Notes techniques du MAB 8

L'irrigation des terres arides dans les pays en développement et ses conséquences sur l'environnement

Préparé en coopération avec le PNUE et le SCOPE

unesco

Dans cette collection:

1. *Le Sahel: bases écologiques de l'aménagement*

2. *Forêts et maquis méditerranéens: écologie, conservation et aménagement*

3. *Les populations humaines dans la biosphère: problèmes et propositions de plans de recherche*

4. *Les changements dynamiques dans les écosystèmes terrestres: modalités, techniques d'étude et applications à l'aménagement*

5. *Orientations pour les études de terrain sur la perception de l'environnement*

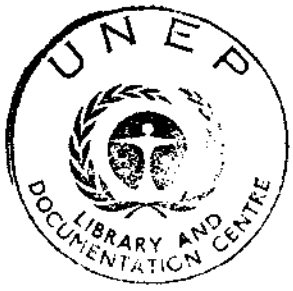
6. *Développement des régions arides et semi-arides: obstacles et perspectives*

7. *Carte de la répartition mondiale des régions arides*

8. *L'irrigation des terres arides dans les pays en développement et ses conséquences sur l'environnement*

L'irrigation des terres arides dans les pays en développement et ses conséquences sur l'environnement

Directeur de publication :
Gilbert White



unesco

Le Programme intergouvernemental sur l'homme et la biosphère (MAB), lancé par l'Unesco en 1970, a pour objectif de développer, avec l'apport des sciences naturelles et sociales, une base rationnelle pour l'utilisation et la conservation des ressources de la biosphère et pour l'amélioration des relations entre l'homme et l'environnement. Pour atteindre ce but, le MAB a adopté une approche écologique intégrée pour ses activités de recherche et de formation, qui sont axées autour de quatorze thèmes internationaux et orientées vers la solution de problèmes concrets de gestion dans les différents types d'écosystème.

Publié en 1978 par
l'Organisation des Nations Unies
pour l'éducation, la science
et la culture,
7, place de Fontenoy, 75700 Paris
Imprimerie Ader, Paris
ISBN 92-3-201586-2
Environmental effects of arid land irrigation in developing countries
ISBN 92-3-101586-9
© Unesco 1978

Préface

Dans les pays arides, l'irrigation est utilisée depuis longtemps pour accroître la superficie totale des terres arables et procurer ainsi un supplément de denrées alimentaires à une population en voie d'expansion. Le développement rapide des surfaces irriguées et la vitesse dramatique de l'accroissement de la population dans les pays en voie de développement ont donné une importance de plus en plus grande à l'utilisation rationnelle de l'irrigation. Les projets d'irrigation correctement conçus et bien administrés peuvent être à l'origine d'un profit extraordinaire pour les pays en voie de développement, non seulement du fait de l'accroissement des ressources alimentaires, mais aussi par leur contribution au développement économique global. En outre, un projet d'irrigation couronné de succès peut améliorer le bien-être des populations locales en leur procurant des ressources en eau abondantes et bien réparties, en améliorant leur alimentation, en permettant une meilleure planification des possibilités offertes en matière de logement et d'hygiène, et en accroissant de façon générale leur niveau de vie. Toutefois, en dépit de ses aspects positifs, l'irrigation est souvent associée à certains impacts négatifs. Parmi les problèmes soulevés, on peut citer: une dégradation éventuelle très sévère consécutive à la salinisation et à l'engorgement, le dépôt de sédiments, et un coût économique excessif eu égard aux profits obtenus. La dimension socio-économique de l'irrigation joue également un rôle important, en particulier pour ce qui concerne l'adaptation des populations locales aux innovations de la technologie, les transformations des caractéristiques des peuplements et des modes de vie, et l'introduction ou l'aggravation de certaines maladies.

Il existe déjà un vaste ensemble de connaissances sientifiques concernant l'irrigation. L'essentiel de ces connaissances est associé à des disciplines définies, et il est rarement tenu compte des interactions complexes entre les diverses composantes écologiques du système, et de l'impact des transformations de l'environnement et des conditions socio-économiques sur les populations locales. Il faut entreprendre une recherche de caractère interdisciplinaire lorsque nos connaissances présentent des lacunes. Lorsque ces connaissances existent, il convient de les mettre effectivement en pratique non seulement dans la gestion, l'amélioration et l'extension des projets existants, mais aussi dans la planification de projets nouveaux lorsque cela s'avère possible.

L'un des quatorze thèmes des projets internationaux du Programme intergouvernemental de l'Unesco sur l'Homme et la Biosphère (MAB), le Projet 4, a pour objet l'étude de l'impact écologique de l'irrigation. Le Projet 4 comporte trois axes de recherche principaux. En premier lieu figure l'analyse des conséquences néfastes des grands projets d'irrigation, en particulier dans les zones soumises depuis longtemps déjà à l'irrigation, où il est possible de définir les changements intervenus jusqu'à présent par rapport à la situation initiale de l'environnement. En second lieu figure la surveillance continue systématique des modifications des diverses composantes de l'environnement sur les emplacements des projets d'irrigation nouveaux, en vue de faciliter l'identification et la prévision des changements, et d'apporter ainsi une aide aux décideurs dans les actions de prévention et de correction. En troisième lieu, la recherche fait porter ses efforts sur les problèmes propres aux surfaces irriguées isolées et de faible étendue.

Les caractéristiques principales du Projet 4 du MAB ont été esquissées par un groupe international d'experts réuni en mars 1975 (Unesco 1975). Par la suite, en coopération avec le PNUE, le MAB-Unesco a organisé à Alexandrie (février 1976) une réunion régionale sur les

activités de recherche écologique intégrée et de formation dans le nord-est de l'Afrique, au Proche et au Moyen-Orient, traitant des effets écologiques de l'irrigation réalisée à partir des grands bassins fluviaux (Unesco 1979). Cette réunion a émis des recommandations concernant les actions intégrées et axées sur des problèmes concrets dans le domaine de la recherche, de la formation et de la vulgarisation sur les périmètres d'irrigation nouveaux, et concernant aussi les programmes de restauration des projets existants. La réunion du MAB avait été précédée d'un symposium international sur "L'irrigation des terres arides dans les pays en développement: problèmes posés et incidences sur l'environnement", symposium organisé par le Comité de recherches sur l'eau (COWAR) du CIVS. Ce symposium a été suivi d'un atelier organisé par le Comité scientifique sur les problèmes de l'environnement (SCOPE), en coopération avec le COWAR et le MAB. La présente Note technique résulte de cet atelier auquel ont participé les personnes suivantes: Alexis Coumbaras (Université de Paris), Jean de Forges (Consultant, Unesco), Jacques Deom (Organisation mondiale de la santé), Malin Falkenmark (Comité national suédois pour le SCOPE), Frédéric Fournier (Consultant, Unesco), Milos Holy (Commission internationale pour l'irrigation et le drainage, Université technique de Prague), Clyde E. Houston (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture), Mohamed Kassas (Université du Caire et Vice-président du SCOPE), Gyorgy Kovacs (Autorité nationale pour l'eau de Hongrie), Letitia Eva Obeng (Programme des Nations Unies pour l'environnement), G. Boris Rozanov (Université d'état de Moscou), Nathaneil Wollman (Université du Nouveau Mexique), E.B. Worthington (Président du Comité de recherche sur l'eau) et Gilbert F. White (Union géographique internationale, Université du Colorado). Le Dr Gilbert White, président de la réunion, a coordonné les contributions des membres du groupe. Une première version de ce texte a été publiée avec l'autorisation de l'Unesco par Pergamon Press (Worthington 1977), en même temps que des communications présentées au symposium du COWAR.

Cette Note technique passe en revue les effets bénéfiques et néfastes de l'irrigation dans les pays en voie de développement, dans le contexte des problèmes pratiques auxquels ces pays sont confrontés compte tenu des impératifs d'une population en expansion, de l'exiguité des ressources naturelles et financières, des conditions climatiques, etc. L'accent est mis sur la nécessité de recherches intégrées pour ce qui concerne les aspects techniques et humains de ces problèmes. On passe en revue les moyens permettant d'améliorer l'efficacité des projets existants, et il est suggéré de faire appel à certains critères pour évaluer le caractère souhaitable de la mise en route de projets nouveaux. Il est également discuté de la réaction sociale, et de la communication entre les divers groupes de personnes concernées - du planificateur au cultivateur.

Le MAB-Unesco et le CIUS-SCOPE tiennent à exprimer leurs remerciements à tous ceux qui ont apporté leur contribution à cette Note technique et en particulier au directeur de publication, le Dr Gilbert White. Les points de vue exposés dans cette publication ne sont pas nécessairement ceux de l'Unesco ou du SCOPE.

Table des matières

I. Les bienfaits de l'irrigation des terres arides 9

II. L'utilisation rationnelle de l'eau en agriculture irriguée. 14

III. La modification des régimes de l'eau et du sol. 21

IV. La modification des écosystèmes aquatiques..... 34

V. L'intégration de l'irrigation au développement des autres ressources. 41

VI. Les effets sur la santé de la population. 45

VII. Les effets socio-économiques. 51

VIII. Communication et réactions sociales 55

IX. L'urgence de la recherche 59

X. La planification des projets d'irrigation nouveaux ou rénovés 61

XI. La gestion des systèmes d'irrigation et de drainage 63

Bibliographie 65

I. LES BIENFAITS DE L'IRRIGATION DES TERRES ARIDES

Il est généralement admis que pour pouvoir alimenter la population du globe telle qu'elle est prévue pour 1985, il faudra que la production de céréales connaisse, par rapport à celle de 1970, un accroissement considérable: par conséquent, il est nécessaire de procéder à d'importantes révisions des systèmes de production, de stockage, de transport, de distribution et de consommation des denrées alimentaires. L'amélioration de la production peut être obtenue grâce à un accroissement de la productivité de la terre et de l'eau sur les terres cultivées actuelles, ou par une augmentation de la superficie totale des terres cultivées. Il est probable qu'il faudra avoir recours simultanément à ces deux orientations.

L'irrigation est un des moyens d'améliorer le volume total ou le degré de validité de la production agricole grâce à l'aménagement des eaux au profit de la plante cultivée. Le contrôle de l'eau est efficace en ce sens qu'il exerce une influence sur le rendement des investissements réalisés sous forme d'engrais, de semences, de diversification des cultures, de mécanisation et d'autres efforts d'aménagement. Cette efficacité s'est potentiellement accrue du fait des progrès récents en matière de technologie agricole.

On estime que la superficie des terres irriguées représente environ 13 pour cent de la surface des terres cultivées du globe, et que l'eau d'irrigation utilisée correspond à un volume approximatif de $1,4 \times 10^{21}$ m^3 par an. On estime que la superficie nette irriguée et récoltée dans les pays en développement s'accroît de 2,9 pour cent par an, alors que la superficie des terres arables non irriguées n'augmente que de 0,7 pour cent par an (Holy 1971). Dans la mesure où il est nécessaire de résoudre les problèmes d'alimentation au moins par un accroissement de la production, il est important de développer l'irrigation et il est essentiel de préserver la productivité actuelle des terres irriguées.

Quant aux investissements futurs, si on veut qu'ils soient effectués de manière stable et fructueuse, il faudra qu'ils soient étudiés en tenant compte de l'ensemble de leurs incidences possibles sur l'environnement. Dans les terres arides des pays en voie de développement, il est indispensable d'adopter une telle démarche car les ressources dont on y dispose sont très limitées et il est urgent d'utiliser rationnellement les disponibilités de capital.

APERCU SUR L'IRRIGATION

Lorsque pour la première fois l'homme a quitté les cavernes pour s'établir sur les terres des vallées, il a appris que des modifications minimes de l'environnement naturel conduiraient à un accroissement de la production de denrées alimentaires. En grattant la surface du sol avant de semer, il a pu obtenir une répartition de la production bien meilleure qu'en jetant les graines sur un terrain durci et nu. Lorsque les pluies arrivaient, elles entraînaient beaucoup plus qu'auparavant les particules de terre arrachées à un sol travaillé pour les déposer à l'aval sur les fonds plats des vallées. L'homme s'est aperçu que ces dépôts étaient fertiles, et que certains des sols ainsi formés pouvaient être travaillés facilement pour préparer la plantation. Lorsque les pluies ne se produisaient pas, les cultures se flétrissaient et pouvaient même disparaître, sauf a proximité du lit des cours d'eau, où l'eau détournée pour arroser les champs pouvait avoir le même effet que si les pluies s'étaient poursuivies.

Dès ses origines l'homme a manipulé son environnement. Cette intervention contribuait dans une large mesure à couvrir les besoins d'une population en expansion. Plus tard, toutefois, certaines manipulations de l'environnement eurent un effet négatif. La principale cause de cette situation peut être attribuée à l'accroissement brutal de la population, qui a entraîné une pression accrue des besoins en espace vital et en produits alimentaires. Cette évolution s'est produite au cours du siècle dernier, et elle a atteint un point culminant avec les crises alimentaires actuelles.

Aujourd'hui, la bataille pour fournir à la population du globe une alimentation suffisante en est arrivée à un stade décisif. Dans certaines régions, l'espèce humaine se multiplie plus rapidement qu'elle ne produit de nourriture. Cette situation est préoccupante. La production actuelle de denrées alimentaires revêt une importance telle qu'il faudra que l'humanité fasse appel simultanément à des mesures techniques, biologiques, socio-économiques et politiques pour maîtriser cette réalité brutale que constituent les insuffisances nutritionnelles. En outre, étant donné que c'est le paysan qui est à la source de la production alimentaire, c'est lui qui devra être l'objet de cette aide multiple indispensable.

LES SOURCES DE DENREES ALIMENTAIRES

Les réunions régionales et internationales qui traitent de l'alimentation sont d'accord pour estimer que les approvisionnements en céréales nécessaires pour répondre aux besoins de l'alimentation de l'homme et des animaux en 1985 seront supérieurs d'au moins 30 pour cent à ceux de 1970. Certains pays ne disposent que de très faibles superficies de terres vierges disponibles pour l'agriculture, et ils seront donc fortement, sinon totalement, asservis à une amélioration des rendements. Certains autres pays disposent de terres non utilisées, et ils pourront par conséquent adopter une politique plus souple, bien que l'obtention de rendements plus élevés demeure un objectif majeur. L'expérience récente de la "révolution verte" a donné un exemple étonnant de la nécessité d'une approche intégrée pour parvenir à des accroissements satisfaisants des rendements. L'emploi de semences nouvelles associé à des techniques culturales anciennes se traduit généralement par un échec. Les semences de variétés nouvelles à haut rendement exigent des techniques nouvelles de semis, une fertilisation convenable, une irrigation améliorée, des techniques nouvelles de lutte contre les nuisances, des modifications dans les méthodes de récolte et de stockage, et des disponibilités financières. Une carence sur l'un ou l'autre de ces points peut entraîner un échec total. Les fluctuations climatiques sont une source perpétuelle de variation des rendements des plantes cultivées, et c'est le climat qui trace les limites de ce que l'on est en droit d'attendre, en particulier dans les régions arides.

VARIATIONS CLIMATIQUES ET PRODUCTION DES DENREES ALIMENTAIRES

Les deux formes extrêmes de l'adaptation de la production agricole aux variations climatiques sont, d'une part, une dépendance totale vis-à-vis de la pluviosité directe, et parfois aléatoire, pour amener la culture à complète maturité, et, d'autre part, le contrôle absolu de tous les apports d'eau à la culture, y compris l'élimination des excédents, de sorte que l'eau n'est fournie qu'en cas de besoin et à dose soigneusement mesurée. Il existe entre ces deux situations extrêmes de nombreux stades intermédiaires caractérisés par un contrôle partiel de l'eau. En règle générale, plus le contrôle est étroit, plus les techniques culturales sont efficaces, plus les rendements agricoles sont élevés, et plus l'économie d'eau est importante. Des études récentes sur les apports d'eau tendent à maximiser la valeur de l'eau dans la production végétale. Par exemple, dans certaines régions pauvres en eau, l'apport sur certaines cultures des deux tiers de leurs besoins maximaux en eau permet d'atteindre les trois quarts de leur production maximale. Une telle situation peut être considérée comme souhaitable tant qu'elle ne se traduit pas par une dégradation du sol. Le tiers d'eau ainsi économisé est alors utilisé pour un complément de production végétale dans un autre secteur. On peut atteindre des résultats analogues en agriculture pluviale lorsqu'une situation de sécheresse ou de quasi-sécheresse n'entraîne pas la destruction totale, mais seulement un abaissement du rendement unitaire.

Les premières étapes de l'amélioration de la culture pluviale traditionnelle consistent à retenir les précipitations dans le sol grâce à des techniques particulières de travail du sol et par la construction de petits endiguements ou d'étangs interceptant le ruissellement superficiel. Ces techniques sont particulièrement utilisées dans le cas de l'agriculture de décrue lorsque tout allongement de la période de dessication progressive

des sols productifs se traduit par des accroissements appréciables des rendements des cultures. Le stade suivant consiste en une utilisation plus complète des écoulements, soit par contrôle de la rétention et du niveau des eaux dans des zones protégées par des endiguements, soit en conduisant l'eau par des canaux ou des tuyaux jusqu'aux zones préparées en vue de la production. Ces méthodes conduisent à une utilisation maximale d'une pluviosité irrégulière. Enfin, il est possible de prévoir des installations permettant de maintenir une alimentation en eau pendant toute la saison sèche. Ces procédés sont classés sous l'appellation irrigation.

Les plus fortes contraintes exercées par la sécheresse sont celles qui interviennent dans certains pays presque constamment semi-arides, dans lesquels les sécheresses saisonnières se reproduisent à des intervalles plus ou moins longs. Entre ces périodes de contrainte, les populations humaine et animale se reconstituent pendant les périodes d'abondance, et elles deviennent vulnérables lorsqu' apparaît la sécheresse suivante. La restauration à long terme de l'agriculture affectée par la sécheresse est un problème énorme. C'est seulement par le recours à une campagne étudiée à l'avance et soigneusement planifiée que l'on pourra remédier de façon significative à cet état de fait, et il conviendra d'adopter plusieurs lignes d'attaque et de les coordonner entièrement. Parmi celles-ci, on peut citer: l'amélioration des réserves en eaux profondes et des approvisionnements susceptibles d'être utilisés en période de sécheresse; la possibilité d'une irrigation supplémentaire pour atténuer les insuffisances des précipitations; la fourniture de citernes pour collecter les précipitations éventuelles; dans certaines régions bien connues pour la réapparition de sécheresses catastrophiques, le transfert définitif des populations locales vers des sites plus favorables.

Les terres arables productives sont pour une bonne part situées le long des cours d'eau et dans leur plaine d'inondation, et les premières réalisations en matière d'irrigation ont eu lieu dans des régions de ce genre. Ces régions sont exposées à des inondations qui peuvent dans une large mesure détruire les cultures et les installations agricoles. Même lorsqu'aucun danger immédiat ne menace les cultures, la production agricole des plaines d'inondation peut encore être affectée, du fait du déclenchement et de l'amplitude imprévisibles des crues, à moins que les cultures ne soient adaptées à l'inondation. Dans de nombreuses régions du monde en voie de développement, la culture saisonnière de décrue assure la base des besoins alimentaires et elle est particulièrement vulnérable à l'irrégularité de l'inondation. La défense contre les dégâts provoqués par l'inondation à la production agricole comporte l'association de mesures techniques, biologiques et agro-techniques, parmi lesquelles la canalisation des eaux en vue de leur évacuation rapide, ou le détournement des eaux de crue en amont des principales régions agricoles vers des dépressions naturelles non cultivables ou des réservoirs artificiels dont l'eau est libérée ultérieurement, pendant les saisons sèches qui suivent.

CONTRIBUTION DE L'IRRIGATION AUX SOURCES DE DENREES ALIMENTAIRES

Deux questions se posent maintenant: quelles sont les améliorations du rendement des cultures qui peuvent être obtenues en agriculture irriguée par comparaison avec l'agriculture sèche ou l'agriculture pluviale, et quels sont les objectifs qui peuvent être jugés acceptables parce que susceptibles d'être atteints dans les pays en voie de développement?

L'Inde est le cas typique, à grande échelle, des conditions généralement rencontrées dans les pays en développement. Le tableau 1 présente, dans la seconde colonne, les rendements susceptibles d'être obtenus sous irrigation complète, en supposant que tous les autres investissements nécessaires sont apportés en quantités convenables. Il s'agit là de rendements observés actuellement, mais seulement dans les stations agronomiques expérimentales. Dans la troisième colonne figurent les rendements moyens obtenus par les cultivateurs dans des conditions normales, et généralement avec des moyens très primitifs en matière d'irrigation et pour ce qui concerne les autres investissements, si tant est qu'ils soient pratiqués.

Une situation du même genre peut être observée au Pakistan, où une tentative a été faite en vue de combler le fossé qui sépare les rendements obtenus à l'occasion des recherches et ceux observés sur les exploitations, grâce à l'utilisation de parcelles de démonstration. Le tableau 2 montre que la production de l'exploitation moyenne est encore bien inférieure à celle obtenue sur une parcelle de démonstration (Houston 1969). Un simple aménagement des eaux ne permettra de trouver qu'une solution d'intérêt assez limité. L'agriculture irriguée parvenue à son

maximum d'efficacité peut donner lieu à des accroissements de rendement énormes si elle est associée à d'autres apports. Même des améliorations partielles des techniques actuelles peuvent être à l'origine de gains considérables. L'ampleur des gains possibles peut être illustrée par la production de céréales irriguées qui couvrent environ 70 millions d'hectares. Si l'on pouvait parvenir, grâce à un mode de culture et d'irrigation plus efficace, à un accroissement moyen de 1 tonne/ha/an seulement, la production s'accroîtrait de 70 millions de tonnes, soit près de 20 pour cent du rendement estimé des céréales annuelles dans les pays en développement. Cet accroissement de production correspondrait à celui fourni par environ 18 millions d'hectares de projets d'irrigation totalement équipés, qui exigeraient d'investir un capital minimal de l'ordre de 80 milliards de dollars.

Tableau 1. *Rendements agricoles maximaux et moyens en Inde, en tonnes/hectare (FAO 1972).*

Aliment	Rendement maximal	Rendement moyen
Plantes cultivées		
Céréales		
Riz	10,0	1,6
Maïs	11,0	1,1
Blé	7,2	1,2
Autres		
Patate douce	41,1	8,0
Manioc	48,0	13,0
Igname	19,0	5,8

Tableau 2. *Rendements approximatifs en station de recherches, sur une parcelle d'une ferme de démonstration, et sur une exploitation moyenne, au Pakistan, en unités par acre (FAO 1969).*

Plante cultivée	Station de recherches	Parcelle d'une ferme de démonstration	Exploitation moyenne
Riz (paddy)	50	40	15
Coton	35	28	8
Maïs	100	80	11
Blé	60	40	9

L'utilisation de l'irrigation pour améliorer et agrandir les projets existants est indispensable pour se rapprocher du niveau de production alimentaire nécessaire dans l'avenir. Il est probable qu'au cours des dix prochaines années, la priorité absolue sera accordée à l'accroissement de la productivité par le biais de la rénovation et de l'amélioration des installations d'irrigation existantes. Cette tâche est plus urgente que la construction de projets nouveaux. Les rapports présentés à la Conférence Mondiale sur l'Alimentation en 1974 proposent comme objectif souhaitable pour 1985 l'amélioration de quelque 50 millions d'hectares irrigués existants. Il a été estimé que le coût d'une telle opération s'élèverait à 25 milliards de dollars en monnaie de 1975.

La seconde priorité pourrait être la création de projets d'irrigation nouveaux. Dans les pays en voie de développement qui sont dépourvus, ou presque, d'une agriculture irriguée, ou dont le potentiel de développement d'une agriculture pluviale est limité, la mise en place de projets de développement nouveaux basés sur l'eau revêt une très grande importance. Ce qui freine de telles entreprises est que l'investissement en capital nécessaire à ces projets est élevé, et qu'il s'accroît en même temps que se raréfient les projets peu onéreux. Les prévisions de la Conférence Mondiale pour l'Alimentation de 1974 soulignent la nécessité de mettre en place pour 1985 l'irrigation de 25 millions d'hectares nouveaux, opération dont le coût approximatif se situera au voisinage de 125-150 milliards de dollars en monnaie de 1976 (Houston 1977).

La longue histoire de l'agriculture irriguée n'est pas faite que de succès. Certains projets du passé - mais aussi certains tout récents - ont subi des dégradations considérables du fait de la salinisation et de l'engorgement. Un certain nombre d'entre eux ont subi le contrecoup malheureux de changements d'ordre social et politique ou les effets de l'envasement (Adams 1965). Certains projets se sont avérés excessivement onéreux par rapport à leur rendement sur le plan économique. Dans d'autres encore, certains cultivateurs ont abandonné leurs terres, ou n'ont jamais occupé les habitations qui leur étaient attribuées dans leur nouveau peuplement. Toute évaluation rationnelle des possibilités de tirer bénéfice de l'irrigation doit prendre en compte les raisons des échecs antérieurs ainsi que les ressources disponibles pour un développement ultérieur.

LES RESSOURCES DISPONIBLES POUR LA PRODUCTION

En tant que milieu à travers lequel l'eau, les éléments nutritifs mineurs et majeurs, et les autres apports destinés à la croissance des végétaux sont distribués aux racines, le sol

peut se caractériser par ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. Une importance particulière doit être accordée à la structure, qui se traduit en général par un litage, et à la texture, qui se manifeste par la dimension des particules de limon, de sable ou d'argile. Ces caractéristiques influent sur l'utilisation possible du sol, et c'est pourquoi l'enquête pédologique est nécessairement l'un des premiers inventaires à réaliser avant de décider s'il faut, ou non, aller plus avant dans la mise au point de la planification de l'irrigation.

La Carte des sols du monde Unesco-FAO (Unesco-FAO en cours de publication depuis 1971) est la tentative la plus récente visant à réaliser une étude préliminaire des sols du monde, en se basant sur un système de classification. Au fur et à mesure de la réalisation d'études complémentaires par les pays coopérant à cette opération, les données originales seront corrigées, et elles prendront davantage de valeur lorsqu'elles seront utilisées pour la planification. Les évaluations préliminaires indiquent que les terres cultivées couvrent actuellement de 1 à 3 milliards d'hectares, le potentiel pouvant être évalué à 3 à 5 milliards d'hectares, ces chiffres étant fonction des demandes et des coûts d'acquisition admissibles. On a estimé à 200 millions d'hectares environ la superficie des terres actuellement irriguées et à 1 milliard d'hectares la superficie irrigable dans le monde, mais ces estimations ne tiennent pas compte des nombreux apports, à la fois physiques et économiques, qu'il conviendrait de prendre en considération dans l'évaluation de ce qui est utilisable. En fait, dans la plupart des pays du monde, il n'existe pas de données précises sur les terres irriguées actuelles ou potentielles. Il a été proposé de procéder à un inventaire mondial de l'irrigation actuelle et potentielle.

L'eau a toujours joué un rôle important dans la production des denrées alimentaires. On estime que 80 pour cent de l'eau utilisée par l'homme dans le monde sont destinés aux plantes cultivées. Il est indispensable de parvenir à une répartition équitable de l'ensemble des ressources en eau car la quantité disponible dans le monde est limitée, et en outre, le ruissellement coïncide rarement avec les zones dans lesquelles les besoins de la plante sont élevés. Le volume de l'eau répartie sur et dans la croûte terrestre est estimé à 1,36 milliards de km^3. 95,5 pour cent de cette eau sont constitués par des eaux salées océaniques, alors que 2,2 pour cent sont immobilisés dans les calottes glaciaires et les glaciers. L'eau effectivement utilisable est celle fournie par les précipitations à la surface de la terre, et c'est elle qui assure le développement de la végétation grâce aux pluies, mais elle peut aussi être extraite des rivières et des nappes phréatiques. Les précipitations annuelles moyennes des terres émergées du globe représentent environ 100 000 km^3, soit 0,007 pour cent du volume total des eaux du globe. Le ruissellement annuel vers les océans atteint environ 38 000 à 40 000 km ; cette valeur représente la réserve réelle susceptible d'être utilisée en empêchant le ruissellement vers les océans, mais au prix de conséquences certaines pour l'environnement. Un tiers environ du ruissellement peut être considéré comme stable, en ce sens qu'il est disponible tout au long de l'année, alors que le reste est constitué principalement par l'écoulement des crues. D'autres réserves ne pourraient être utilisées qu'au prix de dépenses considérables, et souvent dans des sites inadéquats, grâce au dessalement de l'eau de mer, ou par l'exploitation des eaux souterraines fossiles. Diverses estimations conduisent à penser que le volume dont on dispose pour satisfaire les besoins domestiques, industriels, et en matière d'irrigation suffirait à une population au moins double de l'actuelle (Lvovich 1973, Falkenmark et Lindh 1976) mais les ressources disponibles sont inégalement réparties entre, et dans, les divers continents.

Les quantités d'eau utilisées par les cultures dans des conditions édaphiques déterminées varient énormément en fonction des facteurs naturels qui affectent la croissance du végétal. Ce sont essentiellement: les précipitations, la température, la radiation solaire, la durée de la lumière du jour, et la physiologie de la plante en cours de développement.

LES AUTRES APPORTS

L'introduction en agriculture d'une amélioration de l'aménagement des eaux est un problème complexe qui affecte la totalité de la société rurale et de l'administration agricole, et qui a souvent des conséquences susceptibles d'atteindre dans certains cas la législation nationale concernant la terre et les eaux. Cependant, les mesures visant à accélérer les profits que l'agriculture peut tirer des projets d'aménagement des eaux doivent nécessairement prendre en compte le fait que le succès des investissements dépend en dernier ressort de l'efficience de l'eau utilisée par le cultivateur. Il est clair que si le cultivateur veut utiliser l'eau efficacement et sans provoquer de dégradation à long terme, il doit disposer des moyens suffisants pour y parvenir, et être encouragé à poursuivre son effort.

Pour comprendre de quelle façon la science peut contribuer à atteindre ces objectifs, il faut analyser l'efficience de l'eau en irrigation, ainsi que les modifications de l'équilibre sel-eau dans le sol et celles de l'équilibre de l'écosystème consécutives à l'irrigation et au drainage.

II. L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'EAU EN AGRICULTURE IRRIGUEE

LES RESSOURCES EN EAU

L'importance de l'eau grandit avec la population, avec la croissance économique liée au développement rapide de l'industrie et de l'énergie, et avec l'accroissement de la demande en eau en vue de la consommation domestique. Dans les zones arides et semi-arides, la demande en eau s'accroît avec l'expansion de l'agriculture irriguée. Dans les zones tempérées et tropicales à climat aride et semi-aride, caractérisées par une pluviosité annuelle moyenne faible, le rôle capital du développement des ressources en eau est évident. Les valeurs de l'écoulement varient de façon considérable, leur distribution est irrégulière, dans certaines régions les possibilités d'alimentation par les eaux profondes sont faibles et ne couvrent que les besoins locaux, et la culture sans irrigation est impossible ou difficile.

Il a été remarqué qu'au niveau mondial 13 pour cent des terres cultivées sont irriguées, ce qui correspond à l'utilisation de quelque $1,4 \times 10^{12}$ m^3 d'eau par an. Les prévisions montrent également que les terres cultivées irriguées des pays en voie de développement s'accroîtront à une vitesse bien plus grande que les terres arables non irriguées (Holy 1971).

Compte tenu de cette situation, il est évident qu'il faut poursuivre le développement et l'aménagement des ressources en eau selon des directions nouvelles. On peut envisager deux approches: une utilisation plus rationnelle de l'eau, et un accroissement des ressources disponibles.

Des économies d'eau substantielles peuvent être réalisées dans les zones arides et semi-arides en mettant en oeuvre des systèmes de drainage et d'irrigation améliorés et des techniques de culture plus perfectionnées. Dans les régions en question, la plus forte demande pour l'eau est celle liée à l'irrigation. En Egypte, elle représente actuellement 75 pour cent environ des approvisionnements. La situation est analogue dans quelques autres pays en voie de développement. Si l'on utilise l'eau d'irrigation avec une plus grande efficience, des volumes plus importants pourront être libérés pour les systèmes d'irrigation futurs et pour le développement industriel à venir. On peut imaginer l'importance déterminante de ces économies si l'on a à l'esprit que l'Egypte, qu'alimente le lac Nasser "pourrait bien être confrontée prochainement à un problème de restriction des ressources en eau" (Kinawy 1977).

Une utilisation rationnelle implique souvent de retenir les eaux de surface dans des zones appropriées, et de les transporter avec un minimum de pertes vers les lieux de consommation. Pour déterminer le système de stockage et le réseau de transport optimaux, il convient de prendre en considération les eaux souterraines et d'adopter une approche de type systémique. Cette approche peut être adoptée dans des systèmes de conservation de l'eau à buts multiples dont les systèmes d'irrigation font partie intégrante. Dans les zones arides et semi-arides, la principale demande qui s'exerce sur le système de conservation de l'eau à buts multiples vise à garantir un approvisionnement en eau adéquat pour l'irrigation. Les autres demandes pressantes concernent l'industrie, l'énergie et la consommation d'eau domestique. Il y a concurrence lorsque le système est incapable de satisfaire à toutes les demandes.

Parmi les solutions imaginées pour accroître les disponibilités en eau, on peut s'arrêter sur les suivantes: les méthodes de suppression de l'évaporation, de recyclage des eaux usées, de dessalement des eaux salées, ainsi que les modifications de climat, qui permettraient de déclencher des précipitations. Toutefois, aucune de ces méthodes n'est en relation directe avec l'irrigation, alors qu'il s'agit surtout d'améliorer l'utilisation des eaux.

CHOIX DES PLANTES CULTIVEES

C'est sur les terres irriguées que l'introduction d'espèces cultivées, consistant dans un certain nombre de cas en plantes importées, a les résultats les plus marquants. Lorsque la quantité d'eau disponible s'accroît, il devient possible d'introduire des cultures ayant de plus grandes exigences en eau, telles que le riz ou la canne à sucre. L'introduction des légumineuses, qui améliore la productivité du sol par le biais de la fixation d'azote,

prépare la voie à la mise en oeuvre des rotations culturales. Cette mesure permet en retour l'introduction d'autres cultures nouvelles, en même temps que les rendements des cultures augmentent graduellement du fait de la fertilisation et de l'amélioration du travail du sol.

