

UNIVERSITÉS FRANCOPHONES

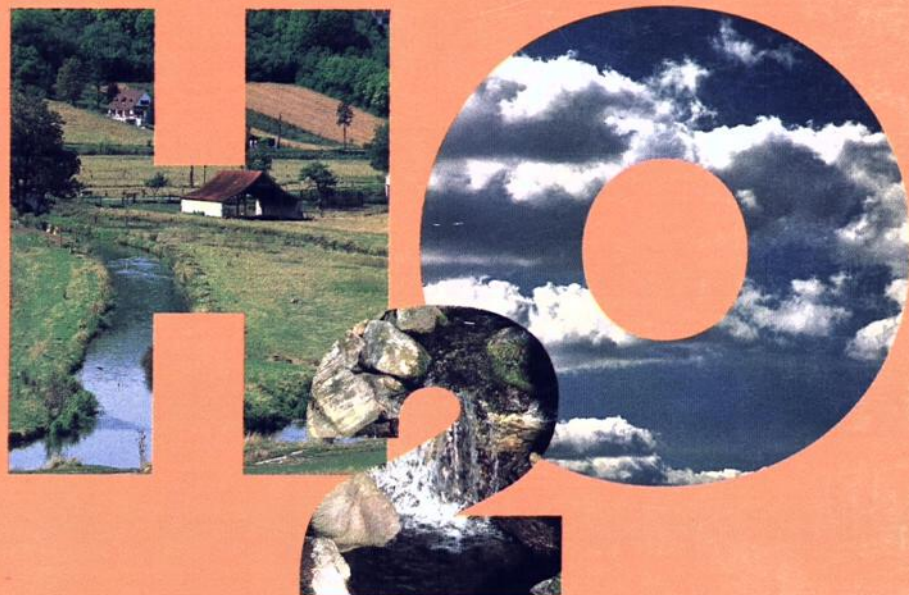


C. Riou, R. Bonhomme
P. Chassin, A. Neveu, F. Papy, éd.

l'eau dans l'espace rural

production végétale
et qualité de l'eau

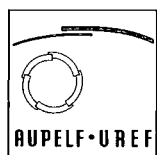
MIEUX COMPRENDRE



l'eau dans l'espace rural

production végétale
et qualité de l'eau

UNIVERSITÉS FRANCOPHONES



l'eau dans l'espace rural

production végétale
et qualité de l'eau

C. Riou, R. Bonhomme
P. Chassin, A. Neveu, F. Papy, éd.

Couverture : photos de Jean Weber, Inra, Versailles.

© INRA, Paris, 1997 ISBN : 2-7380-0708-2

ISSN (INRA) : 1144-7605

ISSN (Aupelf-UREF) : 0993-3948

Le code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique. Toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 3 rue de Hautefeuille, Paris, 6^e.

Ouvrages parus dans la collection Mieux Comprendre

La pomme de terre

P. ROUSSELLE, Y. ROBERT et J.-C. CROSNIER (éds)
1996, 640 p.

**Vie microbienne du sol
et production végétale**

Pierre DAVET
1996, 380 p.

Nutrition des ruminants domestiques

R. JARRIGE, Y. RUCKEBUSH,
C. DEMARQUILLY, M.-H. FARCE,
et M. JOURNET (éds)
1995, 921 p.

**Sols caillouteux
et production végétale**

Raymond GRAS
1994, 178 p.

Biologie de la lactation

Jack MARTINET,
et Louise-Marie HOUEBINE
1993, 587 P.

**Amélioration des espèces végétales
cultivées.**

Objectifs et critères de sélection

André GALLAIS et Hubert BANNEROT
1992, 768 p.

**La régression non linéaire:
méthodes et applications en biologie**

Sylvie HUET, Emmanuel JOLIVET,
et Antoine MESSÉAN
1992, 250 p.

**L'épidémiologie en pathologie
végétale: mycoses aériennes**

Frantz RAPILLY
1991, 318 p.

**Principes d'amélioration génétique
des animaux domestiques**

Francis MINVIELLE
1990, 211 p.

**Cytogénétique
des mammifères d'élevage**

Paul C. POPESCU
1989, 114 p.

**Les oligo-éléments
en agriculture et élevage**

Yves Coïc et Marcel COPPENET
1989, 114 p.

Éléments de virologie végétale

(épuisé)
Pierre CORNUET
1987, 208 p.

