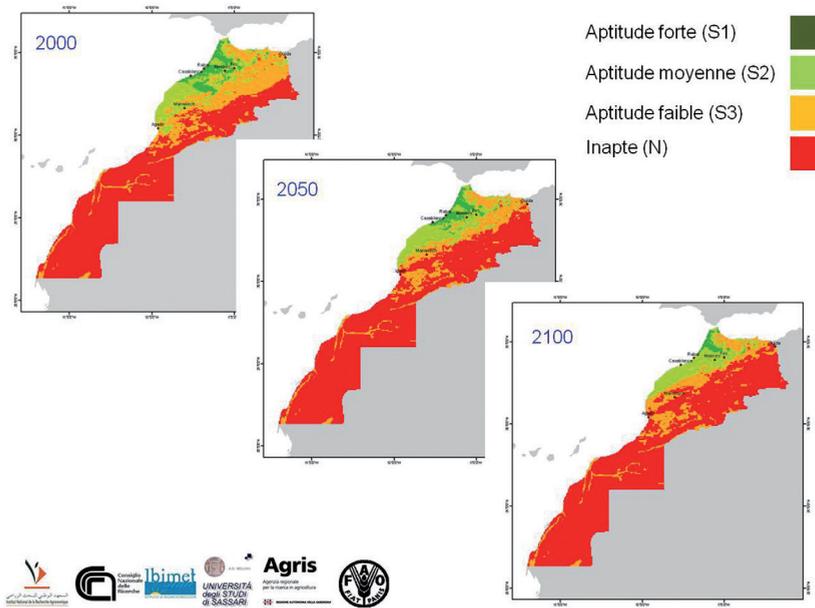


Figure 12 : Impact des changements climatiques sur la vocation agricole des terres. Agriculture pluviale, scénario A1B.

4. Les impacts atténués par le progrès technologique

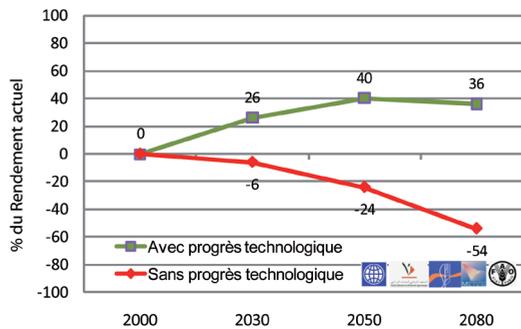
Lorsque l'on étudie la progression des rendements agricoles avec les changements climatiques, mais en tenant compte du progrès technologique réalisé dans notre pays, on se rend compte que les impacts négatifs sont moindres. Le progrès technologique est pris ici dans son sens le plus large, comprenant l'amélioration génétique des plantes cultivées, l'utilisation des fertilisants et pesticides et les techniques de labour. C'est la progression moyenne des rendements des cultures reportés dans les statistiques agricoles de 1979 à 2006. Par exemple, le progrès technologique, que l'on a observé sur les 25 dernières années au Maroc dans les statistiques agricoles, a été en moyenne de 0.2 quintal/ha.an au niveau national aussi bien pour le blé tendre que pour le blé dur. En particulier, ce progrès est le fruit d'un effort important fourni par l'INRA pour créer des variétés, productives et résistantes à la sécheresse et aux maladies, en dépit des aléas climatiques caractéristiques de notre pays.

En stations expérimentales, le gain de rendement peut aller jusque 0.5 quintal/ha.an pour les nouvelles variétés de blé tendre de l'INRA. Dans la figure 13, on peut voir les impacts des changements climatiques sans progrès technologique en rouge et avec progrès technologique en vert pour le blé dur non irrigué au niveau national. Dans le scénario A2, sans progrès

technologique, le rendement du blé dur irait toujours en diminuant alors que l'impact peut être atténué en partie par le progrès technologique, tout au moins jusqu'en 2050 (Figure 13). Dans le scénario B2 plus favorable, le progrès technologique peut atténuer l'impact des changements climatiques même jusqu'en 2100. Pour l'orge par exemple, le progrès technologique a été nul du fait que cette culture a été reléguée vers les zones agricoles marginales affectant ainsi négativement son rendement.

Le gap entre la ligne en vert (avec progrès technologique) et en rouge (sans progrès technologique), montre de notre agriculture aux changements climatiques futurs. Il montre les efforts déployés par la recherche marocaine dans le domaine de l'agriculture en milieux arides à partir du début des années 80. Le progrès technologique le plus spectaculaire se retrouve, par exemple, pour la tomate, la luzerne, la banane, la pomme de terre ou les fourrages. On remarque que les impacts des changements climatiques sont moins importants sur les cultures irriguées et celles pour lesquelles d'importants progrès technologiques ont été réalisés. L'exemple des impacts des changements climatiques sur les rendements de quelques cultures significatives, dans la zone agro-écologique favorable et selon le scénario A2, est donné en figure 14.

Impacts modérés jusqu'en 2030, et sévères au-delà (scénario A2)



Impacts modérés jusqu'en 2030, maîtrisés au-delà (scénario B2)

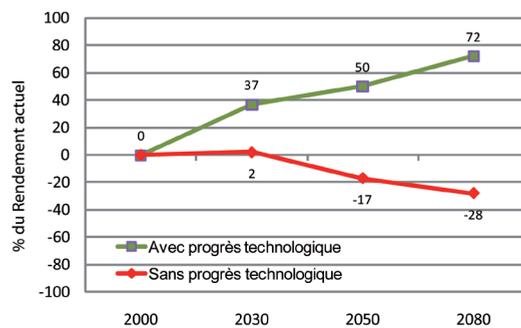


Figure 13 : Impacts des changements climatiques sur le rendement du blé dur pluvial au Maroc.

13a (gauche) : impacts modérés jusqu'en 2030 et sévères au-delà, selon le scénario A2;

13b (droite) impacts modérés jusqu'en 2030, et maîtrisés au-delà.