Le choix de la culture détermine la gamme des besoins en eau d'irrigation. Il peut être déterminé par la tradition, par une évaluation du rendement économique, et par le fait qu'on dispose des variétés appropriées.

A l'heure actuelle, les recherches dans le domaine de la génétique sont principalement orientées vers la sélection de variétés à haut rendement en vue d'une amélioration de la nutrition ou d'un accroissement des revenus. Cependant, si l'on considère les caractéristiques qui prévalent dans la zone aride, il est également important de choisir des variétés résistant à la sécheresse où qui conservent l'eau, et qui présentent un intérêt économique appréciable.

L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'EAU D'IRRIGATION

L'utilisation rationnelle de l'eau pour une culture déterminée s'exprime normalement par le rapport entre la quantité d'eau effectivement utilisée par la culture et la quantité d'eau totale fournie au point de départ du réseau. En vue d'une étude des problèmes soulevés par l'utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation, un groupe de travail de la Commission internationale sur l'irrigation et le drainage (ICID), consacré à l'efficience de l'irrigation, a introduit les définitions suivantes:

- efficacité globale (du projet): rapport entre la quantité d'eau apportée au niveau de la zone racinaire (déficit pluviométrique) et la quantité totale d'eau fournie au secteur irrigué; elle représente l'efficacité de l'ensemble de l'opération entre le point de captage ou de diversion de l'eau et la zone racinaire;
- efficacité de la distribution: rapport entre la quantité d'eau appliquée sur les parcelles et la quantité d'eau totale fournie au secteur irrigué;
- efficacité au niveau de l'exploitation: rapport entre la quantité d'eau apportée au niveau de la zone racinaire et la quantité d'eau totale contrôlée par l'exploitant.

Ces concepts facilitent l'étude de l'efficacité des éléments individuels du système d'irrigation, la détermination des pertes dans les éléments respectifs de ce système, et le choix des mesures possibles pour réduire ces pertes. La nécessité de réduire ces pertes tient à plusieurs raisons: il faut utiliser au maximum les ressources en eau dont on dispose; il convient de tirer un profit maximal des investissements relativement élevés que l'on a consacrés au stockage de l'eau dans les retenues et aux systèmes de transport de l'eau; il est indispensable d'éviter les effets néfastes d'une utilisation irrationnelle de l'eau sur l'environnement, du fait de la remontée des nappes phréatiques, de l'engorgement, de la salinisation, de l'alcalinisation, et de la multiplication et de la prolifération des vecteurs de maladies ou d'autres nuisances.

LES MOYENS TECHNIQUES DE LA REDUCTION DES PERTES D'EAU

Réservoirs

Les pertes dans les réservoirs ont pour origine principale l'infiltration et l'évaporation. Il peut s'avérer anti-économique d'empêcher totalement les pertes par infiltration dans les réservoirs constitués par de grands barrages installés sur des formations sédimentaires, car ces infiltrations diminueront avec le temps.

Les pertes par évaporation de la surface libre des retenues sont considérables et dans certains cas plus faciles à traiter. Dans les zones arides, l'évaporation potentielle, déterminée essentiellement par la radiation solaire, est nettement plus élevée que la pluviométrie annuelle. Dans les zones désertiques, la radiation solaire directe fournit approximativement 60 pour cent de l'énergie totale atteignant la surface au cours de la journée avec un albédo de 0,11. On peut citer quelques exemples de pertes par évaporation extraits de l'étude de l'ICID (1967). Au Soudan, à proximité de Khartoum, l'évaporation journalière atteint 7,5 mm, et 7,9 mm près de Wadi Halfa. En Egypte, sur le lac Nasser, l'évaporation annuelle est de l'ordre de 2 500 mm, tandis que les pertes annuelles en Guyane se situent à 1 597 mm, en Birmanie entre 1 140 mm et 1 520 mm, et elles peuvent atteindre 3 000 mm dans certaines régions de l'Inde.

Pour tenter de réduire ces pertes et les concentrations de sel qui en résultent, un stockage des eaux au-dessous de la surface du sol peut être efficace. Lorsqu'une telle solution n'est pas applicable, on peut avoir recours à l'interposition d'un écran de végétation: toutefois, ce procédé ne peut concerner

qu'une proportion restreinte de la superficie des grandes retenues, et il peut accroître la transpiration. Des études en cours portent sur les couches monomoléculaires de produits aliphatiques, qui n'entravent pas le passage de l'oxygène vers l'eau et qui n'ont pas de caractère toxique (Académie nationale des sciences des Etats Unis 1974). Dans les retenues fortement agitées par le vent, ou dont l'exploitation des eaux est irrégulière, il est difficile de maintenir un film continu à la surface de l'eau. Par conséquent, cette méthode n'est probablement applicable qu'à des retenues dans lesquelles les mouvements de la surface de l'eau sont très limités.

Système de transport

Comme les réservoirs, le système de transport de l'eau est à l'origine de pertes par infiltration et par évaporation, mais dues également à un aménagement irrationnel.

Les pertes d'eau par infiltration dans les canaux constituent, dans le cas des sols à perméabilité élevée, une proportion considérable des pertes totales. Par exemple, dans les plaines alluviales de l'Uttar Pradesh et du Punjab, en Inde, les pertes par infiltration dans les canaux en cours de transport peuvent atteindre 36 pour cent des quantités apportées en tête du canal (ICID 1967). Les pertes par infiltration en Algérie s'élèvent à 40 pour cent environ pour les canaux creusés dans des sols sableux. Les observations réalisées tout au long du canal Kara-Kum en URSS ont montré que, au cours de la première année, les pertes moyennes par percolation profonde atteignaient 43 pour cent de l'apport total en tête du réseau.

Ces quantités varient considérablement selon les conditions de sol et de climat, ainsi qu'avec la densité et la longueur du système de canaux. Dans les canaux non revêtus, les pertes sont fonction de la conductibilité hydraulique du sol, de la profondeur de la nappe phréatique au voisinage des canaux, et du débit et de la vitesse de l'eau. Il est possible de les éviter en ayant recours à un revêtement choisi en tenant compte des conditions locales et de l'aspect économique.

L'une des techniques de revêtement les moins coûteuses est le colmatage, qui convient aux sols sableux, poreux. Il consiste en un revêtement des parois des espaces lacunaires d'un sol poreux par des particules de sol de très petite dimension, qui pénètrent dans les pores lors de l'infiltration de l'eau entraînant avec elle des particules de terre de dimensions déterminées. Parmi les techniques chimiques de revêtement, on peut citer l'alcalinisation artificielle, qui consiste à introduire dans le sol des sels de sodium. Lorsqu'il est saturé par du sodium échangeable, le sol gonfle et devient moins perméable. On peut utiliser du plastique pour revêtir les canaux d'une membrane imperméable fine et souple qui doit être protégée de la lumière. On peut également réaliser sur les lieux une membrane en pulvérisant de l'asphalte ou une pellicule d'un produit industriel convenable. Le revêtement en ciment est imperméable et durable si les joints sont réalisés correctement. Cette opération exige de repérer le niveau de la nappe phréatique au-dessous du canal, et, si la pression augmente, d'équiper le plancher des canaux de drains verticaux. Dans certaines zones arides ou semi-arides, on utilise des canalisations préfabriquées en ciment, que l'on pose en surface, mais le contrôle des joints est alors impératif pour éviter leur destruction.

Enfin, pour réduire les pertes par évaporation dans les canaux, il est souhaitable que la surface libre de l'eau soit aussi restreinte que possible, ce qui implique de concevoir et de réaliser des canaux plus profonds, étroits, et d'en protéger la surface par de la végétation lorsque cette mesure ne risquera pas d'entraîner un accroissement des pertes par infiltration.

Système de distribution

Les origines des pertes enregistrées dans le système de distribution sont fondamentalement les mêmes que dans le système de transport, mais du fait des débits plus faibles, il est possible d'appliquer certaines autres techniques pour éviter ces pertes. Les pertes d'eau par infiltration, par évaporation, et dans une large mesure par suite d'une mise en oeuvre défectueuse, peuvent être presque totalement supprimées par l'utilisation de conduites fermées. Dans les zones arides et semi-arides, ces conduites ne sont pas construites sur place, surtout par suite du prix de revient élevé et des moyens mécaniques importants que requiert la réalisation des canaux d'amenée et de distribution. Dans l'avenir, la fourniture d'importantes quantités d'eau sera probablement assurée par des canaux à ciel ouvert qu'il conviendra de revêtir. L'introduction de canaux revêtus ou d'un système de conduites fermées pour la distribution de l'eau aux zones irriguées est essentiellement un problème économique. Il conviendra de prendre tous les facteurs en considération dans un contexte élargi: quantité d'eau disponible; coûts du

stockage; coût d'installation du système de transport; possibilité d'extension du système d'irrigation à des zones dont les ressources en eau sont limitées, et, par conséquent, possibilité de fourniture de denrées alimentaires à une proportion plus élevée de la population; utilisation possible de l'eau économisée pour d'autres secteurs de l'économie nationale.

Les facteurs sociaux qui ne peuvent s'exprimer en termes économiques doivent également être pris en considération. Les eaux de surface, en particulier lorsque leur vitesse de circulation est faible, créent des conditions favorables à la multiplication et à la propagation des vecteurs de maladies et des hôtes intermédiaires. Elles servent également à véhiculer les organismes responsables de maladies telles que la dysenterie, la fièvre typhoïde, la paratyphoïde et le choléra. Les moustiques responsables du paludisme se multiplient dans les canaux d'irrigation à circulation lente et dans les sols engorgés. Le problème posé est complexe, et il faudra pour le résoudre faire appel à une solution sociale et technique intégrée.

Méthodes d'application sur le terrain

Les pertes d'eau sur les terres irriguées sont la somme des pertes dans le profil, du ruissellement des quantités apportées en excès, de l'évaporation, et des pertes par transpiration vers l'atmosphère.

Les pertes d'eau dans le profil du sol correspondent aux quantités non utilisées par les végétaux et à celles qui percolent dans le sous-sol. La quantité d'eau non utilisée physiologiquement est plus élevée dans les sols à texture plus lourde. Dans les sols plus légers, à capacité d'échange plus faible, elle est négligeable pour le bilan hydrique.

Les pertes d'eau par percolation profonde dans le sous-sol hors de portée des racines sont sous la dépendance de la texture du sol, de son humidité et de l'évolution du couvert végétal. Dans la mesure où l'irrigation apporte une quantité d'eau convenablement calculée, ces pertes peuvent être considérablement réduites.

Les pertes d'eau par écoulement à partir de la surface irriguée se manifestent lorsque la vitesse d'application de l'eau est supérieure à sa vitesse d'infiltration dans la zone racinaire. L'eau s'accumule alors à la surface et elle ruisselle inutilement, entraînant souvent par lessivage des éléments nutritifs et des pesticides susceptibles de polluer l'eau ailleurs.

Les pertes d'eau par évaporation à partir de la superficie irriguée sont fonction de la méthode d'irrigation utilisée. Dans le cas de l'irrigation de surface et de l'irrigation par aspersion, l'évaporation intervient sur toute la surface. Les pertes par évaporation qui se produisent dans l'atmosphère lors de l'irrigation par aspersion sont fonction de la température et de l'humidité relative de l'air, du déficit de saturation, de la vitesse du vent, de la dimension du gicleur, et de la pression de la distribution. Il est difficile de déterminer ces pertes, mais diverses études ont montré qu'elles dépassent rarement 2 pour cent de l'eau effectivement utilisée dans l'aspersion. Les pertes les plus élevées sont le fait du vent, mais aussi de la conception et de l'installation du dispositif.

Les coefficients d'efficacité de l'irrigation qui sont le plus souvent cités sont de 0,75 pour l'irrigation par aspersion, et de 0,65 pour l'irrigation de surface. Pour parvenir à ces coefficients, il est indispensable d'appliquer des normes techniques strictes et des systèmes d'aménagement adéquats. Lorsqu'elle est conçue et appliquée correctement, l'irrigation par aspersion peut être techniquement la plus efficace. De même, lorsque le nivellement est convenablement effectué, il est possible d'obtenir une efficacité d'application élevée dans le cas de l'irrigation de surface. Les deux systèmes sont propices à la mécanisation et à l'automatisation, et ils peuvent être à l'origine de problèmes d'emploi et de revenus. Pour éliminer un certain nombre d'effets néfastes pour l'environnement, en particulier dans les pays en développement, il convient d'introduire des améliorations dans les méthodes d'irrigation de surface ou par aspersion.

L'irrigation au goutte à goutte permet un contrôle encore meilleur de la quantité d'eau apportée et de sa répartition. Toutefois, pour pouvoir en généraliser l'emploi, il convient de résoudre certaines difficultés techniques résultant du colmatage des goutteurs ou de l'accumulation des sels sur la bordure du volume de sol humecté. En outre, l'eau utilisée pour l'irrigation au goutte à goutte doit être filtrée avant emploi. Les prix de revient de ce système sont 5 à 10 fois plus élevés que le coût des autres méthodes.

L'UTILISATION DE L'EAU POUR LA CULTURE

Les rapports donnés ci-après peuvent être utiles à tous ceux qui ont affaire à la pratique de l'irrigation:

$$r = \frac{\text{rendement}}{\text{quantité d'eau fournie en tête de réseau}}$$

Ce rapport peut être divisé en deux parties, r_1 et r_2, telles que $r = r_1 \times r_2$, avec:

$$r_1 = \frac{\text{rendement}}{\text{quantité d'eau retenue dans la zone racinaire}} = \frac{Y}{W}$$

$$r_2 = \frac{\text{quantité d'eau retenue dans la zone racinaire}}{\text{quantité d'eau fournie en tête de réseau}}$$

Un problème de contrôle consiste à déterminer dans quelles conditions il est possible d'accroître r grâce à r_1 sans réduire la qualité.

Le rapport r_1 est fonction de la qualité de l'eau, et on peut admettre que r ne peut augmenter lorsque la qualité décroît, dans la mesure où la réduction de qualité est liée à un accroissement de la salure.

Pour réaliser avec succès et de façon permanente l'irrigation, il convient d'envisager une optimisation de r_1 à longue échéance. Le facteur limitant réside dans le maintien de la fertilité du sol. Il faut rejeter tout système d'aménagement qui se traduirait par un excellent rapport rendement/consommation d'eau au prix d'une dégradation rapide. Sinon, l'avenir serait hypothèqué par un excès d'économie d'eau et par la salure concomitante du sol.

On envisage habituellement l'aménagement à l'échelle de la parcelle et à l'échelle du projet. Le rapport r_2 mesure l'efficacité globale (au niveau du projet).

Aménagement à l'échelle de la parcelle

Le terme de "parcelle" correspond à une unité cultivée, c'est-à-dire une pièce de terre continue consacrée à une seule plante cultivée. En prenant pour base les recherches effectuées depuis plusieurs décennies, de nombreuses méthodes ont été mises au point pour évaluer la consommation d'eau des cultures. L'évapotranspiration correspond à la totalité de l'eau qui passe en phase vapeur, soit à travers la végétation, soit directement à la surface du sol. Il faut remarquer que l'eau retenue dans les tissus végétaux est pratiquement négligeable en comparaison des quantités dissipées sous forme de vapeur.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la consommation maximale d'une culture en bon état physiologique, se développant sur un sol dans un état d'humidité tel que l'alimentation en eau ne constitue pas un facteur limitant. Elle dépend principalement de la quantité d'énergie solaire qui atteint la parcelle. Ainsi qu'il a été suggéré plus haut, on peut la calculer soit sur la base des relevés climatologiques (radiation reçue, température) soit à partir de la vitesse d'évaporation d'une surface d'eau libre, dans un bac par exemple. On peut également recueillir des données grâce à des lysimètres conçus pour mesurer la consommation de l'eau d'une parcelle de petite dimension.

Lorsque l'on dispose des données concernant la quantité d'eau maximale qu'une culture en bon état est capable de consommer, et de celles relatives à l'approvisionnement naturel du sol en eau, il est possible de calculer la hauteur d'eau à apporter et la durée de l'intervalle séparant deux irrigations. Si l'eau est disponible en abondance, un facteur correctif supérieur à 1 peut être appliqué pour tenir compte de l'"efficacité" de l'application de la parcelle. Une telle méthode entraîne une importante consommation d'eau. Bien qu'intéressante pour maximiser le rendement dans certaines conditions socio-économiques, elle conduit rarement à la meilleure valeur possible du rapport r_2, et elle peut entraîner des risques d'engorgement, au moins pour de courtes périodes. Même dans l'éventualité d'un schéma d'aménagement de ce genre, il est possible de procéder à certaines restrictions des apports d'eau sans que le végétal risque d'être insuffisamment alimenté en eau au cours des premiers stades de développement qui suivent immédiatement le semis, et dans les phases initiales. L'aspersion s'avère particulièrement efficace à ce stade lorsque les conditions optimales correspondent à l'apport de faibles quantités d'eau pour éviter le gaspillage d'eau et le lessivage des éléments nutritifs.

Les techniques culturales telles que le travail du sol, la lutte contre les mauvaises herbes ou le paillage, si on les utilise rationnellement, peuvent réduire l'évaporation. De même, le microclimat peut être amélioré grâce aux brise-vents, artificiels ou naturels. Ceux-ci réduisent la "demande climatique" de

l'atmosphère, utilisant la percolation profonde éventuelle dans les fossés, et donnent lieu à une production de bois.

A partir d'un régime qui satisferait totalement les exigences optimales de la plante cultivée, il est possible de mettre sur pied des méthodes de prévision de la réduction des apports d'eau sans réduction de rendement. En irrigation, l'objectif consiste à maintenir l'humidité du sol à un niveau qui rende optimal l'apport d'eau à la végétation. En mesurant le potentiel de rétention d'eau du sol, et en enregistrant soit le taux d'humidité du sol, soit l'état de la végétation, il est possible de mettre au point des programmes sophistiqués d'arrosage. Ces techniques peuvent amener à appliquer un facteur correctif inférieur à 1 aux résultats obtenus dans la mesure de l'ETP.

Deux questions se posent alors: quand et dans quelle mesure une restriction dans l'alimentation en eau est-elle judicieuse? Quelles doivent être les modalités d'application d'une restriction de ce genre? Il est possible de réduire faiblement l'approvisionnement en eau sans provoquer une diminution de rendement lorsqu'un autre facteur limitant exerce son action: technique de travail du sol ou engrais, par exemple. C'est ainsi qu'un apport d'eau en abondance ne peut remplacer l'utilisation d'engrais; si la fertilisation est insuffisante, une légère diminution de l'approvisionnement en eau n'affectera pas le rendement. Il en est de même pour d'autres facteurs, et en particulier pour le travail du sol.

Il est bien connu que la réponse de la culture à une restriction de l'apport d'eau est fonction du stade de développement. Cet état de choses est associé au concept de "période critique". Les besoins en eau d'irrigation sont souvent inférieurs à ceux calculés à partir d'une formule exprimant l'ETP; mais, pendant certaines périodes de la croissance, une restriction même faible des apports peut entraîner une diminution considérable du rendement. Au cours de la période qui précède immédiatement la récolte, un "régime riche" peut avoir pour résultat une diminution de la qualité ou de la quantité, lorsque le végétal consomme sa propre production. C'est ainsi que l'apport d'eau à la betterave à sucre doit être diminué avant la récolte. Par conséquent, une "modulation" de l'approvisionnement en eau peut être appliquée lorsque les besoins de la culture sont connus avec précision.

Sous des conditions climatiques extrêmes, en été par exemple, certaines cultures ne fournissent que de faibles rendements, même lorsqu'elles sont convenablement approvisionnées en eau. La faible efficacité de l'eau que traduit ce phénomène peut être évitée, soit en écartant les cultures de ce genre, soit, lorsqu'il s'agit de plantes pérennes comme la luzerne, en leur apportant la quantité d'eau juste suffisante pour assurer leur survie jusqu'à la saison plus fraîche.

Il est possible de limiter le volume d'eau apporté, soit en réduisant la hauteur d'eau appliquée à chaque irrigation, soit en accroissant la durée de la période séparant deux apport consécutifs. Lorsqu'on pratique l'irrigation de surface, il est difficile d'apporter de petites quantités d'eau sans provoquer une diminution grave de r_2. Il est possible de procéder à un choix entre la réduction du volume d'eau apporté et l'allongement de la "période": ce choix est fonction du type de végétal cultivé, plus particulièrement de son système radiculaire, et du sol. Cette question mérite d'être étudiée plus en détail.

Considérations sur la salure

Les problèmes relatifs au bilan des sels et de l'eau seront envisagés au chapitre suivant, mais il est d'ores et déjà possible de faire quelques commentaires sur la salure, dans la mesure où elle subit les effets de l'utilisation de l'eau.

En général, un accroissement de la salure du sol se traduit par une diminution des rendements, mais seulement dans la mesure ou cette salure constitue le "facteur limitant". Un accroissement de la salure n'implique pas une diminution de production, tant que d'autres facteurs ont un caractère limitant plus accusé (fertilisation, travail du sol). En outre, les effets de la salure du sol sur les cultures ne sont pas constants à tous les stades de la croissance. Elle peut dans certaines circonstances avoir des effets limités sur la germination, mais entraver la levée de la plante dans les sols argileux.

L'homme peut modifier la salure de l'eau d'irrigation lorsqu'un affluent du cours d'eau principal apporte une eau saumâtre, ou lorsque l'on utilise une eau de nappe saumâtre. En Tunisie, un affluent de la Medjerda (appelé Mellegh parce qu'il est "salé") voit ses eaux retenues par un barrage. Pour maintenir au minimum le taux de salure, on programme à la fois l'époque de l'année à laquelle cette eau est rejetée dans le cours d'eau principal où est prélevée l'eau d'irrigation, et le degré du mélange avec l'eau douce provenant de ce cours d'eau.

Aménagement à l'échelle du projet

Le premier objectif visé dans la planification d'un projet d'irrigation est de parvenir au plein emploi du réseau, c'est-à-dire à éviter les pointes de la demande en eau à la parcelle, ainsi que les périodes creuses pendant lesquelles le réseau est sous-utilisé. Le second objectif consiste à obtenir une utilisation agronomique efficace de l'eau. Le schéma de culture doit être planifié de façon à pouvoir atteindre ces deux objectifs. Le type de culture ainsi que les surfaces consacrées à chacune des plantes cultivées doivent être calculés pour éviter les "surcharges de la demande" résultant d'une estimation erronée des besoins en eau.

DRAINAGE

Un facteur d'importance capitale dans tout projet d'irrigation est le facteur drainage. C'est une tendance fréquente que de surévaluer le drainage naturel, et de sous-estimer en même temps l'infiltration profonde à tous les niveaux (transport, distribution, parcelle). Le drainage artificiel est onéreux, et il ne soutient pas la comparaison avec l'irrigation. Les administrateurs qui disposent d'un budget déterminé sont tentés d'utiliser leurs crédits pour agrandir la superficie mise en eau, plutôt que d'irriguer et de drainer une superficie plus restreinte. L'expérience a enseigné, brutalement dans beaucoup de cas, qu'il est préférable d'équiper complètement une superficie restreinte que de mettre en eau une surface plus grande sans prévoir convenablement l'efficacité des apports et l'exécution d'un drainage rationnel.

Nécessité du drainage

Ainsi que nous l'avons montré, il n'existe pas de méthode d'irrigation dotée d'une efficacité à la parcelle, qui soit de 100 pour cent. Les pertes résultent de la percolation en profondeur ou de facteurs autres, par exemple la conception de l'exutoire de la parcelle. Lorsqu'un projet d'irrigation est mal conçu et mal aménagé, la plante cultivée est sous-alimentée alors que la nappe phréatique se recharge, même lorsque les apports sont faibles. Ce problème est particulièrement visible dans le cas de l'irrigation de surface sur des sols qui n'ont pas subi de nivellement, ou lorsque le nivellement a été perturbé par des instruments ou des techniques de travail du sol mal adaptés.

Le drainage est fondamental lorsque se manifeste un problème quelconque de salure. Pour maintenir la concentration saline dans la zone radiculaire à un niveau raisonnable, le lessivage est une opération indispensable. Dans ces conditions, l'eau apportée doit être en excédent par rapport aux besoins de la culture. En outre, l'eau doit être appliquée sur la totalité de la surface cultivée. Lorsque le nivellement est imparfait, les points hauts contiendront une proportion plus élevée de sels résiduels.

Compte tenu du caractère saisonnier du lessivage, la salure peut croître pour de courtes périodes sans que la plante doive nécessairement en souffrir. Dans les régions semi-arides, où les précipitations sont généralement concentrées en un petit nombre de mois, on peut mettre à profit la période humide pour réaliser le lessivage. Bien que les besoins des cultures soient considérablement réduits, une irrigation modérée qui maintiendra dans le sol une teneur en eau relativement élevée, permettra d'optimiser "l'efficacité du lessivage" réalisé par la pluie. L'accroissement saisonnier de la salure du sol est particulièrement sensible dans le cas de l'irrigation par aspersion.

Planification et conception

La réalisation du drainage peut se faire selon des méthodes variées, en fonction des conditions locales et de la qualité des eaux de la nappe. Lorsque celle-ci n'est pas salée, et qu'il est par conséquent possible de l'utiliser pour irriguer les cultures, le but du réseau de drainage est de se débarrasser rapidement de l'excès d'eau affectant la zone radiculaire, en maintenant le niveau de la nappe à un niveau suffisamment élevé pour tirer parti des remontées capillaires. En évitant un drainage trop poussé, la nappe phréatique pourra se maintenir au niveau optimal.

Si les eaux de nappe sont saumâtres, il convient d'empêcher la circulation de l'eau vers la zone radiculaire et vers la surface du sol. Dans les cas de ce genre, la vitesse d'abaissement de la nappe ne constitue pas l'objectif prioritaire, et il faut rechercher un niveau critique plutôt qu'un niveau optimal des eaux. Un système de drainage à faible profondeur ne conviendrait pas dans ce cas.

Il est difficile d'effectuer un choix entre drains à ciel ouvert et drains enterrés. Un drainage profond à ciel ouvert exige des fossés larges, et entraîne par conséquent une perte de superficie, des difficultés de circulation et pose des problèmes d'entretien.

AMELIORATION DE L'ORGANISATION ET DE LA GESTION DES PROJETS D'IRRIGATION

L'expérience acquise grâce à des projets d'irrigation très divers dans les régions arides a enseigné que la clé d'une efficacité élevée réside dans l'organisation du périmètre d'irrigation et dans sa subdivision en districts d'irrigation.

Un groupe de travail de l'ICID, collaborant avec les comités nationaux de cet organisme (Bos 1977), a rassemblé, à partir de questionnaires, des données sur l'influence que peuvent avoir les éléments particuliers du périmètre d'irrigation sur l'efficacité de celles-ci. Parmi ces éléments figuraient: la dimension de la surface irrigable lorsqu'on dispose de moyens sur le plan technique, la dimension de l'unité de rotation déterminée par un canal à débit non continu, l'équipement technique, le réseau de fossés au niveau de l'exploitation, la méthode de distribution de l'eau, la dimension de l'exploitation, la période de fourniture de l'eau, le nombre et la localisation des prises d'eau, le débit, la méthode d'irrigation à la parcelle, et les charges.

A partir de cette analyse, il est possible de procéder à quelques généralisations en ce qui concerne les conditions d'amélioration globale de l'efficacité:

- éviter les projets d'irrigation de moins de 1 000 ha;
- subdiviser les grands périmètres d'irrigation en unités secondaires comprises entre 2 000 et 6 000 ha, selon la topographie;
- faire en sorte que chaque unité secondaire comporte un certain nombre d'unités de rotation dont la dimension pourrait varier entre 70 et 300 ha, selon la topographie;
- mettre en oeuvre les canaux principaux, secondaires et tertiaires sur la base d'un débit continu;
- à l'intérieur d'une unité de rotation, organiser la rotation de l'apport d'eau aux prises ou aux groupes de prises indépendamment de la distribution dans les unités adjacentes;
- sur les grands projets dépassant 10 000 ha, décentraliser l'aménagement du projet de façon telle que chaque unité secondaire dispose de sa propre équipe.

Ces suggestions, qui sont le fruit de l'expérience accumulée à partir de 91 projets opérationnels, peuvent être mises en oeuvre sans qu'il soit nécessaire de disposer d'investissements particuliers en capital. Elles ne doivent pas être considérées comme applicables à tous les cas possibles d'irrigation, mais elles illustrent les avantages qu'on peut tirer d'une étude systématique des facteurs de l'efficacité.

III. LA MODIFICATION DES REGIMES DE L'EAU ET DU SOL

Dans la plupart des cas, et plus particulièrement dans les grandes plaines, la nappe phréatique s'élève sous l'effet de l'irrigation, et les remontées capillaires consécutives à cette élévation provoquent une accumulation des sels, à la fois dans la nappe et dans le sol, au voisinage de sa surface. Dans des cas de ce genre, il faut que le contrôle des régimes de la nappe et de l'humidité du sol soit assuré en complétant le périmètre d'irrigation par un système de drainage efficace.

Un programme d'irrigation et de drainage combinés peut répondre aux impératifs de l'agriculture en maintenant la teneur en eau du sol de la zone radiculaire au voisinage de l'optimum. Le drainage abaisse le niveau de la nappe au-dessous de la profondeur critique. L'irrigation apporte l'eau au végétal lorsque l'évaporation et la transpiration ont consommé celle qui était en réserve, et le taux d'humidité s'abaisse au-dessous d'une valeur supérieure acceptable.

La zone non saturée, où se localisent les racines, est au coeur de la filière terrestre du cycle hydrologique. Les conditions qui règnent dans cette couche relativement mince exercent une influence considérable sur la circulation subséquente des eaux de pluie qui atteignent la surface terrestre, en les renvoyant vers l'atmosphère, en provoquant le ruissellement superficiel ou en se prêtant à l'infiltration. Les modifications les plus importantes du régime des sels et de l'eau consécutives aux changements de teneur en eau dans la zone radiculaire peuvent être classées de la façon suivante:

1. modification de la filière atmosphérique du cycle hydrologique:
   - accroissement de l'évapotranspiration réelle;
   - élévation de la tension de vapeur de l'atmosphère;
   - évolution possible de la quantité et de la distribution des précipitations;

2. modification du ruissellement superficiel:
   - accroissement de la quantité et de l'intensité du ruissellement sur le bassin versant, se traduisant par un potentiel d'érosion accru et par un transport de sédiments plus considérable;
   - contrôle de l'écoulement des cours d'eau grâce aux retenues, et diminution de la charge solide dans ces cours d'eau du fait de la rétention par les barrages;
   - dégradation du lit des cours d'eau par suite de la réduction de leur capacité de transport de sédiments.
3. modification du régime des eaux profondes, modification de la circulation des sels, et transformation des processus hydrologiques dans la zone non saturée:
   - accroissement des apports et réduction des pertes, et élévation de la nappe phréatique;
   - déclenchement d'une circulation horizontale des eaux de profondeur, des zones irriguées vers les terrains non irrigués contigus, élévation de la nappe dans ces derniers, et extension progressive des zones de "drainage sec".
4. modifications de la qualité de l'eau, autres que celles liées à des changements de taux d'humidité du sol:
   - accroissement de la concentration en sels par suite de l'évaporation pendant le stockage, au cours du transport et lors de la distribution de l'eau;
   - autres changements d'ordre qualitatifs, tels que les changements de la température et de la charge solide en suspension, pollution parfois provoquée par le ruissellement superficiel qui transporte des éléments nutritifs, des pesticides, des herbicides dans le système d'irrigation, et par l'eau fortement salée qui s'infiltre dans les canaux;
   - détérioration de la qualité des sols et des eaux provoquée par le rejet des effluents des systèmes de drainage, constitués d'eaux fortement salées.

Chacune de ces modifications soulève des problèmes d'ordre scientifique concernant l'équilibre sol-sel et il faut en tenir compte lors de la planification, de la conception et de la mise en oeuvre des systèmes d'irrigation et de drainage, si l'on veut éviter tout risque de dégradation. Quelques problèmes particuliers concernant l'accumulation des sels seront signalés, de même que les mesures nécessaires à la protection des sols vis-à-vis de certains effets secondaires néfastes.

LES MODIFICATIONS DE L'EVAPOTRANSPIRATION ET DES PRECIPITATIONS

L'une des conséquences du contrôle de la teneur en eau de la zone radiculaire est l'élévation de l'évapotranspiration réelle des zones irriguées par rapport aux zones adjacentes. Le système de l'évapotranspiration est constitué de deux sous-systèmes. Le premier est la masse atmosphérique, à travers laquelle l'énergie parvient jusqu'à l'eau, et qui reçoit et transporte la vapeur d'eau. Le second est constitué par l'eau stockée et par le réservoir qui contient la masse soumise à l'évaporation (profondeur et structure de la zone radiculaire, porosité, adhésivité, capillarité, profondeur de la nappe phréatique, etc...). Les deux sous-systèmes se rejoignent à la surface évaporante, qui fixe les conditions aux limites de la production et de la réception de la vapeur d'eau.

L'irrigation ne modifie pas les conditions du système récepteur de la vapeur d'eau: seule la surface où se manifestent l'évaporation et la transpiration peut être légèrement altérée. La limite supérieure du volume de vapeur susceptible d'être absorbé par la masse d'air contiguë (évapotranspiration potentielle) n'est pas modifiée par le contrôle du taux d'humidité. Le flux réel qui prend naissance entre les sous-systèmes producteur et récepteur de vapeur d'eau ne dépend pas seulement de la capacité de l'air à recevoir cette vapeur, mais aussi du volume d'eau disponible pour l'évaporation au voisinage de la surface, et de la recharge de l'eau de nappe en voie d'évaporation sous l'effet de la capillarité. Ces conditions sont fortement accrues du fait de l'irrigation. L'évapotranspiration réelle augmente.

