



HAL
open science

Des modèles agronomiques pour comprendre, prévoir, intervenir. Exemples en zones tropicale et méditerranéenne

Rémi Gaudin

► **To cite this version:**

Rémi Gaudin. Des modèles agronomiques pour comprendre, prévoir, intervenir. Exemples en zones tropicale et méditerranéenne. Sciences du Vivant [q-bio]. Université de Montpellier, 2015. tel-02800240

HAL Id: tel-02800240

<https://hal.inrae.fr/tel-02800240v1>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Document présenté pour obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches

ED 60 Territoires, Temps, Sociétés et Développement

Des modèles agronomiques pour comprendre, prévoir, intervenir.

Exemples en zones tropicale et méditerranéenne



Laboratoire de Radio Isotopes, Université de Madagascar



UMR n° 1230 System (SupAgro-INRA-CIRAD), Montpellier



Des modèles agronomiques pour comprendre, prévoir, intervenir.

Exemples en zones tropicale et méditerranéenne

Document présenté par Rémi Gaudin

pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

Soutenance publique le 11 septembre 2015

devant la commission d'examen composée de :

M. Jean Cagnet	Professeur, Université de Paris VI, examineur
M. Jérôme Cortet	Maître de Conférences (HDR), Université Paul-Valéry Montpellier III, examineur
M. Pierre Curmi	Professeur, Agro-Sup Dijon, rapporteur
M. Philippe Hinsinger	Directeur de Recherches, INRA Montpellier, rapporteur
M. Jean-Paul Lhomme	Directeur de Recherches, IRD Montpellier, rapporteur
M. Jean-Pierre Lumaret	Professeur, Université Paul-Valéry Montpellier III, tuteur

*« I don't mind your thinking slowly:
I mind your publishing faster than you can think. »*

Wolfgang Ernst Pauli

Illustrations de la page de couverture :

Partie haute

- Mise en boue d'une rizière (à gauche ; photo auteur)
- Placement semi-mécanisé de supergranules d'urée avec un appareil léger glissant sur le sol (à droite ; photo Hoque)

Partie basse

- Vignoble de Rivesaltes avec le Canigou en arrière-plan (à gauche ; photo V. Coulon)
- Système de mesure du ruissellement comportant une bande en caoutchouc (pour le libre passage des engins) qui délimite la surface de mesure, et une cuve en aluminium (à droite ; photo auteur) hébergeant un double auget basculeur relié à un système de mesure automatique

Remerciements

Ce document est soumis pour l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches (ED 60 Territoires, Temps, Sociétés et Développement). Les parties 1 et 2 développent les travaux réalisés et les perspectives de recherche qui conduisent à proposer quatre sujets de thèse.

Je remercie mon tuteur M. le Professeur Jean-Pierre Lumaret de l'Université Paul-Valéry Montpellier. Il m'a accompagné dans la consolidation de ma réflexion et m'a appris à valoriser des résultats, des rapports de recherche et des publications bien au-delà du support papier des revues. Il a su m'aider à trouver une voie médiane entre les recommandations de mon UMR d'appartenance attachée à développer ses propres programmes et la nécessité de préserver des axes de recherche prometteurs basés sur les acquis très forts en agronomie des milieux inondés (riziculture). La phase de pré-inscription avec rédaction d'un document sous forme de canevas à présenter au Conseil de l'ED 60 et au Conseil Scientifique de l'Université Paul-Valéry Montpellier a été décisive pour la maturation du plan, des résultats et des projets présentés aujourd'hui.

Je remercie MM. Pierre Curmi, Philippe Hinsinger et Jean-Paul Lhomme pour leur travail de rapporteur et MM. Jean Cognet et Jérôme Cortet pour celui d'examineur. J'espère que le temps dédié à cette tâche apportera à chacun des éléments intéressants dans son propre domaine scientifique (ou un peu à sa périphérie), que ce soit l'agronomie générale et les flux hydriques dans le sol, la nutrition minérale des plantes, le bilan hydrique des cultures, la modélisation.

Les travaux présentés couvrent une longue période. J'ai une pensée particulière pour les agents scientifiques et techniques du LRI Tananarive qui ont contribué à permettre mon cheminement scientifique : Samuel Randrianarison (aujourd'hui retraité à la tête d'une entreprise de taxi-brousse), Michel Randrianarison et Jacques Dupuy qui ont rejoint le monde des ancêtres, Lilia Rabeharisoa qui dirige aujourd'hui le LRI avec brio (et qui est invitée à la soutenance), Joël Bézille et Olivier Jourdan. Les collaborations menées à cette époque ont largement reposé sur les épaules de Guido D'Onofrio, Philippe Oriol et Mamisoa Rapanoelina. Ce travail est aussi un peu le leur. J'oublie certainement des noms et je m'en excuse.

A Montpellier, j'ai pu intégrer une équipe dynamique dirigée par Christian Gary. J'ai appris auprès de lui une ténacité dans l'art de la publication, depuis la première soumission jusqu'à l'acceptation. Je n'oublie pas les collègues de SupAgro pour les bons moments de la spécialisation d'ingénieurs Production Végétale Durable ou des formations de licence professionnelle (que d'évolution en dix ans et toujours une bonne ambiance).

Merci aux étudiant(e)s que j'ai eu la chance d'encadrer dans des structures très diverses : depuis le LRI à Tananarive (Jaona Ranaivo, Mamisoa Rapanoelina), l'UMR System à Montpellier (improbable Mario Joao Manuel reconverti du pilotage de Mig au bilan hydrique de la vigne sous tableur ; excellent Victor Coulon de l'école de Purpan) et des structures réparties sur l'ensemble du territoire national (Marion Collet à la Sobac Rodez, Camille

Dulamon à la FD CUMA des Landes, Thomas Daneau chez Terrena Ancenis, Aurélie Cros chez Terraneo Saint-Hyppolite, Antoine Del Rio aux Mesclances sur la commune de La Crau, Florian Gerbon chez Cofruid'Oc à Saint-Just, etc.).

Enfin merci à ma famille et plus particulièrement à mes trois enfants qui m'ont encouragé dans la rédaction de ce document.

Sommaire

Remerciements	7
Fiche synthétique	11
1. Synthèse des travaux de recherche	13
1.1. L'eau dans le sol : des cultures adaptées au plus humide et au plus sec (milieu tropical ; milieu méditerranéen)	14
1.1.1. Place de mes recherches dans le continuum sol-plante-atmosphère	14
1.1.2. La culture du riz à Madagascar	16
1.1.3. La canne à sucre irriguée (sol léger) et le triticale de contre-saison	19
1.1.4. La culture de la vigne en Languedoc	21
1.2. Le placement d'urée en riziculture	24
1.2.1. Bref historique	24
1.2.2. Les travaux du LRI sur le placement d'urée	25
1.2.3. Le suivi de la solution du sol après placement de SGU	27
1.2.4. Etude de la diffusion de l'azote en laboratoire	28
1.2.5. Des résultats complexes	30
1.2.6. Expérimentations complémentaires	34
1.2.7. Bilan des publications	38
1.3. Eau dans le sol et pilotage d'arrosage en culture cannière	41
1.3.1. Etude des remontées capillaires en culture de contre-saison	41
1.3.2. Formation d'un homologue national	44
1.3.3. Etude tensiométriques à Analaiva-Morondava (Société sucrière SIRANALA)	44
1.4. Eau et vigne	52
1.4.1. Problématique du bilan hydrique de la vigne	52
1.4.2. Passage du bilan hydrique saisonnier au bilan hydrique pluriannuel	55
1.4.3. L'enherbement de la vigne	59
1.4.4. Problématique de l'irrigation de la vigne	60
1.5. Analyse des expériences de modélisation	63
1.5.1. Synthèse graphique	63
1.5.2. Quelle place pour la modélisation en agronomie ?	66
1.5.3. Modélisation et progrès des connaissances	69
1.5.4. Mise en perspective à l'aide de la courbe caractéristique de l'humidité du sol	70
2. Projets de recherche	73
2.1. Les perspectives pour la fertilisation du riz repiqué	73
2.1.1. Des choix dans les grandes lignes directrices	73
2.1.2. Sujet 1 : un modèle complet pour la symétrie sphérique	76
2.1.3. Sujet 2 : symétrie cylindrique de l'engrais azoté	78

2.2.	La place des remontées capillaires dans le bilan hydrique de la vigne	79
2.2.1.	Sujet 3 : une première analyse avec les outils proposés dans la littérature	79
2.2.2.	Sujet 3 (suite) : étude expérimentale	83
2.3.	Gestion de l'eau et enherbement du vignoble	84
2.3.1.	La thématique vigne enherbée et irrigation	84
2.3.2.	Sujet 4 : concilier enherbement et irrigation dans l'entretien du sol en vignoble méditerranéen	85
2.3.3.	Le contexte du changement climatique	85
2.4.	Conclusion	85
3.	Bibliographie	87
4.	Curriculum vitae	93
4.1.	Formation	93
4.2.	Parcours professionnel	93
4.3.	Production scientifique	94
4.3.1.	Publications	94
4.3.2.	Contributions à des congrès	97
4.3.3.	Rapports scientifiques	97
4.4.	Conduite de programmes de recherche et collaborations à des programmes scientifiques	98
4.5.	Activités pédagogiques	100
4.5.1.	Enseignements	100
4.5.2.	Encadrement d'étudiants	102
4.6.	Evaluation scientifique et rayonnement international	104
4.7.	Responsabilités administratives	104
	Liste des tableaux	105
	Liste des figures	105
	Liste des sigles et symboles scientifiques	107

Fiche synthétique

Situation professionnelle

Ingénieur Divisionnaire de l'Agriculture et de l'Environnement
Spécialiste Agronome, Bilan hydrique et Riziculture (CGAAER)

SupAgro Montpellier, UMR n° 1230 (System)
2 place Viala 34060 Montpellier
remi.gaudin@supagro.fr / 04.99.61.20.59

Etat Civil

Né à Romillé (01/10/1956)
Divorcé, 3 enfants majeurs

23, avenue Saint-Lazare
34000 Montpellier

Parcours professionnel :

- depuis 2013, Ingénieur divisionnaire de l'Agriculture et de l'Environnement (échelon 5) à SupAgro
- 2003-2012 : Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement à SupAgro
- 2001-2002 : Ingénieur contractuel du Ministère de l'Agriculture affecté à SupAgro
- 1999-2000 : Ingénieur de Recherche mis à disposition du CIRAD par le Ministère de la Coopération
- 1992-1996 : Chargé de cours en Physiologie Végétale à la Faculté des Sciences de Niamey (Niger) durant 5 ans
- 1981-1991 : Radio-agronome au Laboratoire de Radio Isotopes (LRI) de l'Université de Madagascar (6 ans) puis de l'Université de Tananarive (4 ans)

Publications :

- Auteur ou co-auteur de 10 publications dans des revues internationales avec facteur d'impact (I.F.) (dont 8 en premier auteur)
- Co-auteur de 8 articles (dont 5 en premier auteur) dans la revue *L'Agronomie Tropicale* (5 depuis la thèse) et d'un compte-rendu à l'Académie des Sciences de Paris

Communications :

- Co-auteur de 4 contributions dans congrès internationaux (1990, 1991, 2012, 2013)

Enseignement :

- Chargé de cours en physiologie végétale durant 5 ans (Université de Niamey)
- Enseignant d'agronomie à SupAgro depuis 2001 ; enseignant Invité à l'Université d'Antananarivo (Madagascar)

Encadrement :

- 2 à 4 étudiants par an des niveaux Licence ou Master, depuis 2008

1. Synthèse des travaux de recherche

Agronome de formation, au cours de ma carrière j'ai eu la chance d'étudier des cultures aux exigences aussi variées en eau (et en azote) que le riz repiqué, la canne à sucre et la vigne. Il est donc logique que cette synthèse précise dans une première partie en quoi ces cultures et le milieu où elles poussent (et leur photosynthèse) sont aussi particuliers.

Ma carrière professionnelle a débuté par un recrutement par le Ministère de la Coopération pour occuper la fonction de radio agronome au sein du Laboratoire de Radio Isotopes (LRI) de l'Université de Madagascar, devenue depuis Université d'Antananarivo. J'y suis resté dix ans, assurant avec J. Dupuy au début des années 1980 un tournant dans les activités du Laboratoire, avec à la fin des années 1980 sa prise en main progressive par des chercheurs nationaux. Cette période a été très féconde sur le plan scientifique, avec des développements encore actuels ; elle constituera les deuxième (azote et riz) et troisième (eau-plante) parties de ce chapitre.

Les travaux effectués au LRI étant porteurs de sens en physiologie végétale (*CR Acad. Sciences agronomie/physiologie* rédigé sous les conseils du Professeur Gadai, Université de Paris-Sud ; communication au symposium « Bas-fonds et riziculture »), le Ministère de la Coopération m'a demandé d'enseigner la Physiologie végétale à la Faculté des Sciences de Niamey. Cette période a été marquée par un approfondissement des connaissances dans la discipline et une collaboration avec un chercheur de l'IRD (Rémy Pasquet) travaillant sur le niébé.

Dans le cadre de l'intégration en métropole des personnels coopérants dans des ministères techniques, j'ai rejoint en 2001 le département Agronomie de Montpellier SupAgro et l'UMR System (Analyse et Fonctionnement des Systèmes de Culture Tropicaux et Méditerranéens), alors en création. La quatrième partie abordera cette période, marquée par l'étude du bilan hydrique de la vigne et la question de son irrigation.

Je terminerai par une analyse comparative des expériences de modélisation menées d'une part à Madagascar sur l'étude de la fertilisation du riz repiqué par supergranules d'urée et d'autre part, au sein de l'UMR System, sur l'évaluation des besoins en eau d'irrigation de la vigne ou le pilotage d'arrosage. Bien que les ressources étudiées (azote pour le riz, eau pour la vigne) remplissent des fonctions très différentes dans la vie et la physiologie de ces deux cultures, je préciserai en quoi le cadre de la modélisation fonctionne de façon assez similaire et ouvre des perspectives de recherche pour aborder de nouveaux problèmes agronomiques.

Le document contient de nombreuses abréviations et symboles scientifiques. Ils sont définis lors de la première utilisation et repris dans une liste en fin de document, tout comme les tableaux et figures (avec indication de la page d'apparition).

1.1. L'eau dans le sol : des cultures adaptées au plus humide et au plus sec (milieu tropical ; milieu méditerranéen)

1.1.1. Place de mes recherches dans le continuum sol-plante-atmosphère

En agronomie et en physiologie végétale, la notion de continuum sol-plante-atmosphère permet d'expliquer comment les végétaux parviennent à maintenir un état hydrique relativement confortable en contrôlant le flux d'eau quasi-permanent qui les traverse, entre le sol et l'atmosphère. Le potentiel hydrique est la grandeur physique qui décrit l'état énergétique de l'eau. Ce potentiel est plus ou moins pluriel selon que l'on s'intéresse au sol, à la plante ou à l'atmosphère.

Les deux endroits où la plante assure un contrôle sont l'entrée (poils absorbants) et la sortie (les stomates). Pendant des décennies, le modèle dominant de fonctionnement de la plante a été basé sur une analogie avec le fonctionnement d'un circuit électrique avec un flux d'eau entre les points au potentiel le plus élevé (le sol) et ceux au potentiel le plus bas (l'environnement de la feuille), flux contrôlé par un ensemble de résistances dont la plus importante est la résistance stomatique. Un point très important à souligner est le caractère presque statique de l'organe (la feuille) qui héberge cette résistance alors que les poils absorbants accompagnent les racines dans la prospection du sol. Dans la feuille, seule est permise une variation temporelle de la résistance par l'ouverture plus ou moins grande des ostioles. Dans la racine, l'ensemble des poils absorbants est quelque chose de beaucoup plus dynamique dans la mesure où leur durée de vie limitée va de pair avec un renouvellement à un autre endroit du sol. L'investissement de la plante en carbone dans l'épaisseur de la paroi des stomates s'oppose à la faible épaisseur de la paroi pecto-cellulosique des poils. Ceux-ci sont ainsi adaptés à la couverture optimale du volume de sol. Ce modèle de fonctionnement du système sol-plante-atmosphère est de plus en plus précisé par le rôle que jouent les aquaporines dans la vie des tissus et les transferts d'eau et de certains composés entre cellules (Hove and Bhave, 2011).

Les études que j'ai menées ont pour objet essentiel le sol. Elles ont porté sur le fonctionnement hydrique du sol en milieu insaturé pour trois cultures : le triticale, la canne à sucre et la vigne. Dans le cas du triticale, il s'agit d'une culture de contre-saison avec présence d'une nappe à moyenne profondeur. Cette nappe définit une condition aux limites (potentiel matriciel nul à la surface de la nappe) qui est essentielle pour le fonctionnement hydrique du système sol-plante. On peut considérer que les trois cultures se placent selon le gradient suivant de sécheresse : triticale (moins sec) / canne à sucre / vigne (plus sec). La canne à sucre se situe en position intermédiaire pour deux raisons : la culture est irriguée et elle pousse sur sol limono-sableux.

La quatrième culture est le riz repiqué poussant en condition de sol saturé en eau. L'humidité volumique Θ prend alors une valeur singulière (humidité à saturation) à laquelle correspond par définition un potentiel matriciel égal à 0. J'ai étudié dans ce cas la diffusion de l'azote ammoniacal à partir d'un engrais azoté placé dans la couche anaérobie du sol.

Le tableau 1 précise les adaptations biologiques et physiologiques de chacune de ces cultures dans leur milieu et l'intérêt qu'elles représentent pour l'étude des relations eau-sol-plante même si le champ de variation de l'humidité ou du potentiel est parfois limité.

Tableau 1. Types de fonctionnement hydrique des cultures étudiées et place de mes travaux

Etat d'humidité	Plante	Adaptations sol / plante	Conséquences
Sol saturé	Riz humide	Aérenchyme cortical pour assurer la fourniture d'oxygène à la racine Prévention de la perte radiale d'oxygène dans le sol	Sol saturé : potentiel matriciel nul Accès relativement facile à la solution du sol (sauf cas de teneur très élevée en argiles) Diffusion des solutés dans le sol peu affectée par variation de θ Résolution simplifiée de l'équation de diffusion (humidité volumique du sol constante)
Intermédiaire	Canne à sucre	Enracinement profond en sol sableux à sablo-limoneux Possibilités de flux obliques dans le sol sous influence : - infiltration préférentielle le long de la tige - succion racinaire Oscillations de potentiel hydrique en aspersion intermittente si sous-sol sec	Etat hydrique intermédiaire facilitant la maîtrise des flux dans le système racinaire - Intensité des flux déterminée par $K(\theta)$ et le champ de potentiel (hydrique) - Relation des oscillations de potentiel à la partie basse de la courbe caractéristique $h(\theta)$
	Céréale de contre-saison	Transmission de l'eau à travers le profil Racines limitées physiquement par la nappe (cas de nappe trop haute) ou rencontrant difficulté à croître (texture argileuse) en accompagnement de descente de nappe	Fonctionnement du système déterminé par conditions aux limites : déterminisme hydrodynamique des remontées capillaires - Rôle du gradient vertical de charge hydraulique - Importance $h(\theta)$ et $K(\theta)$ - Flux d'eau important limité à la partie basse et intermédiaire de la courbe caractéristique
Assez sec à très sec	Vigne	Racines occupant tout le sol Contrôle physiologique de la transpiration (fermeture stomatique) Prélèvement de l'eau dans le stock du sol ; peu de flux d'eau dans le sol quand celui-ci est sec	Le potentiel de base est retenu pour la représentation du système On travaille sur la partie haute de la courbe caractéristique Relation linéaire entre $\log FTSW$ et potentiel de base

θ , humidité volumique du sol ; $h(\theta)$, courbe caractéristique de l'humidité du sol ; $K(\theta)$, conductivité hydraulique du sol ; $FTSW$, fraction of transpirable soil water

1.1.2. La culture du riz à Madagascar

La riziculture des Hauts Plateaux malgaches est une culture humide en ce sens que le cycle de culture est ajusté sur la saison des pluies (novembre à février-mars). Les champs sont souvent de petite surface et occupent les bas-fonds entre les collines et les plaines alluviales.

Le comportement hydrique des sols ferrallitiques qui couvrent les collines (ou plateaux) se rapproche de celui de pseudo-sables (Jourdan, 1983 ; Legros, 2007). La conséquence est la présence d'une grande nappe phréatique qui surplombe les bas-fonds et contribue à son alimentation en eau, via des prises d'eau naturelles ou aménagées au cours des siècles par les paysans malgaches. Le dénivelé naturel rend impossible la maîtrise de l'eau en saison des pluies et la solution de consensus à laquelle sont arrivés les paysans est un écoulement superficiel de l'eau, de rizière à rizière, en partie amont des bas-fonds, complémenté par un canal latéral en partie aval. Le fonctionnement d'un tel système est schématisé dans la figure 1.

La partie amont est donc repiquée en tout début de saison des pluies, avant la partie aval et les plaines adjacentes drainées par une rivière en position plutôt centrale. Le décalage des cycles de culture peut atteindre deux mois. Dans ce type de milieu, l'emploi des engrais est très problématique car tout épandage de surface risque d'être emporté par les pluies d'orage.

La préparation du sol (Fig. 2) occupe une grande place dans ce système de cultures. Elle vise trois objectifs : éliminer les mauvaises herbes, avoir une couche meuble de surface pour faciliter le repiquage du riz, avoir une couche aussi imperméable que possible à moyenne profondeur pour éviter de perdre de l'eau par drainage et limiter les pertes d'éléments minéraux. Très vite, l'anaérobiose s'installe en profondeur et conduit le riz à se nourrir essentiellement de l'azote ammoniacal produit par la minéralisation de la matière organique (Yoshida, 1981). Le riz est adapté à ce type de milieu dans la mesure où des conduits aërières permettent l'oxygénation des racines (et donc la respiration des tissus racinaires indispensable pour la fourniture d'énergie et d'équivalents réducteurs nécessaire à l'assimilation de l'azote), avec cependant une diffusion limitée de l'oxygène dans le sol grâce à la présence de cellules subérifiées en plusieurs couches (bande de Caspary s'ajoutant à celle de l'endoderme, Fig. 3) (Watanabe *et al.* 2013 ; Yamaya and Kusano, 2014).

Les études menées au LRI ont permis de tester différentes méthodes d'application de l'urée. Dans la mesure où l'une d'entre elles, le placement profond de supergranules d'urée (SGU), permettait d'avoir de bons résultats agronomiques, j'ai approfondi cette question en me focalisant sur l'étude de la solution du sol dans l'environnement de la boule d'urée.

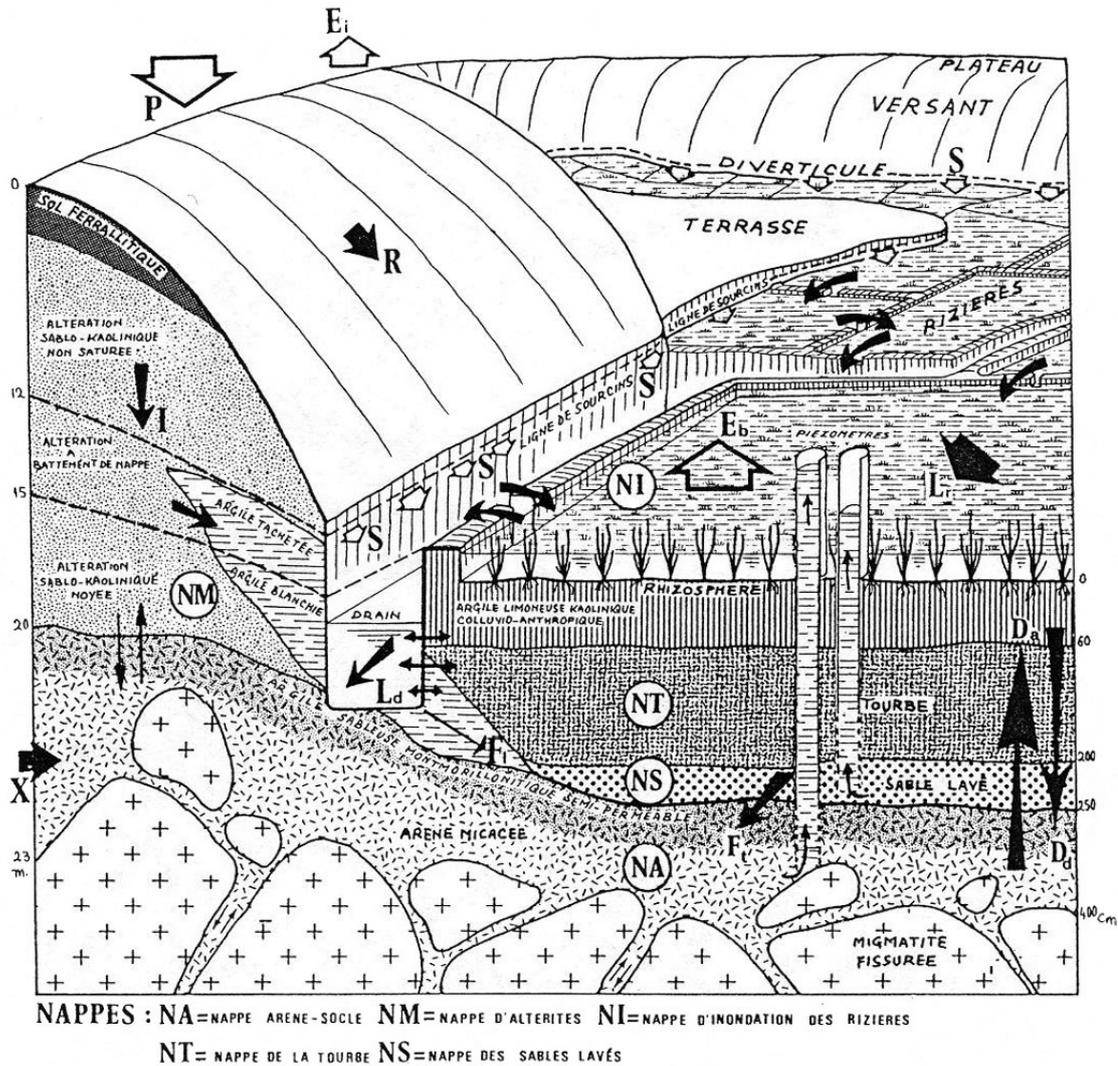


Figure 1. Coupe transversale partielle d'un bas-fond typique des hautes terres (Raunet, 1993)

En parallèle d'expériences menées en milieu contrôlé, j'ai choisi de poser cette question en termes physique et mathématique sous l'angle de la diffusion de l'azote ammoniacal à partir de l'engrais. La modélisation de ce phénomène a ouvert la voie à de multiples expérimentations au champ qui ont permis de préciser le fonctionnement du système constitué par les touffes de riz et le supergranule d'urée. L'ensemble de ces résultats m'a conduit très progressivement à une analyse approfondie et novatrice de la nutrition ammoniacale du riz dans ce contexte particulier, avec des implications physiologiques importantes.



Figure 2. Mise en boue traditionnelle en situation de plaine alluviale (photo R. Gaudin)

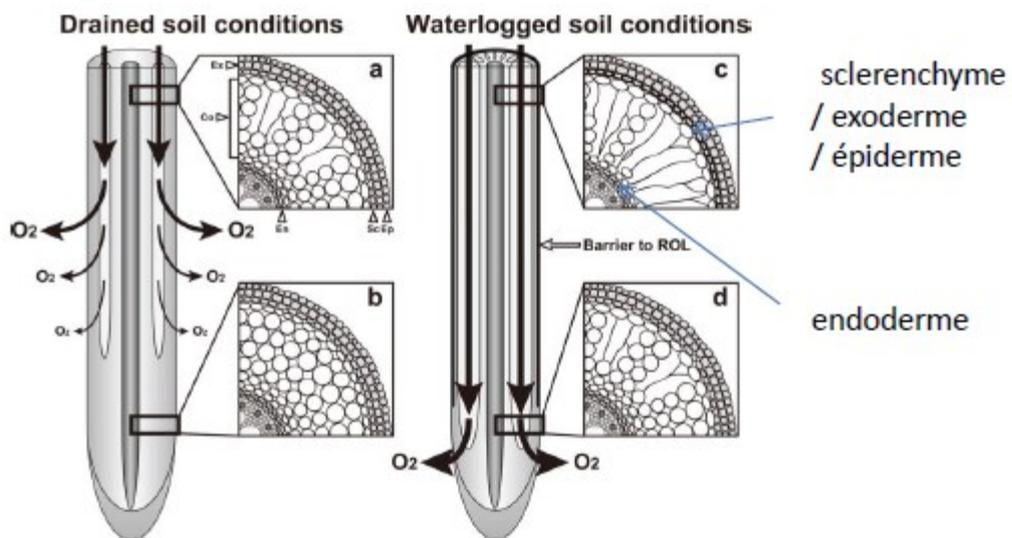


Figure 3. Différenciation de l'aérenchyme dans le cortex et mise en place d'une barrière pour limiter la perte d'oxygène dans la couche anaérobie du sol (d'après Nishiuchi *et al.*, 2012)

Le dispositif mis en place dans le cas du triticale consiste en une batterie de tensiomètres placés verticalement autour de tube d'accès pour sonde à neutrons. L'objectif est de suivre la variation verticale du potentiel hydrique puisque les conditions de culture rendent peu discutable une hypothèse d'homogénéité du potentiel sur un plan horizontal. Pour le suivi de la culture de canne à sucre, six batteries de tensiomètres ont été disposées pour suivre le champ de potentiel hydrique. La figure 5 rend compte de cette différence.



Etude des remontées capillaires en culture de triticale de contre-saison : une seule batterie de tensiomètres (par répétition) permet de suivre les flux d'eau verticaux



Etude des mouvements d'eau sous cannes : plusieurs batteries de tensiomètres permettent de suivre la distribution du potentiel hydrique au sein du sol (vue de la moitié du dispositif)

Figure 5. Vue des dispositifs expérimentaux mis en place pour suivre la variation verticale du potentiel hydrique sous triticale de contre-saison (en haut) et sa variation dans tout l'espace sous culture de cannes (photo R. Gaudin)

A ce stade nous allons rappeler l'équation de Darcy-Buckingham qui régit le déplacement de l'eau en milieu insaturé (Buckingham, 1907 ; Richards, 1960 ; Brown, 2002 ; Nimmo and Landa, 2005). Si l'on se place dans le premier cas (triticale), l'axe vertical Oz (positif vers le bas) est privilégié et le flux hydrique q n'a qu'une seule composante verticale q_z . La loi de Darcy-Buckingham met en relation q_z avec la conductivité hydraulique du sol K et le gradient vertical de potentiel hydrique :

$$q_z = -K(\theta) dH/dz \quad (1)$$

La grandeur H est le potentiel total, somme du potentiel matriciel noté h et du potentiel gravitaire qui vaut $-z$.

La loi de Darcy-Buckingham est locale. La conductivité hydraulique K est celle du point considéré. Elle dépend non linéairement de l'humidité volumique θ .

Dans le cas de la culture de canne il n'y a plus d'axe Oz privilégié. La conductivité hydraulique est supposée isotrope car il n'y a pas de litage dans le profil ; c'est en terme mathématique un scalaire. La loi de Darcy-Buckingham s'écrit alors pour toute perpendiculaire (ρ) à une courbe d'isopotential :

$$q_\rho = -K(\theta) dH/d\rho \quad (2)$$

Le dispositif de mesure donne accès au champ de potentiel. Le tracé de courbes isopotential va permettre de suivre l'orientation spatiale des flux d'eau. La distance entre les courbes renseigne sur le gradient de potentiel. Si l'on suppose parfaitement connue la fonction $K(\theta)$ en fonction de $h(\theta)$ {courbe caractéristique de l'humidité} la loi de Darcy-Buckingham donne théoriquement accès à la valeur du flux en n'importe quel point de la carte de potentiel.

Une analogie vient à l'esprit : les cartes d'isopotential hydrique vont permettre de suivre la vie hydrique souterraine comme les cartes de pression atmosphérique permettent de suivre les mouvements de l'air dans l'atmosphère. Dans le cas de l'atmosphère s'ajoute le déplacement de Coriolis.

1.1.4. La culture de la vigne en Languedoc

Le climat méditerranéen offre un régime de pluies un peu moins intense que le climat tropical, mais les fortes pluies et les orages sont des composantes essentielles du cycle de l'eau dans ces régions. La culture typique du Languedoc est la vigne, qui occupe souvent les coteaux et parfois les plaines. J'ai étudié le terme ruissellement du bilan hydrique et contribué grâce à sa représentation à faire progresser le champ d'application du modèle du bilan hydrique conçu par E. Lebon et A. Pellegrino (Lebon *et al.*, 2003 ; Pellegrino *et al.*, 2004).

Dans ce modèle, le phénomène de transpiration de la vigne est limité par la disponibilité de l'eau dans le sol. Ce formalisme recouvre un mécanisme physiologique : quand les racines perçoivent que le milieu environnant est sec, elles synthétisent de l'acide

abscissique (ABA) qui migre avec la sève brute vers les feuilles. L'arrivée de cette molécule au niveau des stomates provoque leur fermeture partielle et permet ainsi le contrôle de la transpiration (Taiz and Zeiger, 1991 ; Pellegrino, 2003). En situation de grande sécheresse et de forte demande climatique, la vigne peut mettre en œuvre un volant complémentaire d'action pour limiter la montée en température de l'ensemble du feuillage ; elle va sacrifier les feuilles les plus basses (les plus vieilles) en les laissant se dessécher complètement. Ce phénomène peut concerner quelques feuilles par jour.

Le flux de sève est conditionné par la demande climatique et la régulation de la transpiration. Le potentiel hydrique de l'eau dans les feuilles peut varier beaucoup en cours de journée, avec notamment un minimum en milieu de journée. Dans beaucoup de situations, les feuilles de la vigne atteignent en fin de nuit un état d'équilibre hydrique avec le sol environnant, considéré comme un compartiment homogène. Le potentiel hydrique prend alors la valeur dite du potentiel de base. Sa mesure est très importante. Cet indicateur de la disponibilité de l'eau est utilisé par les scientifiques et les agronomes de la vigne.

Cette notion de potentiel de base sert notamment pour faire la différence entre les niveaux de stress hydrique qui seront visés dans les parcours hydriques des vignes classées en IGP (Indication Géographique Protégée) ou en AOP (Appellation d'Origine Protégée). Le rendement en raisin est affecté par ce stress hydrique (Ojeda, 2007).

Dans les sols profonds, une façon indirecte de gérer ce niveau de stress est de mettre en concurrence la vigne et un enherbement intercalaire. L'étude de cette pratique a constitué de 2003 à 2010 l'essentiel du programme de recherche de mon équipe d'appartenance, l'équipe vigne, au sein de l'UMR System.

L'introduction d'un enherbement permet aussi de réduire le ruissellement dans les périodes de l'année marquées par les fortes pluies, principalement en automne et en hiver. Cet effet est plus ou moins marqué selon l'année. En sols profonds, des pluies d'hiver peu productives peuvent avoir comme conséquence un déficit hydrique précoce pour la nouvelle année de culture (exemple de 2014). Avec la représentation du ruissellement que j'ai proposée, il est devenu possible de calculer ce déficit. Un nouveau champ d'études s'est alors ouvert à l'investigation, celui du bilan hydrique pluriannuel. Deux directions de recherche ont découlé de cette approche : le calcul de tous les termes du bilan hydrique de la vigne dans le cadre de sa modélisation, la détermination des besoins en eau d'irrigation en relation avec le parcours hydrique souhaité et les paramètres clés du vignoble. J'ai développé le modèle de bilan hydrique pluriannuel pour un vignoble désherbé et en parallèle un doctorant a construit le modèle d'un vignoble enherbé (Celette *et al.*, 2010). L'emploi du premier modèle, initié dans le cadre d'un master que j'ai encadré en 2007, a permis de préciser sur quels types de vignobles devait porter l'effort d'irrigation, puis de tester l'usage du modèle pour le pilotage d'arrosage dans un domaine viticole.