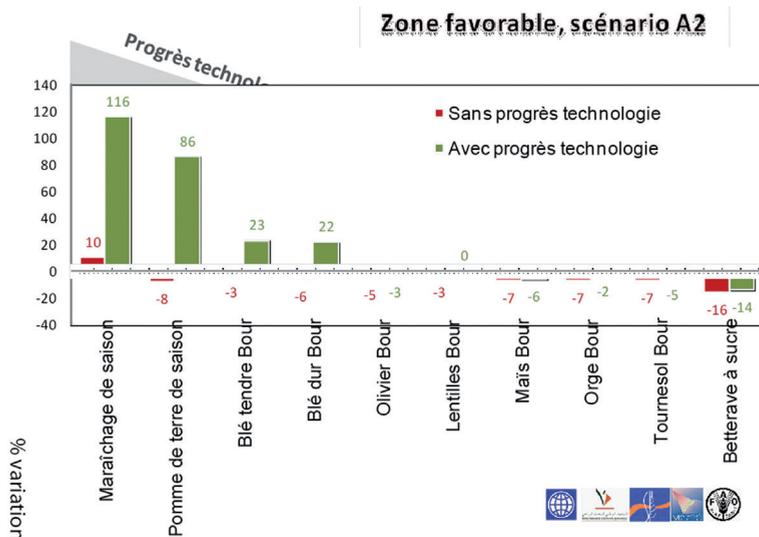


Figure 14 : Impact des changements climatiques en fonction du progrès technologique réalisé sur les cultures, dans la zone agro-écologique Favorable, selon le scénario A2.

5. Les incertitudes concernant les impacts

Les modèles physiques sur lesquels reposent les projections climatiques prévoient mieux les valeurs moyennes de pluie et de température que leurs extrêmes. Il en découle, que les impacts prévus dans le futur représentent des moyennes de valeurs qui peuvent parfois fluctuer fortement d'une année à l'autre. Les prévisions de rendements diffèrent très peu entre les scénarios A2 et B2 jusqu'en 2030⁶. Au delà de cette date, et jusqu'en 2100, des divergences énormes existent entre les scénarios en raison des incertitudes liées aux quantités de gaz à effet de serre qui seront réellement émises dans l'atmosphère, de la dynamique⁷ du secteur agricole, et de la capacité d'adaptation de l'agriculture marocaine. Pour cette raison, les estimations d'impact sont fiables jusqu'en 2030 et vraisemblables au-delà.

Cependant, l'amplitude des changements climatiques attendus à long terme est telle qu'un renversement de tendance est peu probable. Ces prévisions d'impact sur les productions agricoles sont largement tributaires des modèles climatiques développés par les climatologues et ne sont valables que pour les conditions actuelles de l'agriculture marocaine. En d'autres termes, des altérations des systèmes de production actuels tels que la gestion de l'eau, l'affectation des terres, l'amélioration variétale, les cultures existantes ou l'adaptation des agriculteurs aux changements climatiques peuvent modifier les prévisions d'impact. Il faut bien comprendre que l'on essaye de mettre sous forme d'équations mathématiques des relations complexes entre les rendements agricoles et des scénarios futurs. Les incertitudes liées aux projections d'impacts sont principalement dues à notre difficulté à imaginer le monde de demain, aux imperfections des modèles climatiques, aux techniques de réduction d'échelle ainsi qu'aux erreurs statistiques inhérentes aux données d'entrée utilisées.

⁶ Assez logiquement, les différences entre scénarios sont plus faibles pour les cultures irriguées que pour les cultures pluviales.

⁷ Nous incluons dans ce terme les diverses tendances actuellement observées au Maroc, qui répondent à des logiques économiques, environnementales etc.

6. Conclusion

Les estimations d'impact des changements climatiques sur les productions agricoles sont plausibles sur les 20 prochaines années. Pour le futur plus lointain, l'amplitude des changements climatiques prévus est telle qu'un renversement des tendances est peu probable. Il ressort de cette étude que le progrès technologique (amélioration des rendements agricoles en conditions arides et semi-arides), l'irrigation (gestion de l'eau au niveau de la parcelle agricole, du bassin versant et de la région) et l'utilisation des terres selon leur vocation agricole sont des leviers importants d'adaptation aux changements climatiques.

La mise en commun des efforts et de l'expertise d'institutions nationales (MAPM, INRA et DMN) et internationales (BM et FAO) a permis de lever des difficultés opérationnelles et méthodologiques et, surtout, d'assurer un «contrôle de qualité» dans toutes les phases d'analyse de cette étude. Il est important de savoir que plus de 68790 données ont été générées durant l'analyse des impacts, soit presque un «travail d'usine». Pour terminer, on peut dire que les résultats trouvés peuvent trouver des applications pratiques immédiates, dans les processus de prise de décision en agriculture, et ajoutent une composante prospective aux politiques de développement agricole et de sécurité alimentaire au Maroc.