Péczely (1977) compare l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle mesurées ou calculées dans les régions semi-arides (Fig. 1 et 2). La différence entre les deux courbes obtenues représente la limite supérieure de l'excédent d'évapotranspiration consécutif à l'irrigation. Etant donné l'importance de ce paramètre pour les planificateurs et les concepteurs lorsqu'il s'agit de déterminer la demande en eau, il est souhaitable de mettre au point des modèles et des méthodes de mesure adaptés au calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle, et prenant aussi en considération les conditions qui règnent dans le sous-système producteur de vapeur d'eau. Pour ce qui concerne l'évapotranspiration potentielle, les méthodes existantes (Thornthwaite, Penman, Turc, Christiansen) atteignent leur objectif sous réserve de

modifications permettant de prendre en considération la condition limite inférieure du système récepteur de vapeur. La détermination de l'évapotranspiration réelle, qui dépend de la structure et des conditions instantanées du système producteur de vapeur, exigera encore des recherches détaillées.

Au-delà de l'accroissement de l'évapotranspiration, l'effet de l'irrigation sur les précipitations est encore un sujet de controverses. Certains scientifiques estiment que le volume et la distribution des précipitations sont modifiés. Schickedanz et Ackermann (1976) pensent que cet effet est négligeable dans le nord du Texas (Etats-Unis), mais son importance n'a pas pu être mise en évidence jusqu'à présent dans d'autres zones irriguées.

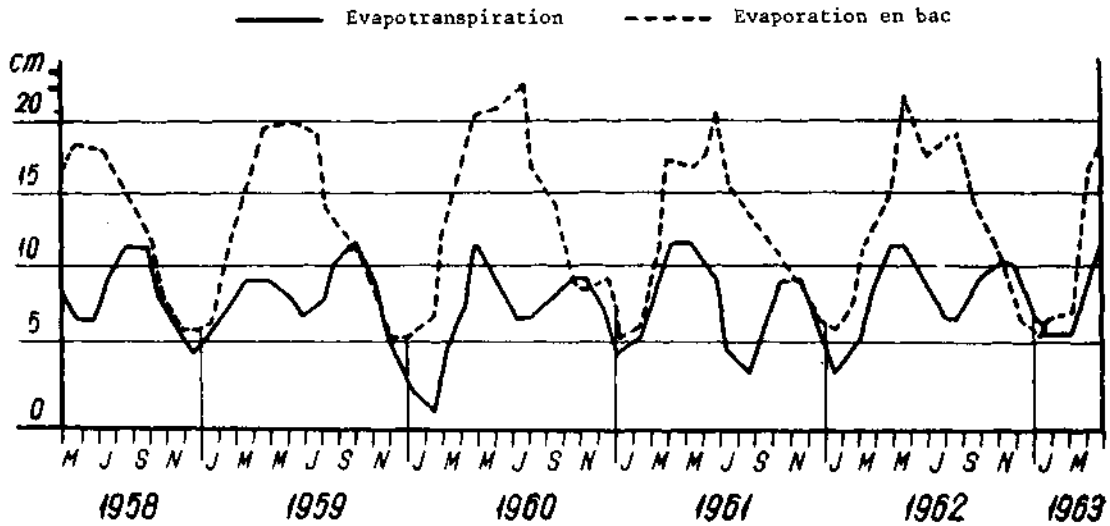


Figure 1. *Représentation graphique de la fluctuation saisonnière de l'évapotranspiration réelle moyenne et de l'évaporation dans un bac, de 1958 à 1963 en Géorgie (Etats-Unis) (Magyar 1973).*

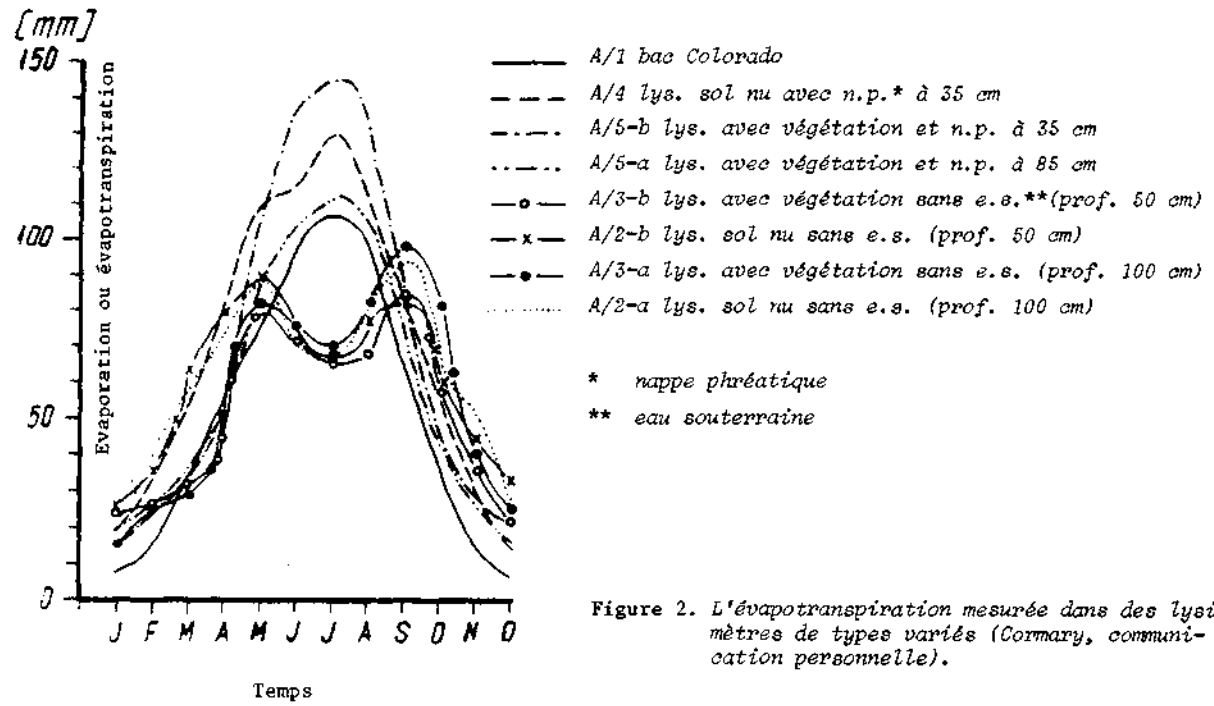


Figure 2. *L'évapotranspiration mesurée dans des lysimètres de types variés (Cormary, communication personnelle).*

TRANSPORT ET DEPOT DES SEDIMENTS

La valeur nutritive des éléments solides transportés par les cours d'eau des régions semi-arides dépend principalement de leur qualité et de leur quantité. Il est évident que le transport de quantités importantes de feldspaths, d'argile ou de matière organique conduit à un potentiel de fertilité naturelle des sédiments plus élevé que dans le cas de silice ou d'alumine.

Le Nil illustre bien cette situation. Les sols de sa vallée et de son delta sont formés sur des alluvions dont la richesse est à la base de l'agriculture égyptienne. Avant la construction du grand barrage d'Assouan, la constitution des éléments en suspension au Caire, en 1955, était la suivante: sable 18 pour cent, limons 43 pour cent, argile 39 pour cent (Académie de la recherche scientifique et de technologie 1975). Après la construction du barrage, le taux moyen de la charge solide pendant la crue annuelle est passé de 1 000 ppm en 1963 à quelques ppm (de 15 à 68) en 1968. La réduction du volume des éléments minéraux transportés sous forme de sédiments n'est pas le facteur le plus important: les autres données sont tout aussi significatives.

Le dépôt renouvelé de constituants minéraux contribue au maintien de la fertilité des sols irrigués. Pour cette raison, il est préférable que les sédiments se déposent sur les parcelles irriguées, plutôt que de s'accumuler dans les réservoirs. Kovda estime qu'un dépôt annuel de 40 tonnes/ha de sédiments dans le delta de l'Amou Daria apporte aux sols: 250 kg/ha d'humus, 20 kg/ha d'azote, 50 kg/ha de potasse échangeable, et 50 kg/ha d'acide phosphorique total. Ces sédiments peuvent avoir un effet bénéfique supérieur à celui des apports d'engrais. Les barrages peuvent mettre un point final à cet état de fait. La sédimentation du Nil qui était de 80 à 228 millions de tonnes par an à la hauteur de Gaaira avant la construction du barrage est réduite à quelques tonnes seulement. L'azote contenu dans les limons qui se déposent dans le lac Nasser équivaut à 13 000 t d'un engrais type nitrate de calcium. Tous les spécialistes de l'irrigation ne partagent pas la même opinion sur ce problème du contrôle de la sédimentation. Lorsque les canaux d'irrigation sont construits en ciment, certains spécialistes préfèrent retenir les sédiments dans des bacs spécialement conçus à cet effet pour éviter les difficultés inhérentes aux dépôts qui se produisent dans les canaux.

Il faut souligner le rôle important que joue la granulométrie du sol dans les canaux en terre. Dans le cas des sols argileux lourds, il faut éviter la sédimentation, mais lorsqu'il s'agit de sols très perméables la sédimentation peut être bénéfique. L'analyse comparative des sols et des sédiments permet de fixer le niveau souhaitable de la sédimentation, mais la quantité est déterminée par la pente du terrain et par la charge solide du cours d'eau.

Il convient encore de signaler deux autres aspects des relations entre irrigation et sédimentation. Le premier est positif: les dépôts annuels de sédiments provoquent une élévation du niveau des sols irrigués qui peut dans certains cas amener le niveau de la parcelle au-dessus de celui du canal d'alimentation. Le résultat se traduit par une amélioration du drainage naturel.

Le second aspect est négatif: du fait de la sédimentation dans le réservoir le transport des sédiments en aval des barrages est réduit, et, dans les deltas, la vitesse du dépôt des alluvions est dépassée par la vitesse de l'érosion marine de la côte. En même temps, la capacité de charge de la rivière s'accroît, ce qui conduit à une érosion des berges et du lit du cours d'eau.

REGIMES DE L'HUMIDITE DU SOL ET DES EAUX SOUTERRAINES

L'interrelation entre les processus hydrologiques qui se manifestent dans la zone humide du sol, la migration des sels et la profondeur de la nappe phréatique s'exprime dans le concept de bilan des eaux souterraines, susceptible d'être modifé par l'irrigation. La base de ce concept est la suivante: toute variation positive et négative du volume des eaux souterraines est une fonction de la profondeur moyenne du niveau piézométrique. La structure et les paramètres des équations qui traduisent ces relations sont fonction du climat, des conditions de la surface et des caractéristiques du sol.

Le volume moyen de l'infiltration annuelle à travers une unité de surface du terrain est déterminé par plusieurs facteurs: météorologie, état de la surface et nature du sol. Une partie de ce volume est stockée dans la frange capillaire, et s'évapore directement à partir de cette frange. C'est seulement le reliquat de l'eau ayant traversé la surface du sol qui atteindra le niveau de la nappe phréatique pour constituer une variation positive du volume des eaux souterraines. Toutes choses égales d'ailleurs, cet accroissement diminue lorsque la profondeur moyenne du niveau de la nappe augmente.

La fonction exprimant la relation de variation négative par rapport à la profondeur est du même ordre que la précédente. Si le niveau phréatique est proche de la surface, l'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle, et le volume d'eau issu d'un niveau inférieur à la surface du sol est fourni dans sa totalité par les eaux de la nappe. La différence entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle s'accroît lorsque la profondeur du niveau piézométrique augmente. Au-dessous d'un niveau maximal, l'évapotranspiration réelle est dans une large mesure indépendante de la position de la surface phréatique, ce qui signifie que, dans le cas d'une nappe profonde, celle-ci n'exerce pas d'influence sur le processus d'évapotranspiration. Toutefois, dans certains autres cas, l'évaporation peut être subdivisée en deux fractions: la première provoque une diminution persistante de l'humidité du sol, alors que la seconde, bien qu'ayant son origine directe dans la zone d'humidité du sol, subit une recharge à partir des eaux de nappe. Cette seconde fraction constitue la variation négative du volume des eaux de nappe. Sa valeur est égale à la quantité totale d'eau évaporée ou transpirée à travers la surface du sol, si le niveau de la nappe est proche de la surface. Elle est nulle lorsque la surface de la nappe se situe au niveau, ou au-dessous du niveau où l'évapotranspiration devient constante. Entre ces deux positions, la variation négative peut être caractérisée par une courbe décroissante.

Le bilan des eaux souterraines peut se traduire en exprimant l'égalité entre, d'une part, la différence des entrées et des sorties, et, d'autre part, la modification du volume du stock d'eau. Au cours d'une période de longue durée pendant laquelle les influences naturelles et artificielles ne subissent pas de variations, la modification du stock peut être négligée. Les valeurs des entrées et des sorties, qui sont fonction du temps, peuvent être supposées approximativement égales à leurs moyennes, si l'on néglige les fluctuations saisonnières. Si l'on accepte ces hypothèses, une forme simplifiée de l'équation du bilan montre que la différence entre les variations positives et négatives moyennes est égale à la différence entre les flux de décharge et de recharge de la nappe. Sachant que ces deux types de variations sont des fonctions univoques simples de la profondeur de la surface piézométrique en un point donné, leur différence peut aussi être représentée comme une fonction de la position du niveau de la nappe. Cette relation détermine dans leur totalité les conditions générales du bilan de la nappe des eaux souterraines, ce qui apparaît sur la courbe caractéristique du bilan de nappe (Fig. 3).

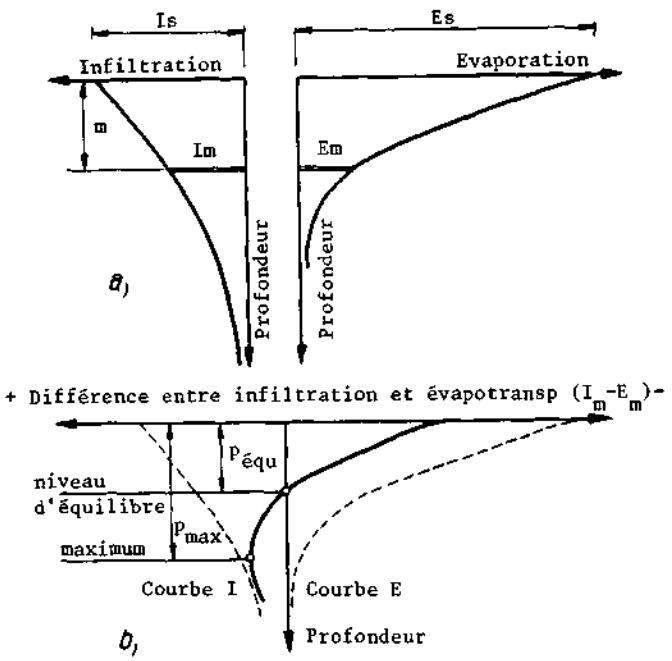


Figure 3. *Interprétation de la courbe caractéristique du bilan des eaux souterraines (Péczely 1977).*

A l'équilibre, à l'intersection de la courbe et de l'axe des ordonnées, les variations positives et négatives sont égales. La surface phréatique ne peut apparaître à ce niveau que dans la mesure où il n'y a pas d'écoulement souterrain, ou si le flux des entrées est égal au flux des sorties. Au-dessus de ce niveau se situe la zone de recharge de la nappe par percolation. Dans le cas de niveaux phréatiques de ce genre, la variation négative est plus importante que la variation positive, et la différence est équilibrée par un excédent du flux d'entrée. Au contraire, lorsqu'une zone subit un drainage par écoulement souterrain, le déficit est compensé par un excédent de recharge provenant de l'infiltration; par conséquent la surface phréatique ne peut se former qu'au-dessous du niveau d'équilibre.

Si l'eau de la nappe n'est le siège d'aucune circulation horizontale, sa surface piézométrique peut se former en tout point du niveau d'équilibre, approximativement parallèle à la surface du sol, si toutes les autres conditions sont homogènes. Etant donné que le terrain n'est généralement pas horizontal, la nappe d'eau sera affectée d'un gradient. Le flux déclenché par ce gradient tend

à créer une surface phréatique horizontale, élevant le niveau de celle-ci dans les vallées et l'abaissant dans les zones élevées. Dans la réalité, le niveau de la nappe phréatique n'est en général ni parallèle à la surface ni horizontal; il suit la pente du terrain, s'abaissant au-dessous du niveau d'équilibre dans les zones élevées, s'élevant au-dessus de lui dans les zones basses. Le flux horizontal sur les surfaces inclinées de la nappe, entretenu par leur gradient, doit être en équilibre dynamique avec les variations positives et négatives. La surface phréatique se mettra donc en place de façon telle que la recharge dans les terrains relativement élevés sera sensiblement égale à la décharge, comme l'indique la Figure 4 (Péczely 1977).

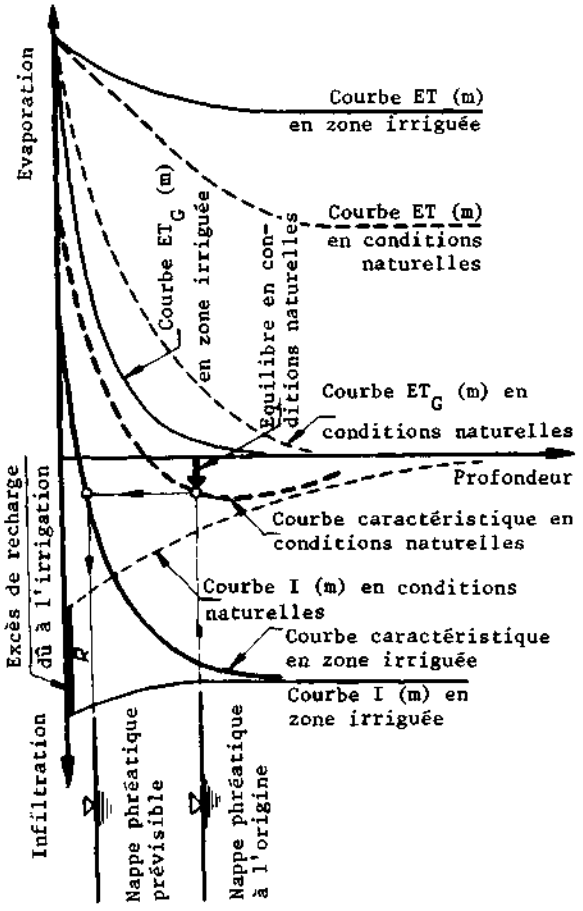


Figure 4. *Construction d'une courbe caractéristique du bilan d'une nappe souterraine modifié par l'irrigation.*

Conformément à cette interprétation, le niveau de la nappe à l'équilibre serait horizontal en tous points dans des zones planes de grande étendue. Toutefois, un flux souterrain latéral peut être déclenché et entretenu dans une situation de ce genre par les constituants et les structures des terrains sus-jacents.

En plus de l'eau, des particules de sol de très petites dimensions et des sels sont lessivés et s'accumulent dans des mares temporaires, des marécages, ou sous la forme de dépôts superficiels imperméables très compacts. La restauration des terres et leur nivellement peuvent éliminer les irrégularités de la surface, mais ils ne font pas disparaître ces différences de structure. Au milieu des terres arables persistent des emplacements dans lesquels l'infiltration de l'eau est ralentie, mais où l'eau s'évapore tout aussi vite qu'ailleurs au cours des périodes de sécheresse. Le déficit hydrique ainsi engendré est compensé par un flux latéral en provenance des parcelles contiguës. Conformément au concept de la courbe caractéristique, le niveau d'équilibre se situe à grande profondeur, ou bien il n'existe pas à la verticale des emplacements imperméables par suite de la lenteur de l'infiltration et de l'ascension capillaire relativement importante. La surface de la nappe phréatique est abaissée au-dessous du niveau normal d'équilibre autour de ces emplacements, assurant ainsi une variation positive du fait d'un excédent d'infiltration. Ce volume est transféré sous les emplacements par un flux de nappe latéral pour compenser le déficit. Ainsi, des différences dans les constituants et les structures du sol peuvent donner naissance sous les plaines à un cycle hydrologique local analogue à celui entretenu par le gradient de nappe dans les terrains en pente.

Les processus hydrologiques dont l'explication vient d'être fournie sont étroitement associés à ceux de la migration des sels dans le sol. Lorsque le niveau de la nappe est situé au-dessous du niveau d'équilibre, la résultante de la circulation verticale de l'eau dans les couches qui surmontent la surface de la nappe est orientée vers le bas. Etant donné que l'eau des précipitations qui s'infiltre et l'eau qui s'évapore sont toutes deux pauvres en sels, le lessivage des horizons supérieurs est le processus caractéristique de l'évolution des sols. Parmi les cations libres des sels solubles, c'est le sodium qui est le plus facilement lessivé, et le calcium peut alors prendre un caractère dominant dans ces horizons. Si le processus se poursuit, le calcium est hydrolysé, migrant alors vers la nappe, et l'hydrogène se fixe sur les minéraux argileux et les agrégats sous forme de cation libre. De la sorte, dans les zones à pluviométrie élevée, il se forme

d'abord un sol calcaire, puis un sol lessivé acide au-dessus des couches aquifères qui sont le siège de variations positives de leur bilan hydrique.

Les sels qui sont lessivés vers le bas parviennent dans les couches aquifères et sont entraînés par la circulation des eaux profondes vers les couches inférieures. Dans les plaines, la circulation latérale des eaux souterraines est orientée en direction des emplacements correspondant à une couverture superficielle imperméable. Lorsqu'elles atteignent les zones où la variation négative du bilan hydrique constitue la dominante de l'échange d'eau entre la nappe profonde et l'humidité du sol, les eaux souterraines chargées de cations "libres" associés aux anions "libres" sous la forme de carbonates et de chlorure de sodium remontent par capillarité vers la surface pour remplacer l'eau du sol entraînée par évaporation. Ces eaux s'évaporent à leur tour, laissant sur place les sels dissous qu'elles contenaient.

Dans les zones où les eaux souterraines sont drainées par évaporation (Pels et Stannard 1977), le début de l'accumulation des sels peut être la conséquence des processus hydrologiques. Etant donné que le sodium est le cation le plus mobile, il se formera des sols à alcali dans les zones d'accumulation.

L'irrigation exerce une influence sur le bilan des eaux souterraines de deux manières différentes. En premier lieu, l'infiltration dans les systèmes de distribution contribue à la recharge de la nappe sans modifier les processus hydrologiques qui interviennent dans la zone d'humidité du sol. Elle donne naissance à un flux latéral et élève le niveau piézométrique, contribuant ainsi à ce que le drainage sec équilibre les quantités d'eau concernées par la recharge. La zone qui est le siège de ce processus le long des canaux et des autres structures assurant la recharge correspond au secteur dans lequel se développe un équilibre dynamique. On peut avoir recours à la courbe caractéristique de l'équilibre de la nappe lorsqu'on étudie ce nouvel équilibre.

Le second mode d'action se manifeste dans les zones irriguées lorsque l'eau en excès rejoint la nappe en traversant la zone d'humidité du sol. Les processus initiaux qui régissent la circulation de l'eau sont modifiés, et une courbe caractéristique nouvelle doit être établie afin de prendre en compte l'infiltration en excès traversant la surface du sol, la diminution de la capacité de stockage du sol, et la variation négative du bilan. Ces divers éléments se traduisent par une position plus haute du niveau d'équilibre, le lessivage demeurant le phénomène caractéristique qui gouverne l'évolution du sol (Fig. 5).

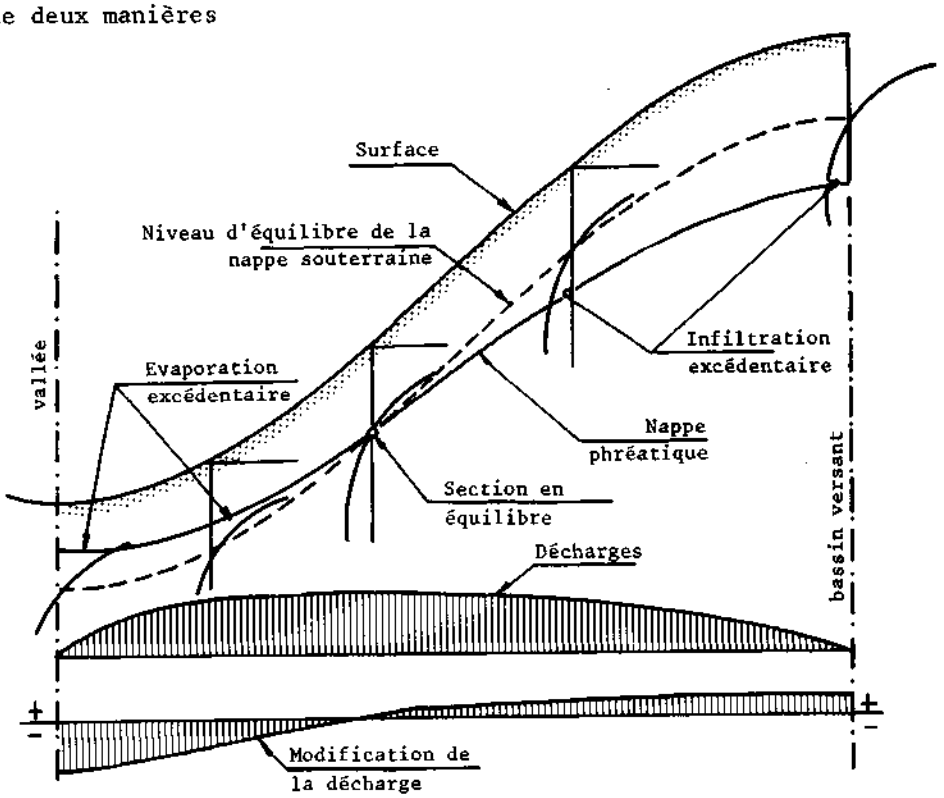


Figure 5. *Formation d'une nappe phréatique sous une surface en pente.*

En partant de ce concept, en terrain totalement irrigué, l'engorgement constitue le facteur principal de la dégradation du sol. La salinisation est généralement moins grave, car l'eau d'irrigation circulant dans le sol assure la poursuite d'une migration des sels solubles vers le bas. Lorsque l'eau du système de distribution ou celle des abords des parcelles irriguées provoque une remontée du niveau de la nappe, l'engorgement s'accompagne d'une accumulation de sels. Les systèmes de drainage conçus pour éliminer ces effets néfastes ont pour but d'abaisser le niveau de la nappe au-dessous du niveau d'équilibre naturel tel qu'il se situe hors des zones irriguées, alors que, à l'intérieur des zones irriguées, les exigences peuvent être plus faibles, et n'ont pour but que d'assurer une protection contre l'engorgement. On peut citer en exemple Fresno (Californie), les Nouvelles-Galles du Sud (Australie) et le secteur de Kom Ombo en Egypte, pour illustrer le fait que l'irrigation pratiquée sur des terrains situés en position haute a provoqué une salinisation rapide des terrains en contrebas. Dans les Nouvelles-Galles du Sud, il est prévu que les superficies susceptibles d'être perdues en l'absence d'un drainage convenable seront légèrement supérieures au tiers de la surface irriguée totale. En Egypte, on estime que cette proportion atteint 1/1.

LES PROBLEMES DE QUALITE DES EAUX

Lorsqu'on a recours à des retenues pour accroître l'importance des ressources en eau disponibles, on observe inévitablement un accroissement de la concentration en sels, qui peut ne pas être très élevé. Un changement qualitatif du même genre se produit dans les sytèmes de transport et de distribution de l'eau du fait de l'évaporation. En outre, les canaux recueillent parfois le ruissellement superficiel ou les eaux de drainage. Le ruissellement superficiel peut entraîner en solution des engrais, des pesticides ou des herbicides provenant des terres arables contiguës, alors que les eaux qui percolent en profondeur à partir des canaux peuvent contenir des quantités relativement élevées de sels dissous en plus des polluants chimiques.

Les recherches visant à étudier la pollution provoquée par les engrais montrent que, parmi les divers éléments nutritifs, seuls les nitrates rejoignent en quantité appréciable la nappe phréatique, et que leur concentration reste encore relativement faible (5 à 6 pour cent de la quantité totale appliquée en surface). Le ruissellement superficiel peut entraîner une quantité beaucoup plus élevée de phosphates et de nitrates vers les rivières et les lacs. Les données recueillies aux Etats-Unis montrent que des quantités considérables de nitrates et de phosphates ont pour origine les terres cultivées. En Hongrie, on a observé que, dans le bassin versant alimentant un lac, 30 pour cent seulement des éléments nutritifs provenaient de sources concentrées: les 70 pour cent restants atteignent les rivières et les lacs sous forme dispersée, dans la plupart des cas à partir des terres cultivées. Ces flux peuvent être réduits grâce à l'application de techniques culturales particulières (par exemple la culture en courbes de niveau). Sur les terrains plats et dans les périmètres irrigués nivelés, le ruissellement superficiel n'apparaît que rarement. Toutefois, certains exemples attirent l'attention sur le risque potentiel inhérent à la réutilisation des effluents des eaux d'irrigation. Un contrôle permanent et soigneux est indispensable, et on prévoit des règles impératives en matière de conduite de l'irrigation dans le cas où il est envisagé de réutiliser ces eaux.

Parmi toutes les modifications d'ordre qualitatif, la plus sérieuse est celle de la forte concentration saline de certaines eaux de drainage. Hotes et Pearson (1971) exposent que, le long du Rio Grande (Etats-Unis), la décharge annuelle moyenne a diminué de $1{,}33 \times 10^9$ m^3 à $2{,}58 \times 10^8$ m^3 par suite de l'irrigation, alors que la concentration saline (en ppm) passait de 221 à 1691. Dans la vallée de la Yakima (Etats-Unis), 160 000 ha environ sont irrigués. Les données qui caractérisent les transformations qualitatives sont présentées dans le tableau 3 (*ibid.*).

Tableau 3. *Modifications de la qualité des eaux de la rivière Yakima (Hotes et Pearson 1977).*

	Eau apportée	Eau circulant au-dessous de la surface	Drains de surface près de leur débouché dans la rivière
Conductivité (Micromhos/cm)	83	420	283
Nitrate (en NO)	1.1	11	3.5
PO total	0.32	0.86	0.83

L'accroissement du total des sels provoqué par l'irrigation a normalement pour effet d'accroître la dureté de l'eau de rivière. Les données du tableau 4 (*ibid.*) illustrent ce cas, qui s'avère favorable sur le plan agricole.

Tableau 4. *Dureté totale de l'eau de rivière, exprimée en mg/l de $CaCo_3$ (dans Hotes et Pearson 1977, d'après Eldridge 1963).*

	Irrigation	En aval de l'irrigation
Rio Grande (Texas)	111	631
Yakima (Washington)	33	134
Sunnyside (Washington)	40	299
Arkansas River	212	890
Sutter Basin (California)	72	480

Dans un certain nombre de cas, un système de collecte distinct doit être édifié pour éviter le mélange de l'eau douce et de l'eau des drains. On peut tenter de diminuer la quantité des eaux rejetées, et, étant donné qu'un lessivage complet ne peut alors être réalisé dans ces conditions, il faut lessiver les sels juste au-dessous de la zone racinaire: une partie d'entre eux se dépose, le reste demeure sur place dans le profil du sol (Van Schlifgaarde *et al.* 1974). Une telle élimination partielle des sels soulève deux sortes de problèmes présentant une certaine gravité (Hotes et Pearson 1977). Elle exige que l'aménagement des terres soit de haut niveau, et assorti d'un contrôle continu. En outre, il n'est pas encore démontré qu'un lessivage partiel assure une protection suffisante pour des périodes de longue durée. Il est important d'élucider cette question; lorsque le bilan des sels n'est pas totalement négatif, l'accumulation continue des sels et leur migration vers le haut peut-elle provoquer la dégradation des terres arables?

LES CONCEPTS D'EQUILIBRE EAU DU SOL-SELS

Les concepts d'équilibre entre eau du sol et sels sont ébauchés ici en prenant pour base le travail FAO-Unesco (1973) et les derniers travaux de Kovda et Szabolcs.

Les objectifs des études sur l'équilibre eau-sels sont les suivants (Kovda 1977):

- mettre en évidence les origines, la répartition, la composition chimique et les quantités totales des divers sels, ainsi que la dynamique de la salinisation dans le matériau originel du sol, dans l'eau employée pour l'irrigation et dans les eaux souterraines à l'intérieur du périmètre irrigué;
- évaluer les modifications possibles de l'équilibre eau-sels de ce périmètre, dès le début et aux divers stades des opérations d'irrigation et de drainage;
- déterminer le moment auquel s'établit un équilibre stable eau-sels, les concentrations salines optimales qu'il convient de maintenir dans le sol et les eaux de nappe, la profondeur optimale et critique du niveau de la nappe phréatique, les régimes les plus efficaces d'irrigation et de lessivage, lorsque ce dernier s'impose, les quantités totales et les proportions des eaux de drainage qu'il convient d'éliminer, et les éléments permanents des structures de drainage.

Il faut également étudier les modifications de l'équilibre eau-sels dans les zones contiguës, afin de déterminer l'étendue complète de la zone susceptible de subir l'influence de l'irrigation.

EQUILIBRE DE L'EAU ET DU SEL DANS LA ZONE RACINAIRE

Le but ultime du contrôle de l'eau est d'ajuster le taux d'humidité de la zone racinaire non saturée en fonction des besoins de la culture. La zone non saturée est toutefois située au centre du cycle hydrologique. C'est dans cette couche de faible épaisseur située entre la surface du sol et le sommet de la zone saturée constituant la nappe que l'eau percole vers cette nappe, retourne vers l'atmosphère du fait de l'évaporation et de la transpiration des végétaux, ou circule latéralement vers les zones adjacentes. A la suite de ces modifications affectant la circulation de l'humidité dans la zone radiculaire, le micro-climat peut subir une altération, le régime des eaux souterraines peut être modifié, et la qualité de l'eau de la zone concernée et de celle stockée dans la nappe peut subir l'influence du mouvement des sels.

La migration des sels dans le sol joue un rôle fondamental dans l'utilisation de l'eau par les plantes. Les précipitations qui s'infiltrent assurent le lessivage des horizons supérieurs et des sels solubles. L'évaporation des eaux de nappe qui remontent sous l'effet de la capillarité ramène ces sels solubles vers la surface du sol.

