

Salinité et irrigation: quelques questions posées à la recherche par le couple infernal

Pascal Boivin, IRD, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1

1. Introduction

L'irrigation a été l'enfant chéri des projets de développement à grande échelle depuis plusieurs décennies. Objet de tous les soins, elle s'est étendue dans toutes les zones arides (ou à déficit hydrique temporaire) d'une façon spectaculaire. Ce n'est évidemment pas sans raison. A l'échelle planétaire, à celle des nations à faible niveau de développement, mais aussi dès que les précipitations naturelles sont insuffisantes et/ou aléatoires, l'irrigation paraît être le seul moyen de sécuriser et intensifier les productions agricoles.

Les prospectives des grandes instances internationales vont plus loin. Dans nombre de pays, l'autosuffisance alimentaire repose déjà sur les productions irriguées. Les ressources agricoles dégagées en zones pluviales, soumises aux aléas climatiques, ne sont pas intensifiables et sont incertaines. Les besoins alimentaires augmentent et leur satisfaction passe obligatoirement par une augmentation drastique des surfaces irriguées dans le futur : 80% des besoins à venir en dépendent (source FAO, voir aussi les sites de l'IRRI, du PNUE, ou de l'IWMI).

Mais les résultats de l'irrigation frustrant les ingénieurs, angoissent les économistes et irritent les écologistes... C'est de l'aspect environnemental que nous parlerons essentiellement ici, c'est-à-dire de la dégradation des ressources en sols et eaux causée par l'irrigation, tout en essayant de montrer que les liens entre les différentes composantes existent et ne sont pas toujours ceux que l'on croit.

2. L'irrigation et ses enjeux

L'irrigation est au confluent de trois débats essentiels de cette fin de millénaire : le partage de la ressource en eau, la sécurité alimentaire et la conservation de l'environnement. On rappelle ici quelques données générales à ces problèmes, à l'aide de chiffres diffusés notamment sur les serveurs cités plus haut. Ils ne sont pas obligatoirement à jour ou incontestables, mais reflètent néanmoins la situation.

Le partage de la ressource en eau

On considère ainsi que l'agriculture consomme 6 fois plus d'eau que les autres activités humaines. Or, parmi les activités agricoles, l'irrigation est le 'mauvais élève' pointé du doigt : moins de 1m³ sur 2 serait 'utile', c'est-à-dire évapotranspiré pour permettre la croissance de la culture. Nous confirmons pour notre part ces chiffres pour la riziculture sahélienne (Raes et al, 1992; Salvignol, 1993). Naturellement, irriguer est surtout nécessaire dans les pays pour lesquels l'eau est une ressource rare, et beaucoup de ces pays consomment plus de 100% de leurs ressources renouvelables, des conflits pour le partage de la ressource en eau se profilent entre pays voisins (Israël et ses voisins; Syrie/Turquie /Irak; USA/Mexique; Inde/Pakistan...).

Importance de l'agriculture irriguée pour la sécurité alimentaire

L'agriculture irriguée représente 237 millions d'hectares dans le monde (8 millions en 1800, 48 millions à la fin du 19^{ème} siècle), soit environ 15% des terres cultivées et elle augmente d'environ 2 millions d'hectares par an. Elle fournit un tiers de la production alimentaire mondiale (dont 55% de la production totale de blé et de riz) et assure des emplois, des vivres et des revenus pour 2,4 milliards de personnes. L'irrigation joue un rôle déterminant dans l'augmentation de la production agricole mondiale: on estime que la moitié de cette augmentation dans les 25 dernières années est due à l'expansion des surfaces irriguées. Dans les 30 prochaines années, 80% des disponibilités vivrières supplémentaires nécessaires pour nourrir le monde résulteront de l'irrigation.

L'échec de l'agriculture irriguée

Partout dans le monde, des grands barrages ont été édifiés, la maîtrise de l'eau a été assurée, avec, entre autres, l'objectif d'irriguer. Partout, les pouvoirs publics et les économistes dressent le même constat : rendements très éloignés des espérances, non rentabilité des investissements, désintérêt des paysans, non compétitivité des productions, abandon des aménagements et désastres écologiques... Depuis les années 90, les décideurs sont suspendus à un paradoxe angoissant : il serait impossible de développer l'irrigation, cela « ne marche pas », et pourtant, c'est le seul moyen de nourrir la planète.

