HAL
open science

Évaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique

Nadine N. Brisson, Frederic F. Huard, Anne-Isabelle Graux, Christine Lebas, Philippe P. Debaeke, Gilles G. Lemaire, Bernard B. Itier

To cite this version:

Nadine N. Brisson, Frederic F. Huard, Anne-Isabelle Graux, Christine Lebas, Philippe P. Debaeke, et al.. Évaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique. [0] 2006. hal-02821829

HAL Id: hal-02821829

https://hal.inrae.fr/hal-02821829v1

Submitted on 6 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.

Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique

N. Brisson[(1)], F. Huard[(1)], A.I. Graux[(1)], C. Lebas[(2)], P. Debaeke[(3)], G. Lemaire[(4)], B. Itier[(5)]

(1) Unité AGROCLIM, Avignon ; (2) Unité INFOSOL, Orléans ;
(3) UMR Arche, Toulouse ; (4) UR EPF, Lusignan ;
(5) Centre INRA Montpellier

Expertise agricole de M.H. Jeuffroy,
J.M. Nolot, G. Lemaire, J. Troizier

Etude réalisée par l'unité AGROCLIM de l'INRA
pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP)

Octobre 2006

Avant propos

L'expertise scientifique collective "Sécheresse et agriculture", réalisée à la demande du Ministère de l'agriculture et de la pêche et pilotée par l'INRA, a fait ressortir deux types de carences au niveau de la bibliographie internationale :

- un manque de recherches et d'études sur les "systèmes de culture" soumis à des sécheresses aléatoires : en effet la littérature internationale donne essentiellement des éléments sur les systèmes de culture en conditions d'aridité, c'est-à-dire sur des systèmes dont les déterminants ont été adaptés à une sécheresse récurrente. Il n'y a guère que le dispositif français de Toulouse, INRA et Instituts Techniques, qui travaille le sujet sur des successions d'années sèches et d'années pluvieuses. Nous en tirons les conséquences dans les recommandations en termes de poursuite et d'amplification de l'effort de recherche car une grande partie du territoire français se trouve concerné par ces conditions "incertaines" qui nécessitent des adaptations spécifiques des systèmes de culture.

- un manque d'études sur les bilans hydriques à l'échelle de bassins versants, les quelques études conduites jusqu'à aujourd'hui sur le bilan hydrique des cultures ayant été réalisées à l'échelle de la parcelle agricole. Or l'échelle du bassin versant est la seule qui soit appropriée à la gestion de la ressource hydrique. En attendant que des études couplant Hydrologie et Hydrogéologie permettent une intégration spatio-temporelle des transferts hydriques sur chaque bassin d'intérêt (cf. recommandation en conclusions sur les besoins de recherche et d'études), l'ensemble des experts s'est accordé sur le fait qu'il serait dommage de ne pas valoriser dès à présent les possibilités offertes par la modélisation des cultures.

En effet, des outils méthodologiques comme les modèles de simulation ont été mis au point au cours des vingt dernières années. Ils intègrent un ensemble de connaissances qui font l'objet de consensus dans la communauté scientifique. Ils ont été validés sur les variables d'intérêt des deux volets de l'expertise : production de matière sèche et d'organes récoltables d'une part, bilans environnementaux (principalement bilans hydrique et azoté) d'autre part. L'outil méthodologique est référé dans la bibliographie internationale et fait donc partie de l'expertise.

Cependant, son utilisation, visant à illustrer les possibilités de rendements et la restitution d'eau au milieu offertes par tel ou tel système de culture dans divers contextes pédoclimatiques, aurait débordé du cadre formel de l'expertise. C'est pourquoi, il nous est apparu plus conforme aux règles retenues pour cet exercice de séparer la présente contribution de N. Brisson et al. de l'expertise stricto sensu. Toutefois, il est fait référence dans le rapport d'expertise à certains résultats de cette étude, au même titre qu'à ceux d'autres études.

Dans le même temps, il nous paraît indispensable de faire connaître dans sa globalité cette étude au commanditaire de l'expertise car c'est, à notre connaissance, la première étude qui présente une approche systématique de la question sur les diverses régions françaises en se focalisant sur le croissant ouest (Ile-de-France - Centre ; Charentes-Poitou ; Aquitaine - Midi Pyrénées) où se concentre le plus grand nombre de problèmes relatifs à la ressource en eau. L'étude n'a pas de caractère exhaustif et présente essentiellement une valeur comparative entre régions et années climatiques. Elle illustre ce que l'on pourrait attendre, en termes de rendement et de restitution au milieu, de trois "systèmes de culture" retenus à dires d'experts (irrigation intensive, irrigation de complément, pluvial), sur trois types de sols représentatifs de chaque région (à partir de la distribution des "réserves utiles" en eau) et pour différentes séries climatiques (successions réelles et combinaisons d'années sèches représentant une prospective de sécheresse accrue).

Sans sous-estimer les limitations liées à la non-prise en compte du temps de réponses des aquifères, cette étude permet d'ores et déjà d'illustrer ce que des études commanditées à l'échelle de bassins versants permettrait d'obtenir en croisant des bases de données climatiques, pédologiques et agronomiques :
- pour l'agriculteur, une étude fréquentielle des rendements espérés, culture par culture, permettant une analyse du risque de sécheresse au niveau du système de culture ;
- pour le gestionnaire de bassin, une estimation de l'utilisation de la ressource et de sa restitution au milieu en fonction de la répartition spatiale des différents systèmes de culture au sein du territoire.

La présente étude illustre ce qui pourrait être réalisé à l'échelle d'un territoire pour servir de base de discussions entre les différents acteurs parties prenantes de la gestion des ressources en eau.

1. Les objectifs de la modélisation dans l'étude

La notion de sécheresse agricole est difficile à définir dans l'absolu. Evidemment, à l'échelle du territoire, et apprécié annuellement, le poids du facteur climatique semble déterminant. Mais si l'on descend à l'échelle régionale, l'impact du potentiel édaphique de même que la variabilité climatique inter-régionale prennent de l'importance. Enfin, la stratégie de l'agriculteur va jouer sur le niveau de mise en adéquation de ces systèmes de culture avec le potentiel pédoclimatique dont il dispose.

L'objectif du travail de modélisation biophysique est de décliner une hiérarchisation de l'ensemble de ces facteurs à une résolution régionale et d'en apprécier les diverses sources de variabilité. Cette modélisation permet, en outre, d'accéder de façon systématique à des variables explicatives permettant de clarifier les divers aspects de la problématique, qu'il s'agisse des composantes du bilan hydrique (évaporation du sol, infiltration d'eau en profondeur, transpiration du couvert végétal) ou de ses conséquences sur les cultures (température de la surface, satisfaction des besoins en eau des végétaux…).

L'approche n'est pas véritablement de nature spatiale mais elle s'appuie sur une analyse typologique multilocale permettant d'apprécier la variabilité des sols et des climats du territoire français métropolitain.

2. Le modèle

2.1. Ses principes de fonctionnement, les variables d'entrée et les variables calculées

Les modèles de culture sont des outils mathématiques et informatiques qui simulent le fonctionnement dynamique d'une culture (système sol-plantes) en interaction avec le climat et les pratiques agricoles. Ils sont nés au début des années 70 à partir des travaux fondateurs des écoles hollandaise (de Wit, 1970) et américaine (Baker et Meyer, 1966 ; Duncan, 1971). Le modèle français STICS, développé à l'INRA depuis 1996 en collaboration avec des partenaires scientifiques et techniques, s'appuie sur des principes largement admis dans la communauté (Brisson et al, 1998, 2003). Il incarne les préoccupations environnementales de l'agronomie par une approche générique permettant de simuler de nombreuses espèces prenant en compte l'effet des pratiques agricoles.

STICS réalise des simulations en continu à l'échelle de la succession de cultures, faisant se succéder des phases de culture et d'interculture, pour des séries climatiques plus ou moins longues. La dynamique est journalière, imposée par le pas de temps climatique, le climat constituant avec le sol et l'itinéraire technique l'ensemble des données d'entrée du modèle. Les données de sorties sont agronomiques (date de récolte, rendement, qualité, consommation d'eau et d'azote) ou environnementales (infiltration profonde, lixiviation de nitrates, température de la surface). STICS simule le fonctionnement carboné (croissance des plantes et élaboration du rendement), énergétique (interception du rayonnement solaire, températures du couvert et du sol), hydrique (évaporation du sol, transpiration des plantes, drainage) et azoté (minéralisation de la matière organique, transport des nitrates, fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses) de l'agrosystème.

Il existe des interactions fortes entre le fonctionnement hydrique et les autres composantes : l'état de croissance de la plante définit ses besoins en eau mais rétroactivement l'insatisfaction de ces besoins pénalise la croissance de la plante (ainsi le modèle permet de simuler un rationnement par le l'Indice Foliaire qui réduit de fait les besoins en eau ultérieurs pour la culture) ; en réduisant l'évapotranspiration, le déficit en eau augmente la température de la surface par le biais du bilan d'énergie ; en s'infiltrant l'eau entraîne avec elle les nitrates, tandis qu'en situation de pénurie ces nitrates ne sont plus véhiculés jusqu'aux racines provoquant ainsi un déficit azoté pour la plante (stress azoté induit par le déficit hydrique) ; enfin dans un sol sec les processus de minéralisation sont considérablement ralentis.

Le modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi les remontées capillaires qui pourraient provenir du compartiment de sol sous-racinaire sont négligées, la parcelle est supposée plane de façon à pouvoir négliger les phénomènes de ruissellement de surface et parfaitement contrôlée au plan phytosanitaire. En particulier l'impact du régime hydrique sur le parasitisme ou les adventices n'est pas pris en compte.

STICS a été adapté à des cultures variées (Figure 1). La stratégie spécifique d'une culture vis-à-vis de son économie en eau repose sur divers éléments du fonctionnement et de la morphologie de la plante renseignés par un paramétrage approprié aux niveaux de son développement phénologique, des dynamiques respectives de son feuillage et de son système racinaire, de la fermeture stomatique et de sa réactivité aux stress.

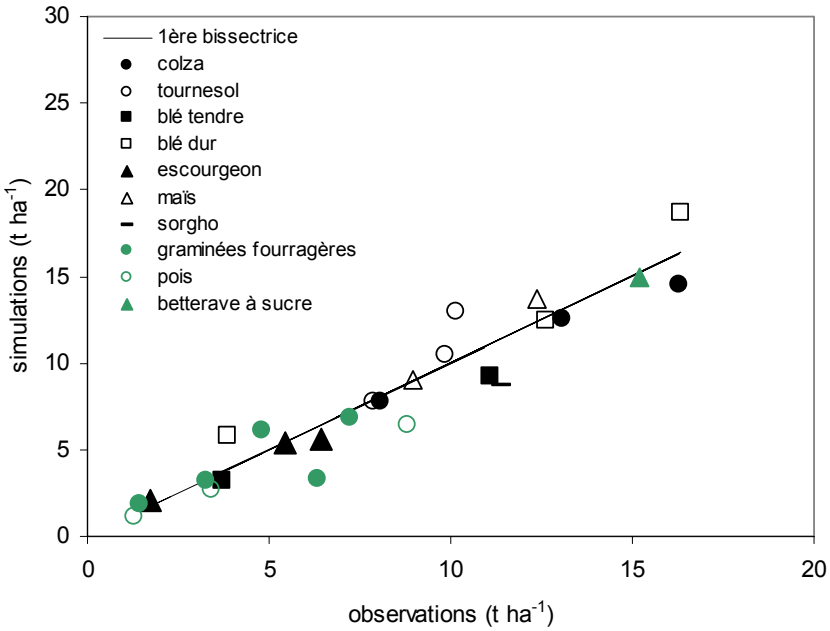

Figure 1. Comparaison entre mesures et simulations par STICS de la biomasse accumulée par des cultures très diversifiées

Les variables calculées utilisées dans cette étude sont essentiellement celles du bilan hydrique : transpiration du couvert végétal et évaporation du sol (cumulées dans la variable évapotranspiration), infiltration profonde et ruissellement par débordement (qui se produit dans le cas de sols à très faible infiltrabilité). Nous analyserons également les variables microclimatiques liées au bilan hydrique : température de surface et humidité des couverts, ainsi que les variables d'intérêt agricole (rendement) et environnemental (lixiviation des nitrates). Infiltration profonde (ou drainage) et ruissellement par débordement seront cumulés car ces deux entités représentent une estimation de la contribution à la recharge des nappes.

2.2. Choix des contextes pédoclimatiques

L'étude repose sur une sélection de milieux pédoclimatiques permettant d'appréhender la variabilité des configurations de sécheresse d'origine climatique et/ou édaphique à l'échelle du territoire français. Nous avons opéré cette sélection au niveau régional, échelle assurant le meilleur compromis entre les décisions relatives à l'eau et le découpage naturel du territoire français. Ainsi 10 régions ont été choisies, chacune étant caractérisée par une station climatique pourvue d'une série de 25 années de données au minimum et de trois types de sol (Figure 2).