Un certain nombre d'équations de l'équilibre eau-sels ont été proposées par différents auteurs. L'une des formes les plus simples de

l'équation exprimant les flux d'entrée et de sortie du sel est la suivante (Kovda 1977):

Y--quantité d'eau d'irrigation pénétrant dans le système au cours d'une période déterminée
C--concentration des sels dans l'eau d'irrigation au cours d'une période déterminée
Q_1 & Q_2--débit naturel respectivement d'entrée et de sortie des eaux souterraines
C_1 & C_2--concentration des sels respectivement dans les flux d'entrée et de sortie des eaux souterraines
Qdr--débit d'évacuation des eaux de drainage
Cdr--salure réelle moyenne pondérée de la nappe dans une parcelle drainée (concentration saline de l'eau de drainage)
La forme de cette équation peut être modifiée comme suit:

$$\int_0^t \left[QC + Q_1C_1 + Q_2C_2 + QdrCdr\right] dt = \Delta S \quad \text{avec:}$$

ΔS--changement de la teneur en sel dans la zone étudiée au cours d'une période déterminée (0,t);
Q--débit d'arrivée de l'eau d'irrigation

Les concepts de base de l'équilibre eau du sol-sels ont été mis au point à l'occasion de tentatives visant à mettre en évidence les origines, la répartition, la composition chimique, et les quantités totales des divers sels, ainsi que la dynamique de la salinisation dans le sol, dans l'eau utilisée pour l'irrigation et dans les eaux de nappe à l'intérieur de la zone irriguée. Une équation précise permettrait d'évaluer les changements possibles de l'équilibre eau-sels dans le secteur concerné, depuis le début de l'irrigation et aux divers stades de la poursuite des opérations, et de déterminer en quel point se situe un équilibre stable eau-sels. Il est possible d'estimer les concentrations optimales en sel, la profondeur optimale et la profondeur critique du niveau de la nappe phréatique et les régimes les plus efficaces d'irrigation et de lessivage, lorsque celui-ci est nécessaire dans des conditions déterminées de climat, de sol et de plante cultivée (Kovda 1977). Le facteur dominant dans la régulation du bilan des sels est la réalisation d'un drainage efficace des eaux de nappe salées.

Les terres soumises à l'irrigation peuvent subir une dégradation par suite d'une remontée des eaux de la nappe entraînant un engorgement, ou par suite de la salinisation (que celle-ci soit due à une forte salure des eaux de la nappe, ou à la dissolution des sels présents en phase solide dans la zone racinaire lors de la remontée d'eaux de nappe douces), ou encore par suite d'une alcalisation. Des problèmes particulièrement ardus apparaissent dans le cas d'une salinisation secondaire par la soude (alcalisation). Le mécanisme de sursaturation le plus facile à contrôler est l'élimination des sels par les eaux de drainage. En faisant appel à la première équation, si l'on n'a pas recours au drainage, le fonctionnement du système d'irrigation est commandé par YC, Q_1C_1 et Q_2C_2. La salinisation secondaire du sol ne se produira pas si $YC + Q_1C_1 = Q_2C_2$. Lorsqu'il y a un excédent, on assitera à une remontée de la nappe, à une salinisation et à l'engorgement du sol irrigué. L'introduction d'un drainage artificiel (*Qdr*) et l'élimination des sels de la nappe phréatique (*Cdr*) par lessivage à l'aide du réseau de drainage transformera un bilan de sels positif (accumulatif) en un bilan négatif (désalinisation). Au cours d'un processus réussi d'amélioration, les valeurs de *Cdr* et de *Qdr* doivent s'abaisser considérablement. L'équation ci-dessus est applicable dans le cas où les réserves initiales en sels du sol sont éliminées; dans le cas contraire, il faut introduire dans l'équation un paramètre supplémentaire.

LES CONCEPTS DE QUALITE D'EAU D'IRRIGATION

Dans de nombreux pays du monde, les eaux d'irrigation sont caractérisées par une minéralisation en augmentation, pouvant se situer entre 1 et 5 g/litre, et par une prédominance très fréquente du sodium parmi les cations présents. Dans de nombreux cours d'eau, au cours de la dernière décennie, on a assité à un accroissement de la minéralisation qui est passée de 0,2-0,3 g/litre à 0,6-1,0 g/litre, en raison des phénomènes suivants: régularisation du débit des cours d'eau, de l'utilisation de l'eau par les cultures et du rôle croissant de l'évaporation; utilisation accrue d'eaux recyclées qui ont déjà transité à travers les profils des sols irrigués; augmentation régulière du volume et de la concentration des eaux résiduaires et des eaux de drainage; et décharge des eaux urbaines, minières et industrielles dans les rivières.

L'accroissement futur de la construction des réseaux de drainage dans les systèmes d'irrigation, parallèlement à l'extension des superficies irriguées, sera accompagné d'un accroissement des teneurs en éléments minéraux et en sodium des eaux dans les cours moyen et inférieur des rivières. Dans un proche avenir, l'utilisation d'eaux minéralisées pour l'irrigation deviendra une pratique plus fréquente, du fait de l'amoindrissement des ressources en eaux douces. Les irrigants devront utiliser davantage les eaux de drainage et les eaux artésiennes, ainsi que les eaux diluées des anses marines, des deltas et des estuaires des fleuves.

L'expérience pratique et scientifique accumulée en Tunisie, en Egypte, et en URSS a permis de fixer à 10-12 g/litre les limites de toxicité de la concentration en chlorures et en sulfates de la solution du sol dans la zone racinaire. Dans des conditions de drainage favorables, il est possible d'utiliser des eaux ayant une teneur en sels minéraux de 2 à 7 g/litre pour irriguer certaines cultures, mais pas toutes. Toutefois, un accroissement de la concentration saline dans l'eau d'irrigation conduira à une augmentation brutale du débit à la sortie du système d'irrigation, conformément à l'équation de l'équilibre eau-sels. Il en résultera une augmentation de la fréquence des lessivages nécessaires, des coefficients de drainage et des volumes d'eau minéralisée à drainer et à rejeter hors du système. Le tableau 5 présente les estimations faites par Kovda (1977) concernant les conditions générales d'utilisation des eaux minéralisées en irrigation.

Lorsque le sodium atteint une proportion de 60 à 70 pour cent de la somme des cations, le processus d'accumulation du sodium échangeable dans le sol irrigué peut conduire graduellement à l'alcalisation. Ce phénomène ne se produit pas lorsque les eaux minéralisées à 2 à 5 g/litre contiennent du gypse dissous.

Les eaux minéralisées peuvent être utilisées en irrigation avec un maximum de sécurité dans les sols légers sableux ou graveleux à perméabilité élevée, à faible capacité de rétention d'eau et à pouvoir absorbant restreint.

On sait maintenant qu'il n'existe pas de critère universellement valable pour juger de la qualité d'une eau d'irrigation, et qui puisse être appliqué dans les conditions qui régissent les zones à drainage naturel entravé et à niveau piézométrique élevé.

Des critères nouveaux ont été étudiés pour l'URSS (Kovda 1977) et pour l'Inde (Bhumbla et Abrol 1972; Bhumbla 1977).

ENGORGEMENT, SALINISATION ET ALCALISATION

La dégradation du sol est imputable dans une large mesure au fait que les systèmes d'irrigation, dans la majorité des cas, ont une efficacité extrêmement faible, qui n'atteint en moyenne que 30 à 50 pour cent. Des pertes d'eau énormes sont provoquées par l'infiltration dans les canaux (jusqu'à 40-45 pour cent de l'apport en tête de réseau) et dans les parcelles irriguées. Mais le danger d'engorgement des terres irriguées persiste alors même que le système d'irrigation a bénéficié d'une amélioration de la technologie et de son équipement.

L'engorgement est un phénomène fréquent dans la majorité des systèmes d'irrigation du monde entier. La remontée du niveau de la nappe peut être rapide dans certains cas, atteignant alors plusieurs mètres en une année, mais elle est généralement de l'ordre de quelques centimètres par an. De toute façon, chaque fois que le drainage est défectueux, ce processus est inévitable.

La plupart des cas de salinisation secondaire du sol sont associés à une remontée du niveau piézométrique, et ils sont imputables soit à la salure élevée des eaux de nappe, soit à la dissolution des sels en phase solide par la remontée d'eaux de nappe non salées.

Des problèmes particulièrement graves apparaissent avec la salinisation secondaire sodique (alcalisation) des sols irrigués. Beaucoup de pays d'Asie, d'Afrique, d'Europe et d'Amérique du Nord et du Sud subissent ce processus d'alcalisation (Aubert 1965). Il est provoqué par des eaux de nappe alcalines (0,5-1,0-2,0 g/litre) ou par des eaux d'irrigation diluées contenant de la soude (le Nil et l'Indus, les eaux de nappe de Californie, de Hongrie, du Pakistan, du sud et du centre de l'Ukraine), ou par ces deux phénomènes à la fois (Kovda 1977). Dans les cas extrêmes, le complexe absorbant du sol se sature de

Tableau 5. *Concentration saline, lessivage et élimination des éléments minéraux*

Concentration saline (sans le sodium) de l'eau d'irrigation, g/l	Fréquence des lessivages du sol	Elimination de l'eau de drainage en pourcentage de l'apport total
0,5 - 1,0	Une fois en 1 ou 2 ans	10 - 15
1,0 - 2,0	Une ou deux fois par an	20 - 25
2,0 - 3,0	Plusieurs fois par an	30 - 35
4,0 - 5,0	Chaque épandage d'eau doit jouer le rôle d'un lessivage	50 - 60

sodium dans une proportion de 50 à 70 pour cent de la capacité d'échange de cations, et l'alcalinité du sol peut s'élever jusqu'à un pH compris entre 9 et 11. Il en résulte généralement une dégradation du sol par dispersion et par tassement. L'amélioration des sols les plus gravement touchés exige l'application simultanée d'un drainage horizontal profond (associé à un drainage vertical lorsque la nappe est captive), et d'un apport de doses massives d'améliorants chimiques pour lessiver les sels en excès. Cette mesure peut comporter l'application de fortes doses de fumures organiques, et l'utilisation permanente d'acide et d'engrais chimiques qui ne seront pas nécessairement physiologiquement acides.

Les origines de l'alcalisation du sol peuvent être très variées selon la diversité des conditions naturelles:

1. résiduelles;
2. actives, résultant de l'existence d'une frange capillaire alcaline au-dessus de la nappe;
3. secondaires, après la remontée d'une nappe alcaline;
4. secondaires, du fait d'une irrigation avec des eaux alcalines;
5. secondaires, résultant d'un échange de cations entre les eaux d'irrigation ou les eaux de nappe remontantes et la phase solide du sol;
6. résultant du dessalement de solontchaks gypseux à chlorures et sulfates.

Les causes de l'alcalisation doivent être étudiées cas par cas avant de prescrire toute mesure de restauration.

NUTRITION DE LA PLANTE ET REPONSE A LA SALURE

Les mécanismes de la sursaturation des plantes par des sels non organiques ne sont pas encore parfaitement élucidés, mais certains points ont déjà pu être établis:

- Il n'y a pas de relation directe entre l'intensité de l'absorption de l'eau et la teneur en sels des végétaux.
- L'intensité de l'absorption des sels est réglée par la perméabilité des tissus et par leur taux de saturation en minéraux.
- Le métabolisme de la plante exerce un effet sur l'absorption des sels.
- La réponse à la salure provoque une modification du métabolisme de la plante.

Le changement le plus important affectant la nutrition de la plante concerne les caractéristiques et l'intensité du métabolisme de l'azote avec accumulation d'ammonium et d'acides aminés libres. Le premier de ces éléments joue un rôle antagoniste; les deux derniers sont impliqués dans la résistance du végétal à la salure. Il est tout à fait démontré que les types de salure exercent une forte influence sur la nutrition minérale de la plante, et qu'ils affectent les rapports calcium/potassium, sodium/calcium, sodium/magnésium et calcium/magnésium.

Lorsqu'on étudie les valeurs critiques de la salure du sol pour certains groupes de plantes, il est extrêmement difficile de fixer des valeurs universellement applicables. Ce fait est dû à ce que d'autres facteurs se superposent aux effets complexes de la salure. Le niveau de salure admissible ne dépend pas seulement du végétal considéré, mais aussi de la production qui en est attendue, du sol, du climat, de l'intervalle séparant deux irrigations, et d'autres facteurs encore. Pour cette raison, il convient que les recherches sur les facteurs limitants de la production aient un caractère intégré.

LES MESURES TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA DEGRADATION DU SOL

La dégradation du sol sous l'effet de l'irrigation continue ne peut être évitée que par un ensemble de mesures d'améliorations dans le cadre d'un aménagement rationnel. Certains systèmes de culture ont pratiqué un aménagement dans de telles conditions depuis des siècles. D'autres ont provoqué une dégradation rapide du sol. Le système sol-eau d'une parcelle irriguée est complexe et fragile. Il ne peut être manipulé efficacement par l'application d'une mesure unique. Le génie civil le plus élaboré restera sans effet s'il n'est pas accompagné d'une application intégrée de mesures agronomiques, agrochimiques et agrobiologiques.

Une mesure de caractère préventif et curatif est le revêtement des canaux au moyen d'une pellicule imperméable et la construction de tuyaux (Kovda 1977). Une seconde mesure est la mise en place obligatoire d'un réseau de drainage maintenant la nappe en profondeur, afin d'éliminer tout risque de remontée prévisible.

En troisième lieu, lorsque les eaux de nappe salées sont proches de la surface et que des sels solubles existent dans les sols, il convient de réaliser conjointement un drainage horizontal et un lessivage. La salinisation secondaire n'apparaîtra pas dans les systèmes d'irrigation de réalisation récente s'ils ont été équipés d'un réseau de drainage horizontal profond, si les parcelles ont été soigneusement nivelées, si le lessivage initial des sels

solubles a été effectué lorsqu'il s'avérait nécessaire, et si l'aménagement technique a été convenablement réalisé.

Enfin, il est souhaitable de mettre en place des systèmes d'irrigation convenablement équipés, conçus pour permettre des contrôles au moyen d'appareillages sophistiqués, et pour procurer une information d'actualité aux aménageurs. La plupart des scientifiques et des spécialistes de l'irrigation dans le monde sont d'accord pour estimer qu'il faut freiner la tendance à l'emploi d'eau en excès et promouvoir le drainage. Le seul point de désaccord réside dans les moyens nécessaires et dans la possibilité économique de le faire.

En ce qui concerne les problèmes spécifiques de la salinisation sodique, les principales mesures à adopter pour combattre ce phénomène comportent: l'aménagement rationnel des ressources en eau, l'efficience des systèmes d'irrigation, la prévention d'une remontée ou d'un abaissement possibles des eaux de nappe, et l'élimination des eaux alcalines par drainage.

Théoriquement, on dispose d'un ensemble de mesures pour combattre la dégradation du sol consécutive à l'irrigation. La plus importante et la plus efficace est la mise en place d'un complexe de réseaux d'irrigation et de drainage bien équilibrés, fonctionnant à la manière d'un mécanisme coordonné de régulation de l'eau. En réalité, l'application rationnelle des connaissances acquises se heurte à de nombreuses difficultés, par exemple: l'absence de données détaillées sur les sols, la géologie, l'hydrogéologie et l'hydrochimie au moment de la conception du système; l'absence de surveillance continue des processus affectant le sol et les eaux pendant le fonctionnement du système; l'absence d'aménageurs de haute qualification; l'absence de spécialistes qualifiés participant aux divers stades des opérations sur le terrain pour aider les aménageurs; et un niveau généralement bas des connaissances en matière d'irrigation chez de nombreux cultivateurs. Dans beaucoup de cas, il y a conflit entre la technologie moderne de l'irrigation, qui constitue la base des systèmes d'irrigation actuels, et la technologie ancienne de l'irrigation traditionnelle. Toutefois, les pratiques traditionnelles peuvent parfois s'avérer très complexes, et elles ont peut-être empêché la dégradation de se manifester. Dans d'autres cas, la pratique populaire a accéléré la dégradation des sols.

Pour combattre avec succès la dégradation des sols sans irrigation continue et faire en sorte que les systèmes d'irrigation soient bénéfiques et efficaces, il faut appliquer les méthodes préventives et curatives connues, ce qui nécessite de surmonter les obstacles existants. La science et la tradition mettant à notre disposition des connaissances et une technologie sophistiquée. Encore convient-il de savoir comment utiliser au mieux ces connaissances.

ESTIMATION DE L'EXTENSION, DE LA GRAVITE ET DE LA RAPIDITE DE LA TRANSFORMATION DU SOL

Selon El Gabaly (1976), la salure et l'engorgement sont des problèmes fréquents dans les pays du Proche-Orient. Ils sont associés à une utilisation irrationnelle de l'eau d'irrigation, à l'absence d'un drainage convenable, à l'emploi d'une eau de mauvaise qualité, et à l'absence d'un aménagement rationnel. On estime que le pourcentage des sols affectés par la salure et l'engorgement atteint jusqu'à 50 pour cent de la superficie irriguée en Irak, 23 pour cent dans l'ensemble du Pakistan, 50 pour cent dans la vallée de l'Euphrate en Syrie, 30 pour cent en Egypte, et plus de 15 pour cent en Iran.

La remontée du niveau de la nappe phréatique atteint plusieurs mètres par an, parfois de 3 à 5 mètres. Dans de nombreux cas, un peu partout dans le monde, la nappe phréatique est passée, en une dizaine d'années de 25 à 30 m de profondeur (par rapport à la surface du sol) à 1 ou 2 mètres seulement. Lorsque les eaux du sous-sol sont salées, il en résulte inévitablement une salinisation secondaire des terres irriguées.

Selon les données de la FAO, une proportion appréciable des terres irriguées du globe est affectée par la salure. Les rendements diminuent sensiblement. Certaines terres sont maintenant totalement incultes. Chaque année, plusieurs centaines de millions d'hectares de terres irriguées présentent des problèmes d'aménagement du fait de la salinisation (Kovda 1977).

Bien que l'accroissement de la salure des sols irrigués soit un phénomène pratiquement universel, il existe un petit nombre d'exemples encourageants de réussite dans la prévention de la dégradation et l'amélioration de terres initialement salées. Dukhovny et Litvak (1977) donnent en exemples les systèmes d'irrigation de la rivière Vakhoh (Tadjikistan, URSS); les oasis de Chardzhou et Khorezm sur l'Amou Daria (Turkménie, URSS); la steppe de Golonadja et de la vallée de Fergana sur le Syr-Daria (Ouzbékistan, URSS); les processus de salinisation y ont été complètement arrêtés, et les sols salins dessalés et remis en culture

avec de bons résultats. Ces résultats ont été obtenus grâce à un drainage horizontal profond, à un lessivage des sels conformément aux concepts du bilan des sels, à l'application sélective d'un drainage vertical par pompage, à la réalisation d'une étanchéité effective des canaux, et à un aménagement rationnel généralisé des ressources en eau.

Malheureusement, les expériences positives ne sont pas très fréquentes dans le monde. Comme le remarque Kovda (1977), la plupart des pays qui ont introduit l'irrigation, et plus particulièrement les pays en voie de développement, continuent d'appliquer certaines pratiques néfastes:

- ils ignorent les caractéristiques particulières des sols naturels de chacune des régions, négligent de tenir compte du niveau de la nappe phréatique, de sa minéralisation et de sa composition chimique, ils ne tiennent pas compte de la salure des sols jusqu'au niveau piézométrique, ni des conditions du drainage naturel;
- ils mettent en place des installations d'irrigation dépourvues de système de drainage profond, dans l'espoir de réaliser des installations "moins coûteuses";
- ils appliquent des quantités d'eau excessives et autorisent des pertes importantes d'eau au niveau de la parcelle et dans les canaux d'irrigation non revêtus.

La superficie totale des sols affectés par la salure est considérable à l'échelle du globe, et elle est un bon indicateur de la gravité des phénomènes en question. Le tableau 6 (FAO-Unesco 1973; Unesco-FAO en cours de publication depuis 1971; Szabolcs 1974; Worthington 1977) donne un aperçu de la répartition des sols affectés par la salure dans les divers pays.

Le trait dominant est celui d'une vulnérabilité généralisée à la salinisation et à l'alcalisation. On ne dispose pas de précisions sur l'importance des surfaces abandonnées en fait, ni sur les vitesses de dégradation. Le chapitre XI, après avoir passé en revue d'autres aspects de l'irrigation et du drainage qui concernent l'environnement, formule des recommandations en vue de définir les tendances dans ces domaines.

IV. LA MODIFICATION DES ECOSYSTEMES AQUATIQUES

L'irrigation constitue l'un des éléments d'un ensemble complexe de pratiques, et elle comporte: l'aménagement des ressources en eau disponibles, la distribution contrôlée de cette eau sur les terres cultivées, et l'évacuation de l'eau en excès grâce au drainage. Parmi les conséquences écologiques de ce processus complexe, on peut citer:

1. la création de systèmes écologiques nouveaux associés aux unités hydrologiques (réservoirs pour l'irrigation, canaux d'irrigation, fossés de drainage, etc.);
2. la modification radicale des systèmes écologiques de l'habitat terrestre. Ce dernier aspect concerne les pratiques de l'irrigation, du labour, le mode de culture, etc.

Certaines de ces modifications écologiques peuvent être conçues comme le passage d'une situation éphémère à une situation permanente. Les unités hydrologiques sous forme d'étangs et de mares de tailles diverses, et les unités d'eaux courantes des ouaddis (torrents) sont des unités éphémères, expression d'accidents tels les tornades violentes des pays arides. Elles permettent l'apparition d'une vie aquatique, de durée limitée il est vrai. Mais lorsque des périmètres d'irrigation sont mis en place, les retenues dues à l'homme, les canaux d'irrigation, les fossés de drainage, et les lacs dans lesquels s'écoulent les eaux de pluie deviennent des unités hydrologiques permanentes qui peuvent abriter des types de vie aquatique étrangers aux terres arides.

Le présent chapitre porte sur les modifications majeures apportées aux écosystèmes aquatiques, plus particulièrement les lacs et les canaux artificiels, dans la mesure où elles ont une incidence sur les processus de transformation de l'énergie. Il est suivi d'un chapitre qui trace une esquisse de la relation entre ces modifications et les écosystèmes terrestres et qui étudie les possibilités d'associer l'irrigation au développement d'autres ressources dans les pays arides.

LA PHOTOSYNTHESE

L'objectif de toute forme d'irrigation est d'accroître la proportion de l'énergie solaire qui est transformée au profit de l'homme par le biais de la photosynthèse. Dans une prairie par exemple, cette proportion représente environ 1 pour cent de l'énergie solaire totale parvenant au sol; dans un désert, elle tombe à zéro, sauf pour de courtes périodes aussitôt après

Tableau 6. *Répartition des sols affectés par la salure dans les principaux pays concernés (superficies en milliers d'hectares) (d'après Kovda 1977).*

Pays	Solontchaks	Phase saline	Solonetz	Phase alcaline	Total
Amérique du Nord					
Canada		264	6 974		7 238
Etats-Unis		5 927	2 590		8 517
Amérique Centrale					
Cuba		316			316
Mexico	242	1 407			1 649
Amérique du Sud					
Argentine	1 905	30 568	11 818	41 321	85 612
Bolivie		5 233	716		5 949
Brésil	4 141		362		4 503
Chili	1 860	3 140		3 642	8 642
Colombie	907				907
Equateur	387				387
Paraguay		20 008	1 894		
Pérou	21				21
Vénézuela	1 240				1 240
Afrique					
Afars et Issas (Territoire des)	59	1 682			1 741
Algérie	1 132	1 889		129	3 150
Angola	126	314	86		526
Botswana	1 131	3 878		670	5 679
Cameroun				671	671
Egypte	3 283	4 077			7 360
Ethiopie	319	10 289		425	11 033
Gambie		150			150
Ghana	200			113	318
Guinée		525			525
Guinée Bissau		194			194
Kenya	3 501	909		448	4 858
Libérie		362			362
Libye	905	1 552			2 457
Madagascar	37			1 287	1 324
Mali		2 770			2 770
Maroc	42	1 106			1 148
Mauritanie	150	490			640
Niger			11	1 378	1 489
Nigéria	455	210		5 837	6 502
Rhodésie				26	26
Sénégal	141	624			765
Sierra Leone		307			307
Somalie	1 043	526	3 754	279	5 602
Soudan		2 138		2 736	4 874
Sud-Ouest Africain	562		1 751		2 313
Tanzanie		2 954		583	3 537
Tchad	2 417		3 728	2 122	8 267
Tunisie	990				990
Zaïre		53			53
Zambie				863	863

Tableau 6. *(Suite).*

Pays	Solontchaks	Phase saline	Solonetz	Phase alcaline	Total
Asie Méridionale					
Afghanistan	2 924	177			3 101
Arabie Saoudite	6 002				6 002
Bangladesh		2 479		538	3 017
Birmanie	634				634
Emirats Arabes Unis	1 089				1 089
Inde	2 979	20 243		574	23 796
Iran	24 817	1 582		686	27 085
Irak	6 679	47			6 726
Israël	28				28
Jordanie	74	106			180
Koweit	209				209
Mascate et Oman	290				290
Pakistan	1 103	9 353			10 456
Qatar	225				225
Sarawak		1 538			1 538
Sri Lanka	180	20			200
Syrie		532			532
Asie Septentrionale et Centrale					
Chine	7 307	28 914		437	36 658
Mongolie	3 728	342			4 070
Salomon (Iles)		238			238
URSS	11 430	39 662	30 062	89 566	170 720
Asie du Sud-Est					
Indonésie		13 213			13 213
Malaisie		3 040			3 040
Kampuchea Démocratique		1 291			1 291
Thaïlande		1 456			1 456
Viêt-Nam		983			983
Australasie					
Australie	16 567	702	38 111	301 860	357 340
Fidji		90			90
Europe					
Bulgarie					
Espagne					
France					
Hongrie		Font l'objet d'observations fréquentes mais ne sont pas répertoriés			
Italie					
Tchécoslovaquie					
Turquie					
Yougoslavie					

la pluie. Dans les plantations sucrières irriguées et correctement aménagées, cette proportion peut atteindre 1,9 pour cent. On a fait état de valeurs de l'ordre de 10 pour cent pour le maïs et le tournesol dans des conditions agronomiques exceptionnelles près du Caire (Cooper 1975).

Dans l'eau, le processus est tout à fait analogue à celui observé sur le sol, à cette réserve près que la photosynthèse est généralement réalisée par les algues au lieu de plantes supérieures. Les algues subissent une transformation lorsqu'elles sont consommées par les poissons, soit directement, soit par l'intermédiaire d'autres organismes dans la chaîne alimentaire aquatique, ce qui se traduit par une réduction de l'efficacité de la photosynthèse primaire de l'ordre de 5 à 50 pour cent avant que l'énergie ne parvienne jusqu'à l'homme par l'intermédiaire de sa nourriture.

Ce concept de flux d'énergie à travers les systèmes biologiques a été fortement mis en relief par le Programme Biologique International (1964-1973). Il est applicable aux écosystèmes naturels de la même façon qu'aux systèmes agronomiques plus simples de la monoculture. Sous un climat chaud et aride, si les caractéristiques physiques du sol sont favorables et si l'humidité se trouve en quantité suffisante grâce à l'irrigation, le flux d'énergie et, par conséquent, la croissance des végétaux sont normalement limités par des facteurs chimiques, dont le plus important est généralement l'azote. On voit donc se dessiner l'importance considérable des végétaux fixateurs d'azote, qui sont le plus souvent des légumineuses associées aux bactéries présentes dans leurs modules radiculaires, mais quelquefois aussi des arbres et des arbustes; et on sait maintenant que, dans les eaux, une quantité appréciable d'azote est fixée et mise sous une forme utilisable pour la production biologique par une algue bleu-vert ou *Cyanophycée* (Stewart 1975; Nutman 1976).

LES RESERVOIRS POUR L'IRRIGATION

Pour pouvoir disposer en toute sécurité d'un approvisionnement en eau pour les périmètres irrigués ainsi que pour les besoins domestiques ou au niveau de l'exploitation agricole, il est assez fréquent que les fleuves et les rivières soient barrés ou détournés, donnant naissance à des étangs ou à de vastes retenues, dont les effets sur l'environnement sont parfois considérables. En 1960, on estimait qu'il y avait au Canada près de 10 000 étangs, et aux Etats-Unis peut-être un million. Dans les pays en voie de développement, par exemple dans la région de Machakos au Kenya, de nombreux petits barrages et de nombreuses retenues ont été créés pour l'agriculture.

L'écosystème terrestre soumis à une inondation subit une dégradation irréversible. Les végétaux meurent ou dépérissent, ce qui bouleverse l'équilibre des gaz dans le milieu aquatique et accroît les dépôts de matière organique sur le fond. La texture du sol est modifiée, la compacité disparaît, et des particules et des éléments nutritifs sont libérés dans les eaux qui se concentrent et dont la qualité chimique et physique subit une altération. La nature des produits apportés par les eaux dépend dans une large mesure de la géologie et des sols du bassin bersant. Lorsque le volume de ces eaux s'accroît, en particulier dans les bassins à grande superficie, et lorsque la vitesse d'écoulement diminue, les espèces animales qui ne sont pas adaptées à la vie dans des eaux profondes et immobiles disparaissent. Dans des cas de ce genre, il est plus facile d'observer le comportement du poisson, et on a signalé des hécatombes de poissons consécutives à l'inondation des bassins fluviaux. Les transformations qui interviennent dans cet écosystème instable ont une incidence sur la vie aquatique à différents niveaux, et plus particulièrement sur les bactéries, le plancton, les algues et les insectes, dont le cycle de développement comporte certains stades aquatiques. Les insectes en question peuvent pulluler dans les conditions nouvelles ainsi créées, et ils entrent alors dans la catégorie des nuisances. La région de Wadi Halfa, contiguë au lac de Nubie, fut affectée à ce point par la pullulation de *Tanytarsus* qu'un camp d'asthmatiques dut être édifié dans le désert, et que l'évacuation de la ville fut sérieusement envisagée.

La teneur élevée des eaux en sédiments et en limons accroît la turbidité. L'érosion des zones inondées et des berges augmente le taux des matières dissoutes et en suspension. Il se peut aussi que le vent transporte des quantités appréciables de particules de sol vers les retenues d'eau, en particulier dans les zones arides. Il en résulte que ces retenues voient leur capacité de stockage diminuer. Avec le temps, et au fur et à mesure de la sédimentation des suspensions sur le fond, la transparence des eaux s'améliore progressivement. Ecologiquement, un tel processus présente une double signification: avec le dépôt des sédiments, une quantité considérable d'éléments nutritifs qui auraient eu un rôle bénéfique lors de l'utilisation de l'eau en aval sont

mis hors circuit, temporairement ou définitivement; et des sels minéraux tels que le fer et le manganèse sont perdus dans les dépôts de sédiments.

Parmi les nombreux exemples d'une forte dégradation de la qualité des eaux dans les retenues du fait de la sédimentation, celui du grand barrage d'Assouan a fait l'objet d'une large publicité. Il a été avancé que la modification de la qualité des eaux en aval avait eu des incidences néfastes sur les terres irriguées, mais certains faits récents montrent que les pertes subies sont moindres qu'il n'avait été prévu. La sédimentation qui se produit dans les eaux du lac retient chaque année un total de 1 950 tonnes de limons qui étaient autrefois déposées sur une superficie irriguée d'un million d'hectares environ. Il a été calculé que cette perte peut être remplacée en partie par un apport de 13 000 tonnes de nitrate de calcium.

Au contraire, lorsque la turbidité de l'eau du réservoir et de l'eau qui s'écoule à l'aval est réduite, la pénétration de la lumière solaire augmente, et avec elle l'activité photosynthétique. En général, dans les eaux d'une retenue nouvellement créée, l'apport d'une eau riche en éléments nutritifs et l'important volume occupé par le milieu permettent une multiplication extensive. On observe fréquemment la prolifération des genres *Microcystis, Synedra* et d'autres algues bleu-vert. Le goût et l'odeur des eaux des retenues peuvent être altérés par le développement excessif et le dépérissement de ces algues, ce qui peut poser un problème sérieux lorsque l'eau est employée à des usages domestiques. Il a été signalé que la prolifération des genres *Anabaena, Gymnodinium, Aphanizomenon* appartenant aux algues bleu-vert pouvait provoquer la mort de mammifères, d'oiseaux et de poissons.

Un avantage supplémentaire de la sédimentation dans des retenues relativement peu profondes réside dans l'accroissement des substances nutritives disponibles pour les consommateurs des fonds lacustres. Dans le lac Volta, les quantités énormes de matière organique et de matériel végétal en voie de décomposition contribuent à accroître fortement la population des poissons, en particulier des espèces *Tilapia* et *Labeo*, pendant les premiers temps de la vie du barrage; les quantités capturées dans la région de faible profondeur au voisinage d'Afram sont considérables. Les élevages de poissons dans les petits étangs locaux réagissent de la même façon, en particulier lorsqu'ils sont approvisionnés.

La dimension et le volume d'un réservoir déterminent dans une large mesure ses caractéristiques physiques et chimiques. Lorsque les réservoirs sont profonds, et en particulier dans les régions tempérées, il se produit une stratification des eaux, et les modifications limnochimiques imposent des limites à la productivité globale. Dans de telles circonstances, l'activité biologique tend à se concentrer dans l'épilimnion qui est soumis à l'agitation et à l'oxygènation de l'eau, et qui reçoit également en quantité suffisante lumière solaire et chaleur. Le niveau de concentration de quelques éléments chimiques et nutritifs dissous varie en fonction de la profondeur. En règle générale, l'activité limnologique diminue progressivement avec l'augmentation de la profondeur, et, dans les zones profondes de l'hypolimnion, lumière et oxygène font généralement défaut. La décomposition prend alors un caractère anaérobie, provoquant souvent l'apparition d'odeurs désagréables et d'hydrogène sulfuré lorsque l'eau de profondeur est lâchée.

La température de l'eau subit aussi une stratification, et elle tend à prendre des valeurs basses. Il a été rapporté que l'irrigation du riz avec des eaux froides captées à grande profondeur pouvait diminuer le rendement ou retarder de façon significative la germination. Bien que la stratification de la température n'ait pas un caractère permanent dans les étangs peu profonds et dans les régions tropicales, il subsiste un doute quant aux raisons de la variation de la qualité des eaux retenues à différentes profondeurs.