D. Conservation des ressources phyto-génétiques

1. La banque de gènes du Maroc

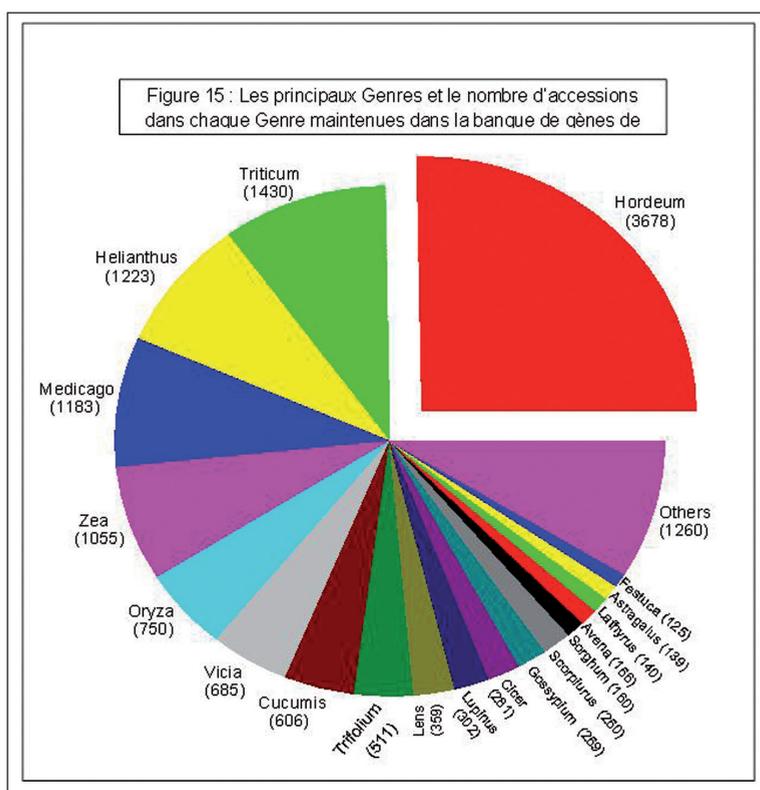
Le Maroc est l'un des pays les plus riches en biodiversité à l'échelle méditerranéenne. En effet, la flore vasculaire marocaine compte environ 4500 espèces réparties sur 930 genres et 130 familles. Les connaissances actuellement disponibles permettent d'affirmer que 1641 taxa sont rares ou menacés dont plus des deux tiers sont très rares. Le nombre total d'espèces endémiques est de 1350 taxa dont environ deux tiers spécifiques au Maroc. Dans la flore marocaine, 407 taxa renferment toutes les plantes à usage alimentaire, médicinal ou aromatique, pastoral, ornemental et industriel et les parents ou voisins sauvages de formes cultivées. Cependant, cette biodiversité subit diverses pressions naturelles ou humaines (surexploitation des ressources naturelles, déforestation, surpâturage, urbanisation, sécheresse, pollution) favorisant son appauvrissement et la disparition d'espèces et de variétés.

Conscient du problème de l'érosion phyto-génétique et afin de protéger le patrimoine génétique national et d'assurer son utilisation durable, l'INRA a opté pour la création d'une banque de gènes centrale pour fédérer toutes les activités et organiser la conservation *ex situ*. Cette banque présente une capacité de 65.000 accessions, dépassant les besoins du pays, et peut assurer ceux de la région. Les collections maintenues, jusqu'à présent, regroupent 23000 accessions réparties en 87 genres et des centaines d'espèces (figure 15).

Les objectifs de la banque de gènes est de procéder à la multiplication et à la régénération au champ de différentes espèces annuelles et pérennes, à l'évaluation et à la caractérisation du matériel conservé ou à conserver, au rapatriement des espèces marocaines détenues par les organismes et institutions internationales, et à la collecte de nouvelles accessions de différentes espèces d'intérêt agricole.

2. Parcs à bois

L'INRA maintient différents parcs à bois (conservation in situ) dans ses domaines expérimentaux. Actuellement, environ 6500 clones de différentes espèces d'agrumes, d'amandier, de figuier, d'olivier, de palmier dattier, de caroubier, de cactus... sont maintenus, respectivement, à ElMenzeh, Ain Taoujdade, Tassaout, Zagora et Agadir. L'objectif à long terme de ces collections est la conservation et l'utilisation des ressources phyto-génétiques de ces espèces. Les objectifs à court et à moyen terme visent principalement le soutien des programmes nationaux d'amélioration pour le développement de variétés adaptées aux différentes conditions, l'échange de l'information et du matériel génétique à travers l'exploration, l'introduction, la gestion des données et le développement de germoplasme de différentes espèces, la collecte des espèces, la préparation, le conditionnement, la distribution, le stockage, la régénération, et l'actualisation des données passeports, et la création d'une base de données informatisée caractérisant les espèces conservées.



E. Création variétale

L'Institut National de la Recherche Agronomique entreprend des programmes d'amélioration génétique sur plusieurs espèces depuis le début du 20^{ème} siècle. La recherche variétale, étant située à l'amont des filières de production, est tenue de répondre aux exigences des différents intervenants, sur toute la chaîne de production, qui sont traduites en termes de critères de sélection variétale. Les variétés actuellement disponibles ont certainement répondu aux

attentes du planificateur, de l'agriculteur et de l'utilisateur du point de vue productivité, qualité et rentabilité. Les travaux d'amélioration génétique continuent toujours dans le but de hisser les espèces cultivées au rang de standards internationaux tout en assurant une adaptation optimale aux conditions écologiques et socioculturelles marocaines.

Les variétés modernes sont de loin plus productives, plus adaptées et plus stables que celles connues au début de l'indépendance. Ainsi, des caractéristiques importantes ont été introduites par étape :

- L'adaptation agronomique (durée du cycle, la hauteur des plants et résistance à la verse dans le cas des céréales, la précocité pour échapper aux stress de fin de cycle, potentiel de productivité).
- L'amélioration de la qualité technologique, surtout pour le pain et les semoules pour les céréales, la qualité et la teneur en huile pour l'olivier.
- La tolérance au stress abiotiques (sécheresse et hautes températures) ont été progressivement améliorées.
- La résistance aux maladies et insectes ravageurs tels que la rouille brune et les pourritures racinaires et la résistance à la cécidomyie chez les céréales a été identifiée et incorporée dans des variétés adaptées au Maroc. La résistance à la cécidomyie pourra assurer une production importantes en années de sécheresse et sous forte infestation lorsque les autres variétés ne produiraient pas du tout.

1. Variétés des céréales

Pour les céréales, les travaux d'amélioration génétique à l'INRA ont abouti à la création d'une large gamme de variétés productives, adaptées aux différentes zones agro-écologiques et résistantes aux principales maladies et ravageurs. Les tableaux 1, 2 et 3 résument, respectivement, les variétés de blé tendre, de blé dur et d'orge développées par l'INRA depuis 1984 avec leurs principales caractéristiques.