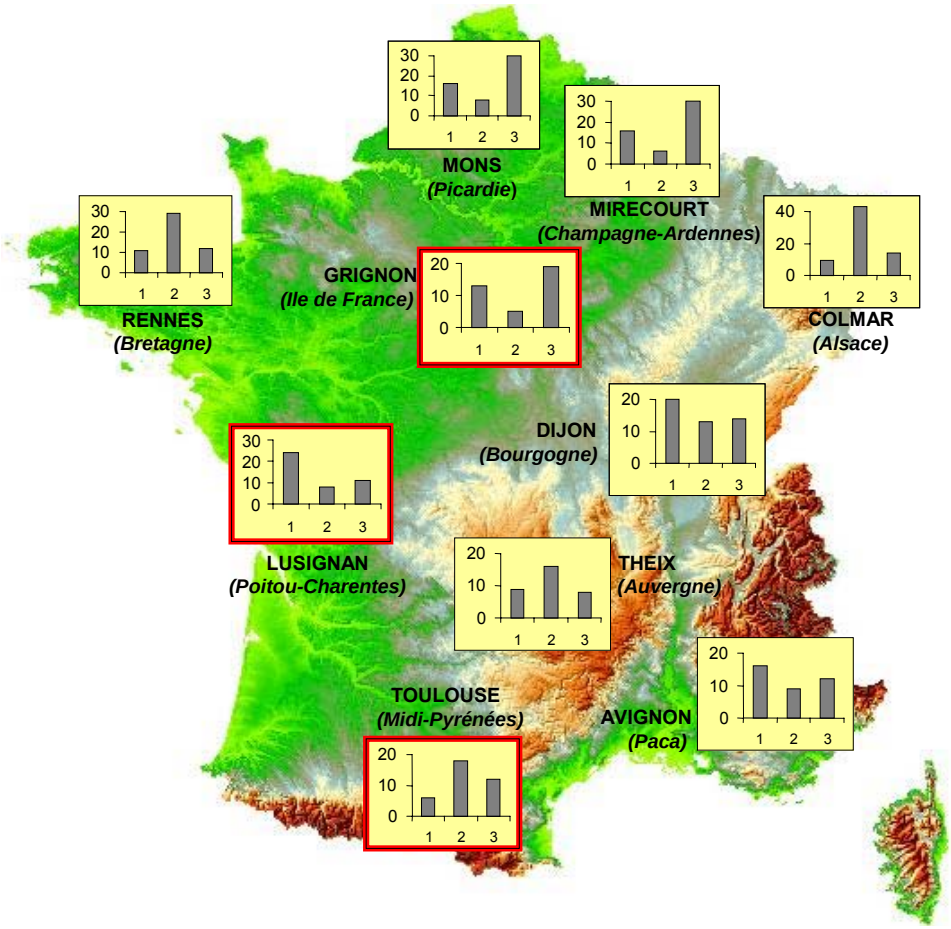

Figure 2. Carte des régions sélectionnées (chacune étant représentée par une station climatique), choix des sols par gamme de réserve utile (1 : 40 à 100 mm, 2 : 100 à 160 mm, 3 : >160 mm) et représentativité dans la région en %.
Les régions encerclées de rouge ont été choisies pour l'étude agricole.

Les climats choisis représentent les tendances océanique (Rennes, Lusignan, Grignon, Mons), continentale (Colmar, Dijon, Mirecourt), montagnarde (Theix à 800 m d'altitude) et méditerranéenne (Avignon, Toulouse) de l'hexagone, combinées du nord au sud avec la zonation latitudinale du climat global.

Le choix des sols s'est fait à partir de la carte pédologique au 1/1 000 000e sur la base de leur réserve utile, caractérisant leur capacité de stockage de l'eau, et de leur représentativité significative dans la région. Ainsi, pour chaque région, ont été retenus un sol à faible réserve utile (entre 40 et 100 mm), un sol à forte réserve utile (supérieure à 160 mm) et un sol intermédiaire (réserve utile entre 100 et 160 mm). L'hétérogénéité des régions en terme de potentiel édaphique est bien illustrée par la Figure 2 sur laquelle est, par exemple, mise en évidence l'importance des sols à faible réserve utile en Poitou-Charentes et en région PACA, alors que la région Ile-de-France ou la Picardie sont majoritairement dotées de sols à forte capacité de rétention en eau. Cependant la réserve utile n'est pas le seul critère de qualification de potentialité agricole des sols et, selon les régions les autres caractères permanents, en particulier ceux relatifs à leur fertilité (teneur en matière organique), peuvent modifier le classement des réponses attendues par la seule variation de la réserve utile (Tableau 1 en annexe).

Deux niveaux d'étude ont été menés. Le premier, de nature uniquement pédoclimatique, concerne l'ensemble des régions. Il vise à cerner le poids relatif des sols et des climats, dans leurs variabilités à la fois spatiale et temporelle, sur les flux d'eau infiltrés et évaporés, les périodes de crise ainsi que les conséquences attendues sur le microclimat. Sur un sous-ensemble de trois régions, sélectionnées pour l'acuité des problèmes liés à l'usage de l'eau (Ile-de-France, Midi-Pyrénées et Poitou-Charentes), nous avons introduit de manière aussi réaliste que possible la dimension agricole (les systèmes de culture).

2.3. Les protocoles de simulation retenus

Deux types de protocoles ont été retenus, correspondant aux deux niveaux d'études mentionnés.

Le protocole "pédoclimatique" correspond à des situations de couverture du sol extrêmes : permanence de sol nu sans aucune couverture végétale comparée à un couvert de prairie de graminées irrigué pour couvrir la totalité des besoins en eau des plantes. Deux coupes sont effectuées, au printemps et en été et à chacune de ces coupes, la prairie est fertilisée à raison de 50 kgN/ha, ce qui correspond à une conduite raisonnée permettant de couvrir en moyenne de 70 à 85 % des besoins en azote et limite les pertes par lixiviation. La même prairie conduite en "sec" a également été simulée afin d'estimer l'ampleur maximale du déstockage de l'eau du sol par une végétation permanente puisant uniquement dans les réserves "naturelles".

Le protocole "agricole" a été construit avec l'aide d'experts régionaux de façon à évaluer trois systèmes de culture réalistes par région. Ces systèmes de culture sont matérialisés par des rotations au plus quadriennales. Les systèmes "A" sont les plus consommateurs en eau, à base de cultures entièrement irriguées (Tableau 1). A l'opposé, les systèmes "C" sont les plus économes, avec des cultures conduites sans irrigation (appelées aussi cultures pluviales). En position intermédiaire, les systèmes "B" utilisent l'irrigation d'appoint, qui ne couvre qu'une partie des besoins en eau des plantes (évaluée à 50%). Les systèmes "B" et "C" tendent à privilégier des stratégies d'esquive en n'occupant pas le sol systématiquement pendant la période sensible de l'été. Les systèmes retenus ne sont pas forcément des systèmes très représentés dans les régions étudiées mais concrétisent une stratégie agri-environnementale que nous souhaitons tester.

Région	Rotation	Culture (variété)	Date de semis	Fertilisation KgN/ha (fractionnement)	Irrigation (satisfaction des besoins en eau)
Ile de France	**A** Maïs	Maïs (DK300)	15/04	175 (2)	100%
	Blé dur	Blé dur (Lloyd)	20/10	210 (3)	100%
	Betterave	Betteraves (Laser)	15/03	145 (1)	100%
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	05/10	225 (3)	100%
	B Colza	Colza (Aviso)	20/08	190 (2)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Shango)	05/10	225 (3)	50%
	Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	29/09	195 (2)	-
	C Tournesol	Tournesol (Albena)	15/04	80 (1)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	225 (3)	-
	Pois de printemps	Pois (Baccara)	15/03	-	-
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	225 (3)	-
Midi-Pyrénées	**A** Maïs	Maïs (Cécilia)	15/04	250 (2)	100%
	B Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	210 (3)	50%
	Blé dur	Blé dur (Nefer)	01/10	170 (2)	50%
	Sorgho	Sorgho (DK18)	25/04	120 (2)	50%
	C Blé dur	Blé dur (Nefer)	10/11	170 (2)	-
	Tournesol	Tournesol (Mélody)	15/04	60 (1)	-
Poitou-Charentes	**A** Maïs	Maïs (Furio)	15/04	220 (2)	100%
	B Colza	Colza (Aviso)	20/08	180 (3)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Shango)	20/10	215 (3)	50%
	Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	15/10	185 (2)	-
	C Tournesol	Tournesol (Mélody)	10/04	50 (1)	-
	Blé tendre	Blé tendre (Appache)	20/10	215 (3)	-
	Escourgeon	Escourgeon (Alaska)	01/10	185 (2)	-

Tableau 1. Détail des rotations et techniques associées retenues pour les trois régions tests

Les itinéraires techniques correspondant à ces systèmes, dont les éléments essentiels sont synthétisés dans le tableau 1, sont différents d'une région à l'autre mais identiques pour les trois types de sol. Les précédents culturaux jouent un rôle sur l'état hydrique et minéral du sol au semis et fournissent des

résidus qui sont enfouis lors des opérations de travail du sol supposées conventionnelles (déchaumage, labour, façons superficielles avant semis). Les densités de semis varient peu entre régions et le fractionnement des apports d'azote repose sur la phénologie des cultures. En ce qui concerne l'irrigation (pour les systèmes A et B), les apports d'eau, en date et quantité, sont calculés en fonction du niveau de satisfaction des besoins en eau recherché. Ainsi, pour les systèmes A, nous supposons que les besoins sont satisfaits à 100% et donc que l'irrigation est déclenchée dès que la transpiration réelle s'éloigne de la transpiration potentielle. Ceci correspond donc à un apport d'eau maximum par irrigation qui est supérieur aux apports d'eau effectués dans la pratique, notamment en fin de cycle cultural : en effet à partir d'un certain état de maturité du grain l'irrigation est généralement arrêtée quel que soit le stress hydrique subi par le feuillage. Pour les systèmes B, l'irrigation est déclenchée plus tardivement, quand la transpiration réelle est inférieure à 50% de la transpiration potentielle ce qui correspond à une irrigation volontairement limitée par rapport aux besoins.

Pour les deux protocoles, les simulations ont été réalisées en continu sur l'ensemble de la période climatique disponible de façon à tenir compte des effets cumulatifs. Si l'on exclut la monoculture de maïs, les systèmes de culture analysés s'appuient sur des rotations pluriannuelles, ce qui nécessite d'exécuter le protocole agricole 2, 3 ou 4 fois pour que les relations culture/année soient aussi exhaustives que possible et s'approcher ainsi de résultats à l'échelle de l'assolement. Une année culturale comprend une période de sol nu, précédant le semis, et une période de végétation. La proportion entre ces deux périodes est plus élevée pour les cultures d'été comme le maïs ou le tournesol que pour les cultures d'hiver comme le blé ou le colza.

2.4. Validité des résultats obtenus

Après en avoir vérifié la cohérence agronomique auprès d'experts, les résultats ont été comparés à des données statistiques régionales de rendement pour les années 2002 et 2003. Nous avons extrait les cultures les plus représentées dans nos trois régions tests (blé tendre, blé dur, maïs, tournesol et colza) en synthétisant les résultats sous la forme de moyennes régionales. Ces moyennes régionales accordent un poids identique aux trois systèmes de culture et aux trois sols, ce qui rend les chiffres difficilement comparables en absolu aux statistiques régionales. Cependant nous nous autorisons à en donner une interprétation en relatif.

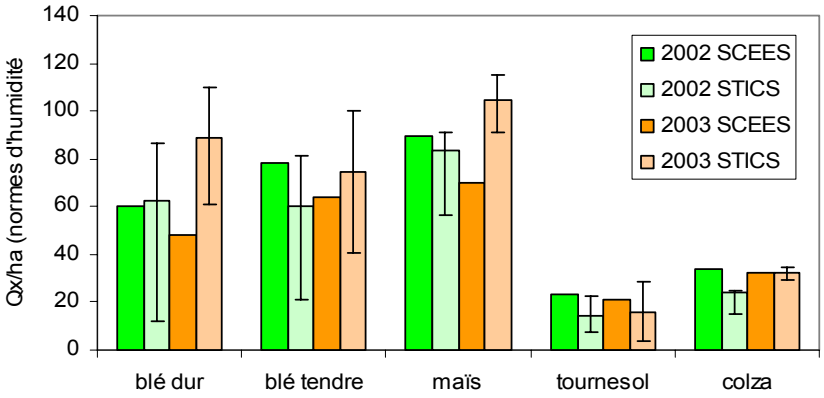

Figure 3. Comparaison entre les valeurs de production par culture (pour les plus représentées) issues des statistiques agricoles régionales (SCEES) et les calculs (STICS) pour les années 2002 et 2003. La barre donne la gamme des situations simulées (3 régions x 3 sols).

Si les ordres de grandeur de production des cultures sont respectés (Figure 3), la hiérarchie entre les années 2002 et 2003 est inversée, trahissant le poids excessif des systèmes irrigués dans les calculs. A l'inverse la culture de tournesol est défavorisée par les calculs, tout simplement parce qu'elle se trouve toujours dans les systèmes non irrigués.

3. Entre sol nu et prairie irriguée : deux extrêmes pour cadrer l'impact de l'agriculture sur le bilan hydrique et le microclimat

3.1. Comportement différentiel des deux types de surface

3.1.1. Bilan hydrique en quantité et qualité

Les besoins maximaux annuels en eau d'irrigation évalués par la quantité nécessaire à apporter à une prairie pour lui éviter tout stress hydrique permettent de borner les apports d'eau qu'une agriculture totalement irriguée pourrait engendrer (Tableau 2). En réalité il ne s'agit pas vraiment d'un maximum, puisque le couvert considéré est constitué de graminées basses et relativement peu fertilisées, ce qui modère l'exubérance du feuillage et par suite ses besoins en eau et nous verrons (chapitre suivant) que dans des contextes agricoles très irrigués, cette valeur peut être légèrement dépassée de quelques dizaines de mm par des cultures comme le maïs. Nous constatons cependant, tout en étant extrêmement variables d'une région à l'autre, que ces apports sont toujours non nuls.

En complétant les eaux météoriques, cette irrigation permet d'assurer le fonctionnement hydrique optimal de la culture : elle maximise la transpiration et entretient par suite un certain niveau d'évaporation du sol (seule l'irrigation par goutte-à-goutte permettrait de limiter cet effet secondaire). Dans ce contexte soulignons que la transpiration, c'est-à-dire l'eau absorbée par les plantes, est d'un ordre de grandeur comparable à l'évaporation directe du sol sous-jacent (Tableau 2), mécanisme purement physique. De plus, la Figure 4 montre que les quantités d'eau évaporées sous un sol de prairie irriguée sont importantes, correspondant au minimum à 70% de celles du sol nu. En effet si l'ombrage du sol par le feuillage tend à diminuer l'évaporation, l'irrigation en humectant régulièrement la surface du sol tend à l'augmenter et selon les régions et les sols une quantité d'eau importante peut ainsi être en apparence "perdue". C'est en particulier le cas en région PACA. Toutefois cette eau évaporée contribue à diminuer la demande climatique au niveau des plantes, et n'est donc pas entièrement perdue pour le système irrigué.