COLLECTION UNIVERSITÉS FRANCOPHONES

Ouvrages d'agronomie

Économie de l'activité productrice agricole

M. CAREL, Hatier (AGR011), à paraître.

L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides

N. CHALBI, Y. DEMARLY, John Libbey Eurotext, 1991 (AGR022)

Le progrès génétique passe-t-il par le repérage et l'inventaire des gènes?

H. CHLYAH, Y. DEMARLY, John Libbey Eurotext, 1993 (AGR032)

Pastoralisme,

P. DAGET, M. GODRON, Hatier, 1995 (AGR041)

Amélioration des plantes et biotechnologies, 2^e éd.

Y. DEMARLY, M. SIBI, John Libbey Eurotext, 1996 (AGR051)

**Maîtrise de la reproduction et amélioration génétique des ruminants:
apports des technologies nouvelles.**

P.H. DIOP, Neas, 1993 (AGR062)

Biotechnologies du diagnostic et de la prévention des maladies animales

P.H. DIOP, A. KAECKENBEEK, John Libbey Eurotext, 1994 (AGR072)

Quel avenir pour l'amélioration des plantes

J. DUBOIS, Y. DEMARLY, John Libbey Eurotext, 1995 (AGR082)

Agronomie moderne: bases physiologiques et agronomiques de la production végétale

T.A. EL HASSANI, E. PERSOONS, Hatier, 1994 (AGR091)

La lutte anti-acridienne

A. ESSAID, John Libbey Eurotext, 1991 (AGR102)

Initiation à l'économie agro-alimentaire

L. MALASSIS, G. GHERSI, Hatier, 1992 (AGR111)

Céréales en régions chaudes: conservation et transformation

M. PARMENTIER, K. FOUA-BI, John Libbey Eurotext, 1989 (AGR122)

Amélioration et protection des plantes vivrières tropicales

C.A. SAINT-PIERRE, Y. DEMARLY, John Libbey Eurotext, 1989 (AGR132)

Reproduction et production laitière

P.H. DIOP, Serviced S.A., 1996 (AGR1332)

Post-récolte: principes et applications en zone tropicale

C. VERSTRAETEN, Estem, 1996 (AGR141)

Avant-propos

La diffusion de l'information scientifique et technique est un facteur essentiel du développement. Aussi dès 1988, l'Agence francophone pour l'enseignement supérieur et la recherche (AUPELF-UREF), mandatée par les Sommets francophones pour produire et diffuser revues et livres scientifiques, a créé la collection *Universités francophones*.

Lieu d'expression de la communauté scientifique de langue française, *Universités francophones* vise à instaurer une collaboration entre enseignants et chercheurs francophones en publiant des ouvrages, coédités avec des éditeurs francophones, et largement diffusés dans les pays du Sud, grâce à une politique tarifaire préférentielle.

Quatre séries composent la collection :

- Les manuels: cette série didactique est le cœur de la collection. Elle s'adresse à un public de deuxième et troisième cycles universitaires et vise à constituer une bibliothèque de référence couvrant les principales disciplines enseignées à l'université. Ces ouvrages sont régulièrement mis à jour.
- Actualité scientifique: dans cette série sont publiés les actes de colloques organisés par les réseaux thématiques de recherche de l'UREF.
- Prospectives francophones: s'inscrivent dans cette série des ouvrages de réflexion donnant l'éclairage de la Francophonie sur les grandes questions contemporaines.
- Savoir plus Université: cette nouvelle série se compose d'ouvrages de synthèse qui font un point précis sur des sujets scientifiques d'actualité.

Notre collection, en proposant une approche plurielle et singulière de science, adaptée aux réalités multiples de la Francophonie, contribue efficacement à promouvoir la recherche dans l'espace francophone et le plurilinguisme dans la recherche internationale.

Professeur Michel GUILLOU
Directeur général de l'AUPELF
Recteur de L'UREF

Remerciements

Jean-Claude REMY (professeur à l'École nationale supérieure d'agronomie de Montpellier) et Bernard SAUGIER (professeur à l'Université d'Orsay) ont bien voulu s'associer aux Éditeurs scientifiques pour relire les articles composant cet ouvrage. Nous les remercions pour leurs remarques et suggestions.