Le tableau 2 résume les particularités biologique et agronomique des systèmes que j'ai étudiés à Madagascar et en Languedoc.

Tableau 2. Précisions sur les questions scientifiques traitées dans mes travaux

Culture	Riz repiqué	Céréale de contre-saison	Canne à sucre	Vigne
Durée de la culture	120 à 150 j (après repiquage à 20 j)	140 j	7 ans	40 ans
Installation	semis /repiquage	semis	bouturage	plantation
Opérations culturales essentielles	labour, hersage, mise en boue, repiquage, sarclage	travail superficiel, semis, désherbage	scarification du sol, coupe	taille, palissage, épamprage, travail du sol, vendange
Photosynthèse	C3	C3	C4	C3
Partie récoltée	grain (+ paille)	grain (+ paille)	tige	baie
Etat hydrique du sol	saturé en eau (couche anaérobie dès le premier centimètre sous la surface)	nappe descendante	nappe de profondeur, sol sec en saison sèche	état de sol sec recherché dès véraison
Profondeur mise en jeu	40 à 50 cm	40 à 140 cm	2 m	5 m
Facteur limitant essentiel	azote (et phosphore)	ensoleillement état du sol	eau	eau (et azote)
Irrigation	submersion	non (remontée capillaire)	aspersion	goutte-à-goutte (facultatif)
Questions scientifiques étudiées	Comment assurer la localisation de l'engrais azoté ? Quel lien entre la géométrie d'apport et la cinétique d'assimilation de l'azote ?	Quelle profondeur de la nappe est adéquate ? Quelle conductivité hydraulique du sol ? (quelle texture ?)	Comment piloter les arrosages en sols légers ?	Quel parcours hydrique en relation avec la qualité du raisin ? Quel arrosage ? Gestion de l'eau et entretien du sol
Phénomène physique étudié	Diffusion et échange de soluté (ammonium)	Remontée capillaire	Transfert d'eau dans le sol	Ruissellement Bilan hydrique
Phénomène biologique	Assimilation de l'ammoniaque	Transpiration	Transpiration	Transpiration (vigne et enherbement)
Modélisation	Diffusion	non	conditions particulières	Parcours hydrique

1.2. Le placement d'urée en riziculture

1.2.1. Bref historique

Le LRI (Laboratoire de Radio Isotopes) d'Antananarivo (Madagascar) va avoir 50 ans en 2015. Il a été créé par le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) dans le but de développer l'emploi des techniques nucléaires dans l'Océan Indien. L'architecture initiale, avec deux services, l'un de radio agronomie et l'autre de radio médecine, a été conservée. Des médecins nationaux ont dès l'origine pris en main le service de médecine nucléaire (Dr Manambelona, Dr Andriantsoa). Le service de radio agronomie a pour sa part connu quatre grandes phases : fonctionnement avec des chercheurs du CEA (P. Moutonnet, etc.), puis un chercheur détaché du CEA (P. Marini) entouré de coopérants (O. Jourdan, etc.) de 1972 à 1980, puis uniquement des coopérants de 1981 à 1991 (J. Dupuy, R. Gaudin) aidés d'un électronicien détaché du CEA et enfin malgachisation (L. Rabeharisoa) avec ensuite accueil de cadres IRD. Il faut noter que le CEA a poursuivi très longtemps son appui documentaire (abonnement à *Plant and Soil*, *Soil Science*, *Soil Science Society of America Journal*, *Fertilizer Research*, *CAB Abstracts*) et la fourniture de renouvelables scientifiques et de produits marqués (^{32}P , ^{15}N et radio traceurs). L'équipement en sondes à neutrons (et gamma-densimètre) et la maintenance électronique faisaient aussi partie intégrante de cette collaboration.

Jusqu'à 1980, l'essentiel des travaux menés par le LRI (service de radio agronomie) a porté sur le bilan hydrique (ou partie du bilan hydrique) de sites très spécifiques, en diverses régions de Madagascar. Les travaux les plus marquants ont été l'étude des remontées capillaires en culture du coton de décrue dans le nord-ouest de l'île (« baiboho ») et la caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols (« sables roux ») de la région d'Analava-Morondava (futur périmètre sucrier ; voir figure 4). La technologie de la sonde à neutrons a montré sur ces deux exemples sa robustesse et sa capacité à fournir des données scientifiques de très grande valeur pour le développement. Des travaux importants (et une thèse) ont également été menés par R. Raharinosoa sur la question difficile du statut phosphorique des sols malgaches.

La grande crise économique du début des années 1980 a considérablement réduit les relations entre les hauts plateaux et les grandes sociétés agricoles implantées dans les terres fertiles de la périphérie, notamment au Nord (Ambanja, Ambilobé), Nord-Ouest et Côte Est. Ceci a posé un grand défi, en termes de ressources financières et de thématique scientifique à développer, puisque l'essentiel des activités du LRI était généré par un partenariat fort avec certaines de ces sociétés, en vue de leur proposer des solutions en terme de calages de cycles de culture ou bien de gestion de l'irrigation, en gravitaire (exemple à Ambilobé), micro-aspersion (cacaoyères à Ambanja) ou goutte-à-goutte. Plusieurs conventions de travail, couvrant jusqu'alors une grande partie du fonctionnement et l'essentiel de l'investissement, n'ont pas été renouvelées.

Le choix a été fait par J. Dupuy et moi-même de maintenir une veille active sur la question de l'eau et d'investir la question de l'azote et des engrais azotés en riziculture.

L'installation d'un spectromètre optique dédié à la mesure de l'excès isotopique ^{15}N a permis d'envisager des expérimentations avec de l'urée marquée. La technique tensiométrique de mesure du potentiel hydrique a été, après l'étude bibliographique et les tests en laboratoire que j'ai menés ou supervisés, transformée en technique de prélèvement de la solution du sol en vue d'étudier les transformations de l'azote dans les sols de rizières¹. Le fait que le LRI construise les tensiomètres (et dispose d'une quantité importante d'appareils) a facilité cette transition.

1.2.2. Les travaux du LRI sur le placement d'urée

Le partenaire professionnel qui a accompagné la réorientation du LRI a été le Programme Engrais Malgache, vaste programme d'appui de la FAO (Food and Agriculture Organisation, Rome) pour la vulgarisation de l'emploi d'engrais en riziculture repiquée. Dirigé par G. D'Onofrio, ce programme a bénéficié d'un don du gouvernement norvégien sous la forme de quantités importantes d'un nouveau produit de la firme Norsk Hydro, les supergranules d'urée (SGU). Des actions similaires ont été menées dans les grands pays rizicoles avec, pour l'Asie, l'appui de l'IRRI (International Rice Research Institute) et/ou de l'IFDC (International Fertilizer Development Center).

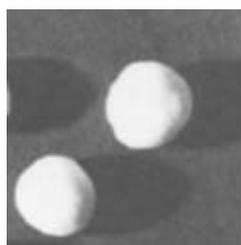


Figure 6. Supergranules d'urée de 2 g avec un diamètre de 14 mm (photo IFDC)

En tant que structure de recherche, le LRI a mené pour la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) des expérimentations avec l'urée marquée (^{15}N) en vue d'étudier sur des sites bien ciblés l'effet de la forme (perlurée vs supergranule d'urée) et de la profondeur de placement (1 cm ou 10 cm) sur les coefficients réels d'utilisation (CRU) de l'azote par le riz².

Pour mieux dissocier ce qui relevait de la forme et de la profondeur dans l'effet positif des supergranules d'urée sur le rendement du riz et le CRU de l'azote par le riz, nous avons dans un essai mené près d'Antsirabé utilisé un dispositif d'injection de l'urée en solution. Il est apparu que la localisation profonde et la faible dispersion de l'urée étaient des

¹ Gaudin R., Dupuy J. & Ranaivo J. 1985. Les bougies poreuses, un outil pour suivre l'ammonium et le nitrate en solution dans les sols de rizières. 1. Etude bibliographique *L'Agronomie Tropicale* 40(1):28-32

² D'Onofrio G., Dupuy J., Gaudin R. & Ravohitrarivo P. 1985. Effets comparés de l'application de perlurée et de supergranules d'urée sur riz inondé à Madagascar. 26 pages. Ministère de la Production Agricole et de la Réforme Agraire de Madagascar / Programme Engrais Malgache de la FAO

facteurs essentiels de l'effet des SGU³. Ces résultats sont importants en termes d'apport scientifique : d'une part, ils montrent qu'un placement réussi de l'urée en profondeur permet de limiter considérablement les pertes (l'azote est mis à l'abri du ruissellement superficiel et de la volatilisation ammoniacale), d'autre part ils conduisent à écarter la possibilité d'un effet retard de la disponibilité de l'azote qui serait lié à la structuration solide de l'urée. Ils montrent aussi la difficulté à réussir l'enfouissement si l'on travaille avec la perlurée.

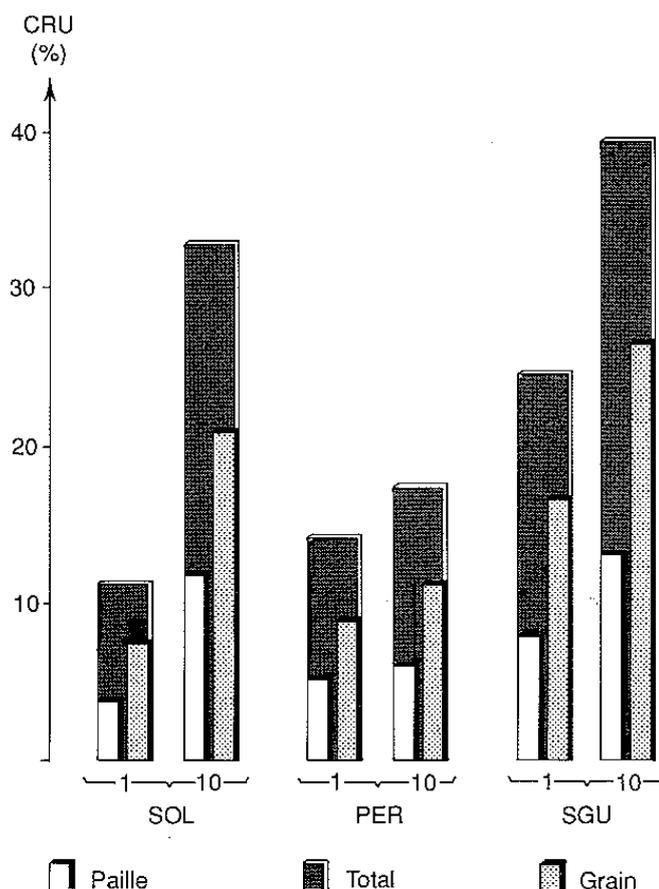


Figure 7. Influence de la profondeur du placement ou de la forme de l'urée sur les coefficients réels d'utilisation de l'azote pour le riz repiqué (Dupuy *et al.*, 1990). 1 = placement à 1 cm, 10 = placement à 10 cm, SOL = solution d'urée, PER = perlurée enfouie dans un sillon, SGU = supergranule d'urée

³ Dupuy J., D'Onofrio G. & Gaudin R. 1990. Etude à l'étude d'urée enrichie en ¹⁵N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. I. Comparaison entre supergranules d'urée, perlurée et solution d'urée placés à 1 cm ou 10 cm de profondeur. *L'Agronomie Tropicale* 45(1):3-10

1.2.3. Le suivi de la solution du sol après placement de SGU

Un essai mis en place à Alasora (Fig. 8) a permis d'utiliser pour la première fois en rizière des bougies poreuses comme préleveurs de la solution du sol.

Ces travaux ont été valorisés par un DEA que j'ai encadré (J. Ranaivo) et une publication⁴. Il s'est avéré que l'ammonium produit par hydrolyse de l'urée était stable dans la couche anaérobie du sol, avant d'être absorbé par le riz. La nitrification est apparue faible, y compris sur le témoin.



Figure 8. Dispositif de préleveurs encadrant la position d'enfouissement du supergranule d'urée (symbolisée par la lettre G) (photo R. Gaudin)

Afin de préciser l'effet des SGU, j'ai mis en place sur un autre site, situé près d'Arivonimamo, un suivi comparatif du devenir de l'azote du SGU ou bien d'urée en bande, en présence ou en absence de riz. Une seule bougie était cette fois utilisée. Elle était localisée à 1,5 cm du point de placement. Suite à des tests préliminaires effectués par Ph. Bournat, j'ai pu suivre l'hydrolyse de l'urée, rapide sur le traitement rizicultivé, et mettre en évidence un retard d'hydrolyse en absence de riz (moins présence d'uréase). Les courbes d'évolution de la concentration en azote ammoniacal ont été décomposées en une suite d'exponentielles décroissantes, avec distinction de décroissance lente (diffusion) et rapide (prélèvement racinaire), à un seuil de concentration en azote ammoniacal autour de 100 mg.L⁻¹. Dans la conclusion de l'article qui décrit ces travaux⁵, il est précisé qu'il faut pour

⁴ Gaudin R., Dupuy J. & Ranaivo J. 1985. Les bougies poreuses, un outil pour suivre l'ammonium et le nitrate en solution dans les sols de rizières. 2. Etude expérimentale. *L'Agronomie Tropicale* 40(1):33-38

⁵ Gaudin R., Dupuy J. & Bournat P. 1987. Suivi du contenu en azote de la solution du sol d'une rizière après placement d'urée. *L'Agronomie Tropicale*, 42(1):13-9

mieux distinguer les phénomènes de diffusion et de prélèvement racinaire passer à un point de vue local avec de petits préleveurs.

Un essai ^{15}N mené sur le même site (Fig. 9) a permis de tester le fractionnement de SGU sur différentes dates d'apport⁶.



Figure 9. Vue partielle de l'essai ^{15}N en vue d'étudier le fractionnement de l'apport d'urée (photo R. Gaudin)

1.2.4. Etude de la diffusion de l'azote en laboratoire

Les sols filtrants ou bien à faible capacité d'échange montrent une mauvaise réponse à l'azote, même placé sous forme de SGU. Ceci m'a conduit à formuler l'hypothèse d'une action spécifique des SGU qui serait liée à une diffusion minimale de l'azote dans le milieu. Dans ce travail de description mathématique de la diffusion, j'ai essayé de trouver le modèle qui décrirait au mieux les données existant dans la littérature, notamment les distributions en azote ammoniacal obtenues par N.K. Savant pour un sol typique des Philippines (Mahaas clay de l'IRRI). Ces distributions se présentaient sous forme de courbes d'iso-concentration, en présence ou non de riz, à trois temps clés : 14 jours, 28 jours et 56 jours. Dans un problème de diffusion, il y a d'une part l'équation de diffusion (intégrant ou non un terme d'échange) et d'autre part la description de la source.

⁶ Dupuy J., Gaudin R. & D'Onofrio G. 1990. Etude à l'étude d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. II. Effets d'un apport unique ou de deux apports de supergranules d'urée ou de perlurée au cours de la phase initiale de croissance du riz inondé. *L'Agronomie Tropicale* 45(1):11-20

Le phénomène de diffusion a été considéré de symétrie sphérique. Il est décrit par l'équation suivante si le coefficient de diffusion de l'azote ammoniacal D est constant et si l'isotherme d'échange (d'adsorption) est du type $S = \kappa c^\eta$ (isotherme de Freundlich avec S quantité adsorbée) :

$$(1 + (\rho/\theta) \eta \kappa c^{\eta-1}) \frac{dc}{dt} = D/r \frac{d^2(rc)}{dr^2} \quad (3)$$

avec :

c , concentration en azote ammoniacal dans la solution du sol

t , le temps

ρ , la densité apparente du sol sec

θ , l'humidité volumique du sol

r , la distance au point d'apport du supergranule d'urée

κ et η , coefficients de l'isotherme de Freundlich

J'ai dans un premier temps négligé le terme d'échange d'azote ammoniacal entre matrice solide et solution du sol. L'équation s'écrit alors :

$$\frac{dc}{dt} = D/r \frac{d^2(rc)}{dr^2} \quad (4)$$

Deux modèles de source ont été testés : source instantanée et ponctuelle d'ammoniacque et source de volume déterminé par la limite de solubilité de l'urée (volume sphérique avec un rayon autour du cm). Il est apparu que cela ne faisait pas de différence significative ; la représentation par une source ponctuelle est d'un intérêt évident car l'équation de diffusion a alors une solution analytique.

$$c(r,t) = (Q/8\theta) (\pi Dt)^{-3/2} \exp(-r^2/4Dt) \quad (5)$$

avec Q , quantité d'azote apporté par la source.

Le terme d'échange d'azote ammoniacal apparaît de ce fait comme un facteur de ralentissement de la diffusion.

Au point d'apport ($r = 0$), l'équation (5) se simplifie :

$$c(0,t) = (Q/8\theta) (\pi Dt)^{-3/2} \quad (6)$$

ou sous forme logarithmique :

$$\log c(0,t) = \log(Q/8\theta) - 3/2 \log(\pi D) - 3/2 \log t \quad (7)$$

Cette dernière formulation conduit à privilégier une représentation log-log pour traiter les données de la phase de diffusion (voir fig. 14).

Pour asseoir ce modèle, j'ai étudié la diffusion de l'azote en conditions contrôlées, dans des récipients cylindriques. Les temps d'observation sont restés les mêmes (14, 28 et 56 jours). Un dispositif de petits préleveurs (Fig. 10) a été mis en place dans un plan à 15 cm de profondeur, sur 3 distances par rapport au point d'apport : 5 cm, 10 cm et 15 cm.



Figure 10. Dispositif pour l'étude de la diffusion de l'azote ammoniacal en laboratoire (vue avant et après remise en place du sol au-dessus du plan de mesure) (photos R. Gaudin)

Pour avoir une donnée au point d'apport, j'ai placé un préleveur spécifique à l'extrémité d'une tige à descendre au premier temps de prélèvement. Ces données ont confirmé l'hydrolyse rapide de l'urée et la localisation de l'azote ammoniacal dans un rayon de 5 cm autour du point d'apport.

Parallèlement, j'ai intégré l'échange d'azote ammoniacal dans la représentation de la dynamique de diffusion. Un algorithme spécifique a été élaboré pour résoudre ce problème non linéaire. Ces travaux ont été présentés dans ma thèse de doctorat en sciences agronomiques⁷, soutenue en décembre 1987 à Nancy. Ils conduisent à proposer un seul (petit) préleveur de solution du sol placé au contact et en même temps que le SGU pour suivre les dynamiques de diffusion et de prélèvement d'azote ammoniacal. Celles-ci apportent une contribution séparée dans la courbe d'évolution de la concentration en azote ammoniacal au point d'apport.

1.2.5. Des résultats complexes

La première utilisation au champ du dispositif SGU-préleveur (Fig. 11) a eu lieu au cours de la saison 1986-1987, sur trois parcelles du bas-fond d'Ambohitrakoho, dans le cadre de l'Action Thématique « Bilan hydrique et minéral d'un bas-fonds représentatif des hautes terres malgaches » (financement CIRAD-CNRS-INRA-ORSTOM). Deux sites étaient situés en parties amont et aval du bas-fond, globalement mal drainées en saison sèche. Le troisième site était placé dans la (petite) plaine bien drainée jouxtant le bas-fond. Les variétés de riz étaient des variétés locales. Les essais ne comportaient que deux traitements : SGU (58 unités de N) avec 90-45 de PK, et témoin absolu. Quatre préleveurs étaient installés par traitement.

⁷ Gaudin R. 1987. L'effet supergranule d'urée (SGU) en sols de rizière. Un problème de diffusion avec échange d'ions. Essai de modélisation. *Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 147 pages



Figure 11. Vue de l'ensemble SGU-préleveur (à gauche) et de la pompe manuelle qui produit le vide qui permet de récupérer la solution du sol dans un flacon à pénicilline. L'ensemble SGU-préleveur est enfoui à 10 cm de profondeur entre 4 touffes de riz au moment du repiquage (photos R. Gaudin)

Dans les trois situations étudiées, le premier prélèvement a été effectué 4 jours après repiquage du riz et apport de SGU. Ce délai assez court entre placement de l'engrais azoté et mesure sur la solution du sol a permis d'observer la coloration brune de la solution (Fig. 12) et de sentir à l'ouverture des flacons (opération effectuée après le dosage de l'azote ammoniacal par la méthode du bleu d'indophénol) l'odeur caractéristique de l'ammoniac. La coloration est due à une attaque de la matière organique du sol par l'ammoniac, ce qui libère des acides fulviques. Les concentrations en azote ammoniacal atteignent $0,25-0,30 \text{ mol.L}^{-1}$ pour un pH voisin de 9. Ceci situe la concentration en ammoniac à $0,09-0,11 \text{ mol.L}^{-1}$ ce qui explique que certaines parties de l'humus soient attaquées.



Figure 12. Vue de la solution du sol récupérée 4 jours après placement d'un SGU de 2 g (photo R. Gaudin)

Dans le suivi de la solution au voisinage du point d'apport des SGU, les résultats les plus spectaculaires ont été obtenus en plaine, avec une bonne synchronicité des répétitions. Dans cette situation, il a été possible de mélanger les échantillons pour obtenir le pH et la concentration en nitrate, en plus des mesures individuelles en azote ammoniacal.

La courbe d'évolution de la concentration en azote ammoniacal a été représentée sur une échelle logarithmique, permettant ainsi de mettre en évidence l'influence du phénomène de diffusion (courbe à la concavité tournée vers le haut) puis le prélèvement racinaire qui apparaît sous une forme linéaire. Le point à l'intersection des deux courbes (Fig. 13) présentait les valeurs suivantes : 164 mg.L⁻¹ d'azote ammoniacal pour pH=7,85 (N-NH₃ à 6 mg.L⁻¹ soit 0,45 mM). La partie gauche a été considérée comme une zone où la concentration en NH₃ était trop forte pour la plante (toxicité ammoniacale) tandis que la partie droite mettait en évidence un mécanisme de premier ordre dans le prélèvement de l'ammoniaque et/ou son assimilation⁸.

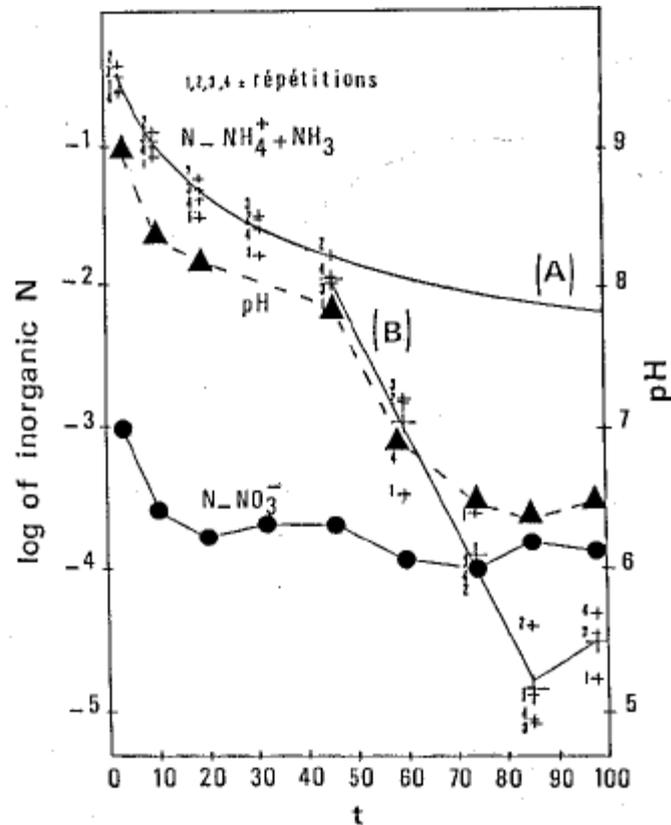


Figure 13. Evolution du pH et des concentrations (mole.L⁻¹) en ammoniacque et nitrate de la solution du sol dans le site de placement d'un SGU de 2 g. En abscisse, le temps en jours. (A) Courbe théorique de diffusion et échange en absence de plante (B) Courbe expérimentale en présence de plante

⁸ Gaudin R. 1988. L'ammoniac NH₃, une clé pour comprendre l'efficacité des supergranules d'urée en riziculture irriguée. *L'Agronomie Tropicale* 43(1):30-39

La question très vite soulevée a été celle de la forme sous laquelle l'azote ammoniacal rentrait dans la racine et j'ai cru pendant quelques mois que mes données penchaient en faveur d'une absorption de NH_3 ⁹. Pour asseoir cette idée, j'ai développé un modèle basé sur une réaction de premier ordre pour l'entrée et l'assimilation de NH_3 et l'équilibre de concentration en NH_3 entre la racine et la solution du sol (notion communément avancée pour expliquer la toxicité de l'ammoniaque) ; ce modèle conduisait à l'équation suivante¹⁰:

$$d(\log c)/dt + d(pH)/dt = -(k/2,3) 10^{(pK_a-pH_i)} \quad (8)$$

avec pH , pH_i et pK_a désignant respectivement le pH de la solution du sol, celui du compartiment racinaire (ou sa composante la plus acide) et celui de la constante d'équilibre du couple $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$. Pour rappel, le pK_a de l'ammoniaque est 9,25 à 25°C.

La principale difficulté de ce modèle était que l'ammoniaque aurait pu, sous certaines conditions, être présente en grande quantité dans les cellules racinaires avant assimilation. Une question importante était notamment la présence ou non de vacuoles puisque le pH bas de ce compartiment aurait conduit à une accumulation vacuolaire. Notons que les cellules du tissu racinaire juste sous la coiffe ne présentent pas encore de vacuole. Une autre question portait sur la nature du système enzymatique qui se chargeait en premier ressort de l'assimilation de ces grosses quantités d'ammoniaque.

Le monde scientifique s'est montré très réceptif sur la pertinence de mon questionnement, notamment parce que le modèle offrait une représentation dynamique du phénomène de consommation de l'azote ammoniacal. La plupart des travaux antérieurs de physiologie consacrés à la nutrition ammoniacale des plantes n'abordaient pas (ou très peu) cette question car la composition du milieu nutritif n'était pas modifiée en cours d'expérience. Avec le placement d'urée, les racines de riz sont amenées à aller au maximum des possibilités en terme d'assimilation, jusqu'à la limite de toxicité de NH_3 . Mais la définition de cette limite ne peut se référer uniquement à l'ammoniaque car la réaction d'assimilation exige un squelette carboné pour se réaliser. Si l'on considère que c'est le facteur limitant de l'assimilation, les données obtenues doivent plus s'interpréter en termes de mécanisme de régulation à l'interface azote-carbone, particulièrement sollicitée dans la géométrie particulière de l'apport des SGU. Il en est résulté deux papiers majeurs, l'un sur la méthode¹¹, et l'autre sur l'interprétation des données¹². Pour reprendre l'explication du Pr Gadal

⁹ Gaudin R. 1988. Le rôle de l'ammoniac dans l'alimentation azotée des plantes : un problème remis à jour par l'étude de la fertilisation azotée du riz irrigué. *Bulletin de l'Académie Malgache* 66(1-2):181-184

¹⁰ Gaudin R. 1989. De l'absorption de l'azote ammoniacal sous sa forme moléculaire NH_3 à la sonde de fertilité : implication physiologique et intérêt agronomique. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. M. Raunet (éd.), Montpellier, CIRAD, p. 77-97

¹¹ Gaudin R. 1991. Un outil enterré pour caractériser l'alimentation ammoniacale du riz irrigué. *C.R. Académie des Sciences de Paris*, t. 313, série III, p. 221-225

¹² Gaudin R. 1993. Caractériser la fertilité des sols de rizières par une mesure à l'interface des métabolismes carboné et azoté de la plante. Théorie, Méthode et Application. Colloque « Bas-Fond et Riziculture », Antanarivo décembre 1991, publié p. 305-312 ; CIRAD 1993, ISBN 2-87614-100-0 (éditeur : M. Raunet), 517 pages.

(laboratoire de biologie moléculaire, Université de Paris-Sud), le mécanisme de premier ordre traduirait le phénomène de régulation de la PEPC (phospho-énol pyruvate carboxylase), une enzyme sollicitée pour permettre à la plante de satisfaire au mieux la priorité accordée à l'assimilation de l'azote ammoniacal externe disponible, par rapport aux autres fonctions classiques du métabolisme carboné (notamment la respiration).

1.2.6. Expérimentations complémentaires

Pour tester le dispositif et mieux comprendre la portée des résultats obtenus, je me suis lancé dans une série d'expérimentations :

- comparaison des cinétiques d'évolution de la concentration en azote ammoniacal (et uréique) pour des SGU de 1 g, 2 g, 3 g et 4 g. Le site choisi a été Arivonimamo, le LRI y ayant mené une étude sur la dynamique de prélèvement de l'azote pour des SGU de 2 g¹³. Mon objectif était de mettre en évidence un décalage dans le prélèvement racinaire pour les SGU de masse plus élevée puisqu'il faut alors plus de temps au phénomène de diffusion pour faire descendre la concentration en azote ammoniacal sous le seuil de toxicité. Cela s'est vérifié, de même que la moindre capacité assimilatrice de la plante en fin de cycle, sans doute liée à une compétition des besoins en carbone dans la phase de reproduction¹⁴.

Ces cinétiques de disparition de l'azote ammoniacal (Fig. 14) sont à mettre en relation avec les résultats agronomiques repris dans le tableau 3. Il y a de façon évidente une difficulté pour le riz repiqué à utiliser l'azote ammoniacal dans le cas de SGU de 4 g. Ces données sont en accord avec les courbes de réponse à l'azote présentées par Savant et Stangel (1990) dans leur synthèse sur l'emploi des supergranules d'urée en riziculture.

Tableau 3. Effet de la masse du SGU sur le rendement du riz repiqué à Arivonimamo. Les doses de PK sont 60 et 90 kg.ha⁻¹.

Masse du supergranule d'urée (g)	Dose d'azote (kg N. ha ⁻¹)	Rendement (Mg. ha ⁻¹)	Test de Duncan (une même lettre indique une différence non significative au niveau de probabilité 0,05)
1	29	3,49	a
2	58	3,90	b
3	87	4,50	c
4	116	4,45	c

¹³ Dupuy J., Gaudin R. & D'Onofrio G. 1990. Etude à l'étude d'urée enrichie en ¹⁵N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. III. Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranules d'urée ou de perlurée au repiquage du riz ou 21 jours après. *L'Agronomie Tropicale* 45(1):21-30

¹⁴ Gaudin R. & Dupuy J. 1999. Ammoniacal nutrition of transplanted rice fertilized with large urea granules. *Agronomy Journal* 91(1):33-36

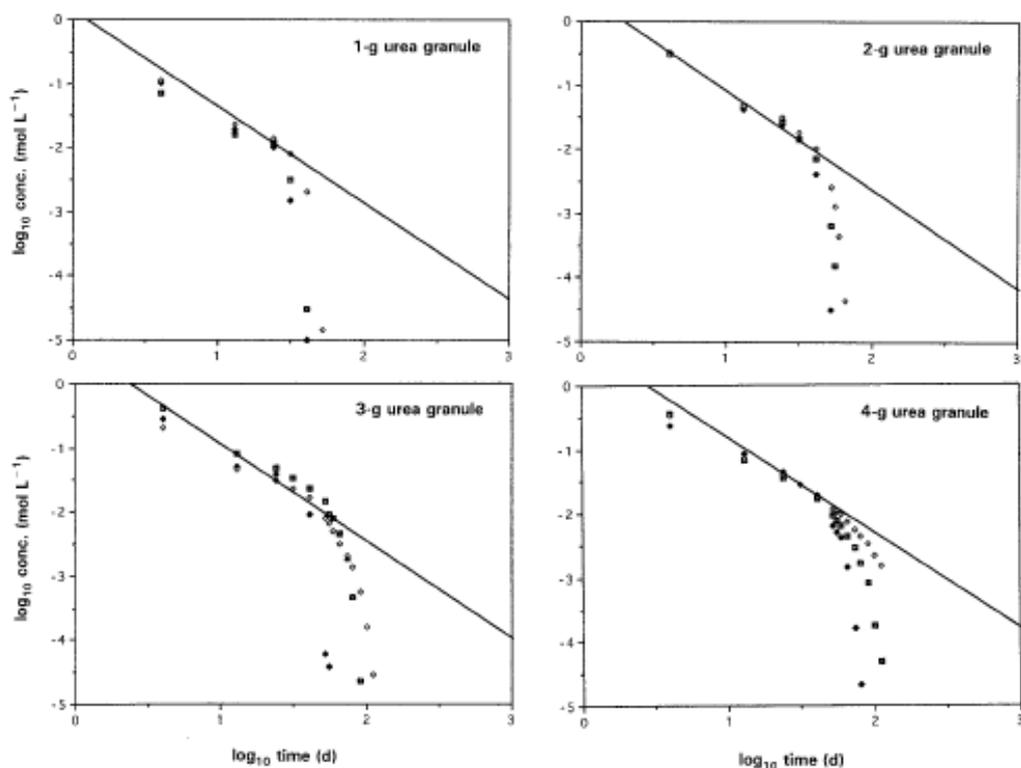


Figure 14. Cinétiques de disparition de l'azote ammoniacal de la solution du sol pour des SGU de 1 g, 2 g, 3 g et 4 g. Ici la représentation log-log permet de visualiser la phase de diffusion sous la forme d'une droite de pente $-3/2$ (éq. 7)

Dans le cas de SGU de 2 g, il y a concordance entre la cinétique de disparition de l'azote ammoniacal observée depuis la solution du sol au voisinage du point d'apport du supergranule et les courbes d'évolution des contributions sol et engrais à la prise d'azote par le riz (Fig. 15 et 16) observées sur le même site pour un apport au repiquage.

On remarque notamment que dans les semaines où le riz a accès à l'azote ammoniacal du SGU (40 à 55 jours) il y a arrêt du prélèvement de l'azote du sol (courbe en jaune). Quand l'azote ammoniacal du SGU est pleinement assimilé, l'azote du sol est à nouveau sollicité (Fig. 16).



Figure 15. Préparation du sol (mise en boue et planage) pour l'un des essais de marquage à l'azote 15. Noter que l'eau d'aménée (ou en sortie) est gérée de façon indépendante pour chaque parcelle. Les six parcelles correspondent à six dates de coupe du végétal (photo R. Gaudin)

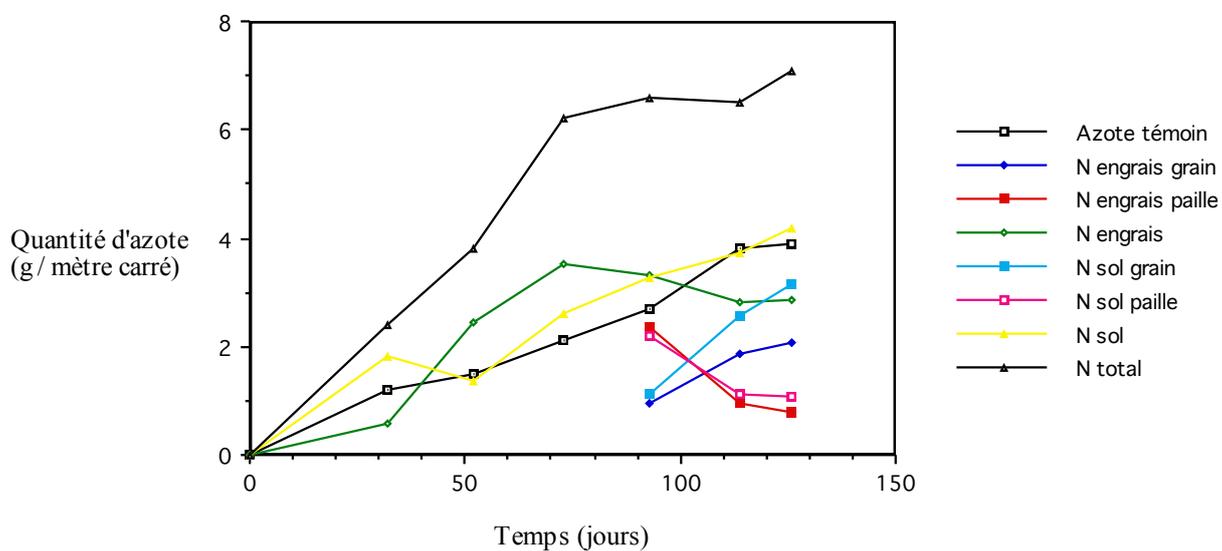


Figure 16. Accumulation de l'azote provenant de l'engrais et du sol dans les feuilles en début de cycle du riz relayée par un transfert vers les grains en fin de cycle (Dupuy *et al.*, 1990)

- étude de l'influence du niveau de fertilisation PK sur la constante d'assimilation. Les deux apparaissent en relation proportionnelle (Tableau 4) dans une gamme de P allant de 0 à 100 unités $P_2O_5^{15}$ (Fig. 17).