Région	Système	Sol	Irrigation (mm)	Drainage (mm)	ETR (mm)	ETR / ETM	Transpiration (mm)	Evaporation (mm)	Lixivation (kg N/ha)
Picardie	Sol nu	rendzine	0	256	347	0.55	0	347	83
		alluvial calcaire sableux	0	261	375	0.52	0	375	133
		lessivé limoneux	0	232	351	0.55	0	351	60
	Prairie irriguée	rendzine	249	242	630	1	327	303	7
		alluvial calcaire sableux	249	231	621	1	369	252	6
		lessivé limoneux	94	90	619	1	326	293	0
	Prairie sèche	rendzine	0	166	442	0.77	189	253	8
		alluvial calcaire sableux	0	152	457	0.78	218	239	9
		lessivé limoneux	0	52	566	0.94	292	275	0
Ile de France	Sol nu	rendzine	0	292	368	0.57	0	368	67
		brun calcaire	0	390	269	0.42	0	269	84
		limoneux lessivé	0	311	348	0.54	0	348	48
	Prairie irriguée	rendzine	195	271	588	1	297	291	7
		brun calcaire	128	261	531	1	346	185	6
		limoneux lessivé	87	184	568	1	302	266	0
	Prairie sèche	rendzine	0	199	460	0.82	198	263	7
		brun calcaire	0	198	461	0.88	280	182	3
		limoneux lessivé	0	131	531	0.95	275	256	0
Bretagne	Sol nu	brun acide limoneux	0	330	369	0.56	0	369	74
		brun limoneux	0	324	378	0.57	0	378	33
		Lessivé	0	339	369	0.54	0	369	91
	Prairie irriguée	brun acide limoneux	252	326	623	1	331	292	6
		brun limoneux	170	261	637	1	299	338	1
		Lessivé	112	200	621	1	362	259	0
	Prairie sèche	brun acide limoneux	0	259	455	0.78	200	255	11
		brun limoneux	0	196	518	0.89	236	281	1
		Lessivé	0	152	562	0.93	318	243	0

Poitou-Charentes	Sol nu	fersiallitique calcaire	0	440	369	0.53	0	369	47
		rendzine argileuse	0	440	369	0.53	0	369	47
		rendzine argileuse sur craie	0	442	366	0.53	0	366	59
	Prairie irriguée	fersiallitique calcaire	205	405	777	1	308	469	6
		rendzine argileuse	159	369	766	1	322	444	2
		rendzine argileuse sur craie	73	289	782	1	328	454	1
	Prairie sèche	fersiallitique calcaire	0	331	477	0.81	206	271	7
		rendzine argileuse	0	299	510	0.87	249	260	2
		rendzine argileuse sur craie	0	238	574	0.96	308	266	1
Midi Pyrénées	Sol nu	brun calcaire argileux	0	291	417	0.45	0	417	74
		alluvial calcaire	0	274	398	0.47	0	398	71
		brun calcaire	0	274	417	0.47	0	417	46
	Prairie irriguée	brun calcaire argileux	306	223	771	1	402	375	2
		alluvial calcaire	265	191	766	1	432	334	1
		brun calcaire	218	130	752	1	431	351	0
	Prairie sèche	brun calcaire argileux	0	146	544	0.77	233	311	3
		alluvial calcaire	0	122	566	0.80	281	286	1
		brun calcaire	0	69	622	0.85	322	299	0
Champagne Ardennes	Sol nu	rendzine peu profonde	0	498	388	0.60	0	388	78
		alluvial calcaire sableux	0	503	383	0.59	0	383	113
		rendzine profonde	0	492	395	0.60	0	395	78
	Prairie irriguée	rendzine peu profonde	155	451	603	1	290	313	13
		alluvial calcaire sableux	151	439	595	1	318	277	11
		rendzine profonde	81	378	596	1	299	297	6
	Prairie sèche	rendzine peu profonde	0	387	499	0.87	216	284	13
		alluvial calcaire sableux	0	374	513	0.88	247	266	10
		rendzine profonde	0	332	555	0.95	271	284	5
Alsace	Sol nu	brun acide sableux	0	134	384	0.52	0	403	96
		brun calcaire argileux	0	127	370	0.52	0	409	0
		alluvial	0	116	373	0.53	0	419	91
	Prairie irriguée	brun acide sableux	269	134	651	1	352	337	3
		brun calcaire argileux	203	100	653	1	319	330	0
		alluvial	171	38	624	1	355	330	0
	Prairie sèche	brun acide sableux	0	83	455	0.75	179	276	6
		brun calcaire argileux	0	0	478	0.80	196	282	0
		alluvial	0	22	517	0.83	240	276	0
Bourgogne	Sol nu	brun calcaire limoneux	0	373	390	0.57	0	390	47
		brun argileux	0	402	357	0.52	0	357	0
		lessivé hydromorphe	0	333	374	0.55	0	374	0
	Prairie irriguée	brun calcaire limoneux	192	308	623	1	288	362	6
		brun argileux	188	335	603	1	318	290	0
		lessivé hydromorphe	82	213	600	1	301	303	0
	Prairie sèche	brun calcaire limoneux	0	266	503	0.85	206	298	7
		brun argileux	0	0	492	0.84	231	260	0
		lessivé hydromorphe	0	0	561	0.95	273	288	0
Auvergne	Sol nu	brun acide sableux	0	380	381	0.66	0	425	135
		andosol	0	341	399	0.64	0	446	137
		brun hydromorphe	0	342	397	0.66	0	446	0
	Prairie irriguée	brun acide sableux	187	380	579	1	288	291	19
		andosol	62	241	580	1	300	278	7
		brun hydromorphe	25	167	573	1	310	263	0
	Prairie sèche	brun acide sableux	0	241	470	0.96	278	273	6
		andosol	0	319	550	0.85	199	272	20
		brun hydromorphe	0	0	575	0.99	309	266	0
PACA	Sol nu	brun calcaire	0	337	359	0.35	0	359	65
		fersiallitique	0	338	357	0.35	0	357	42
		alluvial calcaire	0	326	368	0.36	0	369	53
	Prairie irriguée	brun calcaire	489	301	888	1	505	383	5
		fersiallitique	433	259	874	1	499	376	2
		alluvial calcaire	349	176	875	1	510	365	0
	Prairie sèche	brun calcaire	0	194	499	0.65	229	270	7
		fersiallitique	0	167	526	0.69	253	273	3
		alluvial calcaire	0	106	590	0.76	312	277	0

Tableau 2. Valeurs moyennes des diverses composantes du bilan d'eau (quantité et qualité) par type de sol et par région pour les trois surfaces sol nu, prairie irriguée et prairie sèche

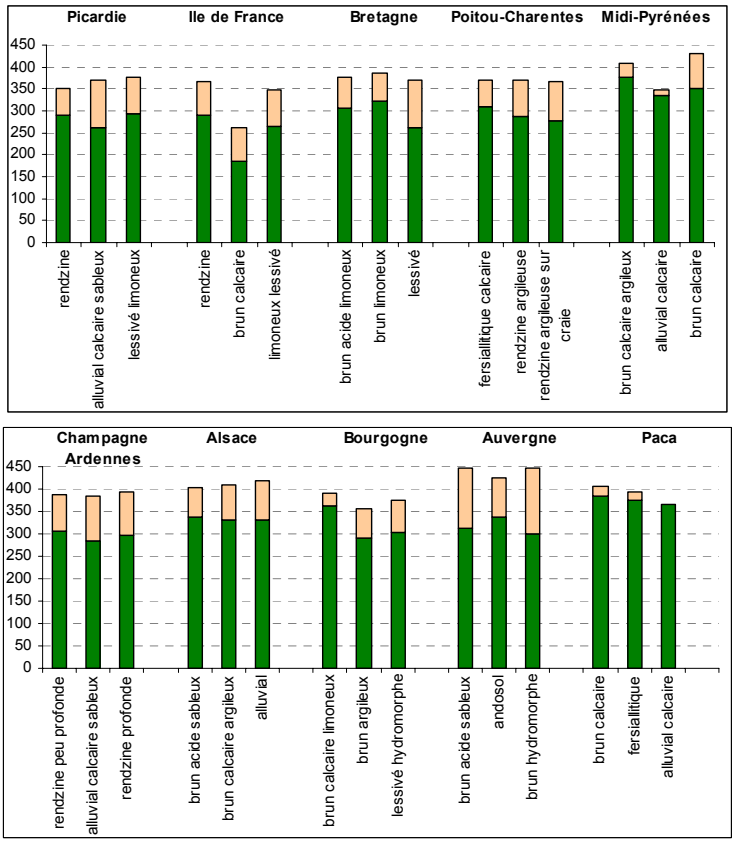

Figure 4. Evaporation directe annuelle moyenne (mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région. Les valeurs sont présentées de façon emboîtée (sol nu en beige et sol sous prairie irriguée en vert) mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

L'ETM correspond à la quantité d'eau maximum consommée par la culture quand elle est exempte de tout contrainte hydrique alors que l'ETR correspond à la quantité d'eau réellement évapotranspirée lorsque la disponibilité en eau devient limitante. Le Tableau 2 permet de vérifier que l'objectif de l'irrigation de la prairie telle que simulée par le modèle est effectivement atteint, puisque le rapport ETR/ETM est de 1. Le rapport des évapotranspirations des deux surfaces, sol nu et prairie irriguée, est de l'ordre de 0.5. Donc une vision synthétique des deux systèmes aboutit à des ordres de grandeurs équivalents pour les trois flux évaporatoires que sont la transpiration des plantes irriguées, l'évaporation du sol sous couvert des plantes irriguées et l'évaporation du sol nu soumis uniquement à la pluviométrie naturelle.

La combinaison entre la capacité de rétention des sols, le régime pluviométrique (naturel et artificiel) et les flux évaporatoires détermine la quantité d'eau qui s'écoule hors du compartiment de sol exploitable par les racines (drainage + ruissellement). Ainsi les situations pédoclimatiques où l'alimentation des nappes par les eaux drainées-ruisselées est particulièrement limitée correspondent à des situations à forte réserve utile, faible pluviométrie et forte demande climatique comme l'Alsace (Tableau 2). A ce titre, il est intéressant de comparer les trois surfaces étudiées dont la capacité à restituer l'eau au milieu est décroissante depuis le sol nu jusqu'à la prairie sèche (Figure 5). La prairie irriguée est à un niveau le plus souvent intermédiaire entre sol nu et prairie sèche, l'eau complémentaire apportée permettant un accroissement de l'évapotranspiration plus que proportionnel. Cependant pour les sols à faible capacité de rétention, les besoins élevés en irrigation peuvent compenser cet accroissement et engendrer des volumes d'eau drainée-ruisselée comparables à ceux du sol nu. Pour les sols hydromorphes, les deux modes de conduite de la prairie n'engendrent que très peu de différence sur les volumes d'eau drainée-ruisselée car la persistance de l'eau dans la macroporosité des sols permet de mieux couvrir les besoins en eau des plantes que dans le cas de sols drainants.

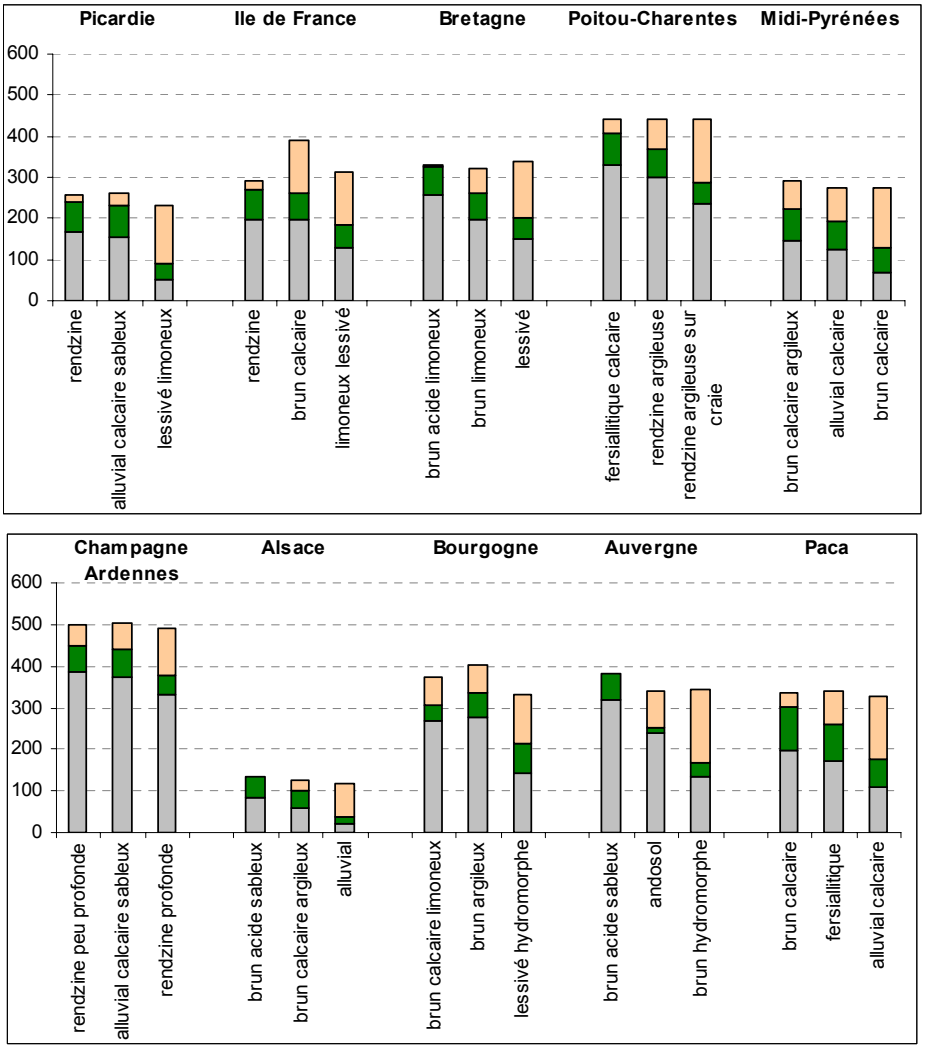

Figure 5. Drainage annuel et ruissellement moyen (mm) pour les trois surfaces étudiées, par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.
Les valeurs sont présentées de façon emboîtée (sol nu en beige, prairie irriguée en vert foncé et prairie sèche en gris) mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

La capacité de rétention des sols diminue à la fois les besoins en irrigation et le drainage, de sorte qu'elle joue très peu sur la différence irrigation - (drainage + ruissellement), et donne un sens à la moyenne par site (Tableau 3). Dans 4 régions sur 10, le volume d'eau drainée+ruisselée dépasse les besoins en irrigation. Cela démontre premièrement que localement, l'irrigation intensive peut provoquer un réel déstockage de l'eau en réserve dans les nappes et les retenues, et deuxièmement qu'un bilan à l'échelle annuelle ne suffit pas à déterminer les besoins en irrigation (exemple de la région Poitou-Charentes).