Les éditeurs

Sommaire

Introduction	5
C. Riou	

L'eau et la production végétale

Fonctionnement hydrique de la plante

1. Les relations plante-eau, de la cellule à la plante entière	11
P. Cruizat	
2. Régulation des échanges gazeux par les plantes soumises à la sécheresse	41
F. Tardieu et E. Dreyer	
3. Architecture racinaire et absorption hydrique	61
L. Pagès, L. Bruckler, S. Pellerin et F. Lafolie	

Fonctionnement d'une culture et gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation

4. Modélisation du fonctionnement d'une culture. Caractérisation de la contrainte hydrique et prise en compte de ses effets	85
R. Bonhomme	
5. Gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole	101
J. Puech, M. Cabelguenne, J.-M. Attonaty, P. Leroy, J.-P. Amigues, B. Balas et V. Perarnaud	

L'apport de la génétique

6. Amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse	121
P. Monneveux, D. This et E. Belhassen	

Méthodes et mesures

7. Mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique dans le sol	143
A. Chanzy, P. Bertuzzi, L. Bruckler et J.-C. Gaudu	
8. Localisation de la profondeur moyenne d'absorption racinaire : les isotopes stables de l'eau	153
T. Bariac	
9. Mesures de flux de sève brute	161
C. Valancogne et A. Granier	

10. Les indicateurs de l'état hydrique de la plante	169
N. Katerji	
11. La mesure des flux de vapeur d'eau	179
Y. Brunet	

Agriculture et qualité de l'eau

Cycles biochimiques et processus physiques

12. Le cycle de l'azote dans les sols et la qualité des eaux souterraines	193
S. Recous, B. Nicolardot et J.-C. Simon	
13. L'eau et la chimie de l'atmosphère	217
P. Chassin, P. Cellier, T. Morvan et R. Delmas	
14. Les transferts sol-eaux des produits phytosanitaires	231
R. Belamie, R. Calvet et P. Chassin	
15. Transferts diffus de phosphore des bassins versants agricoles vers les lacs : impacts, ordre de grandeur, mécanismes	249
J.-M. Dorioz, D. Trévisan et J.-V. Vansteelant	
16. Les effets du ruissellement et de l'érosion sur les matières en suspension dans l'eau	265
Y. Le Bissonnais et F. Papy	

Pratiques agricoles et qualité de l'eau

17. Les flux d'azote dans les exploitations d'élevage	281
J.-Y. Dourmad, Ph. Leterme, T. Morvan, J.-L. Peyraud et F. Vertès	
18. Systèmes de culture, érosion et pollution des eaux par l'ion nitrate	303
Ph. Martin et J.-M. Meynard	
19. Pratiques agricoles et qualité de l'eau sur le territoire alimentant un captage	323
M. Benoît et F. Papy	

Politique d'une qualité de l'eau

20. La qualité de l'eau : quels problèmes et quelles connaissances pour agir?	339
J. Sebillotte	

Méthodes et mesures

21. Écobilan et modélisation du bilan environnemental d'une culture	355
G. Gosse	
22. Dosage des pesticides dans les eaux	361
L. de Cormis	

23. Mesure des flux de gaz-trace	369
P. Cellier et R. Delmas	
24. Utilisation d'un système d'information géographique pour modéliser le ruissellement et l'érosion	377
J. Daroussin	
Liste des auteurs	387
Glossaire	391
Index	405

Introduction

L'eau, sans laquelle la vie ne serait pas, est pourtant bien inégalement répartie dans l'espace et dans le temps. Une dure loi énergétique crée les besoins maximum là où l'eau est rare: l'absence de nuages, les grandes surfaces dénudées, l'air sec, y créent un fort ensoleillement, beaucoup de vent et finalement une très forte capacité à évaporer sans que l'eau soit au rendez-vous. Nos climats tempérés sont heureusement plus propices aux cultures mais l'été reste, en moyenne en France, une saison sèche; elle l'est de façon permanente dans le cas de la zone méditerranéenne qui pratique traditionnellement l'irrigation mais, ailleurs, le développement généralisé du maïs, culture d'été, a relancé l'irrigation. Des épisodes secs peuvent également apparaître au printemps et compromettre le reste de la campagne, mettant en évidence l'intérêt de l'irrigation de complément.

Ainsi l'eau, apparemment si naturelle et si disponible, peut devenir un produit rare, donc un enjeu. L'agriculture est un des gros consommateurs d'eau: 2,7 milliards de m³ d'eau d'irrigation en 1990 contre 2,5 pour la consommation domestique et 0,8 pour l'industrie en France, la même année; les surfaces irriguées y augmentent régulièrement, la superficie irrigable actuelle est de 1 800 000 ha (guère plus de 6 % de la surface agricole utile!).

