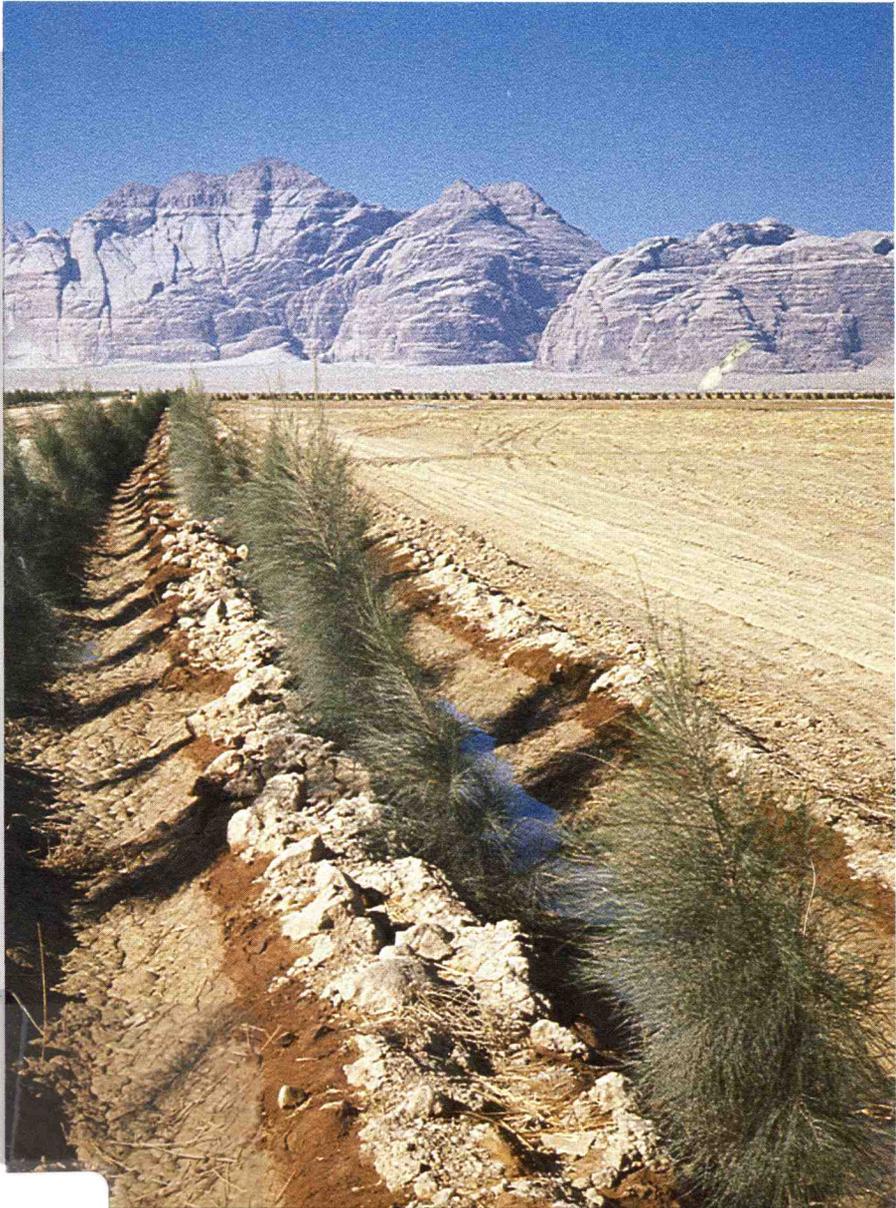


Foresterie irriguée en pays arides et semi-arides : une synthèse



ARCHIV
69330

.mitage

Le Centre de recherches pour le développement international, société publique créée en 1970 par une loi du Parlement canadien, a pour mission d'appuyer des recherches visant à adapter la science et la technologie aux besoins des pays en développement ; il concentre son activité dans cinq secteurs : agriculture, alimentation et nutrition ; information ; santé ; sciences sociales ; et communications. Le CRDI est financé entièrement par le Parlement canadien, mais c'est un Conseil des gouverneurs international qui en détermine l'orientation et les politiques. Établi à Ottawa (Canada), il a des bureaux régionaux en Afrique, en Asie, en Amérique latine et au Moyen-Orient.

© Centre de recherches pour le développement international 1986
Adresse postale : C.P. 8500, Ottawa (Canada) K1G 3H9
Siège : 60, rue Queen, Ottawa

Armitage, F.B.

IDRC-234f

Foresterie irriguée en pays arides et semi-arides : une synthèse. Ottawa, Ont., CRDI, 1986. 192 p. : ill.

/Foresterie/, /production forestière/, /irrigation/, /zone aride/, /zone semi-aride/ — /systèmes d'irrigation/, /plantations/, /aspects économiques/, /bibliographie.

CDU : 634.0:631.67

ISBN : 0-88936-964-8

Édition microfiche offerte sur demande.

This publication is also available in English.

*Foresterie irriguée en pays arides et
semi-arides : une synthèse*

F.B. Armitage



ARCHIV
630 : 631.67

A JF

Resumé

L'irrigation est une technique employée dans beaucoup de plantations forestières des régions arides et semi-arides depuis les années 1860. Dans certains cas, cette technique a montré qu'elle pouvait accroître le rendement des forêts et ainsi contrer l'épuisement des maigres ressources forestières naturelles attribuable à la croissance démographique, tout comme la dégradation de l'environnement qui l'accompagne. La présente synthèse vise à améliorer la foresterie irriguée par un examen de l'expérience acquise, des facteurs de production et des avantages inhérents de l'association des plantations d'arbres à l'agriculture. Elle aborde aussi le potentiel des plantations forestières irriguées et offre une liste des critères économiques, sociaux et techniques à employer pour décider de la faisabilité d'établissement de telles plantations. Elle précise les étapes de la planification, de la mise en œuvre et de l'exploitation de ces plantations et donne une idée de leur rendement et des besoins de recherche dans ce domaine. Les derniers chapitres portent sur les méthodes utilisées en analyse économique, en gestion et en planification.

Abstract

Use of irrigation in forest plantations in many arid and semi-arid areas since the 1860s has demonstrated in some cases a potential for high wood yields and thus for countering the depletion of meagre natural wood resources, with related environmental degradation, that stems from population increases. This synthesis is aimed at enhancing irrigated forestry through an examination of past experience, the range of inputs required, and the benefits of integrating tree plantations with irrigated agriculture. It reviews the potential for irrigated forest plantations and provides a checklist of economic, sociological, and technical criteria needed to guide decisions as to the feasibility of such developments. Actions to be covered in the planning, implementation, and operational phases of irrigated forest plantations are indicated as are illustrative production levels and research needs. The closing chapters review the approaches in economic analysis, management, and planning.

Resumen

El uso de la irrigación en las plantaciones forestales de muchas áreas áridas y semiáridas a partir de 1860 ha demostrado en algunos casos el potencial para obtener altos rendimientos de madera y para contrarrestar, así, el agotamiento de recursos madereros naturales escasos y la degradación ambiental relacionada que deriva de aumentos poblacionales. Esta síntesis tiene por objeto ampliar la silvicultura irrigada mediante un análisis de la experiencia anterior, de la gama de insumos requeridos y de los beneficios de integrar plantaciones forestales con agricultura irrigada. También reseña el potencial de las plantaciones forestales irrigadas y ofrece una lista de los criterios económicos, sociológicos y técnicos que se requieren para orientar las decisiones en cuanto a la factibilidad de tales desarrollos. Se indican las acciones que deben realizarse en las etapas de planificación, ejecución y operación de las plantaciones forestales irrigadas, así como los niveles de producción ilustrativos y las necesidades de investigación. Los capítulos finales reseñan los enfoques adoptados en el análisis económico, el manejo y la planificación.

Table des matières

Avant-propos	7
Remerciements	9
Résumé	11
Introduction	11
L'environnement en zone aride	11
Expérience de plantations forestières irriguées	12
Quelques concepts de base	13
Les systèmes d'irrigation	14
Évaluation des besoins et des possibilités	15
Développement des plantations irriguées	16
Mise en œuvre et production	17
Aspects économiques des plantations irriguées	19
Organisation et gestion	19
Planification	20
1. Introduction	21
2. Les conditions environnementales dans les zones arides	25
Caractéristiques de l'environnement	25
Climat	25
Lès climats arides	26
Les climats semi-arides	26
Les climats subhumides et humides	27
Les indices climatiques	27
Géomorphologie	28
Sols	29
Hydrologie et ressources hydriques	30
Drainage et salinité	31
Végétation	33
Utilisation des terres et besoins d'irrigation	33
3. Les plantations forestières irriguées	35
Réalizations régionales et nationales	37
Asie du Sud et Moyen-Orient	38
Pakistan	38
Inde	41
Iraq	42
Koweït	43
Émirats arabes unis	44
Autres pays du Moyen-Orient	45

Région méditerranéenne	45
Tunisie	46
Algérie	46
Italie	47
Égypte	47
Turquie	48
Israël	48
Afrique orientale, occidentale et australe	49
Soudan	49
Kenya	53
Mali	53
Niger	56
Nigéria	60
Sénégal	60
Zimbabwe	62
Amérique du Nord	63
États-Unis d'Amérique	63
Amérique du Sud et Amérique centrale	65
Australie	66
Conclusion	67
4. Quelques principes fondamentaux	69
Les relations entre les plantes, le sol et l'eau atmosphérique	69
Irrigation et propriétés du sol	70
Irrigation et topographie	72
Incidences hydrologiques de l'irrigation	72
5. Les systèmes d'irrigation	75
Irrigation par gravité	75
Arrosage par aspersion	78
Systèmes localisés	79
Systèmes et dispositifs d'irrigation spéciaux	80
Captage des eaux de pluie : l'irrigation par ruissellement	83
Critères pour le choix d'un système d'irrigation	84
6. Évaluation des besoins et des possibilités	87
Tendances démographiques et socio-économiques	87
Demande de produits forestiers	87
Les terres et l'eau dans la production du bois	90
Faisabilité technique	93
Eau d'irrigation	93
Qualité	93
Quantité	95
Espèces d'arbres à irriguer	97
Tolérance à la saturation en eau et à la salinité	101
Systèmes racinaires	102
Croissance des arbres et qualité du bois	104
Rentabilité socio-économique	105
Critères décisionnels relatifs à la mise en place de plantations forestières	109

7. Aménagement des plantations irriguées	111
Formes et échelle des plantations irriguées	111
Utilisation et occupation du sol	112
Études physiques et écologiques	113
Évaluation et aménagement des ressources en eau	115
Conception des exploitations irriguées	116
Systèmes d'irrigation et régimes d'arrosage	116
Systèmes et régimes sylvicoles	120
8. Mise en œuvre et production	125
Installation des systèmes d'irrigation et de drainage	125
Implantation des arbres et soins culturaux	126
Production de pépinière	126
Préparation de l'emplacement des plants : espacement	128
Implantation des peuplements forestiers	129
Fertilisation	131
Désherbage et dégagement	132
Soins culturaux : éclaircie et élagage	133
Régime des eaux	135
Fréquence et méthodes d'application	135
Efficacité de l'irrigation : les pertes d'eau	138
Entretien des systèmes d'irrigation et de drainage	140
Problèmes liés à l'irrigation	142
Saturation en eau et salinité	142
Troubles de croissance et maladies du système racinaire	144
Oiseaux, insectes et animaux	145
Effets de l'irrigation sur l'environnement et la santé humaine	147
Croissance et rendement	148
Asie du Sud et Moyen-Orient	148
Inde	148
Iraq	149
Israël	149
Koweït	149
Pakistan	150
Afrique	150
Niger	150
Nigéria	151
Soudan	151
Zimbabwe	151
Généralités	152
Impératifs de recherche	153
9. Aspects économiques des plantations irriguées	157
Besoins, possibilité et nécessité d'une évaluation	157
Analyse et évaluation économiques	158
10. Organisation et gestion	167
11. Planification	175

Annexe 1. Essences cultivées sous irrigation	179
Annexe 2. Évaluation provisoire de la tolérance au sel des arbres et des arbustes au Koweït	181
Annexe 3. Essences croissant bien sous irrigation saline à Eilat (Israël)	182
Annexe 4. Essences ayant résisté à une interruption de l'irrigation à Khartoum (Soudan)	182
Bibliographie	183
Sources principales	183
Ouvrages de référence	184

Avant-propos

Dans les régions arides et semi-arides, l'absence d'eau est l'un des facteurs qui touchent le plus la croissance de la végétation et l'agriculture non irriguée y affiche des rendements faibles et imprévisibles. Aussi, l'irrigation se pratique de plus en plus là où les conditions le permettent. De même, dans le secteur de l'arboriculture, la végétation naturelle et les plantations forestières non irriguées présentent un accroissement annuel minime qui ne peut répondre aux besoins grandissants des communautés locales en combustible ligneux, en matériaux de construction et en d'autres produits. Ce déficit net de la production de biomasse forestière conduit à un épuisement des richesses naturelles et à une désertification inévitable qui se répercutent sur les populations humaines et le milieu.

Au cours des dernières décennies, les recherches ont porté sur l'introduction d'essence d'arbres à croissance rapide et sur des techniques de plantation adaptées à des environnements arides et semi-arides. C'est ainsi que de nombreux pays ont procédé à des essais, plus ou moins couronnés de succès, avec des espèces de pins, d'eucalyptus et d'autres arbres qui présentaient une croissance rapide. Dans un effort pour éviter l'épuisement du sol par de telles espèces et pour en généraliser l'emploi, on s'est attaché ces dix dernières années à implanter des espèces polyvalentes et fixatrices d'azote pouvant fournir du bois, du fourrage et une protection tout en maintenant ou même en augmentant la fertilité des sols. Malgré ces mesures, les arbres n'ont affiché qu'une performance restreinte à cause des faibles quantités d'eau disponibles.

Plusieurs des régions arides et semi-arides du monde sont traversées par de grands fleuves ou rivières, mais les régimes d'irrigation de l'agriculture n'utilisent souvent pas cette ressource à son maximum, d'où le gaspillage qui en résulte. Parallèlement, l'irrigation a surtout été appliquée à la production vivrière et rarement aux récoltes arboricoles, sauf au Pakistan et, dans une moindre mesure, en Inde et au Soudan.

En 1974, le Centre de recherches pour le développement international (CRDI) mettait sur pied un projet de recherche sur les plantations forestières irriguées afin d'étudier l'effet de l'irrigation sur la sylviculture. Les premiers résultats scientifiques ont été controversables, illustrant une réussite spectaculaire avec certaines essences et un échec avec d'autres. Les données économiques ont également semblé discutables puisque les plantations forestières pures entraînaient des coûts élevés alors que les plantations intégrées à des cultures agricoles et celles irriguées à l'aide d'eaux résiduelles ou excédentaires étaient prometteuses.

Pour établir le potentiel des plantations irriguées dans les régions arides et semi-arides des pays en développement, plus particulièrement de l'Afrique,

F.B. Armitage, qui jouit d'une expérience considérable de la foresterie dans ce genre de région, a rédigé, à la demande du CRDI, une analyse des plus complètes sur le sujet. Avec l'aide du personnel responsable du programme de foresterie au CRDI, l'auteur a compilé les renseignements disponibles dans le domaine et a rencontré plusieurs scientifiques de la sylviculture avant de mettre au point une première version. S'inspirant des remarques de ses pairs, l'auteur a revu son manuscrit pour le présenter à une rencontre de groupes restreints d'experts et de représentants des pays et des organismes participants. Cette réunion, organisée à la demande du CRDI et tenue sous les auspices du Commonwealth Forestry Institute (CFI) à Oxford, au Royaume-Uni, a eu lieu en mars 1985. L'auteur a ensuite revu une seconde fois son document en y intégrant les observations et questions soulevées au cours de la réunion d'Oxford.

Cet ouvrage n'est ni un manuel ni un simple exposé de la question. Il se veut une source d'information et un guide général à l'intention des gestionnaires et des décideurs dans le domaine de la foresterie irriguée. On s'attend également à ce que le livre favorise les relations et la collaboration entre les scientifiques et les forestiers ainsi qu'entre les organismes à l'échelle régionale et internationale. Les renseignements donnés sur les expériences réalisées dans divers pays et la bibliographie volumineuse constitueront certes un point de départ à cet égard.

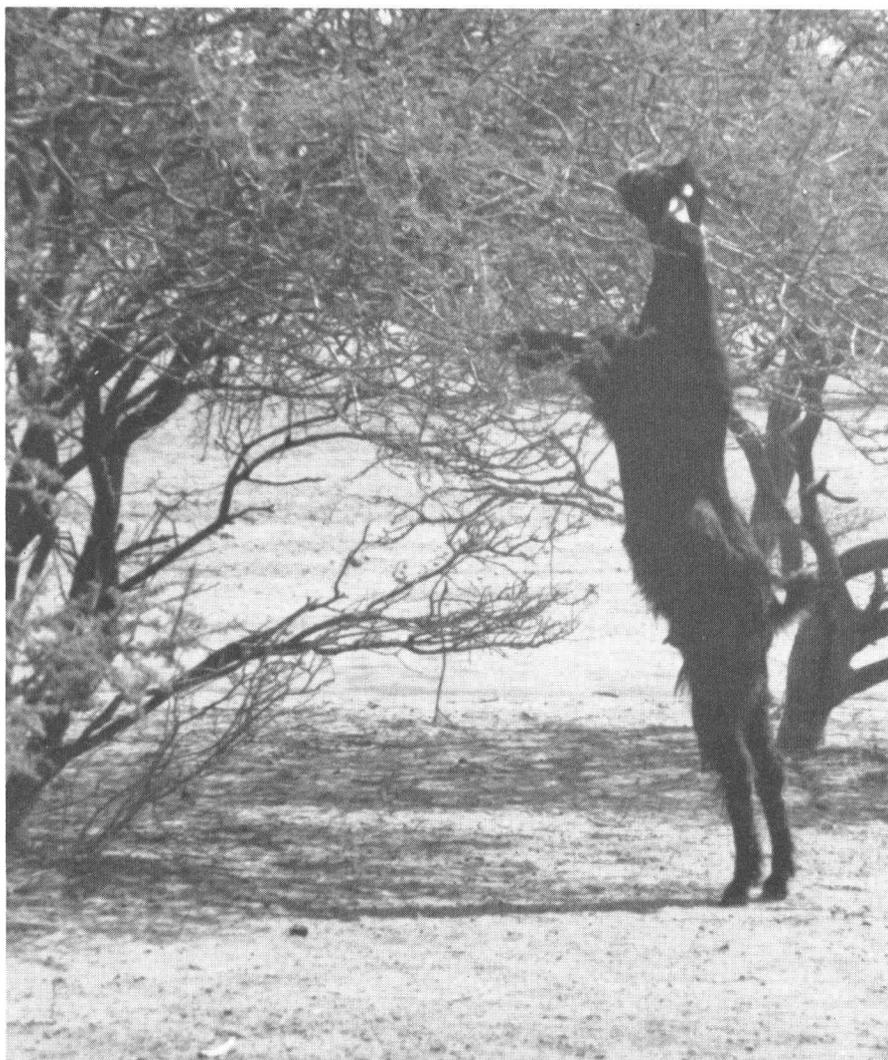
Le CRDI tient à remercier J. Spears et ses collègues de la Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., et P.J. Wood du Conseil international pour la recherche en agroforesterie, Nairobi, Kenya, de leur contribution inestimable lors de l'examen par les pairs. Nous sommes également redevables aux participants de la réunion d'Oxford : J. Burley, CFI ; R.F. Fishwick, Banque mondiale ; O. Hamel, Centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne, France (en poste à Niamey, au Niger) ; W. Howard, Overseas Development Administration, Londres, R.-U. ; T.H. Mather, Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Rome, Italie ; M.I. Sheikh, Institut forestier du Pakistan, Peshawar, Pakistan, et P.J. Wood. Nous sommes vivement reconnaissants à B. Ben Salem de la FAO qui nous a fait tenir ses remarques à la réunion et nous remercions, enfin, le CFI d'avoir bien voulu agir en tant qu'hôte de la rencontre.

H. Zandstra

Directeur, Division des sciences
de l'agriculture, de l'alimentation
et de la nutrition
Centre de recherches pour le développement
international

Remerciements

Cette synthèse a été rendue possible grâce à l'aide et à l'appui d'une foule de personnes représentant divers domaines dans plusieurs institutions. Je désire mentionner en particulier M. Karim Oka du Centre de recherches pour le développement international, qui a dirigé l'analyse et la synthèse ; le personnel de la bibliothèque du CRDI à Ottawa et de la bibliothèque du Commonwealth Forestry Institute, Oxford, R.-U., ainsi que la générosité de plusieurs membres de la Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., plus particulièrement M. Jean Gorse, qui nous ont fourni des renseignements sur les projets appuyés par la Banque mondiale. La synthèse n'aurait pu guère voir le jour n'eut été des publications de l'Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie, dans le domaine des terres et de l'eau.



Les régions arides ont besoin de combustible ligneux et de fourrage : une chèvre en train de brouter près de Dongola, au Soudan.

Résumé

Introduction

Dès l'antiquité, on a pratiqué l'irrigation en pays arides et semi-arides afin d'accroître la production de vivres et de plantes ornementales. Son application à la sylviculture est plus récente. L'irrigation est une technique complexe dont le succès exige la contribution de nombreux spécialistes. La présente synthèse vise à faciliter les applications forestières de cette technique en précisant les éléments d'information spécialisée nécessaires et en indiquant les sources disponibles dans la documentation consacrée à la foresterie et à l'agriculture. Elle aspire également à renseigner les spécialistes de l'irrigation et de l'agriculture sur la faisabilité et les avantages potentiels de l'intégration des plantations forestières aux cultures de plein champ, à encourager de telles initiatives lorsque les circonstances s'y prêtent et à susciter la formulation des principes directeurs indispensables.