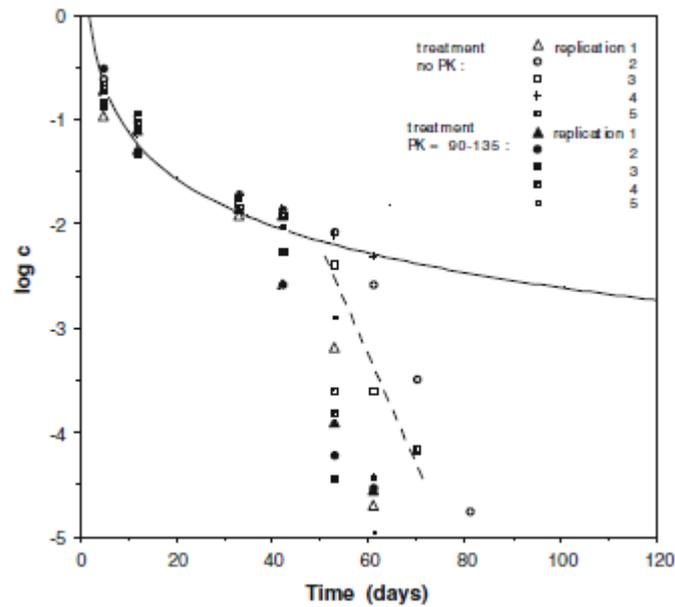


Figure 17. Mise en évidence de l'influence du niveau PK sur la constante d'assimilation de l'azote ammoniacal dérivant d'un SGU de 2 g. La droite en pointillé est la droite d'ajustement pour le troisième réplicat du traitement 0-0. La courbe en continu représente la phase de diffusion correspondant à l'équation (6) pour un traitement sans plante

Tableau 4. Effet du niveau de fertilisation PK sur la constante de vitesse de prélèvement-assimilation de l'azote ammoniacal dérivant de SGU de 2 g, sur le tallage, sur le rapport de la constante de vitesse au nombre de talles et sur le rendement.

Niveau de PK ($kg. ha^{-1}$)	Constante d'assimilation (j^{-1})	Nombre de talles par touffe	Rapport de la constante d'assimilation sur le nombre de talles	Rendement ($Mg. ha^{-1}$)
0-0	0,226 ^{a*}	11,0 ^a	0,0206	3,52 ^a
30-45	0,279 ^{ab}	13,1 ^b	0,0213	3,67 ^a
60-90	0,317 ^{bc}	15,5 ^c	0,0204	4,19 ^b
90-135	0,356 ^c	17,1 ^c	0,0208	4,49 ^b

*les moyennes d'une même colonne suivies de la même lettre ne présentent pas de différence significative au niveau 0,05 (test de comparaison multiple de moyennes dit test de Duncan)

¹⁵ Gaudin R. 2012. The kinetics of ammonia disappearance from deep-placed urea supergranules (USG) in transplanted rice: the effects of split USG application and PK fertiliser. *Paddy and Water Environment* 10(1):1-5

A Madagascar, la relative pauvreté des sols de rizières en P est liée vraisemblablement à l'absence de programme régulier de fertilisation et à la nature essentiellement ferrallitique des sols sur les versants proches.

- étude de l'influence du fractionnement de l'apport de SGU de 2 g pour réaliser une dose de 116 kg N. ha⁻¹. Deux traitements ont été étudiés pour compléter le premier apport au repiquage : un second apport 41 jours plus tard ou bien 62 jours plus tard. Ce second apport a été effectué sur la même interligne en décalage de 40 cm par rapport au premier. L'apport à 41 j permet de valoriser au mieux l'azote apporté¹⁶ ; la plante enchaîne bien la prise d'azote ammoniacal dans les deux volumes (de forme sphérique ou quasi-sphérique) où se concentre l'azote ammoniacal qui dérive des SGU ; il faut cependant veiller à ce que le sol ne soit pas trop plastique sous peine que les doigts ne laissent des voies préférentielles qui servent à accélérer la dispersion de l'azote ammoniacal, voire uréique.

1.2.7. Bilan des publications

Mes travaux sont arrivés à maturité en même temps que ceux effectués par l'IFDC (International Fertilizer Development Center) sur le même sujet. Pour preuve, un numéro spécial de *Fertilizer Research* avait pour titre : « Deep placement of urea supergranules in transplanted rice: principles and practices » (Savant and Stangel, 1990). Il est évident que l'emploi de préleveurs de solution du sol m'a aidé, tout comme l'excellente collaboration avec le « Programme Engrais Malgache ». Le positionnement périphérique du LRI (par rapport à l'IRRI – International Rice Research Institute – ou à l'IFDC) et son relatif isolement ont permis de développer une approche spécifique qui m'a en quelque sorte servi.

La carte suivante (Fig. 18) montre dans quelles revues mes articles publiés dans *L'Agronomie Tropicale* et *Agronomy Journal* ont été cités. On voit que ces travaux sont à l'intersection des disciplines de la physiologie végétale et de l'agronomie et que de nombreux chercheurs y ont fait référence. Les point-clés qui sont le plus souvent mis en avant sont les suivants :

-la mesure *in situ* des niveaux de concentration en azote uréique et ammoniacal après placement localisé d'urée. Ces données sont importantes pour fixer une plage de variation des concentrations de substrats pour l'étude des transporteurs racinaires. Pour NH₄⁺, les transporteurs de basse affinité fonctionnent de 1 à 10 mM (Rawat *et al.*, 1999).

-la limite de toxicité de l'ammoniac mise en évidence avec le dispositif sonde-supergranule qui explique pourquoi de très gros supergranules (4 ou 5 g) sont inefficaces dans la géométrie classique de repiquage

-la cinétique de prélèvement de l'azote ammoniacal depuis l'azote de la solution du sol qui tend à démontrer que les supergranules de 2 ou 3 g fournissent l'azote en adéquation temporelle avec la demande de la plante pour les niveaux intermédiaires de fertilité

¹⁶ Gaudin R. 2012. The kinetics of ammonia disappearance from deep-placed urea supergranules (USG) in transplanted rice: the effects of split USG application and PK fertiliser. *Paddy and Water Environment* 10(1):1-5

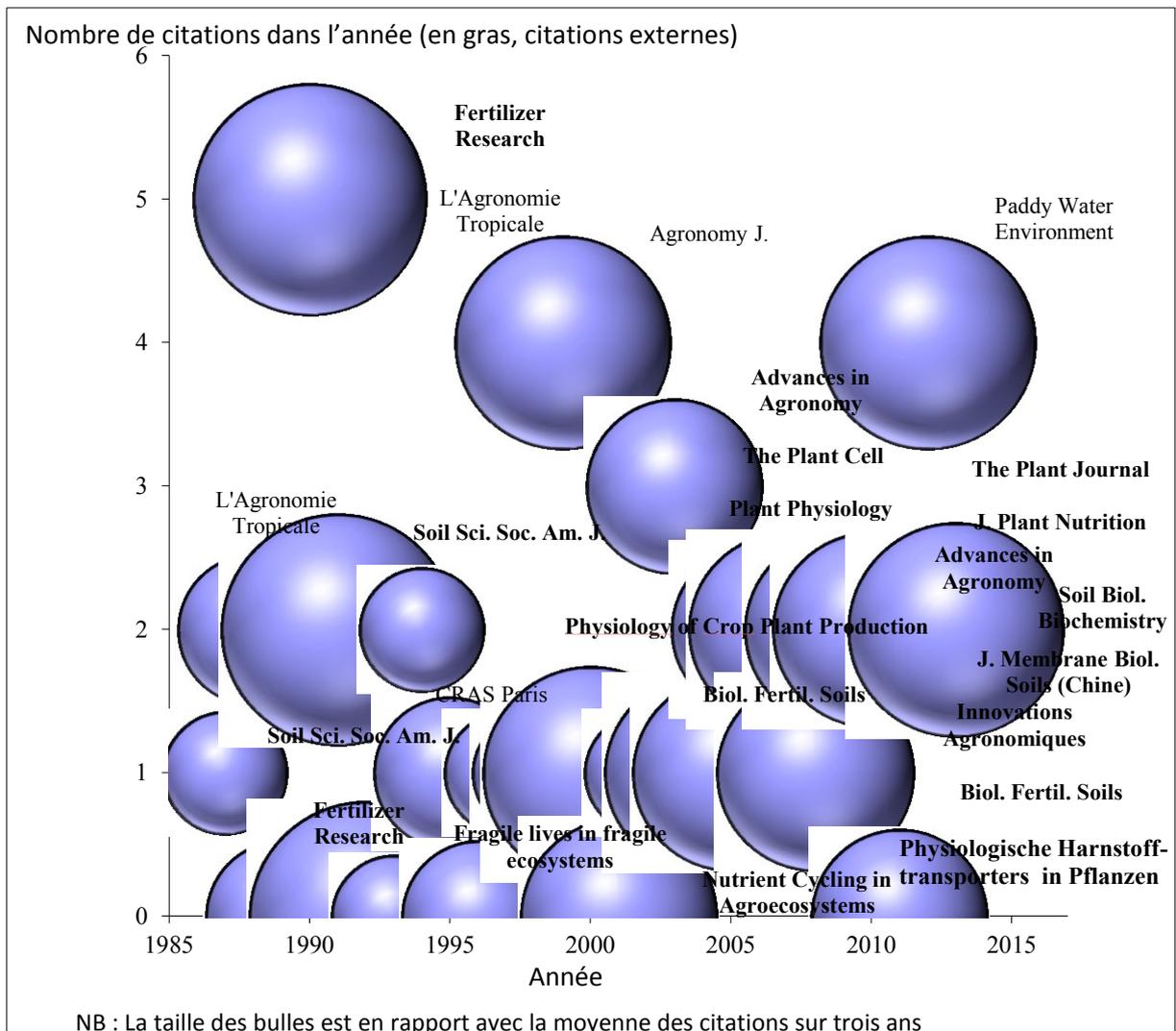


Figure 18. Cartographie des citations de nos articles parus dans *L'Agronomie Tropicale* (1985, 1987, 1988, 1990) et *Agronomy Journal* (1999)

-les implications physiologiques pour le fonctionnement de la plante : il y a couplage entre un volume restreint et fortement enrichi du sol et quatre touffes de riz. La plante met en place une stratégie rapide d'utilisation de cette ressource, l'azote ammoniacal : c'est la voie anaplérotique du cycle de Krebs qui fonctionne à plein pour l'assimilation. Les racines ne croissent plus dès lors qu'elles sont au cœur de la zone enrichie et il n'y a donc pas utilisation d'azote et surtout de carbone pour un nouveau tissu racinaire au moins à court terme. La seule contrainte qui s'impose au système est dès lors la fourniture de squelette carboné (oxo-glutarate) via l'activité de la PEPC (et autres systèmes enzymatiques associés) pour faire fonctionner le cycle GS-GOGAT (= *glutamine synthétase-glutamate oxo-glutarate amino-transférase*). La régulation de la PEPC devient le facteur de contrôle prépondérant de l'assimilation. Ceci explique d'une part le mécanisme du premier ordre et d'autre part que la constante de vitesse dépende en condition limitante du niveau de P du sol (Tableau 4).

Pour reprendre les mots de la communication que l'AUF m'a permis de présenter en 1991 au colloque bas-fonds et riziculture¹⁷ : « Pour une concentration en ammoniacque donnée, le pourcentage de photosynthétats allant à l'amino-synthèse est vraisemblablement le même quelle que soit la fertilité du sol mais la quantité de photosynthétats affectés à cette fonction varie avec le niveau de fertilisation PK puisque la photosynthèse globale en dépend ». Le système riz-supergranule d'urée fonctionne comme un révélateur de la fertilité globale de la rizière.

Un article de synthèse sur le même sujet vient d'être accepté (sous presse, déjà accessible en ligne) par *Paddy and Water Environment*¹⁸. Il présente les résultats obtenus avec des SGU de 4 g dans deux géométries de repiquage. Après un développement théorique sur la diffusion de l'azote ammoniacal en symétrie sphérique (SGU) ou cylindrique (urée en fil), il conduit à proposer une nouvelle génération d'engrais azotés : soit de l'urée sous forme de bâtonnets longs environ de 10 cm, soit sous forme d'une ficelle déroulable à appliquer avec l'aide d'un outil circulaire (poussé par l'applicateur) qui ne s'enfoncerait dans la rizière que d'environ 10 cm.

Il y a à travers le monde une prise de conscience croissante des difficultés de la fertilisation azotée du riz irrigué et des pertes énormes en azote avec les pratiques actuelles de fertilisation (25 % en ordre de grandeur), notamment dans les pays d'Asie (Inde, Chine) qui n'importent plus d'urée mais la fabriquent sur place. Pour information, des chercheurs du Bangladesh ont mis au point un prototype d'outil léger pour la mécanisation de l'apport des SGU (Hoque *et al.*, 2013). Les organismes de recherche-développement d'Afrique de l'Ouest se penchent aussi de plus en plus sur cette problématique du placement d'urée (Totin *et al.*, 2013 ; Bandaogo *et al.*, 2015). Les idées développées dans mon dernier article de *Paddy and Water Environment* conduiront peut-être aussi à de gros progrès d'ici la fin de la décennie, y compris pour la riziculture basée sur le semis (exemple de la Camargue).

¹⁷ Gaudin R. 1993. Caractériser la fertilité des sols de rizières par une mesure à l'interface des métabolismes carboné et azoté de la plante. Théorie, Méthode et Application. Colloque « Bas-Fond et Riziculture », Antananarivo décembre 1991, publié p. 305-312 ; CIRAD 1993, ISBN 2-87614-100-0 (éditeur : M. Raunet), 517 pages.

¹⁸ Gaudin R. & D'Onofrio G. 2015. Is the source-sink relationship in transplanted rice receiving deep placed urea supergranules dependent upon the geometry of transplanting? *Paddy and Water Environment* doi: [10.1007/s10333-014-0461-z](https://doi.org/10.1007/s10333-014-0461-z)

1.3. Eau dans le sol et pilotage en culture cannière

1.3.1. Etude des remontées capillaires en culture de contre-saison

A Madagascar, une action spécifique de l'ATP Bas-fonds portait sur l'établissement du bilan hydrique de cultures de contre-saison. La culture qui a eu le plus de succès dans les années 1980 a été l'orge, afin de satisfaire les besoins en malt de brasseries situées à Antsirabé. Des conditions de ressuyage minimal du sol s'imposent bien sûr après la récolte du riz pour permettre l'installation de la nouvelle culture. Les zones les plus favorables sont celles de plaine, dès lors qu'un drainage des rizières est pratiqué dans la ou les semaines qui précède(nt) la récolte. Un site a été instrumenté en tubes (pour accès à la sonde à neutrons) et tensiomètres (Fig. 19) afin de suivre de façon concomitante l'évolution des profils d'humidité et de potentiel hydrique sur un témoin et une culture de triticales (plus appropriée que l'orge dans les conditions climatiques de Tananarive). Un labour très superficiel a été pratiqué dès la récolte du riz et le semis du triticales est intervenu alors que la nappe était à 30-40 cm.

J'ai montré que le triticales s'alimentait en eau, autant à travers le stock d'eau du sol en ressuyage qu'à travers la remontée capillaire de la nappe (en-deçà de 1 m à la récolte)¹⁹. Le site étant assez argileux, la distance entre les racines et la nappe ne peut dépasser quelques décimètres (Fig. 20) sous peine de tarir la remontée d'eau. Ces résultats sont à comparer avec ceux de l'étude menée par Moutonnet (1972) sur le même phénomène pour un coton en culture de décrue (Fig. 21). La grande dynamique de nappe, la nature limoneuse du sol et la plus grande demande climatique font que le phénomène revêt une plus grande intensité dans le cas spécifique du coton.

Pour interpréter ces données, il faut revenir à la définition des remontées capillaires. On utilise pour cela un diagramme de potentiel total (Fig. 22) avec pour bissectrice la droite de saturation du sol ($H = -z$). Sur les profils successifs l'intersection des profils de charge hydraulique avec cette droite indique la profondeur de la nappe. Il apparaît nettement que la nappe reste en-deçà de 1 m à Ambohitrakoho alors qu'elle atteint plus de 2 m à Antanimalandy. Le flux d'eau est ascendant dans la zone insaturée car dH/dz est positif. Il semble mieux assuré sous coton car il n'y a pas d'inflexion majeure vers l'horizontale qui indique une limite au phénomène comme cela est observé sous triticales. Pour interpréter complètement les données, il faudrait connaître l'enracinement des deux cultures. Il est vraisemblable que c'est un enracinement limité sous triticales (sol argileux) qui limite l'amplitude spatiale de la remontée tandis que dans le cas d'Antanimalandy un enracinement facilité par la texture du sol amène la plante à bien prélever l'eau à moyenne profondeur et ainsi à faciliter la remontée capillaire sous-jacente.

¹⁹ Gaudin R. 1992. Evaluation de la remontée capillaire sous triticales de contre-saison en sol de rizière. *L'Agronomie Tropicale* 46(2):83-87



Figure 19. Dispositif expérimental pour l'étude des remontées capillaires. Le tube d'accès pour la sonde à neutrons dépasse du sol sur environ 1 m pour éviter que l'eau ne pénètre dans le tube en cas d'inondations de la plaine (photo R. Gaudin)

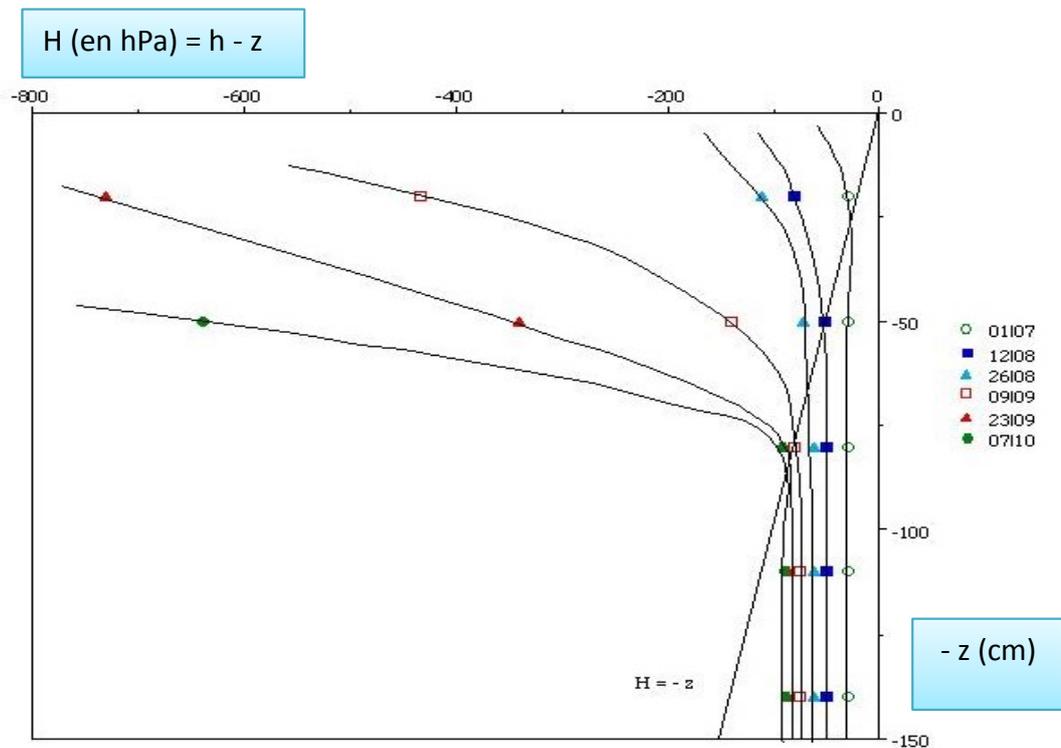


Figure 20. Profils de charge hydraulique (H) observés à Ambohitrakoho

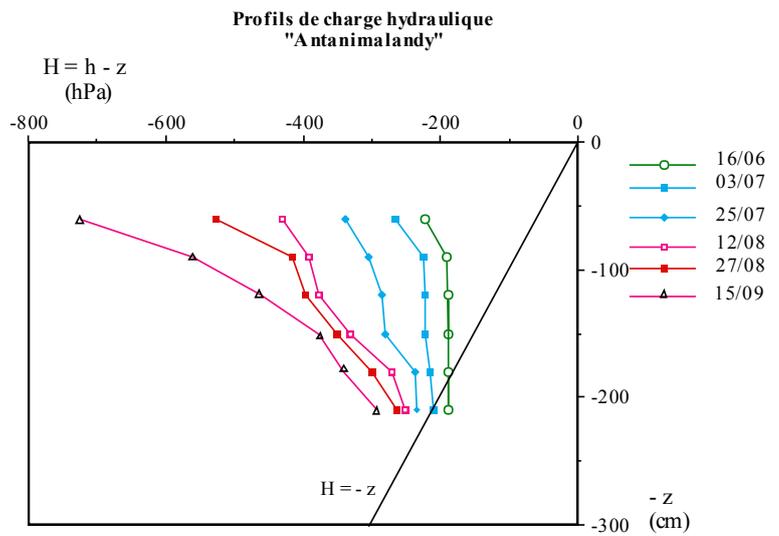


Figure 21. Vue du dispositif mis en place à Antanimalandy (photo P. Moutonnet) et profils de charge hydraulique tracés à partir des données de la publication dans *Terre Malgache* (1972)

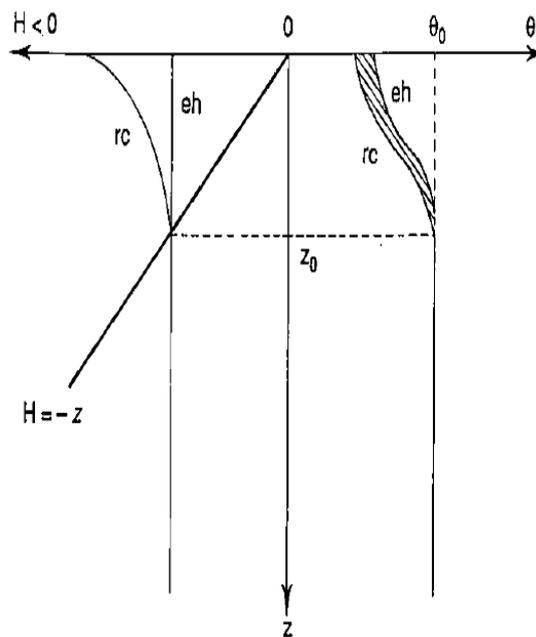


Figure 22. Profils de potentiel total H et d'humidité volumique correspondant à deux situations en présence de nappe. La profondeur de la nappe est donnée par l'intersection des profils de potentiel avec la bissectrice $H = -z$. L'équilibre hydrostatique (eh) est observé lorsque le sol est couvert. Une remontée capillaire (rc) se produit lorsque le profil $H(z)$ s'incurve vers la gauche

1.3.2. Formation d'un homologue national

En 1987 j'ai formé aux techniques de radio agronomie M. Mamisoa Rapanoelina, étudiant de l'EESSA Antananarivo (Etablissement d'enseignement supérieur en sciences agronomiques). Il a étudié la relation entre capacité de rétention et rétention spécifique. La rétention spécifique est une grandeur qui caractérise du point de vue hydrique un réservoir de sol limité en profondeur. Cette notion a été étudiée par O. Jourdan sur les lysimètres du LRI, à travers des mesures de potentiel hydrique et j'ai proposé à M. Rapanoelina d'aborder ce sujet par des mesures d'humidité. Après obtention de son diplôme, je l'ai accompagné dans la conception de l'expérimentation à mettre en œuvre pour le nouveau périmètre sucrier d'Analaiva-Morondava (ouest de Madagascar).

1.3.3. Etudes tensiométriques à Analaiva-Morondava (société sucrière SIRANALA)

Les sols de la région de Morondava sont désignés sous le vocable de « sables roux ». Ce ne sont pas vraiment des sables, mais plutôt des sols limono-sableux à sablo-limoneux. Très filtrants, ils conviennent bien aux cultures à enracinement profond comme la canne à sucre. La pratique de l'irrigation est envisageable mais il faut se prémunir contre le risque de drainage naturel qui peut accompagner toute irrigation « excédentaire ». Au début des années 1980, la Banque Africaine de Développement a financé l'installation d'une sucrerie à Analaiva, la SIRANALA, ainsi que le développement de l'irrigation à travers la mise en place de 33 pivots couvrant 2300 ha (Fig. 4 en partie 1.1.3). L'eau est prélevée dans un canal d'amenée depuis la rivière Dabara ou pompée dans la nappe. Le choix de l'irrigation par pivot et la définition du périmètre ont été basés sur la connaissance des propriétés hydrodynamiques des sols acquise par P. Marini, P. Villemin et O. Jourdan, ainsi que toute l'équipe technique du LRI en 1975. Notons au passage que c'est l'une des premières fois qu'une équipe française utilisait à grande échelle la méthode du drainage interne, vulgarisée par D. Hillel (Israël) et G. Vachaud (Grenoble) (Hillel *et al.*, 1972 ; Hillel, 1980).

A la suite de longues discussions avec P. Oriol, chercheur du CIRAD en poste à la SIRANALA, j'ai trouvé une analogie entre le problème à étudier et celui traité par Gasser et Ross (1975) sur une autre problématique (mesure et tracé de la répartition de l'azote après injection en ligne d'ammoniac sous prairie) et je m'en suis inspiré pour définir un dispositif qui permette de suivre en plusieurs dimensions les mouvements d'eau sous culture de canne, lorsque celle-ci est irriguée par pivot. Ce dispositif installé par M. Rapanoelina consistait en un réseau de tensiomètres occupant deux inter-rangs (Fig. 23). Il a permis de mettre en évidence des flux obliques d'eau, sur une année entière, et une inversion des flux après la saison des pluies si l'on sèvre assez tôt la culture. Les courbes d'iso-potentiel hydrique ont pu être tracées grâce à la technique d'interpolation de Gasser et Ross, très proche de celle du krigeage²⁰ ; la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques du sol (Fig. 24) a alors rendu possible l'estimation de l'intensité des flux hydriques (Fig. 25). Pour la

²⁰ Gaudin R., Rapanoelina M. & Oriol P. 1990. Rapport des études tensiométriques pour l'irrigation à la SIRANALA. Laboratoire de Radio Isotopes / SIRANALA, 42 pages

valorisation, M. Moutonnet (CEA) m'a orienté sur un logiciel de calcul devenu classique en matière géostatistique (Fig. 26).



Figure 23. Vue partielle des cannes tensiométriques occupant une partie d'un inter-rang sur le plot B7 de la SIRANALA (photo R. Gaudin). Ici vue d'une seule batterie de tensiomètres. Le dispositif comporte 3 batteries de part et d'autre d'une ligne de référence

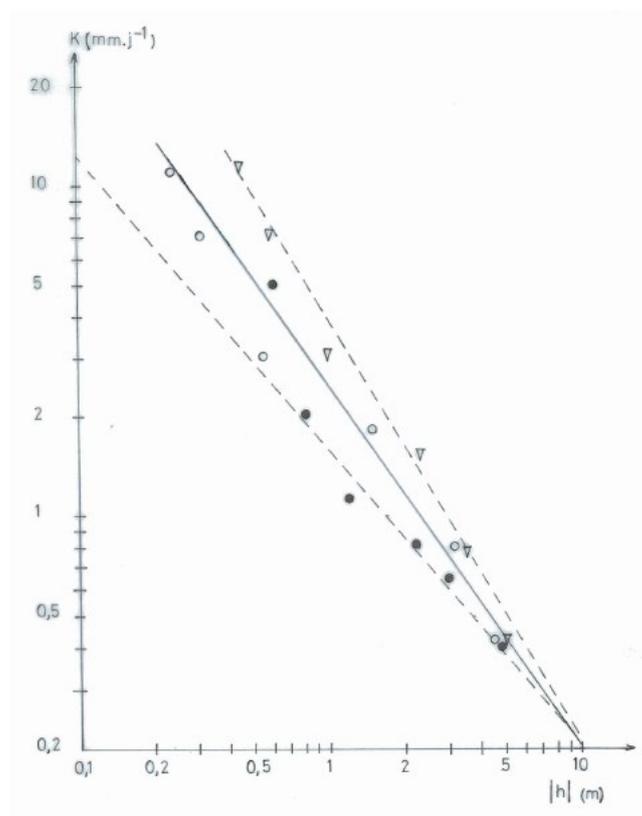


Figure 24. Relation $K(h)$ obtenue à partir des données $h(\theta)$ et $K(\theta)$ de sols à la texture très proche de celle où a été implanté le dispositif dit isopotential. Les courbes $h(\theta)$ et $K(\theta)$ des trois sites étudiés par Marini (Andriamanampisoa *et al.*, 1975) sont accessibles à l'adresse suivante : <https://hal-auf.archives-ouvertes.fr/hal-01071311>

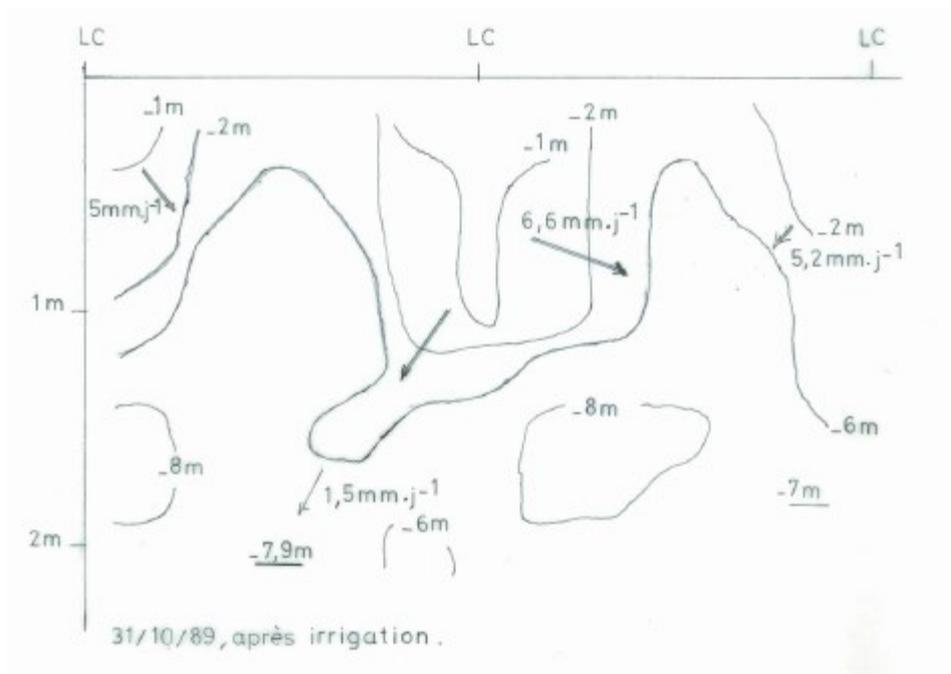


Figure 25. Exemple de carte des flux obtenue par application de la loi de Darcy-Buckingham à la perpendiculaire des courbes d'isopotential hydrique (repousse de 4,5 mois). La distance entre lignes de canne (LC) est 165 cm

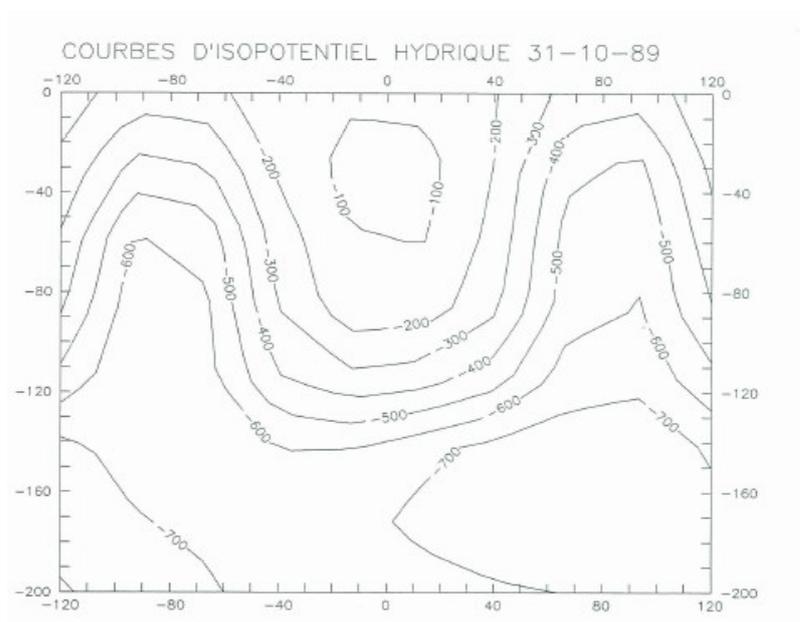


Figure 26. Analyse des données de potentiel par la méthode du krigeage (logiciel SURFER). La zone représentée est centrée sur la ligne centrale

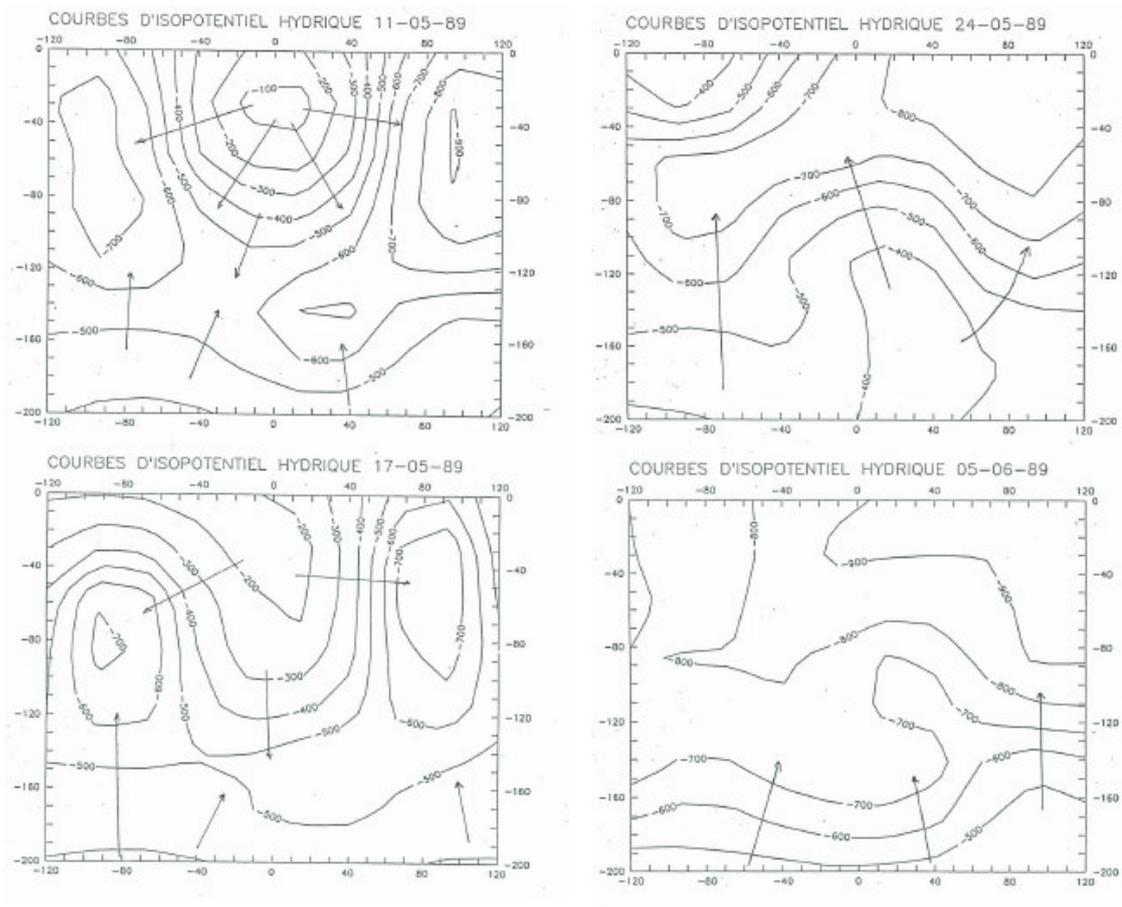


Figure 27. Effet entonnoir très marqué après cumul fortuit d'un arrosage de 20 mm et d'une pluie de 18 mm entre le 11 et le 17/05/89. Le flux ascendant profond se maintient en mai mais se tarit progressivement comme recherché dans la phase de sevrage de la canne (carte du 05/06/89). Les vecteurs indiquant la direction et le sens des flux ont été rajoutés sur les cartes issues du traitement par le logiciel

Les cartes produites par le logiciel de krigeage ne portent aucune indication de flux. Le traitement original des données (Fig. 25) porte une indication des valeurs de flux mais il est évident que les valeurs calculées sont entachées d'une grande incertitude car la relation qui lie la conductivité hydraulique à l'humidité est une relation exponentielle (une variation de quelques % d'humidité entraîne un changement par un facteur 10 de la conductivité). En conséquence seuls les vecteurs de flux ont pu être rajoutés aux cartes pour leur valorisation dans les publications. Les valeurs données en figure 25 sont cependant à mes yeux plausibles.