Tableau 1 : Variétés de blé tendre de l'INRA avec leurs principales caractéristiques.

Variété	Aire d'adaptation	Principales caractéristiques	Année inscription
MARCHOUCH	Bour favorable, Semi aride, Montagne	Semi-précoce, bonne qualité pain	1984
SIBARA	Bour favorable	Semi-précoce, bonne qualité pain et couscous	1985
SAIS	Adaptation large	Souple, vigoureuse, bonne qualité biscuit	1985
SABA	Sais	Souple, Semi précoce, bonne qualité pain	1987
KANZ	Bour intermédiaire, semi aride, montagne	Souple, Tolérante à la sécheresse, bonne qualité pain et couscous	1987
ACHTAR	Irrigué, bour favorable, montagne	Souple, Tolérante à la Septoriose, bonne qualité pain et couscous	1988

BARAKA	Bour intermédiaire, semi aride	Souple, Tolérante à la sécheresse, bonne qualité pain et couscous	1988
KHAIR	Adaptation large	Souple, Tolérante à la sécheresse, bonne qualité pain et couscous	1988
SAADA	Abda	Résistante à la cécidomyie, bonne qualité pain	1988
TILILA	Irrigué, bour humide (Nord-ouest), bour favorable, semi aride	Souple, Tolérante à la sécheresse, bonne qualité pain et couscous	1989
MASSIRA	Bour favorable, Bour intermédiaire, semi aride, terre saline	Souple, Tolérante à la cécidomyie, bonne qualité pain et couscous	1992
MEHDIA	Irrigué, bour humide (Nord-ouest), bour favorable, bour intermédiaire	Souple, productive, bonne qualité pain	1993
RAJAE	Bour humide (Nord-ouest), bour favorable, terre saline	Souple, tolérante à la septoriose, bonne qualité pain	1993
AMAL	Adaptation large	Souple, tolérante à la septoriose, bonne qualité pain	1993
POTAM2	Adaptation large	Résistante à la cécidomyie, bonne qualité biscuit	1995
SAIS2	Adaptation large	Résistante à la cécidomyie, bonne qualité biscuit	1995
ARRIHANE	Irrigué, bour humide (Nord-ouest), bour favorable, semi aride	Résistante à la cécidomyie, bonne qualité pain et couscous	1996
AGUILLAL	Bour intermédiaire, semi aride	Résistante à la cécidomyie, bonne qualité pain et couscous	1996

Tableau 2 : Variétés de blé dur de l'INRA avec leurs principales caractéristiques

Variété	Aire d'adaptation	Principales caractéristiques	Année inscription
MARZAK	Large adaptation	Très Productive., Hauteur moyenne, Précocité moyenne, assez bonnes valeurs semoulière et boulangère	1984
KARIM	Large adaptation, irrigué	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité moyenne, bonne valeur boulangère, pâte	1985
MASSA	Large, Bour favorable, Altitude moyenne	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité moyenne, bonnes valeurs semoulière et boulangère	1988
OUM RABIA	Adaptation Large, Semi aride	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonne valeurs semoulière et boulangère	1988

SEBOU	Adaptation Large, Semi aride	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonne valeur semoulière	1987
JAWHAR	Adaptation Large, Irrigué	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonnes valeurs boulangère, semoulière et pâte	1993
ANOUAR	Adaptation Large	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonnes valeurs semoulière et boulangère	1993
YASMINE	Adaptation Large	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonnes valeurs boulangère, semoulière et pâte	1993
AMJAD	Adaptation Large	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonnes valeurs boulangère, semoulière et pâte	1995
TAREK	Adaptation Large	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonnes valeurs boulangère, semoulière et pâte	1995
OURGH	Adaptation Large	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne, bonnes valeurs boulangère, semoulière et pâte	1995
MARJANA	Adaptation Large	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne ; bonnes valeurs boulangère, semoulière et pâte	1996
TOMOUH	Adaptation Large, Nord, Altitude moyenne	Très Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne bonnes valeurs boulangère, semoulière et pâte	1997
IRDEN	Semi aride poussé	Résistante cécidomyie, Hauteur moyenne, Bonne précocité. Bonne valeurs boulangère.	2002
NASSIRA	Semi aride	Résistante cécidomyie, Hauteur moyenne, Bonne précocité. Bonne valeurs boulangère.	2002
CHAOUI	Semi aride poussé	Résistante cécidomyie, Hauteur moyenne, Bonne précocité. Bonne valeurs boulangère.	2003
AMRIA	Semi aride	Résistante cécidomyie, Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne bonnes valeurs boulangère, semoulière.	2003
MAROUANE	Semi aride poussé	Résistante cécidomyie, très Productive, Hauteur moyenne, précocité Moyenne bonnes valeurs boulangère, semoulière.	2003
FARAJ (ICAMMORE)	Adaptation semi aride / favorable	Résistante cécidomyie, Productive, Hauteur moyenne, Précocité Moyenne bonnes valeurs boulangère et semoulière.	2005
IDYN11	Bonne qualité technologique	Productive, bonne couleur et qualité technologique.	2008

Tableau 3 : Variétés d'orge de l'INRA avec leurs principales caractéristiques.