L'environnement en zone aride

L'irrigation se pratique là où les apports naturels d'eau ne suffisent pas à assurer la croissance végétale. C'est dire qu'elle joue un grand rôle dans les régions arides ou semi-arides caractérisées par des précipitations faibles et irrégulières, un abondant rayonnement incident, des températures et des taux d'évaporation élevés durant l'été ou tout au long de l'année, une faible humidité atmosphérique et des vents souvent forts. Des indices servent à classer les climats selon leur incidence sur la croissance végétale. On les utilise lors de l'évaluation, de la planification et de la mise en œuvre des systèmes de production végétale, y compris l'irrigation.

Du point de vue géomorphologique, les zones arides se caractérisent par des ruptures de pente brutales entre les massifs montagneux et les pédiments associés, par des cônes de déjection, des plaines d'épandage fluvio-glaciaire, des bas-fonds et des dépressions qui influencent la répartition de l'eau et des éléments constitutifs des sols. L'accumulation soudaine de matériel transporté au cours des rares ruissellements se manifeste par des dépôts grossiers le long des ravins et par la formation de bancs et de couches de gravier. L'action du vent sur le sable entraîne la formation de dunes et de bancs de sable, indépendamment du relief.

Le climat exerce une influence prépondérante sur la formation des sols, une augmentation de l'aridité ralentissant progressivement ou entravant la plupart des processus en cause. La décomposition du matériau original s'accélère dans des conditions de température élevée et variable. La végétation et les matières organiques exercent toutefois une influence négligeable. L'illuviation ainsi

que la répartition et la recristallisation des sels solubles après lessivage se bornent presque toujours aux dépressions où s'accumulent occasionnellement les eaux de ruissellement. Les sols sont pauvres en éléments nutritifs. Les dépôts limoneux accumulés dans les dépressions consistent souvent en croûtes salines et alcalines et les déserts pierreux ne sont pas rares. Lorsque l'aridité diminue, les sols sont mieux développés, plus épais et mieux lessivés et la profondeur à laquelle se trouve l'horizon calcaire augmente. Les dépressions mal drainées se caractérisent en particulier par des sols alcalins ou sodiques.

L'hydrologie et les ressources hydriques des zones arides dépendent directement du climat. Les précipitations contribuant à la réalimentation des eaux souterraines sont peu abondantes, de sorte que les nappes aquifères sont soit approvisionnées par des rivières qui prennent leur source dans des zones plus humides, soit constituées d'eau fossile. Plus l'aridité augmente, plus l'eau dont on peut disposer pour l'irrigation est salée.

Les problèmes soulevés par la salinité du sol et de l'eau sont plus fréquents et plus aigus dans les régions arides que dans les régions tempérées. Ils touchent un tiers des 200 millions d'hectares de terres irriguées dans le monde et résultent de la forte évaporation, de la précipitation des sels dans les sédiments marins et de la contamination directe des eaux souterraines par la mer, l'eau salée fossile ou les dépôts de sels en suspension dans l'air. Ces sols, selon leurs caractéristiques chimiques, leur pH et leur conductivité électrique, peuvent être salins, sodiques ou salino-sodiques. La forte teneur en sodium de ces deux derniers types de sols peut avoir un effet marqué sur leurs propriétés physiques.

Dans les régions arides, la végétation est absente à modérément clairsemée, et sa répartition dépend des facteurs propres aux terrains. Elle présente certaines caractéristiques qui prouvent l'adaptation des espèces des régions sèches à de tels milieux. Bien qu'assez robuste, cette végétation peut se dégrader considérablement à la suite de coupes, de pâturage et de broutement excessifs. La régénération est lente.

La concentration de populations « bourgeonnantes », généralement le long des principales rivières, suscite une forte demande locale de nourriture, de bois de chauffage et de fourrage. Il s'ensuit une réduction de la végétation naturelle et, fréquemment, une désertification. L'irrigation à l'aide d'eaux superficielles ou souterraines permet alors d'accroître dans des proportions considérables la production vivrière et, dans certains cas, forestière.

Expérience de plantations forestières irriguées

Il n'existe pas de données précises sur le nombre de plantations forestières irriguées. Les premières grandes plantations de ce type ont débuté en 1864 dans la vallée de l'Indus et représentaient 0,8 % à 0,9 % des surfaces irriguées en 1969. Au Soudan, les plantations effectuées dans le cadre du programme d'irrigation de la Gézireh intervenaient en 1967 pour 0,43 % de la surface irriguée. En Argentine, on trouve de très vastes plantations irriguées de peupliers et de saules, mais il est cependant peu probable qu'elles atteignent 1 % de la surface irriguée totale en dépit de la pénurie parfois dramatique de bois.

Les plantations forestières irriguées sont d'ordinaire intégrées aux cultures, notamment sous forme de rideaux-abris. C'est pourquoi elles sont souvent soumises aux mêmes problèmes de saturation en eau et salinité, particulièrement

lorsqu'elles occupent de petites zones non cultivées servant de lieux de déversement potentiel du trop-plein des eaux d'irrigation. En conséquence, le rendement des plantations est souvent inférieur à ce qu'il pourrait être, ou encore diminue à mesure que les dispositifs d'irrigation vieillissent. Ces insuffisances s'expliquent aussi par l'utilisation d'espèces, de provenances ou de mélanges de qualité moindre, des façons culturales inadéquates, des modes de gestion n'assurant pas une occupation optimale des lieux, une irrigation excessive, impropre ou irrégulière, une végétation adventice, un entretien insuffisant, ou une diminution de la fertilité du sol.

On a démontré que les cubages élevés résultaient de la combinaison de la totalité ou de la majorité des facteurs suivants : recherche et développement poussés, suivis d'une déduction réaliste ; analyse approfondie de la nature du sol et de l'eau ainsi que des conditions sociologiques et économiques ; emploi de méthodes d'irrigation appropriées ; conception, mise en œuvre et gestion judicieuses du projet ; et enfin motivation élevée et formation convenable de l'ensemble du personnel et des producteurs intéressés.

Quelques concepts de base

Pour comprendre la pratique de l'irrigation, il est essentiel de bien connaître les rapports entre les végétaux, le sol et l'eau atmosphérique. La circulation de l'eau à l'intérieur du sol est soumise aux forces mécaniques et moléculaires et dépend du taux d'infiltration de l'eau de pluie dans le sol. La réduction de l'humidité du sol au-dessous de la capacité capillaire peut conduire, selon les propriétés physiques du sol, à un flétrissement temporaire, puis permanent. La quantité d'eau fixée par une plante dépend des caractéristiques et de l'état dynamique de l'eau qu'elle contient, du potentiel hydrique à la surface des racines et de l'efficacité du système racinaire. C'est l'évaporation à la surface des feuilles qui provoque l'ascension de l'eau à l'intérieur de la plante à partir des cellules du xylème (les trachéides dans le cas des gymnospermes), elles-mêmes alimentées par le système racinaire. Ce processus est tributaire des conditions atmosphériques. Les données climatiques peuvent servir à prévoir le degré d'humidité du sol, l'évaporation possible, l'évapotranspiration et, par conséquent, l'excès et le manque d'humidité du sol.

La structure — qui peut être modifiée par la façon culturale en cause — et la texture des sols influent sur leur perméabilité et leur capacité de rétention, se répercutant ainsi sur l'ampleur et la fréquence de l'irrigation. Les caractéristiques chimiques et physiques des sols et la circulation des solutés sont étroitement liées. Il est possible de déterminer la meilleure combinaison entre la quantité d'eau d'irrigation et la teneur en sel de cette dernière et d'exercer une certaine influence sur ces deux paramètres par l'intermédiaire du mode d'irrigation utilisé et de l'apport d'engrais.

La topographie joue sur les processus de formation des sols, sur l'hydrologie d'une région et, par voie de conséquence, sur le choix des lieux et des méthodes d'irrigation.

Le processus d'irrigation modifie profondément l'hydrologie d'une région. C'est pourquoi il importe de prendre les mesures nécessaires pour compenser tout effet défavorable (saturation en eau ou salinisation, par exemple) et préserver la fertilité de l'endroit.

Les systèmes d'irrigation

La variété des conditions qui prévalent a nécessité la mise au point de divers systèmes d'irrigation qui doivent satisfaire à trois exigences fondamentales : rendement économique soutenu, perte d'eau minimale durant le transport et l'arrosage et prévention de la dégradation des sols. Le choix de la méthode tient aux conditions opérationnelles considérées.

Il existe cinq modes principaux d'irrigation par gravité : l'inondation incontrôlée, l'irrigation par calants, l'irrigation par cuvette, l'irrigation par rigoles et l'irrigation à la raie. L'inondation incontrôlée est la moins efficace, ce qui explique qu'on l'utilise rarement, sauf dans le cas des pâturages. L'irrigation par calants requiert un débit d'eau relativement important. L'irrigation par cuvette est la méthode la plus simple et la plus aisément contrôlable ; c'est aussi celle qui convient le mieux aux terrains lourds ou lorsque la salinité du sol nécessite un lessivage. L'irrigation par rigoles est fréquemment utilisée en foresterie ; elle ne permet cependant pas un contrôle précis de l'eau utilisée et peut engendrer une malformation des racines. Quant à l'irrigation à la raie, elle n'a pas d'application en foresterie. Toutes ces techniques nécessitent une préparation soigneuse du terrain.

Il est possible d'avoir recours à l'irrigation par aspersion dans les régions à topographie irrégulière, là où le nivellement des terres est impraticable et où de rapides arrosages correspondant à de petites quantités d'eau conviennent. Pour ce qui est de la foresterie, la hauteur des plantations et les coûts limitent cependant les applications de cette technique qui présente en outre l'inconvénient de nécessiter de l'eau sous pression.

Les systèmes d'irrigation localisée (irrigation goutte à goutte) sont particulièrement efficaces lorsque le rendement des points d'eau est faible ou que l'eau est salée. Ces systèmes comportent toutefois des tuyaux de faible diamètre qui s'obstruent facilement.

Il existe également des systèmes d'irrigation spéciaux, parmi lesquels la réduction des pertes d'eau par contrôle de l'évaporation, la mise en eau temporaire pendant la phase d'implantation afin d'aider le système racinaire à atteindre des zones du sol humides en permanence, sans compter l'irrigation souterraine et la technique de blocage de l'humidité souterraine, qui comptent peu ou point d'applications en foresterie.

Dans les zones arides, on a pendant des siècles recueilli l'eau de pluie afin d'amener les rares eaux de ruissellement et la rosée dans les zones d'enracinement des cultures, y compris des peuplements forestiers, ou de faciliter l'alimentation de la nappe souterraine.

Le choix de système d'irrigation dépend des particularités topographiques et du degré de nivellement ; de la nature du sol ; de la quantité et de la qualité de l'eau ; des possibilités de correction de la salinité du sol ; des aspects biologiques tels que le développement et l'état de santé du système racinaire ; du degré de facilité de la gestion et du contrôle ; du niveau de compétence, de motivation et de formation de la main-d'œuvre ; et des coûts d'investissement, d'exploitation et d'entretien.

Évaluation des besoins et des possibilités

L'augmentation et la concentration récentes de la population, notamment dans les zones arides et semi-arides, ont entraîné un épuisement des ressources naturelles et remis en cause les moyens mêmes de les produire. C'est ainsi le cas de la demande d'eau qui a très vite atteint ou même dépassé la capacité d'approvisionnement. Des mesures innovatrices et intensives ont été prises en vue d'accroître ou de maintenir les ressources en eau. La demande de bois destiné à de nombreux usages a augmenté de pair avec la population, particulièrement dans les régions où le bois constitue un combustible domestique essentiel. Dans certains cas précis, on ne voit guère en effet comment satisfaire la demande, qui varie de 0,5 à 1,2 m³ par personne et par an, tellement les taux de production naturelle sont faibles et les écosystèmes, dégradés. Les excréments et les résidus agricoles servent de combustibles de remplacement. Il est pourtant possible de combler la plupart des besoins en combinant l'arboriculture à l'agriculture, bien qu'il soit néanmoins justifié d'avoir recours à des blocs de plantation uniformes dans certaines circonstances.

La foresterie irriguée — et les besoins d'eau et de terre qu'elle suppose — concurrence directement l'agriculture, sauf apparemment si elle utilise des effluents municipaux et industriels. Il est possible de résoudre partiellement ces conflits en intégrant l'agriculture et la production forestière. Le terrain et l'eau disponibles sont parfois proposés en raison de leur qualité inférieure ; dans ce cas, il convient d'évaluer avec réalisme leur qualité et leur abondance en fonction du niveau de production requis. L'alimentation en eau destinée à l'irrigation doit être sûre, d'un coût abordable et régulière, même si les arbres s'accommodent mieux que les cultures d'apports d'eau irréguliers.

La qualité des eaux d'irrigation influence la croissance des plantes, et il importe par conséquent de bien connaître leur teneur en sel, en ions, en oligo-éléments, en biocides et en solides en suspension, surtout lorsqu'on utilise des effluents municipaux. Les besoins en la matière des différentes essences dans des conditions de croissance déterminées sont d'ordinaire mal connus et nécessitent des recherches. On a mis au point des procédés fondés sur les données climatiques et pédologiques locales et sur les besoins d'eau propres à chaque espèce végétale pour prévoir les besoins d'eau théoriques des cultures. Quoique ces procédés semblent bien adaptés à la foresterie irriguée, les méthodes empiriques sont probablement plus efficaces en pratique. Il est souhaitable d'étendre le champ d'application du concept de polyvalence de l'eau, c'est-à-dire de réutiliser dans la mesure du possible cette denrée rare et coûteuse.

On a recensé un grand nombre d'espèces donnant une foule de produits dans des conditions variées. En appliquant une gamme suffisante de critères, on obtient une courte liste d'espèces particulièrement performantes. La plupart des régions pourraient se prêter à l'introduction, à l'essai et à la sélection d'espèces, de provenances et de cultivars améliorés.

Les essences ont une tolérance variable à l'égard de l'aération du sol, de la saturation en eau et de la salinité. Les mécanismes au moyen desquels les sels influencent la croissance sont connus et servent à contrôler expérimentalement la réaction des plantes à une augmentation de la salinité.

L'irrigation modifie la morphologie du système racinaire du fait qu'elle accroît l'humidité du sol et diminue d'autant l'aération. Le système racinaire

s'installe alors moins profondément ou, dans le cas de l'irrigation par rigoles, s'oriente linéairement le long des billons, entre les rigoles, pouvant ainsi entraîner une diminution de la croissance et un déracinement possible par le vent.

Les données relatives aux effets de l'irrigation sur la qualité du bois sont si peu abondantes qu'elles ne permettent guère de généraliser. Cependant, on n'a noté aucun effet négatif.

Il existe des analyses économiques des procédés de plantation irriguée adoptés dans plusieurs pays. Toutes indiquent que, dans la mesure où l'on apporte les modifications nécessaires aux techniques et aux méthodes de gestion, l'arboriculture irriguée dans les conditions décrites est économiquement réalisable et virtuellement au moins aussi intéressante que plusieurs autres cultures de plein champ possibles. La gestion est un des principaux facteurs garantissant la réussite de ce procédé. Les analyses mentionnées ici ne tiennent pas toujours pleinement compte des coûts et des rendements non quantifiés, ni ne sont toujours accompagnées de ce qu'on considère d'ordinaire comme une analyse sociologique appropriée.

La liste de contrôle des critères de décision se fonde sur la faisabilité des plantations irriguées sous une forme ou sous une autre dans chaque cas particulier : demande des produits du bois ; besoin avéré d'irrigation ; disponibilité de terre et d'eau d'une qualité et d'une quantité acceptables ; faisabilité technique ; absence d'effets inacceptables sur le milieu ; faisabilité sociale (régime foncier, environnement culturel et présence réelle ou potentielle de compétences nécessaires en matière de gestion) ; et faisabilité économique.

Développement des plantations irriguées

Les risques et les rendements financiers souvent relativement faibles associés à la sylviculture pérenne, notamment dans le cas de plantations uniformes sur une grande échelle, font de l'intégration à l'agriculture une possibilité intéressante dans de nombreuses circonstances : les retombées globales ne sont pas retardées outre mesure et les revenus tirés des plantations forestières viennent ajouter aux résultats financiers des dispositifs d'irrigation agricole. Il importe toutefois que cette intégration soit d'une grande cohérence.

Les facteurs relatifs à l'utilisation des terres et au régime foncier exercent d'ordinaire une influence prépondérante sur le succès des plans d'irrigation parce qu'ils touchent directement aux intérêts des personnes visées dont la participation au développement doit bien entendu être encouragée.

La conception et la mise en œuvre des dispositifs d'irrigation nécessitent des études physiques et écologiques détaillées. Les caractéristiques physiographiques, géologiques, topographiques, infrastructurales et foncières sont portées sur des cartes à relativement petite échelle. Il est possible d'entreprendre une étude pédologique à trois stades successifs, l'analyse s'affinant d'un stade à l'autre : un stade préliminaire ou de reconnaissance, un stade d'analyse de faisabilité, semi-détaillé, et un stade détaillé de conception et d'exécution. Il convient de tenir compte de l'humidité du sol et des caractéristiques des eaux souterraines.

Il importe d'évaluer convenablement les apports d'eau d'irrigation et leur essor afin qu'il soit possible de s'en inspirer lors de la conception et la mise

en œuvre. Les paramètres d'une importance particulière sont la quantité (suffisance), la fluctuation saisonnière, la fiabilité, la qualité, les modifications futures possibles et les coûts. On trouve des techniques (et même très souvent des organismes indépendants) adaptées à la mise en valeur et à la gestion des ressources en eau d'origine superficielle et souterraine. Étant donné les études pédologiques requises, les forestiers ne possèdent d'ordinaire pas les compétences qui leur permettraient d'entreprendre seuls l'évaluation, la mise en valeur ou l'aménagement des ressources en eau.

Le succès des programmes d'irrigation dépend pour une large part de la conception des systèmes et des régimes d'irrigation en vue d'un rendement économique optimal, de l'élimination de tout gaspillage de l'eau et de la constance de la productivité de l'emplacement pendant une période indéfinie. L'application de ces principes doit s'appuyer sur un processus de planification intégrant les facteurs économiques, sociaux, physiques, chimiques et biologiques pertinents. Elle nécessite la participation de spécialistes de plusieurs disciplines, la sélection de la technique d'irrigation la plus appropriée et de systèmes d'alimentation et de distribution de l'eau qui correspondent aux besoins des cultures et enfin la mise en œuvre d'un réseau de drainage efficace. La conception doit être suffisamment souple pour permettre les ajustements mineurs inévitables ; elle suppose en outre des directives et des instructions claires au sujet de l'exploitation. L'étude des systèmes et des régimes sylvicoles projetés ne doit s'effectuer qu'après analyse complète des aspects pertinents. Elle doit prévoir un degré convenable d'intégration de l'arboriculture aux cultures de plein champ, bénéfique de tous les points de vue. Il faut choisir les cultures les plus simples à gérer en fonction des résultats souhaités, en évitant toute complication inutile (les mélanges, par exemple).

Mise en œuvre et production

L'efficacité de l'exploitation dépend à long terme du soin et de la précision apportés à l'installation des systèmes d'irrigation. Il est souhaitable de se conformer à des normes élevées lorsqu'il s'agit de mettre en place les systèmes d'alimentation en eau et de drainage afin de réduire les pertes d'eau, et par conséquent les frais d'entretien, ou encore de niveler et de tracer les rigoles afin d'assurer l'uniformité de la distribution de l'eau. On s'y conformera aussi lors de la production et de la manipulation du matériel de reproduction en pépinière, de la préparation des lieux de plantation ainsi que lors de la plantation ou du semis. L'agencement et la densité de peuplement doivent correspondre aux besoins des espèces utilisées et aux méthodes de gestion retenues. L'épandage d'engrais inorganiques ainsi que de gypse ou de fumier, ou des deux à la fois, afin de corriger la salinité du sol ou de l'eau peut avoir un effet très positif. Les plantations semées directement, pour bien croître, ont besoin d'un nettoyage en temps opportun. L'irrigation favorise en effet la croissance des mauvaises herbes qui, laissées à elles-mêmes, compromettraient le rendement des cultures. Il convient par ailleurs de procéder à l'éclaircissage et à la taille dans des proportions et à des intervalles déterminés afin d'assurer des rendements optimaux et une qualité des tiges en accord avec l'occupation complète de l'endroit par le peuplement forestier.

La gestion des eaux vise avant tout à un usage efficace des ressources hydriques, à une optimisation des rendements et à la préservation de la fertilité

de l'emplacement. Il convient de déterminer avec précision les besoins d'eau des peuplements forestiers et de les contrôler fréquemment en tenant compte des précipitations. À cet effet, on note les quantités fournies et on améliore continuellement l'ensemble du système par une surveillance fondée sur une succession intégrée de recherches appliquées et d'essais. On recueille parallèlement des données climatiques et on contrôle les fluctuations et la qualité des eaux souterraines, les propriétés physiques et chimiques du sol, la qualité et la disponibilité des eaux d'irrigation, l'efficacité de l'irrigation et les pertes d'eau par rapport à la croissance végétale de manière à pouvoir apporter les corrections nécessaires à l'endroit et au moment voulus. L'exploitation efficace du système suppose un entretien régulier des dispositifs d'alimentation et de distribution de l'eau.