Ces travaux ont conduit à proposer un pilotage des arrosages par tensiomètres^{21,22} (Fig. 28). Dans la phase de repousse des cannes, il est préconisé de tenir compte de

²¹ Oriol P., Rapanoelina M. & Gaudin R. 1995. Le pilotage de l'irrigation de la canne à sucre par tensiomètres. *Agriculture et Développement* 6:39-48

²² Gaudin R., Rapanoelina M. & Oriol P. 1998. Analyses tensiométriques appliquées au pilotage d'irrigation. *Cahiers Agricultures* 7:131-138

l'information de tensiomètres assez proches de la surface (installés aux cotes 25 cm et 50 cm) et de ne pas humidifier en profondeur (sous 1 m) le profil. Quand les cannes ont atteint leur vitesse maximale de croissance, le fonctionnement du pivot (dose de 20 mm) peut être asservi à des indications de tensiomètres de moyenne profondeur.

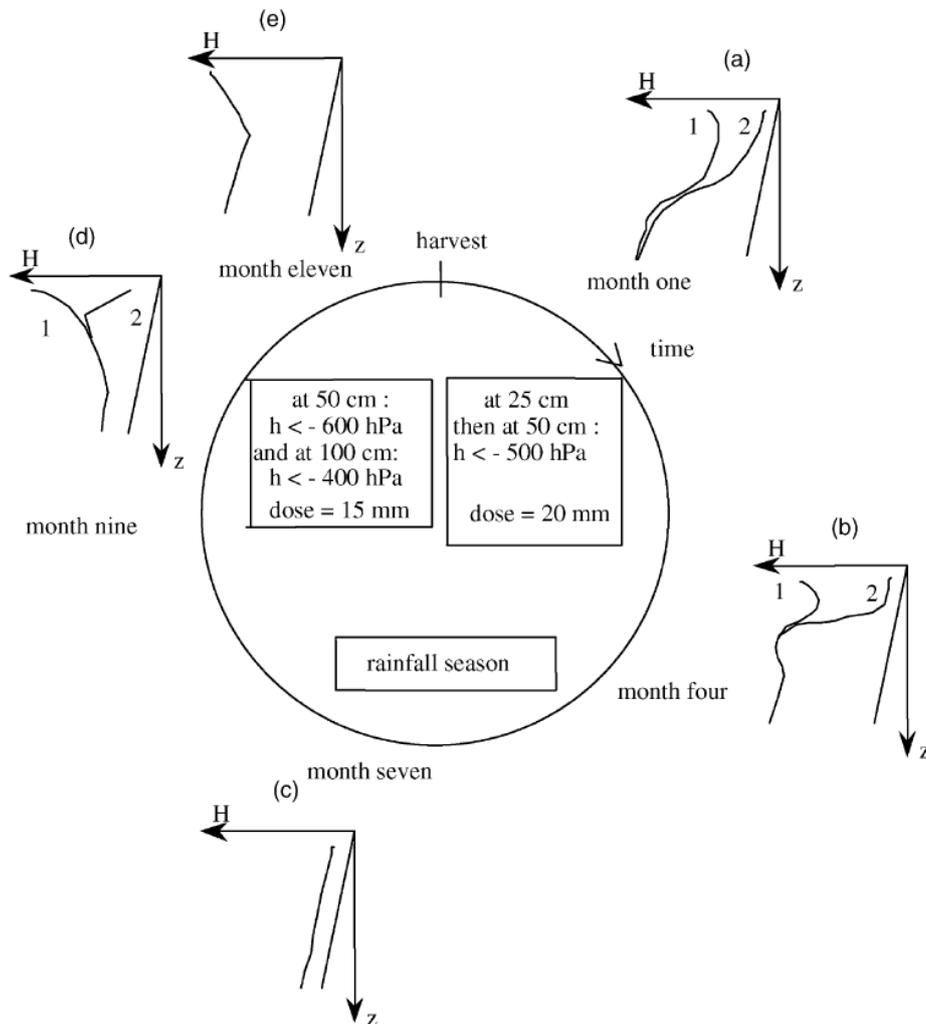


Figure 28. Schéma du code de pilotage et profils de charge hydraulique typiques des différentes périodes du cycle²³

La saison des pluies apporte un relais efficace mais casse aussi la maîtrise des flux hydriques puisque tout le profil est humidifié. En fin de saison de pluies, la canne assèche progressivement le profil mais ce n'est que lorsque la zone profonde (vers 1,5 m) est sollicitée qu'il faut envisager un relais par les pivots d'arrosage.

A la récolte, le profil hydrique sera sec : d'une part cela favorise la maturation de la canne (fort taux de sucre), d'autre part cela va permettre la maîtrise des flux d'eau sous repousse à travers un rationnement strict des arrosages.

²³ Gaudin R. & Rapanoelina M. 2003. Irrigation based on a nomogram using soil suction measurements. *Agricultural Water Management* 58(1):45-53

Les recherches que j'ai effectuées à la SIRANALA ont conduit à revisiter le classique diagramme de potentiel hydrique. De façon traditionnelle, celui-ci présente en bissectrice la droite de saturation (exemples en figures 20, 21, 22 et 28). J'ai aménagé ce diagramme pour accueillir des droites parallèles, chacune correspondant à une intensité des flux hydriques traversant le profil²⁴ (Fig. 29). Ces résultats novateurs ont été publiés dans la revue de référence en la matière, *Agricultural Water Management*²⁵ et complètent bien les travaux menés par C. Isbérie (Cemagref) en région provençale (Tron *et al.*, 2000).

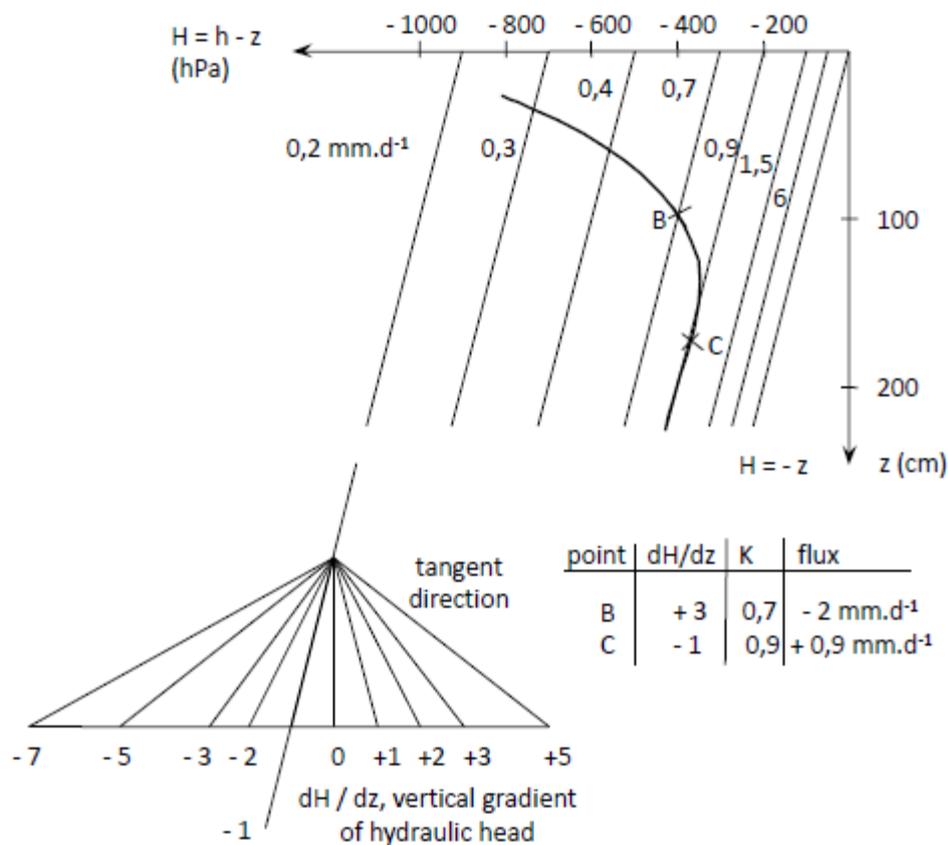


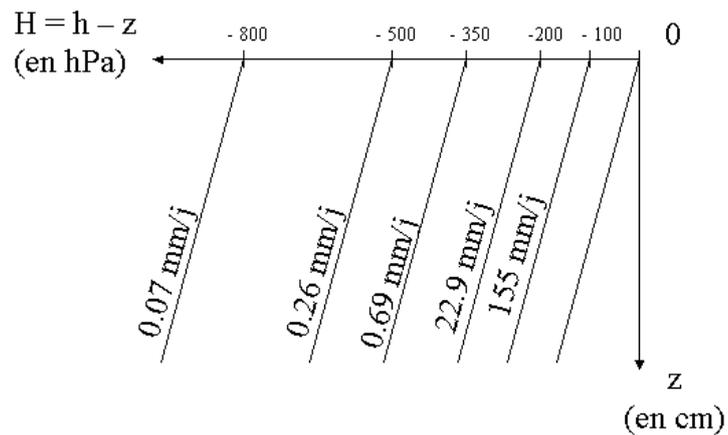
Figure 29. Calcul des flux hydriques verticaux à l'aide d'une abaque intégrée au profil de charge hydraulique. Exemple du plot B7 du périmètre sucrier d'Analava

Cette abaque présente un intérêt évident pour tous les sols légers, c'est-à-dire à la texture sableuse, sablo-limoneuse et limono-sableuse. Même si l'on ne dispose des caractéristiques hydrodynamiques mesurées *in situ*, il est possible d'approcher celles-ci via les fonctions de pédo-transfert et l'outil informatique qui en a dérivé, le calculateur de

²⁴ Rapanoelina M., Gaudin R. & Oriol P. 1999. Sables roux, pivots, tensiomètres : comment ajuster l'irrigation ? *Agriculture et Développement* 24:127-130

²⁵ Gaudin R. & Rapanoelina M. 2003. Irrigation based on a nomogram using soil suction measurements. *Agricultural Water Management* 58(1):45-53

Saxton (Rawls *et al.*, 1982). Un exemple est donné en figure 30 pour un sol du bassin maraîcher de Perpignan. Le tracé de ces droites montre pour ce type de texture la difficulté à éviter les transferts d'eau (et en conséquence d'azote) lors des épisodes pluvieux méditerranéens puisque les profils de charge hydraulique s'adaptent facilement au flux entrant délivré par les orages.



Sol jonquières bas (Elne, 66) avec 38.6 % sable, 15.2 % argile, m.o. 1.2 %,
Densité apparente du sol sec : 1.53

Calcul à partir des caractéristiques hydrodynamiques du sol

Figure 30. Insertion de profils de charge hydraulique à pente unitaire ($dH/dz = -1$) dans la trame du diagramme de potentiel total. Ici, sol du bassin maraîcher de Perpignan

Un autre point important pour le pilotage des arrosages est la forme des oscillations de potentiel hydrique. Elles sont systématiquement concaves vers le haut dans la phase de prélèvement d'eau par la plante (ici la canne) et redescendent au niveau le plus bas de succion juste après arrosage. La phase concave donne une image en symétrie de la partie basse de la courbe caractéristique de l'humidité du sol²⁶ comme l'illustre la figure 31.

C'est cette forme de l'oscillation qui rend le pilotage par tensiomètres si intéressant. Quand on peut mettre en place plusieurs batteries de tensiomètres, il faut accorder plus d'importance à la vitesse d'évolution des valeurs de potentiel qu'aux valeurs de potentiel elles-mêmes (Tron *et al.*, 2000).

²⁶ Gaudin R., Rapanoelina M. & Oriol P. 1998. Analyses tensiométriques appliquées au pilotage d'irrigation. *Cahiers Agricultures* 7:131-138

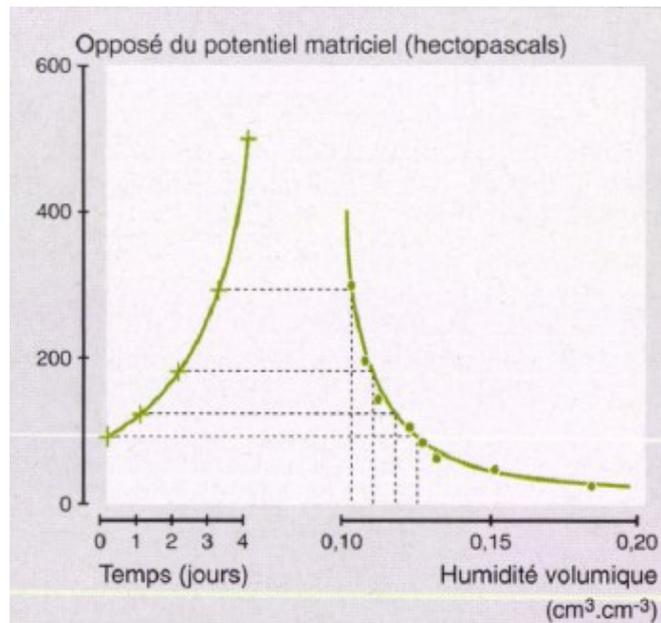


Figure 31. Mise en relation de la montée de la succion observée sur la batterie déclencheuse avec la courbe caractéristique de l'humidité du sol. Période du 15 au 19 septembre 1988. La culture semble consommer en cet endroit à peu près la même hauteur d'eau chaque jour puisqu'à chaque Δt (temps) de 1 jour correspond le même $\Delta\Theta$ (intervalle d'humidité volumique)

Au bilan les études menées à Analaiva auront permis de mieux comprendre le fonctionnement du système sol-canne à sucre. Sur ce type de sol filtrant l'irrigant doit absolument éviter d'humidifier la partie basse du sol s'il veut maintenir sous contrôle les flux hydriques au sein du profil. Ces flux ne sont pas seulement verticaux. La composante oblique traduit l'interception préférentielle de l'eau d'arrosage par les tiges mais aussi la dynamique de prélèvement racinaire notamment en phase de sevrage. Son observation nécessite un dispositif de tensiomètres en réseau. Celui-ci doit avoir une résolution suffisante pour mettre en évidence les courbes d'isopotential qui déterminent l'orientation spatiale des flux (éq. 2).

1.4. Eau et vigne

1.4.1. Problématique du bilan hydrique de la vigne

La vigne est une culture particulière du point de vue hydrique. En effet, pour produire un vin de qualité à partir des raisins récoltés, il faut que ceux-ci présentent des caractéristiques (sucres, acides, polyphénols, etc.) qui traduisent cette qualité, lesquelles n'auront pu être obtenues que par un vécu de stress hydrique « optimal » entre la floraison et la récolte et notamment à compter du stade intermédiaire de la véraison. Dans le même temps, la plante présente une forte régulation stomatique qui lui permet de vivre avec peu d'eau disponible dans le sol, à des niveaux de transpiration voisins de $0,5 \text{ mm.j}^{-1}$, voire plus bas si nécessaire. Elle a aussi un enracinement développé qui lui permet d'accéder aux couches assez profondes du sol.

Les chercheurs peuvent simuler le bilan hydrique de la vigne du débourrement à la récolte, s'ils disposent de données climatiques pour le calcul de l'évapotranspiration de référence et des données journalières de pluies. Les modèles sont basés sur une description mathématique simple de la dynamique de croissance végétative (en relation avec la somme des températures) et de la régulation de la transpiration en relation avec l'eau disponible du sol.

Trois autres phénomènes sont importants dans le bilan hydrique : le ruissellement, l'évaporation du sol nu et la transpiration d'un enherbement intercalaire si celui-ci est présent.

L'expression mathématique de ce bilan hydrique est :

$$ASW_i = I + P + ASW_{i-1} - Runoff - E - Tr - Dr \quad (9)$$

où ASW_i désigne l'eau transpirable du sol disponible au jour i , I la dose éventuelle d'arrosage, P la pluie journalière, $Runoff$ le ruissellement, E l'évaporation du sol nu, Tr la somme des termes de transpiration, Dr le drainage

Cette équation s'applique au pas de temps journalier. Pendant longtemps, son emploi s'est limité à la période allant du débourrement à la récolte. Le stock initial ASW_{ini} (vers la fin du mois de mars) était mesuré ou bien estimé par défaut. Dans la plupart des cas, la valeur maximale de recharge du sol était retenue :

$$ASW_{ini} = TTSW \quad (10)$$

où $TTSW$ désigne la quantité totale d'eau du sol disponible pour la transpiration ($TTSW = Total\ Transpirable\ Soil\ Water$) obtenue par différence des stocks d'eau du sol entre un profil à la capacité de rétention et le profil le plus sec observé sur plusieurs années.

L'opérationnalité de l'équation du bilan hydrique tient à plusieurs facteurs que nous allons analyser en même temps que nous allons préciser certains termes du bilan. Le premier point important concerne l'évaluation de $TTSW$ ou bien de ASW à une date donnée (en vue de vérifier sa prévision d'évolution). La profondeur sur laquelle s'effectue le calcul

correspond à la profondeur d'enracinement qui atteint dans le cas de la vigne plusieurs mètres. C'est pour cette raison que l'emploi de la méthode neutronique de mesure de l'humidité des sols est presque incontournable. L'installation de tubes profonds d'accès pour la sonde à neutrons et l'étalonnage neutronique sont alors les points sur lesquels porte l'effort d'expérimentation. La figure 32 montre un exemple de profils obtenus par cette méthode²⁷. La *TTSW* est d'autant plus élevée que le sol est argileux et moins caillouteux. Elle atteint sur cet exemple 270 à 300 mm.

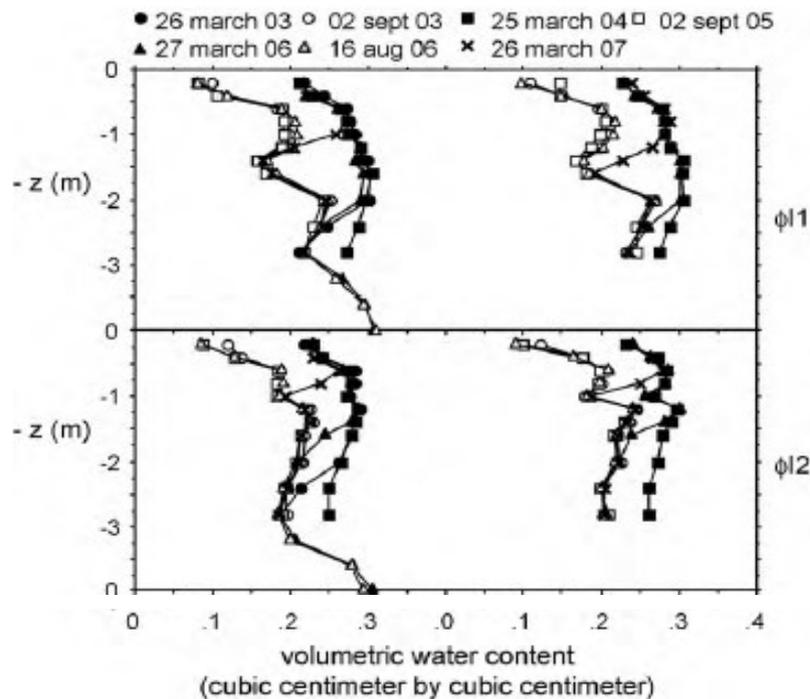


Figure 32. Profils d'humidité volumique au débourrement et à la récolte, à la fois sur le rang (à gauche) et sur l'inter-rang (à droite), sur deux placettes d'une vigne cultivée en sol nu. Parcelle du Larzat au Domaine du Chapitre, Villeneuve-les-Maguelone

Le terme d'évaporation du sol nu est difficile de mesure mais la procédure de calcul qui le concerne est très bien décrite dans le bulletin 56 d'irrigation et de drainage de la FAO (Allen *et al.*, 1998). Elle fait intervenir la texture du sol et l'historique des pluies.

Le terme de transpiration de la vigne est bien décrit dans Lebon *et al.* (2003). Il s'écrit :

$$Tr = \{ \min(1, FTSW_{i-1} / 0,4) \} \times k_c \times ET_0 \quad (11)$$

où k_c désigne le coefficient cultural de la vigne, ET_0 est l'évapotranspiration de référence (Allen *et al.*, 1998) et $FTSW$ (= *Fraction of Transpirable Soil Water*) est le rapport de ASW à $TTSW$.

²⁷ Gaudin R., Celette F. & Gary C. 2010. Contribution of runoff to incomplete off season soil water refilling in a Mediterranean vineyard. *Agricultural Water Management* 97(10):1534-1540

Dans cette formulation la localisation du prélèvement d'eau par les racines n'est pas précisée de telle sorte qu'on pourrait penser que c'est une formulation très sommaire. Le fait qu'il ait plu ou non la veille ne modifie pas la procédure de calcul du flux de transpiration car on considère que c'est la moyenne de l'humidité du profil qui génère la régulation de la transpiration. Le fait que les couches superficielles du sol soient très bien rechargées en eau (après une pluie) n'entraîne une modification dans la consommation de l'eau que par le nouveau *FTSW* introduit dans l'équation 11. Une justification à ce point de vue est que la trajectoire hydrique des vignobles méditerranéens est celle d'un assèchement du sol avec les mécanismes physiologiques associés. Il n'y a que très rarement une trajectoire inverse.

Le terme de ruissellement est le plus difficile à calculer car les épisodes de pluie en climat méditerranéen peuvent être intenses. Ils interviennent cependant essentiellement en fin d'été ou en automne donc la plupart du temps en dehors de la période de culture ou juste avant les vendanges. C'est cette position temporelle des orages qui ont conduit les premiers utilisateurs du bilan hydrique de la vigne à n'utiliser le bilan hydrique que sur la période du débourrement à la vendange.

Le terme drainage est calculé pour respecter le non-dépassement de *ASW* par *TTSW*. Il n'est pas envisagé dans ce modèle de remontée capillaire.

Le point fort du modèle est l'existence d'une relation exponentielle entre le potentiel hydrique de base de la vigne et la *FTSW* (Fig. 33). Une relation similaire est obtenue par translation de la partie médiane à supérieure de la courbe caractéristique de l'humidité du sol (van Leeuwen *et al.*, 2010). Cette relation robuste sert pour comparer les prévisions du modèle (alors exprimées en valeur de potentiel hydrique) aux valeurs données par les mesures avec une chambre à pression.

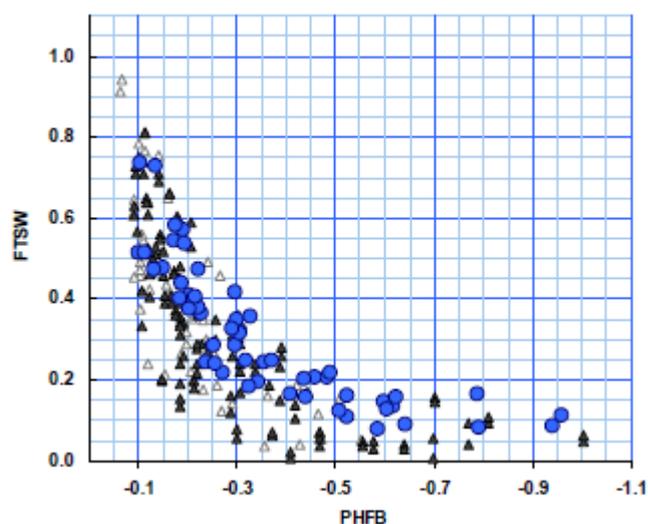


Figure 33. Relation entre le potentiel hydrique foliaire de base (PHFB en MPa) et *FTSW* pour des vignobles localisés en Alsace et en Languedoc. Triangles noirs : Lebon *et al.* (2003), triangles transparents : Pellegrino *et al.* (2004), ronds bleus : Celette (2007)

1.4.2. Passage du bilan hydrique saisonnier au bilan hydrique pluriannuel

Dans cette question du bilan hydrique de la vigne, je me suis focalisé sur l'étude du ruissellement. C'est une question complexe que j'ai d'abord envisagée du point de vue expérimental. Dans le cadre du suivi pluriannuel des termes du bilan hydrique sur la parcelle du Larzat, j'ai proposé d'isoler certaines placettes à l'aide d'une bande en caoutchouc fixée dans le sol et de faire transiter l'eau de ruissellement dans des augets basculeurs avant de l'évacuer hors de la parcelle via des canalisations souterraines. Des données de ruissellement ont ainsi pu être enregistrées au pas de temps du quart d'heure sur une dizaine d'épisodes pluvieux de diverse intensité. Un exemple d'enregistrement est donné en figure 34.

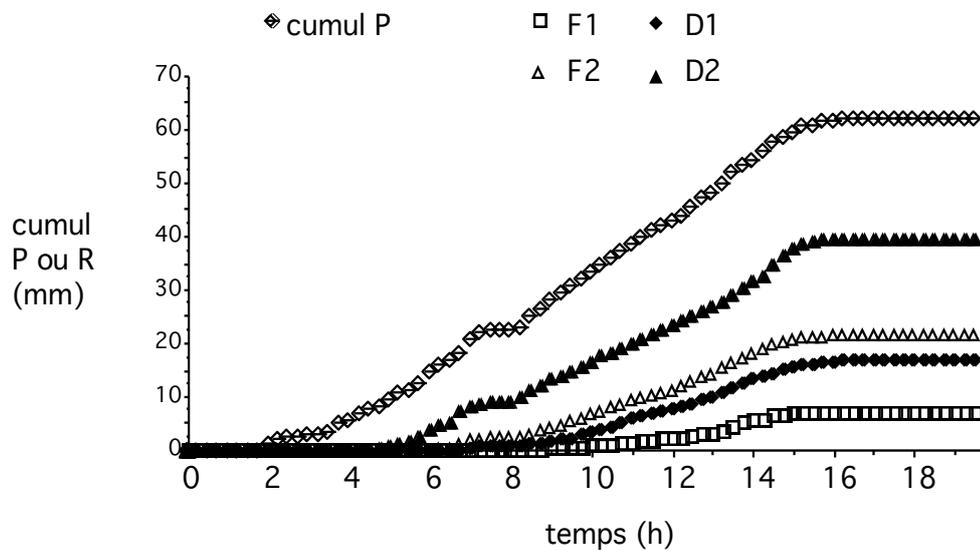


Figure 34. Cumuls de pluie (P) et de ruissellement (R) sur deux placettes enherbées (F1 et F2) et deux placettes désherbées (D1 et D2) sur un épisode de moyenne intensité.

Un point à souligner est la grande diversité des types de pluie qui affectent un vignoble (Fig. 35). Cela va de la pluie intense de quelques heures typique des orages méditerranéens (pouvant se décomposer en sous-épisodes) à une pluie forte de moyenne intensité (exemple en fig. 34) ou bien une pluie faible continue de durée très variable, pouvant dans certains cas dépasser 24 heures (exemple de la pluie de fin janvier 2006 sur fig. 35).

L'analyse la plus approfondie possible des données de ruissellement passe donc par une prise en compte de la cinétique des pluies qui génèrent ce phénomène. Mais si on applique ce point de vue, cela suppose de disposer pour chaque épisode futur de cette cinétique. Dans le cadre du bilan hydrique de la vigne, cela supposerait d'articuler un sous-module de calcul du ruissellement qui aurait son propre pas temporel de calcul.

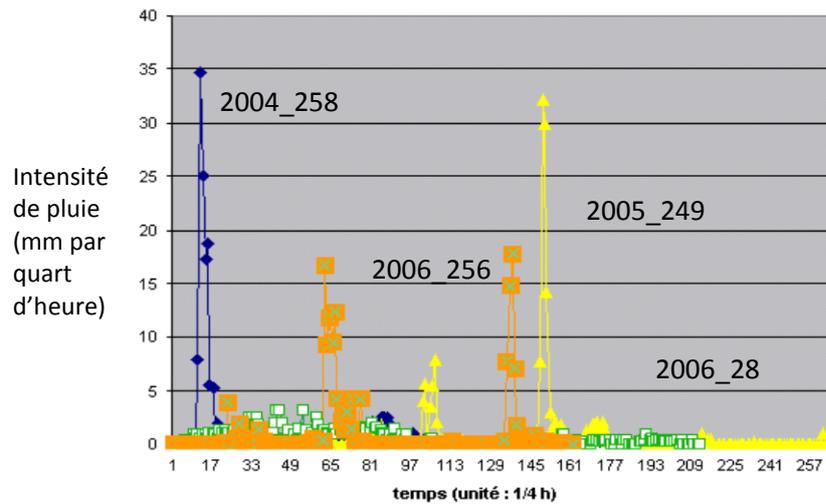


Figure 35. Dynamique des quatre épisodes pluvieux les plus productifs de 2004 à 2006. Données mesurées grâce à un pluviomètre installé sur la parcelle du Larzat à Villeneuve-les-Maguelone

Pour contourner cette difficulté, j'ai proposé d'employer la méthode du numéro de courbe. Cette méthode a été développée au sein du service de conservation des sols de l'USDA (United States Department of Agriculture) : c'est une méthode robuste qui fonctionne au pas de temps journalier et emploie un paramètre principal dit *curve number (CN)*. Les valeurs de *CN* dépendent du type de sol et de l'entretien du sol (Tableau 5).

La valeur du *CN* permet le calcul d'un paramètre *s* dit de rétention :

$$s = (25400 / CN) - 254 \quad (12)$$

qui sert pour le calcul du ruissellement qui n'apparaît que si la pluie est supérieure à $0,2 s$. Sa formule est alors :

$$R = (P - 0,2 s)^2 / (P + 0,8 s) \quad (13)$$

Tableau 5. Valeurs du *CN* selon le type de sol et l'entretien du sol (Romero *et al.*, 2007)

Groupe de sol	A	B	C	D
Texture	Sableuse	Limoneuse	limono-argileuse	Argileuse
Perméabilité (mm/j)	800	90	30	6
nu	72	83	89	93
labouré	57	71	76	80
enherbé	55	75	82	89

Avec cette description du ruissellement et l'emploi de la méthode FAO pour le calcul de l'évaporation du sol nu, M. Manuel, étudiant de Master sous mon encadrement, a articulé pour la première fois des saisons successives de culture dans la même feuille de calcul (tableur excel). La figure 36 illustre ce changement dans l'emploi du bilan hydrique. Les paramètres nécessaires au calcul sont précisés dans le tableau 6.

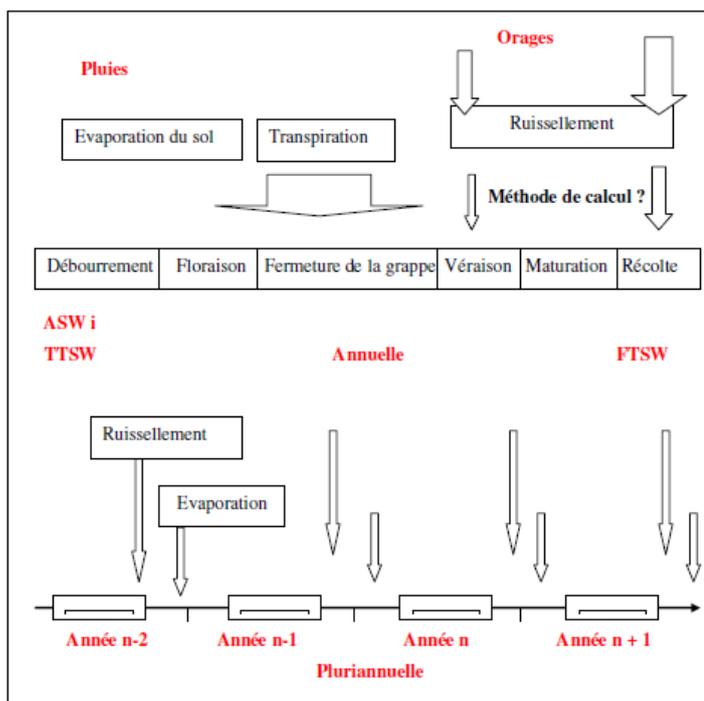


Figure 36. Passage d'une simulation valable seulement sur une partie de l'année (débourrement à vendange) à une simulation pluriannuelle (d'après M. Manuel, mémoire de Master, 2007)

Tableau 6. Paramètres servant au bilan hydrique pluriannuel de la vigne cultivée en sol nu

Paramètre	Signification	Gamme de variation
<i>TTSW</i>	Total transpirable soil water	100 à 300 mm
<i>Seuil</i> (ΣT)	Somme des températures pour $k = k_c$	autour de 380 °C.jour
k_c	Coefficient cultural	entre 0,4 et 0,55
<i>CN</i>	Numéro de courbe	entre 70 et 95
<i>TEW</i>	Lame d'eau totale évaporable du sol	entre 12 et 30 mm (selon texture)
<i>REW</i>	Lame d'eau facilement évaporable du sol	entre 6 et 12 mm

Le résultat le plus spectaculaire permis par ces simulations est la prévision du niveau de recharge du sol au débourrement. Une analyse fréquentielle²⁸ effectuée avec les données de la station météo de Fréjorgues a montré que la recharge n'était la plupart du temps que partielle (Fig. 37). Les résultats expérimentaux obtenus sur la parcelle du Larzat confirment cette approche (Fig. 32).