Si l'échec technique et économique est une généralité peu contestable, certaines des causes généralement admises (désintérêt des paysans, problèmes environnementaux) relèvent de raisonnements parfois simplistes que nous ne partageons pas. En particulier, les conditions d'émergence de systèmes irrigués durables correspondent à des critères économiques, sociaux et institutionnels stricts, comme le rappelle très clairement A. Ostrom (1993), ce que les 'décideurs' ignorent ou feignent d'ignorer.

Irrigation et salinisation

Le phénomène de base est simple : on apporte de l'eau, parfois énormément (jusqu'à 70 000 m³/ha pour une culture de riz !). Si la totalité de l'eau s'évapore (parfois plus de 2500 mm d'évaporation annuelle au Sahel), les sels dissous dans cette eau s'accumulent dans le sol. Si le sol est filtrant, on risque secondairement de remonter les nappes (parfois de plus de 40m !), qui une fois affleurantes alimentent en sels la surface du sol sous l'effet de l'évaporation. Les pratiques d'irrigation mal comprises sont effectivement facteurs de remontées des nappes, de salinisation, d'érosion et de pollution de l'eau. Les remontées salines et la salinisation des sols sont citées parmi les principales causes de la perte de productivité de nombre de périmètres irrigués dans le monde. 20% des surfaces irriguées seraient déjà affectées de façon sensible. Le PNUE estime que le taux de perte de terres irriguées en raison de l'engorgement et de la salinité des sols est de 1,5 million d'hectares par an, soit pratiquement autant que l'accroissement annuel des superficies irriguées estimé à 2 millions d'hectares. Les superficies touchées par la salinisation sont évaluées, en % de la surface irriguée totale, à 10% au Mexique, 11% en Inde, 21% au Pakistan (16% selon la FAO), 23% en Chine et 28% aux Etats-Unis.

Face aux efforts de développement de la riziculture en Afrique Sahélienne, l'extension de la salinité fait craindre un échec total et une dégradation irréversible des terres (Madeley J, 1993). De telles prédictions alarment les décideurs et mobilisent les écologistes. Fort de son ingénierie, l'Occident a conçu et réalisé des projets qui se révèlent inappropriés. La recherche est bien sûr interpellée.

Nous introduirons d'entrée de jeu un point de vue personnel : la dégradation des sols endosse beaucoup. Son diagnostic est souvent sommaire, et surtout la relation de causalité entre dégradation des sols et chute des rendements n'est pas correctement établie (cf. exposé de J.C. Poussin). Bien souvent, la dégradation (saline ou non) de la qualité du sol n'est que l'un des multiples signes du désintérêt des exploitants, désintérêt qui résulte de situations « indépendantes » des contraintes édaphiques.

3. Les processus de salinisation

Rappelons simplement que :

- différentes voies salines peuvent être distinguées, selon que les sels qui s'accumulent sont neutres, alcalins ou même acides ;
- la présence de sodium en excédent (par rapport surtout au calcium) entraîne une destruction de la structure du sol par dispersion des argiles et une destruction du complexe organo-minéral, ceci conduisant à des sols sodiques et alcalins qui représentent sans doute les pires formes de dégradation ;
- une eau de faciès neutre peut fort bien devenir alcaline en se concentrant, ceci étant en réalité déterminé par le signe de son alcalinité résiduelle (Ribolzi et al, 1993 ; Al Droubi, 1976).

4. La compréhension et la modélisation des processus

La recherche sur les sols salés fait appel à des domaines scientifiques relativement distincts et fort complexes, dont elle doit assurer la synthèse. On citera notamment la modélisation des transferts hydriques et de solutés, la chimie des interfaces, les réactions d'oxydo-réduction, la minéralogie, la chimie des solutions salines (concentrées), l'agronomie, la physiologie végétale. Chacun de ces domaines véhicule son lot d'hypothèses et d'incertitudes, ce qui émerge clairement lorsque l'on tente d'intégrer les connaissances dans un modèle de simulation.