La saturation du sol en eau est à l'origine des principaux problèmes associés à l'irrigation. Elle résulte de l'application délibérée de quantités excessives d'eau et de l'infiltration qui, en l'absence de drainage souterrain, élève la surface de la nappe phréatique et provoque une salinité secondaire (que peut aussi amener l'utilisation d'une eau d'irrigation salée). Il est possible de remédier à ces problèmes en adoptant des mesures appropriées lors de la conception, de la mise en œuvre et de l'exploitation : en effet, la remise en état, une fois survenus ces problèmes, coûte cher et peut compromettre totalement la productivité.

Il arrive qu'une certaine malformation des racines soit associée aux méthodes d'irrigation par rigoles ou localisée ; les maladies des racines résultent alors de la saturation en eau, c'est-à-dire de l'irrigation excessive, ou de l'irrégularité des apports d'eau. On constate parfois des dommages attribuables aux oiseaux nichant dans les arbres, mais leur activité quelquefois bénéfique peut compenser ce phénomène. Les dégâts causés par les insectes et les animaux sont d'ordinaire limités et il est donc facile d'y remédier.

La population du sol et des eaux souterraines, notamment lorsqu'on utilise des effluents municipaux ou industriels, les parasites humains et les vecteurs de maladie, qui passent au moins une partie de leur vie dans l'eau stagnante, ainsi que les effets physiques imprévus de la saturation du sol en eau ou des mesures adoptées pour y remédier constituent autant d'incidences possibles et potentiellement dangereuses de l'irrigation sur l'environnement. Quant à l'effet de l'irrigation à grande échelle sur le climat local, il ne semble pas mesurable.

Les taux de croissance en cubage associés aux plantations irriguées sont très variables et permettent de tirer deux grandes conclusions : premièrement, le potentiel de production est souvent élevé à très élevé, mais, deuxièmement, il est rarement atteint à cause de facteurs défavorables qui semblent pour la plupart contrôlables.

La recherche et le développement doivent s'orienter en priorité vers les besoins d'eau des peuplements forestiers irrigués. Les autres secteurs importants touchent : l'identification d'espèces et de provenances adaptées aux plantations irriguées ; le perfectionnement des systèmes d'irrigation ; l'amélioration des méthodes d'assainissement des zones souffrant de salinité ; la mise au point de nouveaux régimes sylvicoles convenant aux plantations irriguées ; l'élargissement de l'information disponible sur la croissance et le rendement, et le perfectionnement des outils d'aménagement forestier tels que les tables de croissance de peuplement ; la détermination de l'incidence sur l'environnement de

l'emploi d'effluents municipaux ou autres ; et enfin la conception de méthodes destinées à contrer les effets indésirables.

Aspects économiques des plantations irriguées

L'importance des plantations forestières irriguées est très variable, allant des quelques arbres plantés par un agriculteur aux grandes exploitations gérées par les pouvoirs publics ou des sociétés. Toutes ces entreprises visent à satisfaire des besoins matériels ou esthétiques particuliers. D'aucunes utiliseront avec opportunité les terres et les plans d'eau délaissés par des entreprises, ou encore les ressources résultant d'autres activités tandis que d'autres se lanceront délibérément dans une production primaire. Toutes feront à un moment donné l'objet d'une analyse économique destinée à identifier et à évaluer les besoins ou les perspectives, à comparer les diverses possibilités afin de choisir la solution de rechange la plus favorable, à estimer les progrès et les résultats des programmes en cours, ou de l'un ou de plusieurs de leurs éléments, ou encore à les comparer avec d'autres stratégies possibles.

Toutes ces analyses supposent une comparaison des coûts et des avantages à l'aide d'une des quatre mesures d'actualisation applicables aux peuplements pérennes, plus particulièrement si la rentabilité des diverses solutions possibles se présente sous une forme ou une durée différentes. Les méthodes s'appliquent aussi bien aux analyses financières qu'économiques. On choisit alors un taux d'actualisation approprié à partir des quatre solutions possibles. La précision de l'analyse dépend bien entendu de la qualité des données d'entrée et de sortie.

On remarquera qu'un des spécialistes cités, chargé de l'étude de plusieurs projets d'irrigation de la Banque mondiale, a indiqué comme causes des principaux problèmes de conception et de mise en œuvre : une technologie impropre, une infrastructure et des systèmes de soutien inadéquats, l'absence d'évaluation des environnements sociaux des projets ainsi qu'une gestion et une administration inconsistantes.

Organisation et gestion

Un projet ne peut réussir sans une structure organisationnelle appropriée et une gestion efficace. La façon dont l'organisation d'un projet est structurée en vue de l'exécution de l'ensemble des fonctions de gestion, d'exploitation et d'entretien en cause dépend de la nature et de la taille du projet ainsi que des facteurs sociaux, institutionnels et techniques qui s'y rapportent. Un fonds d'expériences bien documentées existe pour faciliter la formulation de la structure organisationnelle dont les gestionnaires ont besoin dans chaque cas particulier. L'efficacité de cette dernière fonction repose sur une définition claire des politiques et des objectifs du programme, une délégation de pouvoirs acceptable, particulièrement au niveau de projet lui-même, une conception heureuse des systèmes destinés à l'irrigation, à la production forestière, à l'aménagement et à la surveillance, des ressources financières suffisantes et une réglementation efficace de la distribution et du contrôle des ressources en eau. Souvent négligée, la préparation du personnel aux tâches de gestion à tous les échelons constitue un élément essentiel du succès.

Planification

Le processus de planification ou de formulation d'un plan présuppose l'identification des objectifs et des activités à entreprendre, la sélection des critères d'évaluation des diverses conceptions ou stratégies, la collecte des données permettant de comparer les différentes solutions et le choix du plan optimum. Dans le cas de projets d'irrigation, l'existence d'une politique de mise en valeur harmonieuse des ressources en eau facilite ce processus.

La planification et la gestion font partie intégrante du cycle de la planification qui comprend les étapes suivantes : formulation, exécution, évaluation et reformulation du plan. La deuxième et la troisième de ces étapes incluent l'établissement du budget, la programmation et la surveillance. Seul un plan convenable soumis constamment à ce cycle garantit la qualité de la gestion.

1. Introduction

Nous savons, d'après les sources archéologiques, écrites et folkloriques, que l'irrigation a été pratiquée dès l'antiquité dans l'Ancien Monde. Il s'agissait avant tout de se procurer des aliments par des cultures annuelles de céréales et de légumes et de faire pousser des vignes et des arbres vivaces pour en recueillir les fruits (raisin, olive et dattes). Plus tard, l'irrigation s'est étendue à la culture d'arbustes à fleurs, tels que le rosier et le jasmin, et d'arbres à des fins d'ornement, d'ombre et d'abri. Ces plantes ont fait la renommée des jardins et des routes bordées d'arbres de villes anciennes comme Babylone, et d'autres plus récentes comme Grenade en Espagne, et Rome, du temps de Néron. On pratiquait l'irrigation lorsqu'on cultivait des plantes dans des milieux secs, hors de leur environnement naturel irrigué, ou lorsque le besoin d'augmenter le rendement des récoltes se faisait sentir. Avec le temps, de nouvelles plantes vivrières, ornementales et ombrageuses ont fait leur apparition, notamment au cours des siècles derniers. C'est ainsi que furent introduites en Europe, en Afrique, au Moyen-Orient et en Asie des plantes provenant du Nouveau Monde : le maïs, l'avocat, la goyave, le carouge à miel (*Robinia pseudacacia*) et bien d'autres.

L'irrigation des arbres pour la production de bois est un phénomène assez récent. En effet, avant la croissance démographique qui a caractérisé notre siècle, les réserves naturelles suffisaient à satisfaire les besoins de populations de faible et de moyenne densité et de communautés locales d'importance limitée. Au cours des siècles, le pâturage du menu et du gros bétail appartenant à des populations relativement restreintes a entraîné une raréfaction graduelle des terrains naturellement boisés dans de nombreuses régions du monde, sans toutefois causer de pénurie générale.

Au cours des 100 et surtout des 50 dernières années, la situation a changé de façon radicale. Dans beaucoup de pays, la population a doublé tous les 15 ans ou moins, et l'appauvrissement prend de l'ampleur. La demande globale d'un grand nombre de produits, y compris le bois, s'est accrue. Les réserves naturelles de bois ont vite été épuisées. Dans les régions du monde où la sécheresse sévit, la production de bois à partir de terrains nouvellement boisés et de plantations n'a souvent pas été en mesure de satisfaire la demande, à cause de la priorité accordée à la production alimentaire et du délai de plusieurs années nécessaire pour assurer la rentabilité de l'arboriculture. Cela a rapidement provoqué de graves pénuries qui sont devenues trop souvent banales de nos jours. Les régions arides et semi-arides ont été plus particulièrement touchées, notamment près des villes et des villages, sur les rives peuplées des cours d'eau pérennes et dans les zones agricoles irriguées. Dans beaucoup de ces régions, la population continue d'augmenter rapidement. La pénurie vise spécialement le bois comme produit de première nécessité pour le chauffage et la construction.

Parmi les autres besoins importants, on peut mentionner le fourrage pour les chameaux, les chèvres, les moutons et les bovins, les arbres destinés à abriter et à faire de l'ombre et les rideaux-abris, très utiles dans les zones de culture. La demande est plus marquée dans les zones arides et semi-arides, habituellement peu propices à la croissance végétale.

Pour remédier à l'accroissement de la demande et à l'insuffisance de l'approvisionnement, on a, pendant plusieurs décennies, intensifié la production de bois, et cet effort se poursuit encore de nos jours. L'arboriculture se caractérise de plus en plus par l'introduction, l'essai, la sélection et l'amélioration génétique de clones, de populations naturelles, de cultivars, de provenances et d'essences d'arbres à croissance rapide ; par l'amélioration des semences et des méthodes d'approvisionnement des pépinières ; par la préparation intensive des terrains ; et par le recours aux façons culturales, y compris la fertilisation et, là où c'est possible, l'irrigation. Le premier programme de plantation irriguée, indépendamment de l'échelle, a été lancé en 1864 dans le bassin aride et semi-aride de l'Indus, maintenant situé au Pakistan, afin de fournir le combustible nécessaire au réseau ferroviaire et de produire du bois dur de grande qualité. Par la suite, les programmes de plantation irriguée se sont étendus à d'autres pays comme l'Italie, la Turquie, le Soudan et l'Inde. On les trouve maintenant dans les zones arides et semi-arides de tous les continents, que les précipitations soient hivernales ou estivales. Habituellement, les plantations forestières ne prennent pas le pas sur les cultures de plein champ qui bénéficient en priorité de l'irrigation, mais tendent de plus en plus à s'y intégrer de diverses manières. Du même coup, on continue à utiliser et à améliorer par différents moyens les méthodes traditionnelles d'arboriculture. C'est le cas, par exemple, des dattiers et d'autres arbres fruitiers cultivés de pair avec des plantes annuelles dans les régions à climat méditerranéen de l'Afrique du Nord.

Les programmes d'irrigation arboricole varient d'envergure. Il peut s'agir de grandes plantations en blocs concentrés ou de petites plantations dispersées. La disposition des arbres peut varier : rangées, bouquets, arbres isolés. Une exploitation arboricole peut être conduite aussi bien par un ministère, une société ou un petit agriculteur, pour toutes sortes de buts divers. Quoique l'arboriculture avec irrigation soit souvent couronnée de succès, notamment au cours des premiers stades, il arrive fréquemment que les entreprises de cette nature échouent ou que les rendements diminuent pour différentes raisons, après une phase initiale de grande productivité.

L'irrigation est un processus complexe qui doit faire appel à des spécialistes de plusieurs domaines scientifiques et techniques pour donner un rythme de production soutenu. En matière d'arboriculture irriguée, il convient ainsi d'avoir recours non seulement à l'expérience des forestiers, mais aussi à celle des spécialistes de l'irrigation et, particulièrement lorsque l'arboriculture est intégrée à l'agriculture, à des agronomes. Sauf pour les projets les plus simples, la collecte de données socio-économiques s'imposera au cours de la phase de planification et, par la suite, à intervalles réguliers. Par ailleurs, il faudra souvent solliciter les conseils de pédologues et de spécialistes de la protection des plantes. Lorsqu'il s'agit d'élaborer des projets d'irrigation, les forestiers ont tendance à agir sans consulter suffisamment de spécialistes, peut-être par ignorance des problèmes complexes qu'ils doivent résoudre ou simplement par manque de temps. Le résultat laisse souvent à désirer et se solde parfois par un échec total. Le but principal de la présente synthèse consiste donc à aider les fores-

tiers à mettre au point des projets de plantation forestière irriguée en soulignant la complexité du sujet et en leur fournissant un outil qui leur permettra d'identifier la nature et les sources des informations spécialisées dont ils peuvent avoir besoin. En outre, le présent ouvrage a pour but d'attirer l'attention des agronomes et des spécialistes en irrigation sur le fait que l'intégration de l'arboriculture à la culture de plantes annuelles, si elle est bien planifiée et gérée, augmente les chances de succès des projets d'irrigation sur les plans économique et financier. La présente synthèse n'est pas destinée à servir de manuel technique pour la pratique de l'irrigation, mais plutôt à contribuer à la formulation de principes adaptés à un ensemble précis de conditions et d'applications.

Il sera ici question d'organisation, de gestion et de planification, car l'exécution de ces phases, indispensable à la réussite des programmes, est souvent insuffisante et presque toujours négligée pendant la période de formation des forestiers.

Pour rédiger la présente synthèse, les auteurs ont consulté l'essentiel des documents disponibles relatifs à la plupart des pays étudiés, à l'exception des pays d'Amérique latine, où il existe apparemment peu d'informations sur la sylviculture irriguée, et de la Chine et de l'U.R.S.S., où il est souvent impossible de se procurer les renseignements désirés.

2. Les conditions environnementales dans les zones arides

Le potentiel de production agricole et sylvicole que permet d'obtenir l'irrigation est particulièrement élevé dans les zones arides et semi-arides car, en dépit de l'occupation de ces terres par des populations humaines pratiquant l'élevage, les cultures non irriguées offrent de maigres rendements en raison des conditions environnementales existantes. Par ailleurs, les caractéristiques climatiques et pédologiques propres à ces régions permettraient, avec une irrigation suffisante de terres judicieusement choisies et regroupées, d'atteindre des niveaux de production très élevés. Le présent chapitre traitera brièvement des facteurs environnementaux et généraux influant sur l'utilisation du sol dans les zones arides et semi-arides ; on abordera ensuite, dans les chapitres suivants, l'étude des possibilités de mise en valeur des terres par l'irrigation.

Les termes « aride » et « semi-aride » sont employés dans le texte pour désigner les régions où les conditions environnementales ne permettent pas de pratiquer la culture sans irrigation ou sont trop instables pour assurer une production importante et régulière. « L'irrigation » désigne les techniques visant à transporter l'eau par des moyens artificiels à partir d'une source ponctuelle et à la répandre sur le sol d'une zone particulière dont on veut améliorer le rendement agricole. Sont exclues de cette définition les anciennes techniques encore pratiquées de nos jours que sont le captage des eaux de pluie et l'irrigation par ruissellement, que l'on décrit sommairement au chapitre 5.

Caractéristiques de l'environnement

Climat

L'irrigation sert à compenser par des moyens artificiels un apport d'eau insuffisant sur un terrain cultivé. Sa réussite, sur le plan de la conception et de la mise en œuvre, suppose une connaissance approfondie du climat et une bonne compréhension de la relation existant entre ce dernier et l'irrigation. Par exemple, la répartition saisonnière des besoins d'irrigation supplémentaire dans les régions à climat méditerranéen ne correspond pas à celle observée dans les zones à pluviosité estivale. De plus, la répartition et le volume des précipitations influent à la fois sur les besoins et sur les ressources en eau d'irrigation. C'est pourquoi il est indispensable de disposer de données climatiques précises pour déterminer correctement les quantités d'eau nécessaires ainsi que la fréquence de distribution.

Du point de vue de l'irrigation, on peut distinguer quatre grandes catégories de climats, avec chacune ses nombreuses variantes : les climats *arides*, *semi-arides*, *subhumides* et *humides*. C'est dans les deux premiers types que les besoins d'irrigation se font le plus sentir.

Les climats arides

On définit les climats arides (par ex., McGinnies et al. 1968, Fuchs 1973a, Jones et al. 1981) comme ceux qui ne peuvent soutenir des cultures régulières sans irrigation. Ils sont généralement caractérisés par des précipitations faibles et irrégulières qui varient fortement selon l'époque et la région (moyenne maximale de 200 mm par an) et dont l'intensité à certains moments peut causer de graves inondations. Le rayonnement solaire incident qui, comme les températures, est intense, du moins en été, connaît d'importantes variations annuelles et saisonnières. Les taux d'évaporation sont également élevés, en particulier lors de la période de végétation. À proximité de la mer, l'humidité atmosphérique est faible. Enfin, des vents violents ainsi que de fréquentes tempêtes de sable et de poussière balayent généralement ces zones climatiques. Certains de ces facteurs ont parfois tendance à s'annuler. Par exemple, dans le désert du Rajasthan, en Inde, l'atmosphère renferme, en certains temps de l'année et pendant des périodes prolongées, une telle quantité de poussière qu'elle intercepte une partie du rayonnement solaire pour ainsi accroître l'humidité relative.

Les climats semi-arides

Les caractéristiques des climats semi-arides sont encore plus variables que celles des régions arides, mais, comme on peut s'en douter, elles n'entravent pas autant la croissance des plantes. Fuchs (1973a) considère comme semi-arides toutes les régions où l'insuffisance des précipitations nécessite l'irrigation des cultures au cours d'une partie de la période de végétation. Même s'il est possible de pratiquer l'aridoculture, les rendements sont faibles et limités à quelques espèces xérophiiles.

On peut classer dans la zone semi-aride ainsi définie plusieurs climats : le *climat tropical de savane*, le *climat subtropical méditerranéen* et le *climat steppique*, néanmoins très différents sur le plan des températures, des précipitations (pouvant atteindre dans tous les cas 750 mm par an) et de leur répartition, ainsi qu'au niveau de leurs cycles annuels.

Le *climat de savane*, qui occupe la plus grande partie de la zone de convergence intertropicale, est suffisamment chaud pour permettre la croissance des plantes tout au long de l'année, les températures les plus élevées survenant au cours de la période de végétation.

Le *climat méditerranéen* bénéficie d'un hiver doux bien défini, au cours duquel survient la plus grande partie des précipitations. Par contre, l'été est généralement chaud et sec. On rencontre ce genre de climat dans les régions du globe situées entre la zone tropicale et la zone tempérée. L'agriculture non irriguée se pratique donc en hiver (par exemple le blé), alors que les cultures estivales se limitent à un petit nombre d'espèces à croissance très rapide ou à des plantes dont le système racinaire s'enfonce profondément dans les couches humides du sol. La pluviosité est impossible à prévoir et les volumes annuels très variables.

Enfin, le *climat steppique*, qui comprend un grand nombre de variantes, constitue la zone climatique occupant la plus vaste superficie du globe. Il se situe entre, d'une part, les climats arides et, d'autre part, les climats de savane, méditerranéen ou tempéré subhumide. Comme dans le cas des climats méditerranéen et de savane, le rayonnement solaire et les températures estivales offrent des conditions propices à une exploitation à haut rendement.

Les climats subhumides et humides

Dans les climats subhumides, où les précipitations varient énormément d'une année à l'autre, on évite généralement de pratiquer une irrigation intensive en cultivant de préférence des espèces xérophi les qui survivent à des sécheresses relativement courtes mais toujours impossibles à prévoir. L'irrigation présente peu d'intérêt dans les climats humides.

Les indices climatiques

Les zones arides et semi-arides se trouvent surtout dans les régions tropicales et subtropicales dont les climats sont plus ou moins influencés par les variations de latitude de la zone de convergence intertropicale, cette dernière étant définie comme la région de basse pression atmosphérique où convergent les vents de l'hémisphère sud et de l'hémisphère nord. Dans de nombreuses régions arides situées au voisinage des tropiques, les hauteurs mensuelles maximales de précipitation sont liées à la position saisonnière de cette zone de convergence, dont l'éloignement par rapport à l'équateur détermine chaque année le volume des précipitations dans ces régions (Jones et al. 1981). Les facteurs précédents exercent une action réciproque sur les trois conditions généralement reconnues comme les causes principales de l'aridité (Reitan et Green 1968). Celles-ci sont d'abord l'isolement d'une région privée d'un important apport d'humidité océanique, par exemple en raison de la présence de hautes montagnes ; deuxièmement, la formation de masses d'air sec et stable résistant aux courants de convection ; et troisièmement, l'absence des systèmes de perturbation.

L'utilité d'un système de référence climatique ayant été reconnue, en particulier pour l'aménagement des cultures et de la végétation, on a donc élaboré un certain nombre de systèmes ou d'indices de classement des climats, en ne perdant jamais de vue que les climats se modifient de façon continue et progressive en passant d'une zone à une autre. Thornthwaite et Hare (1955), en faisant l'historique de ces systèmes, ont décrit les résultats des premiers travaux menés dans ce domaine notamment par les chercheurs ci-après : Grisebach, à qui l'on doit la publication, en 1866, de la première grande carte sur les zones de végétation ; Linsser, qui a étudié les effets de la température du point de vue phénologique ainsi que les répercussions des précipitations sur la végétation, recherches qui l'ont conduit à partager le globe en zones climatiques ; et enfin Koppen, dont la classification climatique, d'abord diffusée en 1900 et révisée par la suite en profondeur en 1931, est encore utilisée de nos jours par les géographes. Essentiellement, Koppen pensait que l'on pouvait se servir des végétaux comme instruments intégrant les éléments climatiques. C'est ce raisonnement qui est à la base de la classification proposée par Thornthwaite en 1948 (voir Thornthwaite et Hare 1955), dont le principal paramètre d'intégration est l'évapotranspiration potentielle (ETP), valeur mesurant le potentiel climatique dérivé du régime thermique.