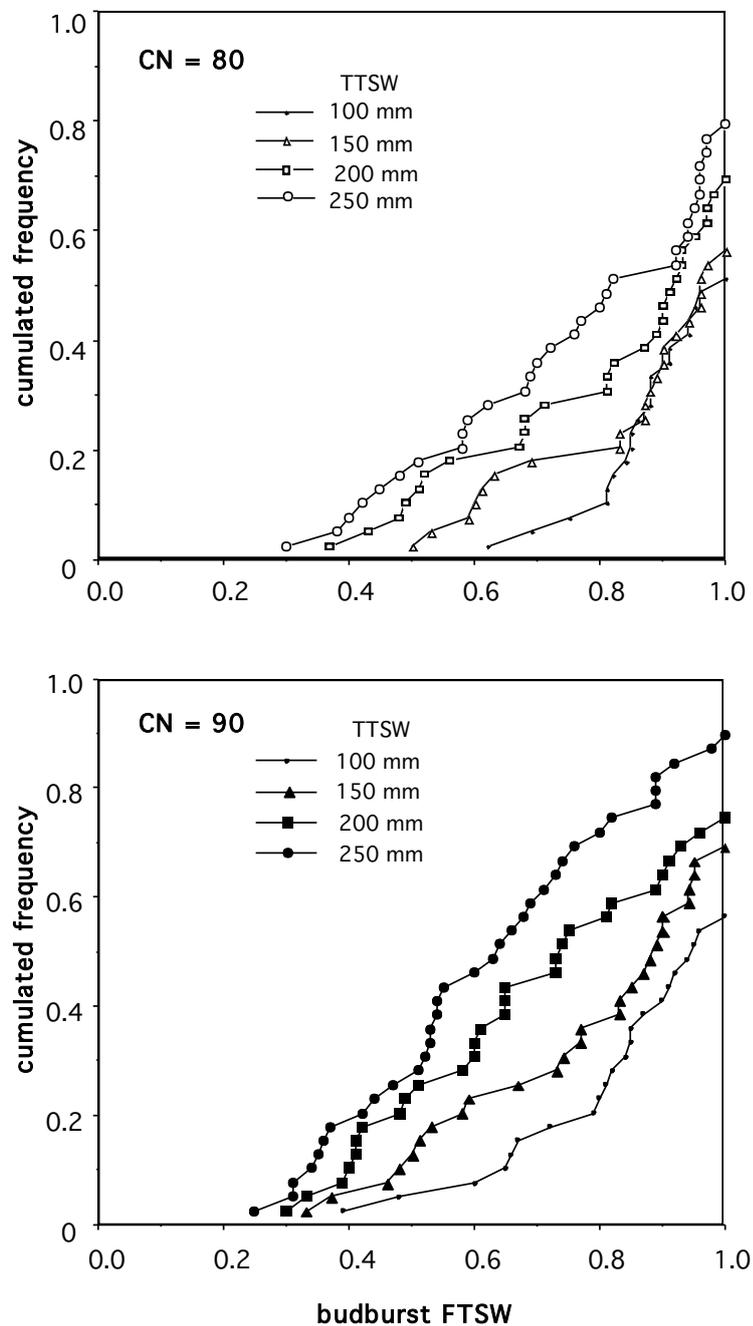


Figure 37. Fréquence de non-dépassement de la FTSW au débourrement pour un sol soumis à un ruissellement modéré (CN = 80) ou bien intense (CN = 90)

²⁸ Gaudin R. & Gary C. 2012. Model-based evaluation of irrigation needs in Mediterranean vineyards. *Irrigation Science* 30(5):449-459

1.4.3. Enherbement du vignoble

L'enherbement du vignoble permet d'améliorer les choses au moins jusqu'à la période du débourrement (Fig. 38) mais au printemps l'herbe va concurrencer la vigne dans l'accès à la ressource hydrique. Il en résulte des changements dans les termes du bilan hydrique, qu'il faut analyser sur des échelles spatiale (occupation différentielle de volume de sol) et temporelle (décalage phénologique)²⁹. Notamment, la présence d'enherbement peut entraîner un prélèvement très actif de l'eau dans les couches superficielles et conduire (en sols profonds) les racines de la vigne à aller chercher de l'eau très bas dans le sol, jusqu'à 5 m de profondeur sur le site étudié de Villeneuve-les-Maguelone (Hérault).

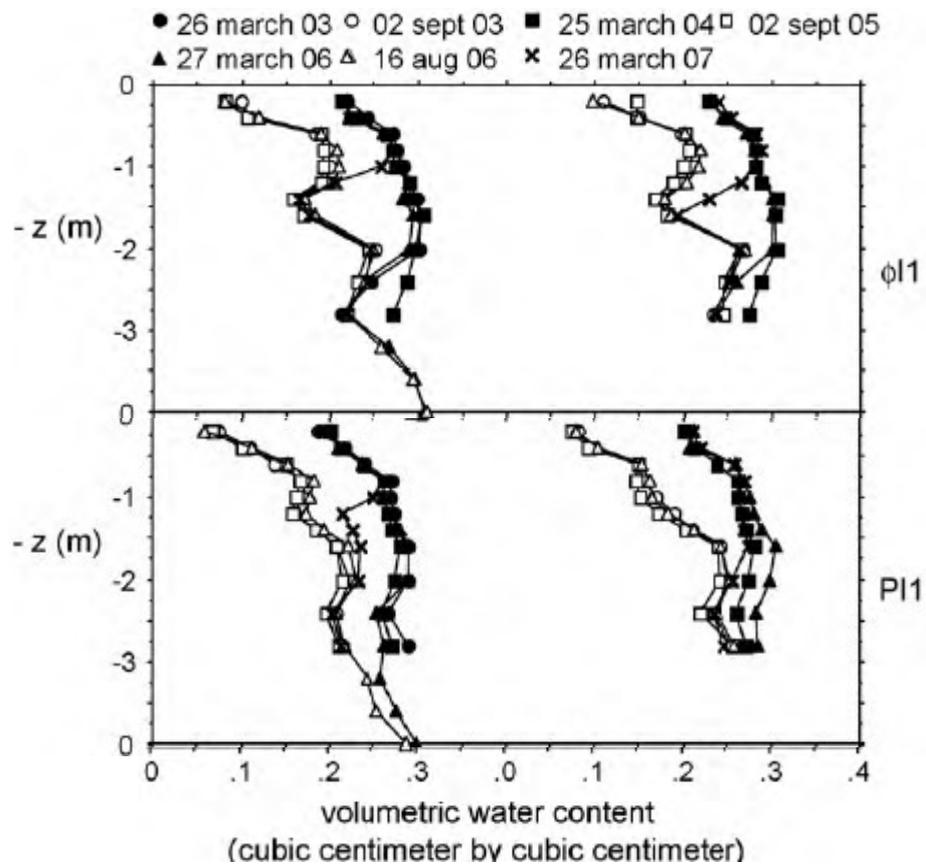


Figure 38. Comparaison des profils hydriques au débourrement et à la récolte pour une vigne dés herbée (en haut) et en herbée (en bas). Mesures sur le rang à gauche et sur l'inter-rang à droite

Comme pour les vignobles dés herbés, il est possible d'enchaîner le bilan hydrique de plusieurs saisons de culture dans le cas d'un vignoble en herbé mais il faut bien entendu préciser les différentes opérations (tonte, destruction) qui concernent l'enherbement. Cette problématique a été traitée par Celette *et al.* (2010) dans le modèle WaLIS (Water balance of

²⁹ Celette F., Gaudin R. & Gary C. 2008. Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy* 29:153-162

Intercropped Systems). Ce modèle est actuellement mis en ligne sur le site de l'IFV (Institut Français de la Vigne et du Vin).

1.4.4. Problématique de l'irrigation de la vigne

L'UMR System a beaucoup mis en avant la notion de parcours hydrique optimal de la vigne, notamment au travers du master de K. Kansou (2004) effectué au sein de l'IFV. Ce travail a conduit à proposer un indice synthétique de stress hydrique, à la fois en relation avec la récolte et des paramètres de qualité du raisin (Fig. 39). J'ai récemment assuré la publication de ces résultats³⁰.

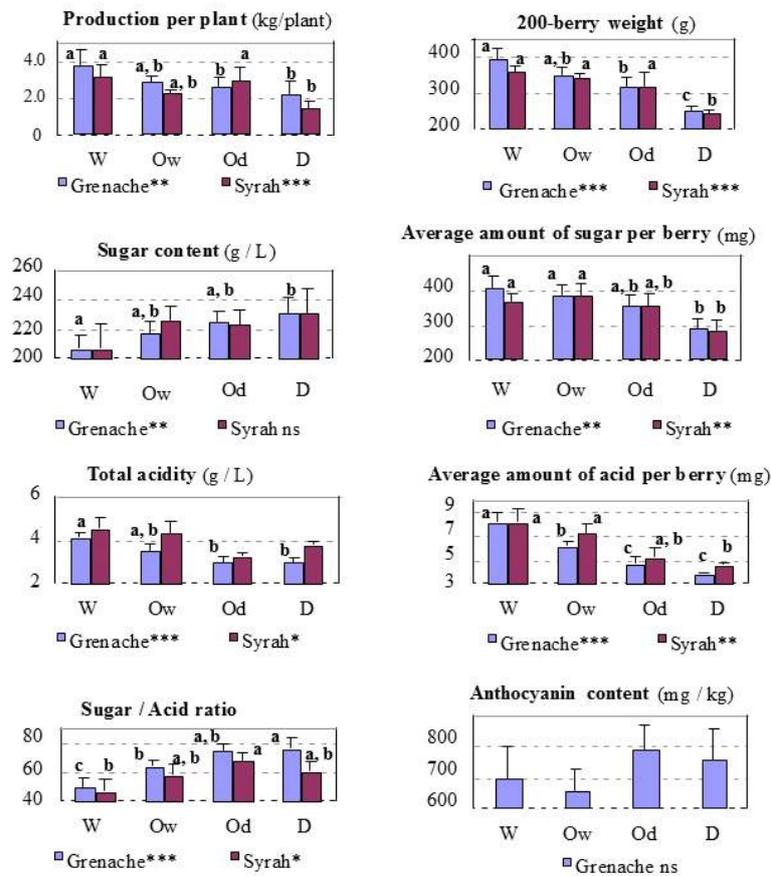


Figure 39. Rendement et qualité du raisin pour quatre niveaux de l'indice de sécheresse déduit du parcours hydrique des vignobles : W (wet), Ow (Optimum wet), Od (Optimum dry), D (dry)

Le développement d'un modèle pluriannuel de bilan hydrique m'a permis d'aborder la question de l'irrigation de la vigne. Celle-ci est devenue possible avec l'assouplissement de la législation dans les années 2006. En climat méditerranéen, cette option peut permettre de traverser les années de sécheresse. Avec C. Gary, nous nous sommes concentrés sur la production de vin de qualité et avons défini des seuils de stress hydrique à ne pas dépasser

³⁰ Gaudin R., Kansou K., Payan J.C., Pellegrino A. & Gary C. 2014. A water stress index based on water balance modelling for discrimination of grapevine quality and yield. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 48(1):1-9

dans certaines phases de la culture. Le problème a été abordé par une analyse fréquentielle du niveau de recharge en eau du sol au débourrement et celle des besoins en eau d'arrosage. Il est apparu que l'irrigation était une option à privilégier pour les sols de moindre réserve hydrique (Fig. 40). Une gestion intégrée de la parcelle est aussi préconisée, notamment pour assurer une bonne recharge en eau et limiter l'évaporation du sol nu³¹.

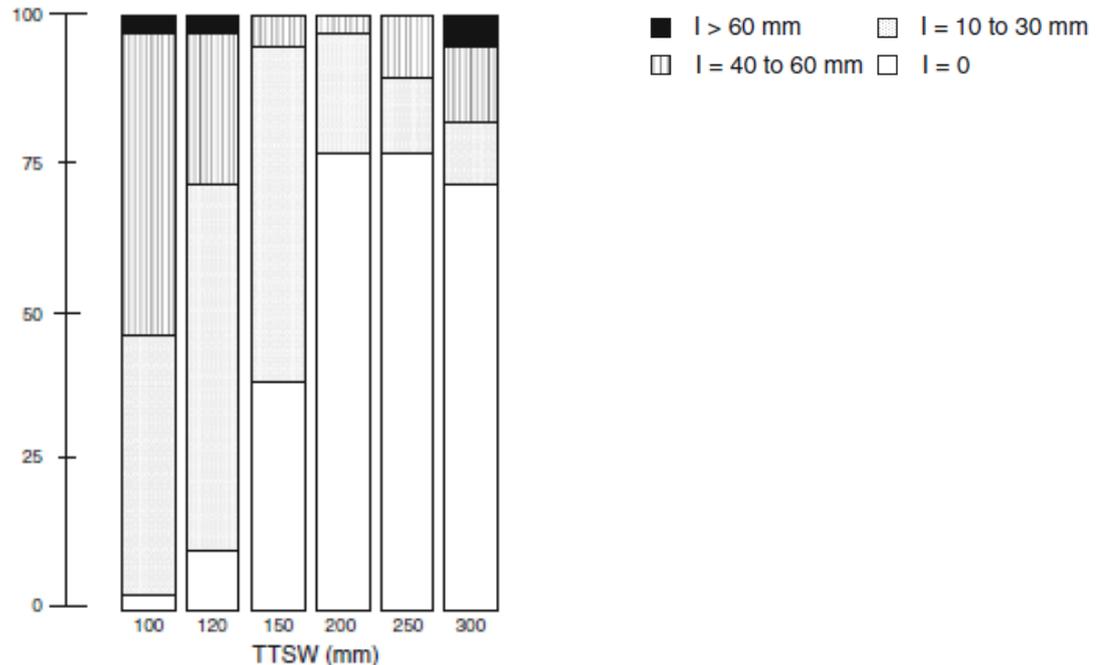


Figure 40. Résultats de l'analyse fréquentielle des besoins en eau d'arrosage (dans la région de Montpellier) en fonction de la TTSW (définie en 1.4.1.). L'échelle à gauche permet de repérer visuellement le pourcentage d'années dans les classes de besoins précisées à droite. La production envisagée est un vin rouge AOP et le sol est relativement perméable

La question du pilotage de l'arrosage à l'aide d'un modèle de bilan hydrique a été abordée au sein du Domaine Cazes (Rivesaltes), dans le cadre du mémoire d'ingénieur de Victor Coulon. Les résultats obtenus ont été présentés à un colloque international (Geisenheim)³². Ils montrent que, sous réserve d'acquisition en temps réel de données climatiques et de caractérisation du sol du vignoble, il est possible de piloter l'arrosage par modèle de bilan hydrique. Les seuils de potentiel hydrique à appliquer ont été définis dans la perspective d'obtenir un vin fruité. Les doses d'arrosage préconisées par le modèle s'écartent peu de celles obtenues par un pilotage à la chambre à pression, plus lourd à mettre en œuvre

³¹ Gaudin R. & Gary C. 2012. Model-based evaluation of irrigation needs in Mediterranean vineyards. *Irrigation Science* 30(5):449-459

³² Gaudin R., Gary C., Wery J., Coulon V. & Cazes E. 2014. Monitoring of irrigation in a Mediterranean vineyard: water balance simulation versus pressure chamber measurement. *Acta Hort. (ISHS)* 1038:295-302. In: *Proceedings of the Seventh International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops* (symposium held at Geisenheim, Germany in July 2012), editors: P. Braun, M. Stoll and J. Zinkernagel.

(mesure de potentiel de base à effectuer avant le lever du jour). Une forte technicité est toutefois nécessaire pour l'emploi du tableur et son paramétrage sur d'autres sites.

A cette occasion, les résultats des simulations du bilan hydrique ont été présentés sous forme d'une représentation du logarithme de $FTSW$ en fonction du temps (Fig. 41) qui permet de faire apparaître le potentiel de base correspondant en linéaire puisqu'il y a une relation exponentielle de la $FTSW$ au potentiel de base (Fig. 33).

En été, lorsque la $FTSW$ est passée sous le seuil qui correspond au déclenchement de la régulation stomatique, la transpiration s'écrit par simplification de l'équation (11) :

$$Tr = (FTSW_{i-1} / 0,4) \times k_c \times ET_0 \quad (14)$$

Si l'on est dans une phase où les pluies remontent à plusieurs semaines et où il n'y a pas d'arrosage, cette transpiration est le seul phénomène à faire évoluer le contenu en eau du sol, ASW . On a alors :

$$Tr = - \Delta(ASW) / \Delta t = - d ASW / d t \quad (15)$$

L'égalité des deux expressions (14) et (15) conduit à :

$$- d ASW / d t = (FTSW / 0,4) \times k_c \times ET_0$$

En divisant les deux termes par $TTSW$, on obtient :

$$- d ASW / TTSW = (d t / TTSW) (FTSW / 0,4) \times k_c \times ET_0$$

ou encore :

$$(d FTSW) / FTSW = - (1/0,4) \times k_c \times ET_0 \times (1/TTSW) \times d t$$

soit :

$$d (\text{Log } FTSW) / d t = - (1/0,4) \times k_c \times ET_0 \times (1/TTSW) \quad (16)$$

L'évolution de $\log FTSW$ est donc déterminée par la demande climatique ($k_c \times ET_0$) mais aussi par la $TTSW$. Dans le cas étudié, la $TTSW$ valait 145 mm. Si elle était doublée, le $\log FTSW$ évoluerait à peu près deux fois moins vite. Ce résultat est important car il signifie que si l'on fait l'approximation d'une évapotranspiration de référence (ET_0) constante (de la mi-juillet à la mi-août par exemple), le potentiel de base va évoluer de façon constante en relation inverse de la $TTSW$.

La relation de la $FTSW$ au potentiel de base Ψ_b est selon Pellegrino *et al.* (2004) :

$$FTSW = 1.02 \exp\{5.69 \Psi_b\} \quad (17)$$

Ceci permet d'écrire (16) sous la forme :

$$d \Psi_b / d t = - 0,44 \times (k_c / TTSW) \times ET_0 \quad (18)$$

La diminution linéaire du potentiel de base en fonction du temps qui est attendue de l'équation **(18)** montre bien tout l'intérêt de la mesure de ce potentiel en période de sécheresse quand on n'a pas accès à la *TTSW* (cas de sols caillouteux par exemple) et / ou quand le recours au bilan hydrique est problématique (méconnaissance du coefficient cultural ou de l'évapotranspiration de référence).

1.5. Analyse des expériences de modélisation

1.5.1. Synthèse graphique

Les expériences majeures de modélisation que j'ai développées au cours de ma carrière concernent l'étude de la fertilisation supergranule d'urée du riz repiqué et le bilan hydrique de la vigne en zone méditerranéenne. Elles se sont appuyées sur des dispositifs de terrain, donnant accès à la concentration en azote ammoniacal au voisinage immédiat du point d'apport de supergranules d'urée (cas du riz), ou bien à l'eau disponible du sol (cas de la vigne).

Bien que ces ressources (eau pour la vigne, azote pour le riz) remplissent des fonctions très différentes dans la vie et la physiologie de ces deux cultures, la modélisation a conduit à définir un cadre de référence dans lequel se décline un parcours hydrique (Fig. 41, cas de la vigne) ou un parcours de consommation de l'azote ammoniacal (Fig. 42 et 43, cas du riz).

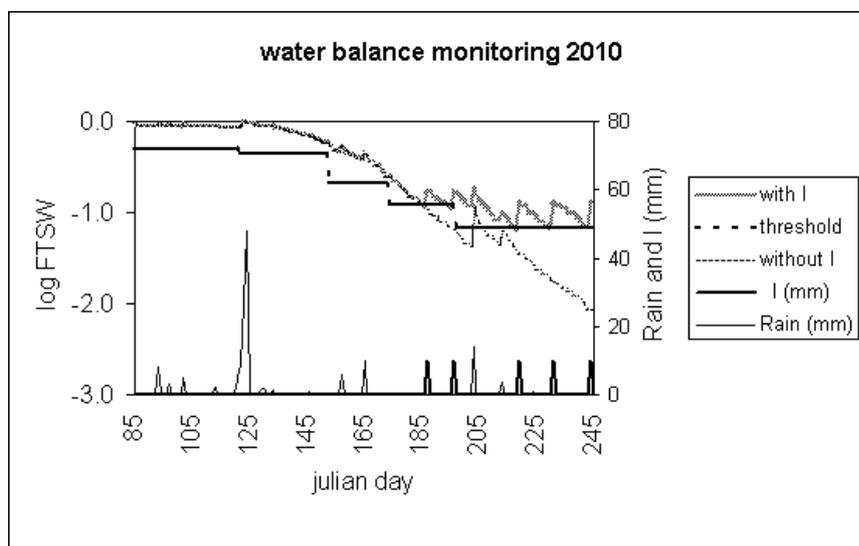


Figure 41. Parcours hydrique de référence visé pour un vin fruité sur domaine de Rivesaltes. Les seuils successifs de $\log FTSW$ correspondent aux valeurs suivantes du potentiel de base³³ : -0,125 MPa, -0,150 MPa, -0,275 MPa, -0,375 MPa et -0,475 MPa (1 MPa = 1 mégapascal = 10 bars). Le parcours sans irrigation est pour le mois d'août (pas de pluie) une illustration des équations **(16)** et **(18)**

³³ Gaudin R., Gary C., Wery J., Coulon V. & Cazes E. 2014. Monitoring of irrigation in a Mediterranean vineyard: water balance simulation versus pressure chamber measurement. Acta Hort. (ISHS) 1038:295-302. In: Proceedings of the Seventh International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (symposium held at Geisenheim, Germany in July 2012), editors: P. Braun, M. Stoll and J. Zinkernagel.

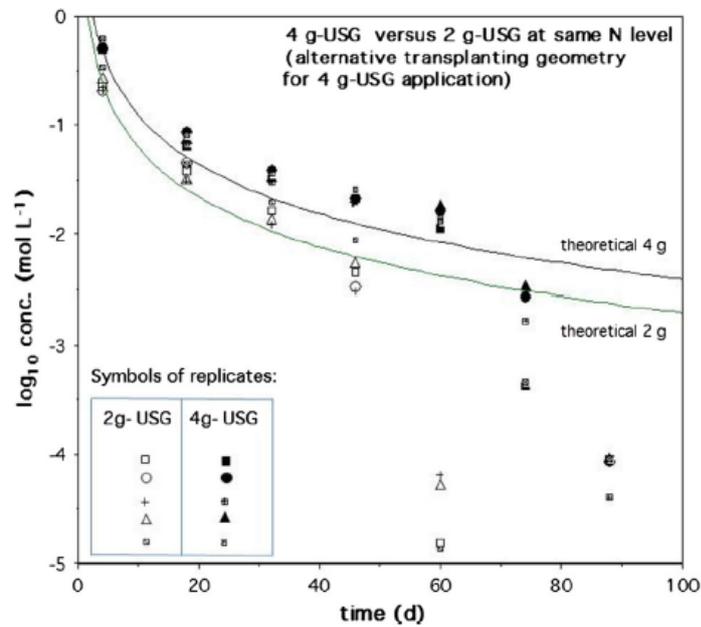


Figure 42. Translation de la courbe de référence vers le haut quand la masse du supergranule d'urée enfoui vaut respectivement 2 g et 4 g³⁴

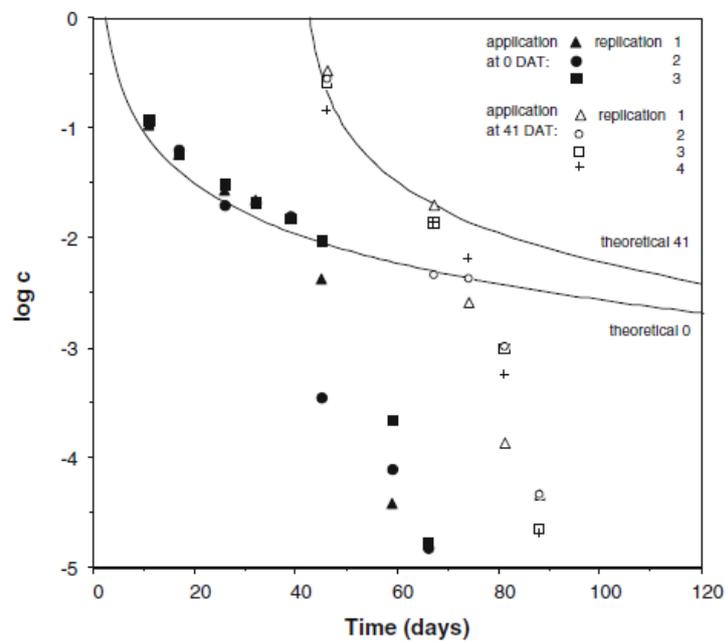


Figure 43. Translation de la courbe de référence vers la droite pour apport tardif d'un second supergranule d'urée de même masse (ici 2 g)³⁵

³⁴ Gaudin R. & D'Onofrio G. 2015. Is the source-sink relationship in transplanted rice receiving deep placed urea supergranules dependent upon the geometry of transplanting? *Paddy and Water Environment* doi: [10.1007/s10333-014-0461-z](https://doi.org/10.1007/s10333-014-0461-z)

Le cadre de référence est important car c'est lui qui détermine en partie les possibilités d'action. Ainsi dans le cas de la vigne le recours à l'irrigation va dépendre du type de parcours hydrique sélectionné (Ojeda, 2007) mais aussi via les équations (16) ou (18) des trois facteurs suivants : le coefficient cultural, l'évapotranspiration de référence et la $TTSW$. Pour diminuer le besoin en eau d'arrosage, les leviers d'action sont : espacer les ceps (action sur la densité de plantation et en conséquence sur le coefficient cultural), augmenter la prospection racinaire (action sur $TTSW$) ou mettre la vigne sous ombrage (diminuer ET_0). Pour deux sols de même qualité agronomique, il conviendra de privilégier celui qui est profond.

Dans le cas du riz repiqué, l'engrais azoté idéal serait celui qui permettrait d'apporter environ 120 kg N par ha sans que cela produise un retard dans la prise d'azote. Cela reviendrait en termes graphiques à combiner translations latérale (Fig. 43) et verticale (Fig. 42) si l'on retient la formulation supergranule d'urée. Idéalement, seul un placement de SGU de 4 g effectué vingt-cinq à trente jours avant repiquage du riz (Fig. 44) répondrait à cet objectif. C'est bien sûr inenvisageable en pratique de riziculteurs.

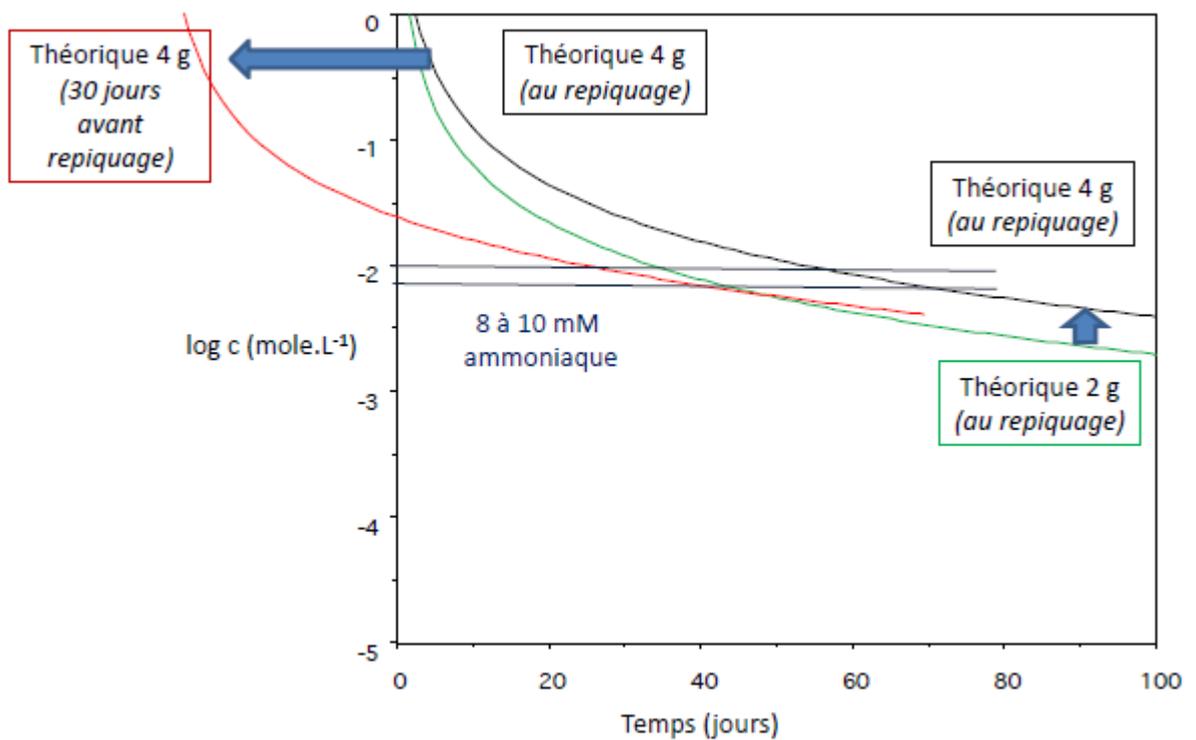


Figure 44. Combinaison d'une translation verticale (passage de SGU de 2 g à SGU de 4 g) et d'une translation horizontale (avancée de la date de placement de 30 jours) pour que la concentration en azote ammoniacal retrouve un niveau de 10 mM vers 30 à 40 jours après repiquage du riz

³⁵ Gaudin R. 2012. The kinetics of ammonia disappearance from deep-placed urea supergranules (USG) in transplanted rice: the effects of split USG application and PK fertiliser. *Paddy and Water Environment* 10(1):1-5

La seule solution est alors de transformer le cadre de référence pour de nouvelles conditions de culture : soit une nouvelle géométrie d'apport de l'engrais azoté ou un nouvel engrais azoté pour le riz, soit des dispositifs innovants pour tenir compte du changement climatique en cours qui va progressivement modifier la culture de la vigne, en particulier en région méditerranéenne.

1.5.2. Quelle place pour la modélisation en agronomie ?

Le recours à la modélisation est au cœur de la démarche scientifique. En physique, les lois qui décrivent le comportement des systèmes étudiés ont souvent été décrites sous forme de relations empiriques entre variables avant d'être démontrées sous forme logique. Dans le domaine de l'agronomie et de l'environnement, une littérature abondante essaie d'analyser la place grandissante des modèles. Pour Jakeman *et al.* (2006), c'est l'utilisateur du modèle qui définit sa fonction principale : cela va de la prédiction en gestion des ressources (aspect management) à la mise en évidence des processus dominants dans le fonctionnement d'un système (aspect scientifique ou développement du modèle). L'analyse fréquentielle des besoins en eau d'irrigation de la vigne ou bien le pilotage d'arrosage à l'aide de modèle se situent clairement dans le premier cas. Mais l'emploi judicieux du modèle proposé tout comme celui du modèle WaLIS passe selon Roux *et al.* (2014) par une caractérisation de l'incertitude et surtout l'étude de sa propagation au sein du modèle. Ceci revient à identifier les processus dominants en fonction des jeux de données ou des situations rencontrées en expérimentation et pose la question des erreurs qui entourent l'application en routine du modèle par un utilisateur, professionnel de la vigne par exemple, n'ayant pas participé à sa conception ou son développement. Ainsi dans le cas du bilan hydrique pluriannuel de la vigne, il est évident que la prévision du niveau de recharge du sol au débourrement sera excellente s'il a beaucoup plu pendant l'hiver et de qualité moindre si l'hiver a été sec. L'erreur associée à la prévision de la *FTSW* est donc variable d'une année sur l'autre. Ce comportement du modèle est à connaître pour gérer le cas de données météorologiques incomplètes : en cas d'absence de données sur l'ensemble des années précédentes, il convient de lancer l'initiation du modèle à la fin d'été (au moment où le sol est typiquement sec et *FTSW* se rapproche de 0).

Bennett *et al.* (2013) met en avant une procédure en cinq étapes pour tester la performance d'un modèle : 1) définition ou redéfinition des objectifs, échelle et perspective ; 2) caractérisation des données servant à la calibration du modèle et à sa vérification ; 3) recours à des outils visuels (graphiques) pour apprécier globalement la qualité du modèle et son domaine d'application ; 4) sélection de critères de performance ; 5) amélioration ou retour à l'étape 1. L'étude de la diffusion de l'azote ammoniacal à partir des supergranules d'urée se place en plein dans ce cas comme le montre la figure 45.

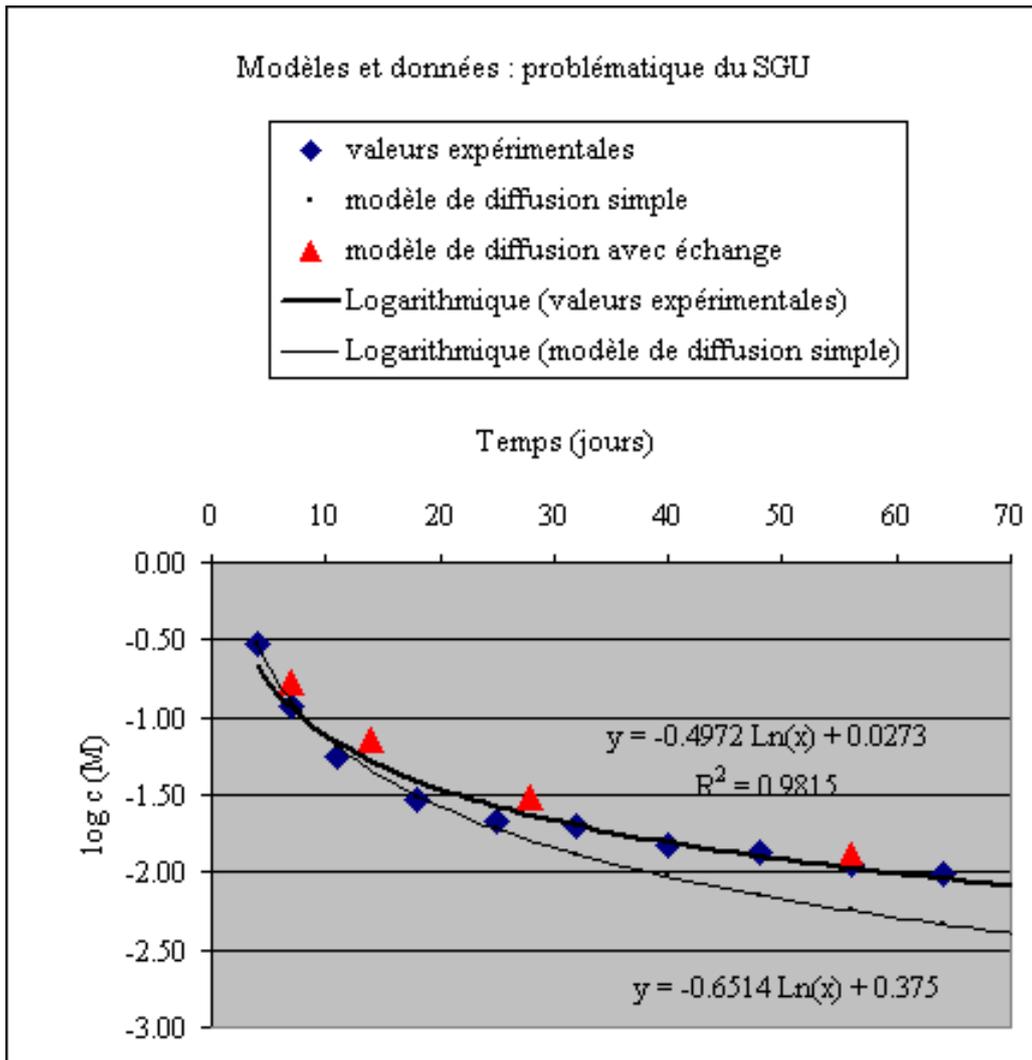


Figure 45. Comparaison des résultats de trois représentations de la diffusion de l'azote ammoniacal à partir d'un SGU de 2 g. La pente du modèle de diffusion simple (- 0,6514) vaut - 1,5 quand la même équation est écrite en log décimal (équation (7))

On voit sur cette figure que la régression linéaire basée simplement sur l'emploi d'une transformation logarithmique conduit à un bon coefficient de détermination ($r^2 = 0,9815$). Le modèle le plus simple qui puisse être associé aux données est celui d'une représentation du SGU comme une source ponctuelle avec diffusion de l'azote ammoniacal en symétrie sphérique. L'équation correspondante qui prédit l'évolution de la concentration en azote ammoniacal est l'équation (6) ou sous forme logarithmique l'équation (7). Il apparaît clairement que cette représentation s'écarte progressivement des valeurs observées. Elle a cependant une valeur explicative forte puisqu'elle n'est basée que sur un paramètre principal qui est le coefficient de diffusion de l'azote ammoniacal. Elle nécessite une seule mesure sur le terrain. Alors pourquoi aller vers un modèle plus complexe ? Tout simplement pour réduire l'écart aux données expérimentales qui se creuse avec le temps et aussi pour avoir une représentation adéquate de ce qui se passe en un autre point du système (par exemple à 3 cm ou à n'importe quelle distance au point d'apport). Le nombre

de paramètres augmente alors puisqu'on intègre le terme d'échange ammoniacal (au moins deux paramètres) et il faut faire de plus une hypothèse par rapport au temps d'hydrolyse de l'urée. Comment dès lors choisir le bon modèle ? Dans ce cas il apparaît que le modèle de diffusion simple est suffisant pour une interprétation graphique des données au point d'apport comme cela est illustré à travers les figures 14 (masse de SGU variant de 1 à 4 g), 17 (effet du niveau PK), 42 (comparaison de SGU de 2 g et 4 g pour la même dose d'azote) et 43 (fractionnement d'apport). Si l'on retenait le modèle de diffusion avec échange, il faudrait dans chacune des situations avoir accès aux paramètres supplémentaires ce qui aurait constitué un investissement important en acquisition de données. Dans ce cas particulier, la vitesse d'hydrolyse peut de plus être affectée par la nature de l'expérimentation (au champ ou en laboratoire) car l'historique de l'échantillon de terre retenu va influencer le contenu en uréase.