La recherche sur les sols salés s'est largement focalisée sur les solutions salines et leurs équilibres avec les sels solubles. Une vision sommaire du complexe d'échange et du rôle des minéraux primaires y a parfois été jointe, pour permettre de saisir les éléments de dynamique temporelle ou améliorer la prise en compte des contrôles géochimiques. Si des connaissances précises sur les processus et les principales pédogenèses permettent des diagnostic a posteriori, la prévision des phénomènes (nature et chronologie) reste largement inaccessible.

- C'est dans le secteur des minéraux primaires et de leur interaction avec la solution du sol que la connaissance fondamentale semble la plus insuffisante. A ce niveau, on assiste à la remise en cause de nombreux concepts qui semblaient bien établis. Notamment :
- La CEC d'un sol n'est pas constante, loin s'en faut. Les charges variables, pour n'importe quelle argile pour peu qu'elle soit finement divisée, peuvent, pour de grandes variations de pH, faire varier la CEC du simple au double (Tessier et al, 1999). Mais l'engorgement temporaire peut avoir le même effet lorsque du fer structural est réduit (cf. exposé de F. Favre). Les sélectivités d'échange s'en trouvent modifiées...
- La CEC n'est pas un compartiment homogène. Les sites d'échange, selon leur situation dans les domaines argileux (Mc Bride, 1989; Halilat, 1998) ou selon leur nature (Charlet, 1999) réagissent différemment avec les cations.
- Les équilibres entre CEC et solution du sol ne sont pas aussi rapides in situ que dans des suspensions fortement diluées au laboratoire.
- Les échanges anioniques sont moins bien connus, et jamais pris en compte. Pour autant la CEA se manifeste, et parfois dans des quantités considérables. Ceci peut par exemple réduire une teneur en chlorure, en milieu confiné, d'un facteur 10...

Les dynamiques intrasaisonnières sont mal connues. En particulier, le rôle physico-chimique des oxydes de fer et de l'oxydo-réduction (fer et soufre) apparaît dans de nombreux travaux récents. Dans le cas de la dynamique alcaline, il nous semble tout à fait essentiel de comprendre comment les cycles d'oxydo-réduction interviennent sur le bilan de protons. Plus largement, on constate au cours des cycles culturels des évolutions chimiques de grande ampleur comparativement aux évolutions interannuelles. L'interaction entre cycles saisonniers et évolution à long terme des sols salés est un domaine d'étude à peine ébauché.

La modélisation des transferts se trouve devant une multitude de voies nouvelles à explorer. A mesure que les connaissances sur les processus évoluent, leur prise en compte dans les programmes de calcul de transfert est envisagée. On se heurte ici à un ensemble de difficultés et de choix dont nous relèverons certains points:

- Plus les modèles sont complexes, plus les phénomènes décrits sont subtils, plus les paramètres de calage sont nombreux. Ils sont parfois impossibles ou difficiles à déterminer. Leur calage offre en revanche une grande souplesse pour permettre au modèle de 'coller' aux données de validation. Pour autant, on a de moins en moins la possibilité de s'assurer que la bonne correspondance avec des observations démontre que la simulation aura des qualités prévisionnelles, et cette confusion est fréquente. Ajoutons que fassent aux développements de modèles impressionnants de savoir, on dispose de fort peu de données de validation, c'est-à-dire d'une observation *in situ* de qualité des transferts d'eau et solutés, pour des sols argileux et sur des pas de temps courts.
- La simulation des transferts hydriques repose sur des hypothèses de travail et de calcul peu compatibles avec la nature et le fonctionnement des sols argileux (sol non déformable, uniforme, chimiquement inerte, air à la pression atmosphérique..). Les observations mettent en évidence des cinétiques de gonflement / retrait extrêmement rapides, notamment au niveau des fissures (Favre et al, 1997), des piégeages d'air (Linden et Dixon, 1972, voir également l'exposé de C. Hammecker)... soit des phénomènes à dynamique rapide, pour lesquels on ne dispose d'aucune piste théorique vers une modélisation. Dans cette attente, la prise en compte des écoulements préférentiels doit se cantonner à des démarches empiriques relativement arbitraires. Les modèles

se heurtent également aux problèmes de spatialisation. Ceci oriente nettement en faveur de paramètres de calage ayant une relation avec les constituants du sol. On notera ainsi la percée des fonctions de pédotransfert.