Variété	Aire d'adaptation	Principales caractéristiques	Année inscription
ACSAD 60	Arides et semi arides	2 rangs Précoce, résistante à la rayure réticulée	1984
ACSAD 176	Semi aride	6 rangs Précoce, résistante à la rayure réticulée	1984
ASNI	Semi aride bour favorable et l'irrigué	2 rangs, cycle de 128 jours, résistante à l'oïdium	1984
TAMELALAT	Semi aride	2 rangs, cycle de 118 j, résistantes aux rouilles et oïdium	1984
TISSA	Bour favorable et l'irrigué	2 rangs, cycle de 142 j, résistante à la rouille brune et oïdium	1984
ACSAD 68	Bour favorable semi aride et aride	6 rangs, moyennement tardive	1985
AGLOU	Bour favorable semi aride et aride	2 rangs , cycle de 127 jours, résistante à la rayure réticulée	1988
TIDDAS	Irrigué	6 rangs, cycle de 125 jours, résistante aux rouilles et oïdium	1988
AZILAL	Zones semi arides et arides	cycle de 118 jours, résistante aux rouilles et oïdium	1989
LAANACEUR	Bour favorable semi aride et aride	6 rangs, cycle de 135 jours	1991
TAFFA	Bour favorable semi aride et aride	6 rangs, cycle de 115 jours, résistante à la rouille brune et oïdium	1994
MASSINE	Bour favorable semi aride et aride	6 rangs, moyennement précoce	1994
OUSSAMA	Bour favorable semi aride et aride	6 rangs, moyennement précoce	1995
AMIRA	Bour favorable et semi aride	6 rangs, moyennement précoce, résistante à la rouille brune et oïdium	1996
IGRANE	Bour favorable semi aride et aride	6 rangs, moyennement précoce, résistante à la rouille brune et oïdium	1996
AMALOU	Aride et semi aride	6 rangs, Précoce, résistante à la rouille brune et oïdium	1997
ADRAR	Nord ouest et montagnes	6 rangs, moyennement tardive, résistante à la rouille brune et oïdium	1998
FIRDAWS	Bour favorable semi aride et aride	6 rangs, moyennement précoce, résistante à l'oïdium	1998

Le progrès génétique réalisé en matière de productivité a été substantiel. Pour le blé dur, les progrès réalisés ont permis un gain moyen annuel de productivité de 2.8%. Pour le blé tendre, le progrès génétique réalisé depuis le début du siècle dernier dépasse les 2% par an en moyenne. Depuis le début des années 80 jusqu'à 2007, il a été constant et équivalent à 1,13% par an. Il est représenté par la pente de l'évolution au cours du temps des gains de rendement réalisés par les meilleures variétés nouvelles par rapport à la meilleure variété qui les a précédées.

La part des variétés de l'INRA dans le Catalogue Officiel Marocain dépasse 42% (Figure 16). Aussi, la contribution des variétés de l'INRA à la production des semences certifiées et commercialisées dépasse 76% (Figure 17). Ceci illustre l'impact des variétés de l'INRA dans la production céréalière du pays.

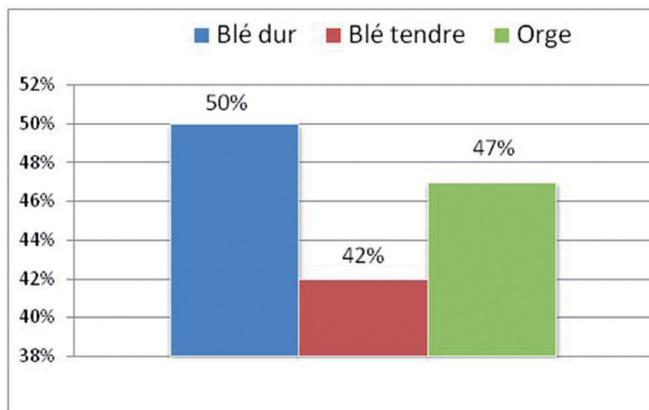


Figure 16 : Part des variétés de l'INRA dans le Catalogue Officiel.

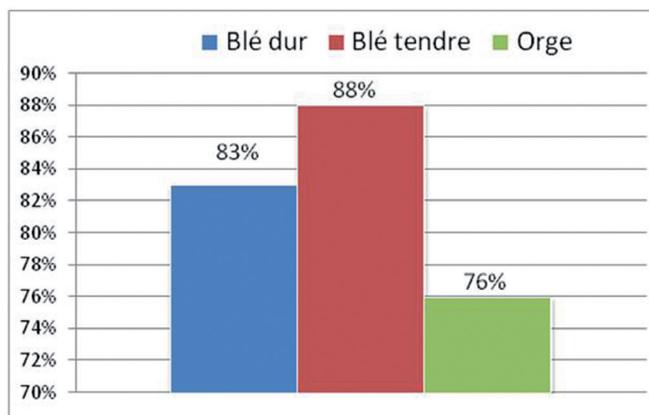


Figure 17 : Contribution des variétés de l'INRA à la production des semences certifiées et commercialisées.

La résistance du blé à la mouche de Hesse : un exemple d'impact sans équivoque

La mouche de Hesse (cécidomyie) cause des dégâts importants à la production des blés dans les zones semi arides (chute de 30 à 100% du rendement) engendrant ainsi une perte annuelle estimée à 200 millions de dirhams.

La création de 4 variétés de blé tendre (Saada, Massira, Aguilal et Arrihane) et 6 variétés de blé dur (Irden, Marwane, Nassira, Amria, Chaoui et Faraj) résistantes à la mouche de Hesse permettent de réaliser des rendements en grain 2 à 3 fois plus élevés en comparaison avec les variétés sensibles. Des calculs économiques ont permis de mettre en évidence un Taux de Rentabilité Interne de 39% pour l'investissement dans une telle recherche.

2. Variétés d'olivier très performantes

Le matériel végétal de l'oliveraie nationale est désormais constitué d'une variété poly-clone, aux caractères très hétérogènes touchant plus particulièrement celui de sa productivité. Une grande proportion d'arbres est en fait dotée d'un faible potentiel de production, ce qui entraîne une stagnation des rendements. En effet, l'analyse de l'évolution de la production oléicole depuis les années de 1970 à 2005 montre une stabilité du rendement autour d'une tonne à l'hectare.

Pour contribuer à améliorer la production oléicole sur les plans quantitatif et qualitatif, l'INRA a conduit et réalisé les travaux d'amélioration génétique qui visent à améliorer les performances productives individuelles des plants d'oliviers en vue de leur diffusion auprès d'exploitations oléicoles de notre pays.