Le système de Thornthwaite est important, car il permet de calculer l'ETP en tout lieu dont on connaît la latitude et à propos duquel on dispose des relevés de températures, en tenant compte du rayonnement solaire, de la dissipation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère, de la couverture végétale et de sa capacité de réflexion du rayonnement incident ainsi que de la nature et du degré d'humidité du sol et en procédant aux corrections nécessitées par la variation de la durée du jour afin de rendre correctement le lien étroit existant entre la température et l'évapotranspiration.

Parmi les paramètres que le système de Thornthwaite permet de prévoir, citons *l'excès d'humidité* et *le manque d'humidité*. Ils sont tous deux combinés à l'ETP annuelle dans *l'indice d'humidité* de Thornthwaite, lequel est à la base de la division du monde en provinces ou zones écologiquement distinctes, classées selon le degré d'humidité de leur sol. Meigs (1953) s'est inspiré de cette méthode, en y apportant certains raffinements, pour classer les climats arides et en dresser la carte, tout comme l'ont fait l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) lors de l'élaboration de leur méthode de cartographie bioclimatique de la zone méditerranéenne (Reitan et Green 1968).

Plusieurs systèmes servent à décrire de façon intégrée ou numérique les paramètres climatiques, à l'aide de diagrammes à peine plus grands qu'un timbre-poste. L'un des plus répandus est le système des « climagrammes », conçu par Walter et Leith (1967). Un autre procédé consiste à utiliser des courbes ombrothermiques intégrées dans le système UNESCO-FAO de cartographie bioclimatique.

Les systèmes et les indices de classement climatique jouent un grand rôle dans l'évaluation d'activité économique potentielle. On utilise certains d'entre eux comme guides empiriques lors de l'exécution d'une activité de ce genre, notamment dans la pratique de la sylviculture non irriguée et irriguée dans certaines régions de la zone méditerranéenne d'Afrique du Nord (Metro dans Kaul 1970). D'autres systèmes servent au calcul théorique des régimes d'irrigation, comme on le verra dans la section du chapitre 6 intitulée « Eau d'irrigation ».

Il ne convient pas de traiter ici des climats en zones sèches. Il existe néanmoins beaucoup de bons comptes rendus effectués à l'échelle mondiale et régionale et Reitan et Green (1968) ont publié plusieurs sommaires des déserts à l'échelle de la planète. On peut trouver d'autres rapports sur de vastes régions dans les publications de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Kaul (1970) donne de brèves descriptions de nombreux pays. Enfin, parmi les comptes rendus portant sur des zones et des pays particuliers, citons celui d'Ashraf Ali (1971) pour la plaine de l'Indus au Pakistan et celui de Satchell (1978) pour les Émirats arabes unis.

Géomorphologie

Les zones arides chaudes possèdent certains reliefs caractéristiques, façonnés ou accentués au cours de longues périodes sous l'action du climat. C'est ainsi que des formes telles que les massifs montagneux, les plaines, les pédiments, les ravins profondément encaissés et les canaux de drainage présentent fréquemment des angles prononcés et de brusques variations de pente et de topographie. À basse altitude, le cours des fleuves traversant les grands lits d'inondation est périodiquement dévié. Il n'est pas rare que des formes du relief soient recouvertes de sable qui se présente alors sous forme de dunes instables ou de bancs (Lustig 1968 ; Jones et al. 1981). Outre qu'il modifie tout type de relief (Dan 1973), le sable éolien envahit souvent les terres cultivées et irriguées ainsi que les canaux (Wood 1977).

Les phénomènes qui exercent une influence sur la formation et les caractéristiques du sol constituent également des éléments géomorphologiques impor-

tants. Parmi ceux-ci, notons la distribution des particules fines et grossières, arrachées du sol, transportées, refaçonnées et redéposées par le vent et l'eau, ainsi que l'invasion périodique par l'eau des lits d'inondation dont les effets bénéfiques sont l'apport d'éléments nutritifs et de matières organiques de même que le lessivage des sels accumulés dans le sol.

Sols

Le climat influence grandement la formation et les caractéristiques du sol. Dans les régions arides, où l'érosion par le vent et, occasionnellement, par l'eau est accentuée, on rencontre surtout des plaines désertiques graveleuses, des dunes et des bancs de sable. En outre, les fortes variations diurnes de température accélèrent le processus de désagrégation des matériaux originels. Par contre, les effets combinés de tous les autres facteurs contribuant à la pédogenèse sont réduits par les conditions d'aridité et amplifiés à mesure que l'humidité augmente. Ce phénomène s'observe également à propos du rôle joué dans la formation du sol par la végétation et les composés organiques connexes, ainsi que dans le cas du lessivage et de la recristallisation en profondeur des sels solubles (par exemple le gypse et la chaux) ou de l'illuviation et de la descente des matières argileuses dans le profil pédologique.

Dans les plaines désertiques graveleuses, les horizons indurés de gypse ou d'autres sels abondent. Les sols salins, et plus particulièrement les terrains mal drainés, abritent par ailleurs des dépôts limoneux dans leurs dépressions en raison de la remontée capillaire des eaux souterraines salées vers la surface.

Dans les régions situées en bordure des déserts arides, comme les hautes terres délimitant au nord-est, au nord et au nord-ouest la plaine de l'Indus, au Pakistan, on retrouve fréquemment de vastes zones loessiques ; en outre, les conditions écologiques (surtout l'humidité) sont favorables au développement d'une couverture herbeuse. Enfin, il n'est pas rare de rencontrer à faible profondeur un horizon calcaire, mais ces sols sont rarement très salins.

Les zones semi-arides renferment des sols plus développés que les régions arides ; le couvert végétal se compose d'herbe et, lorsque l'humidité est plus grande, de savane. Les sols sont beaucoup mieux lessivés, surtout dans les horizons A et B, et l'horizon calcaire, s'il y en a un, se trouve à des profondeurs plus grandes. On remarque fréquemment des fissures dans les sols asséchés à texture fine. À mesure que l'aridité diminue, la structure des sols s'améliore, et dans les lits d'inondation et les dépressions, ceux-ci sont relativement bien développés ; de plus, les dépressions mal drainées sont souvent caractérisées par des sols alcalins. Dans les régions où l'alternance des saisons humides et sèches est plus marquée, la pédogenèse tend, dans l'ensemble, à être davantage prononcée et élaborée. Lorsque le drainage naturel ne peut se faire, comme dans les hautes terres de la vallée de l'Indus, au Pakistan, en raison de la présence d'une crête souterraine, ou lorsque les méthodes d'irrigation choisies sont peu efficaces, les sédiments des plaines limoneuses ou argileuses peuvent devenir salins ou alcalins.

Les interactions climat-pédogenèse dans les zones arides et semi-arides ont été décrites dans plusieurs ouvrages, et notamment par Dan (1973). Kaul (1970) a donné une description générale des sols de régions soumises à divers degrés d'aridité dans le sud de la zone méditerranéenne, au Moyen-Orient ainsi qu'en

Inde et au Pakistan. On peut trouver dans Ali (1960) un bref compte rendu des principaux sols alluviaux de la plaine de l'Indus.

Hydrologie et ressources hydriques

En zone aride, les eaux souterraines locales assurent généralement l'irrigation de superficies relativement restreintes (Fuchs 1973a). L'eau d'irrigation provient surtout de grands fleuves qui prennent leur source dans des régions à plus forte pluviosité, notamment le Nil au Soudan et en Égypte, l'Euphrate, le Tigre, l'Indus, le Gange, le Sénégal et le Niger. Si l'on s'approvisionne à partir de nappes aquifères, il est indispensable de connaître le mouvement des eaux souterraines ainsi que leur vitesse de renouvellement, afin que la quantité d'eau extraite à long terme n'excède pas la capacité de renouvellement et que l'on puisse éviter des incidents catastrophiques comme une infiltration d'eau salée.

Avec ses réseaux souterrains d'acheminement de l'eau, Israël constitue un bon exemple de gestion et de budgétisation strictes et scientifiques, à l'échelle nationale, de faibles ressources en eau se trouvant à l'intérieur et en bordure des zones arides et semi-arides. Les deux tiers de toute l'eau utilisée dans le pays proviennent du pompage des nappes aquifères, lesquelles servent non seulement de sources d'approvisionnement mais également de réservoirs, d'aqueducs et, en raison de leur structure granulaire, de filtres naturels, et permettent en outre la régulation du débit de base par pompage à partir des nappes captives (Buras 1973a).

Le renouvellement des eaux souterraines est fortement tributaire du volume, de l'intensité et de la durée des précipitations, ainsi que du relief et de la nature du sol superficiel, lesquels ont un effet sur le ruissellement. En zone aride, les facteurs de ruissellement, le débit des cours d'eau, la quantité d'eau souterraine et le degré d'humidité du sol sont plus variables et moins prévisibles que dans les zones tempérées. Étant donné qu'une grande partie des précipitations s'évapore, les eaux souterraines ne sont renouvelées localement que par infiltration des eaux des crues sporadiques. C'est pourquoi il se forme dans les régions désertiques des nappes d'eau douce relativement récentes aux abords des cours d'eau, où les taux d'infiltration dans les alluvions des chenaux sont élevés, alors que les nappes aquifères régionales renferment généralement une vieille eau saumâtre, pouvant remonter à plus de 10 000 ans d'après Simpson (1968) (Buras 1973a ; Mandel 1973 ; Jones et al. 1981). Dans les régions arides, les eaux souterraines sont souvent extraites à un rythme ne permettant pas leur renouvellement.

Il est important de parler de deux types de sources rencontrées en régions arides. La première catégorie comprend les grandes sources pérennes constituant les déversoirs des nappes aquifères renfermant du carbonate de calcium. Elles résultent de la formation de canaux de dissolution par les eaux souterraines contenant du gaz carbonique dissous et de la constitution progressive de canaux d'écoulement acheminant l'eau vers une sortie commune. Les canaux de dissolution suivent les cassures produites par l'activité tectonique (Jones et al. 1981).

La seconde catégorie est représentée par les marécages salins typiques des régions désertiques. Ils sont alimentés par les nappes aquifères dont l'eau s'évapore dès qu'elle apparaît à la surface. Au centre du marécage se trouve une

zone stérile recouverte de sel incrusté et entourée de phréatophytes halophiles. On plante souvent des palmiers-dattiers en bordure de ces marécages ; c'est là l'origine des oasis. Il est possible d'obtenir de l'eau de qualité satisfaisante en forant à une certaine distance de la source, là où la teneur en sel n'a pas atteint un niveau trop élevé (Mandel 1973).

Un peu partout en Asie et en Afrique, les populations ont perturbé depuis longtemps l'activité des sources naturelles, par exemple en les creusant pour obtenir une plus grande quantité d'eau. On a même dans certains cas, notamment en Algérie, creusé si profondément que l'on a atteint les sédiments imperméables situés à faible profondeur. À mesure que la source s'écoule, la végétation se développe et le sable s'accumule jusqu'à ce que l'embouchure soit assez grande pour absorber l'eau provenant de la source. Avec l'augmentation du degré d'aridité, le nombre de sources naturelles ainsi que leur débit diminuent (Jones et al. 1981).

Même si la question de la salinité est abordée dans la section suivante, il convient de noter que, dans une grande partie des zones arides et semi-arides, le phénomène de la salinité touche, à un degré ou à un autre, la totalité de l'eau naturelle disponible pour l'irrigation. Arar (1975) précise que de telles conditions existent dans l'émirat de Bahrain, en Arabie saoudite, au Koweït, dans la région de Tagora sur la plaine côtière de la Libye, dans les Émirats arabes unis et dans la République arabe du Yémen. Des phénomènes semblables sont étudiés par Cointepas (1968) en Tunisie, par Satchell (1978) dans les Émirats arabes unis et enfin par Firmin (1971) au Koweït.

Les propriétés hydrologiques des grandes étendues d'eau peuvent être fortement modifiées par certains facteurs souterrains imperceptibles, mais qui influencent néanmoins la circulation des eaux souterraines. C'est parfois le cas des lits d'inondation des grands réseaux fluviaux où le relief peu accentué est le résultat du dépôt de sédiments pendant de longues périodes. Une des grandes particularités de la plaine de l'Indus, au Pakistan, constitue en l'occurrence un cas d'espèce. Celle-ci renferme en effet un certain nombre de crêtes souterraines dont l'une, qui prolonge vers l'ouest les monts Aravalli situés en Inde, a pratiquement séparé le bassin alluvial du Pendjab du bassin de l'Indus. C'est une des principales causes du problème de saturation en eau dans le haut bassin de l'Indus, puisqu'il n'existe aucun bassin d'eau souterraine continu allant des contreforts de l'Himalaya aux environs de la ville de Multan, située approximativement à mi-chemin de la mer (Kaul 1970).

Drainage et salinité

Dans nombre de pays tempérés comme dans les régions arides du bassin méditerranéen et dans les zones tropicales et subtropicales, on connaît bien les problèmes de salinité des sols et des eaux d'irrigation. Toutefois, en raison de l'influence directe et indirecte du climat, le problème est beaucoup plus grave et étendu dans les zones arides et semi-arides. Selon Yaron (1973), un tiers environ des 200 millions d'hectares de terres irriguées dans le monde est touché par la salinité. S'il est vrai que tout sol renferme une quantité plus ou moins grande de sels solubles, ce n'est que lorsque leur concentration atteint un niveau suffisamment élevé pour nuire à la croissance des plantes que l'on peut parler de salinisation. Cela revient donc à dire que l'on définit la salinité des sols en fonction du degré de tolérance des plantes.

La minéralisation des ressources hydriques, et plus particulièrement des eaux souterraines, est un problème universel dans les régions arides. Les causes possibles en sont les suivantes : évaporation de l'eau superficielle et de l'eau souterraine peu profonde ; saumure fossile laissée par les lagunes et les lacs intérieurs anciens ; sels fossiles précipités sous forme de sédiments marins à grains fins ; sels éoliens se déposant par précipitation et sous forme de retombées sèches ; et contamination directe par la mer, notamment dans le cas de sources saumâtres provenant de formations calcaires (Elgabaly 1971 ; Mandel 1973).

En de nombreux points des régions méditerranéennes proches de la mer ainsi que dans les nappes aquifères situées à proximité de la côte des Émirats arabes unis, il arrive fréquemment que les eaux souterraines soient très salées. D'après Simpson (1968), 50 % des terres désertiques australiennes se trouveraient au-dessus de nappes d'eau salée.

On retrouve, dans les eaux naturelles, les ions chimiques dominants suivants : chlore, sulfate, bicarbonate, sodium, potassium, calcium et magnésium. Par leur abondance relative, on peut connaître les origines géochimiques de l'eau et les milieux naturels qu'elle a traversés. La concentration des sels dans les eaux souterraines peut être très élevée. Elgabaly (1971) parle de concentrations de l'ordre de 25-100 g/L. Curry et al. (dans Unesco 1974) affirment que dans les zones irriguées par les eaux d'amont du fleuve Murray, dans l'est de l'Australie, les eaux souterraines naturelles renferment presque autant de sel que l'eau de mer. Firmin (1968), à propos des tentatives de sylviculture irriguée à l'aide d'eau salée au Koweït, où les sources naturelles d'eau douce sont extrêmement rares, rapporte des concentrations allant jusqu'à 4 000-5 000 ppm. Il a également étudié les effets sur la croissance des plantes de concentrations variables des différents ions présents dans la région ainsi que de la présence ou de l'absence d'oligo-éléments comme le bore et le zinc. Dans son rapport sur les sols actuellement et potentiellement salins au Moyen-Orient, Khatib (1971) fait remarquer que la répartition des différents sels varie tout au long du cours des principaux fleuves. Les carbonates sont généralement très abondants en amont, les sulfates prédominent dans les lits d'inondation des régions centrales, et l'on retrouve surtout des chlorures (les plus solubles) en aval et dans les régions deltaïques. Cette répartition s'observe également dans le bassin de l'Indus, au Pakistan.

Dans une étude intéressante des sols pakistanais salinisés, Shah Mohammad (1978) a regroupé les différentes conditions possibles en trois catégories, du point de vue de la croissance des plantes. D'abord, les *sols sodiques* (expression moins ambiguë que « sols alcalins ») possèdent une forte teneur en sodium échangeable (souvent carbonate de sodium), une faible conductivité électrique de l'extrait de saturation, et un pH très élevé (de l'ordre de 8,5-10). Les *sols salins*, qui renferment un excédent de sels solubles, en particulier de chlorures neutres, présentent une conductivité électrique supérieure à celle des sols précédents et ont un pH généralement inférieur à 8,5. Quant aux *sols salins-sodiques*, ils renferment à la fois trop de sels solubles et trop de sodium échangeable, et leur pH peut ou non dépasser 8,5. Même si les sols de ces trois catégories sont peu propices à la croissance des plantes, on peut dire par exemple que la présence de sodium provoque l'effondrement de la structure des sols et rend ceux-ci plus ou moins imperméables à l'eau, alors que les sols salins possèdent une structure relativement intacte permettant un lessivage facile.

Végétation

Les régions arides présentent une végétation clairsemée, généralement très spécialisée sur le plan morphologique et physiologique, sauf dans certains emplacements favorables bien définis. La structure foliaire et la fonction xéromorphes, le contrôle biologique du transport et du métabolisme, le développement d'organes de rétention de l'humidité et des éléments nutritifs, les éléments externes épineux ou à texture rêche, ainsi que la nature éphémère d'une foule d'espèces annuelles sont monnaie courante dans ces régions qui ont fait l'objet de nombreuses études. À mesure que l'aridité diminue et que les conditions deviennent plus favorables à la croissance des plantes, on remarque une régression du phénomène de spécialisation (Gindel 1964, 1971, 1973 ; McGinnies 1968).

Vu le lien étroit existant entre la spécialisation des formes végétales et l'aridité, on peut généralement obtenir, par simple observation du type de végétation poussant en un lieu donné, plusieurs indications utiles au sujet des conditions écologiques présentes. Ainsi, au Moyen-Orient et dans la plaine de l'Indus, la présence de *Prosopis cineraria* et *Capparis aphylla* comme espèces dominantes signifie que les sols ne sont pas trop salins et qu'ils peuvent se prêter à la culture irriguée ; en revanche, *Salvadora persica* et *Salvadora oleoides* sont des espèces qui, parmi beaucoup d'autres, sont l'indice de sols appauvris fortement salins et impropres à la culture sans des mesures d'assainissement préalables. De même, *Tamarix articulata*, *Tamarix dioica* ainsi que les espèces *Sueda* sont l'indice de sols calcaires pauvres.

Il convient de souligner que plus les régions arides et semi-arides souffrent de la sécheresse, moins l'on trouve d'espèces pouvant assurer l'alimentation des populations locales, même si les feuilles et les fleurs de certaines d'entre elles peuvent constituer d'importants compléments alimentaires.

Malgré l'impression de robustesse et de résistance que donne la végétation en zone aride, il est bien connu que, lorsque la pluviosité est faible et irrégulière, ces plantes se trouvent en équilibre relativement précaire avec l'environnement. Elles peuvent tolérer un degré modéré d'activité humaine, par exemple le ramassage de bois de chauffage et de petits matériaux de construction ainsi que le pâturage et le broutement. Par contre, elles résistent mal quand augmentent les besoins des populations et de leurs troupeaux ; dans ces milieux fragiles, le couvert végétal et le sol superficiel sont sujets à une dégradation et à une dénudation rapides. La régénération et la croissance de la végétation, en particulier des arbres, sont des phénomènes normalement lents, même dans les régions non perturbées. Il a cependant été démontré facilement que les sols d'une épaisseur suffisante, sans problèmes de salinité et d'alcalinité et bénéficiant d'une irrigation appropriée et bien contrôlée ainsi que de conditions de température et d'éclairement naturellement favorables, présentent en fait un grand potentiel de productivité en zone aride.

Utilisation des terres et besoins d'irrigation

Tout comme ailleurs dans le monde, les régions arides et semi-arides sont touchées par la croissance démographique et par l'urbanisation. À ce phénomène correspond une hausse de la demande de bois de chauffage (la première source d'énergie domestique dans nombre de pays), de bois de construction et

autres, de fourrage et de brouet pour l'alimentation des chameaux, des chèvres, des moutons et des bovins. Cette activité entraîne la destruction de la forêt naturelle dans un périmètre de plus en plus vaste autour de chaque ville et de chaque village. Du reste, la majeure partie des terres sont réservées à l'agriculture et plus le climat est sec, plus la dégradation de la végétation est susceptible de s'accompagner de phénomènes d'érosion éolienne et de formation de dunes.