La consommation française en eau agricole s'est ainsi accrue de 45 % au cours des 10 dernières années. Certes le stock d'eau français – réseau hydrographique, réserves de barrages, nappes – est énorme, mais les besoins de pointe ne sont pas toujours assurés, car les usagers peuvent avoir des exigences qui entrent en conflit. Les sécheresses de 1989 et 1990 ont ainsi provoqué des crises dans la gestion de la ressource. Ces mêmes sécheresses ont également mis en vedette le problème de la pollution qui diminue la ressource utilisable. A cette pollution contribuent les collectivités publiques, l'industrie et l'agriculture.

L'agriculture intensive est grande consommatrice d'engrais azotés, phosphorés et potassiques et de produits phytosanitaires; l'industrie stocke, transforme, rejette des produits nombreux et diversifiés malgré des efforts croissants pour recycler les déchets; les consommateurs, enfin, utilisent une gamme de plus en plus large de «produits ménagers» dont les résidus s'acheminent vers les cours d'eau et la mer.

L'eau, le vecteur naturel par excellence, collecte, transporte, dépose; en résultent dans l'eau des rivières et celle des nappes, des hausses inquiétantes de produits dont certains peuvent menacer notre santé.

Les crises apparaissent au moment des sécheresses estivales, ou naissent du constat de la pollution des eaux – relayé par les médias. Ce sont des révélateurs qui remettent au premier plan la nécessité d'une meilleure gestion et celle d'une protection ou du traitement de la ressource.

Un excès d'eau d'irrigation s'accompagne d'un transfert vers les nappes de substances polluantes, notamment de nitrates, et les problèmes de quantité et de qualité des eaux se trouvent ainsi mêlés. De même, une culture mal conduite peut s'accompagner d'érosion et de transports de terre vers les cours d'eau ou les lacs avec leur contenu en phosphore et pesticides. L'agriculture est donc périodiquement sur la sellette.

L'agriculture de demain devra être durable et donc ménager l'environnement; elle deviendra du même coup plus savante: les besoins en eau seront mieux compris; il ne s'agira plus, comme on l'a fait souvent, de fournir tout ce qu'il faut et même un peu plus, puisqu'on ne prend pas le risque d'une pluviosité insuffisante, mais on adaptera la fourniture d'eau aux stricts besoins compatibles avec une production économiquement, socialement et écologiquement viable. Cette nouvelle façon de voir remobilise tout un secteur de la recherche et en crée de nouveaux.

Économie d'eau, protection de la ressource, deux préoccupations auxquelles s'ajoute une troisième, celle d'améliorer la qualité des produits agricoles. Ce terme de qualité, très général, englobe beaucoup d'acceptions: qualités «extérieures» des produits – forme, couleur, dimensions – goût (acidité, sucre, arômes, etc.), aptitudes à la conservation, sécurité alimentaire, etc. Il faut noter que le facteur hydrique joue souvent un rôle lors de la maturation du produit. C'est le cas du raisin où une période sèche en fin d'été joue un rôle positif sur la qualité du vin: sans pouvoir aller très loin dans l'explication, il apparaît alors qu'une certaine sécheresse du sol pendant la maturation, freine la photosynthèse des feuilles et favorise le transfert de sucres vers les fruits en formation.

Faire état de besoins en eau pour l'irrigation, cela impliquera une meilleure maîtrise de l'eau pour l'économiser, la distribuer au bon moment, éviter les excès d'eau favorisant la pollution, régulariser et améliorer la production.

Ce contexte relance la recherche à différents niveaux et demande d'abord une meilleure connaissance du fonctionnement hydrique de la plante et de ses régulations; il reste beaucoup à faire en ce domaine aussi bien pour les arbres fruitiers et forestiers que pour les plantes herbacées, même si nos connaissances sont déjà importantes; des progrès peuvent permettre de relancer la sélection variétale qui dispose, par ailleurs maintenant, de nouveaux moyens puissants grâce à la biologie moléculaire.

Un des espaces opérationnels en matière d'eau est le champ cultivé; la proximité des plantes y crée de la compétition pour l'eau et pour l'alimentation minérale et carbonée, mais joue en même temps un rôle protecteur réduisant les effets du vent et des rayonnements et créant un microclimat favorable. La modélisation des relations entre le couvert cultivé et son environnement est une clef pour l'agriculture de demain.