Picardie	Ile-de-France	Bretagne	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées	Champagne-Ardennes	Alsace	Bourgogne	Auvergne	PACA
9	-102	-84	-209	82	-161	124	-131	-171	178

Tableau 3. Différences moyennes (interannuelles et intersols) entre l'irrigation d'une part et le cumul drainage-ruissellement d'autre part (en mm) pour une prairie irriguée.

La quantité de nitrate lixiviée n'est pas proportionnelle aux eaux de drainage. Elle dépend de la capacité du sol à "produire" des nitrates, c'est-à-dire de son potentiel de minéralisation combinant teneur en matière organique (éventuellement neutralisée par le calcaire actif) et caractéristiques

climatiques locales. Mais comme le montre le Tableau 2, elle dépend avant tout de la présence d'une couverture végétale capable d'absorber l'azote minéral. En effet la lixiviation des nitrates est très étroitement reliée à l'occupation du sol.

La relation entre la pluviométrie (naturelle et artificielle) et l'eau qui s'écoule hors du compartiment de sol exploitable par les racines et sert à l'alimentation des nappes est fortement modulée par la réserve utile des sols et l'évapotranspiration des surfaces. La différence entre les deux extrêmes que sont le sol nu et la prairie sèche peut aller de quelques dizaines à une centaine de mm. Malgré l'irrigation, la couverture permanente du sol réduit les phénomènes de drainage-ruissellement et donc la réalimentation des nappes. Dans une large moitié des régions étudiées, les volumes d'eau drainée-ruisselée dépassent les besoins potentiels en irrigation. C'est avant tout l'occupation du sol par une végétation qui permet de limiter la lixiviation des nitrates.

3.1.2. Microclimat

L'occupation du sol et la conduite des cultures ont des impacts sur les climats locaux et ce sont des éléments importants des modèles climatiques globaux. Par leur caractère extrême, les deux types de surface simulés donnent l'amplitude de cet impact.

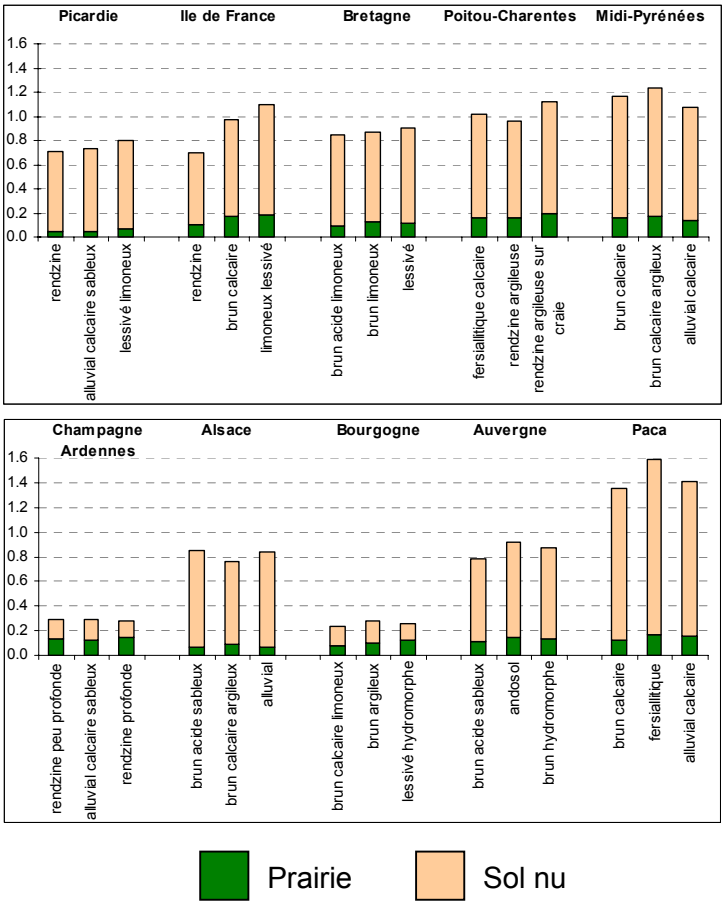

Figure 6. Ecarts moyens de température annuelle entre la surface et l'air (°C) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.
Les valeurs sont présentées de façon emboîtée mettant en évidence le classement respectif des deux valeurs.

Un rapide regard comparatif sur la Figure A1 (en Annexe) indique les grandes tendances, à savoir un assèchement de l'air au dessus des surfaces en sol nu et une humidification au dessus des prairies. Les élévations de température (Figure 6) induites par une suppression des surfaces végétalisées sont de l'ordre de grandeur de 1°C en moyenne annuelle. Cette élévation de température joue un rôle

important sur les processus biologiques du sol. Au-delà, l'occupation du sol par une végétation agricole "transpirante" est un facteur non négligeable de régulation de la température à l'échelle locale. En terme d'ordre de grandeur, cette différence thermique annuelle entre des surfaces de sol nu et de prairie irriguée est juste un peu plus faible que les prévisions de réchauffement données par les climatologues pour la fin du siècle : entre 1.5 et 6°C.

La température d'une surface de sol nu est, en moyenne annuelle, plus élevée de 1°C par rapport à celle d'une prairie irriguée.

3.2. Sources de variabilité

3.2.1. Gammes de variabilité spatiale inter et intrarégionale

S'il est évident que la diversité des climats et des sols de l'hexagone génère une variabilité importante dans les bilans hydrique et microclimatique, les éléments de ces bilans sont inégalement affectés. La plus grande variabilité apparaît dans les besoins potentiels en irrigation (Figure 7) et les volumes d'eau drainée-ruisselée (Figure 8).

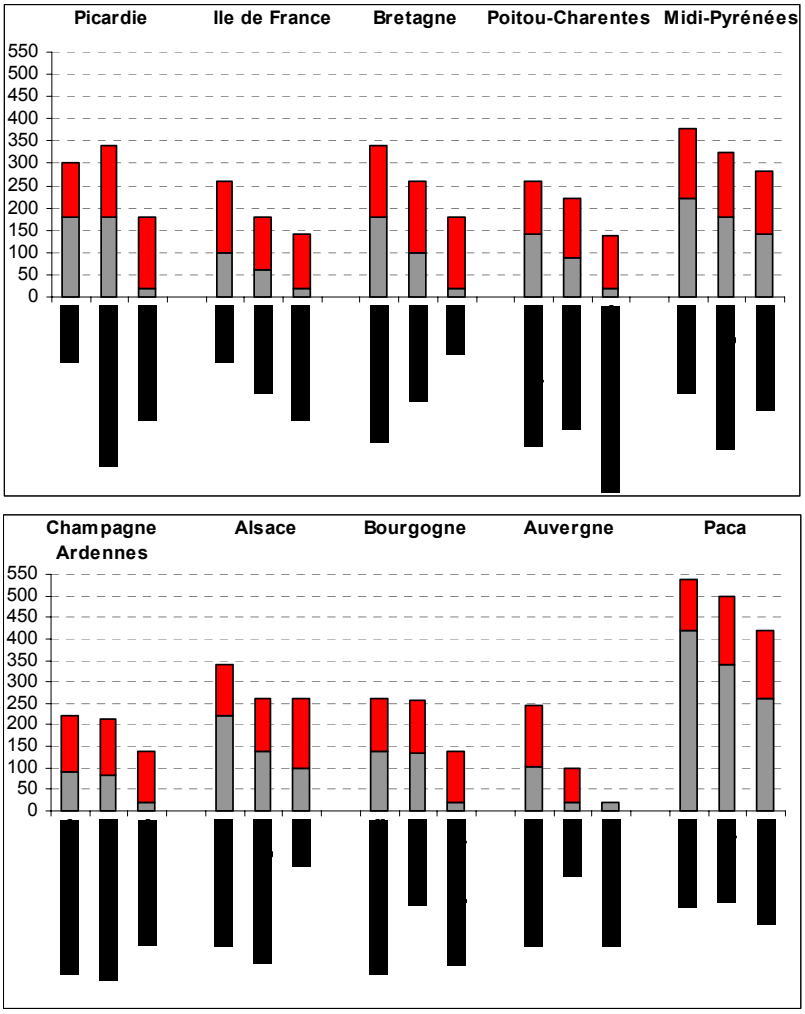

Figure 7. Irrigation annuelle (mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région, avec la quantité minimale nécessaire 8 années sur 10 (en gris) et celle nécessaire 2 années sur 10 (en rouge).

L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle

La combinaison des variabilités des régimes pluviométriques d'un côté et des gisements radiatif et thermique d'un autre côté est une première clé expliquant les besoins en irrigation. Nous rappelons ici qu'il s'agit de besoins théoriques maximaux en eau qui sont supérieurs aux pratiques d'irrigation réellement recommandées. Il s'agit donc de comparer les situations en valeurs relatives. Ainsi avec des irrigations potentielles annuelles de l'ordre de 400 mm, la région PACA se situe à un niveau très supérieur à celui des autres régions. Viennent ensuite les régions Midi-Pyrénées et Alsace avec des valeurs de l'ordre de 200 mm. A l'opposé, les plus modestes en terme de besoins en irrigation semblent être les régions Champagne-Ardenne et Auvergne (de l'ordre de 100 mm). Dans les autres régions, il est impossible de réaliser un classement sans tenir compte du poids respectif des différents sols. La variabilité entre types de sol est le plus souvent d'un ordre de grandeur supérieur à celui de la variabilité climatique, allant de 80 à 150 mm. Cette variabilité est en adéquation avec la capacité de rétention des sols, les sols ayant la plus faible réserve utile nécessitant davantage d'eau d'irrigation. Les régimes pluviométriques, presque indépendamment du type de sol, vont déterminer aussi le niveau du flux d'évaporation issu du sol nu par rapport à celui issu de la prairie irriguée : 0.35 en région PACA et 0.60 en Champagne.

De même le volume du compartiment exploitable par les racines est un élément déterminant du drainage+ruissellement des sols. Les sols superficiels ou caillouteux (cas de Poitou-Charentes) présentent généralement des volumes d'eau drainée importants (Figure 8). Il est intéressant de souligner que le type de sol explique davantage la variabilité du drainage que le climat. On voit cependant que la région Poitou-Charentes est celle où le volume d'eau qui retourne aux aquifères (drainage + ruissellement) est le plus élevé, mais aussi le plus variable.

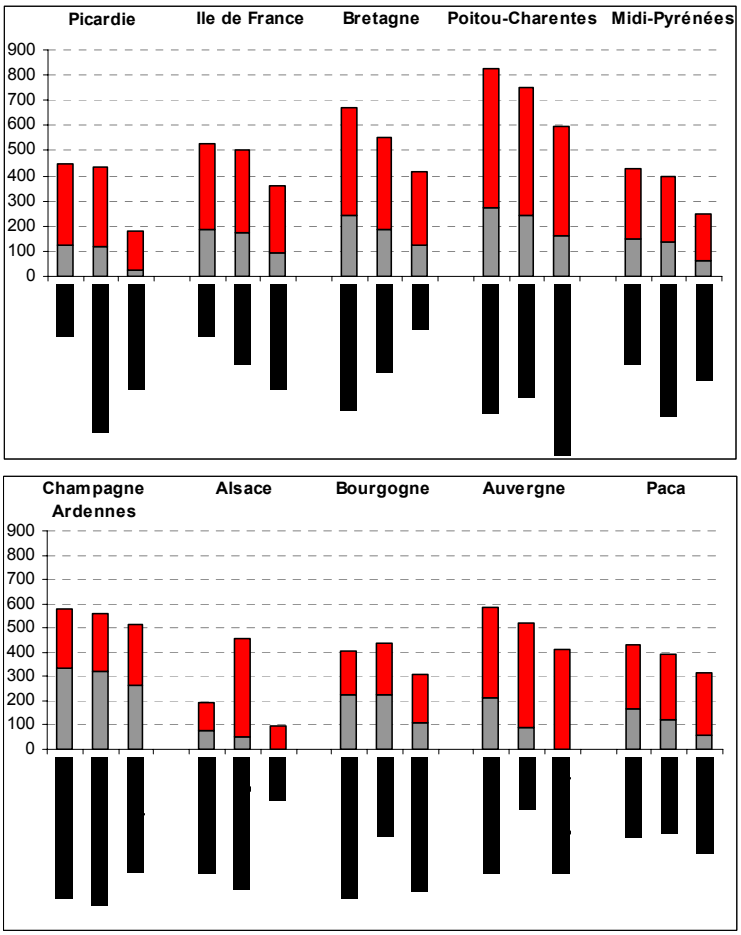

Figure 8. Cumuls annuels de l'eau de drainage profond et de ruissellement (mm) pour une prairie irriguée par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.

La quantité minimale atteinte 8 années sur 10 est en gris et celle atteinte 2 années sur 10 est en rouge.
L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle

Cet impact très fort du type de sol apparaît aussi sur les différences de drainage-ruissellement entre les surfaces (Figure 5) avec des classements entre types de sol pouvant varier pour le sol nu et la prairie puisque que les propriétés des sols en cause ne sont pas les mêmes (Tableau A1 en annexe).