Dans les milieux arides et semi-arides, les terres permettant une agriculture soutenue sans irrigation sont rares et ne peuvent généralement pas satisfaire les besoins d'aliments et de fourrage. On utilise donc des techniques d'irrigation pour augmenter plusieurs fois la production, si possible jusqu'à réalisation complète du potentiel des sols, puisque l'insuffisance d'eau est l'unique facteur climatique limitant les rendements (Yaron et Vink 1973). S'il est vrai que l'on accorde à juste titre la priorité à l'agriculture dans l'affectation des terres irrigables et de l'eau d'irrigation, il faut malgré tout souligner que l'on peut employer ces mêmes méthodes, et qu'on les emploie effectivement souvent, pour augmenter la production de bois. L'irrigation accroît de manière très nette le rendement dans les zones arides et semi-arides. Ses effets varient à mesure que le climat devient moins aride. Dans les régions arides, l'irrigation permet de passer de rendements très faibles à des rendements très élevés ; dans les régions de savane et sous les climats méditerranéens, elle prolonge la saison de croissance, élève le potentiel de diversification des cultures et favorise leur rotation ; enfin, la steppe peut être transformée en terre très productive. Il n'en va pas de même pour toutes les régions : en effet, dans les climats subhumides, on évite généralement les frais d'investissement et d'exploitation élevés liés à l'irrigation pratiquée à très grande échelle, notamment dans le cas des plantations forestières irriguées, en plantant plutôt des espèces xérophi les et en n'irriguant que les cultures de grande valeur (Fuchs 1973a).

L'irrigation offre d'importantes possibilités pour la production de bois, en particulier dans les régions sèches où ce matériau constitue la principale forme de combustible domestique et sert à bien d'autres usages, notamment à la fabrication de poteaux et d'abris et à l'alimentation du bétail. Toutefois, dans ces régions, on a également besoin d'eau et de terres irrigables pour la production vivrière, à laquelle on accorde généralement la priorité.

3. Les plantations forestières irriguées

Plusieurs forestiers et spécialistes des forêts ont constaté que l'irrigation permet d'atteindre de hauts niveaux de production dans des régions arides et semi-arides. Les principaux avantages offerts par cette technique sont l'assurance d'une bonne plantation, l'obtention de rendements élevés grâce à la culture d'essences à croissance rapide, la transformation de terres désertiques et infertiles en zones boisées productives et enfin la suppression des difficultés liées aux rigueurs et aux caprices du climat. Toutefois, un grand nombre de personnes ayant acquis une expérience pratique de ce type de culture insistent sur les risques d'apparition de problèmes physiques et biologiques ayant parfois d'importantes répercussions économiques, sociales et politiques. À l'extrême limite, l'irrigation peut être elle-même une des causes de la désertification (Khatib 1971 ; Barbier 1978 ; Wood et al. 1982).

L'irrigation des plantations forestières étant presque toujours pratiquée dans des régions où l'agriculture bénéficie elle-même de cette technique, il est préférable d'en étudier l'historique et l'évolution dans le même contexte. Pour donner une idée de la fréquence d'utilisation de ce procédé, disons que Shmueli (1973) a évalué que moins de la moitié des 500 millions d'hectares de terres situées dans les régions les plus sèches du monde et pouvant bénéficier de l'irrigation sont mises en valeur par ce moyen et ce, pour diverses raisons sociales, économiques et politiques. En 1800, quelque 10 millions d'hectares étaient irrigués ; ce chiffre était passé à 40 millions d'hectares en 1900, à 160 millions en 1950 et à 200 millions en 1969. Au niveau régional, on s'aperçoit, par exemple, que sur les 24 millions d'hectares irrigables situés dans le bassin méditerranéen, à peine 8 millions sont effectivement irrigués, soit 3 % de la superficie totale de cette région, en excluant les déserts (Glesinger 1960). Au niveau national, citons le cas du Pakistan où, en 1979, 12 millions d'hectares de terres étaient irrigués grâce à quelque 78 000 petits réseaux privés d'acheminement de l'eau (Trout 1979). Dans 17 États de l'ouest des États-Unis, la superficie irriguée est passée de 14 millions d'hectares en 1910 à 30,7 millions en 1960. Bien que cette situation s'explique par l'utilisation d'une eau bon marché et de techniques développées à partir de recherches sur les relations entre les plantes, l'eau et le sol, certains spécialistes n'ont remarqué aucune amélioration notable sur le chapitre de l'application de l'eau (Shmueli 1973). Les graves conséquences de cette observation ont amené une commission de l'Unesco à préciser que l'eau peut constituer soit une ressource productive, soit une menace destructive, selon les techniques d'aménagement du sol employées, le choix des cultures et, surtout, les apports d'eau (Unesco 1974).

La première civilisation connue s'est développée il y a 6 000 à 7 000 ans en Mésopotamie, dans la plaine du Tigre et de l'Euphrate. Installée à l'extrémité sud-est du « croissant fertile », elle a réussi à produire des cultures dans

le désert grâce à l'irrigation. Le canal Nahrwan, reliant le Tigre à l'Euphrate, a permis de mettre en culture plusieurs centaines de kilomètres carrés de sol désertique grâce à l'eau des précipitations saisonnières se déversant sur les montagnes et retenues par le barrage Beled. La fertilité de cette région est devenue légendaire. Pendant 3 000 ans, la mise en valeur des ressources naturelles, alliée à un gouvernement fort, a permis de subvenir aux besoins de Babylone dont la population a atteint 25 millions de personnes. Par la suite, ce système entier s'est effondré suite à l'affaiblissement du pouvoir politique central et de la discipline, à la salinisation progressive du sol qui a détruit le couvert végétal en amont et aux inondations subséquentes qui finirent par combler le canal de sédiments. Entre 4000 et 2000 av. J.-C., la salinité du sol s'est élevée à un point tel qu'aujourd'hui encore les terres n'ont pas retrouvé leurs caractéristiques initiales. Cette baisse de fertilité est attribuable à une irrigation excessive, à l'infiltration de l'eau acheminée dans les canaux, à l'élévation de la nappe phréatique et à des dépôts de sels à la surface du sol provoqués par l'évaporation. Vingt à trente pour cent des terres irrigables de nos jours en Iraq sont encore inutilisables. Alors qu'au départ les habitants de cette région cultivaient en quantités égales le blé et l'orge, avec un rendement moyen de 2 t/ha, on ne cultivait plus de blé dans le sud de l'Iraq dès 1700 av. J.-C., mais seulement de l'orge, une espèce halophile. Les graves conséquences sociales, démocratiques et économiques de cette diminution des superficies consacrées à l'agriculture irriguée ont conduit au déclin de la civilisation sumérienne. D'autres civilisations se sont succédées, notamment celle qui s'est développée à la faveur du très vaste réseau d'irrigation mis en place par les Perses après la conquête de la Mésopotamie par Alexandre le Grand, au quatrième siècle avant Jésus-Christ. La salinité du sol a également posé un problème, mais jamais aussi aigu que dans les cas précédents. Le réseau d'irrigation perse s'est dégradé après l'invasion islamique au douzième siècle et n'a jamais été remis en état. Une des plus grandes civilisations du monde a disparu. Lorsque les Mongols ont envahi cette région au treizième siècle, ils n'ont trouvé dans la légendaire Mésopotamie qu'une terre dévastée. De nos jours, cette région du globe en majeure partie désertique est habitée par dix millions de personnes qui arrivent avec peine à obtenir de leurs cultures l'un des plus faibles rendements du monde (Unesco 1974 ; Eckholm 1975 ; Pillsbury 1981).

Le limon charrié par les canaux jusqu'aux terres irriguées constituait également une menace pour la production vivrière. En 5 000 ans, une couche pouvant atteindre 10 m d'épaisseur s'est ainsi déposée dans certaines parties du bassin du Tigre et de l'Euphrate. Il était essentiel de prendre d'importantes mesures concertées pour sauver le réseau ; pourtant, il reste encore d'immenses quantités de limon et de sable fin dans le nord de l'Iraq.

Depuis des siècles, la salinité, la saturation en eau et la sédimentation rendent difficile l'utilisation des plus anciens et des plus vastes réseaux d'irrigation au monde construits dans les grands bassins hydrographiques du Tigre, de l'Euphrate, du Gange et de l'Indus. L'infiltration se produisant au niveau des canaux élève peu à peu le niveau des eaux souterraines, et ce problème est aggravé par la tendance universelle des agriculteurs et autres adeptes de l'irrigation à arroser à l'excès. Il est rare que les réseaux de drainage soient suffisamment importants pour évacuer cet excès d'eau. Le lessivage des sels accumulés dans le sol par d'importants apports d'eau n'est possible que si le réseau de drainage est adéquat et que l'évacuation des eaux salées dans un réseau hydro-

graphique soit acceptable pour les utilisateurs placés en aval. Lorsque le niveau des eaux souterraines salées s'élève jusqu'à l'horizon racinaire des cultures, l'augmentation de la pression osmotique due aux sels provoque le flétrissement des végétaux. Voyant cela, l'agriculteur pense que ses cultures manquent d'eau et, s'il le peut, il arrose davantage, ce qui a finalement pour effet d'amener les sels à la surface et de rendre le sol incultivable.

L'étude de la plupart des cas historiques précités par le directeur général des civilisations anciennes en Iraq et l'Institut oriental de l'Université de Chicago (citée dans Unesco 1974) permet de tirer trois leçons importantes qui sont largement applicables à l'irrigation dans les régions arides et semi-arides.

- Il existe une relation très étroite entre la réussite de l'agriculture irriguée et l'existence d'un gouvernement central stable, car, pour être efficace, le contrôle doit s'étendre au-delà des frontières régionales jusqu'aux sources d'approvisionnement en eau. Il faut également prévoir un système efficace d'évacuation de l'eau de drainage.
- La sédimentation, qui obstrue les canaux et entraîne par la suite l'écroulement de leurs berges, risque également de provoquer à long terme une lente destruction des dispositifs d'irrigation par l'élévation du niveau du sol, rendant impossible l'alimentation en eau.
- Dès les débuts de l'irrigation, on a noté une perte de productivité attribuable à la salinisation. Quoique l'on semble avoir compris très tôt que le lessivage et le drainage enrayaient ce processus, ces techniques n'ont pas été appliquées de manière suffisamment systématique pour empêcher la détérioration du sol. On estimait, par exemple, en 1974 que, dans les zones irriguées de l'Indus et du Gange, la superficie totale de terres productives abandonnées chaque année à cause de la salinité du sol était supérieure à celle des terres mises en culture grâce à de nouveaux réseaux d'irrigation.

Ces trois leçons et les points marquants de l'historique des anciens systèmes d'irrigation brièvement présentés ici indiquent clairement les problèmes auxquels se heurte le développement de cette technique et prouvent qu'il est absolument indispensable de concevoir et d'exploiter de tels réseaux avec réalisme. Comme on le verra plus loin, il semble que l'on ait encore parfois du mal à tirer des leçons des expériences passées !

Réalisations régionales et nationales

La description des cas énumérés ci-après ne se veut pas une explication détaillée des réalisations régionales ou nationales en matière de sylviculture irriguée, mais plutôt une mise en évidence des points fondamentaux des programmes adoptés, de quelques-uns des principes qu'ils englobent ou illustrent et de l'expérience acquise dont pourraient bénéficier d'autres régions. Il est rare que l'on puisse se procurer des dossiers complets sur les divers projets ou les réalisations d'un pays en particulier, et les rapports publiés ne sont souvent pas à jour. Cependant, les documents cités ici renferment plus de détails que la présente étude et constitueront pour les lecteurs intéressés une introduction à l'analyse plus poussée des techniques mises en place dans chaque pays particulier.

Asie du Sud et Moyen-Orient

Pakistan

C'est dans les plaines de l'Indus, situées dans ce qu'on appelle aujourd'hui le Pakistan, que la sylviculture irriguée à grande échelle a été pour la première fois pratiquée. La plantation a débuté en 1864 le long des voies ferrées, dans le but d'assurer l'approvisionnement en combustible des chemins de fer. En 1926, le peuplement forestier couvrait 3 550 ha ; en 1960, il englobait presque 80 000 ha et, en 1967, près de 100 000 ha. Les plantations étaient constituées d'un grand nombre de parcelles dont la superficie variait de quelques centaines d'hectares à plusieurs milliers, réparties dans la grande zone de culture irriguée extensive de la vallée de l'Indus et de ses affluents, dans la région des plaines. Outre le bois de chauffage, ces plantations ont produit des quantités substantielles de billes de sciage, ainsi que du bois destiné à des usages particuliers, comme la fabrication d'articles de sport, tout en favorisant l'implantation locale d'industries artisanales importantes comme la sériciculture et l'apiculture. Hiley (1930) estimait que la totalité du capital investi dans les plantations de Changa Manga, qui sont les plus anciennes, était déjà remboursée en 1913-1914, grâce à un rendement financier de 4,67 %.

Les principes et les techniques ayant permis l'établissement de ces plantations ont été résumés par Troup (1921) et décrits en détail dans deux manuels publiés par Ali (1960, 1962) et par Khan (1961). Dans ses ouvrages, Ali indique quels sont les facteurs d'emplacement à considérer, les relations entre les plantes, le sol et l'eau, les critères devant intervenir dans le choix de l'emplacement et des essences et enfin, les techniques sylvicoles à utiliser. Il décrit le réseau complexe et coûteux de canaux d'irrigation par gravité, consistant en rigoles de 30 cm de profondeur, disposées à 3 m d'intervalle, le long desquelles les arbres sont plantés tous les 2 m. Cette technique a été employée presque exclusivement jusqu'à une date récente, quand est apparue l'irrigation par inondation. Ali donne également certaines indications au sujet de la fréquence et des méthodes d'application de l'eau, de la saturation du sol en eau, de la salinisation et d'autres problèmes possibles, en précisant comment y remédier. Il souligne, tout comme Khattack (1976), que les schémas d'aménagement, les méthodes d'irrigation et les techniques sylvicoles se sont précisés de manière empirique au cours des années, et que les forestiers participant aux projets manquaient souvent de données sur les principes d'irrigation.

Les essences les plus fréquemment plantées ont toujours été *Dalbergia sissoo*, *Acacia nilotica* et *Morus alba*, avec en moindre proportion *Albizia procera*, *Albizia lebbek*, *Bombax ceiba*, *Eucalyptus camaldulensis* et divers clones de *Populus × euramericana*. *Dalbergia sissoo* et *Populus × euramericana* donnent souvent l'impression d'être mal adaptés à la très longue période de végétation et à la courte période de repos hivernal qui prévalent dans la plaine de l'Indus. Les espèces *Albizia* n'ont pas toutes un port serré, caractéristique nécessaire à une bonne plantation. On a souvent effectué la culture mixte de *Dalbergia sissoo* et *M. alba*, ce qui a donné une production de bois généralement bien inférieure à celle obtenue par la culture de l'une ou de l'autre de ces essences (Lerche et Khan 1967).

La production dans les régions irriguées a diminué au cours des années en raison de plusieurs facteurs, parmi lesquels l'irrégularité de l'implantation attri-

buable à de mauvaises méthodes de plantation, le nivellement très approximatif de l'emplacement, compromettant l'uniformité de l'alimentation en eau ; un arrosage irrégulier ou insuffisant dû parfois à la situation des plantations à l'extrémité des réseaux d'irrigation mais aussi, dans d'autres cas, à l'élévation du niveau des terres suite à dépôt de limon ; le mauvais entretien des canaux ; et une planification et une surveillance insuffisantes de l'irrigation. De plus, il arrive fréquemment que le volume d'eau disponible soit inférieur au volume prévu lors de la conception du réseau. Les rendements ont également baissé à cause de la prolifération des plantes adventices (surtout l'herbe, *Prosopis glandulosa*, et *Prosopis juliflora*) et de l'adoption de régimes sylvicoles comportant de fortes coupes d'éclaircie vers la sixième année suivant la plantation et conduisant à un peuplement inégal du terrain pendant le reste de la révolution. L'aménagement des plantations selon le régime du taillis-sous-futaie ou d'autres méthodes de peuplement étagé a entraîné la destruction de l'étagé dominé par suite du développement excessif de la cime des arbres composant l'étagé dominant. Ces problèmes ont été amplifiés par la tendance des arbres plantés à 3 m d'intervalle le long de rigoles de 30 cm de profondeur à développer des systèmes racinaires nettement orientés dans le sens des canaux d'irrigation. En conséquence, ils sont portés à croître de façon oblique ou à être déracinés par le vent, surtout si leurs racines ont souffert d'une maladie (Lerche et Khan 1967 ; M.I. Sheikh, Institut forestier du Pakistan, Peshawar, communication personnelle, 1985). On régénère habituellement les peuplements de *D. sissoo* par une nouvelle plantation, mais il est également possible d'obtenir de bons résultats à l'aide de la régénération par taillis des drageons racinaires, précédée par une coupe rase (Khan 1960a).

De récents efforts visant à accroître la production par un contrôle plus strict ont donné des résultats surprenants grâce aux méthodes ci-après : remplacement des rigoles par un système d'irrigation par inondation, imposition de normes élevées pour la préparation du terrain (surtout en ce qui concerne le nivellement) et la régularité de l'arrosage et adoption d'espacement et de calendriers d'éclaircie permettant de réduire la croissance des plantes adventices au cours des premières années et de maximiser le cubage produit. Il est malheureusement difficile de maintenir le niveau des cuvettes d'inondation pendant les longues révolutions propres aux peuplements forestiers et pratiquement impossible de corriger les défauts de nivellement qui apparaissent après la plantation.

Pendant longtemps, l'établissement de plantations d'État a été effectué en permettant aux agriculteurs d'ensemencer entre les rangées de jeunes arbres, au cours des deux ou trois premières années. Ce système a été abandonné peu à peu, car il s'est avéré difficile à gérer et était utilisé d'une manière qui favorisait généralement l'agriculture aux dépens de la sylviculture (Khattack 1976). En revanche, la plantation par les agriculteurs eux-mêmes et sur leurs propres terres d'arbres isolés, de rangées d'arbres et de plantations par bouquets (*hou-ris*) d'espèces légumineuses améliorant la qualité du sol ou d'espèces produisant des fruits ou du bois, ainsi que leur intégration à l'agriculture, a donné d'excellents résultats et une production abondante sur de vastes étendues, par exemple, dans les régions agricoles irriguées du Pendjab.

Les agriculteurs cultivent avec succès des peupliers à la bordure de champs irrigués dans la province de la Frontière du Nord-Ouest et au Pendjab. Il serait

possible d'étendre largement l'intégration de la sylviculture et de l'agriculture au Pakistan (Sheikh 1978, 1980, 1981, 1982 ; Sheikh et Raza-ul-Haq 1982a, b).

De même que les terres agricoles irriguées sur lesquelles elles sont établies, les plantations de la plaine de l'Indus souffrent fortement d'une saturation en eau et d'une remontée de sel plus ou moins importante. Les estimations du degré de dégradation des terres irriguées sont variables. On évaluait, en 1952-1954, que 20 % des 11,4 millions d'hectares analysés dans le Pendjab étaient salins, tout comme 56 % des 7,25 millions d'hectares prospectés dans le Sind et 5 % des 0,55 million d'hectares de la province de la Frontière du Nord-Ouest. Au Pendjab, 16 % des terres prospectées étaient saturées d'eau, contre 38 % dans le Sind. On estimait en 1976 que 87 % des 4,5 millions d'hectares affectés par le sel manifestaient une salinité fossile, c'est-à-dire une salinité naturelle développée au cours de très longues périodes. Les 15 % restants souffraient de salinité artificielle (Shah Mohammad 1978). Alors que, vers 1945-1946, la superficie des terres saturées d'eau et salinisées augmentait d'entre 16 000 et 20 000 ha annuellement, elle s'établissait à 65 000 ha par année vers 1962-1963, dont les deux tiers dans la basse plaine de l'Indus (Khatib 1971).

La salinité artificielle est un problème principalement attribuable aux facteurs suivants : élévation de la nappe phréatique sous l'effet du passage continu, sur une région entière, de grands volumes d'eau transportés dans des canaux sans revêtement intérieurs, application excessive d'eau par les agriculteurs et, enfin, drainage naturel et artificiel inapproprié. Pour être efficaces, l'assainissement et l'amélioration du sol doivent être entrepris à très grande échelle. De fait, c'est ce qui est effectué depuis 1960 par un organisme créé spécialement à cette fin. Le plan adopté comprenait la mise en place de milliers de kilomètres de tuyaux de drainage pour évacuer l'eau en excès dans le sol, le forage de nombreux puits afin d'abaisser le niveau de la nappe phréatique et une série de mesures visant à améliorer ultérieurement les caractéristiques du sol, entre autres par le lessivage à l'eau douce. En 1964, première année d'application du plan, le niveau de la nappe phréatique avait baissé en moyenne de 28 cm dans les régions visées et les chances de succès apparaissaient encore plus nettement vers 1970. Le coût énorme de ces travaux en ralentit la progression, mais on considère généralement sur place que cela en vaut la peine : les nouvelles pertes de productivité dues à la salinité et à la saturation en eau sont en gros compensées par les gains résultant de l'assainissement (Eckholm 1975). Les forestiers participent à la réalisation du plan en adoptant des techniques de conception et d'aménagement actuellement observées dans tous les nouveaux peuplements et en améliorant les anciennes plantations. L'assainissement complet des zones touchées prendra encore beaucoup de temps.

On connaît mal les besoins d'eau des espèces cultivées ainsi que leurs réactions à diverses conditions. Des essais menés en laboratoire sur l'eau consommée par les semis ont fait ressortir de nets écarts de croissance par rapport au volume d'eau utilisé chez *Acacia arabica*, *Eucalyptus tereticornis*, *E. camaldulensis*, *M. alba*, *D. sissoo* et *Tamarix articulata* (Raeder-Riotzsch et Masrur 1968). Cela fait maintenant plusieurs années que l'on est passé à l'étape suivante, qui consiste à établir scientifiquement des régimes d'arrosage tenant compte des caractéristiques du sol et des conditions climatiques locales. On a pu déterminer que la croissance de *D. sissoo* est maximale avec un apport total d'eau se situant entre 0,9 m et 1,35 m par an, tandis que *E. camaldulensis*, *M.*

alba et les peupliers ont besoin de moins de 1,5 m d'eau par an, dans la gamme des conditions d'analyse, pour atteindre une croissance maximale (Sheikh 1974 et communication personnelle, 1985).