Du point de vue statistique, un des critères de performance souvent utilisé en agronomie est l'efficacité dite de Nash et Sutcliffe (Legates and McCabe, 1999), notée *Eff*:

$$Eff = 1.0 - (\sum_{i=1}^N (O_i - Pr_i)^2) / (\sum_{i=1}^N (O_i - O_m)^2) \quad (19)$$

avec O_i : les observations sur la variable modélisée, O_m : la moyenne des N observations, Pr_i : les prévisions du modèle sur la variable

C'est le rapport de la *MSE* (*mean square error*) sur la variance ôté de l'unité.

$$MSE = N^{-1} (\sum_{i=1}^N (O_i - Pr_i)^2)$$

Par exemple, si le carré des différences entre les simulations et les observations est aussi grand que la variabilité des données observées, alors l'efficacité est nulle ; s'il le dépasse, l'efficacité est négative (la moyenne observée donne alors une meilleure prévision que le modèle). L'efficacité est considérée comme supérieure au coefficient de détermination car sensible aux différences entre moyennes et variances observées et simulées. Si ce critère est intéressant, il n'empêche que son emploi n'est pas toujours adapté à l'expérience modélisée. En simulation numérique, on a par exemple l'habitude de faire des sorties de résultats à des temps régulièrement espacés alors qu'en expérimentation c'est plus les conditions météorologiques et le facteur humain qui règlent le rythme des observations. Pour deux expériences au champ les temps d'observation ont peu de chances d'être exactement les mêmes. Il peut en résulter une difficulté (exemple en Fig. 45) si le temps du calcul (en simulation) est long car pour calculer l'efficacité il faut s'assurer que les sorties du modèle se font aux mêmes temps que les expérimentations au champ. Cette difficulté s'estompe au fur et à mesure que la puissance des micro-ordinateurs donne plus de souplesse dans leur utilisation. La maîtrise de la programmation est aussi bienvenue.

J'ai calculé l'efficacité de Nash et Sutcliffe pour le modèle de ruissellement basé sur la méthode du numéro de courbe. Les données ayant servi au calcul provenaient de onze

événements productifs pour lesquels le ruissellement a pu être mesuré³⁶. L'efficacité obtenue est 0,681.

1.5.3. Modélisation et progrès des connaissances

La modélisation n'est qu'un outil parmi d'autres à disposition du chercheur. Le progrès scientifique se fait par un ensemble d'interactions plus complexe qu'un (ou de multiples) aller-retour (s) entre expérience et modèle. Hillel (1987) a employé la métaphore de l'embarcation allant d'une rive à l'autre d'un cours d'eau pour décrire le progrès scientifique (Fig. 46). L'une des rives serait celle des données regroupant les observations, les mesures et l'expérimentation. L'autre rive serait la théorie regroupant supposition, hypothèse et modèle. Le trajet des données à la théorie est de l'induction, celui de la théorie aux données de la déduction. Hillel parle de risques à éviter sur les rives aussi bien que de facteurs qui compliquent le trajet. Sur la rive des données, il faut savoir mettre fin à la phase d'acquisition sous peine d'être submergé par les faits et de n'avoir aucun cadre théorique pour les classer et les comprendre (« the deep blue sea »). On peut aussi rencontrer une zone très difficile (« a hard place ») en termes d'acquisition de données si les appareillages ne sont pas encore au point ou quand les données présentent énormément de variabilité. Dans le cas de la théorie, existent le risque de spéculation et conclusion prématurée (« the devil ») tout comme la difficulté (« a rock ») posée par certaines formulations mathématiques ou modèles (série non convergente par exemple, instabilité du calcul en simulation numérique).

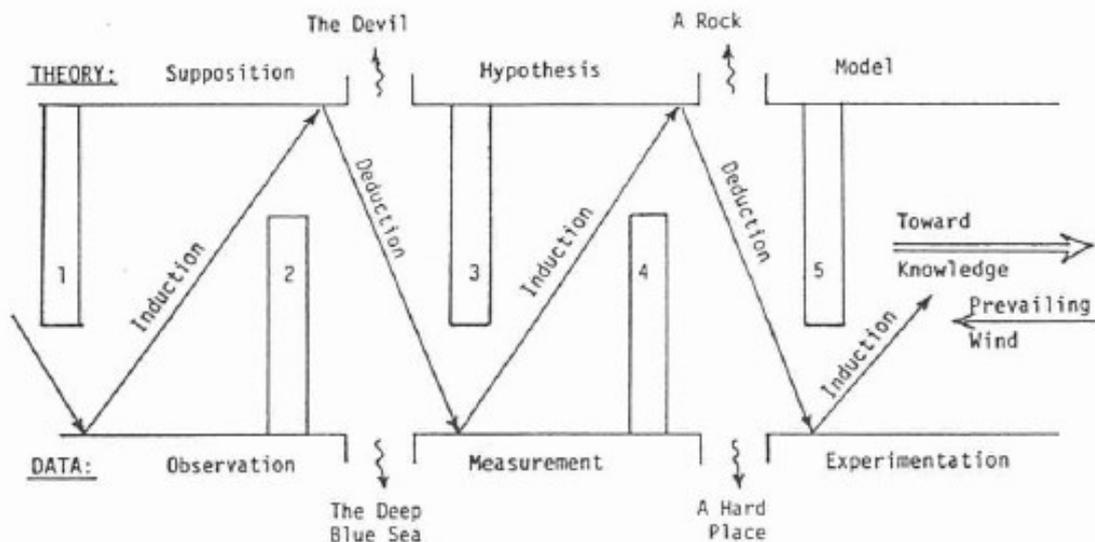


Figure 46. Le chemin tortueux du progrès scientifique (Hillel, 1987). Eléments de légende : 1- Conventional wisdom, 2- Institutional administration, 3- Funding agencies, 4- Peer reviews, 5- Publication policies

³⁶ Gaudin R., Celette F. & Gary C. 2010. Contribution of runoff to incomplete off season soil water refilling in a Mediterranean vineyard. *Agricultural Water Management* 97(10):1534-1540

Le progrès des connaissances est présenté par Hillel comme un cheminement à contre-courant du vent dominant, avec des interactions tantôt positives tantôt négatives avec le cadre institutionnel (« institutional administration »), les agences de financement, la revue par les pairs, les politiques de publication des revues. La tentation du secteur privé ou celle de la retraite anticipée peuvent aussi jouer un rôle. S’y mêle aussi la chance (« beneficent gust of wind or chance current ») qui conduit parfois à la découverte. Mais cela ne peut aucun cas se prévoir et presque toujours, c’est un nouveau problème qui apparaît à chaque virage rendant le voyage scientifique quasiment sans fin.

On peut penser qu’en agronomie comme en physique, c’est la disponibilité de moyens de calcul performants qui a contribué au développement de la modélisation. Cette facilité à disposer d’outil permettant d’étudier de multiples scénarii liant théorie et données doit renforcer la capacité d’analyse du chercheur. En d’autres termes, il faut savoir abandonner un modèle dès lors qu’il ne répond plus aux questions à étudier (Galison, 1987). Cela peut être un abandon en tant qu’objet de recherche mais le modèle élaboré jusque-là peut servir en application. Il existe aussi des cas où le modèle ou un résultat scientifique prend une place majeure dans la discipline. Ainsi la procédure FAO de calcul de l’évapotranspiration de référence a vulgarisé avec succès une application de la formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) : dans ce cas, le module de calcul (alimenté par des données de température, humidité de l’air, etc.) a pris la place de dispositifs de terrain qui autrefois servaient à la mesure de l’évapotranspiration potentielle (gazon bien alimenté en eau).

1.5.4. Mise en perspective à l’aide de la courbe caractéristique de l’humidité du sol

L’ensemble des travaux que j’ai menés sur l’eau dans le sol se place dans un schéma centré sur la courbe caractéristique de l’humidité du sol (Fig. 47) :

- les études menées sur la vigne se situent sur la partie montante de la courbe caractéristique bien au-delà du point d’inflexion. A ces niveaux de potentiel hydrique le sol est sec et il n’y a plus de mouvement d’eau notable au sein du sol. L’évolution de l’humidité du sol est juste pilotée par le prélèvement racinaire : c’est ce qui se passe durant une grande partie des étés méditerranéens.

- le travail sur le riz se place au point singulier de saturation en eau du sol. Cette condition particulière (pas de volume disponible pour l’air et donc pour l’oxygène) entraîne l’anaérobiose du sol et donc la mise en place d’une nutrition ammoniacale exclusive. Le flux de percolation pourra souvent être négligé car les rizières s’insèrent dans un milieu complètement saturé en eau (Fig. 1). On peut aussi faire l’hypothèse d’une porosité constante sur quelques décimètres et considérer que le riziculteur maîtrise au mieux les conditions hydrologiques (pas de période de sécheresse). L’équation de diffusion qui décrit le devenir d’un engrais (apporté sous forme uréique ou ammoniacale) est alors un cas très simplifié par rapport au cas général qui inclurait un terme dispersif.

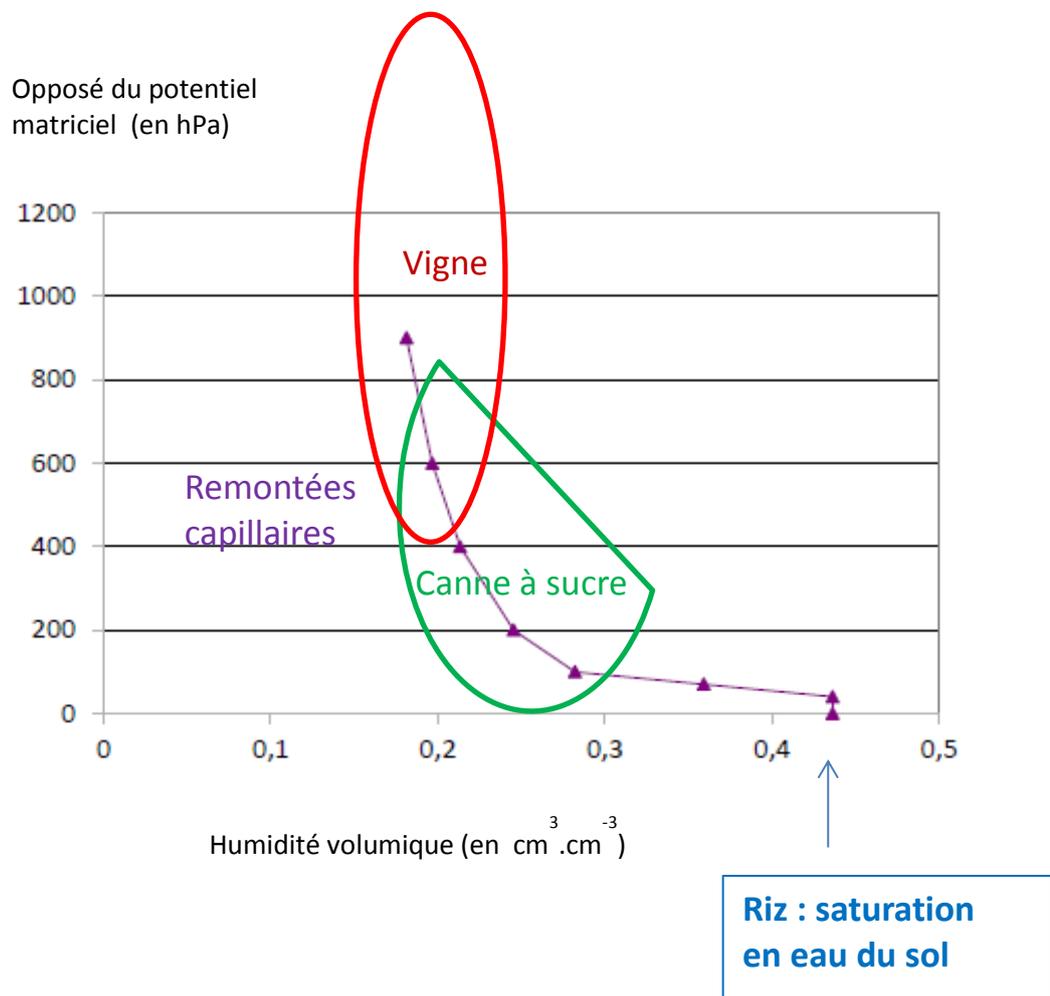


Figure 47. Analyse des systèmes étudiés en fonction de leur place sur la courbe caractéristique de l'humidité du sol

- l'étude menée sur la canne à sucre à Morondava se situe dans la partie intermédiaire de la courbe caractéristique. Les oscillations de potentiel observées en pilotage d'arrosage sont autant de montées sur la courbe caractéristique puis redescende au moment des arrosages ; elles traduisent la maîtrise du système par l'irrigant.

- les études sur les remontées capillaires montrent un cheminement au long de la courbe caractéristique : du point de saturation en eau du sol à la surface de la nappe jusqu'à des valeurs de succion élevées plus haut dans le profil pour assurer un flux ascendant conséquent vers les racines. Comme dans le cas de la vigne, on peut atteindre des niveaux de succion bien au-delà de ce qui est représenté sur la figure 47.

Les modèles qui intègrent les connaissances sur les sols et les cultures et la représentation des phénomènes qui s’y déroulent deviennent de plus en plus complexes. C’est pourquoi le schéma précédent est important pour délimiter les futurs axes de recherche. L’analyse des travaux effectués conduit à proposer des sujets de recherche aussi bien aux candidats du sud qu’en zone méditerranéenne. Dans le premier cas, il s’agit de sujets sur l’amélioration de la gestion de l’urée en riziculture inondée. Dans le second cas, il s’agit d’améliorer la gestion de l’eau dans la perspective de changements globaux climatiques qui pourraient mettre à rude épreuve les systèmes viticoles. Les connaissances existantes qui sous-tendent ces systèmes devraient trouver leurs limites.

Il y a en agronomie un réel besoin de revenir aux questions fondamentales des mécanismes. Les systèmes agricoles seront vraisemblablement à repenser en s’appuyant sur des données (et des modèles) en relation avec la physiologie des plantes. Dans le cas de la vigne, l’irrigation est un moyen d’action qui permet de déplacer le curseur sur l’axe qui va de la survie de la plante à la production d’un rendement qualitatif puis quantitatif. La question de la qualité en climat méditerranéen est aussi une question de régularité. Les modèles sont des outils de conception et d’application qui doivent aider à répondre à ces nouvelles problématiques. C’est pour toutes ces raisons que j’ai intitulé le document d’habilitation « Des modèles agronomiques pour comprendre, prévoir, intervenir ».

2. Projets de recherche

Les projets de recherche que j'ai en perspective visent à approfondir les connaissances et solutions pour la fertilisation du riz repiqué et à cerner le meilleur compromis entretien du sol et gestion hydrique du vignoble. Le tableau 7 précise les thématiques des sujets proposés.

Tableau 7. Matrice des sujets de thèse à développer. En colonnes, les cultures ; en ligne, les sujets scientifiques

Culture	Riz repiqué	Vigne
Questions scientifiques à traiter	Acquérir un modèle complet du fonctionnement riz-supergranule d'urée Le transformer pour une géométrie cylindrique	Remontée capillaire sous vigne (en situation de plaine) Interactions entre irrigation du vignoble et son enherbement
Phénomène physique étudié	Diffusion avec échange	Transfert d'eau dans la zone insaturée Bilan hydrique, entretien du sol
Phénomène biologique	Assimilation de l'ammoniaque	Transpiration (vigne et enherbement)
Modélisation	Hydrolyse de l'urée Diffusion Prélèvement racinaire	Remontée capillaire Bilan hydrique en scénario de changement climatique
Sorties attendues	Cinétique d'assimilation pour les géométries sphérique et cylindrique Définition d'un nouvel engrais azoté	Marge de manœuvre en situation avec nappe Besoin en eau d'arrosage en relation avec les stratégies d'entretien du vignoble
Projets	Thèses 1 et 2	Thèses 3 et 4

2.1. Les perspectives pour la fertilisation du riz repiqué

2.1.1. Des choix dans les grandes lignes directrices

Par rapport aux résultats obtenus, beaucoup de thèmes peuvent faire l'objet de recherches approfondies :

- i) L'étude du lien entre toxicité ferreuse et mauvais prélèvement de l'azote dans les parties des bas-fonds mal drainées (Fig. 48) ; les résultats obtenus dans le cadre du projet bas-fond apportent de très fortes suspicions d'un syndrome de déséquilibre nutritionnel^{37, 38} mais des expérimentations plus poussées sont nécessaires pour établir un lien causal ;

³⁷ Gaudin R. 1988. Les problèmes de nutrition minérale (en particulier azotée) posés par l'étude de la fertilisation supergranule d'urée en différents points du bas-fond d'Ambohitrakoho. In : Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond des hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement. M. Raunet (éd.), Montpellier, CIRAD, p. 107-130

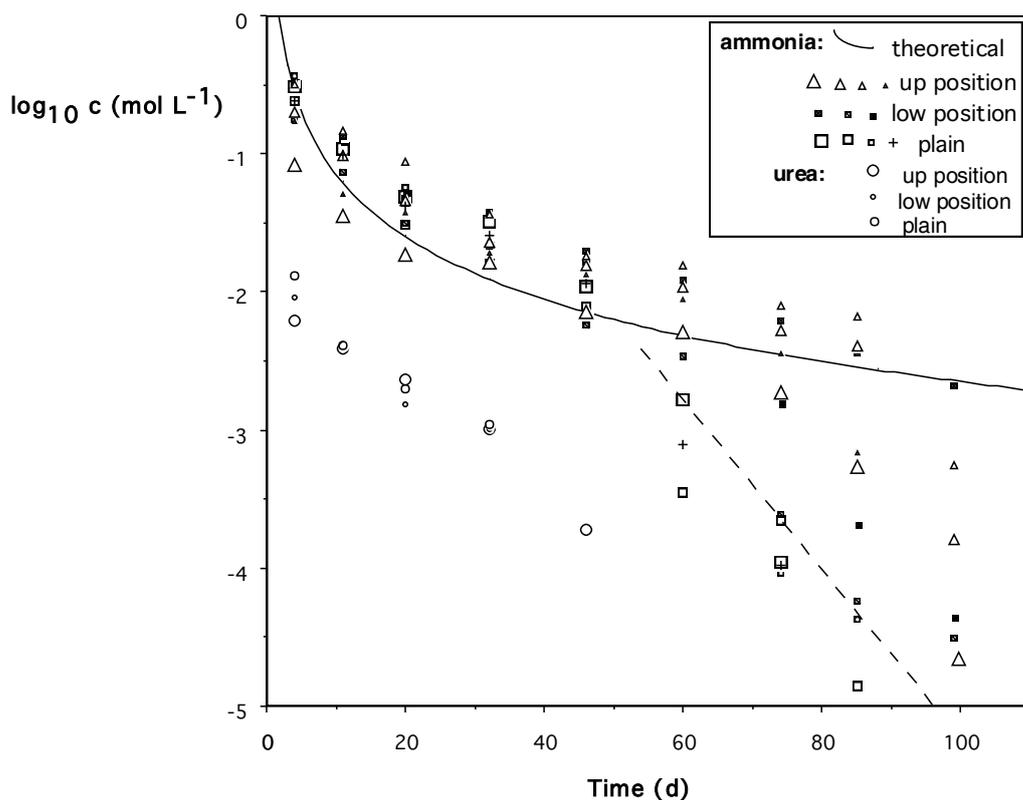


Figure 48. Mise en évidence d'un mauvais prélèvement racinaire³⁹ dans les parties amont et intermédiaire des bas-fonds des Hauts Plateaux de Madagascar après placement de supergranules d'urée de 2 g (dose de 58 kg N par ha). En ordonnée, le logarithme décimal des concentrations en azote ammoniacal et uréique au point d'apport ; en abscisse, le temps en jours. Le trait pointillé permet de séparer les données de la plaine (en-dessous du trait) et celles du bas-fond (au-dessus)

ii) L'intégration de la cinétique d'hydrolyse de l'urée dans un modèle de diffusion des formes uréique et ammoniacale ; dans mon modèle, j'ai considéré une hydrolyse très rapide de l'urée. Même si cette réaction est rapide, il ne faut pas négliger sa cinétique qui sera entre autre différente si l'apport d'urée est décalé par rapport au repiquage du riz (plus d'uréase présente). Dans la littérature scientifique, des problèmes assez voisins ont déjà été traités pour les cas de placement d'urée, essentiellement en sols non saturés. Le cas d'un apport superficiel d'urée a été étudié par Rachhpal-Singh et Nye (1984) ; ces résultats ont été intégrés dans une série d'articles qui conduit à un modèle de la volatilisation ammoniacale (Rachhpal-Singh et Nye, 1986, 1988). Le premier article (1984) se penche sur la cinétique d'hydrolyse et retient une équation de Michaélis-Menten jusqu'à 0,2 M (en urée) puis une

³⁸ Gaudin R. 1993. Caractériser la fertilité des sols de rizières par une mesure à l'interface des métabolismes carboné et azoté de la plante. Théorie, Méthode et Application. Colloque « Bas-Fond et Riziculture », Antananarivo décembre 1991, publié p. 305-312 ; CIRAD 1993, ISBN 2-87614-100-0 (éditeur : M. Raunet), 517 pages.

³⁹ Gaudin R., Dupuy J. & Rabeharioa L. 1987. ATP bas-fond, rapport de campagne 1986-1987. LRI Antananarivo, 38 pages, 6 figures.

réaction du premier ordre au-dessus de 0,2 M. Le cas d'un placement en bande est traité par Shah *et al* (2004). Le niveau de concentration est plus élevé que pour l'apport en plan et il faut tenir compte de l'inhibition provoquée par l'urée à très forte concentration. Pour ces auteurs, l'hydrolyse est même complètement bloquée autour de 6,7 M. Dans le cas du supergranule d'urée, il faudra éventuellement considérer une période (très courte) où seule la diffusion de l'urée fait baisser sa concentration jusqu'à un niveau où l'hydrolyse sera déclenchée. On pourrait avoir avec ce mécanisme une explication des différences observées (Tableau 8) entre SGU de masse différente⁴⁰.

Tableau 8. Niveau de concentration en urée et pourcentage d'hydrolyse pour des SGU de 1 à 4 g apportés au repiquage du riz (mesure au point d'apport)

Masse du SGU	Concentration en N uréique (mM) (et pourcentage d'hydrolyse)			
	4 jours	13 jours	24 jours	31 jours
1 g	9 (91,6)	0,4 (98,1)	0,1 (99,4)	0 (100)
2 g	32,7 (90,8)	2,6 (94,6)	0,2 (99,3)	0 (100)
3 g	60,8 (85,7)	2,6 (96,3)	0,6 (98,6)	0,2 (99,3)
4 g	100,7 (77,5)	2,9 (96,4)	0,6 (98,5)	0,2 (99,2)

iii) L'interfaçage du modèle de diffusion avec échange avec un module de prélèvement racinaire ; cette étape permettrait de faire le lien avec les résultats des cinétiques de marquage assez nombreuses dans la littérature. Mes résultats montrent que le prélèvement racinaire suit un mécanisme du premier ordre ; il faudra appliquer cette réaction d'ordre 1 au niveau local, c'est-à-dire à l'échelle du pas d'espace retenu dans le calcul numérique ;

iv) Le passage de ce modèle interfacé à d'autres géométries d'apport (urée-bâtonnet) ; c'est ce modèle final qui conduira à tester de nouvelles géométries en adéquation avec les niveaux de fertilisation entre 100 et 150 kg d'azote par ha, dans les situations très favorables de fertilité du sol.

L'ensemble de ce programme de recherche dont j'ai fixé les grandes lignes peut offrir deux sujets de thèse pour des jeunes malgaches qu'il conviendra de former aux concepts et techniques pour une agronomie en milieu inondé (rizières). Le premier point de ce projet est sans doute le sujet le plus pointu en termes de recherche et il demanderait de gros investissements en matériel. En effet, le phénomène de toxicité ferreuse se passe dans un environnement extra-racinaire qui est chimiquement en état réduit. La moindre exposition à l'air modifie très vite les paramètres que l'on souhaitera étudier, que ce soit le potentiel d'oxydo-réduction du sol ou bien la concentration en fer ferreux de la solution du sol. Le

⁴⁰ Gaudin R. & Dupuy J. 1999. Ammoniacal nutrition of transplanted rice fertilized with large urea granules. *Agronomy Journal* 91(1):33-36

protocole expérimental à mettre en œuvre doit donc éviter ces effets destructeurs. En essai au champ, cela suppose que l'échantillon, par exemple un volume de solution du sol, soit prélevé sous atmosphère neutre, ou bien très vite accueilli dans un milieu qui bloque toute réaction d'oxydo-réduction. De Giudici (1993) a testé avec succès une extraction du fer ferreux avec AlCl_3 au 2/1000 sur quelques grammes de sol mais pour simplifier la prise d'échantillon (éliminer une partie de la variabilité et éviter un effet destructeur) il reste à mettre au point un protocole pour la solution du sol. En essai de laboratoire il sera difficile d'avoir la réaction de la plante si l'on ne dispose pas de serres suffisamment équipées. Dans le contexte actuel de Madagascar, il n'est pas sûr que les conditions de faisabilité soient toutes réunies sans financement extérieur conséquent ; il n'est pas sûr non plus que ce thème de recherche puisse être considéré comme prioritaire par les instances malgaches de la recherche, ni par les bailleurs de fonds. C'est pourquoi je n'en fais pas un thème de recherche à proposer comme sujet de thèse dans l'immédiat.

Par contre les autres sujets de thèse sont plus abordables en termes d'objectifs immédiats car les ressources à mobiliser relèvent partiellement ou entièrement de la modélisation.

2.1.2. Sujet 1 : un modèle complet pour la symétrie sphérique

Le premier sujet sera consacré à la construction et validation d'un modèle complet du fonctionnement du système supergranule d'urée-riz repiqué, de la diffusion à l'assimilation azotée. La partie diffusion avec échange a été réalisée dans le cadre de ma thèse. L'adjonction du module d'hydrolyse de l'urée est assez facile à réaliser sur un ordinateur scientifique portable, elle permettra de couvrir plus de situations au champ. C'est la partie prélèvement-assimilation qui sera au cœur de cette première thèse. Comme indiqué précédemment, il faudra appliquer le mécanisme d'ordre 1 au pas d'espace du calcul numérique (0,25 cm dans ma thèse) à partir d'une valeur seuil de concentration en ammoniacque (autour de 10 mM pour le début de la réaction). Une hypothèse de calcul sera à préciser, à savoir le caractère négligeable (ou non) de la diffusion relativement à l'absorption dès lors que celle-ci est engagée. Comme le phénomène va se dérouler sur une sphère d'environ 4 cm de rayon, cette hypothèse n'est pas forcément localement vérifiée et il faudra dès lors faire le calcul pour les deux alternatives. Le résultat final en termes de cinétique globale d'absorption ne sera pas forcément affecté par ce choix.

La dernière partie de cette thèse consistera à relier cette cinétique d'absorption à la cinétique de prélèvement telle qu'elle a été mesurée dans les essais ^{15}N menés par le LRI⁴¹ (Fig. 49-50) ou bien dans d'autres régions du monde (Chen & Zhu, 1982 ; Savant *et al.*, 1982 ; Cao *et al.*, 1984). L'intérêt de cette thèse est la compréhension la plus fine possible de l'assimilation à l'échelle de la plante. Il serait possible de prolonger par des observations sur le système racinaire et l'acquisition des activités enzymatiques *in situ* mais cela suppose une collaboration avec des institutions spécialisées en ce domaine.

⁴¹ Dupuy J., Gaudin R. & D'Onofrio G. 1990. Etude à l'étude d'urée enrichie en ^{15}N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. III. Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranules d'urée ou de perlurée au repiquage du riz ou 21 jours après. *L'Agronomie Tropicale* 45(1):21-30

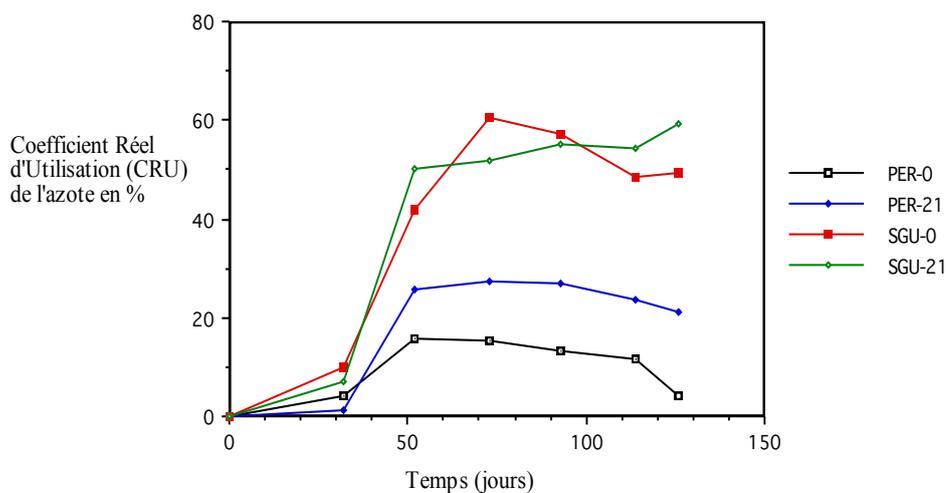


Figure 49. Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranule (SGU) ou perlurée (PER) au repiquage ou 21 jours après (essai du LRI à Arivonimamo). La dose d'azote est 58 kg N par hectare

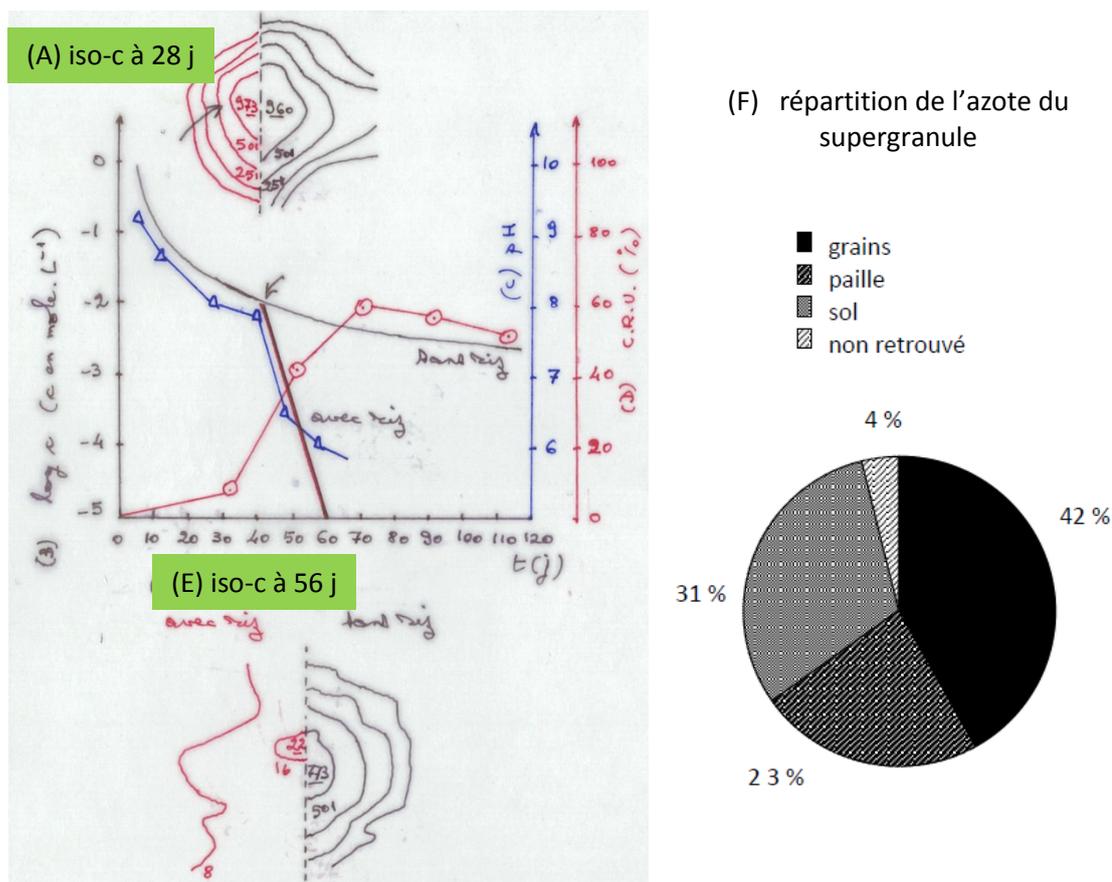


Figure 50. Synthèse des approches IRRI (A, E : courbes d'iso-concentration en N ammoniacal, F : répartition de l'azote) et LRI (B, C : évolution de log c et du pH, D : cinétique du coefficient réel d'utilisation) pour l'étude du devenir de l'azote dans le cas d'un SGU de 2 g

La sortie du modèle sera une réponse de la culture (sa vitesse d'acquisition de l'ammoniaque, son rendement) selon la masse du supergranule (entre 1 et 3 grammes) et le niveau de fertilité de la rizière qui apparaît dans la constante de vitesse.

2.1.3. Sujet 2 : géométrie cylindrique de l'apport d'engrais azoté

L'autre intérêt de la première thèse est d'introduire la modélisation qui sera forcément au cœur du sujet de la seconde thèse que je propose. Il s'agit d'appliquer le formalisme précédent au cas d'un engrais de géométrie cylindrique. Dans le dernier papier⁴² paru dans *Paddy and Water Environment*, j'ai mis en évidence la relation suivante :

$$c_b(0, t) / c_g(0, t) = (2A/Q) (\pi Dt)^{1/2} \quad (20)$$

c_b et c_g étant les concentrations azote ammoniacal à la ligne et au point d'apport de l'urée, A la densité linéaire de la source en ligne, Q la quantité d'urée apportée par la source ponctuelle, D le coefficient de diffusion de l'ammoniaque, t le temps.