Il est possible de conserver certaines eaux d'irrigation en les mettant en réserve dans des couches souterraines. Même dans ces conditions, la qualité de l'eau peut être significativement altérée du fait de la percolation des effluents industriels, domestiques ou agricoles.

CANAUX ET FOSSES, ET CONTAMINATIONS

C'est peut-être au cours des phases du transport et de la distribution qu'apparaissent le mieux les modifications des caractères du milieu aquatique. L'eau d'un cours d'eau, d'une retenue ou d'un réservoir de stockage souterrain est affectée par l'évaporation lorsqu'elle circule dans le système de distribution. Ainsi qu'il a été signalé dans le chapitre précédent, le contenu minéral de l'eau d'irrigation peut alors augmenter. Lorsque les canaux d'irrigation et les drains sont aussi contaminés par des effluents domestiques, la concentration de l'eau en éléments nutritifs peut s'accroître et le niveau trophique en être altéré.

Leurs rapports peuvent varier fortement tout au long du trajet suivi par l'eau dans le système d'irrigation. Au fur et à mesure de l'évaporation de l'eau, il se produira une précipitation de carbonate et de sulfates de calcium, ce qui provoquera un accroissement de la concentration des sels de sodium. Il en résultera que l'eau d'irrigation deviendra de plus en plus alcaline au fur et à mesure de sa progression dans le système de distribution.

Les éléments nutritifs principaux nécessaires à la croissance des organismes aquatiques sont le magnésium, le calcium, le sodium, le potassium, les carbonates et bicarbonates, les chlorures, les nitrates, les sulfates et les phosphates, les exigences et les niveaux de tolérance spécifiques différant selon les espèces végétales et animales.

Les pesticides, les herbicides et les engrais chimiques utilisés en agriculture irriguée moderne alourdissent la charge en produits chimiques que l'on trouve dans les écosystèmes aquatiques. On ne connaît que peu de choses sur leurs effets globaux et à long terme, mais on peut signaler quelques unes des relations connues. On a signalé certaines réactions de la flore et de la faune d'eau douce, des simples protozoaires aux vertébrés complexes et des bactéries et du phytoplancton aux plantes vasculaires. La plupart des pesticides semblent avoir un effet néfaste sur les organismes qu'ils ne combattent pas spécifiquement, parmi lesquels figure l'homme. Les pesticides et les herbicides toxiques peuvent provoquer une mort brutale. *Daphnia*, la puce d'eau qui est l'une des composantes essentielles de nombreux écosystèmes d'eau douce, est connue pour être rapidement exterminée sous l'action d'une large gamme d'insecticides. Les substances chimiques utilisées en agriculture détruisent également le phytoplancton et les algues, dont le rôle est bénéfique. Les exemples de destruction des invertébrés d'eau douce sont nombreux. Le toxaphène et la roténone réduisent l'effectif des populations de moucherons des réservoirs du Colorado. Les poissons sont souvent décimés à la suite d'un contact avec des produits chimiques, alors que les résidus s'accumulent dans le corps des poissons vivants et qu'ils peuvent y demeurer pendant une période très longue. Il est bien connu que les pesticides ont des niveaux de persistance différents. Par exemple, on pense que les produits du groupe des organo-phosphorés se dégradent plus rapidement que les composés chlorés des chaines hydro-carbonées, qui peuvent s'accumuler chez l'homme (Hotes et Pearson 1977). Pour certains des pesticides les plus communs, les concentrations qui peuvent être tolérées par l'homme ont fait l'objet d'estimations qui donnent lieu à controverses. En ce qui concerne le DDT, la concentration dans les réserves d'eau destinées à la population ne peut pas dépasser 0,056 mg/litre. Toutefois, le DDT s'accumule en grandes quantités dans le poisson, et il peut exercer ses effets sur les êtres humains qui s'en nourrissent.

Certains faits permettent de penser que la contamination de l'eau par les pesticides résulte davantage d'un apport direct dans l'eau que d'un ruissellement sur les terrains cultivés. Les eaux qui circulent au-dessous de la surface ne paraissent pas constituer un moyen de transfert direct vers les rivières et les retenues. En règle générale, on estime que les pesticides peuvent persister plus longtemps dans l'eau que dans le sol, et il est probable que la plupart des pesticides sont facilement adsorbés sur les particules de sol.

Il a été observé que les herbicides d'usage courant se dégradent plus facilement que les insecticides. Cependant, ils peuvent altérer suffisamment l'écologie des écosystèmes aquatiques pour que les populations animales associées aux végétaux soient détruites.

Les engrais ont un effet sensiblement différent et davantage positif sur la croissance des végétaux. Le rejet dans les eaux des rivières et des retenues de substances provenant des engrais ou d'éléments nutritifs divers est susceptible de provoquer une prolifération explosive des algues et des mauvaises herbes. Les nitrates et les phosphates sont des éléments actifs entrant dans la composition des engrais, et les excédents de ces éléments transportés par le ruissellement superficiel accroissent la fertilité des eaux d'irrigation; associés à d'autres éléments dans des proportions et des combinaisons qui sont encore obscures, ils provoquent l'eutrophisation de l'environnement. Les processus qui se traduisent par l'eutrophisation font appel à des successions d'assimilation et de fixation du carbone et de l'azote à différents niveaux trophiques. Dans des conditions d'éclairement et de chaleur favorables, les organismes utilisent les éléments nutritifs et les minéraux pour donner naissance à un développement végétal important d'algues et de plantes adventices, mais aussi d'organismes qui en vivent.

De nombreux cas d'eutrophisation de grands lacs ont été signalés, mais le phénomène se produit aussi dans les petits lacs et les étangs caractérisés par une productivité trophique de haut niveau, même si les exédents

de zooplancton font parfois défaut. Les eaux eutrophisées sont riches en plancton et leur productivité organique est élevée, mais leur tension d'oxygène est faible au lever du jour et après le coucher du soleil. Une sursaturation d'oxygène se produit, et des bulles apparaissent à la surface pendant la journée; le pH de ces eaux alcalines peut atteindre 9,0, et leur conductivité est élevée du fait de la concentration des sels dissous. Dans ces conditions, certaines espèces de poissons ne peuvent survivre, mais d'autres prolifèrent.

LES ADVENTICES AQUATIQUES

Les canaux et les systèmes de distribution qui sont riches en matière organique et en éléments nutritifs, mais dont l'entretien est insuffisant, sont invariablement envahis et parfois obturés par un développement considérable d'algues et de plantes adventices aquatiques. Il faut dépenser des sommes excessivement élevées pour nettoyer ces canaux.

Les plantes aquatiques tendent à être considérées comme des mauvaises herbes car elles représentent une nuisance grave dans les canaux d'irrigation, où leur présence n'est pas souhaitée. Les systèmes d'irrigation qui assurent un approvisionnement convenable en eau, en lumière et en éléments nutritifs créent des conditions idéales pour la croissance de ces plantes. Bien que les canaux et les drains soient conçus comme devant demeurer propres, les plantes aquatiques s'y implanteront sauf si l'on y fait obstacle. Elles peuvent être enracinées (comme le nénuphar), lorsque le substrat le permet, ou flotter (*Pistia* et *Salvinia*), ou être submergées (*Ceratophyllum*). Quel qu'en soit le type, leur croissance peut être assez exubérante pour entraver l'écoulement de l'eau et provoquer l'obstruction des canaux. Toutefois, dans d'autres conditions, la présence de plantes aquatiques peut présenter certains avantages. Certaines constituent une nourriture pour les poissons, lorsqu'elles sont vivantes, et assurent la protection des alevins et des invertébrés, dont la présence est indispensable à l'équilibre écologique du milieu. Les plantes submergées contribuent à l'aération des eaux. Ces avantages sont insuffisants pour justifier leur présence dans les écosystèmes aquatiques créés par l'homme, et elles sont jugées indésirables. Elles ont été directement mises en cause dans l'apparition de l'engorgement des sols. Elles ont également été jugées responsables de taux d'évapotranspiration élevés, mais sans qu'on puisse encore le démontrer.

La relation qui existe entre les plantes adventices aquatiques et la prolifération de certains vecteurs de maladies de l'homme et des animaux constitue peut-être la raison principale pour laquelle la présence de ces végétaux dans les systèmes d'irrigation est généralement jugée indésirable. Bien que l'existence de mauvaises herbes ne soit pas obligatoire pour que s'installent *Bulinus* et *Biomphalaria*, hôtes intermédiaires dans la bilharziose, par exemple, ces gastropodes tendent à proliférer sous la protection et avec le concours des plantes adventices. Dans le lac Volta, la croissance loin du rivage et sous les eaux de *Ceratophyllum* entretient davantage de gastropodes du genre *Bulinus* que toute autre association végétale. Les biefs des cours d'eau qui alimentent des retenues, les berges peu élevées, les zones à l'aval des barrages, où le volume des eaux est généralement faible, et les systèmes de distribution des eaux d'irrigation sont des facteurs qui favorisent systématiquement l'installation des gastropodes vecteurs de la bilharziose: c'est pourquoi, dans les régions tropicales, l'apparition ou l'aggravation de la bilharziose sont presque systématiquement associées aux projets d'irrigation.

Une modification des écosystèmes aquatiques peut aussi accroître l'effectif des moustiques vecteurs de maladies. Le développement d'une végétation type *Pistia* et *Polygonum* favorise le genre *Mansonia*, dont les larves et les pupes se fixent sur les racines, les tiges et les feuilles. Les eaux dormantes, plus spécialement lorsqu'elles sont envahies par les mauvaises herbes et polluées par des matières organiques, constituent un site de multiplication idéal pour Culex. *Anopheles gambiae* préfère des eaux temporaires, peu profondes, ensoleillées et dépourvues de végétation, comme celles des flaques abandonnées par l'irrigation, alors que *A. funestus* est associé à des fossés et à des zones marécageuses. Comme on le signalera dans le chapitre VI, les conditions créées par la submersion des parcelles mal nivelées sont favorables à la multiplication des moustiques, et les flaques d'eau d'irrigation saumâtre permettent la reproduction de moustiques tolérant les eaux salées. La culture de plantes à port serré favorise les moustiques en assurant des aires de repos ombragées, à degré d'humidité convenable, qui tendent à accroître la longévité des adultes. Dans un certain nombre de cas, les rizières irriguées ont accru le nombre des vecteurs du paludisme, et plus particulièrement d'*A. gambiae*. Dans les plaines de Kano,

au Kenya, 65 pour cent des moustiques qui attaquent l'homme dans les rizières sont des *A. Gambiae*. Dans une zone du même genre, mais non irriguée, ce complexe d'espèces ne représentait que 1 pour cent (Hill *et al.* 1977).

Les moustiques qui se multiplient sur les périmètres d'irrigation transmettent aussi des arbovirus, sources de maladies chez l'homme. Certaines formes de virus provoquant l'encéphalite ont été isolées chez *A. funestus* et *Culex tarsalis*, qui trouvent tous deux des conditions favorables dans les périmètres irrigués. *C. tritaeniorhynchus* est l'un des principaux moustiques des rizières en Orient, et *C. annulirostris* en Australie orientale.

V. L'INTEGRATION DE L'IRRIGATION AU DEVELOPPEMENT DES AUTRES RESSOURCES

La modification des écosystèmes aquatiques par les réservoirs, les canaux et les polluants affecte directement les unités hydrologiques, mais elle exerce aussi une influence sur la qualité des terres voisines. Certaines modifications sont également en relation avec l'intensité de l'aménagement.

Les écosystèmes subhumides et arides sont par nature instables, en ce sens que de faibles transformations dans leur aménagement peuvent entraîner des changements considérables au sein de l'écosystème. Ils sont particulièrement sujets à des transformations dramatiques déclenchées par l'apparition soudaine de vastes superficies cultivées sous irrigation, par exemple la pullulation des populations d'insectes ou d'oiseaux, ou de la flore des adventices. Ces écosystèmes ont une capacité limitée d'absorber (par résistance, ou adaptation) les apports d'eau, de produits chimiques et d'énergie qui sont associés à l'aménagement intensif des agro-écosystèmes irrigués. Les techniques culturales tendent à accroître cette capacité en transformant les caractéristiques du sol, par le labour, par l'emploi de conditionneurs ou d'engrais supplémentaires, et par la mise en place de systèmes de drainage. Les problèmes de la salinisation ou des autres formes de dégradation de la fertilité décrites dans le chapitre III sont des exemples de manipulations qui dépassent la capacité de l'écosystème. Les composants biologiques sont altérés en ce qui concerne la diversité des espcèes, les effectifs des organismes vivants, et la stabilité de leurs inter-relations. Les organismes aquatiques sont les plus affectés, en particulier les algues, les hydrophytes vasculaires, les invertébrés aquatiques, les insectes présentant une phase aquatique dans leur cycle biologique, et les poissons.

L'irrigation est à l'origine de transformations radicales dans la population humaine, en modifiant l'écologie naturelle, et en créant des systèmes de production nouveaux sur terre (parcelles cultivées, vergers, zones boisées, pâturages irrigués, jardins d'habitation, etc.) et dans l'eau (pêche et aquaculture). Ces transformations se traduisent par la fixation des populations indigènes nomades, la réinstallation des populations de cultivateurs originaires d'autres territoires, et par d'autres interactions d'ordre social.

LES POSSIBILITES D'AMENAGEMENT DU MILIEU AQUATIQUE

Les modifications d'ordre biologique peuvent être potentiellement bénéfiques. Les bénéfices possibles sont: la production de protéines grâce aux poissons, aux écrevisses et aux oiseaux aquatiques, et l'utilisation de la végétation aquatique pour l'épuration de l'eau. Pour promouvoir la production de protéines dans les unités hydrologiques et les parcelles mises en eau des systèmes irrigués, il faut avoir recours à des pratiques nouvelles. Il peut s'avérer nécessaire de trouver un compromis entre les pratiques idéales de la production végétale, et celles de la production de protéines à partir des poissons et du gibier d'eau. La validité de ce compromis doit reposer sur son intérêt économique relatif pour la communauté, en tenant compte du contrôle des nuisances comme nous l'avons évoqué au chapitre VII.

Les interactions positives entre le poisson et les cultures peuvent s'avérer favorables au maintien des rizières dans de bonnes conditions sanitaires, les poissons consommant le phytoplancton, les adventices et les insectes; en outre, leurs déjections contribuent à la fertilité du sol. Si les espèces sont soigneusement sélectionnées, elles peuvent présenter l'intérêt supplémentaire de participer au contrôle des gastropodes et des larves de moustiques. Au titre des interactions négatives, il faut citer le problème soulevé par les exigences de la rizière, des canaux et des retenues en ce qui concerne le niveau des eaux; l'inconvénient de certaines structures des réseaux d'irrigation et de drainage; l'emploi des pesticides chimiques dangereux pour la croissance ou la commercialisation du poisson; le contrôle des

unités hydrologiques qui interfère avec la productivité des espèces de poissons dont la reproduction est assujettie à ces cycles naturels liés aux crues saisonnières; et les dégâts provoqués aux plantes cultivées.

Il a été démontré récemment que les plantes de marécage sont capables d'améliorer la qualité de l'eau en diminuant la charge bactériologique, en faisant disparaître l'excédent d'éléments nutritifs et en éliminant le limon. Il conviendrait d'étudier avec soin la possibilité de tirer parti de ces propriétés en tête du réseau d'irrigation. On pourrait également envisager dans certaines situations l'utilisation des plantes adventices sous forme d'ensilage, de compost ou de mulch.

Les techniques qui permettent d'éliminer les adventices aquatiques par des moyens chimiques, mécaniques, ou manuels sont largement utilisées et elles peuvent être chiffrées avec précision. Toutefois, l'évaluation économique d'une proposition de projet d'irrigation est rarement exécutée au stade de la prise de décision. La connaissance de l'écologie des plantes peut conduire à modifier la conception d'un canal pour éviter une croissance excessive des plantes nuisibles. Parmi les mesures possibles figurent l'intervention sur le niveau et le débit des eaux, et l'assèchement des canaux pendant un laps de temps suffisant pour interdire un développement excessif des populations végétales.

Il est d'une importance capitale d'introduire ces techniques et des méthodes du même genre si l'on veut, au stade de la planification, éviter ou réduire les difficultés, grâce à une saine conception des canaux, ou à un urbanisme approprié.

LES IMPACTS BIOGEOGRAPHIQUES

Les périmètres d'irrigation créent des habitats nouveaux qui peuvent susciter des réflexes migratoires chez divers organismes, en particulier chez les insectes et les oiseaux, et briser ainsi la barrière naturelle que constituent les terres arides. Au contraire, les barrages et les canaux peuvent jouer le rôle de barrières qui entravent la prolifération de certaines espèces aquatiques.

Les zones de végétation de l'agriculture irriguée fournissent un habitat aux criquets et aux autres insectes, et créent des conditions favorables à de nombreuses variétés d'espèces animales et végétales. Les populations de ces espèces vont se multiplier, et, au bout d'un certain temps, elles seront prêtes à émigrer vers des secteurs qui seraient normalement demeurés hors de leur portée. Par contre, les types d'habitat nouvellement créés vont procurer des aires de repos aux oiseaux migrateurs, et ils pourront ainsi modifier leurs itinéraires naturels.

MODIFICATIONS DE L'HABITAT TERRESTRE

La faune du sol

La faune des sols du désert est peu abondante, mais elle est constituée d'espèces adaptées qui résistent à la sécheresse et tirent profit des accroissements minimes de l'humidité du sol consécutifs aux pluies ou à la formation de rosée pour se nourrir et se reproduire. Ce sont essentiellement des termites moissonneuses et des termites du bois qui se nourrissent à partir de graines et de bois morts en décomposition; des espèces de blattes des sables qui ont la faculté exceptionnelle d'absorber de la vapeur d'eau de l'atmosphère du sol à des humidités relatives ne dépassant pas 28 pour cent; une foule d'espèces de coléoptères ténébrionides qui se nourrissent de débris de litière; et un certain nombre de prédateurs tels que les coléoptères carabides, les fourmilions et les chilopodes. Ces animaux sont en général caractérisés par un rythme journalier de migration verticale dans les deux sens, entre la surface du sol et les horizons profonds, rythme commandé principalement par le changement des gradients de température et d'humidité qui s'inversent deux fois par jour. Ils se rassemblent sous les buissons du désert où la litière peut s'accumuler et où ils trouvent une protection contre l'excès de chaleur, l'évaporation et les prédateurs. Les densités de population de ces animaux sont en corrélation très étroite avec les variations saisonnières d'humidité et de température.

Par contre, dans les sols irrigués, les principaux constituants de la faune des sols sont les vers de terre, associés à une foule de collemboles, d'acariens, de nématodes, etc. Ils sont également sous la dépendance des propriétés physiques des sols qui déterminent la quantité d'eau disponible pour les organismes vivants.

La microflore du sol

L'irrigation affecte les caractéristiques physiques et structurales du sol tout autant que son humidité et son atmosphère. Elle influence de cette façon divers groupes de la microflore du sol: champignons, actinomycètres et bactéries. On observe souvent une tendance à la réduction du nombre des espèces et à un accroissement du nombre des populations.

La saturation du sol ou sa submersion sont parfois mises à profit pour contrôler les agents pathogènes des végétaux dans le sol, bien que les principaux facteurs limitants soient naturellement l'approvisionnement en eau, les caractéristiques de la topographie et des sols, et la disponibilité des terres. La saturation du sol peut entraver directement les apports d'oxygène aux agents pathogènes, mais il est également possible que l'accumulation de CO_2 résultant de la respiration microbienne ait une importance considérable, peut-être même plus grande encore que la précédente. Les éléments dont on dispose suggèrent que l'activité microbienne peut être responsable, directement ou non, de la destruction de certains agents pathogènes dans les sols inondés: l'efficacité du mécanisme antagoniste peut être influencée par d'autres facteurs, parmi lesquels la disponibilité en oxygène. Ce fait est bien illustré par les recherches sur l'irrigation des plantations de bananes par la méthode de submersion en vue de l'éradication de *Fusarium oxysporum f. culense* (Stover 1955). Les sols étaient recouverts de 60 à 150 cm d'eau non stagnante pour une durée pouvant atteindre 6 mois. La plus forte réduction de champignons indigènes du sol, et le plus fort accroissement du nombre des bactéries ont été observés dans la couche de vase superficielle après 35 jours de submersion, et 85 pour cent au moins des *Fusaria* indigènes ont été détruits dans les 40 premiers jours. Après 120 jours, la plus grande partie de la flore fongique indigène avait disparu; toutefois, une petite population fongique a été observée après ce délai à la surface du sol submergé, et ce fait a été considéré comme consécutif à l'existence d'une flore "migratoire" transportée par les eaux d'irrigation.

La vie animale

Les modifications qui interviennent dans les techniques d'irrigation, de même que le passage de la culture pluviale à la culture irriguée, peuvent affecter les populations d'animaux sauvages aussi fortement que le fait d'apporter de l'eau à des terres jusqu'alors incultes, ou que la création d'unités hydrologiques permanentes dans des zones dépourvues d'eau. Les animaux sauvages du désert, tels que les gazelles, les bouquetins et les hyènes, doivent pouvoir se désaltérer de temps en temps. Lorsqu'elles peuvent disposer d'eau au milieu du désert, les populations de ces grands animaux s'accroissent rapidement. Ce fait peut être considéré comme une modification favorable qui pourrait être mise à profit dans les mesures de conservation des animaux en péril.

Le passage de l'irrigation par bassins à l'irrigation pérenne en Haute-Egypte et l'élimination de la crue annuelle du Nil à l'aval des grands travaux de régularisation ont entraîné des conséquences favorables et défavorables. Le rat ne constitue plus la grave menace qu'il fut autrefois, mais il a été remplacé par d'autres rongeurs, et les animaux nuisibles habituels des cultures du delta migrent facilement en direction du sud.

La flore des adventices

La production agricole obtenue grâce à l'irrigation est mise en péril, entre autres choses, par un développement néfaste des mauvaises herbes lorsque l'eau et les éléments nutritifs sont amenés aux parcelles mises en valeur. Le foisonnement de ces plantes adventices peut être dû aux activités de l'homme - transport de terre, impuretés parmi les semences des plantes cultivées - mais il peut avoir d'autres causes, parmi lesquelles la flore autochtone de la région. Certaines de ces plantes peuvent poser des problèmes. Pour cette raison, il convient d'étudier les espèces autochtones, végétales ou animales, de la région pour détecter les espèces nuisibles potentielles.

PISCICULTURE ET ELEVAGE DU POISSON

La présence de l'eau, dormante ou non, offre certaines possibilités à la pisciculture, forme d'utilisation de la terre et de l'eau qui peut être intégrée à l'agriculture irriguée dans certaines circonstances favorables. Les pêcheurs ne consomment pas d'eau, sinon du fait des pertes par infiltration et évaporation. Par conséquent, l'eau des élevages de poisson, industrie importante et très organisée dans certains pays, est réutilisée dans l'agriculture. En outre, dans une retenue ou dans un étang de pisciculture, l'élevage du poisson réduit les teneurs en éléments nutritifs et, par là-même, la tendance à l'eutrophisation.

Dans les retenues des régions tropicales, le poisson d'origine locale s'installe de lui-même naturellement, et il peut donner lieu à des récoltes importantes. Il est toutefois rare qu'un rendement de 20 à 40 kg/ha soit dépassé, et il en est de même pour les canaux qui ne sont pas contaminés par des produits chimiques toxiques. Cependant, dans les étangs aménagés pour la production du poisson, avec des parcs abritant des espèces sélectionnées, le rendement annuel peut être plus de 10 fois

plus élevé, de 400 à 1 000 kg/ha, et il est encore plus considérable si un complément d'alimentation est apporté à la nourriture fournie par l'eau elle-même.

L'association de l'aquaculture et de l'agriculture est couramment pratiquée dans les rizières, où l'on obtient - par exemple à Madagascar - en plus du riz, une récolte de poisson de 20 à 30 kg/ha en 120 jours par les procédés naturels, de 80 à 200 kg/ha en 120 jours avec un apport d'engrais, et de 200 à 400 kg/ha en 120 jours avec des engrais et un complément alimentaire (Daget 1977). Dans les canaux, la production naturelle du poisson peut être fortement accrue en parquant les poissons dans des cages où ils peuvent être alimentés. Cependant, certains techniciens sont opposés à l'association agriculture-aquaculture, parce que les cages et dispositifs du même genre tendent à freiner l'écoulement, et qu'ils imposent une conception et des techniques d'aménagement plus complexes.

L'éventail des espèces de poissons adaptées aux différentes conditions de l'aquaculture est largement ouvert. Certaines espèces sont herbivores, par exemple la carpe des prairies et *Tilapia zillii*, et elles peuvent parfois jouer un rôle efficace dans la réduction des adventices. D'autres, telle la carpe commune, sont omnivores, ou, comme Clarias, se nourrissent de la chair des animaux. Certaines espèces consomment des larves de moustiques, d'autres des gastropodes, et on les utilise parfois pour lutter contre le paludisme et la bilharziose, bien qu'elles ne soient pas par elles-mêmes totalement efficaces en tant qu'agents de la lutte biologique.

Les personnes qui s'intéressent à l'aménagement des périmètres d'irrigation ne doivent pas ignorer les avantages que l'on peut tirer de la pêche récréative. De nombreux types d'activités récréatives, parmi lesquelles la pêche à la ligne, peuvent s'avérer des facteurs importants du développement culturel d'un pays.

LES AIRES DE PROTECTION ET DE RECREATION

Une surface irriguée contiguë à une zone de terres arides offre un habitat nouveau à une grande variété de végétaux, les uns trouvant naturellement leur voie, les autres étant introduits volontairement ou par accident. L'eau, la nourriture et le couvert végétal attirent certains types de gibiers, non seulement des mammifères et des oiseaux, mais aussi des reptiles, des amphibiens, des poissons, des insectes et d'autres invertébrés. Les oiseaux, en particulier, sont susceptibles d'être attirés de fort loin, et ils se multiplient parfois au point de constituer une nuisance, par exemple *Quelea* en Afrique. Le gibier d'eau et les autres oiseaux migrateurs, qui accomplissent deux fois par an de longs parcours, empruntent typiquement un parcours jalonné de zones irriguées, par exemple la vallée du Nil, où des troupes énormes se rassemblent saisonnièrement, ou bien passent d'une oasis à une autre.

Par conséquent, la création de zones de protection à l'intérieur de périmètres irrigués, ou à leur voisinage, revêt pour plusieurs raisons une grande importance:

- Pour des raisons scientifiques. La variété et l'abondance de la vie végétale et animale, associées quelquefois à des conditions physiques particulières, présentent une importance particulière lorsque la zone a fait l'objet d'une étude, par exemple de la part d'un organisme d'éducation supérieure du voisinage, de manière à définir "une ligne de départ" par rapport à laquelle seront appréciées les modifications de tous ordres.
- Pour l'enseignement et la formation. L'éducation sur le terrain, qu'il s'agisse de jeunes ou d'adultes, prend une importance de plus en plus grande dans tous les pays, et tout particulièrement pour les communautés agricoles, dont le travail doit être en harmonie avec les processus naturels.
- Pour des raisons récréatives et culturelles. L'élévation du niveau de vie conduit à une demande de zones récréationnelles de types très variés, en particulier dans le périmètre des villes et des grandes agglomérations. Parmi celles-ci, des espaces ouverts favorisent les activités de groupes, et des zones de tranquillité, personnalisées, propres à la promenade et à l'observation du paysage.

La demande en matière de récréation, toujours présente dans les communautés humaines, ira croissant, et il faut prendre en considération les moyens qui permettront de la satisfaire. La mise à disposition de certaines facilités sous forme de piscines de villages, où il est relativement facile d'éliminer les vecteurs de maladies, représenterait une part relativement minime du coût d'un grand projet d'irrigation. De même que les aires de protection et les autres mesures d'ordre sanitaire, les possibilités récréatives doivent être prises en considération dès le stade de la planification.

VI. LES EFFETS SUR LA SANTE DE LA POPULATION

Dans les projets d'aménagement des ressources en eau conçus en vue d'améliorer la production agricole sur les terres arides, les populations locales, comme les populations implantées sur le périmètre, sont trop souvent négligées, et elles ne tirent que peu de profit de la situation, sinon aucun, sur le plan de leur état de santé. Sous cet aspect comme dans d'autres domaines, l'irrigation peut avoir des effets néfastes sur la santé de l'homme; mais elle offre également certaines possibilités d'améliorations.

EFFETS BENEFIQUES SUR LA SANTE

L'irrigation peut améliorer la santé dans quatre domaines principaux. L'accroissement des disponibilités en eau permet de mieux satisfaire les besoins domestiques des habitants; l'accroissement de la production agricole offre la possibilité d'améliorer la nutrition; le développement de peuplements nouveaux et de communautés nouvelles autorise une planification meilleure dans le domaine de l'habitat et des facilités sur le plan sanitaire; et l'élévation générale du niveau de vie qui doit être la conséquence de la réussite économique d'un projet d'irrigation peut entraîner une réduction du facteur déterminant de la maladie, la pauvreté. Mais, dans ces quatre cas, les effets bénéfiques ne sont pas automatiques: ce sont des opportunités qu'il faut saisir, qui dépendent du soin apporté au stade de la planification des nouveaux projets, et non d'une idée *a posteriori*, lorsque les travaux d'irrigation sont achevés.

L'effet le plus évident est la fourniture d'eau en abondance et sa distribution généralisée dans des régions primitivement démunies, et où l'eau était généralement de mauvaise qualité. La mise en place d'un projet d'irrigation résout le plus souvent le problème de l'eau de boisson, tout au moins lorsque l'eau est pompée grâce à des puits tubés. Toute amélioration dans ce domaine revêt une importance capitale pour la santé de la population, et des résultats excellents seront obtenus à bas prix sous réserve de veiller soigneusement à la potabilité de l'eau (étanchéité du forage, vannes d'un modèle convenable et orifices de vidange). Par contre, si ces précautions indispensables ne sont pas prises, l'intérêt de l'opération est perdu. De même, si la réalisation est bonne, on peut prévoir des aménagements d'évacuation des rejets. Les travaux de génie civil préparatoires à la mise en place d'un projet d'irrigation peuvent s'avérer bénéfiques pour la population locale et pour les futurs habitants, en diminuant la vulnérabilité de la zone concernée vis-à-vis de la prolifération des vecteurs et des hôtes intermédiaires des maladies.

Pour atteindre ces objectifs, il est indispensable que s'instaure une collaboration entre les ingénieurs et les spécialistes de la santé publique, tout au moins aux premiers stades de la planification. Dans la plupart des cas, l'introduction à ce stade de la dimension santé publique n'implique qu'un accroissement négligeable du coût global de l'opération, bien inférieur en tout cas à celui d'éventuelles opérations de "sauvetage en catastrophe" qui devraient peut-être intervenir ultérieurement en l'absence d'une prévision judicieusement établie.

Lorsque l'autorité responsable de l'irrigation se consacre à la construction de villages nouveaux, il est souhaitable de concevoir des habitations nouvelles en conformité avec certaines normes minimales en matière de conditions sanitaires, mais aussi avec les préférences manifestées par les futurs habitants. Cette façon de faire contribue à maintenir dans des limites acceptables la contrainte liée à la réinstallation d'une population.

La présence de quantités d'eau suffisantes est l'une des conditions préliminaires indispensables à une hygiène personnelle et domestique satisfaisante, et elle joue un rôle déterminant en tant que toile de fond de la lutte contre les maladies transmissibles. Dans les régions arides, nombreux sont les cas où, un projet d'irrigation ayant entraîné un approvisionnement adéquat en eau, on a pu constater une chute brutale des manifestations du trachome et de la gale.

Dans les pays arides, lorsque la malnutrition pose un problème grave, le développement de l'agriculture irriguée, associé à l'élevage du bétail et à la pêche, entraîne une amélioration de la nutrition de la population en accroissant la quantité et la qualité des denrées alimentaires disponibles, et plus particulièrement des protéines animales.

Le niveau de vie, y compris les normes sanitaires, s'élève avec le revenu de la population. Le désir d'un état de santé meilleur, d'une hygiène plus poussée et de soins médicaux améliorés se manifeste très fortement, et ce "besoin de santé" facilite de plus en plus la réalisation des programmes concernant la santé publique.

Lorsqu'ils existent, les services de santé publique sur le périmètre du projet sont généralement insuffisants pour répondre aux besoins d'une population en expansion. Simultanément, il se peut que, rapidement, le périmètre devienne très vulnérable par suite de conditions épidémiologiques nouvelles induites par l'irrigation. Par conséquent, il est nécessaire de mettre sur pied des services de santé régionaux, et leur coût peut être compensé par l'accroissement du revenu national.

LES INCIDENCES NEFASTES DE L'IRRIGATION

La création d'un périmètre d'irrigation peut accroître la vulnérabilité d'une région à l'égard des maladies. L'eau peut véhiculer des produits chimiques toxiques, et de nombreuses maladies transmissibles, en servant à la fois de milieu de transport et d'habitat pour les vecteurs et les hôtes intermédiaires. Bien souvent, les effets négatifs de l'irrigation ne sont pas liés à l'irrigation elle-même, mais à sa mise en oeuvre dans de mauvaises conditions, et ils pourraient être évités ou réduits à de plus faibles proportions par un aménagement approprié.

La pollution chimique qui affecte les lieux irrigués peut avoir son origine en amont et mettre en péril la santé des habitants. Elle peut aussi apparaître dans le périmètre d'irrigation lui-même, à la suite d'une utilisation inconsidérée d'engrais et de pesticides. Dans ce cas, elle peut avoir des effets néfastes en aval, lorsque ces composés pénètrent dans la chaîne alimentaire, s'accumulent dans les plantes et les poissons qui sont en définitive consommés par l'homme et par les animaux domestiques, et provoquent finalement des intoxications aiguës ou chroniques graves.

La transmission directe de la maladie est la principale voie de dissémination du choléra, de la typhoïde, de la dysenterie bacillaire, de l'hépatite infectieuse et de la poliomyélite. Ces maladies peuvent être transmises par des sources ou des puits contaminés, par la pollution du sol, et par la pollution subséquente des légumes, aussi bien que par contact direct. Un réseau de canaux d'irrigation est un moyen particulièrement efficace pour transporter à longue distance les agents pathogènes.