Inde

Dès le début des années 50, certaines mesures ont été prises afin de créer des plantations irriguées dans la partie nord-ouest de l'Inde. Les essences, les aménagements et les méthodes choisis étaient ceux que l'on retrouvait traditionnellement dans les plaines de l'Indus, dans les régions voisines du Pakistan (Singh 1960 ; Singh 1963). Ces plans d'aménagement n'avaient absolument rien de commun avec ceux de la vallée de l'Indus. Ils ont toutefois été entravés par l'irrégularité des ressources en eau, la salinité du sol et d'autres problèmes identiques à ceux rencontrés au Pakistan. L'absence de méthodes d'irrigation élaborées a également gêné la réussite des programmes de plantations irriguées. Certaines recherches effectuées visaient à s'assurer que la qualité de l'eau convenait à l'irrigation des plantations forestières et au lessivage des sels au-delà des horizons racinaires des arbres, les précipitations étant insuffisantes pour ce faire. La rapidité avec laquelle la nappe phréatique peut s'élever sous l'effet de l'irrigation et l'ampleur de cette élévation ont été observées au Pendjab, dans la région du canal de Bhakra comptant 2,7 millions d'hectares irrigués depuis 1954 pour un vaste réseau d'irrigation. Les données précises sur cette région, remontant jusqu'à 1895, ont permis de s'apercevoir qu'en 1963 la nappe phréatique avait remonté de 7 à 9 m et que les terres irriguées commençaient à être saturées d'eau et salinisées (Barghava 1948 ; Kanshik 1961 ; Singh 1963 ; Sharma 1973 ; Singh et Singh dans Unesco 1974 ; Bhatia 1980 ; Tomar et Yadav 1980).

L'une des entreprises de sylviculture irriguée les plus impressionnantes mises en place dans le monde au cours des dernières années se trouve dans les zones agricoles de l'Inde, c'est-à-dire dans le Gujarat (où tout a commencé), l'Haryana, l'Uttar Pradesh, le Bihar, le Bengale-Occidental et les États du Sud. Ces réalisations, largement financées par la Banque mondiale, sont décrites en détail dans les dossiers de cette institution, mais n'ont pas fait l'objet d'études approfondies dans les ouvrages traitant de foresterie ou d'autres questions scientifiques. Il apparaît clairement, lorsque l'on observe soi-même les résultats obtenus ou que l'on s'entretient avec des représentants du Service indien des forêts et de la Banque mondiale, que les agriculteurs indiens réussissent parfaitement à intégrer la plantation et l'entretien des arbres à leurs propres travaux d'exploitation agricole et qu'ils sont extrêmement conscients et satisfaits des avantages économiques qui en résultent. En quelques années, le paysage de ces contrées agricoles a commencé à se transformer, des terres presque dénudées devenant fortement boisées. Selon Shiva et al. (1982), quelque 10 000 exploitants d'un district du Gujarat ont abandonné la culture du blé ou de la canne à sucre au profit de la culture irriguée d'*Eucalyptus*, en raison des profits supérieurs qu'elle génère. Les services forestiers gouvernementaux ont fait tout particulièrement l'objet d'une restructuration profonde destinée à les adapter à ces nouvelles pratiques et à d'autres besoins, notamment en ce qui a trait aux centres de vulgarisation.

Toute une gamme d'essences sont cultivées pour produire du bois de chauffage, des poteaux, des fruits, du fourrage ou simplement de l'ombre, parmi

lesquelles *E. camaldulensis*, *Eucalyptus* « hybride » (*E. tereticornis*),¹ *A. nilotica*, *Azadirachta indica*, différentes espèces d'*Albizia*, des manguiers et des essences à croissance très rapide et à courte révolution telles que *Sesbania grandiflora*. Les pépinières d'État fournissent généralement les semences gratuitement ou à faible coût, mais un grand nombre d'agriculteurs produisent les leurs.

Une étude de la consommation d'eau des semis âgés d'un an par rapport à la production de biomasse a été effectuée à l'aide d'un lysimètre sur différentes essences cultivées grâce à l'irrigation dans l'Uttar Pradesh : *Pongamia pinnata*, *A. lebbeck*, *Acacia auriculiformis*, *D. sissoo*, *Syzygium cuminii* et *Eucalyptus* « hybride ». On a découvert une forte corrélation positive entre la consommation d'eau et la production de biomasse (croissance). Les essences étudiées sont présentées ici dans l'ordre croissant de pousse et de consommation d'eau par unité de biomasse produite. *Eucalyptus* « hybride », l'espèce ayant la croissance la plus rapide, a besoin de 0,51 L d'eau pour produire un gramme de biomasse tandis que *P. pinnata*, avec la croissance la plus lente, avait besoin de 1,30 L d'eau (Chaturvedi et al. 1984).

L'analyse financière a fait ressortir les bons résultats obtenus dans une exploitation de 65 ha située près d'Ahmedabad, dans le Gujarat, et totalement reconverte à la culture irriguée de poteaux d'*Eucalyptus*. Avec un taux de rendement interne de 129 % pour la première coupe et de 213 % pour les coupes suivantes de taillis (sans tenir compte de la valeur des terres), la production arboricole était nettement plus lucrative que les récoltes agricoles annuelles (Gupta 1979).

Iraq

Les débuts de l'irrigation dans la région du Tigre et de l'Euphrate, dont fait partie l'Iraq, ont été décrits au début de ce chapitre. De nos jours, 70 % à 80 % de toutes les zones irrigables dans ce pays sont plus ou moins salines. Les terres cultivées pour la première fois depuis 600 ans n'ont pu produire que 5 à 10 récoltes avant de devenir à nouveau trop salines pour la culture (Glesinger 1960).

Dans un rapport sur les essais d'irrigation de *E. camaldulensis* et *Eucalyptus microtheca*, Pryor (1953) soulignait que les résultats étaient très prometteurs dans les régions suffisamment drainées et peu touchées par la salinité. À certains endroits, les peuplements d'*E. camaldulensis* étaient atteints de chlorose. Selon lui, grâce à la culture irriguée, 10 % des terres publiques utilisables (y compris les terres agricoles de faible rendement) devraient être réservées à la production du bois dont on a tant besoin dans ce pays et de nombreuses espèces d'*Eucalyptus* provenant de régions climatiques australiennes comparables à celles de l'Iraq devraient être testées sur place. Il ne pouvait décrire précisément les méthodes d'irrigation utilisées mais pensait qu'il serait peut-être bon de réduire en partie l'apport d'eau et de pousser les recherches concernant la période la plus favorable à l'irrigation, la fréquence d'application et la quantité d'eau déversée.

Des essais très prometteurs de plantation d'*E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *Casuarina equisetifolia*, *Platanus orientalis*, *D. sissoo*, *Melia azaderach* et

¹ *Eucalyptus* « hybride » a été identifié comme *E. tereticornis* (FAO 1979a). Il a été décidé d'employer la terre « hybride », comme il est courant en Inde.

T. articulata ont débuté en 1948 à proximité du confluent du Tigre et du Petit Zab. On ne possède aucun chiffre sur le taux d'irrigation en eau, mais il y a probablement eu saturation. L'irrigation de ces peuplements et certains essais de culture se sont poursuivis jusqu'au début de la décennie actuelle grâce au soutien financier du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et de la FAO. On a cultivé *Eucalyptus camaldulensis* dans les plantations d'Omari situées dans la vallée du Tigre à une densité représentant jusqu'à 37 m³ de bois par hectare et par année à l'âge de cinq ans (Gorrie 1956 ; Barbier 1978). Étant donné les besoins en bois du pays et les résultats d'une analyse économique des données recueillies lors des essais, Busby (1979) recommandait la mise en place d'un programme de plantation portant sur 34 000 ha de terres dans la plaine mésopotamienne.

Malheureusement, certains rapports officieux émanant de représentants du PNUD et de la FAO indiquent que les plantations sont négligées depuis deux ou trois ans en raison de la guerre Iraq-Iran et que l'arrêt de l'arrosage a provoqué la mort d'un grand nombre d'arbres.

Koweït

Le climat du Koweït est rude. Il se caractérise principalement par des étés chauds et secs, au cours desquels surviennent des tempêtes de sable, et des hivers doux à froids (la température la plus basse enregistrée est de -4 °C). L'humidité relative varie de 80 % maximum en décembre à 13 % en juin et la hauteur annuelle moyenne des précipitations est de l'ordre de 100 mm sur la côte et dans les basses terres intérieures, pour une évaporation potentielle totale de 5 000 mm par an. Le sol est infertile et son profil pédologique est peu développé, la salinité est souvent élevée et l'on retrouve un horizon induré de carbonate de calcium entre 0,7 m et 1,7 m de profondeur. L'irrigation des terres agricoles et sylvicoles se fait à l'aide d'eau saumâtre dessalée, d'eaux usées non traitées, d'effluents d'eaux usées traitées ou d'eau provenant de nappes aquifères superficielles, caractérisée par une forte salinité, une teneur élevée en chaux et un pH de 8 à 9. L'eau de mer est relativement peu salée en raison de la limitation des courants dans le golfe Persique. Il est donc possible de faire pousser des mangroves le long de la côte.

Dans ces conditions peu favorables, le ministère chargé de la foresterie a mené plusieurs essais de culture irriguée de *P. juliflora*, *Zizyphus spina-christi* et *E. camaldulensis* ; ces espèces ont bien toléré des niveaux de salinité proches de celui de l'eau de mer lorsque l'horizon racinaire était constamment humide et que les rapports magnésium-calcium n'étaient pas toxiques. Un grand nombre d'autres essences et buissons halophiles ont été plantés à des fins expérimentales dans des sols salins, en utilisant de l'eau renfermant 4 400 ppm de sel. À partir des résultats obtenus, les chercheurs ont classé ces essences par ordre décroissant de tolérance au sel, mesurée par la conductivité électrique du milieu de croissance (voir l'annexe 2). Ils ont dressé la liste des arbres poussant à proximité de puits salins, ce qui incluait les espèces semblant bien supporter les hauts rapports sodium-calcium et sodium-calcium + magnésium. Diverses méthodes visant à réduire les effets de la salinité ont également été évaluées, entre autres l'aération pédologique, l'abaissement du pH par apport de soufre, la pose de feuilles de matière plastique autour des tiges pour réduire l'évaporation au niveau du sol, le billonnage, la plantation en profondeur et l'irrigation

à courts intervalles ou de façon continue pendant la nuit (par aspersion). On s'est aperçu qu'il était primordial de limiter l'évaporation superficielle (Firmin 1968).

Deux dispositifs ont été mis en place en 1962 : l'un portait sur la création de rideaux-abris le long de la route reliant Koweït à Jahara et l'autre, sur la protection de la ville et des environs de Jahara, là aussi à l'aide de rideaux-abris (Firmin 1968). La technique employée consistait à creuser des rigoles de 1 m de profondeur, à les remplir d'eaux usées traitées apportées de Koweït par camions-citernes, à reboucher les rigoles à l'aide de terre et à planter de longues boutures (1 m) de *Tamarix aphylla*, l'espèce la plus adaptée à ce genre de plantation. Plus de 200 essences ou provenances ont été sélectionnées à l'aide d'essais par élimination menés dans six endroits différents. On a également tenté de déterminer les types de plants à utiliser, les effets d'une réduction de l'apport hydrique, le niveau de tolérance au sel, l'utilité des engrais et l'efficacité des méthodes mécaniques de préparation du sol. Les essences suivantes se sont révélées les plus prometteuses : *T. aphylla*, *E. camaldulensis* var. *obtusa*, *Eucalyptus coolabah* (c'est-à-dire *E. microtheca*) et *Acacia salicina*. On s'est aperçu à plusieurs occasions qu'il était important de bien choisir la provenance des végétaux. Enfin, il a été recommandé de poursuivre les essais et de passer à des superficies plus vastes si l'on pouvait disposer des terres, de l'eau et des fonds nécessaires. Bien que les résultats obtenus lors de travaux ultérieurs ou de l'application des résultats de ces importants essais n'aient apparemment pas été publiés, on sait que le ministère koweïtien des Travaux publics a demandé à des experts-conseils de concevoir des zones d'aménagement agricole et sylvicole alimentées à partir d'effluents d'eaux usées traitées. Le gouvernement a déjà établi quelque 3 000 ha de plantation autour de la ville de Koweït ; il a aussi adopté un programme de 7 000 ha visant à utiliser la plupart des effluents d'eaux usées disponibles entre 1980 et l'an 2 000 pour accroître sensiblement la production forestière, protéger l'environnement, créer des rideaux-abris pour les cultures et parvenir à une sylviculture peu ou pas irriguée (Wood et Synott 1978).

Émirats arabes unis

En Abu Dhabi, les premières plantations ont été établies en 1968 près d'Al Ain, située à environ 170 km du port d'Abu Dhabi, sous la forme de bandes étroites longeant les routes, irriguées par la méthode goutte à goutte. Certaines des essences plantées (*E. camaldulensis*, *E. microtheca*, *C. equisetifolia*, *Parkinsonia aculeata* et *P. juliflora*) avaient atteint une hauteur de cinq mètres au bout de cinq années (Satchell 1978). Chaque hectare a reçu environ 6 000 m³ d'eau dont la teneur en sel allait de 2 à 15 g/L chaque année (Barbier 1978).

L'aménagement de terres a vraiment commencé en 1972 par le boisement de 430 ha dans deux régions nettement éloignées des grandes routes, au sud-ouest d'Al Ain, mais présentant divers attraits qui amèneront peut-être un jour à les transformer en parcs naturels ou en zones d'attraction touristique (Wood et al. 1975). Ces terres se trouvent à une altitude moyenne de 300 m et reçoivent moins de 100 mm de pluie par an. L'humidité relative est moindre que sur la côte, car des vents particulièrement secs soufflent de l'Arabie désertique. Les plantations sont situées en partie dans des plaines graveleuses ou limoneuses et en partie sur des dunes de sables mouvants. La profondeur du sol, sa

fertilité et sa structure sont très variables et l'on trouve des horizons de graviers indurés renfermant souvent beaucoup de gypse. L'eau d'irrigation provient de puits de forage et son degré de salinité varie considérablement, pouvant aller de 2 500 à 7 000 ppm. Quand l'eau disponible est très salée, il est recommandé d'irriguer de manière relativement abondante pour limiter l'accumulation de sel dans l'horizon racinaire, de réduire le plus possible l'évaporation superficielle et, bien sûr, de s'assurer que les plantes utilisent au maximum l'apport d'eau. C'est pour ces raisons et afin de ne pas gaspiller les faibles réserves d'eau disponible que l'on a opté pour un réseau d'irrigation goutte à goutte, en divisant les plantations en blocs de 20 à 25 ha, l'exploitation de chacun d'entre eux étant confiée à une seule personne. On a choisi de planter quatre espèces indigènes, *Acacia tortilis*, *A. nilotica*, *Prosopis cineraria* et *Z. spina-christi*, dont les graines étaient de provenances locales. Bien que la saison la plus chaude s'étale d'avril à octobre, la plantation a été réalisée en août, quand les températures diurnes chutent sensiblement. Grâce à des feuilles de palmier ou à des filets, les plants repiqués de 30 cm ont été protégés de l'effet abrasif du sable éolien. En général, 80 % des plants reprenaient et certains atteignaient 1,50 m après une année. L'apport d'eau était limité au minimum requis pour assurer la survie et une croissance régulière des arbres. L'aspersion d'insecticides a protégé les jeunes plants des mineuses, des cicadelles, des chenilles et des acariens ; le réseau d'irrigation a également permis de lutter efficacement contre les termites et les vers blancs. Les auteurs pensent que seules deux essences peuvent survivre sans irrigation, à savoir : *P. cineraria*, qui dispose de racines pivotantes profondes, et *A. tortilis* parce que, au contraire, ses racines peu profondément enfouies dans le sol lui permettent de recueillir l'eau des précipitations occasionnelles ou de la rosée.

Selon Satchell (1978), des entrepreneurs d'aménagement paysager ont récemment entrepris de reboiser 200 ha supplémentaires en Abu Dhabi et d'autres régions de Dubay et Chardja. On envisageait également d'établir des plantations recouvrant 960 ha à proximité des centres pétroliers de Tarif et de Jebel, en Abu Dhabi.

Autres pays du Moyen-Orient

Khatib (1971) affirmait que la salinité et la saturation en eau sont des problèmes touchant fréquemment les terres irriguées dans le Yémen du Sud, la République arabe de Yémen, la Somalie, l'Arabie saoudite et l'Iran. Dans ce dernier pays, 5 % des terres arables irriguées étaient saturées d'eau en 1971 et Eckholm (1975) signalait que l'on procédait à l'irrigation de vastes superficies à l'aide d'eau légèrement salée.

Région méditerranéenne

Les travaux sur les progrès et les applications de l'irrigation dans la région méditerranéenne soulignent très nettement les difficultés posées par l'insuffisance d'eau (les puits sont la principale source d'approvisionnement), le degré de salinité souvent élevé de l'eau, la faible superficie des terres irrigables et la grande proportion de sols salins (ou la rapidité de salinisation) et insistent donc sur la nécessité de bien concevoir et tester les méthodes et les techniques d'irrigation ainsi que les systèmes de drainage du sol. Il n'est donc pas surprenant que l'on ne retrouve nulle part dans cette région de vastes plantations irriguées

et que les aspects économiques de la sylviculture soient soigneusement étudiés et comparés à ceux d'autres cultures agricoles possibles. L'analyse des cas ci-après montre que l'homme peut être remarquablement ingénieux quand il doit résoudre des problèmes liés à l'insuffisance d'eau et à la présence d'un sol peu propice à l'arboriculture. Par contre, il semble parfois commettre des erreurs et des oublis particulièrement graves et inattendus lorsque le sol présente un potentiel excellent et que l'eau est douce et abondante !

Tunisie

Depuis des siècles, l'irrigation permet de produire des dattes, des olives et des cultures annuelles grâce à de l'eau saumâtre provenant d'un sous-sol renfermant naturellement des dépôts de sels. La zone irriguée, réservée surtout aux cultures agricoles, s'est nettement étendue au cours des dernières années, alors qu'étaient réalisés de nombreux projets visant à sélectionner des plantes halophiles et à éviter l'accumulation de sels dans le sol. Un service de recherches agricoles très actif a mené un grand nombre d'études sur ces questions dans plusieurs régions représentatives de l'ensemble du pays. L'une d'entre elles, par exemple, portait sur l'irrigation d'une région proche de Sfax, recevant 200 mm de précipitations, à l'aide d'eau provenant de puits artésiens et renfermant jusqu'à 11 g de sel par litre. L'apport de 6,9 mm d'eau par jour, soit un volume supérieur à l'évapotranspiration potentielle quotidienne évaluée à 5,5 mm, a élevé en quatre ans la nappe phréatique de trois mètres. En conséquence, les systèmes racinaires se sont réduits, les rendements ont diminué et la surface du sol a commencé à présenter des zones dénudées recouvertes de poussière. On a remédié rapidement à cette situation en posant des tuyaux de drainage, en réduisant les volumes d'eau d'irrigation, en augmentant la fréquence d'alimentation et en lessivant les sels en hiver. On s'est aperçu qu'il était primordial de surveiller la profondeur de la nappe phréatique dans toutes les régions irriguées : par exemple, celle-ci doit se trouver entre 1,4 m et 1,7 m au minimum sous la surface du sol dans les grandes étendues du centre et du sud du pays, y compris dans les oasis et dépressions plantées de palmiers-dattiers, d'*Eucalyptus occidentalis* et *E. camaldulensis*. Les systèmes et les méthodes les plus efficaces d'irrigation-lessivage-drainage sont mis au point pour chaque situation (Cointepas 1968 ; Van Hoorn et al. 1968 ; Arar 1975).

Algérie

Plusieurs essais de culture irriguée d'arbres fruitiers, de palmiers et de différentes essences produisant du bois d'œuvre (entre autres *E. occidentalis* et *C. equisetifolia*) ont donné des résultats très encourageants dans la région aride d'Igli-Adrar, près de la frontière séparant l'Algérie et le Maroc. Ces essais ont révélé l'importance du nivellement du terrain et d'autres techniques de préparation du sol, du bon dosage de l'apport d'eau et d'un drainage efficace empêchant une trop grande accumulation de sels (Durand 1958). Metro (dans Kaul 1970) a décrit les excellents résultats obtenus grâce à l'irrigation de petites plantations d'agrément et de rideaux-abris dans une région désertique située au pied du Irara. *Eucalyptus gomphocephala*, *E. camaldulensis* et *E. occidentalis* sont les espèces qui ont présenté la meilleure croissance, mais plusieurs autres se sont également bien comportées. L'eau d'irrigation était quelque peu salée et distribuée en abondance « afin de pénétrer jusqu'à une profondeur d'un à deux mètres. » Lorsque la nappe phréatique s'était élevée à moins de deux mètres

de la surface du sol, on a eu recours au drainage souterrain. L'irrigation a été suspendue à la fin de l'été de manière à favoriser un enracinement profond. De grandes quantités d'eau étaient distribuées pour lessiver les sels dès que les arbres présentaient des symptômes attribuables à la salinisation du sol. Il serait intéressant de savoir si ces peuplements, créés par une société d'exploration pétrolière, ont continué à présenter une croissance normale, bien que selon Metro (dans Kaul 1970), les apports d'eau aient été excessifs.