Deux têtes de clones performants au sein de la variété population nationale «Picholine marocaine» ont été sélectionnées sur la base de leurs performances agronomiques et technologiques. Il s'agit des variétés «Haouzia» et «Ménara». Ces variétés se caractérisent par :

- une production moyenne supérieure à 30 Kg /arbre entre 3 et 10 ans d'âge,
- une entrée en production rapide (3^{ème} année après la plantation),
- une alternance réduite de 30% par rapport à la Picholine marocaine,
- une tolérance à la maladie de 'l'oeil de paon' commune au Maroc,
- une teneur importante en huile de 23 à 24% par rapport à la matière fraîche,
- une aptitude technologique à la conservation en olives de table,
- un taux d'acidité inférieur à 0.22%.

Grâce à sa stabilité et sa teneur élevée en acide oléique et en poly-phénols, l'huile de ces variétés a été classée au deuxième rang devant toutes les huiles des variétés de la collection mondiale d'olivier de Cordoue par l'INIA de Jaén (Espagne).

Une nouvelle variété à huile, productive et à plus faible taux d'acidité «INRA ManzPI» est en cours de protection. En outre, de nouvelles variétés naines sont en cours de création pour les vergers à haute densité.

L'impact des deux variétés Haouzia et Menara sur le secteur s'est traduit par leur diffusion à grande échelle par le biais de plus de 50 conventions avec les pépiniéristes multiplicateurs de plants dans différentes régions oléicoles du pays. Par ailleurs, la demande en plants de ces deux variétés est en nette augmentation (Tableau 4). Les chiffres enregistrés au cours de ces quatre dernières années situent la contribution moyenne des deux variétés dans les nouvelles plantations à 50%.

Actuellement, plus de 10 millions de plants certifiés de ces deux variétés ont été produits et diffusés auprès des oléiculteurs.

Tableau 4 : Contribution en quantité et en pourcentage des variétés Haouzia et Menara dans les nouvelles plantations

Années	Nombre de plants diffusés de Haouzia et Menara	Contribution en % dans les nouvelles plantations au niveau national
2005	526 000	30.0
2006	974 000	37.5
2007	1 870 000	50.5
2008	2 500 000	50.0

Source : DPV, Division Horticulture (2008)

3. La création variétale pour la reconstitution de la palmeraie

L'INRA dispose d'un riche patrimoine dattier. En effet, plus de 250 variétés ont été inventoriées. Egalement, plus de 2300 têtes de clones présentant une bonne qualité de production suite à la sélection massale dans toutes les palmeraies ont été sélectionnées. Une dizaine de palmiers mâles pollinisateurs ont aussi fait objet de sélection.

Les travaux de sélection ont abouti à la création de la première variété de palmier dattier résistante au bayoud et de qualité «Najda» et six autres clones résistants au bayoud en cours d'inscription.

Pour la multiplication de ces variétés trois voies de multiplication sont utilisées: organogénèse, embryogénèse somatique et multiplication à partir des inflorescences. Actuellement, et grâce à la production industrielle, des plants pour la reconstitution de la palmeraie en partenariat avec le secteur privé, plus de 420.000 plants dont 120.000 de variété Najda ont été distribués aux agriculteurs.

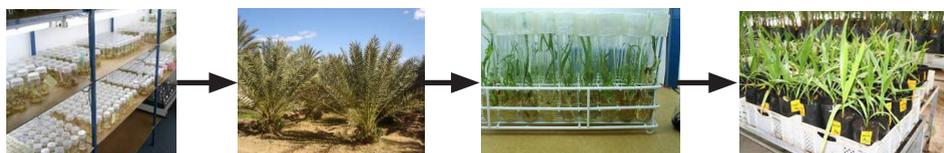


Photo 1 : Multiplication du Palmier par les techniques *in vitro*.

4. La création variétale pour la filière agrumicole

Dans l'objectif de la diversification variétale et clonale en vue d'obtenir des variétés ou clones plus précoces ou plus tardives d'agrumes, l'INRA a mis au point un matériel génétique très performant répondant aux critères précités.

Parmi les variétés développées par l'INRA, il y a lieu de citer :

- Pour le mandarinier : Création de la variété Nadocott, sans pépin, facilement épluchée, à production échelonnée (janvier - mars). Actuellement, une superficie d'environ 17 500 ha, soit 15 millions de plants, est plantée à travers le monde (USA, Espagne, Maroc, Afrique Sud, autres pays hémisphère Sud).
- Egalement, huit nouveaux clones de mandarinier sont en cours d'inscription au Catalogue National. Ces clones sont productifs, précoces et à cycle de production échelonné.
- Pour l'oranger : Cinq nouveaux clones sont en cours d'inscription au Catalogue National, juteux, fruit de calibre d'exportation et à cycle de production échelonné.
- Introduction et adaptation de porte-greffes tolérants à la Tristeza et adaptés aux conditions pédoclimatiques du Maroc : En effet, 40 nouveaux porte-greffes ont été introduits, et sont en évaluation dans les principales régions agrumicoles, pour le remplacement du Bigaradier afin d'éviter le danger de la maladie de la Tristeza.
- Détermination de meilleures combinaisons variétés /porte-greffes pour différentes régions agrumicoles.

F. Techniques d'Aridoculture : Conservation des eaux et des sols

Le milieu aride et semi-aride marocain représente près de 68% des terres agricole. Dans ce milieu, l'eau constitue le facteur majeur limitant la production agricole. Les disponibilités hydriques sont déterminées par une pluviométrie faible et aléatoire, des sols généralement peu profonds à capacité de stockage en eau insuffisante et des températures élevées en fin, et parfois, en début du cycle des cultures. Ceci se traduit par un potentiel de production limité et fortement variable. Les maladies et ravageurs, interviennent aussi pour amplifier le caractère aléatoire des productions agricoles dans ces zones.