La transpiration des plantes (Tableau 2) ne présente pas une variabilité aussi importante et les valeurs se situent autour de 300-350 mm au nord et 400-450 mm au sud (PACA et Midi-Pyrénées). La variabilité entre les sols est due aux propriétés de dessèchement de la couche de surface responsables de la formation du mulch naturel. Ce mulch est la pellicule sèche en surface du sol qui fait obstacle aux transferts d'eau et donc aux dessèchements ultérieurs du sol. Ce mécanisme joue deux rôles quelque peu antagonistes au niveau de la plante : en diminuant les pertes par évaporation, c'est un facteur d'économie d'eau au profit de la plante, mais en même temps la réduction de l'évaporation augmente la demande climatique du feuillage par des mécanismes de microconvection. En bilan la présence d'un mulch naturel est plutôt de nature à économiser l'eau ; ce qui est parfaitement illustré en Ile-de-France par le sol brun-calcaire, sol très argileux présentant une forte capacité de mise en place du mulch, sur lequel la transpiration maximale des plantes est supérieure de 50 mm à celle des deux autres sols alors que l'évaporation est diminuée de 100 mm.

En ce qui concerne le microclimat, la nature des sols (couleur, capacité de rétention) et des surfaces, végétalisées ou non, exacerbe les différences climatiques. On constate que les différences inter-régionales pour ce qui concerne l'élévation de température au dessus d'une surface de sol nu peuvent atteindre 1°C (entre l'Ile-de-France et PACA) et les différences intra-régionales entre types de sols 0.4°C (en Ile-de-France). Par conséquent la variabilité microclimatique spatiale est comparable à la variabilité climatique temporelle.

Les besoins en irrigation et les volumes d'eau drainée-ruisselée sont les composantes du bilan hydrique les plus variables spatialement et temporellement. Le climat constitue une première clé d'explication des besoins en irrigation avec en tête les régions PACA (autour de 400mm en moyenne), puis l'Alsace et la région Midi-Pyrénées (autour de 200 mm en moyenne). Vient ensuite la faible capacité de rétention en eau des sols qui explique les besoins en irrigation de régions comme Poitou-Charentes (Figure 2). Le poids des sols est également déterminant sur les volumes d'eau qui alimentent les nappes. Il existe des mécanismes naturels, liés aux propriétés des sols, permettant de limiter l'évaporation directe du sol au profit de la transpiration des plantes

3.2.2. Gammes de la variabilité temporelle

La variabilité temporelle des processus en cause dans le bilan hydrique des surfaces est sans doute l'élément le plus important en terme de gestion de l'eau, tant il est vrai que les décisions stratégiques, aux niveaux d'une part des systèmes de culture et d'autre part des équipements hydriques et hydrauliques, s'appuient sur cette variabilité annuelle et saisonnière. Les figures 7 et 8, en exprimant les résultats sous forme de quintiles, montrent combien les besoins en irrigation et plus encore la recharge des nappes peuvent varier entre années "favorables" et années "défavorables".

Pour appréhender davantage la variabilité interannuelle, nous avons choisi les trois régions d'intérêt agricole retenues pour la seconde partie de l'étude (Ile-de-France, Poitou-Charentes et Midi-Pyrénées). En ce qui concerne le terme de consommation eau (Figure 9) des deux types de surface, il apparaît que la variabilité interannuelle est importante et l'irrigation de la prairie, même si elle l'atténue par rapport au sol nu, ne la supprime pas. Cela souligne le poids de la variabilité des autres composantes du climat que sont le rayonnement et la température. Les différences climatiques entre les trois régions sont complètement gommées pour le sol nu. Par ailleurs les trois courbes de la Figure 9 sont rarement en phase, mettant en évidence le fait que la sécheresse affecte de façon très contrastée l'ensemble de l'hexagone.

Quels que soient les types de couvert, le drainage est typiquement un phénomène hivernal (Tableau A2 en annexe). Cependant, l'irrigation de la prairie provoque également un drainage printanier et estival significatif, même pendant les mois de juillet et août. C'est évidemment parce que l'irrigation

est concentrée sur cette période avec des maxima en août. C'est également à ce moment là que les élévations de température par rapport à l'air culminent, pouvant atteindre 3-4°C sur sol nu. Une analyse par type de sol indique que si le sol joue un rôle important dans le bilan hydrique annuel, il n'intervient pas dans la dynamique saisonnière.

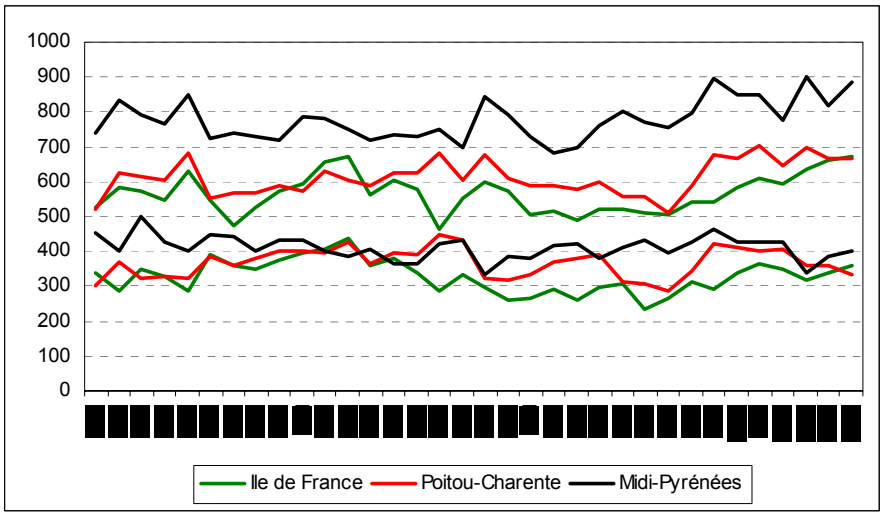

Figure 9. Variabilité interannuelle de l'évaporation du sol nu (en bas) et de l'évapotranspiration de la prairie irriguée (en haut)

La variabilité interannuelle de l'évapotranspiration de la prairie irriguée souligne le poids de la variabilité des autres composantes climatiques que la pluviométrie, rayonnement et température en particulier. L'irrigation culmine en été alors que les phénomènes de drainage-ruissellement se produisent surtout pendant la période automno-hivernale. En été, un sol nu peut être jusqu'à 4°C plus chaud que l'air ambiant.

4. En situations agricoles

L'objectif de cette partie est d'approcher le comportement hydrique de véritables surfaces agricoles. Selon le nombre de cultures constituant le système, la surface est représentée par 1, 2, 3 ou 4 cultures et les synthèses annuelles présentées correspondent à une moyenne de cet ensemble.

4.1. Différence entre les systèmes de culture

Comme attendu, dans chacune des régions analysées, les trois systèmes de culture A, B et C correspondent à des niveaux de satisfaction de besoin en eau décroissants (Figure 10), les systèmes irrigués assurant presque 100% des besoins alors que les systèmes pluviaux les plus déficitaires assurant 85% des besoins, ce qui permet une consommation additionnelle des eaux météoriques par rapport au sol nu de l'ordre de 35% au minimum.

Les apports d'eau d'irrigation ne sont pas dans les mêmes proportions et les systèmes B n'utilisent que de 25 à 45% de l'eau apportée aux systèmes A à base de maïs alors qu'ils permettent de couvrir 95% des besoins. Par ailleurs, bien que le maïs n'occupe pas le sol en permanence, les apports d'eau d'irrigation sont semblables (parfois même supérieurs) aux apports potentiels estimés pour la prairie irriguée. Ceci s'explique par la hauteur des plants de maïs, qui intervient dans le bilan d'énergie et tend à augmenter la demande climatique du couvert végétal par rapport à un couvert bas de prairie, et par un taux de couverture plus faible autorisant davantage de pertes par évaporation.

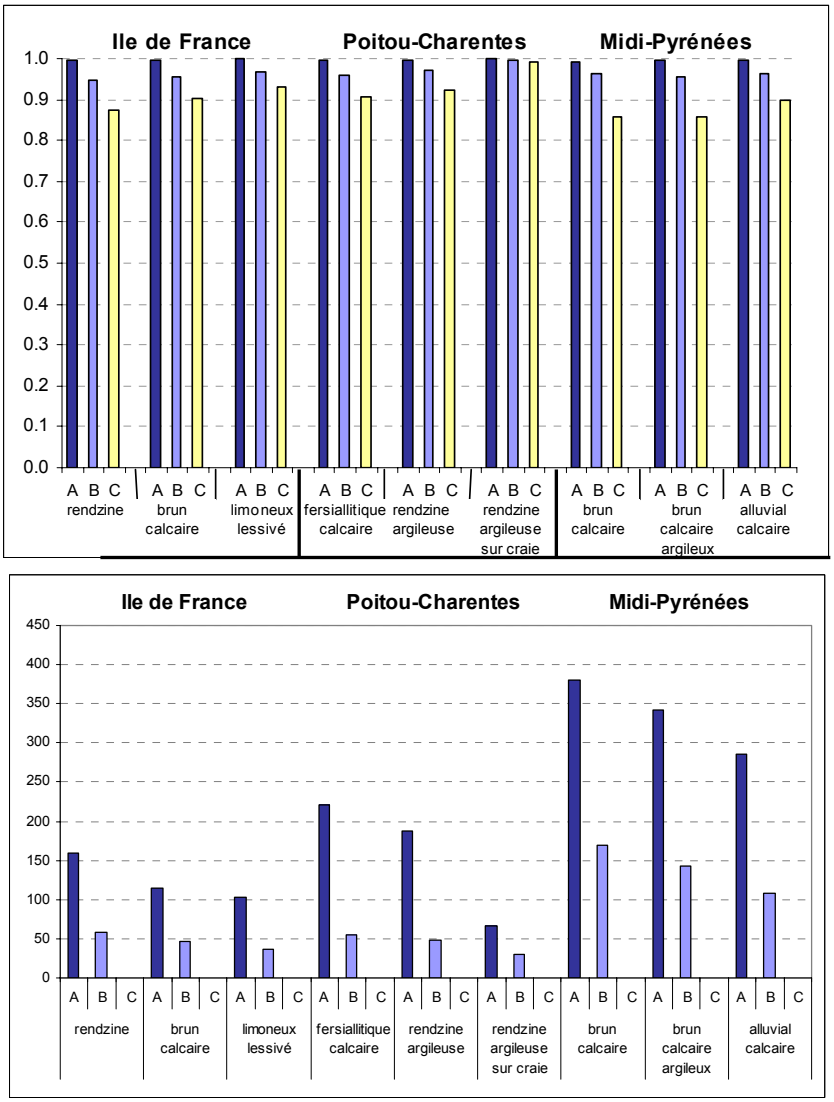

Figure 10. Moyennes interannuelles de la satisfaction des besoins en eau estimée par le rapport ETR/ETM par région, système de culture et sol (haut) comparée aux moyennes interannuelles des apports d'eau d'irrigation (mm) par région, système de culture et sol (bas)

Le modèle permet de rendre compte de l'effet du rationnement en eau des cultures en début de cycle. En effet ce rationnement limite le développement de l'Indice Foliaire du couvert végétal, ce qui en retour limite les besoins en eau ultérieurs de la culture.

Cependant ces apports d'eau n'ont pas tout à fait le même impact sur le microclimat que pour la prairie (Figure A2 en annexe) puisque les différences thermiques annuelles entre les systèmes irrigués et les systèmes pluviaux sont au maximum de 0.2°C avec un minimum de 0.2°C de différence entre l'air et la surface cultivée. L'été, les différences de température entre les systèmes sec et irrigués peuvent être de l'ordre de 1°C provoquant des accélérations de cycle de plusieurs jours.

La différence de drainage (Figure 11) entre systèmes de culture est relativement constante : de l'ordre de 50 mm avec les systèmes irrigués (en tête) puis à un niveau équivalent pour les systèmes B et C. Cela démontre l'efficacité hydrique de l'irrigation d'appoint pratiquée dans les systèmes B. Notons que les systèmes A sont également des systèmes à forte proportion de cultures d'été donc prélevant peu d'eau au printemps contrairement aux cultures d'hiver, ce qui constitue un autre élément en faveur du drainage. Les quantités de nitrates lessivés ne sont pas déductibles des quantités d'eau drainées et la Figure A3 (Annexe) démontre clairement combien le type de sol est déterminant sur la lixiviation, faisant passer les systèmes de culture et la variabilité climatique au second plan des facteurs explicatifs.