Toutes ces connaissances trouvent leur aboutissement dans la mise en œuvre, à l'échelle de l'exploitation, de pratiques tenant compte de ces deux grands principes:

économie d'eau, protection de la ressource ; principes qu'il faut rendre cependant compatibles avec une gestion saine de l'économie de l'exploitation.

On peut noter ici que la protection de la ressource peut déborder le cadre de l'exploitation, car l'eau qui circule rassemble l'ensemble des exportations ; apparaît alors un espace opérationnel mieux adapté : le bassin-versant.

La première partie de l'ouvrage s'arrêtera à la dimension de l'exploitation, la suite abordera le problème de la qualité de l'eau.

C'est un problème complexe qui met en jeu des substances et des processus très divers. L'azote qui peut devenir un polluant, subit des transformations cycliques qui le font passer du sol à l'atmosphère, avec une forte intervention des êtres vivants. Les produits dangereux peuvent être entraînés sous des formes variées, en solution dans l'eau, ou associés à des débits solides dus à l'érosion. La pollution peut provenir d'une source ponctuelle ou ne durer qu'un moment ; elle peut au contraire s'étaler dans le temps et l'espace.

Chimie des polluants, processus de transfert, rôle de la biosphère, trois domaines où la maîtrise de la qualité de l'eau demande des connaissances nouvelles.

Il ne suffit évidemment pas de constater la pollution, encore faut-il la réduire et la maintenir dans des limites acceptables, ce qui a donné naissance à la notion de « norme ».

Un effort est donc fait depuis plusieurs années pour préserver la ressource en eau et, plus généralement, l'environnement, qu'il s'agisse de réduire l'émission de gaz dangereux dans l'atmosphère ou d'obtenir une diminution des polluants dans la biosphère. L'eau joue ici un rôle majeur, soit directement comme vecteur de la pollution, soit indirectement, en intervenant dans les processus chimiques ou biochimiques.

A côté d'exposés sur les thèmes principaux, on trouvera dans cet ouvrage des descriptions de méthodes et de techniques performantes qui ont permis des progrès notables. La mesure de la consommation d'eau des plantes cultivées et de la forêt est à l'origine de bien des recherches ; elle peut maintenant se faire directement sur la plante (l'arbre) par l'évaluation du flux de sève ; elle s'applique à des couverts, soit par des méthodes micrométéorologiques, soit par l'évolution du stock d'eau du sol. L'utilisation de certains isotopes peut aider à comprendre la circulation et la localisation de l'eau dans le complexe sol-plante-atmosphère. Les réactions de la plante et du couvert végétal, dès que l'eau du sol se raréfie, sont enfin maintenant observées, mesurées et analysées et nous fournissent des indicateurs permettant le pilotage de l'irrigation ou le repérage de du comportement de la plante.

Ainsi s'établissent des liens essentiels entre techniques de mesure, méthodes d'études et connaissance des comportements dans ce domaine du fonctionnement hydrique des plantes et des peuplements cultivés. De même, il est aisé de voir ce qui lie la connaissance des mécanismes de circulation de l'eau dans le sol et l'atmosphère *via* la plante, celle des réactions d'un peuplement végétal homogène face à l'évolution du stock d'eau du sol et la stratégie d'une exploitation agricole qui doit prendre en compte un ensemble hétérogène de peuplements et de nombreuses contraintes vis-à-vis de la res-

source en eau et de l'économie. La sélection de variétés nouvelles, quant à elle, ne doit rien ignorer de ces trois approches du problème.

Dans le même esprit, de courts exposés plus techniques accompagneront les textes consacrés à la qualité de l'eau: nouvelles méthodes d'écobilans, analyses des pesticides, mesure des flux de gaz-traces, utilisation des systèmes d'information géographique.

Ainsi s'achève ce premier tome qui met l'accent sur deux grands rôles joués par l'eau dans la mise en œuvre de l'agriculture. L'eau est d'abord un élément indispensable à la vie des plantes; quand la nature est défaillante, c'est à l'homme d'y suppléer par l'irrigation. Mais l'eau, parce qu'elle est partout présente et souvent indispensable, est associée à de très nombreuses activités; ses propriétés physico-chimiques en font alors le vecteur naturel de la pollution. L'agriculture doit donc veiller à maintenir la qualité de la ressource.

Eau précieuse, eau dangereuse, deux raisons pour une grande politique de l'eau.

C. RIOU