La pression sur la terre s'est traduite par le recours, croissant, à la monoculture céréalière, à l'exploitation des terres marginales et au surpâturage des parcours. Il en résulte une exploitation «minière» du milieu concrétisé par une diminution de la productivité et une dégradation des ressources naturelles (sol, végétation, eau), entraînant une fragilisation préoccupante du milieu que les techniques de production actuelles pratiquées ne font qu'aggraver.

L'aridoculture constitue l'ensemble des technologies et des connaissances pour la mise en valeur durable des zones arides et semi-arides. Dans le cas de la conservation des eaux et des sols, des technologies ont été mises au point dans le souci d'augmenter et de stabiliser la production agricole de manière durable, mais aussi d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et des intrants.

En effet, en matière d'économie et d'efficacité d'utilisation de l'eau, l'INRA dispose d'une base de données importante en matière de caractérisation du climat et des sécheresses et de caractérisation agro écologique, de développement d'outils d'aide à la prise de décision en agriculture pluviale (utilisation de l'agro climatologie, les systèmes d'informations géographiques et la télédétection spatiale pour la caractérisation des sécheresses) pour mieux cibler les actions de recherche et de transfert de technologies adaptées aux différents environnements physiques des zones arides et semi-arides.

Des variétés améliorées de blé dur, orge, pois chiche, lentille et cultures fourragères adaptées ont été développées et qui se caractérisent par une plus grande plasticité vis-à-vis des fluctuations environnementales. Ce comportement est le fait de précocités optimales, d'une meilleure tolérance à la sécheresse et d'un bon niveau de résistance aux maladies et insectes ravageurs.

Pour la gestion intégrée des cultures, au niveau des modalités de semis des céréales et des légumineuses alimentaires, il a été démontré que le semis précoce permet des gains de rendements de plus de 40 % par rapport au semis tardif. Les doses de semis préconisées sont de 100 kg/ha pour les blés, 80 kg/ha pour l'orge, 90 kg/ha pour le pois chiche, et 50 à 60 kg/ha pour la lentille. Au niveau de la fertilisation des cultures, l'élaboration des méthodes d'analyse des sols et des normes de fertilisation des céréales et des légumineuses ont permis de mieux raisonner la fertilisation minérale (calibration des analyses du sol). Le recours par les agriculteurs à cette méthode pourrait dégager des économies importantes en éléments fertilisants. Quant au désherbage chimique précoce des céréales et des légumineuses, il permet de réduire le gaspillage d'eau et de favoriser son utilisation par cultures. Une large gamme d'herbicides efficaces pour le contrôle des adventices dicotylédones ou graminées infestant les céréales existe. Les gains de rendement enregistrés peuvent atteindre 20 à 30%.

La lutte intégrée dans le système prédominant blé/légumineuse, dont les acquis ont permis le diagnostic de l'importance des maladies des céréales et légumineuses, le développement de méthode de lutte biologique contre les maladies cryptogamiques des céréales, l'identification de méthode adéquate de surveillance des maladies des céréales et d'estimation des niveaux d'attaque au champ, l'estimation des pertes de rendement dues aux différentes maladies cryptogamique, l'identification des principales maladies virales sur céréales, la contribution dans le développement de matériel génétique résistant aux maladies et insectes des céréales et des légumineuses, la cartographie de l'incidence et de la sévérité des principales maladies des céréales et légumineuses alimentaires, et les méthodes de lutte biologique.

L'irrigation d'appoint consistant en l'apport d'une quantité optimale d'eau au moment le plus opportun pour améliorer et stabiliser les rendements en permettant des économies d'eau, tout en conciliant entre les faibles disponibilités hydriques et le besoin d'un niveau de production sécurisant et peu variable. Elle permet de garantir des gains significatifs de rendement allant de 70 % à plus de 100 % grâce à l'apport d'une à deux irrigations de 60 à 70 mm au stade tallage ou/et au stade épiaison. La valorisation de l'eau se trouve ainsi améliorée.

En matière de gestion conservatoire de l'eau et des sols, le système de semis direct est une alternative incontournable pour les zones arides et semi-arides marocaines. Le semis direct permet des meilleures efficacités d'utilisation de l'eau (augmentation jusqu'à 60%), des économies d'énergie (réduction de la consommation d'énergie jusqu'à 70%) et de temps, améliore le taux de la matière organique (enrichissement de 3 à 14%), et assure des gains de rendement à long terme (de l'ordre de 30 à 40%) (Figure 18).

D'autres acquis de l'INRA dans ce domaine concernent entre autres les techniques de récolte des eaux pluviales dans zones semi arides et arides, le semis en ados comme une technique prometteuse de semis des céréales en irrigué permettant une économie d'eau et d'intrants, l'évaluation de l'impact de l'utilisation des eaux usées en agriculture sur l'écosystème et

la santé humaine, la détermination des normes d'interprétation des analyses de sol pour une meilleure fertilisation des cultures, la pratique de la jachère et la gestion intégrée des ressources naturelles.

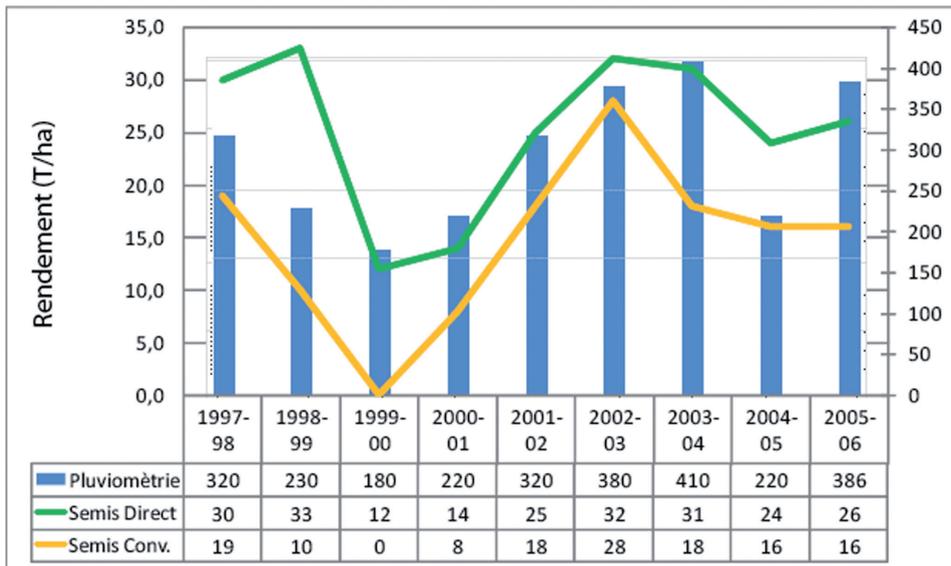


Figure 18 : Rendement du blé sous système semis direct et semis conventionnel en fonction de l'année climatique.