Lorsqu'il n'y a pas de latrines, ce qui est généralement le cas dans les zones arides, le sol subit une pollution fécale permanente par des oeufs d'ascaris et de ténia, des larves d'anguillules et des kystes amibiens. La transmission est particulièrement rapide dans les zones densément peuplées, qui caractérisent les terres irriguées. Les secteurs marécageux et les étangs de petites dimensions, les zones boueuses autour des puits et des sources d'eau potable sont les sites parfaits de transmission du ténia et de l'anguillule, et ils favorisent aussi la dissémination de la bilharziose et du paludisme.

Comme nous l'avons indiqué au chapitre IV, les vecteurs ou les hôtes intermédiaires de ces maladies sont, soit totalement aquatiques, soit amphibies au cours de leur cycle de vie (gastropodes), ou seulement pendant leur stade larvaire (moustiques, *Simulium*); il se peut aussi que leur écologie soit plus ou moins liée à l'eau ou au bétail (mouche tsé-tsé).

Les maladies principales concernées sont les suivantes:

1. transmises par les moustiques:
   - le paludisme,
   - la filariose due à *Wuchereria bancrofti* et *Brugia malayi*,
   - les arbovirus transmis par les arthropodes: fièvre jaune, dengue (et fièvre hémorragique de la dengue), encéphalite équine;
2. transmises par les simulies:
   - l'onchocercose (cécité des rivières);
3. transmises par la mouche tsé-tsé:
   - la maladie du sommeil (trypanosomiase africaine);
4. transmises par les gastropodes:
   - la bilharziose (urinaire, bilharziose intestinale),
   - la parayonimiase (distomatose pulmonaire),
   - la distomatose (distomatose hépatique),
   - la clonorchose (distomatose hépatique humaine);
5. engendrées par un crustacé d'eau douce:
   - la dracunculose (ver de Guinée).

Les maladies qui n'existent pas dans une zone donnée peuvent apparaître après l'irrigation. Leur dominance et l'intensité de l'infestation, qui existaient auparavant à un niveau raisonnable, ont pu prendre le caractère d'infestations massives. Une infestation grave et débilitante amoindrit la capacité de travail, ce qui entraîne des conséquences socio-économiques. Le paludisme, la bilharziose et l'onchocercose ont provoqué de très gros dommages dans les pays où l'irrigation a pris un grand essor sans que l'on se préoccupe des incidences possibles sur la santé publique.

Le paludisme

Le paludisme demeure l'une des maladies les plus répandues dans le monde, et il constitue un danger dans toutes les régions chaudes et arides soumises à l'irrigation. Dans les zones

arides, les sites de multiplication des moustiques sont en général de dimensions restreintes, souvent désséchés, ce qui interrompt la transmission en saison sèche. Ces régions sont particulièrement exposées aux perturbations apportées par l'homme dans l'environnement, telles que l'introduction d'une irrigation pérenne, ou le passage de la culture en sec et de l'irrigation des cultures d'hiver à la culture irriguée continue. Ainsi s'explique l'échec subi par la tentative d'interruption de la transmission du paludisme dans les zones irriguées pérennes d'Egypte, d'Irak et d'Iran. *Anopheles gambiae*, vecteur très dangereux de la maladie, peut envahir une zone irriguée nouvelle à partir des aires de multiplication voisines. La construction du grand barrage d'Assouan a soumis de vastes superficies auparavant dépourvues d'anophèles au risque d'une pénétration d'*A. Gambiae* en provenance du Soudan, et elle a conduit l'Egypte et le Soudan à conclure un accord visant à la création d'une zone-tampon sans moustiques soumise à une surveillance continue au sud du lac Nasser.

Toutes ces modifications d'environnement qui interviennent en pays arides tendent à transformer un paludisme saisonnier et modéré en une situation hyperendémique permanente. Cependant, ce n'est pas tant la pratique de l'irrigation qui est spécialement néfaste que la planification, la mise en oeuvre et la maintenance des projets d'irrigation, avec des stagnations d'eau dans les canaux, des drains mal entretenus, de l'infiltration et des mares résiduelles permanentes. Ce qui est mauvais pour la santé est également mauvais pour la production agricole.

La filariose

La filariose, provoquée par *Wuchereria bancrofti*, ver parasite transmis par plusieurs espèces de moustiques, peut être associée au mauvais fonctionnement des systèmes d'irrigation et à la mauvaise utilisation des ressources en eau. Les larves des espèces de moustiques responsables se multiplient dans des unités hydrologiques riches en matière organique: marais, drains mal entretenus, et canaux d'évacuation mal réalisés. La maladie affecte le système lymphatique de l'homme, et elle peut se traduire par de l'éléphantiasis, qui handicape très sérieusement la capacité de travail de celui qui en est atteint.

L'onchocercose

Un autre type de filariose, fréquent en Afrique et dans certaines parties de l'Amérique du Sud, est l'onchocercose. Elle est transmise par la piqûre de la simulie, ou mouche noire, et lorsque les piqûres sont fréquentes, elles se traduisent par une maladie des yeux dont le paroxysme correspond à ce que l'on a appelé la "cécité des rivières".

Parmi les habitants de certains villages africains, 30 pour cent parfois sont aveugles, et des villages et des terres fertiles ont été abandonnés par leurs habitants. Le traitement conduit à des résultats décevants, et les lésions oculaires éventuelles persistent. Les larves de simulies vivent dans des eaux agitées bien oxygénées, des ruisseaux à écoulement rapide, des fleuves et des chutes d'eau. L'irrigation peut déterminer l'apparition de nouveaux sites de multiplication de ce genre. Par contre, les lacs artificiels et les retenues construites par l'homme peuvent submerger les sites naturels de multiplication, réduisant ainsi la possibilité de transmission.

La maladie du sommeil

Cette maladie est susceptible d'apparaître au sein d'une population réimplantée dans une aire à mouches tsé-tsé, comme c'est le cas près du réservoir de Kariba en Zambie. Des changements de composition floristique, la croissance des arbres sur le bord des canaux d'irrigation, l'accroissement du taux d'humidité de l'air, et l'introduction généralisée du bétail peuvent entraîner une prolifération de la mouche tsé-tsé, comme ce fut le cas au Soudan.

La bilharziose

La bilharziose, dans ses manifestations urinaires et intestinales est transmise par des gastropodes aquatiques ou amphibies; elle est la plus grave des maladies associées aux projets d'irrigation dans les pays arides très chauds. Il s'agit d'affections typiquement débilitantes, qui se traduisent par une réduction de la capacité de travail. Certains des médicaments utilisés pour le traitement de la bilharziose sont coûteux, et certains peuvent avoir des effets secondaires sérieux. Si l'on ne tente rien pour empêcher la transmission, la réinfestation se produit facilement. Dans les régions où l'on rencontre la bilharziose et où l'on entreprend des projets d'irrigation, l'infestation peut apparaître et prendre rapidement les proportions d'une épidémie du fait de l'introduction de gastropodes dans le système d'irrigation, ou de l'introduction de la maladie par l'immigration de personnes contaminées.

Dans les zones arides où la bilharziose existe avec un taux de présence relativement

modeste, par exemple de l'ordre de 10 à 15 pour cent de la population, et avec une intensité d'infestation (et donc une gravité) également assez faible, il est fréquent de voir l'extension passer rapidement à 80-90 pour cent. De même que pour l'onchocercose, la gravité clinique et par conséquent l'impact socio-économique de la bilharziose prennent de l'importance lorsque l'effectif des vers s'accroît, ce qui se produit dans des conditions de transmission intensive. L'invasion des périmètres d'irrigation de la zone aride par la bilharziose est si fréquente qu'il n'est pas nécessaire d'en donner des exemples. Dans une région où sévit la maladie, il est exceptionnel que les projets échappent à l'infestation.

De nombreux facteurs concourent à créer des conditions épidémiologiques favorables à la prolifération de la bilharziose. Ce sont: des sites nouveaux et nombreux de multiplication des gastropodes; la mauvaise utilisation de l'eau et l'entretien défectueux du réseau hydraulique; les canaux contenant de l'eau stagnante; et les drains non fonctionnels, envahis par les mauvaises herbes et donnant naissance à des zones marécageuses. Quelques autres facteurs se rattachent à l'homme lui-même. Les activités imposées par une irrigation intensive multiplient les occasions de contact de l'homme avec les eaux contaminées. Les travaux agricoles et les pêcheries entraînent des contacts fréquents avec l'eau. La concentration de la population dans des peuplements nouveaux amène les habitants à utiliser des emplacements communs, qui sont contaminés par contact, pour se baigner, laver les vêtements, boire et pour d'autres usages domestiques encore.

CONTROLE DES MALADIES

Lutte contre les bactéries, les virus et les parasites; lutte contre les vecteurs et les hôtes intermédiaires

Sans entrer dans le détail des différentes méthodes de lutte contre les maladies extrêmement variées qui sont associées à l'irrigation, il faut poser un petit nombre de principes généraux et importants.

Il est rare que le traitement individuel ou le traitement de masse d'une population puissent à eux seuls conduire à une amélioration à long terme. Cela semble évident, mais beaucoup de problèmes de santé publique sont encore abordés selon une approche thérapeutique étroite.

Les méthodes spécifiques utilisées contre un agent pathogène, un vecteur ou un hôte intermédiaire diffèrent selon les maladies. Les tentatives classiques de lutte contre le paludisme ou la bilharziose reposent sur l'utilisation d'insecticides, de molluscicides, sur la chimiothérapie de masse, et sur l'éradication massive des gastropodes. Les mesures portant sur l'environnement présentent l'avantage d'avoir un effet simultané sur plusieurs maladies à la fois. Ainsi l'utilisation de latrines, et l'installation de systèmes d'évacuation des déchets protègent l'environnement contre la contamination, plus spécialement la pollution fécale, et elles entravent en même temps la transmission des maladies virales, bactériennes et parasitiques associées au facteur sol. La constitution de réserves d'eau saine empêche la transmission de nombreuses maladies dues à l'absorption d'eau polluée (en particulier les maladies bactériennes et virales, et la dracunculose), et elle évite également la pénétration à travers la peau des larves de schistosomes, de ténias et d'anguillules.

L'ingénierie hydraulique joue un rôle important dans ce domaine car elle peut contribuer à la santé de la communauté par ses diverses réalisations: drainage, canalisation des cours d'eau, revêtement des cours d'eau et des canaux, nivellement des terres et comblement des dépressions, contrôle de l'infiltration, couverture des canaux et des drains, ou mise en place de tuyaux, lutte contre les mauvaises herbes, amélioration de la gestion des eaux, respect d'une discipline stricte dans l'utilisation de l'eau. L'irrigation par aspersion et l'irrigation au goutte à goutte, quoique très onéreuses, méritent d'être prises en considération, étant donné les économies qu'elles permettent de réaliser tant dans les dépenses de santé publique, qu'en matière de consommation d'eau.

On connaît quelques exemples de réussites brillantes obtenues grâce à des méthodes axées sur l'environnement, dans des pays qui n'ont pas rejeté ces méthodes *a priori*, et qui ont accepté de supporter la charge des coûts initiaux. C'est ainsi que des résultats décisifs ont été obtenus dans l'éradication du paludisme en Italie et en Grèce, mais seulement après la réalisation de travaux de drainage importants. Dans le sud de la Tunisie, où des projets avaient été mis en place essentiellement pour l'irrigation de palmiers-dattiers, une partie importante du réseau d'irrigation avait été équipée de revêtements en ciment, certains canaux étaient recouverts et certains autres

enterrés. Dans ces conditions de milieu favorables, une vigoureuse campagne contre la bilharziose a pu obtenir des résultats satisfaisants. La Tunisie est l'un des très rares pays où cette maladie est en voie de disparition. L'emploi des molluscicides a une efficacité maximale dans les bassins et les canaux revêtus de ciment et dépourvus de plantes adventices, et, dans de nombreux cas, la destruction des gastropodes peut être réalisée grâce à des dessiccations périodiques. Dans ces conditions, les chances de réinfestation se réduisent considérablement.

Aucune méthode ne peut à elle seule agir efficacement contre l'une ou l'autre des maladies inventoriées ci-dessus. Il convient d'appliquer une approche de type mixte. Mais il ne sera pas possible non plus d'obtenir des résultats permanents si les moyens utilisés ne sont pas associés à des méthodes axées sur l'environnement.

Services sociaux

Les peuplements nouveaux créés dans les grands périmètres d'irrigation sont particulièrement exposés aux problèmes des maladies, en particulier lorsque l'effectif des personnes réinstallées est élevé. La cassure entre les modes de vie antérieur et actuel est brutale et complète. Le revenu subit des perturbations. L'adaptation aux conditions nouvelles peut être longue et difficile, matériellement et psychologiquement. Il faut accorder une protection particulière à la mère et à l'enfant. Pour surmonter dans une certaine mesure ces difficultés, il est souhaitable d'organiser dans la zone irriguée un réseau de services sociaux à des fins à la fois curatives et préventives.

PREVENTION DES MALADIES

L'éducation de masse dans le domaine de la santé

On ne peut pas attendre beaucoup d'un programme de prévention des maladies qui ne prévoirait pas l'établissement de contacts approfondis avec la population par le biais de l'éducation de masse dans le domaine de la santé publique. La population, et plus particulièrement la population féminine, doit apprendre comment utiliser et entretenir les nouveaux puits, les installations de lavage et les latrines; comment améliorer la gestion de l'eau au niveau domestique; et comment changer d'habitudes alimentaires. Elle doit apprendre à reconnaître les signes du risque d'infestation, les circonstances de cette infestation et les points de contact, et la manière de les éviter. Il est indispensable de déterminer auparavant les besoins, les opinions et les préférences de la population dans ces domaines.

L'éducation sanitaire dispensée par des équipes étrangères ou même par des nationaux extérieurs à la région ne conduit en général qu'à des résultats médiocres. Très modestes sont les effets perceptibles des méthodes habituelles de l'éducation sanitaire de masse, telles que distributions de prospectus (souvent à des populations illettrées), affiches, messages radiodiffusés et télévisés, exposés et films, lorsqu'elles sont introduites de l'extérieur sans la participation de la population concernée. Les efforts entrepris peuvent avoir un meilleur rendement lorsque la population y est associée par le canal de ses chefs traditionnels et des responsables du projet: agents de l'action sanitaire dans les villages, enseignants, agents de la vulgarisation agricole, chefs de village traditionnels, et responsables politiques et religieux locaux. Les spécialistes ne doivent constituer que le premier échelon d'une armée de propagandistes de la santé, aussi nombreuse et aussi variée que possible, choisie parmi les différents membres de la communauté qui vivent en contact étroit et diversifié avec cette communauté.

Les enquêtes sur la santé publique

Dès qu'un projet d'irrigation est proposé, et avant même qu'aucune décision ne soit prise, il est souhaitable de mettre sur pied dans la zone du projet, mais aussi dans les régions d'où la population est susceptible de venir, une enquête sur la santé publique. Cette enquête aura pour objet d'estimer et de quantifier dans toute la mesure du possible la situation des maladies dominantes, les maladies susceptibles d'apparaître et de se répandre rapidement, leurs effets sur les plans humain, social et économique, et le coût du programme pour la santé.

Les enquêtes multidisciplinaires

Etant donné que les problèmes sanitaires des projets d'irrigation sont entièrement sous la dépendance de la conception, du fonctionnement et de l'aménagement du système d'irrigation, leur solution ou mieux leur prévention, ne peut être trouvée que dans une coopération étroite entre les chercheurs de plusieurs domaines: spécialistes de la santé publique,

planificateurs, hydrologues, ingénieurs, agronomes, économistes, géographes, sociologues, et agents de la vulgarisation agricole. Cette coopération doit commencer dès le stade de la planification et se poursuivre pendant toute la durée du projet de développement de l'irrigation.

Surveillance épidémiologique

Etant donné son caractère épidémiologique particulier, un secteur irrigué constitue une zone chroniquement vulnérable. Il sera toujours nécessaire d'exercer une surveillance épidémiologique et d'intervenir ensuite en cas de nécessité. Là encore, il est urgent que s'instaure une coopération étroite entre les différents spécialistes concernés.

Les campagnes d'immunisation

Les campagnes d'immunisation sont particulièrement nécessaires dans les peuplements nouveaux à forte densité, où les contacts sont étroits, et où la transmission des maladies est facile. Les jeunes enfants sont spécialement vulnérables, et il faut prêter une attention toute particulière aux vaccinations contre la tuberculose, la variole, la diphtérie, le tétanos, la rougeole et la coqueluche.

L'INTEGRATION DES PROGRAMMES SANITAIRES

La mise en oeuvre souple et continue d'une composante santé publique dans un dispositif d'irrigation est une des conditions essentielles de sa réussite. Si les opérations subissent une longue interruption, pour être reprises ensuite, parce que les crédits budgétaires ne sont accordés qu'irrégulièrement, on peut aller à la catastrophe et se retrouver dans une situation analogue à celle du départ. L'expérience a montré qu'un moyen efficace d'assurer au budget sanitaire l'ampleur, la continuité et l'indépendance requises, consiste à incorporer ce budget dans le budget global du projet.

Outre un budget clairement défini et régulièrement renouvelé, la composante santé publique exige un soutien administratif et une équipe fiable. Lorsqu'un projet d'irrigation est administré par une autorité spéciale mise en place pour la durée de son existence, les équipes médicale, technique et auxiliaire de ce projet doivent dépendre de cette autorité, et d'elle seule. Il convient d'instaurer une coordination étroite avec le Ministère de la Santé, même si ce dernier n'est pas directement responsable des problèmes sanitaires qui se posent au projet. Ces problèmes de santé publique pourront éventuellement être incorporés au fonctionnement ordinaire du Ministère de la Santé, mais l'expérience incite à penser que cette solution ne devrait intervenir que lorsque les méthodes employées pour résoudre ces problèmes sont elles-mêmes entrées dans les habitudes.

L'expérience accumulée jusqu'à présent met en lumière un concept capital. Les problèmes de santé publique que soulève un projet d'irrigation ne sont pas uniquement d'ordre médical. Souvent leurs aspects médicaux ne sont pas les plus importants, ils ne régissent pas l'épidémiologie de la maladie ni la stratégie de la lutte. Ils sont du ressort de l'environnement, et associés aux modifications à longue échéance qu'y apporte l'homme. Cette observation souligne la nécessité d'intégrer la composante santé au projet dans son ensemble: techniquement, financièrement et administrativement.

Les spécialistes de la santé publique ne doivent pas être considérés, comme c'est trop souvent le cas, comme une entrave au bon déroulement d'un projet de développement de l'irrigation, et comme une source de complications. Par contre, beaucoup de physiciens et de scientifiques n'ont pas manifesté la volonté, ou n'ont pas eu la possibilité, d'adopter un point de vue réaliste susceptible de concilier les impératifs de la santé et les impératifs des projets sur le plan technique, économique, hydraulique et agricole. Il n'est donc pas surprenant que leurs recommandations n'aient pas été appliquées.

L'approche multidisciplinaire des problèmes de la santé publique, l'intégration de la composante santé dans les programmes de développement des ressources en eau, la répartition des recherches en vue d'apporter des solutions et la mise en oeuvre de celles-ci, ne sont pas essentiellement une question de technologie, de structure administrative et de crédits. Elles expriment un état d'esprit: poursuivre les mêmes objectifs, rechercher un langage commun et agir en coopération dans la planification des projets et dans leur mise en oeuvre.

VII. LES EFFETS SOCIO-ECONOMIQUES

Les effets du développement de l'irrigation et du drainage sur l'eau, le sol, les écosystèmes aquatiques et terrestres, et la santé de l'homme, se répercutent sur l'ensemble de la structure sociale et économique de la société à l'échelle locale et nationale. En retour, la manière dont la société aborde les problèmes d'irrigation et de drainage a un impact considérable sur les effets en question. Les objectifs que se fixe un pays et les modalités selon lesquelles ces objectifs pourront se refléter dans les plans d'irrigation constituent le cadre à l'intérieur duquel des choix sont effectués parmi les conséquences à envisager sur le plan économique, social et écologique.

Le présent chapitre passe en revue les facteurs qui sont généralement pris en considération lorsqu'il est décidé d'entreprendre des travaux nouveaux en matière d'irrigation et de drainage. Il étudie en même temps les difficultés que l'on rencontre lorsqu'il s'agit d'apprécier et d'établir les contacts entre les divers groupes intéressés: cultivateurs, scientifiques, autorités officielles. Pour tous ces problèmes, on étudie plus particulièrement la façon dont les méthodes analytiques et les démonstrations scientifiques définissent les limites et les circonstances favorables à des entreprises d'irrigation préservant la stabilité des rapports "homme-environnement".

LES OBJECTIFS NATIONAUX

Les objectifs nationaux en matière d'irrigation et de drainage peuvent être les suivants: efficacité sur le plan de l'économie nationale; amélioration des échanges avec l'étranger par le biais des cultures de rente destinées à l'exportation; sédentarisation de populations nomades; prévention des dégâts dus à la sécheresse; stabilisation des systèmes agricoles; modernisation de l'économie rurale. Le plus souvent, plusieurs de ces objectifs sont poursuivis simultanément. Il arrive parfois qu'ils se succèdent les uns aux autres dans une séquence désagréablement rapide: en l'espace de vingt ans, l'aide du gouvernement aux projets d'irrigation de la vallée de Sabi en Rhodésie a commencé par des secours contre la sécheresse, pour s'orienter ensuite vers la production agricole, et se terminer par une stabilisation de l'agriculture (Roder 1965). Compte tenu des ressources et des aspirations nationales, l'irrigation peut être considérée non pas tant comme un moyen d'accroître la production nette par hectare, ou par personne, ou par mètre cube d'eau, que comme une possibilité de maintenir le niveau de vie du secteur agricole en harmonie avec l'environnement.

L'un des objectifs souvent cités est l'utilisation du projet d'irrigation comme un instrument de l'évolution sociale en milieu paysan. Cette façon de voir s'appuie sur le fait que la population est nécessairement initiée à de nouvelles techniques de culture sur des sites nouveaux, et qu'elle est donc préparée à adopter des modes de comportement modernisés. En réalité, cela ne se produit que rarement. Les difficultés que soulève l'adaptation à des environnements étrangers et à des méthodes de culture nouvelles sont énormes. La réimplantation des populations n'est pas une voie toute tracée pour l'instauration d'une vie meilleure (Brokensha et Scuddex 1968). L'émigration et les techniques nouvelles de culture perturbent le processus social traditionnel. Les agriculteurs qui ne sont pas encore familiarisés avec l'irrigation peuvent se trouver désemparés lorsqu'ils sont livrés à eux-mêmes avec l'obligation de se forger des habitudes nouvelles et des liens nouveaux. Ils peuvent juger insurmontables les obstacles rencontrés dans l'application des méthodes nouvelles, au point qu'ils ne s'habitueront jamais à la pratique courante de l'irrigation et qu'ils laisseront inculte une partie des terres visées par le projet. Ce type de difficultés a été illustré de façon caractéristique par les populations semi-nomades de Khasm et Girba, au Soudan, et par le projet Helmand en Afghanistan. Il convient en général de se fixer des objectifs plus réalistes.

Dans tout projet d'irrigation la décision de passer au stade de la réalisation est fonction de plusieurs facteurs. En premier lieu, est-ce le meilleur moyen, sur le plan économique, pour accroître les ressources en denrées alimentaires et en plantes à fibres, par comparaison avec l'utilisation de quantités d'engrais et de pesticides plus importants, ou de semences meilleures, ou avec l'amélioration des techniques de culture sur des terres déjà cultivées (irriguées et non irriguées)? En second lieu, est-il plus facile d'améliorer les projets existants que de créer un projet nouveau? En troisième lieu, compte tenu de disponibilités limitées en capital, le bien-être social est-il davantage assuré par un projet d'irrigation que par la création d'écoles, de logements, de services de santé, de routes ou par d'autres types d'investissements du capital? En quatrième lieu, l'irrigation est-elle le type d'utilisation des terres le plus approprié aux aptitudes des sols?

Si un projet d'irrigation semble justifié sur la base de considérations budgétaires, l'analyse doit prendre en considération des points de vue plus spécifiques: s'agit-il d'un projet à objectif unique ou à objectif multiple? quelle est sa dimension optimale et quelle est la quantité d'eau à prévoir compte tenu des diverses utilisations concurrentes (même un projet à objectif unique peut exiger de prendre des décisions concernant la quantité d'eau à prélever, et celle à laisser dans le fleuve)? quels sont les coûts et les profits qui ne peuvent être évalués en termes monétaires, et de quelle façon les considérations de cet ordre peuvent-elles être prises en compte, en particulier celles concernant les effets sur la répartition du revenu et de la richesse, les effets sur l'environnement, les impacts socio-culturels tels que la perception des faits politiques, et les transformations du statut de la femme et des traits de la vie familiale. Certains des éléments non monétaires peuvent être considérés comme complémentaires des bénéfices monétaires, d'autres comme des compensations. Pour évaluer correctement ces derniers, il convient de mettre au point une méthode d'appréciation de ces compensations, même s'il résulte seulement la conviction que les décideurs ne pourront se déterminer qu'intuitivement.

Il faudra à un certain moment étudier les liaisons entre le projet proposé et l'économie nationale. Les projets d'envergure relativement vaste peuvent avoir un impact économique sensible: ils mobilisent des crédits (d'origine extérieure ou intérieure; s'ils sont intérieurs, ils résultent d'impôts ou d'emprunts; s'il s'agit d'emprunts, ils proviennent de l'épargne ou de crédits de la banque centrale); ils induisent des modifications dans les dépenses consacrées aux biens de consommation et aux investissements, et des transformations sur le plan de la perception des ressources; et ils ont des incidences sur l'inflation ou la déflation. Lorsqu'ils sont mis en oeuvre, ils donnent lieu à des effets multiplicatifs dans divers domaines d'activités: accroissement de la demande d'investissements de la part de l'agriculture (travail, engrais, semences, pesticides, matériel, et carburants); stockage, transport, traitement des denrées alimentaires ou des fibres textiles.

L'ACCROISSEMENT DE LA DENSITE DE POPULATION

Tout projet nouveau est de nature à stimuler la croissance des villes et autres agglomérations tout autant qu'à accroître la densité de la population rurale. En outre, il est probable que les immigrants seront des adultes relativement jeunes, qui créeront des foyers et verront croître leurs familles. Le développement de la production alimentaire, l'augmentation du nombre des emplois, l'élévation du niveau de confort, la réduction des dangers d'inondation, l'usage de commodités telles que l'eau potable, les installations sanitaires, et l'énergie électrique: autant de forces puissantes qui vont entrer en jeu pour stimuler un accroissement rapide de la population. Ces forces sont susceptibles de s'accroître du fait de l'absorption de familles dispersées par le projet et qui reçoivent de nouveaux logements et la promesse d'un emploi.

Dans l'optique de l'évaluation du projet, il faut maintenir la distinction entre les activités coûteuses et celles qui constituent une partie des résultats fournis par le projet (et par conséquent une partie des bénéfices de ce projet). Par exemple, si l'accroissement de la densité de population entraîne des risques sanitaires nouveaux, le coût du maintien de la situation sanitaire de départ est bien évidemment une dépense pour le projet. Si les conditions sanitaires peuvent être améliorées jusqu'à un certain niveau, cette amélioration constitue un bénéfice brut (les bénéfices bruts peuvent être convertis en bénéfices nets en prenant en compte les dépenses additionnelles effectuées au profit de la santé, et en soustrayant ces dépenses de la valeur des bénéfices bruts). Nombre de ces avantages ne peuvent être mesurés que de manière approximative, mais des mesures approximatives valent mieux que pas de mesures du tout.

La perte de productivité consécutive à une incidence accrue de la maladie est pour le projet une dépense tout aussi significative que celles consenties pour les structures de génie civil visant à stimuler la productivité agricole.

Lorsqu'un projet est créé pour une population caractérisée par des activités de nomadisme ou de pastoralisme extensif, il est possible de prendre en compte d'autres types de bénéfices, par exemple la stimulation de l'activité économique consécutive à la fourniture de semences, d'engrais, d'insecticides, d'herbicides, de services rendus sur la base de contrats, d'équipement, de carburants et de travail. Une grande partie des effets secondaires résulte de l'accroissement du recours à un travail sédentaire, qui dans d'autres conditions n'aurait pas eu à s'employer. Pour réaliser une activité économique complémentaire, il faut prévoir la gamme des besoins associés à la création de cités, de villes et

de villages nouveaux, et répondre à ces besoins de manière ordonnée.

Lorsqu'on procède à une évaluation des mérites d'un projet, il faut garder présente à l'esprit l'éventualité de divergences entre les bénéfices appréciés sur le plan local et sur le plan national. Dans certaines circonstances, un projet nouveau dans une partie d'un pays peut avoir une incidence nuisible sur la prospérité économique des activités concurrentes qui s'exercent dans d'autres régions en réduisant le marché et en contribuant ainsi au chômage et à une capacité de production excessive. Il faut que les conséquences de cet ordre soient prises en compte dans le calcul de la balance coût-profit qui servira de base à la prise de décision.

Le caractère souhaitable d'une politique de la population ne nécessite pas d'être justifié si son objectif consiste en une amélioration du niveau de vie de chacun. La menace d'une augmentation de croissance de la population peut résulter d'une élévation du taux de fécondité, d'un abaissement du taux de mortalité, ou de l'association de ces deux éléments. En toute éventualité, l'aménagement des taux de natalité constitue une étape importante en matière de stratégie, et il convient de le prendre en considération.

EMPLOIS, REVENUS, REPARTITION DES RICHESSES ET INFLATION

L'amélioration de la productivité sera partagée entre la totalité des individus de la population ou concentrée entre les mains de quelques-uns. Cela dépendra dans une certaine mesure de certaines circonstances économiques constituant le contexte du financement, de la mise en oeuvre et de l'utilisation du produit net du projet. Il sera peut-être nécessaire de procéder à une intégration soigneuse des activités d'ingénierie et d'agronomie d'une part, et des politiques économiques d'autre part, si l'on souhaite que les bénéfices tirés du projet dépassent ceux jugés les plus nécessaires et les plus urgents.

Dans le cas des projets placés sous l'autorité directe de l'Etat, la répartition du revenu peut être déterminée par une action de type administratif: sera-t-elle en numéraire ou en nature, et, dans ce dernier cas, quelle sera la proportion des denrées et des services, et quelles sont les règles qui permettront de respecter l'équité? Lorsque les projets mis en oeuvre s'appliquent à des terres soumises au régime de la propriété privée, il est probable que ces questions seront résolues conformément aux règles du marché, l'action gouvernementale se bornant généralement à des contrôles fiscaux et monétaires et à la mise en place de réglementations ou de contraintes sur les marchés pour ce qui concerne le travail, la terre, les denrées, les fibres et les investissements agricoles.

Il existe un certain nombre de dispositifs permettant d'accroître la prospérité de l'agrégat social face à des marchés fonctionnant de façon imparfaite et à la propriété privée des moyens de production:

- la limitation de la dimension des propriétés à l'intérieur du projet;
- la fixation de prix minimaux payés aux cultivateurs pour les produits issus du projet, en particulier pour les cultivateurs exploitant des superficies restreintes;
- la fixation de prix maximaux payés par les cultivateurs pour les investissements agricoles, les biens de consommation et les services: logement, aliments transformés, etc.
- la fourniture directe de services liés à la consommation - eau potable, commodités en matière d'équipements sanitaires, écoles, services médicaux, électricité - à des prix acceptables ou gratuitement;
- le contrôle des salaires minimaux et des prix de certains biens de consommation déterminés;
- des taxes permettant de récupérer les gains dus à la spéculation, et qui s'appliquent sous une forme progressive au revenu.

D'autres précautions doivent être prises pour assurer un bénéfice maximal au projet sur le plan social. Lorsque les forces du marché ont un caractère dominant dans l'économie et que les revenus sont répartis de façon très inégale, les propriétaires terriens peuvent juger que la production destinée à l'exportation est plus profitable que la production destinée aux marchés domestiques. Il est évidemment possible que la masse des salariés bénéficie de l'expansion des marchés à l'exportation, mais les bénéfices de cet ordre ne se concrétisent que dans la mesure où la demande en travail subséquente conduit en définitive à des salaires réels plus élevés, résultat qui n'est ni obligatoire, ni même probable en l'absence d'actions gouvernementales appropriées.

Un projet d'irrigation nouveau, comme tout autre investissement nouveau de capital à grande échelle, entraîne un risque d'inflation ou de déflation, selon la façon dont ce projet est mis en oeuvre. L'éventualité d'une poussée déflationniste est relativement éloignée. Les pressions inflationnistes sont beaucoup plus probables, et elles peuvent servir à masquer le fait que d'importants segments de la population ne tirent que peu de profit de

l'opération, sinon aucun, et qu'ils subissent même des pertes économiques réelles.

Un profit présumé des grands projets d'irrigation est la création d'emplois. Toutefois, il se peut que l'élévation du niveau de l'emploi ne fasse que déclencher une montée des prix, dont ne bénéficieront que les propriétaires des terres et du capital, à moins que la fourniture globale aux ouvriers et petits cultivateurs de biens de consommation et de services s'accroisse parallèlement à l'évolution du revenu global. Ces éventualités doivent être prises en compte dans une planification soigneusement étudiée, ce qui exige une collaboration étroite des responsables officiels au niveau ministériel. Des biens de consommation supplémentaires ne pourraient probablement être obtenus à court terme que par l'importation - démarche à laquelle s'opposent ceux qui insistent pour que les échanges avec l'étranger soient utilisés à combler les insuffisances en matériel et en biens d'équipement. En conséquence, l'endettement vis-à-vis de l'étranger augmentera probablement, et les conditions sont donc remplies pour que se manifestent de nouvelles pressions inflationnistes. En général, ceux qui souffrent le plus de l'inflation appartiennent à la masse de la population dont le revenu exerce une contrainte sur les niveaux minimaux de subsistance. Seule une politique vigoureuse sur le plan monétaire, salarial, fiscal et en matière de prix pourra parvenir à répartir équitablement les coûts de l'amélioration du capital.