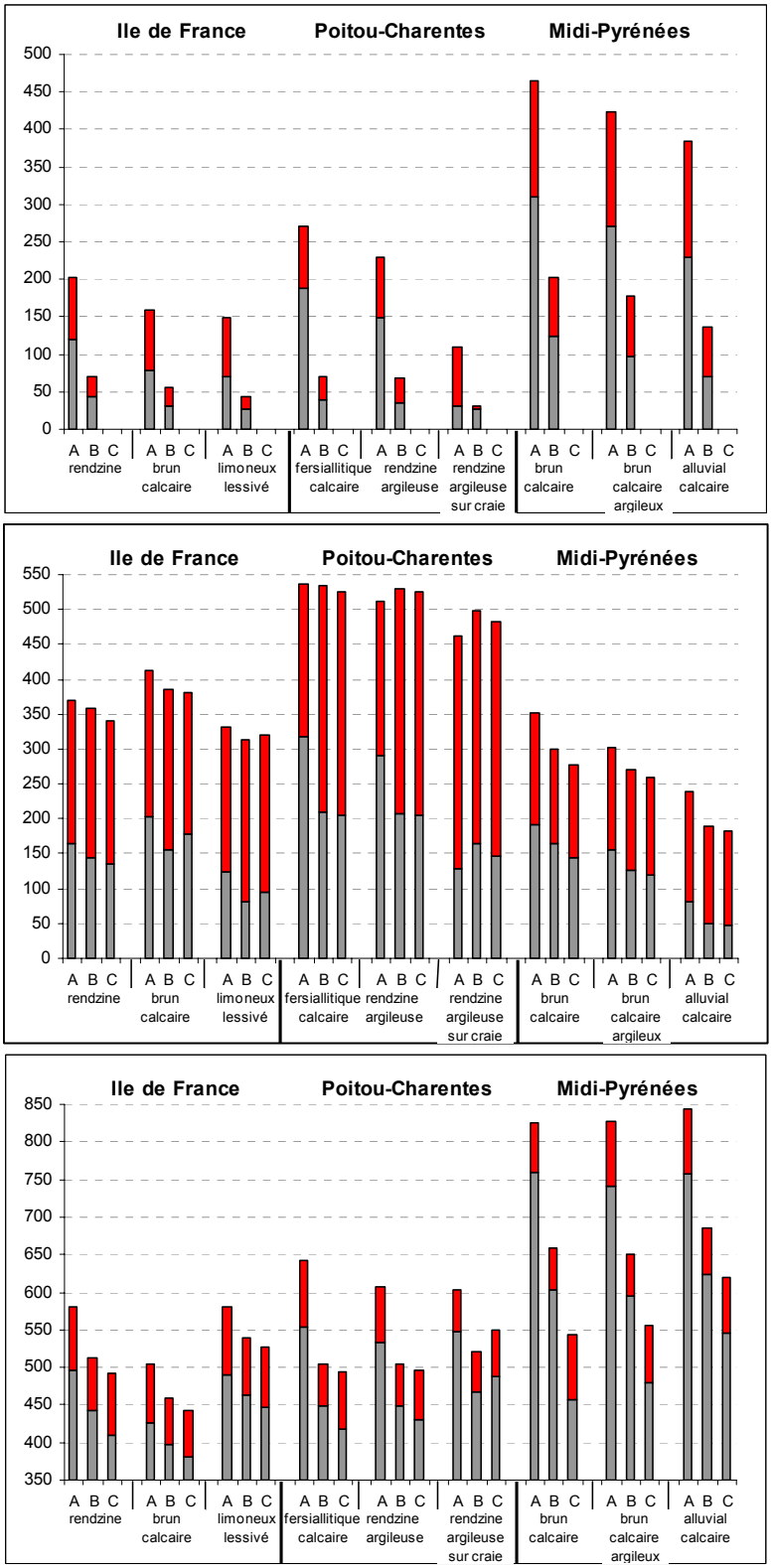

Figure 11. Variabilités interannuelles de l'irrigation (en haut), du drainage (au milieu) et de l'évapotranspiration (en bas).
Les valeurs minimales atteintes 8 années sur 10 sont en gris et celles atteintes 2 années sur 10 sont en rouge.
L'ampleur de la différence entre ces deux grandeurs indique la variabilité interannuelle.

Le déficit hydraulique induit par l'irrigation intensive (Figure 12) est proportionnel aux apports mais inférieurs à ceux-ci de l'ordre de 50 mm. Par exemple en Poitou-Charentes le déficit hydraulique entre les systèmes A et C est de 150 mm pour le sol squelettique (fersiallitique calcaire) alors que

l'irrigation est de 220 mm. En Midi-Pyrénées, ce déficit est si important qu'il provoque un déstockage de l'eau de réserve (risques potentiels de baisse des nappes et vidange des retenues), phénomène qui ne se produit pas pour les systèmes B d'irrigation d'appoint.

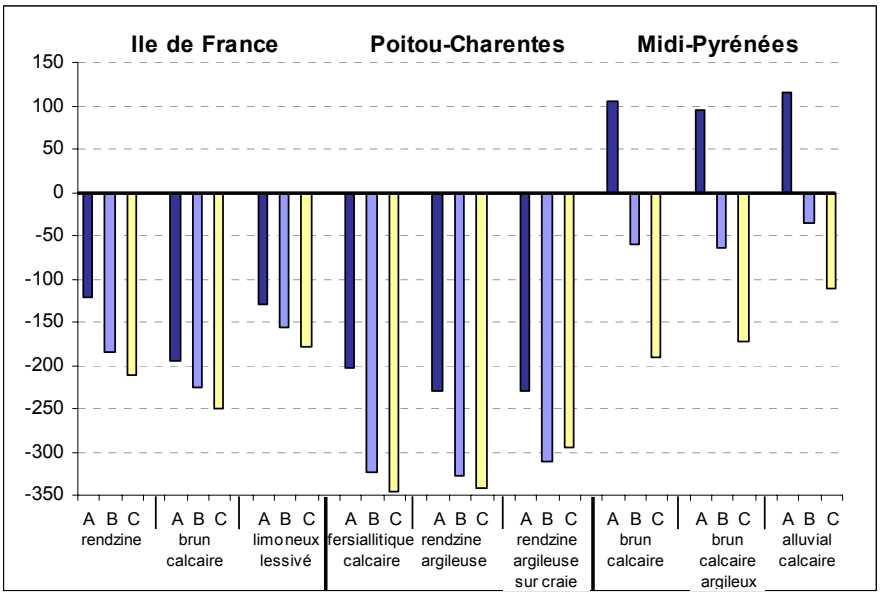

Figure 12. Différences moyennes entre l'irrigation et le drainage (en mm) par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région. La différence entre les systèmes C et les systèmes A peut être analysée comme le déficit hydraulique induit par l'irrigation intensive.

La Figure 13 montre que les systèmes irrigués permettent de mettre en évidence le potentiel climatique régional en maximisant la consommation en eau alors que les systèmes pluviaux mais aussi les systèmes avec irrigation d'appoint tendent à homogénéiser le niveau des consommations en eau, même si ces niveaux satisfont très différemment les besoins (Figure 10).

Avec de 25 à 45% des quantités d'eau apportés aux systèmes intensifs A, les systèmes B couvrent 95% des besoins en eau des cultures. Cela s'explique par la présence de cultures d'été plus tolérantes et de cultures d'hiver auxquelles s'ajoute le rationnement du besoin par une contrainte modérée qui joue sur la réduction de la surface foliaire. Sous les systèmes A, intensivement irrigués, les quantités d'eau de drainage sont très nettement diminuées par rapport aux systèmes pluviaux ("C") car l'évapo-transpiration est stimulée par l'exubérance du feuillage. En Midi-Pyrénées, contrairement aux systèmes B basés sur l'irrigation d'appoint, les systèmes A provoquent un véritable déstockage comme pour la prairie irriguée, à l'instar d'autres régions notoirement sèches comme l'Alsace ou la région PACA. La différence thermique entre les systèmes secs et irrigués provoque des accélérations du cycle cultural de plusieurs jours.

4.2. Impact des systèmes de culture sur les variabilités spatiale et temporelle

En ce qui concerne les besoins en irrigation, le classement régional est cohérent avec un gradient nord-sud. Ces différences régionales sont exacerbées en cultures annuelles par rapport à ce qu'elles sont pour une prairie irriguée (Figures 7 et 10). Ainsi les besoins en irrigation du système intensif de la région Poitou-Charentes sont nettement supérieurs à ceux d'Ile-de-France alors qu'ils sont comparables pour la prairie. Cela est lié à la présence de cultures d'hiver dans les rotations du système intensif d'Ile-de-France. Le classement des sols sur les besoins en irrigation est, lui, bien conforme aux résultats obtenus sur prairie. Par ailleurs, la proportion de sols peu favorables (Figure 2) explique la fragilité de la région Poitou-Charentes en cas de sécheresse. Dans le même temps, il semble que Poitou-Charentes valorise mieux les systèmes pluviaux puisque les valeurs ETR/ETM sont les plus

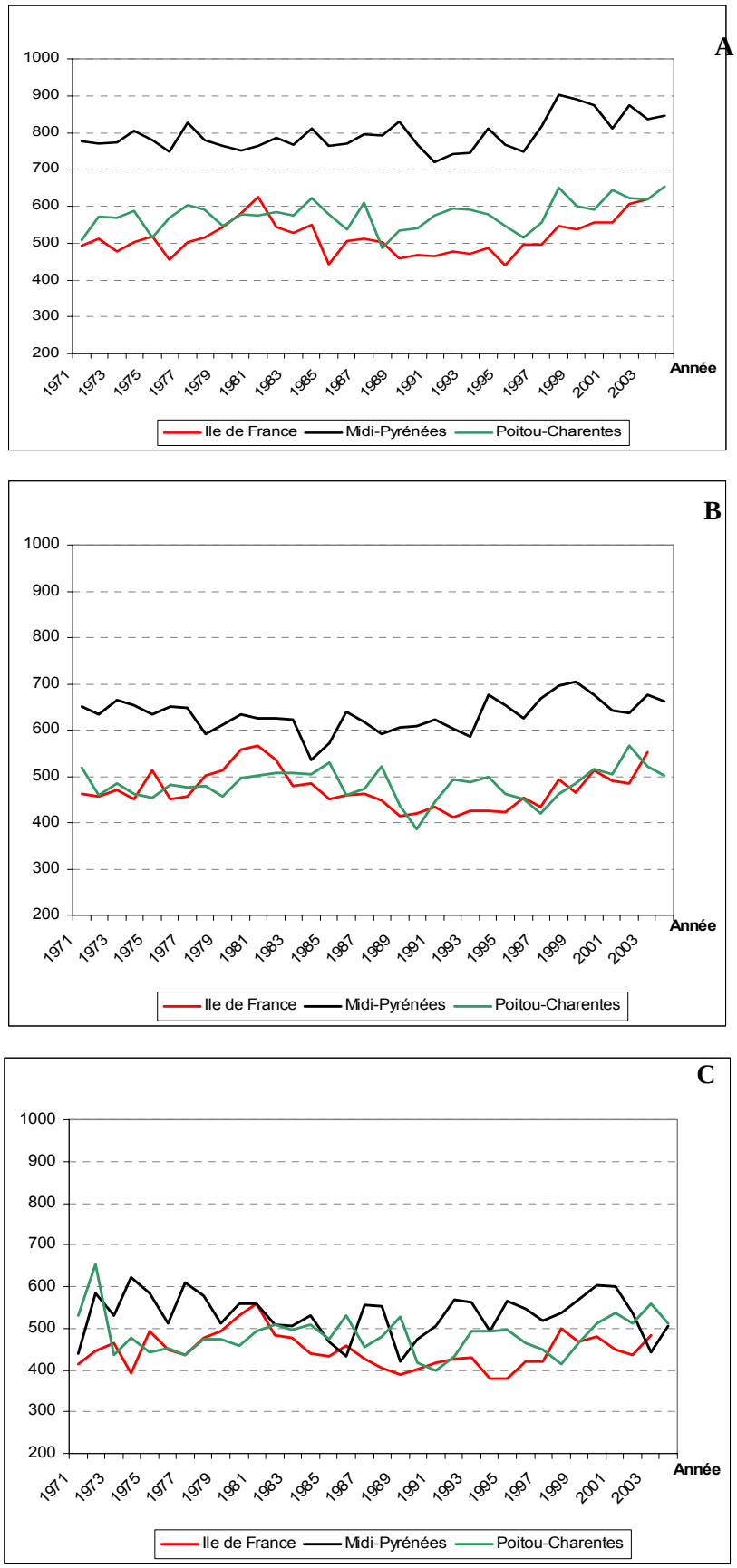

Figure 13. Evolution de la consommation en eau (1971-2004) des trois systèmes de culture (moyenne sur la sole et les types de sol) pour les trois régions test

élevées des trois régions (Figure 10). A l'opposé, c'est en Midi-Pyrénées que les systèmes C ont le plus de mal à satisfaire les besoins en eau requis. Ainsi pour ces systèmes, l'ajustement au type de sol parait indispensable : si par exemple on évalue leur viabilité à une couverture minimale des besoins d'au moins 90%, cela exclut les sols bruns calcaires de Midi-Pyrénées et les rendzines d'Ile-de-France, ce qui conforte les résultats du bilan hydraulique (Figure 12).

Par ailleurs, notons que la capacité du sol à mettre rapidement en place un mulch naturel peut compenser une faible réserve utile et nécessiter des volumes d'eau d'irrigation comparables aux sols profonds, cas du sol brun calcaire d'Ile de France. De ce point de vue les techniques de non-labour, en laissant un mulch végétal à la surface du sol, peuvent jouer un rôle non négligeable sur l'économie en eau de la parcelle.

Concernant le drainage, on retrouve en situations agricoles, la variabilité spatiale inter-régionale perçue lors de l'analyse pédoclimatique. En revanche, la variabilité entre types de sol est légèrement inférieure à celle obtenue sous prairie, même si les systèmes irrigués en totalité ont tendance à accentuer le drainage.

La différence d'ambiance thermique entre types de sol est de l'ordre du dixième de degré, inférieure à la différence induite par le passage d'un système irrigué à un système cultivé en sec, qui elle est exacerbée en ambiance méridionale. En conséquence cette différence entre types de sol n'aura, a priori, que très peu d'impact sur la culture.

Sur la Figure 13, il est intéressant de constater de nouveau que les systèmes de culture irrigués ne suppriment pas la variabilité inter-annuelle de la consommation en eau des cultures. Même si elle n'est pas significative, on observe toutefois une tendance à l'augmentation de cette consommation depuis 7 ans pour les systèmes irrigués, signe de l'augmentation des besoins liés à l'augmentation de la température et dans une moindre mesure au rayonnement. La disparition de cette tendance pour les systèmes pluviaux est un indicateur de la tendance à l'augmentation des sécheresses agricoles.

Par l'écart entre les quintiles extrêmes, la Figure 11 fournit une synthèse de cette variabilité interannuelle, confirmant l'importance de la variabilité des termes d'irrigation et de drainage, le sol intervenant peu dans cette variabilité. La variabilité de la consommation en eau est d'un ordre de grandeur inférieur et clairement liée à la région et au système de culture, avec, sans surprise, une valeur légèrement accentuée pour les systèmes pluviaux.