G. Machinisme agricole

L'objectif des recherches en équipement agricole consiste en le développement de machines et d'outils pouvant réaliser les interventions agricoles à temps et à moindre coût. Parmi ces équipements produits par l'INRA, il y a lieu de citer :

- Le sweep, outil à lames et à traction mécanique conçu pour le minimum labour et la lutte contre les mauvaises herbes sans retourner le sol. Un prototype a été développé et breveté;
- Le semoir no-labour, machine combinée à traction mécanique pour le semis direct des céréales et l'épandage d'engrais. Un prototype a été développé et sa commercialisation a été entamée;
- Le semoir mono-grains, machine à traction mécanique pour le semis de précision du maïs et du pois chiche. Un prototype a été développé;
- La bineuse, outil à traction mécanique pour l'entretien des cultures en lignes (maïs, légumineuses, tournesol). Un prototype a été développé;
- La batteuse à poste fixe, machine automotrice pour le battage des céréales après fauchage. Elle est destinée aux petites exploitations et aux zones enclavées (oasis) ou montagneuses. Une dizaine de machines ont été produites et testées à travers le Maroc;

- La faucheuse/andaineuse, machine autotractée pour la récolte et l'andainage;
- Un nouveau pulvérisateur, outil développé pour une utilisation rationnelle des pesticides, une économie d'eau de 50% et de temps de travail de 60% par rapport au pulvérisateur à dos commercial tout en assurant une répartition homogène de la bouillie;
- Petit pulvérisateur roulant (version poussée);
- Petit pulvérisateur roulant automoteur (version automotrice);
- Cellule de mesure optique de la concentration de dose d'un pesticide appliqué par un pulvérisateur agricole;
- Développement de matériel d'application de pesticide pour le désherbage de la ligne ferroviaire de l'ONCF et production de manuel d'utilisation et de réglage.

III. Conclusion

L'INRA est une institution publique leader nationale dans plusieurs domaines de recherche appliquée en agriculture. L'offre de l'INRA en matière de savoir scientifique, d'outils d'aide à la prise de décision en agriculture ainsi que de technologies adaptées aux besoins des agriculteurs est destinée à répondre aux impératifs de sécurité alimentaire du pays et de compétitivité d'un secteur agricole à haute valeur ajoutée. Le **Plan Maroc Vert** est une opportunité et en même temps un défi pour les chercheurs de l'INRA. Grâce à ses acquis, d'une part, et son implantation régionalisée, d'autre part, l'INRA est prête à assurer un rôle d'accompagnement technologique et d'expertise scientifique pour la mise en œuvre des projets du Plan Maroc Vert dans ses dimensions régionales et nationales ainsi que pour développer les projets de développement inscrits dans le cadre des deux piliers de ce plan.

Les exigences du Plan Maroc Vert incitent les chercheurs à continuer les recherches sur :

- la mise à niveau des filières agricoles et l'augmentation de leur compétitivité (productivité, durabilité et valorisation) et le suivi-évaluation des technologies adoptées;
- la caractérisation agro-écologique du milieu et de ses aptitudes agricoles des terres (Cartes de Vocations des Terres);
- la connaissance des ressources naturelles et leur préservation et valorisation durable (sol, eau, biodiversité);
- l'avertissement agricole et les outils d'aide à la prise de décision face aux aléas climatiques;
- les études sur les systèmes de production et le milieu socio-économique et institutionnel;
- l'étude des politiques agricoles et l'analyse de la modélisation de leur impact sur les systèmes de production et les exploitations et les ressources naturelles.

Par ailleurs, sur le plan de la coopération et du partenariat, comme de part le passé, en tant qu'institution ouverte sur son environnement, l'INRA ne ménagera aucun effort pour le renforcement et le développement de partenariats à tous les niveaux: international, national et régional et avec tous les acteurs concernés, notamment les organisations professionnelles. Des partenariats diversifiés sont noués : recherche de base, R&D, renforcement des capacités des ingénieurs, techniciens et jeunes agriculteurs, professionnels, intégration recherche formation.

Conscient du rôle que peuvent jouer les Agropoles et les Agrotechs au niveau régional, et la position stratégique en tant qu'acteur principal fédérateur de la recherche au niveau régional, l'INRA est prédisposé à mettre à profit ses services et ses expertises afin de leur permettre de jouer pleinement leurs rôles dans la valorisation des produits agricoles au bénéfice des acteurs régionaux.

**Académie Hassan II des Sciences et Techniques
Km 4, Avenue Mohammed VI - Rabat.**

Tél : 0537 63 53 77 • Fax : 0537 75 81 71

E-mail : acascitech@academiesciences.ma

Site internet : <http://www.academiesciences.ma>



Royaume du Maroc
Académie Hassan II des Sciences et Techniques

«Restauration de la fertilité des sols : un défi mondial, une nécessité pour le Maroc»

Actes du séminaire organisé à Rabat
le 19 février 2016 à l'occasion de la célébration
du 10^{ème} anniversaire de l'installation
de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

**Edités en hommage à
Feu Pr Mohamed BADRAOUI**

(23 janvier 1955 - 16 avril 2019)
ancien Directeur de l'INRA
(Institut National de la Recherche Agronomique)