LES SERVICES SOCIAUX ET LES DISPOSITIONS D'ORDRE SOCIAL

Une partie des bénéfices que procure un projet se trouve sous la forme de services à caractère social dispensés au profit de tous. Ceux qui viennent immédiatement à l'esprit sont: la fourniture d'eau pure à usage domestique, un réseau d'égouts et l'évacuation des déchets, le logement, l'énergie électrique, les voies de communication et les transports, les installations à but récréatif, les écoles, les hôpitaux et cliniques, et les crèches. Cette gamme de services peut procurer des commodités qui faisaient défaut jusqu'alors, et susciter des modifications dans les tâches accomplies par les femmes, dans l'organisation sociale relative à ces tâches, et au statut de la femme dans la société. Ces modifications peuvent s'accompagner d'une baisse de la fécondité et d'une diminution sensible du taux de croissance de la population.

Il n'existe pas de méthode unique permettant de réduire rapidement le nombre des naissances, et compatible avec des techniques acceptables sur le plan social. Cependant, la stabilisation du revenu familial, la réduction de la nécessité du travail des enfants, l'amélioration du niveau d'éducation, l'information médicale et les soins médicaux, l'élimination des responsabilités coûteuses qui retiennent la femme à la maison, la réalisation de crèches, et une large gamme de possibilités d'emploi nouvelles, sont des éléments qui faciliteront l'instauration d'un planning familial adapté au potentiel économique et aux aspirations de la population.

GESTION DU PROJET, GESTION DE L'EXPLOITATION ET ENVIRONNEMENT

Quelques-unes des décisions prises au niveau de l'exploitation vont dans le sens des décisions prises au niveau du projet ou du pays, alors que d'autres vont dans un sens opposé. Pour une proportion élevée de ces décisions, c'est l'environnement physique qui constitue le terme de passage. Par exemple, lorsque l'eau est mise gratuitement à la disposition de l'exploitation, le cultivateur souhaitera probablement maximiser son produit en se référant à la ressource qui, pour lui, est la plus rare - généralement la terre ou les dépenses en numéraire nécessaires à ses achats. Il en résulte une surconsommation de l'eau, avec des effets consécutifs à cette surconsommation: rareté de l'eau, engorgement, salinisation, alcalisation et érosion. Le cultivateur ignore le plus souvent la perte potentielle de terre lorsqu'il calcule ses profits à court terme et il néglige en général totalement le coût que représente pour autrui ses propres agissements.

Des conflits du même ordre surgissent lorsque les cultivateurs réalisent une économie de travail et de capital en utilisant des engrais et des pesticides en quantités telles que les eaux de drainage en sont polluées, ou encore lorsque les techniques d'irrigation provoquent l'érosion et la sédimentation, au prix d'une baisse de productivité en aval. On peut se poser certaines questions sur la responsabilité de l'exploitant dans les modifications du taux d'utilisation de l'eau, mais il est probable qu'une recherche sur les particularités locales des méthodes pratiquées en matière de facturation permettra d'élaborer des directives administratives utiles.

Dans un certain nombre de cas, il y a complémentarité plutôt que conflit d'intérêts. Par

exemple, l'amélioration de la gestion de l'eau peut réduire les dangers du paludisme, et l'élimination des adventices dans les canaux et les fossés permettra de maîtriser la fraction non bénéfique de l'évapotranspiration, de réduire les risques d'engorgement, et d'éliminer les habitats favorables aux gastropodes.

Les techniques d'utilisation et de distribution de l'eau peuvent donner naissance à des conflits entre les impératifs de l'irrigation au niveau du projet et les activités pratiquées en aval. Il convient que les effets produits soient étudiés en détail lors du calcul des profits nets. Par exemple, lorsque la régularisation de l'écoulement d'une rivière exerce une influence néfaste sur la productivité des pêcheries dans un estuaire ou au large, les pertes ainsi provoquées doivent être inscrites au passif du projet d'irrigation. L'effet bénéfique de chasse des crues dans un cours d'eau précédemment non régularisé disparaît, et il faut aussi considérer ce fait comme un résultat négatif du projet. La qualité des eaux en aval peut être altérée par l'écoulement des eaux de drainage, et les modifications du régime de la rivière peuvent restreindre un habitat qui présente de la valeur pour le gibier.

Les critères d'efficacité économique portent sur la dimension du projet, sur l'allocation d'eau en fonction des diverses alternatives possibles concernant la production, et sur le choix des investissements. Il peut y avoir un lien, non obligatoire toutefois, entre les coûts supportés par les participants au projet et les bénéfices que celui-ci procure, car certaines dépenses peuvent faire l'objet de subventions dans le cadre de la politique adoptée vis-à-vis du public. Ce qui est important, c'est l'adoption d'une politique dans laquelle les dépenses supplémentaires (c'est-à-dire, les compléments de dépenses en faveur des facteurs de production) sont conçues pour susciter un comportement bénéfique pour la société. Par exemple, il peut être souhaitable sur le plan social d'attribuer gratuitement aux utilisateurs modestes un quota d'eau d'irrigation pour faire en sorte que tous les foyers disposent d'une quantité d'eau suffisante pour un jardin de dimension minimale, pour les besoins indispensables sur le plan sanitaire, ou pour assurer un lessivage convenable. Au-delà de ce minimum, l'efficience est obtenue grâce à un droit d'utilisation de l'eau calculé à partir du coût social des surcroîts de rendement successifs imputables à l'eau utilisée. Les sommes totales versées par utilisateur doivent demeurer inférieures au prix de revient total par utilisateur, eu égard à la subvention, encore qu'un supplément de dépenses par utilisateur soit susceptible d'induire le comportement souhaité. Ce principe peut être appliqué avec une efficacité comparable dans les systèmes à planification centralisée et dans les systèmes soumis à l'économie de marché.

Les décisions concernant la dimension optimale des unités de production sont applicables de la même façon dans les économies à planification centralisée et dans les économies de marché. Habituellement, la décision dépend du degré de sophistication du système d'aménagement et du nombre de variables susceptibles d'être prises en compte à l'avance. Lorsque les projets sont nouveaux et relativement complexes, la nécessité d'apprendre en agissant peut justifier un degré de décentralisation plus élevé que lorsque des modèles ont pu être expérimentés avec succès.

Dans tout projet important, les buts recherchés par les ingénieurs, les spécialistes de la santé, les agronomes, les spécialistes de la commercialisation, et les économistes impliqués dans les divers stades successifs du projet peuvent être très diversifiés même lorsqu'ils sont assujettis au cadre analytique esquissé plus haut. C'est l'une des responsabilités de l'aménagement au sommet que ces points de vue divergents s'harmonisent pour maintenir une ligne d'action rationnelle sans que l'une des phases prenne du retard par rapport aux autres. C'est en définitive au niveau de la politique nationale et de la gestion des projets qu'il est procédé à un choix entre les impacts économiques, qui se répercutent facilement sur les sommes dépensées, et les impacts sociaux ou sur l'environnement, qui doivent être intuitivement évalués dans l'analyse du projet, même lorsqu'il est difficile d'apprécier le coût monétaire.

VIII. COMMUNICATION ET REACTIONS SOCIALES

Avoir une perception claire des possibilités offertes au niveau de l'environnement et les difficultés de l'irrigation des terres arides, cela dépend dans une large mesure de la communication qui s'instaure entre les diverses personnes concernées: le cultivateur, l'aménageur du projet et son équipe, l'administrateur, l'ingénieur et le planificateur,

le responsable de la santé publique, et le scientifique. Chacun d'eux prend des décisions qui interviennent dans l'impact global d'un projet. Ils travaillent souvent tout à fait indépendamment les uns des autres. En définitive, c'est le cultivateur qui est affecté le plus directement par le résultat. A l'origine, c'est le scientifique qui apporte son aide aux autres.

LA COMMUNICATION SCIENTIFIQUE

Il est fondamental que s'instaure une communication entre, d'une part, les ingénieurs et les scientifiques spécialisés sur les problèmes de la qualité et de la quantité d'eau - sous les aspects physique, chimique et biologique - et, d'autre part, les gens concernés par l'agriculture, la pêche, l'hygiène et les maladies. Pour utiliser efficacement la terre et les eaux tout en modérant les effets nuisibles dans tous les projets d'irrigation, il est essentiel d'établir la communication dès le début des opérations. Les liaisons entre scientifiques, planificateurs, administrateurs et cultivateurs doivent être continues, depuis le stade de la préplanification, lorsqu'on évalue la faisabilité jusqu'au stade de la planification, où il devient de plus en plus nécessaire de consulter davantage de spécialistes, et longtemps après que le projet nouveau ait commencé à fonctionner. Il n'est pas possible que les scientifiques se détachent complètement de ce processus à un stade quelconque des opérations.

Les ingénieurs à qui il a été demandé de planifier un projet nouveau occupent normalement une position privilégiée. Tout en se préoccupant de recueillir les avis des biologistes, des médecins ou des sociologues, ils doivent établir leurs plans en tenant compte de nombreuses contraintes, financières en premier lieu, et il est fréquent qu'ils atténuent, ou même qu'ils écartent, les modifications qui visent à améliorer une partie de l'opération ou à éviter un effet secondaire aux conséquences hazardeuses. Le scientifique aide à fixer les choix et à déterminer les conséquences, et sa recherche doit être guidée en partie par ce qu'il connaît des besoins des autres personnes concernées. La présentation de ses conclusions au planificateur de projet doit être solidement étayée.

LE CULTIVATEUR

A la base, la personne responsable de l'utilisation de l'eau et du maintien de la qualité de l'environnement est le cultivateur. Un projet d'irrigation parfaitement conçu, s'il est aux mains de cultivateurs incompétents, peut conduire à des résultats inférieurs, sur le plan de l'efficacité économique et de la qualité de l'environnement, à ceux d'un projet mal conçu mais géré par une population compétente. Une conception efficace prend en compte les aptitudes et les limites des cultivateurs qui seront affectés aux travaux nouveaux. En règle générale, ceux qui pratiquent l'irrigation doivent avoir des compétences plus affirmées que les cultivateurs exploitant en agriculture pluviale, car leurs tâches sont plus complexes et le prix des erreurs beaucoup plus élevé. Au niveau de la parcelle, les risques qu'entraîne un usage défectueux de l'eau (dégradation du sol, nuisances, développement des adventices) sont considérables.

Bien que le cultivateur puisse bénéficier de directives émanant du laboratoire ou des expérimentations sur parcelles de démonstration, il est généralement obligé de prendre seul des décisions sur le "quand" et le "comment" se servir de l'eau et des divers produits complémentaires. Il pratique un art auquel la science ne peut contribuer que pour une part. Son choix est souvent dicté par l'expérience populaire ou par le mode d'action des organismes qui régissent l'accession à l'information, au crédit, aux produits, aux marchés et aux autres éléments constituants de la gestion de l'exploitation. Il ne serait pas réaliste de penser qu'il ne s'occupe que de l'eau et de la terre. Sa tâche est complexe, et elle le devient de plus en plus lorsqu'il reçoit une aide dans le domaine de l'eau, mais pas dans le domaine des autres éléments qu'il doit manipuler. Ces complications s'aggravent lorsque les préoccupations des gouvernements subissent des fluctuations, passant d'un objectif social à un autre - par exemple de l'aide contre la sécheresse à l'autosubsistance ou à la production de cultures de rente.

L'AIDE AU CULTIVATEUR

L'absence d'une communication satisfaisante avec les aménageurs aggrave les problèmes posés par l'eau et par le sol, et les obstacles rencontrés peuvent être sérieux lorsque les cultivateurs sont illettrés. Mais le fait d'être illettré n'a pas toujours par lui-même des conséquences graves. La sagesse populaire peut être considérable et l'instruction de caractère pratique concernant le sol joue un rôle important. A cet effet, il faut que l'infrastructure des services sociaux soit adaptée aux conditions locales, y compris lorsqu'il s'agit d'éducation des jeunes et des adultes. Une modification du système social, dans la mesure où elle affecte le cultivateur, se

traduit souvent par une amélioration rapide de l'efficacité dans la pratique de l'irrigation. Dans le sud de la France, en facturant au cultivateur l'eau effectivement utilisée, on a provoqué des économies d'eau et atténué l'engorgement. Dans les zones qui, en Egypte, étaient précédemment soumises à l'irrigation par bassins, on est passé à l'irrigation pérenne parce qu'on disposait toute l'année de l'eau du grand barrage, et ce nouveau système a entraîné chez les cultivateurs une tendance à gaspiller l'eau. On tente de réduire ce gaspillage en maintenant le niveau d'eau des canaux au-dessous du niveau des terres cultivées, ce qui impose au cultivateur d'élever l'eau qu'il utilise. Mais cette technique peut être dangereuse: l'eau salée peut s'infiltrer dans les canaux et les contaminer. Il a été suggéré que, étant donné que le cultivateur a beaucoup d'autres occupations, une incitation meilleure pourrait consister à construire des canaux à écoulement gravitaire au-dessus du niveau des terres irriguées, et à faire payer aux cultivateurs l'eau utilisée.

Au Proche-Orient, la FAO a entrepris une série d'études de démonstration dans les champs des cultivateurs, en coopération avec les ministères et les universités concernés. Ces études ont pour but de montrer aux cultivateurs les méthodes efficaces d'utilisation de l'eau et du sol pour parvenir à des rendements optimaux par unité de volume d'eau utilisée. Il n'existe pas de panacée pour atteindre une meilleure efficacité. Dans certaines régions, ce peut être dans une large mesure le fait d'une sympathie plus grande du technicien et de l'aménageur pour le mode de vie du paysan.

CHOIX D'UN SYSTEME DE CULTURE

Dès les premiers stades de la planification d'un projet d'irrigation les organismes gouvernementaux peuvent opérer un choix entre deux objectifs: soit rechercher le profit économique, donc mettre l'accent sur les bénéfices que peuvent réaliser les investisseurs et l'Etat, soit rechercher les avantages d'ordre social, donc mettre l'accent sur les bénéfices que peuvent tirer du projet les cultivateurs et la communauté. L'orientation adoptée influera de façon considérable sur les travaux d'ingénierie, sur le choix des cultures et sur le lieu d'implantation des entreprises de transformation.

Les avantages relatifs des divers plans d'opération sont illustrés par le cas du Khuzestan septentrional, en Iran, où quatre types d'agriculture sont en compétition les uns à côté des autres dans le projet d'irrigation de DEZ (Ehlers 1977). Ces quatre types sont les suivants: entreprise agricole à caractère industriel, exploitation traditionnelle à petite échelle, affaire agricole, association d'actionnaires agricoles. Une entreprise agricole à caractère industriel est généralement la propriété de l'Etat, et elle n'est pas strictement axée sur la notion de profit; c'est par exemple le cas des plantations de canne à sucre. L'exploitation à petite échelle est généralement installée sur des systèmes traditionnels de tenure des sols, et elle peut être consolidée grâce à des améliorations techniques modiques, parmi lesquelles l'irrigation. Par contre, l'affaire agricole est installée sur des terres concédées à des sociétés en vue du développement de la culture mécanisée, et ses répercussions économiques et sociales sur la vie des villageois peuvent être très profondes, en particulier lorsque leurs terres font partie de la concession. Quant aux associations agricoles elles tentent de passer de l'exploitation individuelle à l'exploitation collective, les cultivateurs investissant leur propre capital sous la forme de terres, de machines et de constructions. L'expérience tend à prouver que seules les entreprises agricoles à caractère industriel et la culture traditionnelle améliorée sont capable de provoquer des réactions sociales mettant l'accent sur le développement social par l'amélioration des services à la campagne, et réduisant ainsi l'exode rural.

Il existe un certain nombre de cas concrets dans lesquels une communication satisfaisante a apporté une aide au cultivateur et a amélioré la précision du choix au niveau national. Lors de la planification des problèmes de santé de l'homme dans les extensions des oasis du sud tunisien et dans le projet Rahad au Soudan, il a été démontré qu'il est possible de passer par les différentes étapes indispensables. Cependant, l'étude révèle l'omission de certaines mesures dans la conception des travaux d'ingénierie, par exemple la possibilité de modifier le niveau des eaux, et de vidanger les canaux pour les assécher, mesures susceptibles d'épargner certaines difficultés sur le plan sanitaire et d'empêcher l'invasion des plantes adventices: il s'avérera onéreux de rectifier ces omissions à un stade ultérieur.

RECHERCHES SUR LES REACTIONS SOCIALES

La réaction de la société humaine, et plus spécialement celle des paysans, à l'irrigation n'a pas fait l'objet d'études aussi approfondies

que la réaction des sols ou des plantes cultivées. C'est seulement au cours de ces dernières années que les transformations sociales provoquées par les projets d'irrigation sont devenues un important sujet d'études. Même dans ces conditions, les intentions de recherches sur le plan social sont peu nombreuses par comparaison avec celles concernant les disciplines physiques, biologiques et médicales. Il existe des exceptions notables: l'adjonction d'un spécialiste des sciences sociales à une équipe de planification physique devient pratique courante, mais, dans la plupart des cas, l'étude approfondie des réactions sociales demeure insuffisante. Les cultivateurs doivent souvent s'adapter au projet d'irrigation, alors que le projet ne leur est pas adapté. L'alternative la meilleure consiste peut-être à concevoir des projets de plus petite taille convenant mieux aux possibilités et aux moyens locaux. Il n'est guère surprenant que le processus d'adaptation sociale soit difficile dans beaucoup de projets, même lorsqu'on tient compte de l'aide fournie par les services que procurent le gouvernement et le projet en matière de santé, d'éducation et d'instruction technique.

LES TYPES DE REACTION SOCIALE

Les populations de cultivateurs pratiquant l'irrigation peuvent être divisées en deux catégories:

- les populations des pays où l'aridité est telle que la mise en valeur des terres dépend presque totalement de l'irrigation, ce qui vaut aussi pour les terres inondées par les crues saisonnières; ces populations sont passées par une période longue de lente adaptation avant l'introduction de la technologie moderne;
- les populations des régions semi-arides qui, au fil des générations, se sont adaptées à une exploitation de l'animal et qui se déplacent en fonction des pâturages et de l'eau disponibles, ou bien qui pratiquent une culture itinérante soumise aux risques d'une pluviosité aléatoire.

Un exemple caractéristique de la première catégorie est celui de l'Egypte. Les cultivateurs qui pratiquent traditionnellement l'irrigation réagissent rapidement aux possibilités qui leur sont offertes d'améliorer leurs installations; cette situation a commencé avec Mohammed Ali qui construisit un barrage au Caire dès le début du 19e siècle. La conséquence sociale a consisté en un accroissement rapide et soutenu de la population, dont l'effectif était de l'ordre de 2,5 millions de personnes en 1800. Cette population a presque doublé à chaque demi-siècle pour atteindre 18 millions en 1950, et les pasteurs se sont reconvertis à la culture irriguée. Il s'est ensuite produit un doublement du taux de croissance de la population, de sorte que celle-ci a atteint 36 millions de personnes en 1975. On peut s'attendre à un nouveau doublement de cet effectif d'ici à la fin du siècle. Si tout se passe bien, la mise en valeur de zones nouvelles et le passage de l'irrigation par bassins à l'irrigation pérenne en Haute Egypte, associés à l'amélioration généralisée de l'efficacité en matière d'utilisation du sol et de l'eau, permettront aux paysans égyptiens de supporter ce rapide accroissement de population, avant qu'il ne soit trop tard.

Lorsqu'un projet d'irrigation est lancé dans une région semi-aride, la perspective de disposer d'eau et d'accéder à la prospérité attire immanquablement les populations des autres régions dont les écosystèmes sont totalement différents. Celles qui sont assujetties à l'élevage des animaux domestiques peuvent souhaiter conserver l'association traditionnelle homme-animal. Beaucoup sont habituées à un habitat très dispersé, dépourvu partiellement ou totalement d'eau courante ou stagnante, et n'ont pas été sérieusement exposées jusque-là aux maladies associées à l'eau. Dans les zones arides, où les populations humaines sont clairsemées, l'évacuation des excréments et des déchets soulève peu de problèmes. Dans les régions semi-arides, les habitudes des populations sont sous divers aspects en contradiction avec celles qui s'imposent dans les régions irriguées, où les populations sont relativement denses et concentrées, et dominées par les problèmes de l'eau. Sur un périmètre irrigué, la solution la plus simple consiste à rejeter les excréments dans l'eau, et les animaux qui pâturaient sur de grands espaces s'adaptent difficilement au système d'utilisation des terres. Après quelques années, il se peut qu'un projet ne soit pas parvenu aux résultats qui en étaient attendus, comme c'est le cas du bassin du Helmand; il se peut aussi qu'une adaptation se dessine et que l'amélioration de la nutrition, du revenu et des services sanitaires se traduise chez les enfants par une longévité et un taux de survie accrus. La population commence alors à augmenter, et il se peut qu'elle continue de le faire, quelquefois même au-delà des limites permises par les ressources nouvelles.

Que la population initiale des cultivateurs d'un projet nouveau ou d'une extension soit d'origine locale ou au contraire qu'elle soit

venue de l'extérieur, des tensions sociales et psychologiques pourront apparaître. Par exemple, ainsi qu'il a été signalé dans le chapitre VII, l'accroissement du nombre des jeunes peut être si important qu'il libère des types de comportement qui ne sont guère combattus par les classes plus âgées, moins nombreuses. Dans un environnement totalement nouveau, les contraintes peuvent être grandes et elles peuvent imposer la nécessité d'une infrastructure solide en matière de services sociaux. La situation inverse se produit lorsqu'un facteur quelconque, salinisation des sols par exemple, ou diminution des ressources en eau, incite les cultivateurs jeunes et actifs à émigrer, laissant derrière eux une population plus âgée, ce qui rend nécessaire la mise en place de services de gériâtrie, précisément au moment où les possibilités de prendre de telles mesures sont moindres.

Il est d'autres facteurs qui ont des effets sociaux importants. L'un deux est la transformation des caractéristiques du travail, qui se traduit par une activité pratiquement continue tout au long de l'année dans le cas de deux à quatre cycles culturaux en irrigation pérenne sur le même sol. La réduction du temps consacré à la détente et le changement dans la répartition des différentes activités au cours de la journée, du mois et de l'année, entraînent une altération du mode de vie dans son ensemble, si on le compare par exemple à la surveillance d'un troupeau au pâturage. La survie du projet exige des cultivateurs un effort de coopération dans certains domaines tels que l'utilisation de l'eau, la mécanisation, la commercialisation et l'assistance financière.

LA GESTION DU PROJET ET LE FERMIER

Il est vraisemblable que si certaines entreprises n'ont que peu d'efficacité, cela peut être attribué au comportement des responsables qui ont défini leur politique ou aménagé le projet. Il serait possible dans certaines circonstances d'accroître fortement la productivité en modifiant les méthodes de gestion ou en changeant les gestionnaires. Dans un certain nombre de cas, et bien qu'ils soient sérieux et de bonne volonté, ceux-ci n'ont pas saisi l'occasion d'aider le cultivateur lorsqu'il le fallait. Cette situation tient pour une part au fait qu'ils sont accaparés par de grands travaux nouveaux que la vision des experts travaillant dans les limites de leur propre discipline est parfois étroite et que l'utilisation de l'eau pose des problèmes particuliers. Sur la foi d'observations faites au Ghana, au Kenya et à Sri Lanka, Chambers (1975) suggère que "il peut s'avérer nettement plus facile d'entretenir un élan en faveur de travaux nouveaux réalisés à grande échelle que de maintenir un haut niveau d'efficacité et une gestion disciplinaire de l'eau dont on a assuré la fourniture".

Si notre savoir en matière d'éléments techniques est étendu, il est très limité en ce qui concerne les conditions réelles ou potentielles de la gestion des entreprises d'irrigation. On ne dispose guère d'étude sur les raisons de la réussite remarquable de certains projets. Il existe une sorte de "no man's land" entre les disciplines. Peu de scientifiques se sont aventurés à poser la question des raisons pour lesquelles les administrateurs, les ingénieurs, les agriculteurs et les responsables de l'environnement progressent sur des voies séparées, laissant au cultivateur le soin de tout réussir.

IX. L'URGENCE DE LA RECHERCHE

Au fur et à mesure que l'intervention de l'homme dans les écosystèmes des zones arides s'étend et se complique, il devient de plus en plus nécessaire de comprendre les processus physiques, biologiques et d'ordre social qui se trouvent déclenchés ou interrompus. Toute recherche qui améliore la connaissance de ces processus permet aux populations et aux nations de mieux maîtriser les effets possibles de l'irrigation et du drainage sur l'environnement. Dans les pages qui précèdent, il a été possible d'apprécier combien il est important de combler un certain nombre de lacunes dans l'information concernant l'irrigation des zones arides. Un certain nombre de lacunes évidentes et importantes ont été signalées, par exemple l'insuffisance de nos connaissances sur l'évapotranspiration des surfaces d'eau couvertes de plantes flottantes. Une grande partie des études à entreprendre sont du ressort de disciplines scientifiques et techniques classiques. Des propositions d'action détaillées peuvent être trouvées dans de nombreux rapports du MAB-Unesco (Unesco 1974, 1975), de la Commission internationale des grands barrages (CIGB), de l'Association internationale de la science du sol (AISS) (AISS 1975), et de la Commission internationale des

irrigations et du drainage (CIID). Il existe un ensemble de revues bibliographiques consacrées aux besoins en recherches sur l'eau en agriculture (Hyatt et Hopper 1970, Peterson 1972, Groupe consultatif sur la recherche agronomique internationale 1973); elles recommandent d'entreprendre des recherches dans divers domaines spécifiques: hydrologie, ingénierie, pédologie, agronomie, biologie, sciences de la santé, géographie, économie, analyse des systèmes, gestion et organisation, et dans les domaines connexes.

Dans le présent chapitre, la discussion met l'accent sur l'application des connaissances déjà acquises. Les organismes de recherche existants sont rarement équipés pour étudier ces domaines prioritaires, ou sont dépourvus de l'expérience pratique nécessaire pour ce faire.

Le développement de la recherche appliquée comporte deux phases principales:

- l'adaptation de la technologie existante aux conditions spécifiques, physiques, culturelles et politiques, qui existent dans les zones irriguées. Cela implique des recherches pour la mise au point de méthodes simples et peu coûteuses, des recherches sur l'équipement et sur les sources d'énergie. L'accent sera mis sur l'utilisation des moyens de travail et des matériaux qui existent sur place;
- l'adoption des concepts et d'une technologie déterminés par les utilisateurs d'eau, les résidents, et d'autres encore. Cela exigera de prêter attention aux conditions socio-économiques, administratives, légales et politiques qui exercent une influence sur les décisions prises au niveau local.

Ces deux phases de la recherche: adaptation et adoption, sont nécessaires au niveau général comme au niveau local. Dans la zone du projet, le cultivateur, l'utilisateur d'eau, le résident sont les bénéficiaires ultimes. L'étude de leurs décisions aidera à appliquer des technologies introduites de l'extérieur dans les conditions locales, et à promouvoir l'acceptation d'une technologie nouvelle réellement appropriée.

Pour répondre à toute la gamme des questions concernant aussi bien la recherche de base que la recherche appliquée, il sera nécessaire de recourir à un programme à long terme organisé à l'échelle internationale. Néanmoins, l'un des problèmes à résoudre présente une telle urgence qu'il exige une attention renforcée dans un proche avenir. C'est le problème de l'intégration de l'effort de recherche.

NECESSITE D'UNE RECHERCHE INTEGREE

Lorsque des crédits sont alloués aux recherches concernant l'irrigation, le drainage et les problèmes connexes, on observe une tendance à utiliser les voies habituelles des organismes gouvernementaux et des départements universitaires. Ceux-ci sont habituellement organisés sur la base de disciplines existantes, et qui sont commodes et efficaces dans le domaine de la méthodologie de la recherche. Ces organismes encouragent néanmoins un type de travail qui ne permettra pas de percevoir ou d'étudier les lacunes entre disciplines distinctes, ni de prendre en compte de façon satisfaisante les relations entre les secteurs où se posent des problèmes aigus inhérents à l'irrigation et au drainage.

On peut citer l'exemple de cette question vitale des moyens permettant de réduire les manifestations de la bilharziose chez ceux qui pratiquent l'irrigation. Les processus de la transmission sont relativement bien connus, comme le sont aussi les insuffisances de la thérapie actuelle. Mais les mesures qui permettraient de juguler la poursuite de la transmission de la maladie, et qui seraient insuffisamment peu onéreuses, simples et efficaces pour être adoptées sur une grande échelle, font défaut. Pour concevoir des mesures de ce genre dans une zone irriguée déterminée, il faut étudier dans le détail: les incidences de l'entretien des canaux et la croissance des mauvaises herbes, et des molluscicides sur la répartition des gastropodes; la possibilité de modifier la conception des canaux, et les schémas de distribution de l'eau; les diverses solutions en matière de peuplements et de techniques culturales en relation avec l'efficacité de l'eau et avec le profit économique; et les circonstances dans lesquelles les cultivateurs pourront être amenés à réviser le choix des plantes qu'ils cultivent, leur mode d'utilisation de l'eau à usage domestique, leurs habitudes en matière de toilette, et d'autres pratiques encore, consécutives aux efforts nouveaux d'information et d'éducation. Les résultats obtenus dans le domaine de l'écologie des gastropodes pourraient fort bien influer sur la conception de l'hydraulique des canaux. Les connaissances acquises grâce aux études sociologiques sur le comportement et les attitudes des cultivateurs pourraient suggérer l'existence de contraintes sur les programmes de distribution de l'eau et sur le mode de culture. Il se pourrait que ces études et d'autres du même genre, mettent en évidence qu'il serait

souhaitable d'appliquer une technologie nouvelle et simplifiée à la maison ou aux champs.

Un autre problème consiste à déterminer les apports d'eau qui conviennent à un type de sol déterminé et à une culture donnée dans un projet nouveau. En partant de recherches sur les caractéristiques pédologiques et hydrologiques de la zone concernée, et de l'estimation des probabilités des précipitations, il est souhaitable de déterminer quels seront les effets sur le rendement de la culture et sur l'équilibre eau-sels de différentes combinaisons entre les doses et fréquences d'irrigation, la nature des plantes cultivées et les techniques de cultures utilisées. Ces combinaisons seront en retour affectées par la conception de l'hydraulique du projet, par la qualité de l'eau disponible, par les effets probables sur les vecteurs de maladies, par le comportement quotidien des cultivateurs, et par diverses autres considérations connexes. Il peut arriver qu'un planificateur de projet dispose d'une information suffisante pour entreprendre la conception de ce projet sans avoir recours à des études complémentaires, mais c'est probablement un cas exceptionnel. Il est important de combler les lacunes en mettant en route de nouvelles recherches sur le terrain, et en veillant à ce que les résultats qu'elles fournissent soient intégrés avec ceux dont on disposait déjà.

LES CONDITIONS NECESSAIRES A L'INTEGRATION DE LA RECHERCHE

Elaborer une recommandation en faveur de l'intégration de la recherche est beaucoup plus facile que de la mettre en pratique, et il n'y a pas de méthode simple pour y parvenir. La difficulté majeure réside souvent dans la nécessité de surmonter l'absence de communication entre les différentes disciplines engagées dans un programme de recherches.

Si le produit doit être intégré, il est essentiel d'obtenir un accord et une coopération sur un certain nombre de points. Il faut que toutes les disciplines intéressées étudient en commun le projet central et ses objectifs. Il convient de préciser les méthodes d'analyse spécifiques à utiliser et de définir à l'avance la nature des données à collecter. Par exemple, pour juger des potentialités agricoles d'une région aride, les divers investigateurs doivent préciser les données qui permettront au géographe d'apprécier les facteurs physiques et humains affectant la production de l'exploitation, au sociologue d'étudier les conséquences sociales des méthodes de culture, et à l'économiste d'évaluer le budget d'exploitation des agronomes en fonction de l'économie nationale. L'équipe multidisciplinaire devrait être orchestrée par une autorité unique afin que les différents jugements puissent être harmonisés. Il faut enfin que soient réunis périodiquement les différents chercheurs, afin de comparer les résultats sectoriels et de les accorder pour parvenir à une solution acceptée par tous.

Il ne faut pas sous-estimer les obstacles qui jalonnent le chemin de ce type d'entreprise scientifique. Mais faute de procéder ainsi, les progrès de la recherche sur les problèmes capitaux que soulèvent l'irrigation et le drainage sont condamnés à être très lents.

X. LA PLANIFICATION DES PROJETS D'IRRIGATION NOUVEAUX OU RENOVES

Lorsqu'on s'occupe de l'irrigation de terres arides, il est évidemment nécessaire de mettre en oeuvre les connaissances scientifiques dont on dispose déjà. Une bonne partie, mais certainement pas la totalité, des efforts accomplis dans le passé en matière d'irrigation et de drainage dans les pays en voie de développement produiraient aujourd'hui des retombées économiques et sociales plus importantes, contribueraient mieux à la stabilité de l'environnement, si leur planification avait pleinement fait appel à l'information technique disponible. Les obstacles que rencontrait la communication entre les individus et les groupes responsables étaient énormes dans le passé et s'ils sont quelque peu atténués à l'heure actuelle, ils restent encore énormes.

Les obstacles d'ordre institutionnel que rencontre une planification véritablement intégrée des actions en matière d'irrigation et de drainage ont été exposés brièvement dans le chapitre VIII. Dans une large mesure, ces difficultés trouvent leur origine dans la structure et les méthodes du gouvernement. A un degré moindre, mais qui conserve une certaine importance, les avantages que l'homme peut retirer de ces projets d'irrigation seraient sûrement accrus si les activités des scientifiques dans les pays en développement et les pays industrialisés étaient convenablement organisées et canalisées. Il est nécessaire d'entreprendre au niveau international une action positive orientée dans deux directions. L'information disponible doit être diffusée plus largement et plus

rapidement auprès des groupes de consultation gouvernementaux et privés responsables de la planification des projets. En même temps, une politique plus ferme concernant les critères de cette planification doit être adoptée par les agences responsables du financement des projets d'irrigation qu'ils soient nouveaux ou rénovés.