Pour une ligne continue, A prend la valeur $Q/40$ (A exprimé en mmol/cm) et $2A/Q$ la valeur 0,05 par cm. Ceci vaut pour une équivalence de dose d'azote à l'hectare. On a donc :

$$c_b / c_g = (0,05 \text{ cm}^{-1}) (\pi Dt)^{0,5}$$

équivalent à $c_g / c_b = (20 \text{ cm}) / (\pi Dt)^{0,5}$ représenté sur la Fig. 51

Pour $t = 20$ jours et $D = 1 \text{ cm}^2/\text{jour}$, $(\pi Dt)^{0,5}$ vaut 7,92 cm, $c_g / c_b = 0,42$

Pour $t = 40$ jours et $D = 1 \text{ cm}^2/\text{jour}$, $(\pi Dt)^{0,5}$ vaut 11,2 cm, $c_g / c_b = 0,55$

Pour $t = 60$ jours et $D = 1 \text{ cm}^2/\text{jour}$, $(\pi Dt)^{0,5}$ vaut 13,7 cm, $c_g / c_b = 0,69$

Ceci signifie qu'avec une dose doublée (116 kg d'azote par ha), la ligne continue permettrait d'obtenir à 30-40 jours approximativement la même concentration que le supergranule d'urée de 2 g, soit 10 à 12 mmol/L.

La thèse proposée consistera à tester cette nouvelle formulation en plein champ dans des essais agronomiques classiques (mesure de tallage et des composantes du rendement) et à suivre en parallèle le devenir de l'azote ammoniacal. Sur ce dernier point, cette thèse pourra être l'occasion de tester de nouveaux capteurs qui assurent en continu le suivi de la concentration en azote ammoniacal.

⁴² Gaudin R. & D'Onofrio G. 2015. Is the source-sink relationship in transplanted rice receiving deep placed urea supergranules dependent upon the geometry of transplanting? *Paddy and Water Environment* doi: [10.1007/s10333-014-0461-z](https://doi.org/10.1007/s10333-014-0461-z)

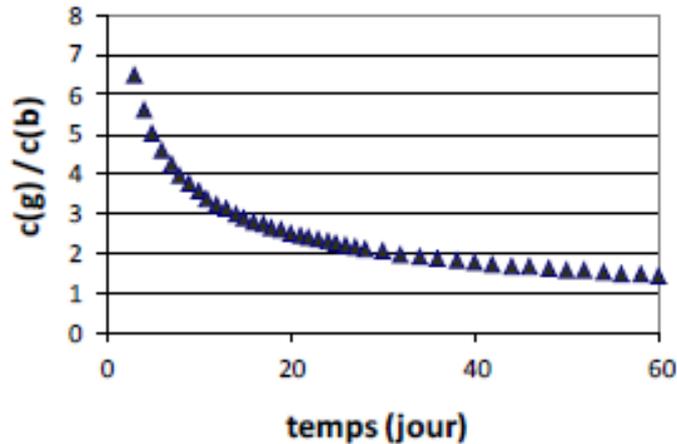


Figure 51. Evolution temporelle du rapport des concentrations en ammoniacque générées par une source ponctuelle et une source cylindrique pour la même dose d'azote à l'hectare et la même géométrie d'apport (une interligne sur deux)

Bien entendu, il faudra transformer le modèle de diffusion avec échange du cas sphérique (apport de SGU) au cas cylindrique. Les données expérimentales permettront de valider les résultats obtenus dans la phase de calcul numérique à proprement parler. Mais il ne faut pas sous-estimer certaines difficultés qui pourraient apparaître dans la réécriture des algorithmes conçus au départ pour le cas de la symétrie sphérique ou bien revenir à la famille de l'algorithme source (Richtmyer & Morton, 1967 ; Pinner & Nye, 1982).

Le modèle complet développé dans le cas de la source sphérique sera transformé pour le cas de la symétrie cylindrique. Si les essais agronomiques sont concluants, il conviendrait d'envisager aussi une expérimentation avec de l'urée marquée à l'azote 15 pour caractériser la cinétique de prélèvement de l'azote et la comparer aux résultats du modèle.

2.2. La place des remontées capillaires dans le bilan hydrique de la vigne

2.2.1. Sujet 3 : une première analyse à l'aide des outils proposés dans la littérature

Le bilan hydrique des cultures est difficile à mettre en œuvre dès lors que l'un des termes en entrée ou en sortie est inaccessible ou bien entaché d'une grande imprécision. En entrée, le manque de précision peut concerner l'eau rentrant effectivement dans le sol, la pluie diminuée du ruissellement dans le cas des forts orages ou d'épisodes pluvieux très productifs. Mais ce cas concerne des moments connus (en fin d'été ou à l'automne) et il peut être soumis à une analyse critique. Si la réserve en eau était presque pleine avant l'évènement, sa quantification devient secondaire puisque l'état final de la réserve est connu via une grandeur, la quantité d'eau totale transpirable du sol (*TTSW*). La situation devient plus problématique si une nappe est présente. Il y a alors possibilité d'une ascension

capillaire de l'eau de la nappe vers les racines de la vigne. Quelle contribution apporte cette remontée au bilan hydrique de la culture ?

J'ai déjà étudié cette question pour une culture de céréales (voir 1.3.1.) et mis en évidence l'influence de plusieurs facteurs dont deux très importants : la distance entre les racines et la nappe, les propriétés hydriques du sol. Dans le cas de la vigne, les choses se compliquent pour plusieurs raisons :

i) La consommation journalière en eau de la vigne est moindre que celle d'une céréale, en ordre de grandeur deux à quatre fois moins. Il faut donc dans le cas de la vigne une moindre différence de potentiel hydrique pour assurer ce moindre flux sur la même distance.

ii) L'intensité du phénomène diminue rapidement quand la distance entre la nappe et la base des racines est trop grande par rapport à ce que permet la transmission de l'eau par le sol non saturé. La figure 52 construite à partir de données de la thèse de De Laat (1980) illustre le phénomène pour un sol léger. Dans la pratique, c'est souvent la descente de la nappe qui enclenche le tarissement du phénomène, notamment pour les textures trop sableuse ou argileuse.

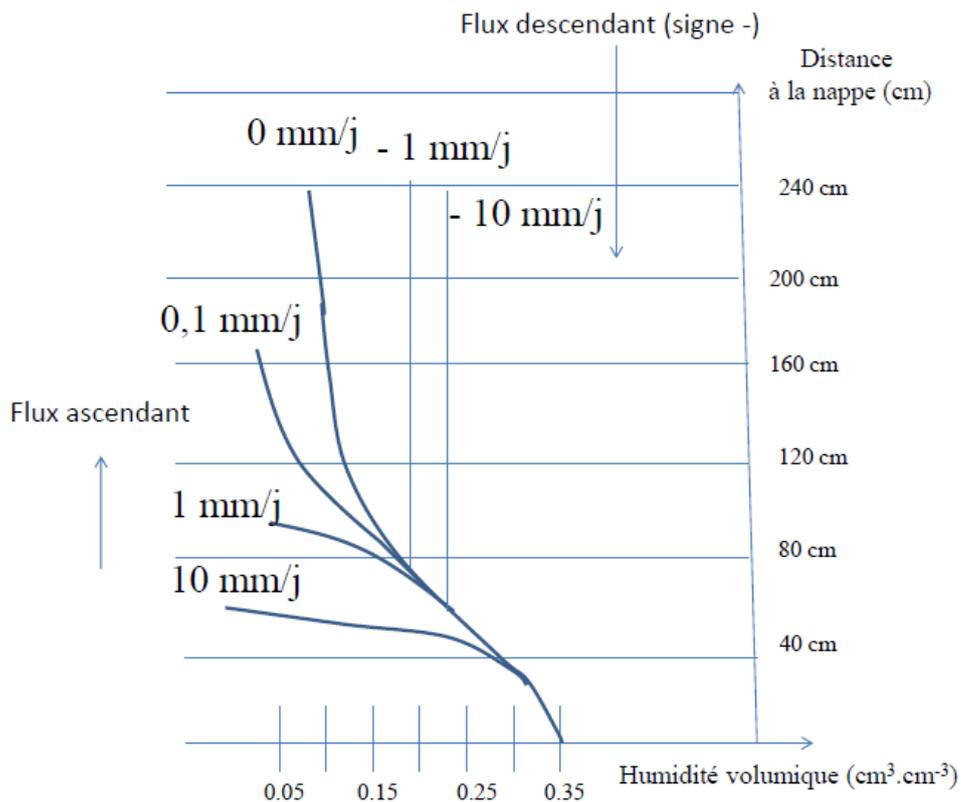


Figure 52. Profils d'humidité volumique assurant un flux hydrique ascendant constant à partir de la nappe ou un flux hydrique descendant (cas particulier d'une infiltration). On voit que le flux ascendant ne peut guère dépasser 1 mm/j à partir de 100 cm au-dessus de la nappe. Données de De Laat (1980) pour un sol sableux fin

iii) L'enracinement de la vigne est beaucoup plus profond que celui d'une céréale et il semble revêtir un caractère dynamique assez marqué. On peut imaginer que dans certaines situations les racines profitent plus de l'eau libérée par la descente de la nappe que d'une véritable remontée capillaire. Les hydrologues évaluent ce phénomène à travers un coefficient dit de restitution.

iv) Les couches de sol concernées sont donc en conséquence plus profondes, donc plus difficilement accessibles à l'observation.

v) Des phénomènes de bicouches peuvent jouer un rôle non négligeable. En hydrodynamique (insaturée ou non), on appelle bicouche la superposition de matériaux aux propriétés hydriques contrastées, notamment la conductivité hydraulique. C'est le cas d'un sable limoneux sur une argile ou inversement. Certaines couches peuvent donc être très favorables à la mise en place de ces remontées, d'autre beaucoup moins. Leur disposition dans l'espace et le positionnement relatif de la nappe deviennent des facteurs très importants.

Je propose que la thèse (troisième sujet) débute par une synthèse exhaustive de toute la bibliographie publiée sur le sujet et qu'ensuite soient testés les logiciels qui simulent ce phénomène. Un premier outil pédagogique est le logiciel Upflow (Raes et Deproost, 2003) mis en ligne par l'Université de Louvain (Belgique). Le logiciel Hydrus 1D permet aussi le calcul de cette remontée. Ces outils seront utilisés pour évaluer l'influence de la texture et pour préciser le comportement hydrodynamique du système associant la vigne et une nappe, notamment sa plage de fonctionnalité intéressante pour l'agronome.

Les logiciels ne sont pas la panacée. Il ne faut pas sous-estimer les travaux théoriques menés par Gardner (1958) qui a introduit des formules mathématiques pour approcher la relation $K(h)$ et a ainsi pu résoudre analytiquement (intégrer h entre la surface de la nappe et une hauteur z) l'équation de flux ascendant conservatif. Cette équation se déduit de **(1)** :

$$dh/dz = (q_c + K(h))/K(h) \quad \mathbf{(21)}$$

avec comme condition $h = 0$ à $z = z_0$ (surface de la nappe) et q_c valeur constante du flux conservatif. Bien que difficile à cause des connaissances mathématiques nécessaires à la compréhension de la méthode de résolution de cette équation en fonction des formulations de $K(h)$, ce papier de Gardner reste à ce jour une référence très citée.

Il y a aussi le travail conceptuel effectué par des spécialistes qui ont étudié ce phénomène dans un autre contexte, celui des polders des Pays-Bas. Rappelons ici le travail de De Laat (1976, 1980), repris et amélioré par van Walsum et Groenendijk (2008). L'approche de De Laat consiste à envisager les états du sol sous une culture alimentée en eau par remontée capillaire comme une succession d'états hydriques (Figure 53) pour lesquels il y a une valeur du flux conservatif ascendant. La valeur maximale de ce flux est déterminée en consultant des abaques qui précisent le fonctionnement hydrodynamique de chaque type de sol rencontré.

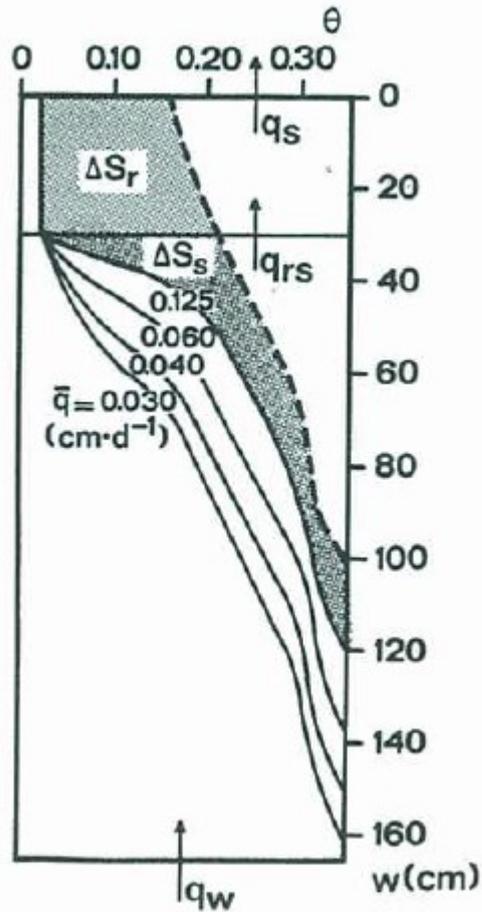


Figure 53. Succession des états de remontée capillaire au cours d'une centaine de jours (De Laet, 1980). La courbe en pointillé indique l'état hydrique de départ (équilibre hydrostatique) avec une nappe à 100 cm de profondeur. Les courbes suivantes indiquent les profils d'humidité qui correspondent aux différentes valeurs de flux ascendant, en décroissance au cours de la saison : 0,125-0,060-0,040 et 0,030 $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$, au fur et à mesure que descend aussi la nappe. Le flux ascendant est récupéré par les racines à la base de la couche supérieure du sol. Le sol est ici un sable fin

Van Walsum et Groenendijk (2008) justifient la reprise de l'approche de De Laet par le fait que la résolution numérique de l'équation (21) nécessite trop de temps de calcul sur ordinateur si on envisage de travailler sur des surfaces limitées à 25 m^2 . Cette surface est l'unité de base de leur système d'informations géographiques qui sert pour représenter l'altitude (variation minimale de 20 cm). Pour eux, le phénomène de remontée capillaire est très dépendant sur le terrain de la variation du relief et de la variation de la profondeur de la nappe. Une différence de 20 cm sur l'un de ces paramètres produit des effets significatifs si la nappe est à faible profondeur. Pour contourner le problème du calcul numérique des flux de remontées capillaires sur de grandes surfaces (à l'échelle d'une commune) où le relief n'est pas complètement plat, ni même la nappe, la succession des états d'équilibre hydrique envisagée par De Laet offre une économie de calcul considérable.

L'étude approfondie de ces documents et de tous ceux qui concernent l'alimentation en eau de la vigne dans les zones profondes du sol permettra de préciser le cadre théorique dans lequel s'insèrera l'expérimentation. Ce cadre théorique pourrait inclure la définition d'un nouveau concept, celui de « transmissivité hydrique » du sol, en envisageant la remontée capillaire comme un problème mathématique d'optimisation d'une fonction conjointe de la conductivité hydraulique et du gradient de potentiel hydrique.

2.2.2. Sujet 3 (suite) : étude expérimentale

Peu d'expérimentations ont été mises en place sur vigne pour traiter cette question. Signalons le travail de Guix-Hébrard *et al.* (2007) visant à mettre en évidence à l'échelle d'un bassin versant l'influence de la profondeur des nappes sur le statut hydrique de la vigne. Les difficultés signalées dans le paragraphe précédent expliquent vraisemblablement ce manque d'études. Elles doivent guider le choix de l'expérimentation.

Dans un premier temps, il faut se limiter à des textures sablo-limoneuses qui sont bien favorables au phénomène. La nappe doit être assurément présente, même si sa profondeur est non maîtrisable. Ces deux conditions sont remplies en certains tronçons des plaines alluviales des fleuves côtiers (Orb, Hérault, etc.). Il faudra s'assurer de la bonne homogénéité du profil textural, à tout le moins qu'il n'y ait pas de variation brusque de texture sur quelques décimètres.

L'expérimentation pourra combiner traitement sans apport pluvial (sol recouvert à chaque fois qu'est annoncé un évènement pluvieux majeur) et traitement pluvial, traitement sol enherbé et sol nu. Elle devra étudier la réponse dynamique de l'enracinement et les gradients de charge hydraulique sur l'ensemble du profil concerné (de la zone racinaire à la nappe).

Les données obtenues seront importantes pour la compréhension du fonctionnement hydrique de la vigne dans de telles situations. Il pourrait y avoir couplage de la vie hydrique de la plante à la nappe via le flux de remontée capillaire, avec une dégressivité (en relation avec la descente de nappe) plus ou moins favorable à la qualité du raisin ou au rendement. Mais l'étude proposée dépasse ce cadre. En effet, beaucoup de situations rencontrées au champ ont un lien indirect avec le phénomène des remontées capillaires. C'est le cas dans les jours qui suivent une forte pluie lorsque l'évaporation de surface déclenche un processus de flux ascendant à partir de couches humidifiées en profondeur. Le viticulteur doit-il alors intervenir en travail superficiel du sol pour casser la transmission de l'eau vers le haut ? A partir de quelle hauteur de pluie ? Combien d'eau économise-t-on alors ? Ce sont quelques-unes des multiples questions qui devraient trouver un début de réponse lorsqu'on en saura plus sur les remontées capillaires.

Une autre justification à cette étude est l'évolution probable de la valeur agronomique des terres en relation avec le changement climatique. Il est possible que les zones de plaine autrefois support de vignes à haut rendement deviennent du fait de leur grande réserve hydrique et aussi de ce phénomène de remontées capillaires des zones intéressantes pour de nouvelles appellations. Seules des études poussées comme celle proposée plus haut pourront donner des informations pertinentes.

2.3. Gestion de l'eau et entretien du vignoble

2.3.1. La thématique vigne enherbée et irrigation

La caractérisation dynamique du bilan hydrique de la vigne, en relation avec l'entretien du sol, reste une thématique à approfondir au sein de l'UMR System. L'échelle parcellaire est privilégiée au sein de l'Unité, mais il n'est pas sûr qu'elle soit suffisante dès lors que l'on veut ne négliger aucun terme du bilan, notamment les flux profonds. En effet, ceux-ci sont liés autant au matériau pédologique / géologique de profondeur qu'à la dynamique de nappes dont la recharge peut être très affectée par le paysage environnant (exemple de garrigues surplombant une parcelle viticole). L'enherbement peut aussi affecter ces flux profonds, voire la dynamique de la nappe, puisque d'une part plus d'eau s'infiltré (au moment des fortes pluies) et d'autre part les racines de la vigne descendent plus profondément. Ces questions pourront être abordées en tant que telles, mais aussi être associées à une autre thématique : Quel lien entre enherbement et irrigation ? Quelle géométrie relative des goutteurs et de l'herbe ? Faut-il envisager des goutteurs enterrés ? Autant de questions de recherche qui peuvent être regroupées sous la rubrique «Gestion de l'eau et entretien du sol en vignoble méditerranéen» qui sera au cœur du quatrième sujet de thèse que je propose.

2.3.2. Sujet 4 : concilier enherbement et irrigation dans l'entretien du sol en vignoble méditerranéen

Ce sujet de thèse sera scindé en deux volets, un premier qui fera une analyse critique des outils informatiques qui permettent théoriquement de traiter cette question. Il s'agit du modèle SIMDualKc développé par Rosa *et al.* (2011) et utilisé sur vigne enherbée par Fandino *et al.* (2012). Ce modèle offre la possibilité de prendre en compte de l'irrigation. Il correspond bien donc à notre besoin pour le calcul des termes du bilan hydrique d'une vigne enherbée. Le modèle WABOL sera aussi testé car il a été conçu pour étudier la question de l'enherbement dans les conditions hydriques encore plus limitantes, celles rencontrées par les oliveraies dans le sud de l'Espagne (Abazi *et al.*, 2013).

Le deuxième volet de cette thèse abordera la question de l'enchaînement des opérations culturales à mettre en œuvre par le viticulteur. Il est vraisemblable que le meilleur compromis entre aspect positif (protection du sol contre l'érosion, portance améliorée) et aspect négatif (concurrence hydrique) de l'enherbement soit de passer selon les années de parcelles intégralement enherbées (année médiane) à un enherbement un rang sur deux (année sèche). Une gestion dynamique est donc à mettre en œuvre, à l'image de celle développée au sein de l'UMR System pour le cas sans arrosage⁴³. Cette approche initiée par Ripoché *et al.* (2011) sera appliquée au cas d'une vigne enherbée irriguée. Elle pourrait permettre de calculer les compromis permis par l'association de l'irrigation et de l'enherbement dans différents systèmes de production, AOP et IGP. Un aspect important à

⁴³ Gary C., Gaudin R. & Metay A. 2014. Gestion de l'entretien du sol et fonctionnement hydrique du vignoble. *Innovations Agronomiques* 38:109-116

prendre en compte sera la moindre évacuation de résidus phytosanitaires par les eaux de drainage ou de ruissellement dans le cas de vignes enherbées puisqu'on peut supposer qu'une partie de ces résidus sera dégradée au sein du couvert herbacé.

2.3.3. L'impact du changement climatique

Enfin, l'influence du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation pourra être abordée grâce à l'emploi de scénarii climatiques sur les 30 années à venir (fourniture de données par la base agro-climatique d'Avignon). Cette question sera traitée dans un premier temps comme partie intégrante de la thèse « vigne enherbée et irrigation », le jeu de données climatiques servant à pousser à l'extrême le comportement du vignoble en maintenant les pratiques actuelles. L'association enherbement et arrosage sera l'une des options étudiées afin de voir notamment comment des sécheresses futures impacteront le besoin en eau d'arrosage. Des modifications du système de culture de la vigne seront envisagées de façon à contenir les impacts négatifs du changement, notamment celui lié à l'élévation de la température (Quénol, 2014). Cela pourra aller de la modification du système de plantation à des pratiques comme le mulching (Medrano *et al.*, 2015) ou l'ombrage. Le déploiement de couvertures photovoltaïques sur une partie des vignobles peut offrir une partie de la solution. Il faut aussi prendre en compte les progrès accomplis par d'autres équipes, à l'exemple du travail tout récent de Hofman *et al.* (2014) qui traite de l'occurrence de stress hydrique très marqué dans les vignobles allemands d'ici la fin du siècle.

2.4. Conclusion

Le présent document met en évidence la trajectoire d'un spécialiste du bilan hydrique des cultures et de la fertilisation azotée du riz repiqué. Cette trajectoire a été initiée très tôt par le choix d'investir un domaine pointu de l'agronomie (la radio-agronomie) puis de s'ouvrir sur le domaine complémentaire de l'étude de l'emploi des engrais azotés en milieu inondé.

Les travaux que j'ai encadrés portent sur le suivi de la solution du sol en rizière, la détermination des besoins en eau d'irrigation (vigne) et le pilotage d'arrosages (canne à sucre, vigne).

L'expérience acquise aussi bien en milieu tropical (Afrique de l'Ouest et Océan Indien) que méditerranéen montre à la fois une continuité dans les thématiques de recherche et une ouverture sur la valorisation de la production en vigne. L'étude du bilan hydrique a été approfondie sur canne à sucre et sur vigne, qui sont à cet égard des cultures très différentes. Les données acquises sur le placement d'urée en riziculture repiquée ont été valorisées dans la durée. Elles ont conduit à mieux articuler deux disciplines, la science du sol et la physiologie végétale.

Il ressort de cette expérience un besoin d'aller plus loin en certaines thématiques pour continuer à faire progresser la science et les techniques agricoles. C'est notamment le cas pour la définition d'un engrais optimal à mettre en avant en riziculture inondée. C'est

aussi le cas dans l'identification de compromis via la recherche de conditions optimales d'entretien du sol et d'arrosage pour des vignobles enherbés irrigués. Cette thématique est à rattacher aux objectifs de production des appellations et à placer dans le contexte du changement climatique en cours.

Ces deux thématiques ouvrent un éventail pour le développement de recherches à mener personnellement et en encadrement de thèse. J'espère que la thématique du nouvel engrais azoté et les deux thèses proposées trouveront un écho favorable auprès de jeunes étudiants malgaches (ou européens) et des universités et institutions de recherche qui seraient prêtes à apporter leur financement (France, Madagascar, IFDC, IRRI) pour envisager un stade de développement. La seconde thématique est depuis de nombreuses années au cœur de l'activité de l'UMR System, à Montpellier. Dès l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, il me faudra trouver les financements pour lancer ces thèses qui portent sur des thématiques largement ouvertes sur l'avenir.

3. Bibliographie

- Abazi U., Lorite I.J., Carceles B., Martinez Raya A., Duran V.H., Francia J.R. & Gomez J.A. 2013. WABOL: A conceptual water balance model for analyzing rainfall water use in olive orchards under different soil and cover crop management strategies. *Computers and Electronics in Agriculture* 91:35-48
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and drainage paper no. 56. FAO, Rome, Italie, 300 pages
- Andriamanampisoa O., Randrianarison S., Randianarison M., Ranoharison M., Marini P., Villemin P. & Jourdan O. 1975. *Définition des propriétés hydrodynamiques des sols du périmètre sucrier d'Analaiva*. Laboratoire de Radio Isotopes, Tananarive, 41 pages
- Bandaogo A., Bidjokazo F., Youl S., Safo E., Abaidoo R. & Andrews O. 2015. Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* DOI 10.1007/s10705-014-9653-6
- Bennett N.D., Croke B.F.W., Guariso G., Guillaume J.H.A., Hamilton S.H. *et al.* 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling and Software* 40:1-20
- Brown G.O. 2002. Henry Darcy and the making of a law. *Water Resources Research* 38:7-11
- Buckingham E. 1907. Studies on the movement of soil moisture. USDA, Bureau of Soils-Bulletin n° 38, Washington
- Cao Z.H., DeDatta S.K. & Fillery I.R.P. 1984. Effects of placement methods on floodwater properties and recovery of applied N (¹⁵N labeled urea) in wetland rice. *Soil Science Society of America Journal* 48:196-203
- Celette F. 2007. Dynamique des fonctionnements hydrique et azoté dans une vigne enherbée sous climat méditerranéen. Thèse de doctorat spécialité agronomie, SupAgro Montpellier, 179 pages + annexes
- Celette F., Ripoche A. & Gary C. 2010. WaLIS-A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management* 97: 1749-1759
- Chen R.Y. & Zhu Z.L. 1982. Characteristics of the fate and efficiency of nitrogen in supergranules of urea. *Fertilizer Research* 3:63-71
- De Giudici P. 1993. Caractérisation physico-chimique des sols rizicultivés d'un bas-fond des hautes terres de Madagascar : variabilité topologique des paramètres et influence sur la productivité. In : *Bas-fonds et riziculture*, Antananarivo, 9-14 décembre 1991, CIRAD édition, p. 305-312

- De Laat P.J.M. 1976. A pseudo steady-state solution of water movement in the unsaturated zone of the soil. *Journal of Hydrology* 30:19-27
- De Laat P.J.M. 1980. *Model for unsaturated flow above a shallow water-table, applied to a regional sub-surface flow problem*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 126 pages
- Fandino M., Cancela J.J., Rey B.J., Martinez E.M., Rosa R.G. & Pereira L.S. 2012. Using the dual-Kc approach to model evapotranspiration of Albarino vineyards (*Vitis vinifera* L. cv. Albarino) with consideration of active ground cover. *Agricultural Water Management* 112:75-87
- Galison P. 1987. *How experiments end*. The University of Chicago Press, 337 pages
- Gardner W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85:228-232
- Gasser J.K.R. & Ross G.J.S. 1975. The distribution in the soil of aqueous ammonia injected under grass. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 26:719-729
- Guix-Hébrard N., Voltz M., Trambouze W., Garnier F., Gaudillère J.P. & Lagacherie P. 2007. Influence of watertable depths on the variation of grapevine water status at the landscape scale. *European Journal of Agronomy* 27:187-196
- Hillel D., Krentos V. & Stylianou Y. 1972. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science* 114:395-400
- Hillel D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, 413 pages
- Hillel D. 1987. On the tortuous path of research. *Soil Science* 143:304-305
- Hofman M., Lux R. & Schultz H.R. 2014. Constructing a framework for risk analysis of climate change effects on the water budget of differently sloped vineyards with a numerical simulation using the Monte Carlo method coupled to a water balance model. *Frontiers in Plant Science* 5:645
- Hoque M.A., Wohab M.A., Hossain M.A., Saha K.K. & Hassan M.S. 2013. Improvement and evaluation of Bari USG applicator. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15(2):87-94
- Hove R.M. & Bhawe M. 2011. Plant aquaporins with non-aqua functions: deciphering the signature sequences. *Plant Molecular Biology* 75:413-430
- Jakeman A.J., Letcher R.E. & Norton J.P. 2006. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling and Software* 21:602-614
- Jourdan O. 1983. *Contribution à l'étude de la capacité de rétention en eau des sols. Cas de deux sols malgaches*. Thèse de Docteur Ingénieur en agronomie option pédologie de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 135 pages

- Lebon E., Dumas V., Pieri P. & Schultz H.R. 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology* 30:679-710
- Legates D.R. & McCabe G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35:233-241
- Legros J.P. 2007. *Les grands sols du monde*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 pages
- Medrano H., Tomas M., Martorell S., Escalona J.M., Pou A., Fuentes S., Flexas J. & Bota J. 2015. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development* DOI 10.1007/s13593-014-0280-z
- Moutonnet P. 1972. Contribution à l'étude des remontées capillaires sous culture cotonnière de décrue du nord-ouest de Madagascar. *Terre Malgache* 12:161-178
- Nimmo J.R. & Landa E.R. 2005. The soil physics contributions of Edgar Buckingham. *Soil Science Society of America Journal* 69:328-342
- Nishiuchi S., Yamauchi T., Takahashi H., Kotula L. & Nakazano M. 2012. Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice. *Rice* 5:2
- Ojeda H. 2007. Irrigation qualitative de précision de la vigne. *Progrès Agricole et Viticole* 124(7) :133-141
- Pellegrino A. 2003. *Elaboration d'un outil de diagnostic du stress hydrique utilisable sur la vigne en parcelle agricole par couplage d'un modèle de bilan hydrique et d'indicateurs de fonctionnement de la plante*. Thèse de doctorat spécialité sciences agronomiques, SupAgro Montpellier, 138 pages
- Pellegrino A., Lebon E., Voltz M. & Wery J. 2004. Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant and Soil* 266:129-142
- Pinner A. & Nye P.H. 1982. A pulse method for studying effects of dead-end pores, slow equilibration and soil structure on diffusion of solutes in soil. *Journal of Soil Science* 33:25-35
- Quénol H. 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Lavoisier Tec et Doc, 444 pages (16 planches couleur)
- Rachhpal-Singh & Nye P.H. 1984. Diffusion of urea, ammonium and soil alkalinity from surface applied urea. *Journal of Soil Science* 35:529-538
- Rachhpal-Singh & Nye P.H. 1986. A model of ammonia volatilization from applied urea. I. Development of the model. II. Experimental testing. III. Sensitivity analysis, mechanisms, and applications. *Journal of Soil Science* 37:9-40
- Rachhpal-Singh & Nye P.H. 1988. A model of ammonia volatilization from applied urea. IV. Effect of method of urea application. *Journal of Soil Science* 39:9-14

- Raes D. & Deproost P. 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. *Agricultural Water Management* 62:79-91
- Raunet M. 1993. Structure et fonctionnement d'un bas-fond rizicole sur les hautes terres de Madagascar. In : *Bas-fonds et riziculture*, Antananarivo, 9-14 décembre 1991, CIRAD édition, p. 99-125
- Rawat S.R., Silim S.N., Kronzucker H.J., Siddiqi M.Y. & Glass A.D.M. 1999. *AtAMT1* gene expression and NH_4^+ uptake in roots of *Arabidopsis thaliana*: evidence for regulation by root glutamine levels. *The Plant Journal* 19(2):143-152
- Rawls W.J., Brakensiek D.L. & Saxton K.E. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25:1316-1320
- Richards L.A. 1960. Advances in soil physics. Volume 1, P. 67-78 In: Proceeding of the 7th International Congress of Soil Science, Madison, Wisconsin, USA
- Richtmyer R.D. & Morton K.W. 1967. *Difference method for initial value problems*. John Wiley and Sons, New York, 405 pages
- Ripoche A., Rellier J.P., Martin-Clouaire R., Paré N., Biarnès A. & Gary C. 2011. Modelling adaptive management of intercropping in vineyards to satisfy agronomic and environmental performances under Mediterranean climate. *Environmental Modelling and Software* 26:1467-1480
- Romero P., Castro G. & Gomez J.A. 2007. Curve number values for olive orchards under different soil management. *Soil Science Society of America Journal* 71:1758-1769
- Rosa R.D., Paredes P., Rodrigues G.C., Fernando R.M., Alves I., Pereira L.S. & Allen R.G. 2011. Implementing the dual crop coefficient approach in an interactive software: 2 Model testing. *Agricultural Water Management* 103:62-77
- Roux S., Brun F. & Wallach D. 2014. Combining input uncertainty and residual error in crop model predictions: A case study on vineyards. *European Journal of Agronomy* 52:191-197
- Savant N.K., De Datta S.K & Craswell E.T. 1982. Distribution patterns of ammonium nitrogen and ^{15}N uptake by rice after deep placement of urea supergranules in wetland rice. *Soil Science Society of America Journal* 46:567-573
- Savant N.K. & Stangel P.J. 1990. Deep placement of urea supergranules in transplanted rice: principles and practices. *Fertilizer Research* 25:1-83
- Shah S.B., Wolfe M.L. & Borggaard J.T. 2004. Simulating the fate of subsurface-banded urea. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 70:47-66
- Taiz L. & Zeiger E. 1991. *Plant physiology*. The Benjamin / Cummings Company, 565 pages

- Totin E., Stroosnijder L. & Agbossou E. 2013. Mulching upland rice for efficient water management: A collaborative approach in Benin. *Agricultural Water Management* 125:71-80
- Tron G., Isbérie C. & Chol P. 2000. *La tensiométrie pour piloter les irrigations*. Editions Educagri, 247 pages
- UNEP. 2008. *Afrique. Atlas d'un monde en mutation*, 393 pages
- Van Leeuwen C., Pieri C. & Vivin P. 2010. Comparison of three operational tools for the assessment of vine water status: stem water potential, carbon isotope discrimination and water balance. P. 87-106 In: S. Delrot, H. Medrano, E.Or, L. Bavaresco & S. Grando (eds.), *Methodologies and results in grapevine research*. Springer Science and Business Media
- Van Walsum P.E.V. & Groenendijk P. 2008. Quasi steady-state simulation of the unsaturated zone in groundwater modeling of lowland regions. *Vadose Zone Journal* 7:769-781
- Watanabe K., Nishiuchi S., Kulichikhin K. & Nakazono M. 2013. Does suberin accumulation in plant roots contribute to waterlogging tolerance. *Frontiers in Plant Science* 4:178
- Yamaya T. & Kusano M. 2014. Evidence supporting distinct functions of three cytosolic glutamine synthetases and two NADH-glutamate synthases in rice. *Journal of Experimental Botany* 65: 5519-5525
- Yoshida S. 1981. *Fundamentals of rice crop production*. IRRI, Los Banos (Philippines), 269 pages

4. Curriculum vitae

4.1. Formation

De 1985 à 1987, préparation au Laboratoire de Radio Isotopes, Antananarivo, d'une thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques soutenue en décembre 1987 à l'Institut Polytechnique de Lorraine.