Système de culture		**A**		**B**		**C**	
Région	**Période**	**Drainage %**	**Irrigation %**	**Drainage %**	**Irrigation %**	**Drainage %**	**Irrigation %**
Ile-de-France	août	1	23	1	6	3	0
	sept.-octobre	8	7	16	**53**	5	0
	nov.-janvier	**49**	0	**51**	0	**49**	0
	février-avril	**35**	0	**30**	0	**38**	0
	mai-juin	4	**43**	0	36	2	0
	juillet	3	27	2	4	3	0
Poitou-Charentes	août	0	**35**	0	5	1	0
	sept.-octobre	12	15	19	**56**	10	0
	nov.-janvier	**65**	0	**72**	0	**75**	0
	février-avril	12	0	5	0	7	0
	mai-juin	11	25	4	32	7	0
	juillet	0	**35**	0	7	0	0
Midi-Pyrénées	août	2	26	1	17	2	0
	sept.-octobre	7	**29**	8	25	4	0
	nov.-janvier	**37**	0	**47**	0	**44**	0
	février-avril	**36**	0	**31**	0	**36**	0
	mai-juin	17	15	12	**44**	12	0
	juillet	1	30	1	14	2	0

Tableau 4. Pics saisonniers de drainage et d'irrigation (en mm) par région et système de culture (tous sols confondus)

Sans surprise, ce sont les mois de juillet et août qui correspondent aux périodes critiques de besoins en eau (Tableau 4) et ce d'autant plus que le climat est plus méridional. Cependant les "avant" saisons printanières peuvent représenter un volume tout aussi important. C'est en particulier le cas en Ile-de-France où le système irrigué comporte à la fois des cultures d'été et des cultures d'hiver. Tout en diminuant considérablement les volumes d'eau requis, l'irrigation d'appoint permet également de déplacer les périodes de consommation intense au printemps. En ce qui concerne la réalimentation des nappes, les systèmes de culture ont peu d'impact sur la période de drainage intense qui reste centrée sur le trimestre novembre-janvier. On constate simplement que les systèmes irrigués de type A fournissent davantage d'eau au printemps que les systèmes plus économes, en relation avec une occupation du sol majoritairement estivale.

Les besoins en irrigation des systèmes A sont croissants du Nord au Sud mais la présence de cultures d'hiver dans les rotations, même irriguées, permet de diminuer significativement ces besoins. Après les systèmes de culture, c'est essentiellement le climat qui pèse sur la variabilité spatiale du drainage et du bilan hydraulique (drainage - irrigation), le sol n'intervenant que très marginalement. Les systèmes B permettent de déplacer la période de besoins intenses en irrigation vers le printemps.

5. Le maïs par rapport aux autres cultures

La culture de maïs est souvent désignée comme une culture très consommatrice en eau parce que très productive. Afin d'apporter des éléments chiffrés dans cette discussion, les résultats précédents ont été réexaminés par culture sur les deux sols extrêmes, à très faible et forte réserve utile. Les variables d'intérêt analysées sont la consommation en eau sur le cycle de la culture, l'irrigation nécessaire et le rendement. En faisant le rapport entre rendement et eau consommée on obtient une estimation de l'efficience agricole de l'eau.

Si l'on excepte la betterave en Ile-de-France, le maïs est, en effet, la culture qui consomme le plus d'eau (Figure 14) avec de 30 à 50% de cette consommation couverte par l'irrigation, l'augmentation des besoins en irrigation suivant très logiquement un gradient nord-sud. Il existe des cultures d'été moins consommatrices comme le sorgho (Midi-Pyrénées) ou le tournesol mais qui évidemment produisent moins (Figure 15) dans les contextes d'agriculture plus économes en eau dans lesquels ils sont produits (systèmes de culture B et C). Pourtant le sorgho montre une efficience de l'eau comparable à celle du maïs, ce qui lui confère un statut agronomique substitutif par rapport au maïs. Le blé est sans doute la culture dont consommation en eau et production se rapprochent le plus de celle du maïs. Son efficience de l'eau est bien supérieure à celle du maïs en Midi-Pyrénées.

Les performances du maïs sont également liées à la fertilisation azotée qui augmente de façon proportionnelle avec les apports d'eau par irrigation (Tableau 1) indiquant que l'intensification liée à l'irrigation s'accompagne d'une forte fertilisation.

Evidemment le choix du type de sol pèse lourd sur l'irrigation requise et la pratiquer sur un sol à faible réserve peut augmenter de 100 mm les besoins en eau d'irrigation.

Le culture du maïs est la culture à vocation nationale la plus consommatrice en eau, ses besoins allant en moyenne de 400 à 600 mm du nord au sud. Cela s'explique parce que c'est aussi une culture très productive dans ces situations de culture intensive, qui s'accompagnent d'une fertilisation élevée. En terme d'efficacité de l'eau, le blé et le sorgho sont des cultures de substitution possibles. Le choix pertinent des sols permet d'économiser jusqu'à 30% de l'eau d'irrigation.

	Ile de France		Poitou-Charentes		Midi-Pyrénées	
	sol 1 : rendzine		*sol 1 : fersiallitique calcaire*		*sol 1 : brun calcaire*	
(mm)	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation
600-649					◀ maïs	
550-599						
500-549	◀ betterave				◀ sorgho	
450-499			◀ maïs			
400-449	◀ maïs				◀ blé dur	
350-399	◀ blés, colza ◀ escourgeon		◀ blé tendre ◀ colza			◀ maïs
300-349	◀ tournesol		◀ escourgeon ◀ tournesol			
250-299	◀ pois			◀ maïs	◀ tournesol	◀ sorgho
200-249		◀ betterave				
150-199		◀ maïs				
100-149						
50-99		◀ blé		◀ blé		◀ blé dur
0-49		◀ colza, tournesol ◀ escourgeon, pois		◀ colza, tournesol ◀ escourgeon		◀ tournesol
	sol 3 : limoneux lessivé		*sol 3 : rendzine argileuse sur craie*		*sol 3 : alluvial calcaire*	
(mm)	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation	Consommation	Irrigation
600-649					◀ maïs	
550-599						
500-549	◀ betterave				◀ sorgho	
450-499			◀ maïs		◀ blé dur	
400-449	◀ maïs ◀ escourgeon ◀ blé tendre ◀ colza		◀ tournesol ◀ blé tendre			
350-399	◀ tournesol ◀ blé dur		◀ escourgeon ◀ colza		◀ tournesol	
300-349						
250-299	◀ pois					◀ maïs
200-249						
150-199		◀ betterave, maïs				◀ sorgho
100-149						
50-99				◀ maïs		◀ blé dur
0-49		◀ blé, colza ◀ tournesol ◀ escourgeon, pois		◀ blé tendre ◀ tournesol, colza ◀ escourgeon		◀ tournesol

Figure 14. Position relatives des cultures en termes de consommation en eau et de besoins en irrigation sur les 2 sols "extrêmes". Il s'agit de moyennes pour l'ensemble des systèmes de culture

Rendement MS 0%	Ile de France	Poitou-Charentes	Midi-Pyrénées
14-15	◀**betterave**		
13-14			
12-13			
11-12			
10-11			
9-10			◀**maïs**
8-9		◀**maïs**	
7-8	◀**maïs**		
6-7	◀**blé**	◀**blé**	◀**blé**
5-6			
4-5			◀**sorgho**
3-4	◀**escourgeon**	◀**escourgeon**	
2-3	◀**pois** (1)	◀**colza**	
1-2		◀**tournesol**	◀**tournesol**
0-1			

Autres cultures non mentionnées dans leur ordre de production :
(1) : colza et tournesol

Figure 15. Positions relatives des cultures en termes de production récoltable (t/ha)
En rouge, le maïs ; en bleu, les cultures d'hiver et en vert, les cultures d'été

6. Et si la fréquence des sécheresses s'accentuait…

L'inquiétude qui fait suite aux sécheresses de 2003 et 2005 est-elle légitime ? Afin de répondre à cette question, nous avons extrait de la série climatique passée 5 années connues pour leur caractère sec, le plus souvent au printemps et en été mais aussi en hiver (cas de l'année 2004). Parallèlement, nous nous sommes livrés à une étude prospective afin d'apprécier d'éventuels effets cumulatifs des sécheresses en supposant que la succession des années 2003 à 2005 se reproduisait 10 fois. Indépendamment du fait que ces années sont encore dans les mémoires, elles représentent un échantillonnage intéressant des divers modes de sécheresse : sécheresse combinée avec une canicule en 2003, sécheresse hivernale en 2004 et estivale en 2005.

Série climatique	Variable	Système				
		Prairie	**A**	**B**	**C**	**Sol nu**
1972-2005	Pluie	819 (±161)	799 (±175)	802 (±202)	799 (±196)	809 (±147)
	Irrigation	164 (±71)	187 (±52)	48 (±22)	0	0
	Drainage	374 (±132)	416 (±143)	377 (±183)	369 (±176)	440 (±129)
	ETR/ETM	1.00	0.99 (±0.00)	0.97 (±0.00)	0.92 (±0.01)	0.53 (± 0.07)
	INN (*)	0.65 (±0.05)	0.80 (±0.05)	0.81 (±0.07)	0.78 (±0.06)	- - -
	Rendement	9.7 (±0.4)	8.5 (±1.4)	3.9 (±0.8)	3.2 (±0.8)	- - -
1976	Pluie	815	571	556	561	707
	Irrigation	340	184	80	0	0
	Drainage	481	257	206	205	390
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.92	0.84	0.43
	INN (*)	0.68	0.65	0.75	0.72	- - -
	Rendement	10.0	5.4	3.2	1.9	- - -
1989	Pluie	619	523	568	549	583
	Irrigation	300	190	42	0	0
	Drainage	239	254	243	235	256
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.99	0.87	0.42
	INN (*)	0.62	0.73	0.73	0.76	- - -
	Rendement	9.8	8.2	2.6	3.1	- - -
2003	Pluie	809	782	834	822	740
	Irrigation	259	230	56	0	0
	Drainage	376	390	364	360	379
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.93	0.88	0.44
	INN (*)	0.59	0.77	0.80	0.79	- - -
	Rendement	10.0	7.3	3.3	2.7	- - -
2004	Pluie	536	776	741	766	652
	Irrigation	220	230	91	0	0
	Drainage	91	402	381	378	286
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.93	0.84	0.48
	IINN (*)	0.62	0.74	0.89	0.82	- - -
	Rendement	9.3	8.7	4.8	2.9	- - -
2005	Pluie	427	397	520	475	427
	Irrigation	299	304	77	0	0
	Drainage	42	120	64	61	97
	ETR/ETM	1.00	1.00	0.91	0.83	0.42
	INN (*)	0.58	0.76	0.88	0.85	- - -
	Rendement	9.1	9.2	4.0	2.8	- - -
Série sèche de 30 ans créée à partir d'un tirage au sort des années 2003, 2004 et 2005	Pluie	587 (±118)	603(±123)	606 (±75)	605 (±76)	591 (±139)
	Irrigation	273 (±44)	244 (± 47)	61 (± 23)	0	0
	Drainage	173 (±100)	234 (±23)	183 (± 101)	180 (± 104)	251 (±132)
	ETR/ETM	1.00	0.99 (±0.00)	0.94 (±0.02)	0.86 (± 0.03)	0.43 (±0.01)
	INN (*)	0.63 (±0.04)	0.76 (±0.04)	0.83 (±0.08)	0.82 (±0.04)	- - -
	Rendement	9.9 (±0.5)	8.2 (± 0.9)	3.9 (± 0.01)	2.8 (± 0.4)	- - -

(*) INN : Indice de nutrition azotée pendant la phase végétative

Tableau 5. Comparaison de l'impact des sécheresses en Poitou-Charentes sur rendzine argileuse (sol médian) sur les grandeurs d'intérêt hydrique et agronomique et sur les cycles de culture à partir de deux séries climatiques (série réelle 1972-2005 et série fictive très sèche) avec les écart-types et des années sèches connues (1976, 1989, 2003, 2004, 2005). Les valeurs sont comparables entre années ou séries climatiques mais pas entre systèmes de culture car les périodes sur lesquelles sont réalisées les moyennes et les cultures sont différentes.

Afin de ne pas mélanger d'autres sources de variabilité que celle de l'occupation des sols, nous nous sommes concentrés sur un seul milieu pédoclimatique, en Poitou-Charentes sur rendzine argileuse. Les résultats (Tableau 5) sont édifiants. En comparant série réelle et série fictive, on voit les besoins en irrigation plus que doubler pour la prairie alors qu'ils n'augmentent que de 30% en moyenne pour les systèmes irrigués à base de cultures annuelles. Beaucoup plus drastique, la diminution du drainage est de l'ordre de 50% sous l'ensemble des surfaces. Les systèmes avec irrigation d'appoint parviennent à maintenir un même niveau de rendement alors que les systèmes pluviaux voient leurs rendements chuter de 12% qui s'expliquent par une diminution de la satisfaction des besoins en eau de 92 à 86%. Dans le scénario fictif, les eaux météoriques ne satisfont plus que 43% des besoins d'évaporation du sol nu, contre 53% avec la série passée. Il apparaît, par ailleurs, une accentuation des déficits azotés (INN) pour les systèmes intensément irrigués (prairie, maïs), ce qui pourrait conduire les agriculteurs à augmenter la fertilisation avec, en corollaire, les effets néfastes sur l'environnement (émission de N_2O notamment). C'est l'inverse pour les systèmes B et C : meilleure couverture des besoins azotés, ce qui contribue à maintenir un niveau de rendement comparable dans les deux séries pour les systèmes B.

Les années sèches isolées démontrent combien les sécheresses peuvent différer dans leurs impacts. Ainsi en 1976, la sécheresse brutale au printemps a fait suite à une période pluvieuse en fin d'hiver qui explique le faible niveau des quantités d'eau d'irrigation pour le maïs mais aussi le déficit azoté lié à la lixiviation des nitrates avant le semis. Il en résulte un faible rendement du maïs malgré l'irrigation, suite au déficit azoté. En 1989, les surfaces emblavées en cultures annuelles ne semblent pas avoir véritablement souffert de sécheresse dans ce contexte pédoclimatique : volume d'eau d'irrigation égaux ou inférieurs à la moyenne, besoins en eau satisfaits pour les systèmes pluviaux, fort drainage. En revanche pour la prairie, culture pérenne, l'impact des sécheresses de 1976 et 1989 est lisible sur le volume d'eau d'irrigation et sur le faible niveau de l'évaporation du sol. La forte sensibilité des systèmes prairiaux à la sécheresse apparaît ici de façon évidente.