- L'interaction entre le sol et les solutions salines est relativement bien définie dans ses composantes théoriques. En revanche les conséquences pratiques d'une sodisation sont à la fois mal abordées expérimentalement (on travaille sur sol remanié ou sur suspension d'argile), mal diagnostiquées (on distingue difficilement les effets de l'augmentation du potentiel de gonflement, de la dispersion des argiles, et de l'explosion des agrégats) (Abu-Sharar et al, 1995; Curtin et al, 1994; Crescimano et al, 1995), et inutilisables en modélisation (ce ne sont que des abaques de chute de perméabilité, non valables in situ. Seul le logiciel UNSATCHEM en propose une prise en compte arbitraire) (Mc Neal, 1969; Simunek et al, 1996).

Face à toutes ces difficultés, il semble que l'on manque fondamentalement de données expérimentales, c'est-à-dire d'observation des processus in situ. Cette recherche doit se développer, afin de disposer d'une capacité de diagnostic sur les processus qui contrôlent le fonctionnement et l'évolution d'un sol. Ceci devrait notamment orienter vers des choix de modèles spécialisés, et non vers des modèles universels.

Le rôle de la modélisation apparaît davantage comme celui d'un outil de réflexion et de discussion de scénarios, à confronter aux observations pour développer un diagnostic, que comme un outil de prédiction sensu stricto. De plus, alors que les modèles sont de mieux en mieux diffusés et interfacés, il apparaît très clairement que leur mise en œuvre non accompagnée de solides compétences conduit à des explorations douteuses.

5. Irrigation, dégradation du sol et potentialité du sol

In fine, ces recherches sont destinées à comprendre et prévoir l'évolution du sol irrigué en fonction des conditions de gestion imposées, particulièrement pour pouvoir préserver sa capacité à produire. On s'intéresse couramment à des formes de 'dégradation', supposées pénalisantes pour les cultures.

Le diagnostic de la pression exercée par le sol sur l'élaboration des rendements est souvent conduit de façon trop sommaire. On verra à travers l'exposé de J.C. Poussin que ceci s'exprime en fonction des pratiques culturales. Ne pas prendre en compte leur diversité aux divers stades d'évolution de la culture conduit à des erreurs d'interprétation. En travaillant en conditions contrôlées, on risque de se focaliser sur des 'facteurs limitants' qui en réalité ne s'expriment pas (ou peu) avec les pratiques paysannes. En analysant mal les pratiques, on ne se donnera pas la possibilité d'interpréter correctement la cause de rendements différents (ou identiques).

Ceci n'est pas anodin. Par exemple, tandis qu'on diagnostique une dégradation sévère des sols de l'Office du Niger, les plans de réhabilitation permettent de doubler les rendements. Il en résulte une incompréhension profonde des risques environnementaux par les décideurs. De fait, les conséquences réelles pour différents systèmes de culture d'une alcalinisation du sol sont méconnues. Inversement, les pédologues ont tendance à se focaliser sur certains processus, qu'ils appellent 'dégradation' au sens pédologique et pensent l'être au sens large, ce qui les conduit à proposer des solutions pour des problèmes dont les producteurs n'ont que faire.

Il y a ici, à notre sens, une rationalisation et un approfondissement des méthodes de travail et des connaissances à conduire.

6. Proposition de méthodes de gestion de l'eau alternatives ?

De ce qui précède, nous retirons la conviction que les recherches fondamentales ne peuvent pas travailler sur de bons questionnements si elles ne se confrontent pas aux problématiques de terrain. La solution universelle à la salinisation est le drainage. Mais le drainage peut être irréalisable dans certains sols argileux (les vertisols rizicultivés par exemple), hors de portée des moyens financiers des exploitants, et encore plus simplement non pratiqué parce que non compatible avec les pratiques et les objectifs des producteurs.