LE FLUX D'INFORMATION

On peut s'attendre à ce que le flux d'information scientifique concernant les problèmes étudiés dans le présent rapport se poursuive à un rythme plutôt lent et en ordre dispersé à moins que des mesures particulières ne soient prises pour accélérer le processus. Les réseaux actuels de diffusion de l'information et de l'expérience techniques doivent être renforcés en leur donnant pour tâche de communiquer leurs résultats aux planificateurs et aux responsables du financement qui décident du choix des projets nouveaux à réaliser. Dans ces réseaux sont incluses les actions d'information, signalées plus haut, des commissions régionales des Nations Unies, les réunions et les publications de la FAO, du Programme sur l'Homme et la Biosphère (MAB) de l'Unesco, de la Commission internationale des irrigations et du drainage (ICID), et les secteurs intéressés des organisations scientifiques internationales telles que l'Association internationale des sciences hydrologiques (AISH), l'Union géographique internationale (UGI), et l'Association internationale de la science du sol (AISS). Le nombre des agences nationales, des agences intergouvernementales, et des organisations de conseil, et l'effectif total des professionnels engagés dans la planification des projets nouveaux sont relativement faibles. On devrait pouvoir les atteindre grâce à des ateliers spécialisés et à des efforts de formation à court terme ainsi que par des publications et par le canal du Système international de référence du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE).

LES CRITERES DU FINANCEMENT PUBLIC

Le moyen le plus simple et le plus direct d'améliorer la planification des projets d'irrigation et de drainage consiste pour les principaux organismes impliqués dans le financement de ces actions à exiger que soient pris sérieusement en considération quelques critères peu nombreux. Ces critères sont inclus à des degrés divers dans les méthodes d'examen des projets en cours. Habituellement, les organismes de financement étudient à fond la sécurité et la faisabilité des travaux proposés, l'adéquation des ressources en eau, le flux prospectif des coûts et des bénéfices économiques, et la possibilité de remboursement du capital investi à des taux d'escompte et à des dates déterminés. Il y a aussi d'autres aspects évoqués dans le présent ouvrage qui souvent font l'objet de recherches. Néanmoins, c'est sur les points qui viennent d'être cités qu'il convient désormais de mettre l'accent: cette nécessité est attestée par le nombre des projets réalisés qui n'ont pas réussi à prendre pleinement en compte ces critères.

Si l'étude des effets possibles sur l'environnement n'est pas prescrite dans les procédures des organismes de financement, il convient de l'incorporer. Les questions qu'il serait essentiel de poser en réponse à toute proposition de projet d'irrigation et de drainage sont les suivantes:

1. la gamme complète des flux des coûts et des profits dans l'avenir a-t-elle été soigneusement étudiée?
2. le drainage et le lessivage ont-ils été prévus de manière suffisante pour assurer de façon permanente le maintien de la qualité du sol et de l'eau dans la zone racinaire?
3. la gamme complète des solutions possibles pour assurer l'efficacité de l'eau a-t-elle été évaluée?
4. l'étude du projet a-t-elle envisagé les incidences probables de la modification du régime du sol et de l'eau dans la zone concernée sur les écosystèmes aquatiques et terrestres avoisinants?
5. l'étude a-t-elle envisagé dans le détail et précisé les coûts des mesures sociales, sanitaires et économiques nécessaires pour permettre d'obtenir les bénéfices attendus de la culture et de la stabilité sociale?
6. le bien-être de la population a-t-il été pris en compte de façon telle que le projet se traduise non par une dégradation, mais par une amélioration de la qualité de la vie pour ceux qui sont le plus directement concernés?

L'organisme de financement, comme les scientifiques et les ingénieurs engagés dans la planification du projet, ont intérêt à suivre ces problèmes. Il leur faudra accomplir des efforts vigoureux et persévérants pour s'assurer que ces questions ont reçu une réponse qui soit valable sur le plan économique, qui soit sincère et qui, dans toute la mesure du possible, corresponde à l'état actuel des connaissances scientifiques.

XI. LA GESTION DES SYSTEMES D'IRRIGATION ET DE DRAINAGE

La rapidité avec laquelle les terres irriguées se dégradent et sont perdues pour l'agriculture est une source de préoccupation pour tous ceux qui aspirent au maintien de ressources alimentaires permanentes. Si les tendances actuelles à l'abandon ne cessent pas, et si l'on ne découvre pas de moyens pratiques pour restaurer les terres abandonnées antérieurement, les mises de fonds nouvelles dans les entreprises d'irrigation et de drainage parviendront difficilement à compenser ces pertes continues. Le déclin en maints endroits du rendement annuel moyen consécutif à la dégradation du sol et des eaux est plus grave encore que l'abandon pur et simple. Pour faire cesser l'essentiel de ces pertes et pour éviter qu'elles se reproduisent dans de nouveaux projets, la solution réside dans la gestion du système d'irrigation et de drainage. Il est préférable de réaliser une meilleure efficience d'application et un meilleur drainage sur une zone restreinte que de se consacrer à des projets nouveaux, de grande étendue, mais de conception défectueuse.

ACTION ET RECHERCHE

Il se dégage des chapitres II à VIII sur le sol, l'eau, les biotes et les processus sociaux, que le savoir dont nous disposons est assez vaste pour que les opérations d'irrigation actuelles en tirent profit. Ce serait toutefois une erreur de penser que le domaine scientifique possède des réponses toutes faites à toutes les questions posées lors de la recherche de techniques efficaces d'irrigation et de drainage, en harmonie avec les conditions locales de l'environnement. Le fait brutal est celui-ci: en de nombreux endroits, il n'est possible de trouver des solutions qu'au prix d'observations, d'expérimentations et d'études nouvelles. A vrai dire, les projets d'irrigation qui ne présentent pas de problèmes résistant obstinément aux solutions proposées sont bien peu nombreux.

Dans ces conditions, il n'apparaît pas souhaitable d'attendre les résultats des recherches entreprises dans la zone du projet ou ailleurs. Il se peut que l'aménageur du projet soit contraint de choisir une ou plusieurs orientations de son action en se basant sur des essais. Il peut s'avérer politiquement difficile d'agir ainsi quand on a l'impression qu'une fois terminée la phase de mise au point du projet, la mise en oeuvre des travaux d'ingénierie constituera un problème relativement simple. Il peut y avoir une certaine réticence à accepter l'évidence que tout ne va pas pour le mieux dans un environnement soumis à l'irrigation. Ces tensions pourront être mieux supportées si l'on reconnaît franchement que des difficultés dues aux sels, ou aux mauvaises herbes, ou aux gastropodes, ou aux motivations du cultivateur, ou à la gestion de l'équipe vont probablement se produire, et que beaucoup d'autres projets les ont déjà rencontrées.

LES RAPPORTS ANNUELS

Une étape concrète, par laquelle il faut passer pour améliorer la gestion des opérations d'irrigation et de drainage, consiste, pour chacun des organismes responsables, à élaborer un rapport annuel précisant la situation dans laquelle se trouvent les projets dans la poursuite de leurs objectifs concernant l'économie et l'environnement. Il est relativement classique que les projets exposent: la superficie des terres qu'ils gèrent, la quantité d'eau qu'ils distribuent, et les coûts et les revenus du fonctionnement des travaux. Lorsque ces précisions n'ont pas encore été fournies, il serait souhaitable de traiter les points suivants:

- efficacité de l'utilisation de l'eau: au cours du transport, à la parcelle, au niveau de l'exploitation;
- superficie soumise à l'engorgement, à la salinisation et à l'alcalisation;
- superficie abandonnée du fait de la qualité du sol et de l'eau;
- population affectée par certaines maladies liées à l'eau et à l'existence de vecteurs;
- naissances, décès, immigration et émigration ayant une incidence sur le projet.

D'autres facteurs méritent d'être pris en considération, mais ces cinq indices permettent de focaliser l'attention sur les grandes questions qui peuvent apparaître ou persister lors de la gestion du projet.

Il conviendra de faire périodiquement un rapport sur ces conditions, ce qui contribuera à alerter l'organisme local responsable. Ce rapport devrait également suggérer les orientations à suivre pour encourager une coopération mondiale ou régionale portant sur l'étude des acquis ou la promotion de la recherche. L'étude approfondie des rapports montrera quelles sont les questions d'aménagement les plus génératrices de difficultés, et les actions les plus efficaces. Les réseaux permettant la communication de l'information nécessaire pourraient alors être aidés à prendre des mesures plus rigoureuses en vue d'accélérer

les actions constructives au niveau du cultivateur et à celui du projet.

Il faut espérer qu'à longue échéance les institutions responsables de l'éducation et de la formation auront ajusté leurs programmes de façon à pouvoir prévoir ces résultats, et d'autres encore. Les matériaux scientifiques mis à leur disposition comme éléments des réseaux d'information accélérée les y aideront. Néanmoins, pour le proche avenir, ce qui est le plus urgent est de toucher ceux qui détiennent entre leurs mains le pouvoir d'arrêter la dégradation du sol et d'accroître la productivité de l'irrigation et du drainage existants - c'est-à-dire le fermier, à l'extrémité du canal d'irrigation, et l'aménageur du canal local ou du système de pompage. C'est avant tout de leur action que dépendront les niveaux de productivité et les effets - néfastes ou bénéfiques - de l'irrigation et le drainage sur les environnements arides.

ABUL-ATA, A. Azim. 1977. The conversion of basin irrigation to perennial systems in Egypt. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 99-106. Pergamon Press, Oxford.

ACADEMY OF SCIENTIFIC RESEARCH AND TECHNOLOGY. 1975. *Effect of Nile suspended water deficit on the properties and fertilization requirements of Egyptian soils.* Academy of Scientific Research and Technology, Cairo.

ADAMS, R.M. 1965. *Land behind Baghdad. The history of settlement on the Diyala plains.* University of Chicago Press, Chicago.

AMIN, M.A. 1977. Problems and effects of schistosomiasis in irrigation schemes in the Sudan. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 407-412. Pergamon Press, Oxford.

ANDERSON, R.L.; MAASS, A. 1971. *A simulation of irrigation systems: the effect of water supply and operating rules on production and income on irrigated farms.* US Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, D.C.

ANTOINE, P.; DELACOURT, A. 1977. Observations sur deux sols argileux (vertisols) irrigués depuis 25 ans dans la plaine du Gharb (Maroc). In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 277. Pergamon Press, Oxford.

ARAB REPUBLIC OF EGYPT. 1975. *The high dam and its effects.* National Council for Production and Economic Affairs, Cairo.

AUBERT, G. 1965. Transformations des sols de la zone aride sous l'influence des irrigations. *Wasserwirtschaft in Afrika*, p. 75-82.

BAKER, S. 1976. *Ancient irrigation systems in southern Sri Lanka.* Paper presented at 72nd annual meeting of Association of American Geographers. New York, April 1976.

BHUMBLA, D.R. 1977. Chemical composition of irrigation water and its effect on crop growth and soil properties. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 279-288. Pergamon Press, Oxford.

BHUMBLA, D.R.; ABROL, I.P. 1972. Is your water suitable for irrigation? *Indian Farmer*, 22, p. 15-17.

BOGOMOLOV, G.V.; LEBEDEV, A.V.; BOGOMOLOV, Y.G. 1977. Influence of irrigation on hydrogeological processes in the aeration zone. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 125-126. Pergamon Press, Oxford.

BOS, M.G. 1977. Some influences of project management on irrigation efficiencies. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 351-360. Pergamon Press, Oxford.

BROKENSHA, D.; SCUDDER, T. 1968. Resettlement. In: *Dams in Africa*, N. Rubin and W.M. Warren (Eds). Frank Cass, London.

BRONDO, A.A.; ESQUER, L.R.; ESPINOSA DE LEON, E. 1977. Operation of the irrigation districts in Mexico. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 81-84. Pergamon Press, Oxford.

BUTLER, J.H.; DOEHRING, D.O. 1976. *Irrigation and carbonate terrain. Some planning consideration.* Paper presented at 72nd annual meeting of Association of American Geographers. New York, April 1976.

CHAMBERS, R. 1975. *Water management and paddy production in the dry zone of Sri Lanka.* Occasional Publication No. 8. Agrarian Research and Training Institute.

CHAMBERS, R.; MORIS, J. (Eds). 1973. *Mwea: An irrigated rice settlement in Kenya.* Afrika-Studien No. 83. Weltform Verlag, Munich.

CHURCH, R.J.H. 1963. *Problems of large-scale irrigation projects in Africa.* Economic Commission for Africa, Addis Ababa.

CONSULTATIVE GROUP ON INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH: TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE. 1973. *Report of a research review mission to the Near East and North Africa.* Consultative Group on International Agricultural Research, Rome.

COOPER, J.P. (Ed.). 1975. *Photosynthesis and productivity in different environments.* International Biological Programme 3. Cambridge University Press, Cambridge.

COUMBARAS, A. 1962. Devenir et avenir de la bilharziose en Tunisie. *Annales de Parasitologie humaine et comparée*, XXXVII, No. 3, p. 276-294.

COUMBARAS, A. 1965. L'hydraulique du Sud tunisien et le problème de l'eau potable. *Archives de l'Institut Pasteur de Tunis*, No. 3-4, p. 429-472.

COUMBARAS, A. 1977a. Une approche pluridisciplinaire (irrigation et santé) dans deux projets intégrés d'irrigation. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 75-80. Pergamon Press, Oxford.

COUMBARAS, A. 1977b. Santé et irrigation. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 385-394. Pergamon Press, Oxford.

COWARD, E.W. 1973. Institutional and social organizational factors affecting irrigation: their application to a specific case. In: *Water management in Philippine irrigation systems: research and operations.* p. 207-218. International Rice Research Institute, Los Baños.

COWARD, E.W. 1976. *Irrigation institutions and organizations. An international bibliography,* New York State College of Agriculture and Life Sciences, New York.

DAGET, J. 1977. La production de poissons de consommation dans les écosystèmes irrigués. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 295-302. Pergamon Press, Oxford.

DEOM, J. 1976. *Water resources development and health. A selected bibliography.* World Health Organization, Geneva.

DIELEMAN, P.J. 1976. Personal correspondence, May 5.

DUKHOVNY, V.; LITVAK, L. 1977. Effect of irrigation on Syr Darya water regime and water quality. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 265-276. Pergamon Press, Oxford.

EHLERS, E. 1975. Traditionelle und Moderne Formen der Landwirtschaft in Iran. *Marburger Geographische Schriften*, vol. 64.

EHLERS, E. 1977. Social and economic consequences of large-scale irrigation developments - the Dez Irrigation Project, Khuzestan, Iran. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 85-98. Pergamon Press, Oxford.

ELDRIDGE, E.F. 1963. Irrigation as a source of water pollution. *Wat. Pollut. Contr. Fedn.*, 35, p. 614-625.

EL GABALY, M.M. 1976. Personal correspondence, March 29.

EL GABALY, M.M. 1977. Problems and effects of irrigation in the Near East region. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 239-250. Pergamon Press, Oxford.

EL HADARI, A.M. 1972. Irrigated agriculture in the Sudan: new approaches to organization and management. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 27, p. 25-37.

FALKENMARK, M.; LINDH, G. 1976. *Water for a starving world.* Westview Press, Boulder.

FAO. 1969. *Report to the Ford Foundation on the need for agricultural extension specialists in Pakistan.* FAO, Rome.

FAO. 1972. *State of food and agriculture.* FAO, Rome.

FAO-UNESCO. 1973. *Irrigation, drainage and salinity. An International Source Book.* Hutchinson/FAO/UNESCO, London.

FARID, M.A. 1977. Irrigation and malaria in arid lands. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 413-420. Pergamon Press, Oxford.

FREDERICK, K. 1975. *Water management and agricultural development.* Johns Hopkins Press, Baltimore.

GUNTER, J.D. 1976. *Water for western Oklahoma: alternative supplementation techniques.* Paper presented at 72nd annual meeting Association of American Geographers. New York, April 1976.

HAGAN, R.M.; HOUSTON, C.E.; ALLISON, S.V. 1968. *Successful irrigation.* Food and Agriculture Organization, Rome.

HAGAN, R.M.; HOUSTON, C.E.; BURGY, R.H. 1968. *More crop per drop: approaches to increasing production for limited water resources.* International Conference on Water for Peace, Washington, D.C.

HANSSON, K.E. 1976. Personal correspondence, March 11.

HELLMERS, H.; BONNER, J. 1959. Protosynthetic limits of forest tree yields. *Proc. Soc. Amer. For.*, p. 32-35.

HILL, M.N.; CHANDLER, J.A.; HIGHTON, R.B. 1977. A comparison of mosquito populations in irrigated and non-irrigated areas of the Kano plains, Nyanza Province, Kenya. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 307-316. Pergamon Press, Oxford.

HOLY, M. 1971. *Water and environment.* FAO, Rome.

HOLY, M. 1977. The efficiency of irrigation schemes, an overview. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 343-350. Pergamon Press, Oxford.

HOTES, F.L.; PEARSON, E.A. 1977. Effects of irrigation on water quality. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 127-158. Pergamon Press, Oxford.

HOUSTON, C.E. 1969. *Extension production specialist.* Report to the Ford Foundation. Pakistan.

HOUSTON, C.E. 1977. Irrigation development in the world. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 425-432. Pergamon Press, Oxford.

HYATT, E.J.; HOPPER, D.W. 1970. *Discussion paper on key needs for agricultural water management research and training in the developing nations.* International Development Research Centre, Ottawa.

INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE (ICID). 1967. *World-wide survey of experiments and results on the prevention of evaporation losses from reservoirs.* ICID, n.p.

INTERNATIONAL SOCIETY OF SOIL SCIENCE (ISSS). 1975. *Third International Symposium on Soil conditioning: Proceedings.*

KINAWY, I.Z. 1977. The efficiency of water use in irrigation in Egypt. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 371-378. Pergamon Press, Oxford.

KOVACS, G. 1977. Changes in hydrological processes. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 113-124. Pergamon Press, Oxford.

KOVDA, V.A. 1977. Arid land irrigation and soil fertility: problems of salinity, alkalinity, compaction. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 211-236. Pergamon Press, Oxford.

KOVDA, V.A.; ROZANOV, B.G.; ONISHENKO, S.K. 1977. On probability of droughts and secondary salinization of world soils. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 237-238. Pergamon Press, Oxford.

LEES, S.H. 1973. *Sociopolitical aspects of canal irrigation in the Valley of Oaxaca.* Memoirs of the Museum of Anthropology No. 6. University of Michigan, Ann Arbor.

LOWE-MCCONNEL, R.H. (Ed.). 1966. *Man-made lakes.* Academic Press, London.

LU, H.L. 1976. *Water and rice.* Paper presented at 72nd annual meeting Association of American Geographers. New York, April 1976.

LVOVICH, M. 1973. *The world's water.* Mir, Moscow.

MAGYAR, P. 1973. *Simulation of the hydrologic cycle using atmospheric water vapour transport data.* Vitoki, Budapest.

MITCHELL, D.S. 1977. Water weed problems in irrigation systems. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 317-328. Pergamon Press, Oxford.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1974. *More water for arid lands, promising technologies and research opportunities.* Board on Science and Technology for International Development, Commission on International Relations, National Academy of Sciences, Washington, D.C.

NESSON, C. 1972. Densité des puits et niveaux piézométriques dans les palmeraies de l'Oued Righ. *Les problèmes de développement du Sahara septentrional*, Vol. I. Alger.

NUTMAN, P.S. (Ed.). 1976. *Symbiotic nitrogen fixation in plants.* International Biological Programme 7. Cambridge University Press, Cambridge.

OBENG, L. (Ed.). 1969. *Man-made lakes.* Ghana Academy of Sciences, Accra.

PECZELY, T. 1977. Some observations concerning the changes in the hydrological cycle caused by irrigation. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects.* E.B. Worthington (Ed.), p. 159-170. Pergamon Press, Oxford.

PELS, S.; STANNARD, M.E. 1977. Some environmental changes due to irrigation development in semi-arid parts of New South Wales, Australia. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects*. E.B. Worthington (Ed.), p. 171-184. Pergamon Press, Oxford.

PETERSON, D.R. 1972. *Water use and management*. International Development Research Centre, Ottawa.

RADOSEVICH, G.E. 1974. Water use organizations for small farmers. In: *Small farm agricultural development problems*. H.H. Biggs and R.L. Tinnermeier (Eds), p. 131-148. Colorado State University, Fort Collins.

RAHMAN, M. 1976. *Perennial irrigation and hydrological imbalance in arid Pakistan*. Paper presented at 72nd annual meeting of the Association of American Geographers. New York, April 1976.

RODER, W. 1965. *The Sabi Valley irrigation projects*. Research Paper No. 99. University of Chicago, Department of Geography, Chicago.

SCHICKEDANZ, P.T.; ACKERMANN, W.C. 1977. Influence of irrigation on precipitation in semi-arid climates. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects*. E.B. Worthington (Ed.), p. 185-196. Pergamon Press, Oxford.

SCIENTIFIC COMMITTEE ON PROBLEMS OF THE ENVIRONMENT. 1972. *Man-made lakes as modified ecosystems*. SCOPE Report No. 2. ICSU-SCOPE, Paris.

SEN, A.K.; MANN, H.S. *Exploration, utilization and quality of groundwater in Rajasthan*. India: Central Arid Zone Research Institute, Jodhpur. (Unpublished paper).

SIDDIQI, A.H. 1976. *Climatic factors in the use of irrigation in Pakistan*. Paper presented at 72nd annual meeting of Association of American Geographers. New York, April 1976.

STANLEY, N.F.; ALPERS, M.P. (Eds). 1975. *Man-made lakes and human health*. Academic Press, London.

STEWARD, J. 1955. *Irrigation civilization: a comparative study*. Social Science Monograph No. 1. Pan-American Union, Washington, D.C.

STEWART, W.D.P. (Ed.). 1975. *Nitrogen fixation by free-living micro-organisms*. International Biological Programme 6. Cambridge University Press, Cambridge.

STOVER, R.H. 1955. Flood-fallowing for eradication of *Fusarium oxysporum f. culense*. The effect of oxygen on fungus survival. *Soil Science*, 80, p. 397-412.

SZABOLCS, I. 1974. *Salt affected soils of Europe*. Budapest.

TABA, A.H. 1977. The influence of irrigation on mankind. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects*. E.B. Worthington (Ed.), p. 433-436. Pergamon Press, Oxford.

UNESCO. 1974. *Report of an international working group on MAB Project 5: Ecological effects of human activities on the value and resources of lakes, marshes, rivers, deltas, estuaries and coastal zones*. MAB Report Series No. 21. Unesco, Paris.

UNESCO. 1975. *Report of an expert panel on MAB Project 4: Impact of human activities on the dynamics of arid and semi-arid zone ecosystems, with particular attention to the effects of irrigation*. MAB Report Series No. 29. Unesco, Paris.

UNESCO. 1978. *Report of a regional meeting on integrated ecological research and training needs in North East Africa and in the Near and Middle East, with emphasis on the ecological effects of irrigation derived from large river basins*. MAB Report Series No. 40. Unesco, Paris.

UNESCO-FAO (In publication since 1971). *Soil map of the world*. Unesco, Paris and FAO, Rome.

UNIVERSITY OF READING. 1969. *The economics of irrigation development: a symposium*. Development Study No. 6. University of Reading, Department of Agricultural Economics, Reading.

URROZ, J.E. 1977. Reutilization of residual water and its effects on agriculture. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects*. E.B. Worthington (Ed.), p. 361-370. Pergamon Press, Oxford.

VARALLYAY, G. 1977. Soil water problems related to salinity and alkalinity in irrigated lands. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects*. E.B. Worthington (Ed.), p. 251-264. Pergamon Press, Oxford.

VAN SCHLIFGAARDE *et al.* 1974. Irrigation management for salt control. *Journal of Irrigation and Drainage, American Society of Civil Engineers*, 100, p. 321-338.

WELCOMME, R.L. 1977. Inland fisheries in arid zones. In: *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects*. E.B. Worthington (Ed.), p. 303-306. Pergamon Press, Oxford.

WILKEN, G.C. 1974. Some aspects of resource management by traditional farmers. In: *Small farm agricultural development problems*. H.H. Biggs and R.L. Tinnermeie (Eds). Colorado State University, Fort Collins.

WILKEN, G.C. 1976. *Manual irrigation in Meso America*. Paper presented at 72nd annual meeting of Associatio of American Geographers. New York, April 1976.

WORTHINGTON, E.B. (Ed.). 1977. *Arid land irrigation in developing countries. Environmental problems and effects*. Pergamon Press, Oxford.

ZAIDI, I.H. 1976. Land use hazards in an arid environment. The case of the lower Indus region. *Ecological guidelines for the use of natural resources in the Middle East and South West area*. International Unior for Conservation of Nature and Natural Resources, Morges.

publications de l'unesco : agents de vente

Algérie	**Institut pédagogique national, 11, rue Ali-Haddad (ex-rue Zaâtcha), Alger. Société nationale d'édition et de diffusion** (SNED), 3, boulevard Zirout-Youcef, Alger.
Allemagne (Rép. féd.)	S. Karger GmbH, Karger Buchhandlung, Angerhofstrasse 9, Postfach 2, D-8034 Germering-München. « Le Courrier » *(édition allemande seulement)*. Colmantstrasse 22, 5300 Bonn. *Pour les cartes scientifiques seulement :* Geo Center, Postfach 800830, 7000 Stuttgart 80.
Antilles françaises	Librairie « Au Boul'Mich », 1, rue Perrinon et 66, avenue du Parquet, 97200 Fort-de-France (Martinique).
Argentine	EDILYR S.R.L., Tucumán 1699 (P.B. « A »), 1050 Buenos Aires.
Autriche	Dr. Franz Hain, Verlags-und Kommissionsbuchhandlung, Industriehof Stadlau, Dr. Otto-Neurath-Gasse 5, 1220 Wien.
Belgique	Jean De Lannoy, 202, avenue du Roi, 1060 Bruxelles, CCP 000-0070823-13.
Bénin	Librairie nationale, B.P. 294, Porto Novo.
Brésil	Fundação Getúlio Vargas, Editoria-Divisão de Vendas, caixa postal 9.052-ZC-02, Praia de Botafogo 188, Rio de Janeiro, RJ (CEP 20000).
Bulgarie	**Hemus, Kantora Literatura, bd. Rousky 6, Sofija.**
Canada	Renouf Publishing Company Ltd., 2182 St. Catherine Street West, Montréal. Que. H3H 1M7.
Chili	Bibliocentro Ltda., Constitución n.° 7, casilla 13731, Santiago (21).
Congo	**Librairie populaire, B.P. 577, Brazzaville.**
Côte-d'Ivoire	**Centre d'édition et de diffusion africaines, B.P. 4541, Abidjan Plateau.**
Cuba	**Instituto Cubano del Libro, Centro de Importación, Obispo 461, La Habana.**
Egypte	National Centre for Unesco Publications, 1 Talaat Harb Street, Tahrir Square, Cairo.
Espagne	Mundi-Prensa Libros S.A., apartado 1223, Castello 37, Madrid-1. Ediciones Liber, apartado 17, Magdalena 8, Ondárroa (Vizcaya). DONAIRE, Ronda de Outeiro 20, apartado de correos 341, La Coruña. Librería Al-Andalus, Roldana 1 y 3, Sevilla 4. LITEXSA, Librería Técnica Extranjera, Tuset 8-10 (Edificio Monitor), Barcelona.
Ethiopie	Ethiopian National Agency for Unesco, P.O. Box 2996, Addis Ababa.
France	**Librairie de l'Unesco, 7, place de Fontenoy, 75700 Paris; CCP 12598-48.**
Ghana	**Presbyterian Bookshop Depot Ltd., P.O. Box 195, Accra. Ghana Book Suppliers Ltd., P.O. Box 7869, Accra. The University Bookshop of Ghana, Accra. The University Bookshop of Cape Coast. The University Bookshop of Legon, P.O. Box 1, Legon.**
Grèce	Grandes librairies d'Athènes (Eleftheroudakis, Kauffman, etc.).
Haïti	Librairie « A la Caravelle », 26, rue Roux, B.P. 111, Port-au-Prince.
Haute-Volta	**Librairie Attie, B.P. 64, Ouagadougou. Librairie catholique « Jeunesse d'Afrique », Ouagadougou.**
Hongrie	**Akadémiai Könyvesbolt, Váci u. 22, Budapest V. A.K.V. Könyvtárosok Boltja, Népköztáraaság utja 16, Budapest VI.**
Irak	McKenzie's Bookshop, Al-Rashid Street, Baghdad.
Iran	**Commission nationale iranienne pour l'Unesco, avenue Iranchahr Chomali, n° 300, B. P. 1533, Téhéran. Kharazmie** Publishing and Distribution Co., 28 Vessal Shirazi Street, Sharezza Ave., P.O. Box 314/1486, Téhéran.
Israël	**Emanuel Brown, formerly Blumstein's Bookstores: 35 Allenby Road *et* 48 Nachlat Benjamin Street, Tel Aviv; 9 Shlomzion Hamalka Street, Jerusalem.**
Italie	**LICOSA (Libreria Commissionaria Sansoni S. p. A.), via Lamarmora 45, casella postale 552, 50121 Firenze.**
Jamahiriya arabe libyenne	**Agency for Development of Publication and Distribution, P.O. Box 34-35, Tripoli.**
Koweït	**The Kuwait Bookshop Co. Ltd, P.O. Box 2942, Kuwait.**
Liban	**Librairies Antoine A. Naufal et Frères, B.P. 656, Beyrouth.**
Liechtenstein	**Eurocan Trust Reg., P.O. Box 5, Schaan.**
Luxembourg	**Librairie Paul Bruck, 22, Grand-Rue, Luxembourg.**
Madagascar	Commission nationale de la République démocratique de Madagascar pour l'Unesco, B.P. 331, Tananarive.
Mali	**Librairie populaire du Mali, B.P. 28, Bamako.**
Maroc	***Toutes les publications :*** **Librairie « Aux belles images », 281, avenue Mohammed-V, Rabat (CCP 68-74).** ***« Le Courrier » seulement (pour les enseignants) :*** **Commission nationale marocaine pour l'Unesco, 20, Zenkat Mourabitine, Rabat (CCP 324-45).**
Maurice	**Nalanda Co. Ltd., 30 Bourbon Street, Port-Louis.**
Mexique	SABSA, Insurgentes Sur n.° 1032-401, México 12 D.F.
Monaco	**British Library, 30, boulevard des Moulins, Monte-Carlo.**
Mozambique	Instituto Nacional do Livro e do Disco (INLD), avenida 24 de Julho 1921, r/c e 1.° andar, Maputo.
Niger	**Librairie Mauclert, B.P. 868, Niamey.**
Nouvelle-Calédonie	Reprex, SARL, B.P. 1572, Nouméa.
Pays-Bas	N. V. Martinus Nijhoff, Lange Voorhout 9, 's-Gravenhage. Systemen Keesing, Ruysdaelstraat 71-75, Amsterdam 1007.
Pologne	Ars Polona - Ruch, Krakowskie Przedmiescie n° 7, 00-068 Warszawa. ORPAN - Import, Palac Kultury, 00-901 Warszawa.
Portugal	**Dias & Andrade Ltda., Livraria Portugal, rue do Carmo 70, Lisboa.**
Rép. dém. allemande	Librairies internationales *ou* Buchhaus-Leipzig, Postfach 140, 701 Leipzig.
Rép. unie du Cameroun	Le Secrétaire général de la Commission nationale de la République unie du Cameroun pour l'Unesco, B.P. 1060, **Yaoundé.**
Roumanie	ILEXIM, Romlibri, Str. Biserica Amzei n° 5-7, P.O. Box 134-135, Bucuresti. *Abonnements aux périodiques :* Rompresfilatelia, calea Victoriei n° 29, Bucuresti.
Sénégal	**La Maison du livre, 13, avenue Roume, B.P. 20-60, Dakar. Librairie Clairafrique, B.P. 2005, Dakar. Librairie « Le Sénégal », B.P. 1594, Dakar.**
Suisse	**Europa Verlag, Rämistrasse 5, Zürich. Librairie Payot, 6, rue Grenus, 1211 Genève 11.**
Rép. arabe syrienne	**Librairie Sayegh, Immeuble Diab, rue du Parlement, B.P. 704, Damas.**
Tchécoslovaquie	SNTL, Spalena 51, Praha 1 (*Exposition permanente*). Zahranicni literatura, 11 Soukenicka, Praha 1. *Pour la Slovaquie seulement :* Alfa Verlag, Publishers, Hurbanovo nam. 6, 893 31 Bratislava.
Togo	**Librairie évangélique, B.P. 378, Lomé. Librairie du Bon Pasteur, B.P. 1164, Lomé. Librairie moderne, B.P. 777, Lomé.**
Tunisie	**Société tunisienne de diffusion, 5, avenue de Carthage, Tunis.**
Turquie	**Librairie Hachette, 469 Istiklal Caddesi, Beyoglu, Istanbul.**
URSS	**Mezhdunarodnaja Kniga, Moskva G-200.**
Yougoslavie	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, P.O.B. 36, 11-001 Beograd. Drzavna Zalozba Slovenije, Titova C. 25, P.O.B. 50-1, 61-000 Ljubljana.
Zaïre	**La Librairie, Institut national d'études politiques, B.P. 2307, Kinshasa. Commission nationale zaïroise pour l'Unesco,** Commissariat d'Etat chargé de l'éducation nationale, B.P. 32. Kinshasa.

Basée sur les travaux d'un séminaire international réuni à Alexandrie en février 1976, cette Note technique traite à la fois des résultats bénéfiques et des résultats négatifs de l'irrigation dans les pays en développement. On y analyse les interrelations parmi les nombreuses composantes du système irrigué et l'on y examine certains problèmes techniques fréquemment associés à l'irrigation, tels que salinisation, engorgement et alcalinisation, ainsi que les problèmes de biologie humaine et les facteurs socio-économiques s'y rapportant.

L'accent est mis particulièrement sur la nécessité d'une approche intégrée dans les recherches sur les écosystèmes irrigués et dans l'aménagement et la planification de l'irrigation. En même temps, les aspects dans lesquels une démarche de ce genre s'impose d'urgence sont mis en évidence. Enfin, le lecteur trouvera dans cet ouvrage des suggestions en vue d'améliorer l'efficacité des projets existants et des critères possibles pour évaluer les projets éventuels.

Une stylisation du « ankh », signe de la vie dans l'ancienne Egypte, a été introduite dans le sigle du Programme sur l'homme et la biosphère (MAB)

ISBN 92-3-201586-2