Les sécheresses récentes jouent davantage sur les surfaces agricoles, se caractérisant par des volumes d'eau d'irrigation fortement augmentés par rapport à la moyenne (65% pour 2005) et une difficulté accrue pour satisfaire les besoins en eau des systèmes pluviaux. Ce qui est très frappant c'est la sévère diminution des volumes drainés démontrant le poids important que semble prendre la composante hivernale des sécheresses agricoles.

Les années de sécheresse ont des caractéristiques différentes : les sécheresses "anciennes" étaient centrées sur la période printanière et estivale alors qu'il semble que pour les sécheresses récentes le déficit d'eau hivernal pèse beaucoup, diminuant, de surcroît, significativement la réalimentation des nappes. Si les besoins azotés sont mal couverts en période végétative, l'irrigation ne peut induire une augmentation substantielle du rendement qu'avec une augmentation de la fertilisation azotée. Les systèmes prairiaux sont très pénalisés par la sécheresse. Si les scénarios de sécheresse des années 2003 à 2005 se répétaient, les systèmes irrigués intensivement auraient besoin d'au moins 30% d'eau supplémentaire alors que le drainage hivernal serait diminué de 50%.

7. Conclusion

Il faut considérer cette étude par modélisation comme une illustration qui n'a pas l'ambition de reproduire une réalité précise, mais seulement de montrer les possibilités offertes par l'approche de modélisation. C'est pourquoi elle procède d'une approche typologique et permet de proposer des ordres de grandeurs des variables clés du bilan hydrique et une hiérarchisation des facteurs de variation de l'impact de la sécheresse (climat, sol, système de culture). Il ressort que d'un point de vue strictement agronomique les systèmes basés sur l'irrigation de complément présentent beaucoup d'avantages et mériteraient donc d'être déclinés plus précisément pour des conditions locales bien identifiées.

Bibliographie

Baker D.N., Meyer R.E. 1966. Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton. *Crop Sci.* 6:15-19.

Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Nicoullaud B., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.

Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron*. 18: 309-332.

de Wit C.T., Brouwer R., Penning de Vries F.W.T., 1970. The simulation of photosynthetic systems. In: Setlik, I. (Ed.), *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. Proceeding IBP/PP Technical Meeting Trebon 1969. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 47-50.

Duncan W.G., 1971. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. *Crop Sci.* 11 : 482-485.

Annexes

Région	Sol	RU (mm)	Profondeur (cm)	MO[1] (%)	Mulch[2]
Picardie	rendzine	96	50	1.9	*
	alluvial calcaire sableux	103	110	1.9	*
	lessivé limoneux	271	140	1.0	*
Ile de France	rendzine	96	50	1.9	*
	brun calcaire	115	80	2.3	***
	limoneux lessivé	191	140	1.3	**
Bretagne	brun acide limoneux	101	50	1.9	*
	brun limoneux	158	80	0.5	*
	Lessivé	230	140	1.9	*
Poitou Charentes	fersiallitique calcaire	91	50	1.0	*
	rendzine argileuse	124	80	1.9	**
	rendzine argileuse sur craie	338	95	1.9	**
Midi Pyrénées	brun calcaire argileux	85	50	0.8	*
	alluvial calcaire	116	80	1.5	**
	brun calcaire	182	110	1.3	*
Champagne Ardennes	rendzine peu profonde	96	50	1.9	*
	alluvial calcaire sableux	103	110	1.9	*
	rendzine profonde	159	80	1.9	*
Alsace	brun acide sableux	79	80	1.9	*
	brun calcaire argileux	116	80	1.3	**
	alluvial	170	110	1.9	*
Bourgogne	brun calcaire limoneux	101	50	1.0	*
	brun argileux	112	80	1.3	**
	lessivé hydromorphe	170	110	0.5	*
Auvergne	brun acide sableux	55	50	1.9	*
	andosol	159	80	1.9	*
	brun hydromorphe	198	120	1.9	*
Paca	brun calcaire	86	50	1.5	*
	fersiallitique	118	70	0.8	*
	alluvial calcaire	182	110	1.0	*

Tableau A.1. Caractéristiques des sols retenus dans chacune des régions

[1] MO : Matière organique. Une bonne fertilité des sols correspond à une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en calcaire actif qui bloque la minéralisation.

[2] Selon les propriétés de surface du sol, se formera plus ou moins rapidement une couche sèche, appelée mulch naturel, protectrice vis-à-vis de l'évaporation.

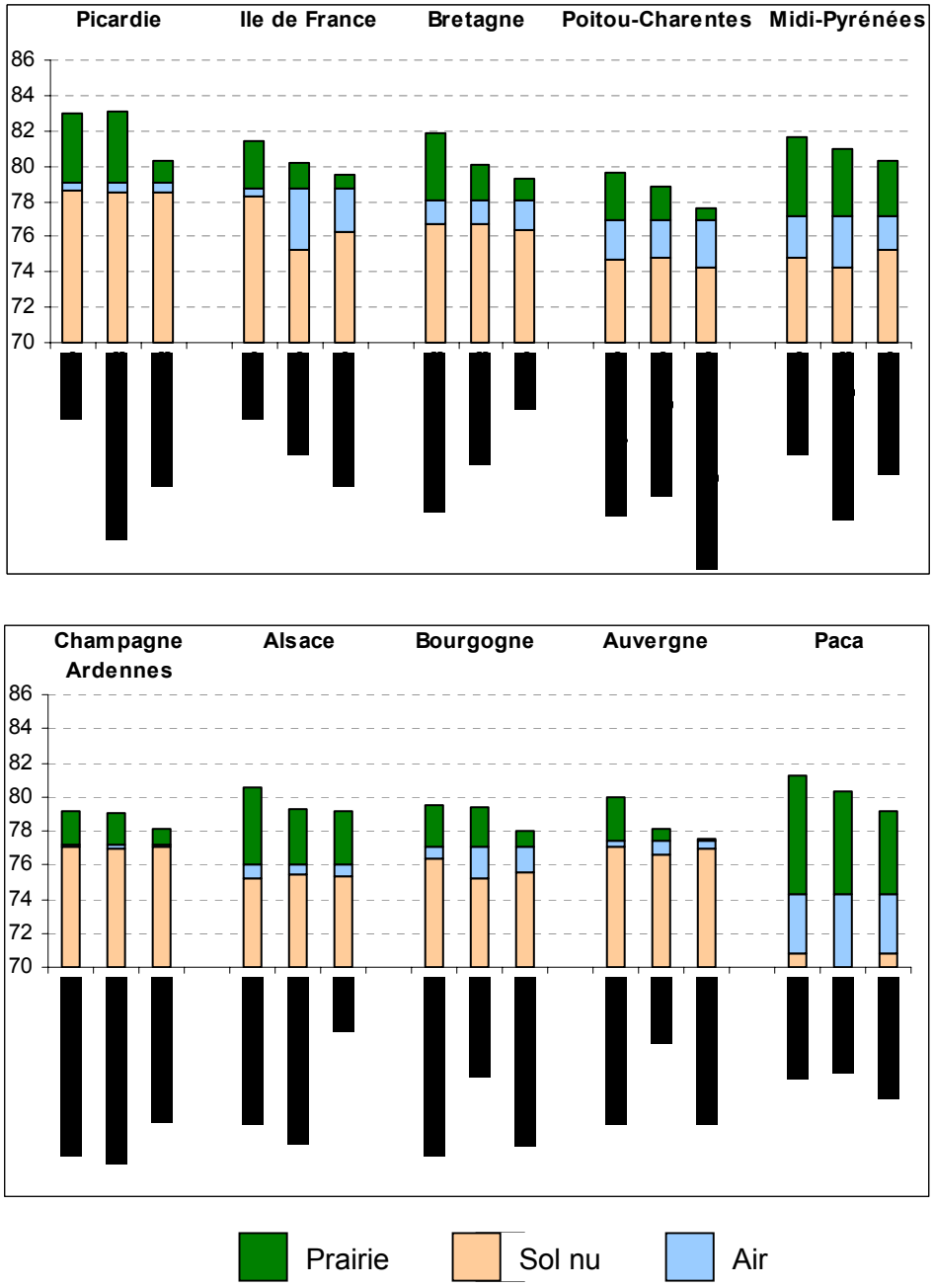

Figure A.1. Humidités moyennes annuelles (%) au dessus du sol nu (1cm) et de la prairie (30cm) comparées à celles de l'air à 2m par type de sol (en abscisse), les sols étant regroupés par région.

Les valeurs sont présentées de façon emboîtée mettant en évidence le classement respectif des trois valeurs.

Région	période	ΔT prairie (°C)	ΔT sol nu (°C)	Drainage prairie (%)	Drainage sol nu (%)	Irrigation prairie (%)
Ile de France	août	0.1	1.8	0	3	25
	sep-oct	0.0	0.0	9	17	12
	nov-jan	0.0	0.0	49	42	0.0
	fev-avr	0.1	0.5	39	25	14
	mai-juin	0.0	2.4	1	7	38
	juillet	1.0	2.4	2	6	11
Poitou-Charentes	août	0.2	2.2	0	2	29
	sep-oct	0.0	0.0	8	15	12
	nov-jan	0.0	0.0	54	49	0.0
	fev-avr	0.1	0.5	34	25	13
	mai-juin	0.0	2.3	4	8	30
	juillet	1.2	3.0	0	1	16
Midi-Pyrénées	août	0.1	2.5	1	4	28
	sep-oct	0.0	0.1	7	12	13
	nov-jan	0.0	0.0	45	42	0
	fev-avr	0.1	0.6	36	25	8
	mai-juin	0.0	2.2	10	15	33
	juillet	1.1	3.3	1	2	18

Tableau A.2. Valeurs saisonnières moyennes des variables d'intérêt suivantes : ΔT (élévation de la température de la surface par rapport à celle de l'air), drainage et irrigation pour les deux surfaces, sol nu et prairie.

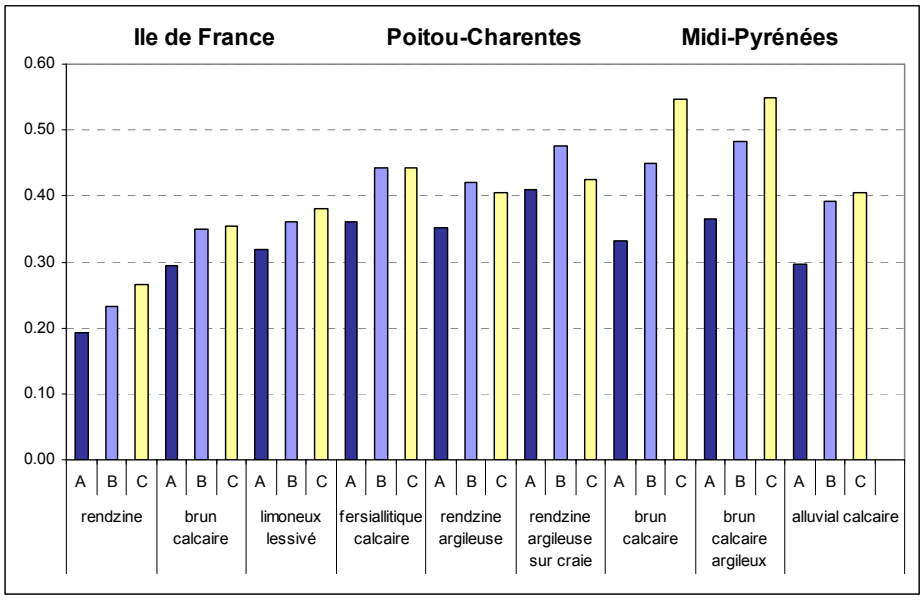

Figure A.2. Moyennes interannuelles de l'élévation de température de la surface agricole par rapport à l'air (ΔT en °C) par région, système de culture et sol

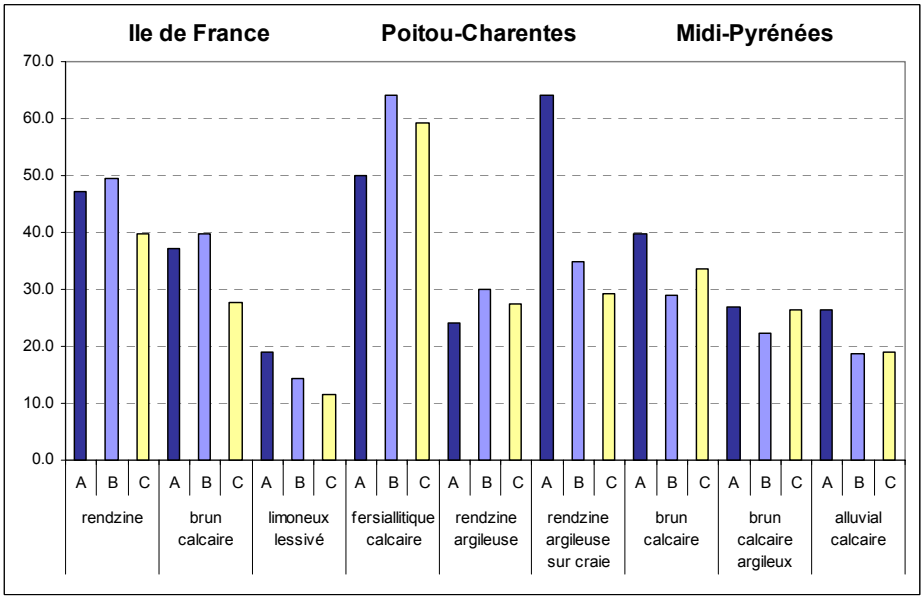

Figure A.3. Moyennes interannuelles des quantités d'azote lixivié (kgN/ha) par région, système de culture et sol