Ce contexte de recherche est indispensable pour nous ouvrir les yeux sur de nouvelles problématiques et de nouveaux processus. L'évacuation des excédents de sels de la parcelle, du périmètre, puis du paysage, sans introduire de charges excessives au niveau de l'aménagement, et tout en garantissant une qualité du sol telle qu'il ne soit pas un facteur d'échec économique de l'entreprise, est la question essentielle. En apportant des solutions acceptables, même temporairement, on offre aux

cultivateurs la possibilité d'évoluer vers une meilleure maîtrise technique, et à terme vers des systèmes irrigués durables (Ostrom, 1993). Cela suppose d'inscrire les recherches dans le cadre d'une approche du système irrigué dans son ensemble.

7. Conclusion

Il nous semble vain de viser à réaliser des modèles universels permettant de décrire toutes les composantes d'évolution d'un sol irrigué. Les recherches doivent se développer vers une meilleure prise en compte de l'expression des processus élémentaires in situ, vers notamment une meilleure prise en compte du rôle des constituants finement divisés (minéraux primaires) et des dynamiques rapides (oxydo-réduction). La modélisation doit se développer comme un outil complémentaire au diagnostic de terrain.

Il faut analyser l'évolution de la ressource en sol dans le cadre des systèmes de culture, et décrire son expression sur les résultats agronomiques relativement aux pratiques culturales. Ceci conduira à proposer des solutions de gestion 'durable' intégrant différentes disciplines dans leur conception.

8. Références

- Abu-Sharar TM et Salameh AS 1995 Reductions in hydraulic conductivity and infiltration rate in relation to aggregate stability and irrigation water turbidity. *Agricultural Water Management* 29, 53-62.
- Charlet M 1999 The exchange capacity of soils. Structure and Charges at the Particle/water Interface. *Comptes Rendus de l'Académie de l'Agriculture, Paris*, in press.
- Curtin D, Steppuhn H et Selles F 1994 Clay dispersion in relation to sodicity, electrolyte concentration and mechanical effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 955-962.
- Crescimanno G, Iovino M et Provenzano G 1995 Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1701-1708.
- Dixon RM et Linden DR 1972 Soil air pressure and water infiltration under border irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36, 943-953.
- Droubi (Al-) A 1976 Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg, mémoire n°46, Sciences Géologiques, 177 p.
- Favre F, Boivin P et Wopereis M 1997 Water Movement and soil swelling in a dry, cracked vertisol. *Geoderma* 78, 113-123.
- Halilat T 1998 Etude expérimentale de sable additionné d'argile. Comportement physique et organisation en conditions salines et sodiques. Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris Grignon, Paris, 279 p.
- Madeley J 1993 Will rice turn the Sahel to salt ? *New Scientist*, 9 October 1993, 35-37
- McBride MB 1989 Surface chemistry of clay minerals, in *Minerals in soil Environments*. Chap. 2, SSSA Book series n°1, Soil Sc. Soc. Am., USA
- McNeal BL 1969 Prediction of the effect of mixed-salt solution on soil hydraulic conductivity, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32, 190-193.
- Ostrom E 1996 Pour des systèmes irrigués et durables : façonner les institutions. *Multigr. Inter-Réseaux, Groupe Irrigation Observatoire des périmètres Irrigués Sahéliens, GRET Paris*, 35 p.
- Raes D, Sy B et van Passel L 1992 The water balance of rice irrigation schemes in the Senegal river Delta. pp. 835-844 in: J. Feyen, E. Mwendera and M. Badji (Eds) *Advances in planning, design and management of irrigation systems as related to sustainable land use*. Center for Irrigation Engineering, K.U. Leuven, Leuven, Belgium.
- Ribolzi O, Valles V et Barbiero L 1993 Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et argument de bilan. *Science du Sol* 31, 1/2, 77-95
- Salvignol C 1993 Gestion de l'eau en riziculture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal. Essai de bilan hydrique et salin. Mémoire de fin d'études ESITPA, 34 p.
- Simunek J, Suarez DL et Sejna M 1996 The UNSATCHEM software Package for simulating the one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry. Research report 141, USSL, Riverside.

ONZIÈME RÉUNION DU GROUPE DE RÉFLEXION
SUR L'ÉTUDE DE LA SOLUTION DU SOL
EN RELATION AVEC L'ALIMENTATION DES PLANTES
(GRESSAP)

IRD Montpellier - 14 septembre 1999