Italie

En Italie et en Sicile, caractérisées par un climat méditerranéen plus sec, on a largement recours à l'irrigation pour la production annuelle de fruits, de légumes et d'autres cultures agricoles. Certaines difficultés surgissent en raison de l'accroissement de la salinité des eaux souterraines utilisées du printemps à la fin de l'été et par suite de la salinisation du sol. Diverses expériences ont conduit à l'adoption de régimes d'irrigation prévoyant de courts intervalles de distribution et l'application d'engrais minéraux et de fumier, conjointement avec la surveillance soigneuse de l'évolution du sol (probablement afin de pouvoir effectuer un lessivage en cas d'accumulation du sel) (Ficco 1968). Eccher et Lubyano (1969) ont signalé une nette augmentation de la production de *Pinus radiata* près de Rome grâce aux méthodes d'irrigation appliquées, même si l'été n'avait pas été particulièrement sec. Des résultats plus marqués devraient être obtenus avec les mêmes méthodes dans le sud du pays et en Sicile, où les étés sont plus longs et plus secs. L'irrigation par goutte à goutte a accru le taux de survie et le rythme de croissance de *Pinus maritima* (Grossi 1974, 1976).

Égypte

Il est rare qu'un document mentionne clairement l'existence de zones de sylviculture irriguée dans l'ancienne Égypte. Toutefois, en étudiant soigneusement la littérature de la période ptolémaïque (4^e et 3^e siècle av. J.-C.), Rostovtzeff (dans Hughes et Thirgood 1982) a découvert l'existence d'un programme de sylviculture pour l'ensemble du territoire, notamment la plantation d'arbres le long des fleuves et de canaux afin de pallier l'insuffisance de la production forestière. On continue encore aujourd'hui à planter des brise-vent et des rideaux-abris le long des canaux, leur production globale de bois étant évaluée à 10 millions de mètres cubes par an.

Comme dans la plupart des pays méditerranéens, les plantations irriguées sont presque toutes intégrées à l'agriculture et prennent la forme de bandes étroites, de rideaux-abris et de bouquets d'arbres. La survie et le développement des essences dépendent en fait des conditions créées au départ pour l'agriculture ou découlant de cette mise en valeur des terres. La grande fertilité de la vallée du Nil a été préservée pendant des millénaires grâce aux crues annuelles (Pillsbury 1981). Ce phénomène naturel a été supprimé par la construction du barrage d'Assouan, avec pour conséquence l'apparition de problèmes de salinité et de saturation en eau touchant 30 % des terres arables, surtout dans la partie nord du delta où les sols sont plus lourds et moins bien drainés de l'intérieur (Khatib 1971 ; Eckholm 1975). L'extension de l'irrigation dans le désert situé à l'ouest du delta du Nil a permis d'atteindre des rendements étonnamment élevés pendant quatre ou cinq ans mais la saturation en eau, principalement due à l'infiltration au niveau des canaux, et la salinité ont par la suite fortement abaissé la production dans cette région également (Hassan et al. 1970 ; ONU 1978).

Turquie

L'irrigation de la plaine de Menemen a été marquée par des problèmes maintenant bien connus et attribuables à l'absence de drainage dans le réseau construit en 1949. Dans les dix années qui suivirent, de grandes superficies ont commencé à devenir improductives en raison de la saturation en eau et de la salinité du sol. Cependant, l'irrigation de plantations de peupliers dans les environs d'Izmit a été conçue avec plus de clairvoyance. Les apports d'eau n'ont pas été limités pendant les premières années mais, après 1965, on a posé des vannes permettant de régler et de mesurer le débit en certains points clés. Cette mesure s'est avérée décisive du fait de la faible profondeur de la nappe phréatique. On a également décidé de passer à l'irrigation par inondation et d'abandonner la méthode d'irrigation par rigoles afin de favoriser le développement de systèmes racinaires mieux équilibrés et plus étalés (Glesinger 1960 ; Chardeon 1969).

Israël

Ce pays pratique la sylviculture irriguée sur de faibles étendues en l'intégrant généralement à l'agriculture. Comme pour les cultures traditionnelles, la recherche et l'application se font strictement de manière scientifique. On a par exemple effectué à plusieurs reprises une expérience sur quatre ans visant à déterminer si deux clones de peupliers représentatifs seraient plus ou moins bien adaptés à une culture irriguée par aspersion dans la plaine côtière ainsi qu'à définir et à évaluer le régime d'irrigation le plus approprié. Le volume et la fréquence des apports d'eau nécessaires pour que l'humidité du sol atteigne la valeur au champ ont été déterminés et comparés à l'humidité naturelle du sol et au niveau de précipitations (tous deux étant soigneusement surveillés). L'augmentation ou la diminution de l'apport d'eau a ralenti la croissance des arbres et réduit l'efficacité de l'irrigation. On s'est aperçu que l'absorption d'eau était uniforme jusqu'à une profondeur de 120 cm, ce qui favorise un développement racinaire très égal en profondeur (Rawitz et al. 1966).

Une méthode similaire a permis de déterminer quel était le régime d'irrigation par aspersion le plus favorable en été pour *E. camaldulensis*, espèce entrant normalement en dormance à cette période de l'année en Israël (Karschon 1970). Le mode de distribution choisi a causé une accélération de la croissance évaluée entre 100 % et 120 % au bout de la cinquième année par rapport à une culture non irriguée. Selon Karschon, même ce taux de croissance (qui n'était pas encore maximal) ne justifie pas nécessairement l'emploi de telles quantités d'eau et ce n'est qu'au terme de la révolution, quand les arbres seront âgés d'environ 12 ans, que l'on pourra vraiment émettre un jugement définitif à cet égard. On ne sait si cette analyse ultérieure a été effectuée.

Plusieurs essais ont été réalisés sur quelque 200 espèces ornementales (principalement des arbres, des arbustes et des plantes pouvant avoir une certaine valeur sur le plan de l'agrément et sur le plan économique) dans le but d'observer leur comportement dans la région côtière extrêmement aride d'Eilat. La hauteur annuelle moyenne de précipitation dans cette zone est de 20 mm en moyenne, l'eau d'irrigation a une teneur globale en sel de 2 000 à 6 000 mg/L, mais ce chiffre peut atteindre 10 000 mg/L, et l'alimentation en eau est parfois limitée. Le sol est très léger et renferme une couche de gypse à 10 ou 20 cm de profondeur ; la présence de ce matériau hygroscopique explique peut-être

la survie des plantes lors de l'interruption occasionnelle de l'alimentation en eau. La légèreté du sol s'est avérée un atout, car elle a facilité l'irrigation conçue de façon à réduire l'accumulation de sel. Au bout de 15 années, on a dressé la liste de 29 espèces qui étaient « particulièrement bien adaptées » aux conditions locales (voir l'annexe 3) et de 17 autres qui étaient « bien adaptées » (Boyko et Boyko 1968).

Afrique orientale, occidentale et australe

Soudan

La plus ancienne plantation irriguée au Soudan a été créée à la suite d'essais de culture entrepris en 1932 dans le cadre du projet d'irrigation des champs de coton et de sorgho de la Gézireh ; ce projet avait été lancé dans les années 20 afin de mettre en valeur les rives ouest du Nil Bleu, à quelque 170 km en amont de sa confluence avec le Nil Blanc. C'est en 1937 que l'on a pris la décision de créer des plantations dans la Gézireh, afin d'assurer un approvisionnement suffisant en bois de chauffage et en poteaux ; les travaux ont commencé la même année à Fekar. Cette région est caractérisée par une grave sécheresse en été et par des précipitations occasionnelles s'élevant en moyenne à 200 mm. Le sol comprend de grandes zones d'argiles noires, alcalines et fissurées dont le pH excède parfois 8,5. Il était au départ recouvert d'herbages clairsemés et dégagés au nord, de broussailles d'*Acacia mellifera* au centre et de forêts claires (*Acacia seyal*-*Balanites aegyptiaca*) au sud. L'utilisation de l'eau est régie par l'accord sur les eaux du Nil signé avec l'Égypte, lequel ne permet que très peu d'irrigation entre la mi-mars et la mi-juillet (et pratiquement pas pour les plantations). Au début, les agriculteurs se sont opposés à la sylviculture par crainte de la prolifération d'insectes nuisibles pour le coton et d'oiseaux se nourrissant de sorgho. Les plantations ont donc été situées en partie sur des terres non cultivées à l'intérieur de la zone agricole. Après 1951, on a surtout mis en valeur des terres au microrelief accidenté servant au déversement de l'excédent d'eau d'irrigation ou de l'eau usée, dont la teneur en sel est souvent élevée (Masson et Osman 1963 ; Bosshard 1966b ; Khan 1966d ; Foggie 1967 ; Bayoumi 1972, 1976, 1977 ; Saleem 1973, 1975 ; Laurie 1976 ; Jackson 1976 ; Ahmed 1977 ; Ali 1979).

On a surtout choisi de planter l'espèce *Eucalyptus microtheca* c'est-à-dire *E. coolabah*, car elle supporte une chaleur intense, est adaptée aux sols de la région riches en montmorillonite et n'est pas trop sensible aux interruptions des régimes d'arrosage. Malheureusement, toutes les graines plantées pour effectuer les essais en 1932 et au cours des années suivantes provenaient d'un seul arbre planté à Shambat par Massey en 1922, lequel était lui-même issu de graines provenant d'Afrique du Sud. Cela a entraîné une nette dégénérescence par consanguinité qui s'est traduite par une malformation accentuée des tiges, caractéristique que l'on retrouve dans presque tous les peuplements locaux de cette espèce. Le bambou *Oxytenanthera abyssinica* est également bien adapté aux conditions dans lesquelles se pratique la sylviculture irriguée.

La préparation du sol comprend le labour en billons bas à 2,4-2,7 m d'intervalles, les dépressions servant de canaux d'irrigation. Foggie (1967) pensait qu'il est préférable de niveler le sol avant le labour en billons afin d'assurer un arrosage plus uniforme. Des semis de cinq à six mois, cultivés dans des bacs en poly-

thène, ont été placés en terre à 2,4 m d'intervalle, juste au-dessus du niveau d'irrigation. Habituellement, les canaux d'irrigation sont espacés de 3 m et on dispose les plants à 2 m d'intervalle le long de ces derniers. Ahmed (1969) et Khan (1966b) ont étudié et proposé divers régimes d'irrigation ; l'apport d'eau a en principe lieu deux fois par mois de la mi-juillet à la mi-décembre et une seule fois par mois jusqu'à la mi-mars. En fait, le volume d'eau déversé et la fréquence de distribution ont été très irréguliers, l'irrigation étant parfois excessive en raison des grands volumes d'eau utilisés pour les cultures avoisinantes, et parfois insuffisante à cause de divers facteurs parmi lesquels l'inégalité du terrain, ce qui a entraîné un dépérissement (Foggie 1967 ; Laurie 1974 ; Ali 1979). En 1971, les problèmes de salinité étaient limités à certaines zones et ne présentaient pas un caractère alarmant (Khatib 1971). Le fait qu'au Soudan les zones irriguées soient remarquablement à l'abri de la salinisation s'explique par la présence presque systématique d'argiles à montmorillonite qui empêchent la percolation de l'eau d'irrigation jusqu'à la nappe phréatique ou la remontée capillaire d'eau salée située en profondeur.

En 1967, 3 700 ha de plantations avaient été aménagés dans 63 zones différentes. En raison du caractère variable des facteurs cultureux et autres déjà mentionnés, on a observé de grands écarts dans l'accroissement des arbres et le rendement des plantations. Dans les plantations de qualité III, qui semblent recouvrir la majorité des terres irriguées, le rendement des peuplements de jeunes plants âgés de huit ans (moment de la révolution) a varié de 1 m³/ha (et parfois moins) à 10 m³/ha, la moyenne se situant à environ 6,5. Les meilleures terres ont produit un rendement atteignant 23 m³/ha avec une bonne préparation du terrain et un arrosage égal et approprié. Il affirmait que, dans ce cas, les plantations seraient plus rentables que les cultures agricoles les moins productives. Ali (1979) a remarqué que, contrairement à l'habitude, les rendements obtenus à partir du taillis étaient inférieurs à ceux des peuplements de jeunes plants et il fallait selon lui en rechercher les causes dans les facteurs biologiques ou sylvicoles. Dans son rapport, Ali suggère que cette situation s'explique, au moins en partie, par les mauvaises méthodes d'abattage, le soin insuffisant apporté à l'arrosage quand le jeune taillis en a besoin et le « noyage » de certaines souches sous un excès d'eau. Ces erreurs de gestion provoquent l'affaiblissement des pieds mères, retardant la repousse des taillis et entraînent la mort prématurée d'une proportion beaucoup trop grande de plantes mères.

Ali (1979) a évalué les aspects économiques du projet de plantation. Il a étudié plus particulièrement trois des techniques d'aménagement appliquées, ce qui l'a conduit à confirmer que huit à neuf ans était la révolution sur semis optimale et à encourager la coupe de rajeunissement plutôt que le replantage (étant donné la diminution de rendement dont nous avons parlé plus haut). Il a émis des commentaires décisifs sur le choix des espèces, l'espacement, l'emploi d'engrais, les régimes d'arrosage et l'intérêt de l'intégration de la sylviculture (par exemple sous forme de rideaux-abris) à la production agricole, et a tenté de prédire quels seraient les rendements des peuplements de jeunes plants et de taillis établis sur des terres de trois niveaux de qualité différente.

Foggie (1967) a étudié le projet en concentrant son analyse sur les techniques de sylviculture, d'irrigation et de gestion forestière et en tentant de l'évaluer par rapport aux besoins présents et futurs en bois de chauffage et en poteaux dans cette région. Il a recommandé d'importantes améliorations en ce qui concerne la création et l'aménagement des plantations ainsi qu'un vaste essor de

l'irrigation afin de répondre aux besoins futurs qui semblaient énormes à l'époque. Tout comme Saleem (1973, 1975), Bayoumi (1976, 1977) et Ali (1979), il favorisait l'intégration à l'agriculture sur une vaste échelle, par la création de rideaux-abris dont les essais ont été décrits par Khan (1966d).

Le deuxième grand projet de plantation irriguée fut celui de la ceinture verte de Khartoum dans laquelle *E. microtheca* (les mêmes plants dégénérés que ceux utilisés dans la Gézireh), *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *A. mellifera* et *Conocarpus lancifolius* sont quelques-unes des espèces que l'on parvient à bien faire pousser dans cette zone aride grâce à l'irrigation. Au départ, ce projet a été conçu de manière à profiter des effluents d'eaux usées de la ville de Khartoum. Il a été étendu par la suite grâce à l'acheminement de l'eau transportée dans les canaux du réseau d'irrigation de la Gézireh. La préparation du terrain, les plants choisis, les méthodes de plantation, les révolutions et les techniques d'irrigation sont similaires à ceux décrits par le projet de la Gézireh quoique ce dernier, grâce à ses deux sources d'approvisionnement et au revêtement des canaux, a bénéficié d'un apport beaucoup plus régulier et uniforme, sans interruption annuelle. Malheureusement, l'approvisionnement en eau à partir du réseau de la Gézireh a été interrompu pendant plusieurs mois en 1984, entraînant la mort des peuplements irrigués de cette manière.

Dans les années 60, un très grand nombre d'études d'aménagement sylvicole ont été entreprises sur des sujets tels que les essais des essences, la culture en pépinière, le développement des racines, la préparation du terrain, la plantation et les calendriers d'irrigation (Bosshard 1966a, c ; Bosshard et Wunder 1966 ; FAO 1969).

D'autres plantations irriguées, presque toutes limitées à l'espèce *E. microtheca*, sont actuellement créées dans différentes zones d'irrigation agricole dont le sol est semblable à celui de la Gézireh ; l'eau provient du Nil Bleu ou de ses affluents. On a aussi planté 1 000 ha d'arbres à New Halfa, sur l'Atbara (le projet prévoit le boisement de 2 100 ha), 360 ha sur un total prévu de 2 500 ha à Er-Rahad, sur le Rahad, et 450 ha à Khashm el-Girba. La plantation a également commencé dans le cadre des projets de Suki, Kenaf, Sennar Sugar, Guneid Sugar et Kenanan Sugar. Les cinq entreprises sucrières participant à certains de ces projets envisagent d'établir des plantations de canne à sucre couvrant en tout 63 000 ha. Elles ont toutes l'intention d'utiliser l'eau usée produite par les sucreries, en la traitant au besoin pour la purifier, et l'eau d'irrigation résiduaire pour faire pousser des *Eucalyptus* en vue de la production de bois de chauffage et de poteaux. À Rahad, une des entreprises a déjà construit une installation de traitement des eaux usées. Si tous les plans sont réalisés, et surtout si les terres nécessaires sont disponibles, les plantations pourraient couvrir une superficie égale ou supérieure à celle des champs de canne. Le coût en capital de ces aménagements ne serait pas aussi élevé qu'on pourrait le penser parce que la majorité de l'infrastructure nécessaire et du matériel requis pour la construction des canaux est déjà en place.

Les autorités locales chargées de la foresterie ont toujours cherché à étendre et à intensifier la régénération et la croissance des peuplements d'*A. nilotica* situés dans des dépressions le long du Nil et régulièrement inondés à l'époque de la crue. Cela n'arrive plus que rarement aujourd'hui, car plusieurs grands barrages construits sur le Nil Bleu et ses affluents retiennent les eaux de crue. On a toutefois tenu à poursuivre cette activité relativement réduite mais impor-

tante au niveau local en pompant de l'eau du fleuve ou en creusant des puits peu profonds à proximité. La plantation ne se limite pas à *A. nilotica* et l'on trouve beaucoup d'espèces d'*Eucalyptus*.

La province du Nil, au nord du Soudan, renferme plusieurs zones agricoles productives situées sur les bords du fleuve, ce qui permet le recours à l'irrigation. Ces terres, ainsi que les canaux d'irrigation qui les traversent, sont recouvertes de sable éolien provenant du désert avoisinant. On est donc en train de créer des rideaux-abris irrigués afin de les protéger. Ils se sont avérés très utiles pour empêcher l'accumulation de limon aux endroits où ils constituent un véritable obstacle aux vents, tout en améliorant le rendement des cultures et en devenant une importante source de bois de chauffage. Wood (1977) soulignait que l'extension de ces programmes semblait se faire sans analyse économique et planification appropriées, complètes et détaillées ; selon lui, il n'est pas certain que *E. microtheca*, *E. camaldulensis* et *E. tereticornis*, ou la provenance des espèces transplantées, conviennent aux sols légers du Nord, qu'un espacement de 3 m × 2 m est suffisant et que le système d'irrigation (identique à celui de la Gézireh et de la ceinture verte de Khartoum) ne doit pas être modifié en raison des énormes volumes d'eau utilisés, ou même remplacé par un système d'irrigation localisée ou par goutte à goutte.

Le Soudan pourrait accroître notablement sa production agricole et produire d'importantes quantités de bois en établissant soigneusement des réseaux de rideaux-abris et de plantations le long des canaux, dans les régions d'agriculture irriguée. En réduisant par ce moyen la vitesse des vents dans la Gézireh (Salih 1967), on s'est aperçu que l'on pouvait obtenir les mêmes avantages et une réduction de l'évaporation aussi importante que dans d'autres parties du monde. Bayoumi (1976, 1977) a proposé pour la Gézireh la formation d'un réseau de rideaux-abris irrigués composés de trois rangées d'arbres et couvrant l'équivalent de 8 400 ha, soit 1,5 % de la région visée. Bien établis et gérés, ces rideaux d'arbres pourraient sans doute produire 84 000 m³ de bois par année. La réduction de l'évaporation permettrait d'économiser environ 400 000 m³ d'eau par an, ce qui serait suffisant pour irriguer les arbres et 33 600 ha de coton. Dans les zones protégées, le rendement global des cultures serait accru d'au moins 20 %. Si l'on formait des rideaux-abris de cinq rangées d'arbres, 2,5 % de la région serait ainsi aménagée, la production de bois représenterait presque le double de la valeur précédente de 84 000 m³ et les bienfaits pour les cultures et l'environnement seraient sans doute eux aussi accrus. Il est vraisemblable que certains inconvénients, par exemple le fait que des arbres peuvent gêner l'aspersion aérienne des cultures ou abriter des oiseaux nuisibles, pourraient être réduits par le mode de conception des rideaux-abris (entre autres par le choix des espèces) et par la sélection génétique d'espèces cultivées tolérant les oiseaux.

Au cours des trois ou quatre dernières années, des organismes tels que le Programme soudanais pour les énergies renouvelables ont mis sur pied un certain nombre de projets pilotes ayant pour but d'inciter les agriculteurs et les entreprises agricoles, quelle que soit leur taille, à planter des rideaux-abris tout en continuant à pratiquer l'agriculture et l'élevage et à établir des plantations par bouquets irrigués sur les terres non cultivées propices à cette culture.

Dans son analyse prévisionnelle des besoins de combustible et de bois, dont les conclusions générales sont encore largement valables aujourd'hui, Foggie

(1967) insiste sur la nécessité de créer chaque fois que cela est possible des plantations irriguées à haut rendement. Les réalisations importantes qui ont suivi ont permis d'acquérir une vaste expérience et de mieux savoir quelles sont les espèces à utiliser et à essayer, ainsi que les méthodes d'irrigation et autres techniques à mettre en place, à perfectionner ou à éviter. Les travaux d'Ali, de Bosshard et de Khan déjà cités sont très utiles à cet égard. Il existe une multitude d'informations sur les méthodes à suivre pour concevoir et réaliser des projets de plantations techniquement valables après avoir effectué les analyses économiques nécessaires pour déterminer les solutions les plus appropriées. Une donnée importante est l'ensemble des avantages réels présentés par l'intégration de la sylviculture à l'agriculture grâce à la conception de différents types de rideaux-abris. Il semble cependant que plusieurs projets de ce genre réalisés jusqu'à présent, particulièrement ceux établis sur des lopins de terre impropres aux cultures annuelles, ont été entrepris en laissant une trop grande part au hasard. Le rendement de ces plantations serait amélioré si l'on procédait à une analyse et à une planification plus poussées permettant de mieux choisir les emplacements et les types d'aménagement, et de procéder avec plus de rigueur en ce qui concerne le nivellement du terrain, la sélection des espèces, les espacements, les révolutions, l'aménagement des taillis et surtout les volumes et les fréquences d'irrigation.