- Jury de thèse :
 - Michel Schiavon, MCF, Directeur de thèse (ENSAIA, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, Nancy), examinateur ;
 - Armand Guckert, Pr., ENSAIA, rapporteur ;
 - Raoul Calvet, Pr., INA-PG, rapporteur ;
 - Paul Fallavier, ingénieur IRAT, examinateur

Septembre 1978 – Juillet 1979 : DEA Sciences du Sol à l'Université de Nancy-I

Septembre 1976 – Juillet 1979 : cursus d'Ingénieur Agronome à l'ENSAIA de Nancy

Septembre 1974 – Juin 1976 : classe préparatoire de Biologie-Mathématiques Supérieures et Spéciales au Lycée d'Etat Chateaubriand à Rennes (admis au Concours A des ENSA, admissible au Concours de l'ENSET, section A3, Biochimie)

Baccalauréat Série C, avec mention AB

4.2. Parcours professionnel

Juillet 2013 – à présent : **Ingénieur Divisionnaire** de l'Agriculture et de l'Environnement à SupAgro Montpellier (JO du 11 juillet 2013)

Juin 2012 : Inscription sur la liste des spécialistes et référents du Conseil Général du Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et l'Espace Rural

Janvier 2003 – Juin 2013 : Ingénieur de l'Agriculture et de l'Environnement à SupAgro Montpellier

Avril 2001 – Décembre 2002 : Ingénieur contractuel, Ministère de l'Agriculture

Janvier 1999 – Mars 2001 : Ingénieur de Recherche mis à disposition du CIRAD Montpellier, Programme Canne à Sucre, par le Ministère de la Coopération

Septembre 1996 – Décembre 1998 : Agent du Ministère de la coopération en portage « Le Pors » (mission de préparation du « futur » service civique de la défense)

Décembre 1991 – Août 1996 : Enseignant Chercheur en Physiologie Végétale au Département de Biologie de la Faculté des Sciences de Niamey, contrat du Ministère de la Coopération

Septembre 1981 – Septembre 1991 : Radio agronome au Laboratoire de Radio Isotopes de l'Université de Madagascar, contrat du Ministère de la Coopération

Avril 1980 – Juillet 1981 : Volontaire du Service National au Laboratoire de Radio Isotopes de l'ORSTOM à Adiopodoumé (République de Côte d'Ivoire)

Septembre 1979 – Mars 1980 : Stagiaire longue durée du CEA puis attaché CNRS au CEN Cadarache, service de Radio-Agronomie

4.3. Production scientifique

Le nom des étudiants que j'ai directement encadrés est souligné

Synthèse

- 26 publications
- 2 chapitres d'ouvrages
- 9 projets de recherche (participation ou direction)
- 4 communications à des congrès
- 14 rapports scientifiques

4.3.1. Publications

Publications dans des revues internationales

- [19] **Gaudin R.** & D'Onofrio G. 2015. Is the source-sink relationship in transplanted rice receiving deep placed urea supergranules dependent upon the geometry of transplanting? *Paddy and Water Environment* doi: [10.1007/s10333-014-0461-z](https://doi.org/10.1007/s10333-014-0461-z)
- [18] **Gaudin R.**, Kansou K., Payan J.C., Pellegrino A. & Gary C. 2014. A water stress index based on water balance modelling for discrimination of grapevine quality and yield. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 48(1):1-9
- [17] Kouam E.B., Pasquet R.S., Campagne P., Tignegre J.B., Thoen K., **Gaudin R.**, Ouedraogo J.T., Salifu A.B., Muluvi G.M. & Gepts P. 2012. Genetic structure and mating system of wild cowpea populations in West Africa. *BMC Plant Biology* 12:113
- [16] **Gaudin R.** & Gary C. 2012. Model-based evaluation of irrigation needs in Mediterranean vineyards. *Irrigation Science* 30(5):449-459
- [15] **Gaudin R.** 2012. The kinetics of ammonia disappearance from deep-placed urea supergranules (USG) in transplanted rice: the effects of split USG application and PK fertiliser. *Paddy and Water Environment* 10(1):1-5

- [14] **Gaudin R.**, Celette F. & Gary C. 2010. Contribution of runoff to incomplete off season soil water refilling in a Mediterranean vineyard. *Agricultural Water Management* 97(10):1534-1540
- [13] Celette F., **Gaudin R.** & Gary C. 2008. Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy* 29:153-162
- [12] **Gaudin R.** & Rapanoelina M. 2003. Irrigation based on a nomogram using soil suction measurements. *Agricultural Water Management* 58(1):45-53
- [11] **Gaudin R.** & Dupuy J. 1999. Ammoniacal nutrition of transplanted rice fertilized with large urea granules. *Agronomy Journal* 91(1):33-36
- [10] **Gaudin R.**, Rapanoelina M. & Oriol P. 1998. Analyses tensiométriques appliquées au pilotage d'irrigation. *Cahiers Agricultures* 7:131-138
- [9] **Gaudin R.** 1992. Evaluation de la remontée capillaire sous triticales de contre-saison en sol de rizière. *L'Agronomie Tropicale* 46(2):83-87
- [8] **Gaudin R.** 1991. Un outil enterré pour caractériser l'alimentation ammoniacale du riz irrigué. *C.R. Académie des Sciences de Paris*, t. 313, série III, p. 221-225
- [7] Dupuy J., **Gaudin R.** & D'Onofrio G. 1990. Etude à l'étude d'urée enrichie en ¹⁵N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. III. Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranules d'urée ou de perlurée au repiquage du riz ou 21 jours après. *L'Agronomie Tropicale* 45(1):21-30
- [6] Dupuy J., **Gaudin R.** & D'Onofrio G. 1990. Etude à l'étude d'urée enrichie en ¹⁵N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. II. Effets d'un apport unique ou de deux apports de supergranules d'urée ou de perlurée au cours de la phase initiale de croissance du riz inondé. *L'Agronomie Tropicale* 45(1):11-20
- [5] Dupuy J., D'Onofrio G. & **Gaudin R.** 1990. Etude à l'étude d'urée enrichie en ¹⁵N de la fertilisation azotée du riz inondé à Madagascar. I. Comparaison entre supergranules d'urée, perlurée et solution d'urée placés à 1 cm ou 10 cm de profondeur. *L'Agronomie Tropicale* 45(1):3-10
- [4] **Gaudin R.** 1988. L'ammoniac NH₃, une clé pour comprendre l'efficacité des supergranules d'urée en riziculture irriguée. *L'Agronomie Tropicale* 43(1):30-39
- [3] **Gaudin R.**, Dupuy J. & Bournat P. 1987. Suivi du contenu en azote de la solution du sol d'une rizière après placement d'urée. *L'Agronomie Tropicale*, 42(1):13-9
- [2] **Gaudin R.**, Dupuy J. & Ranaivo J. 1985. Les bougies poreuses, un outil pour suivre l'ammonium et le nitrate en solution dans les sols de rizières. 2. Etude expérimentale *L'Agronomie Tropicale* 40(1):33-38

- [1] **Gaudin R.**, Dupuy J. & Ranaivo J. 1985. Les bougies poreuses, un outil pour suivre l'ammonium et le nitrate en solution dans les sols de rizières. 1. Etude bibliographique *L'Agronomie Tropicale* 40(1):28-32

Facteur d'impact (I.F.) 2013 des revues internationales dans lesquelles j'ai publié

Revues	Nombre de publications dans chaque revue	Place de l'auteur comme signataire	Numéro de l'article	IF ₂₀₁₃
<i>Agricultural Water Management</i>	2	1 ^{er}	[12], [14]	2,33
<i>Agronomy Journal</i>	1	1 ^{er}	[11]	1,54
<i>BMC Plant Biology</i>	1	6 ^{ème}	[17]	3,94
<i>Cahiers Agricultures</i>	1	1 ^{er}	[10]	0,39
<i>European Journal of Agronomy</i>	1	2 nd	[13]	2,92
<i>Irrigation Science</i>	1	1 ^{er}	[16]	2,84
<i>Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin</i>	1	1 ^{er}	[18]	0,80
<i>Paddy and Water Environment</i>	2	1 ^{er}	[15], [19]	1,25

Communication à l'Académie Malgache

- [20] **Gaudin R.** 1988. Le rôle de l'ammoniac dans l'alimentation azotée des plantes : un problème remis à jour par l'étude de la fertilisation azotée du riz irrigué. *Bulletin de l'Académie Malgache* 66(1-2):181-184

Publications dans des revues de développement avec comité de lecture

- [26] Gary C., **Gaudin R.** & Metay A. 2014. Gestion de l'entretien du sol et fonctionnement hydrique du vignoble. *Innovations Agronomiques* 38:109-116
- [25] Rapanoelina M., **Gaudin R.** & Oriol P. 1999. Sables roux, pivots, tensiomètres : comment ajuster l'irrigation ? *Agriculture et Développement* 24:127-130
- [24] **Gaudin R.**, Brouwers M. & Chopart J.L. 1999. L'eau utile et les caractéristiques hydrodynamiques des sols sous culture de canne à sucre. *Agriculture et Développement* 24:30-38
- [23] **Gaudin R.** 1999. L'évaluation des besoins en eau de la canne. *Agriculture et Développement* 24:10-20
- [22] **Gaudin R.** 1999. Incidence de l'eau sur la culture de la canne. *Agriculture et Développement* 24:4-8
- [21] Oriol P., Rapanoelina M. & **Gaudin R.** 1995. Le pilotage de l'irrigation de la canne à sucre par tensiomètres. *Agriculture et Développement* 6:39-48

4.3.2. Contributions à des congrès

Avec publications des actes du congrès

- [C2] **Gaudin R.**, Gary C., Wery J., Coulon V. & Cazes E. 2014. Monitoring of irrigation in a Mediterranean vineyard: water balance simulation versus pressure chamber measurement. *Acta Hort. (ISHS)* 1038:295-302. In: Proceedings of the Seventh International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (symposium held at Geisenheim, Germany in July 2012), editors: P. Braun, M. Stoll and J. Zinkernagel.
- [C1] **Gaudin R.** 1993. Caractériser la fertilité des sols de rizières par une mesure à l'interface des métabolismes carboné et azoté de la plante. Théorie, Méthode et Application. Colloque « Bas-Fond et Riziculture », Antananarivo décembre 1991, publié p. 305-312 ; CIRAD 1993, ISBN 2-87614-100-0 (éditeur : M. Raunet), 517 pages.

Autres contributions

- [C3] Dufourcq T., Barraud G., Delpuech X., Debord C. & **Gaudin R.** 2013. Application du modèle de bilan hydrique WaLIS pour prédire le potentiel hydrique foliaire de tige sur cépage Colombard en Côtes de Gascogne. *Ciência e Técnica Vitivinícola - Volume 28, Proceedings 18th International Symposium GiESCO, Porto, 7-11 July 2013*, p.75 -79.
- Oriol P., Rapanoelina M., **Gaudin R.** & Rasolo J. 1991. Suivi tensiométrique d'une culture de canne à sucre irriguée par rampe pivotante sur sol alluvionnaire léger. *AFCAS : 1^{ère} rencontre internationale en langue française sur la canne à sucre*, p.174-180.

4.3.3. Rapports scientifiques (14 rapports)

- [R14] **Gaudin R.** & Papin O. 2010. Bilan carbone-Etude pilote. UMR 1230 Fonctionnement et analyse des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens. Données 2008. *ECIC-CO2-FACTOR X-SYMOE*, 50 pages
- [R13] **Gaudin R.** 1995. La distribution des plantes C3, C4 et CAM au Niger. *Atelier National sur les Ressources Phytogénétiques*, Niamey, 8 pages
- [R12] **Gaudin R.**, Rapanoelina M. & Oriol P. 1990. Rapport des études tensiométriques pour l'irrigation à la SIRANALA. *Laboratoire de Radio Isotopes / SIRANALA*, 42 pages
- [R11] **Gaudin R.** 1989. Rapport de la mission effectuée à la SIRAMA Ambilobé, 8-9 décembre 1989. *Laboratoire de Radio Isotopes*, 9 pages
- [R10] **Gaudin R.** 1989. De l'absorption de l'azote ammoniacal sous sa forme moléculaire NH₃ à la sonde de fertilité : implication physiologique et intérêt agronomique. In : *Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond sur les hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement*. M. Raunet (éd.), Montpellier, CIRAD, p. 77-97

- [R9] **Gaudin R.** 1988. Projet d'étude des remontées capillaires pour l'alimentation hydrique du blé de contre-saison au Lac Alaotra. *Laboratoire de Radio Isotopes*, 5 pages
- [R8] **Gaudin R.** 1988. Les problèmes de nutrition minérale (en particulier azotée) posés par l'étude de la fertilisation supergranule d'urée en différents points du bas-fond d'Ambohitrakoho. In : *Bilan hydrique et minéral d'un bas-fond des hautes terres de Madagascar. Rapport d'avancement*. M. Raunet (éd.), Montpellier, CIRAD, p. 107-130
- [R7] **Gaudin R.** Non daté. Etude du rôle des impluvia dans l'alimentation hydrique des pins. Rapport des études menées à la Fanalamanga, *Université de Madagascar*, 15 pages
- [R6] D'Onofrio G., Dupuy J., **Gaudin R.** & Ravohitrarivo P. 1985. Effets comparés de l'application de perlurée et de supergranules d'urée sur riz inondé à Madagascar. 26 pages. *Ministère de la Production Agricole et de la Réforme Agraire de Madagascar / Programme Engrais Malgache de la FAO*
- [R5] **Gaudin R.** 1985. L'eau, le sol et la plante. Qu'est-ce que la courbe caractéristique et à quoi sert-elle ? *Centre d'Informations Scientifiques et Techniques de Tananarive*, 15 pages
- [R4] **Gaudin R.** & Dupuy J. 1985. La sonde à neutrons et les tensiomètres. Méthodologie, Application, ou comment : déterminer avec précision les qualités hydrodynamiques d'un sol, connaître les besoins en eau d'une culture, piloter une irrigation. *Université de Madagascar*, 43 pages
- [R3] **Gaudin R.** & Dupuy J. 1984. Etude bibliographique sur les bougies poreuses utilisées comme préleveurs de la solution du sol. *Université de Madagascar*, 17 pages
- [R2] **Gaudin R.** 1981. Etude à l'aide des radio-isotopes du phosphore des liaisons racines-feuilles chez l'ananas. *ORSTOM Adiopodoumé, République de Côte d'Ivoire*
- [R1] Larelle D. & **Gaudin R.** 1980. Etude hydrodynamique d'un sol à l'aide d'un humidimètre à neutrons et d'une batterie de tensiomètres. Modèle expérimental. *CEA, Département de Biologie, Service de Radio-Agronomie, Saint-Paul-lez-Durance*, 20 pages

4.4. Conduite de programmes de recherche et collaborations à des programmes scientifiques

- 2011-2013 : Etude du pilotage de l'irrigation par modèle au sein de domaine viticole (Domaine Cazes) en collaboration avec la société **Advini** pour l'étude. Durée : 2 ans. Valorisation par une communication au sixième symposium international sur l'irrigation des cultures et un chapitre d'ouvrage [C2].
- 2008-2011 : Participation au Projet **Climfourel**, projet PSDR (projet pour et sur le Développement Régional) à financement INRA, CEMAGREF, CIRAD et SupAgro :

Adaptations au changement climatique des systèmes d'élevage de l'arc péri-méditerranéen (Sud du massif central). Durée : 3 ans. Valorisation par 2 projets collectifs d'ingénieurs.

- 2003-2011 : Participation au Programme vigne de l'UMR System sur le partage de la ressource hydrique dans le système vigne-enherbement. Durée : 8 ans.
- 1999-2000 : Coordination du numéro spécial d'**Agriculture et Développement** (Programme Canne à sucre du CIRAD) sur l'irrigation de la canne à sucre. Durée : 2 ans.
- 1993-1994 : Lancement du programme recherche de l'**IRD : Biodiversité du niébé** en Afrique de l'Ouest. Durée : 1 an. Valorisation dans la publication de synthèse [17] d'un doctorant africain.
- 1987-1990 : Initiation et mise en œuvre de la **convention de travail entre LRI et SIRANALA** (Analaiva-Morondava, Madagascar) pour les études sur le pilotage des arrosages au sein du périmètre sucrier. Durée : 3 ans. Valorisation dans revue de développement [21, 25] pour l'aspect pratique du pilotage en sols légers, dans revue internationale [10, 12] pour les avancées théoriques sur les flux d'eau dans le sol.
- 1986-1989 : Etude du bilan hydrique et minéral d'un bas-fond représentatif des Hautes Terres Malgaches. Participation à l'**Action Thématique Programmée « Bas-Fonds »**. Durée : 3 ans. Coordinateur de l'action du LRI (Laboratoire de Radio Isotopes) ; financement : CIRAD-CNRS-INRA-ORSTOM et Ministère de la Coopération. Valorisation par le colloque international « Bas-fond et Riziculture » tenu en décembre 1991 à Antananarivo, [C1].
- 1983-1986 : Etude à l'aide d'urée enrichie en ¹⁵N de la réponse du riz repiqué à la fertilisation supergranules d'urée. Participation au **Programme Engrais Malgache** (FAO-Ministère de la Réforme Agraire et du Développement Rural). Durée : 4 ans. Valorisation par une série d'articles dans la revue de référence [5, 6, 7].
- 1982-1984 : Collaboration avec le groupe d'étude de la solution du sol (IRAT). Durée : 2 ans.

Tableau synthétisant mes principales collaborations nationales et internationales (hors équipe actuelle d'appartenance) ayant donné lieu à des publications

Collaborateur (s)	Structure	Pays	Numéro de la publication
C. Pieri, R. Oliver	IRAT	France	1, 2
G. D'Onofrio	FAO	Italie, Madagascar	5, 6, 7, 19
M. Raunet	CIRAD	France	4, C1
M. Rapanoelina, P. Oriol	SIRANALA/ CIRAD	Madagascar	10, 12, 21, 25
M. Brouwers	CIRAD	France	24
R. Pasquet	IRD	Niger	17
E. Cazes, V. Coulon	Advini	France	C2

4.5. Activités pédagogiques

J'ai assuré le temps plein d'un enseignant chercheur (192 h équivalent TD par an) à la Faculté des Sciences de Niamey, de 1992 à 1996, en physiologie végétale. Deux publics concernés : amphi de 120 étudiants en CB-BG* 2 (70 étudiants) et Agro 2 (50 étudiants) et salle de 12 étudiants en licence sciences naturelles.

*CB-BG correspond à Chimie-Biologie/ Biologie-Géologie

De 1982 à 1991, j'ai délivré un volume de 20 h annuelles en radio agronomie auprès de 20 étudiants de la spécialisation agriculture de l'Etablissement des Sciences Supérieures Agronomiques de Tananarive.

Depuis 2008, j'assure un réalisé pédagogique d'environ 120 h annuelles dans les formations de Licences Professionnelles « Agriculture Raisonnée et Certification environnementale » et « Viticulture Raisonnée et Certification Environnementale » de Montpellier SupAgro (cohabilitation avec l'Université Paul-Valéry Montpellier, UFR3).

4.5.1. Enseignement

Détail des enseignements

Radio Agronomie, de 1982 à 1991 : Etablissement d'Enseignement Supérieur des Sciences Agronomiques de Tananarive, spécialisation agriculture ; 20 h par an. Durée : 10 ans.

Généralités sur la physique nucléaire et les rayonnements : constitution de la matière – les 4 interactions fondamentales – la radioactivité – méthode de mesure des rayonnements – radioprotection

Utilisation des radio-isotopes en sources scellées en agronomie : l'eau dans le sol / la sonde à neutrons (avec TP) – la densité des sols / le gamma-densimètre (avec TP) – la méthode du drainage interne (TD) – irradiation des denrées

Utilisation des radio-isotopes en sources non scellées en agronomie : radio-entomologie – dilution isotopique

Utilisation des isotopes stables en agronomie : l'azote-15

Physiologie Végétale, de 1992 à 1996 : Faculté des Sciences de Niamey ; 192 h équivalent TD par an. Durée : 6 ans.

a) Niveau CB-BG 2 (70 étudiants) et Agro 2 (50 étudiants)

La cellule végétale. La plante dans son milieu.

Alimentation hydrique : eau dans le sol – poils absorbants – stomates (avec TP) – caractérisation des sèves (TD) – caractérisation du continuum sol-plante-atmosphère à l'aide de la notion de potentiel hydrique (TP pression osmotique) – circulation de l'eau – régulation stomatique

Photosynthèse : chloroplastes – pigments photorécepteurs – métabolisme C3 et photo-respiration – métabolismes C4 et CAM

Métabolisme de l'azote : assimilation de l'ammoniaque – fixation symbiotique de l'azote atmosphérique – assimilation du nitrate

Etude des relations eau-sol-plante

b) Niveau Licence Sciences Naturelles (12 étudiants)

Nutrition minérale

La germination (y compris aspects biochimiques)

Médiateurs moléculaires de la croissance et du développement (avec TP et TD)

Agronomie, de 2008 à actuel : Montpellier SupAgro ; Licences Professionnelles Agriculture Raisonnée et Certification Environnementale (20 étudiants) / Viticulture Raisonnée et Certification Environnementale (12 étudiants) ; 120 h équivalent TD par an. Durée : 6 ans.

Physiologie et agronomie générale

Description, Caractérisation et Formation des sols agricoles

Constituants et propriétés : complexe argilo-humique – capacité d'échange des cations – mesure de l'acidité (ou basicité) des sols – calcul du besoin éventuel en chaux

L'eau dans le sol : définition du potentiel hydrique – méthodes de mesure de l'humidité et du potentiel hydrique – flux d'eau dans le sol

Bilan hydrique et pilotage des arrosages (avec TD)

Analyse de sols (TD)

Responsabilités pédagogiques

- Depuis 2008, Responsable de l'UE2 Agronomie de la licence professionnelle Agriculture Raisonnée et Certification Environnementale (cohabilitation SupAgro et Université Paul-Valéry)
- Depuis 2008, Responsable de l'UE2 Agronomie de la licence professionnelle Viticulture Raisonnée et Certification Environnementale (licence en alternance) (cohabilitation SupAgro et Université Paul-Valéry)

Enseignant invité

Septembre 2014 : « Le placement d'urée (supergranules d'urée) en riziculture repiquée ; intérêts et limites ». Cours donné à l'école thématique sur les services systémiques rendus par les sols, organisée par le LRI et l'IRD à Tananarive (financement FSP-PARRUR et AUF)

4.5.2. Encadrement d'étudiants

Au total, j'ai assuré l'encadrement de 22 étudiants dans le cadre de leur stage de fin d'études :

- 3 en Master 2,
- 1 en DEA,
- 1 en DESSA,
- 13 en Licence professionnelle Agriculture Raisonnée et Certification Environnementale,
- 3 en Licence professionnelle Viticulture Raisonnée et Certification Environnementale.

J'ai aussi encadré 3 projets collectifs d'Ingénieurs, spécialisation Production Végétale Durable.

Master 2 ou DEA

- Coulon V. 2012. Irrigation de la vigne au domaine Cazes : Détermination des conditions d'irrigation optimales et mise en place d'un outil de pilotage. Ecole d'ingénieurs de Purpan
- El-Daher M.H. 2012. Pilotage de l'irrigation dans le Roussillon. Domaine Cazes Frères. Master viti-oenologie de SupAgro
- Manuel M. 2007. Etude par modélisation d'une stratégie de pilotage d'irrigation de la vigne. UMR System
- Ranaivo J. 1985. Etude cinétique de la variation de la concentration en $N-NH_4^+$ de la solution d'un sol de rizière après apport en profondeur de supergranules d'urée (« point placement»). DEA de sciences biologiques appliquées, Université de Madagascar

Diplôme d'études supérieures en sciences agronomiques

- Rapanoelina M. 1987. Etude de la rétention spécifique des lysimètres. Université de Madagascar, Etablissement d'Enseignement Supérieur des Sciences Agronomiques

Licence Agriculture Raisonnée et Certification Environnementale

- Santucci G. 2014. Une nouvelle pratique agronomique de gestion des pailles de riz. Centre Français du Riz, Arles
- BreLOT A. 2014. Evolution de la fertilité des sols en Franche-Comté : exemple du canton de Chemin. Coopérative Interval

- Genin M. 2013. Proposition pour améliorer la gestion de la fertilisation chez les adhérents de la coopérative. Cofruid'Oc, Saint-Just
- Bardou A. 2012. Améliorer l'irrigation en travaillant sur l'environnement des systèmes d'irrigation et leur pilotage. Coopérative Unicoque, Cancon
- Daneau T. 2012. Evaluation de la technique de travail du sol simplifié « Strip Till » dans le contexte agronomique des pays de la Loire. Terrena Terroirs de la Noelle, Ancenis
- Cussac M. 2012. Gestion de la fertilité et de l'irrigation. Analyses et suivis parcellaires sur vergers de pommiers. Cofruid'Oc, Saint-Just
- Collet M. 2011. Possibles réductions d'intrants et changements édaphiques après utilisation de bactériolite / bactériosol. Sobac, Rodez
- Dulamon C. 2010. L'agriculture durable dans les Landes. FD Cuma des Landes, Mont-de-Marsan
- Trouillet P. 2010. Diagnostic irrigation par aspersion sous abri. Chambre d'Agriculture du Rhône, Brignais
- Gerbon F. 2009. Analyse et suivi de parcelles de pommiers sur le bassin versant de l'étang de l'Or. Biodiversité, fertilisation et irrigation. Cofruid'Oc, Saint-Just
- Cros A. 2009. La nutrition des fruits à noyaux. Un suivi technique et un plan de formation des producteurs pour une amélioration des pratiques. Terraneo, Saint-Hippolyte
- Denis P. 2008. La gestion de l'irrigation dans le bas-fond de Laafou. Fédération des Paysans du Fouta Djallon, Laafou (Guinée)
- Goller C. 2002. Actualisation d'une carte d'occupation des sols et évaluation de la pollution d'une nappe par les nitrates. Cas de la nappe de la Vistrenque. Syndicat mixte d'étude et de gestion de la nappe de la Vistrenque, Redessan

Licence Viticulture Raisonnée et Certification Environnementale

- Del Rio A. 2014. Pilotage de la fertilisation en viticulture. Château Les Mesclances, La Crau
- Chardigny V. 2013. Essai d'évaluation du différentiel d'émission de gaz à effet de serre entre un vignoble certifié agriculture biologique et un vignoble en viticulture conventionnelle. Château de la Nerthe, Chateauneuf-du-Pape
- Avallet B. 2013. L'entretien du sol en viticulture au sein de parcelles accidentées. Domaine de Bonsérine, Ampuis

Projet collectif de la spécialisation SupAgro Production Végétale Durable (avec Pr A. Capillon)

- Analyse diagnostique des adaptations aux aléas climatiques des systèmes ovins laitiers Rougiers / Causses du Larzac. Mars 2009
- Diagnostic régional des systèmes d'alimentation et des systèmes d'élevage : cas des Causses. Mars 2008
- Agricultures, agriculteurs, et aménagement du Vistre. Quelle participation pour les agriculteurs dans les politiques d'aménagement ? Mars 2007

Participation à des jurys

- Président de Jurys de soutenance de mémoires d'Ingénieur, spécialisation Production Végétale Durable (2 à 3 par an depuis 2010)
- Membre de Jurys de mémoires de Master et Licence (3 à 4 par an depuis 2008)

4.6. Evaluation scientifique et rayonnement international

- Reviewer régulier de la revue scientifique *Agricultural Water Management* (thèmes : azote et riziculture, bilan hydrique des cultures) à raison de 3 à 4 articles soumis par an (revue à facteur d'impact 2,333)
- Reviewer plus occasionnel pour *Irrigation Science* (IF = 2.843) et *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (IF = 1.733)

4.7. Responsabilités administratives

- Statut de « Personne Compétente en Radioprotection » (PCR) de l'UMR System de 2005 à 2010 (dossiers mis en œuvre : autorisations administratives de détention de radio éléments en sources scellées, acquisition de sonde à neutrons par l'unité, formation du personnel)
- Suite au Grenelle de l'Environnement, « Référent Carbone » de l'UMR System (formation collective au bilan carbone par INRA, mise en œuvre pour l'année de référence 2008)
- Responsable administratif et financier de la convention liant l'Université de Madagascar et la société sucrière SIRANALA (1987-1990)

Liste des tableaux

Numéro	Page	Légende (ou début de la légende)
1	15	Types de fonctionnement hydrique des cultures et place de mes travaux
2	23	Précisions sur les questions scientifiques traitées dans mes travaux
3	34	Effet de la masse du SGU sur le rendement du riz repiqué
4	37	Effet du niveau de fertilisation PK sur la constante d'assimilation de l'azote ammoniacal dérivant d'un SGU de 2 g
5	56	Valeurs du CN selon le type de sol et l'entretien du sol
6	57	Paramètres servant au bilan hydrique de la vigne cultivée en sol nu
7	73	Matrice des sujets de thèse
8	75	Niveau de concentration en urée et pourcentage d'hydrolyse pour des SGU de 1 à 4 g apportés au repiquage du riz

Liste des figures

Numéro	Page	Légende (ou début de la légende)
1	17	Coupe transversale partielle d'un bas-fond typique des hautes terres
2	18	Mise en boue traditionnelle en situation de plaine alluviale
3	18	Différenciation de l'aérenchyme dans le cortex et mise en place d'une barrière pour limiter la perte d'oxygène dans la couche anaérobie du sol
4	19	Vue aérienne du périmètre sucrier d'Analaiva à 20 km de Morondava
5	20	Vue des dispositifs expérimentaux mis en place pour suivre le potentiel hydrique
6	25	Supergranules d'urée de 2 g avec un diamètre de 14 mm
7	26	Influence de la profondeur du placement ou de la forme de l'urée sur les coefficients réels d'utilisation de l'azote pour le riz repiqué
8	27	Dispositif de préleveurs encadrant la position d'enfouissement du supergranule
9	28	Vue partielle de l'essai ¹⁵ N en vue d'étudier le fractionnement de l'apport d'urée
10	30	Dispositif pour l'étude de la diffusion de l'azote ammoniacal en laboratoire
11	31	Vue de l'ensemble SGU-préleveur et de la pompe manuelle qui produit le vide qui permet de récupérer la solution du sol dans un flacon à pénicilline
12	31	Vue de la solution du sol récupérée 4 jours après placement d'un SGU de 2 g
13	32	Evolution du pH et des concentrations en ammoniacque (+) et nitrate (mole.L ⁻¹) de la solution du sol dans le site de placement d'un SGU de 2 g
14	35	Cinétiques de disparition de l'azote ammoniacal de la solution du sol pour SGU de 1 g, 2 g, 3 g et 4 g
15	36	Préparation du sol (mise en boue et planage) pour l'un des essais de marquage
16	36	Accumulation de l'azote provenant de l'engrais et du sol dans les feuilles en début de cycle du riz relayée par un transfert vers les grains en fin de cycle
17	37	Mise en évidence de l'influence du niveau PK sur la constante d'assimilation
18	39	Cartographie des citations de nos articles parus dans <i>L'Agronomie Tropicale</i> et <i>Agronomy Journal</i>
19	42	Dispositif expérimental pour l'étude des remontées capillaires
20	42	Profils de charge hydraulique (H) observés à Ambohitrakoho
21	43	Vue du dispositif mis en place à Antanimalandy et profils de charge hydraulique
22	43	Profils de potentiel total H et d'humidité volumique correspondant à deux situations en présence de nappe
23	45	Vue partielle des cannes tensiométriques occupant une partie d'un inter-rang sur le plot B7 de la SIRANALA

24	45	Relation $K(h)$ obtenue à partir des données $h(\theta)$ et $K(\theta)$
25	46	Exemple de carte des flux obtenue par application de la loi de Darcy-Buckingham
26	46	Analyse des données de potentiel par la méthode du krigeage
27	47	Effet entonnoir très marqué après cumul fortuit d'un arrosage et d'une pluie
28	48	Schéma du code de pilotage et profils de charge hydraulique typiques des différentes périodes du cycle
29	49	Calcul des flux hydriques verticaux à l'aide d'une abaque intégrée au profil de charge hydraulique
30	50	Insertion de profils de charge hydraulique à pente unitaire ($dH/dz = -1$) dans la trame du diagramme de potentiel total
31	51	Mise en relation de la montée de la succion avec la courbe caractéristique
32	53	Profils d'humidité volumique au débourrement et à la récolte
33	54	Relation entre le potentiel hydrique foliaire de base et FTSW
34	55	Cumuls de pluie (P) et de ruissellement (R) sur un épisode de moyenne intensité
35	56	Dynamique des quatre épisodes pluvieux les plus productifs de 2004 à 2006
36	57	Passage d'une simulation saisonnière à une simulation pluriannuelle
37	58	Fréquence de non-dépassement de la FTSW au débourrement
38	59	Comparaison des profils hydriques pour une vigne désherbée et enherbée
39	60	Rendement et qualité du raisin pour quatre niveaux de l'indice de sécheresse
40	61	Résultats de l'analyse fréquentielle des besoins en eau d'arrosage
41	63	Parcours hydrique de référence visé pour un vin fruité sur domaine de Rivesaltes
42	64	Translation de la courbe de référence vers le haut
43	64	Translation de la courbe de référence vers la droite
44	65	Combinaison d'une translation verticale et d'une translation horizontale
45	67	Comparaison des résultats de trois représentations de la diffusion de l'azote ammoniacal à partir d'un SGU de 2 g
46	69	Le chemin tortueux du progrès scientifique (Hillel, 1987)
47	71	Analyse des systèmes étudiés en fonction de leur place sur la courbe caractéristique de l'humidité du sol
48	74	Mise en évidence d'un mauvais prélèvement racinaire dans les parties amont et intermédiaire des bas-fonds des Hauts Plateaux de Madagascar
49	77	Cinétique de prélèvement de l'azote apporté sous forme de supergranule ou perlurée
50	77	Synthèse des approches IRRI et LRI
51	79	Evolution temporelle du rapport des concentrations en ammoniacque générées par une source ponctuelle et une source cylindrique
52	80	Profils d'humidité volumique assurant un flux hydrique ascendant constant à partir de la nappe
52	82	Succession des états de remontée capillaire au cours d'une centaine de jours

Sigles et symboles scientifiques (liste non exhaustive)

Sigle	Signification
θ	Humidité volumique du sol (unité : $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
θ_0	Humidité volumique à saturation
ASW	Available Soil Water (unité : mm)
c ou $c(r,t)$	Concentration en N ammoniacal (unité : $\text{mole}.\text{dm}^{-3}$)
CN	Curve Number
D	Coefficient de diffusion (unité : $\text{cm}^2.\text{j}^{-1}$)
Dr	Drainage (unité : mm)
CRU	Coefficient réel d'utilisation
d	Opération différentielle
E	Evaporation du sol nu (unité : mm)
ET_0	Evapotranspiration de référence (unité : $\text{mm}.\text{j}^{-1}$)
FTSW	Fraction of Transpirable Soil Water
GS	Glutamine Synthétase
GOGAT	Glutamine Oxo-Glutarate Amino Transférase
h	Potentiel matriciel (unité : hPa)
$h(\theta)$	Courbe caractéristique de l'humidité du sol
H	Potentiel total (unité : hPa)
I	Irrigation (unité : mm)
k_c	Coefficient cultural de la vigne
$K(\theta)$	Conductivité hydraulique du sol (unité : $\text{mm}.\text{j}^{-1}$)
N	Azote
P	Pluie (unité : mm)
PEPC	Phospho -énol -pyruvate carboxylase
PHFB ou Ψ_b	Potentiel hydrique foliaire de base (unité : MPa)
r	Distance au point d'apport (unité : cm)
R	Ruissellement (unité : mm)
SGU	Supergranule d'urée
t	Temps (unité : j)
Tr	Transpiration de la vigne (unité : mm ou $\text{mm}.\text{j}^{-1}$)
TTSW	Total Transpirable Soil Water (unité : mm)
z	Profondeur (unité : cm)