Kenya

Une plantation forestière, dont la création a été financée par le ministère finlandais pour la Coopération internationale (FINNAID), fait partie du projet d'irrigation de Bura qui vient d'être lancé. Ce projet, mis en œuvre principalement grâce à des fonds de la Banque mondiale, porte sur les terres bordant le Tana, un fleuve s'écoulant dans l'est du Kenya. On se propose d'y établir en trois ans 100 ha de plantations principalement composées de *P. juliflora*, selon un espacement de 1,8 m × 1,8 m pour les plants ou de 1,8 m × 1,9 m pour les graines mises directement en terre, *E. microtheca*, *E. camaldulensis* et d'autres essences secondaires étant placées à 3 m × 1,25 m d'intervalle. La préparation du terrain, y compris le labour en billons, est effectuée mécaniquement. L'irrigation se fait par rigoles à partir de canaux situés à 500 m d'écart. Il est apparu clairement dès le départ que le sarclage était un facteur important à considérer pour l'aménagement et la gestion des plantations : 10 % de toutes les heures de travail effectuées avaient déjà été consacrées à cette activité. On a donc décidé récemment de semer ou de planter *P. juliflora* dans les rigoles et non plus sur les billons de manière à réduire les volumes d'eau utilisés et à ralentir ainsi la croissance des plantes adventices. Des surveillants empêchent le bétail, les chèvres et les animaux sauvages de venir brouter les jeunes plants. La production de bois de chauffage et de petits poteaux devait commencer dès la troisième année (M. Grut et N. Brouard, Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., communications personnelles, 1984).

Mali

Comme le Nil et le Sénégal, le Niger, bordé de part et d'autre d'une étroite bande de végétation, s'écoule de façon permanente dans un paysage soudano-sahélien plus ou moins aride parsemé de quelques massifs d'arbres résistants à croissance lente. La population est fortement concentrée le long du fleuve, attirée par diverses activités productrices telles que la riziculture irriguée et la

pêche. La production de bois est nettement insuffisante pour répondre aux besoins de cette population riveraine ; il sert en effet de combustible domestique, de combustible pour le fumage du poisson, à Mopti par exemple, et de matériau de construction. À certains endroits, les habitants des villages situés au bord du fleuve doivent parcourir jusqu'à 30 km à l'intérieur des terres pour se procurer le bois de chauffage dont ils ont besoin. Cette situation a des conséquences graves pour les écosystèmes de la zone aride.

Chaque année, les précipitations saisonnières débutant vers le mois de juillet provoquent la crue du Niger qui recouvre les secteurs inondables des basses terres, formant ici et là d'étroites bandes longeant le fleuve ou de plus vastes régions dans le delta intérieur. On y pratique essentiellement la riziculture. L'eau du fleuve, en grande partie inutilisée, s'évapore, s'infiltré dans le sol ou se déverse dans la mer. Il existe, à l'intérieur et aux abords des zones cultivées, des terres de forme et de taille différentes, généralement petites, qui ne sont pas mises en valeur. Elles pourraient donc servir à produire le fourrage et le bois si nécessaires à la population ; il faudrait pour cela établir des plantations d'étendue et de conception variées, y compris des rideaux-abris qui protégeraient les cultures et les zones d'habitation des vents chauds et desséchants. Ce type d'aménagement serait réalisable, par exemple, sur une partie des 56 000 ha de terres proches de Ndébougou, que l'on projette de consacrer à l'agriculture irriguée et qui renferment un delta intérieur dont un tiers de la superficie totale est inculte.

Grâce à l'aide technique et financière apportée par le Centre de recherches pour le développement international (CRDI), un organisme canadien, le gouvernement du Mali a chargé le Service forestier, relevant du ministère de la Production, d'entreprendre un programme d'essais échelonné sur cinq ans et visant à déterminer comment établir des plantations forestières dans la région afin de satisfaire à la demande de bois de la population. Les principaux objectifs de ces essais étaient les suivants :

- Sélection des essences et des provenances convenant le mieux aux réalisations envisagées,
- Étude des techniques de plantation les plus efficaces dans les conditions propres à la région,
- Évaluation globale de la rentabilité et de la faisabilité économique de ces plantations avant de recommander des méthodes précises aux propriétaires fonciers.

Les premières difficultés ont surgi en raison du manque d'expérience des forestiers locaux chargés des premiers essais. Il est également apparu clairement que les généreux régimes d'arrosage adoptés au début de la plantation étaient excessifs et même nocifs, eu égard aux fortes fluctuations de la nappe phréatique. Il a donc fallu tester des régimes d'irrigation plus restreints. La méthodologie et les résultats de ces essais sont présentés ici de façon assez détaillée, du fait qu'ils ne sont récapitulés dans aucun rapport, mais paraissent seulement dans les dossiers du projet conservés au Mali et dans les documents du CRDI (CRDI 1981).

Les essais de sélection des essences par éliminations successives consistaient en quatre replications dans chacun des blocs entièrement aléatoires de placettes de 25 arbres. Un des essais portait sur 17 espèces plantées au moment des crues, en août 1976, dans des trous de 30 cm × 20 cm creusés à 2,5 m × 2,5 m d'écart à la surface naturelle des basses terres. Ce large espacement a permis d'effec-

tuer un sarclage mécanique. Lors d'un autre essai, 14 espèces ont été plantées dans des billons s'élevant au-dessus de la surface des plaines d'inondation. Du point de vue statistique, les conditions étaient semblables à celles du premier essai, si ce n'est que l'insuffisance de plants n'a pas permis d'inclure certaines essences dans toutes les placettes expérimentales.

Au bout de cinq années, cinq espèces présentaient un taux de survie et un rythme de croissance supérieurs à ceux de toutes les autres (tableau 1). Les deux premières servaient surtout à la production de poteaux et de bois de chauffage, les deux suivantes convenaient à l'implantation de rideaux-abris et à la production de fourrage, et la dernière procurait du bois de sciage ordinaire.

En octobre 1977, à la fin de la période des crues, on procéda à un troisième essai portant sur dix espèces qui furent plantées sur des basses terres non billonnées. Six essences ont donné des résultats prometteurs (tableau 1). *Eucalyptus camaldulensis*, une espèce résineuse qui pousse à l'état naturel dans les plaines d'inondation d'Australie, a globalement donné les meilleurs résultats dans ces conditions, la croissance annuelle moyenne étant de 2,5 m par année et l'augmentation de diamètre à hauteur d'homme, de 2,5 cm/année.

Comme nous l'avons vu, ces essais ont permis d'évaluer deux méthodes d'irrigation : irrigation par inondation de basses terres non billonnées et apports d'eau plus restreints sur des terres billonnées. En ce qui concerne la première méthode, on a testé trois taux d'arrosage : au départ, les taux adoptés équivalaient à 400 mm, 300 mm et 200 mm de précipitations par mois, mais on a ramené ces chiffres à 100 mm, 75 mm et 50 mm/mois lorsque des sondages ont révélé que la nappe phréatique se trouvait tout au long de l'année entre 0,5 m et 2,0 m de la surface du sol. Le taux de survie des arbres plantés sur les billons a été supérieur, la majorité des espèces plantées sur les terres non billonnées étant mortes au cours de la première année, probablement à cause de la longue période d'inondation.

Il semble que, dans les conditions hydrologiques de l'essai, les arbres n'aient pu développer leur système racinaire en profondeur dans le sol non billonné, surtout lorsque l'irrigation prolongeait la période d'inondation ou élevait le niveau de la nappe phréatique. C'est ainsi que l'on explique le taux élevé de

Tableau 1. Résultats partiels de deux essais d'espèces par éliminations successives, Mali.

Espèces	Survie (%)	Développement moyen en hauteur (m/an)
Deuxième essai		
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	85	2,6
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	36	1,8
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	77	0,7
<i>Dalbergia sissoo</i>	75	1,4
<i>Khaya senegalensis</i>	58	1,3
Troisième essai		
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	65	2,0
<i>Gmelina arborea</i>	100	1,8
<i>Azadirachta indica</i>	82	1,8
<i>Eucalyptus microtheca</i>	82	1,8
<i>Leucaena leucocephala</i>	74	1,7
<i>Khaya senegalensis</i>	73	1,3

mortalité observé lors d'un essai d'espacement entrepris en octobre 1978. Par contre, les arbres plantés sur billons peuvent développer leur système racinaire au-dessus du niveau d'inondation. Toutefois, le billonnage nécessite une main-d'œuvre plus abondante et donc des frais supplémentaires. C'est pourquoi on a effectué au cours de la dernière année du programme un essai sans irrigation ni billonnage, dont les premiers résultats sont encourageants. En 1975, on a établi à proximité de la zone réservée à la réalisation du projet un rideau-abri comprenant trois rangées d'*A. indica* puis, en 1976, d'autres rideaux de quatre rangées d'*E. camaldulensis* et de *C. equisetifolia*. Le taux de survie a été de 80 % pour les deux premières espèces, mais la dernière n'a pas survécu.

Les excellents résultats obtenus dans certaines sections d'expérimentation et l'identification rapide des causes de la plupart des échecs et des réussites grâce à la modification de certains facteurs lors d'essais ultérieurs ont incité les autorités à prolonger la période d'expérimentation afin de faciliter la recherche d'espèces et de provenances mieux adaptées, la mise au point de techniques de plantation efficaces et pratiques et la définition de régimes d'irrigation tenant compte des conditions locales, des périodes de crue et de l'élévation ou de l'abaissement de la nappe phréatique. Au même moment, on a incité les agriculteurs à tester sur leurs propres terres des espèces prometteuses, diverses méthodes d'irrigation et d'autres techniques culturales en mettant à leur disposition des plants de pépinières et en leur offrant l'assistance technique du service de vulgarisation agricole. Ces peuplements doivent permettre de mieux répondre à la demande de bois de chauffage et de poteaux, tout en améliorant l'environnement grâce à l'effet brise-vent des arbres. La population locale observe avec étonnement la croissance des jeunes peuplements les mieux établis. La réussite n'est possible que si l'on comprend bien les facteurs hydrologiques présents dans les régions riveraines comme celle-ci et si l'on choisit les espèces ainsi que les modes et les méthodes de plantation en conséquence (M. Grut, Banque mondiale, Washington, DC, E.-U., communication personnelle, 1984).

Niger

Plusieurs projets pilotes et programmes de recherche sur les plantations irriguées ont été entrepris récemment dans les environs de Niamey, sur le Niger. Ils présentent un grand intérêt et sont particulièrement importants pour ce pays, car la forêt naturelle, dont la production avoisine 0,5 m³/ha/an, n'est pas suffisamment étendue pour répondre de manière satisfaisante à la demande croissante de combustible domestique et d'autre bois de la population urbaine (325 000 habitants); le problème est tel que l'on doit maintenant combattre la désertification du sol.

Le pays s'étend dans une région semi-aride. Le Niger est en crue chaque année en janvier et en février et les basses eaux surviennent en juin-juillet. L'irrigation a presque toujours été limitée aux bassins régulièrement inondés bordant le fleuve, où le sol lourd, à grain fin, se caractérise par une vitesse de percolation lente. Les terrasses alluviales permettraient elles aussi d'avoir recours à l'irrigation, mais la topographie locale est irrégulière et le sol, plus poreux et moins fertile. Les coûts d'aménagement de ces régions sont beaucoup plus élevés que ceux des bassins. Les méthodes d'irrigation mises en place ou susceptibles de l'être dépendent en fait des caractéristiques du sol et de la topographie du terrain.

Jusqu'à présent, l'établissement de plantations irriguées s'est faite de deux manières : dans le cadre d'un programme de recherche lancé par le Centre technique forestier tropical (CTFT) et conduit maintenant par l'Institut national de recherches agronomiques du Niger (INRAN) avec l'aide du CTFT, et aux termes de projets pilotes ou de recherches appliquées en foresterie financés par la Banque mondiale, la Communauté économique européenne (CEE) et le Fonds d'aide et de coopération. Dans le premier cas, les expériences ont principalement été réalisées dans la région des bassins d'inondation et, dans le second cas, sur les terrasses alluviales.

Les premiers essais ont porté sur un nombre limité d'essences plantées en 1965 dans le sol de bassins fluviaux régulièrement inondés de Goudel. La hauteur de la nappe phréatique dans ces sols, différente au départ, varie également en fonction de la saison. Au moment de la coupe, à cinq ans et demi, l'accroissement annuel moyen mesuré à la circonférence extérieure des troncs avait été de 23 m³/ha/an pour *E. camaldulensis* et de 31 m³/ha/an pour *Eucalyptus resinifera*. Le cubage du branchage s'étant accru de 37 % dans les deux cas, l'accroissement annuel total moyen avait été de 31,6 et de 42,6 m³/ha/an.

Des essais d'espèces ont été entrepris en 1974 à Karma (hauteur annuelle moyenne de précipitation de 560 mm et ETP de 2 240 mm) en distribuant 270 mm d'eau d'irrigation d'octobre à mai. Au bout de deux ans et demi, les essences qui s'étaient les mieux développées étaient *E. tereticornis*, *E. camaldulensis* et *D. sissoo*, suivies d'*E. resinifera*, *A. indica* et *A. nilotica* var. *nilotica*. *E. microtheca*, *Eucalyptus alba*, *Eucalyptus deglupta*, *A. lebbek* et *C. equisetifolia* s'étaient beaucoup moins bien adaptés aux conditions locales. On a effectué au même moment un essai sur huit provenances d'*E. camaldulensis*. Cinq ans plus tard, l'accroissement annuel moyen en cubage global allait de 7,8 à 20,0 m³/ha/an.

Lors d'un essai non replicatif portant sur trois taux d'irrigation (soit 0 mm, 270 mm et 460 mm/saison), on a pu observer qu'au bout de trois ans l'accroissement annuel moyen était respectivement de 4,6, 12,1 et 12,9 m³/ha/an, ce qui semble indiquer que les racines des arbres ayant reçu de l'eau d'irrigation avaient atteint la nappe phréatique.

Un essai d'espacement d'*E. camaldulensis* a débuté à Lossa (550 mm de précipitations annuelles et ETP de 1 850 mm) en 1975, en procédant pendant 18 mois à l'irrigation des plants par inondation sous 400 mm d'eau. On s'est aperçu au bout de deux ans que l'accroissement annuel moyen, exprimé en cubage correspondant de bois empilé, était plus faible quand l'espacement était plus grand (tableau 2).

Tableau 2. Production en cubage solide lors d'un essai d'espacement effectué sur des cultures irriguées d'*Eucalyptus camaldulensis*, Lossa, Niger, 1976.

Espacement (m)	Accroissement annuel moyen (m ³ /ha/an)
1 × 1	38
1 × 2	27
1 × 3	24
2 × 2	22
2 × 3	19
3 × 3	16

En 1978, on a également effectué à Lossa, sur les sols légers des terrasses alluviales, trois essais d'irrigation localisée sans arrosage, à l'aide de la technique mise au point par la Société d'exploitation des techniques de l'irrigation (SETI)/Bas-Rhône. Les volumes d'eau distribués, ajoutés aux précipitations survenues, ne représentaient dans aucun cas plus de 32 % de l'ETP. C'est la raison pour laquelle aucune différence notable n'a été observée au bout de trois ans dans la croissance des arbres ayant reçu différentes quantités d'eau. Sur ces trois sols infertiles et poreux, la croissance a été faible et les systèmes racinaires n'ont occupé qu'un volume restreint du sol. En revanche, des arbres plantés en rideaux-abris non loin de là, sur les digues élevées entre les bassins d'irrigation par inondation, se sont beaucoup mieux développés. Ces expériences ont servi à démontrer l'importance du choix de la méthode d'irrigation, puisque dans le second cas le développement racinaire était plus poussé, ainsi que les effets bénéfiques du travail du sol dans les bassins (Barbier 1977, 1978 ; Delwaille 1979 ; Barbier et Louppe 1980 ; Hamel 1985).

Encouragée par les résultats des premiers essais, la Banque mondiale a décidé d'apporter son aide à la réalisation d'un projet de recherche appliquée devant permettre de tester pendant deux ans diverses techniques d'irrigation sur une superficie de 400 ha (ramenée par la suite à 240 ha). Les terres choisies, à 35 km au nord-ouest de Niamey, se trouvent sur la première des basses terrasses fluviales, à quelque 15 m au-dessus du fleuve, entre les basses terres de Namade-Goungou et une chaîne de dunes de sable située à proximité. En raison du relief, de l'instabilité du sol sablonneux, des caractéristiques hydrologiques et des coûts élevés du travail de la terre dans cette région de terrasses ondulées, il n'a pas été possible de mettre en place les réseaux ordinaires d'irrigation par inondation ou par rigoles. On a donc eu recours à deux systèmes de transport de l'eau par gravité dans des tuyaux. Deux zones ont été plantées la première année ; la première, couvrant 100 ha, a été aménagée à l'aide d'un réseau d'irrigation « californien » par gravité transportant l'eau sous faible pression dans d'étroites rigoles en béton et de courts tronçons de tuyaux en polychlorure de vinyle jusqu'aux cuvettes de percolation creusées au pied des arbres. L'autre section, s'étendant sur 35 ha, a été pourvue d'un réseau d'irrigation localisée SETI/Bas-Rhône, ce dernier ayant donné de bons résultats à Lossa, comme nous l'avons vu précédemment. On a également utilisé ce système lorsqu'il s'est agi d'étendre le programme à 105 ha supplémentaires la deuxième année.

Un grand nombre de difficultés ont surgi au cours des premières phases de ce projet. Elles s'expliquent en partie par le manque d'expérience préalable du personnel local dans l'utilisation de matériel spécialisé d'irrigation et autre, par la nécessité d'adapter progressivement les systèmes expérimentaux aux caractéristiques du terrain et du sol de la région, par l'obstruction des filtres et des tuyaux par le sable, et surtout par l'inefficacité ou l'échec des diverses méthodes utilisées pour pomper l'eau du fleuve, toutes ayant dû être rejetées à l'exception de la dernière, qui consistait à ancrer une pompe immergée au substrat rocheux dans le lit du fleuve. On avait au début tenté en vain d'acheminer l'eau jusqu'aux rives à l'aide d'un tuyau souple raccordé à une pompe placée sur un radeau. La croissance des plants a été variable et même parfois médiocre en raison des apports d'eau irréguliers, inégaux et quelquefois excessifs, de l'emploi de graines de mauvaise qualité génétique, du développement médiocre des racines (surtout à proximité immédiate des sources d'eau cana-

lisée) et de la faible teneur du sol en éléments nutritifs. L'accroissement avoisinait 3 m³/ha/an avec le réseau d'irrigation localisée, ce qui était passablement faible. Avec le réseau « californien », la croissance a été deux fois plus rapide. On s'est ainsi rendu compte qu'il était important d'occuper complètement l'ensemble du terrain pour que l'eau déversée soit bien utilisée et que la production soit optimale. Néanmoins, il était encourageant de voir que l'on avait réussi à établir de beaux peuplements d'*E. camaldulensis* atteignant une hauteur de 6 à 8 m au bout de deux ans. La salinité du sol ou de l'eau n'a pas posé de problèmes, sauf dans les régions d'eau saumâtre ; celles-ci sont du reste facilement repérables par la présence de palmiers d'ombrage nains.

Les coûts directs d'établissement et d'exploitation de ces plantations expérimentales ont été bien sûr élevés du fait des procédés empiriques utilisés pour certaines phases des projets et de la superficie réduite occupée par les peuplements. Le réseau d'irrigation localisée a entraîné des coûts de 50 % supérieurs à ceux du système « californien ».

On en a conclu, vu la fiabilité de l'ensemble du système employé, qu'il était possible de parvenir à une production globale moyenne de 10 m³/ha/an. Toutefois, étant donné les prix de vente du bois de chauffage et des poteaux par rapport aux coûts de production et l'urgente nécessité d'affecter le plus de terres possibles à la production agricole, il est apparu que la sylviculture devait être intégrée à l'agriculture irriguée.

En conséquence, les nouveaux aménagements entrepris depuis 1982 ont eu pour but d'intégrer ces deux types de culture dans les bassins d'inondation bordant le fleuve où, comme cela a été mentionné plus haut, les sols sont de nature très différente et où la nappe phréatique peut être atteinte par les racines des arbres, en partie à cause de l'irrigation des cultures agricoles. Les projets pilotes réalisés en 1982-1983 à Sebery, à Kolo et à N'dounga consistaient à établir des brise-vent d'une seule rangée d'*E. camaldulensis* le long des sentiers, des canaux et des fossés. Ces peuplements n'ont pu atteindre un développement optimal en raison du peu d'intérêt que cette activité inhabituelle a suscité chez les agriculteurs.

En 1983-1984, des arbres ont été plantés dans la région de Namade Goungou en procédant à une irrigation localisée suffisamment importante sur des périodes assez longues pour que les racines atteignent la nappe phréatique. On a choisi pour cela des parcelles de terre situées dans les zones agricoles, mais ne pouvant être cultivées en raison de leur topographie ou des propriétés du sol. Les plantations, qui s'étendent sur 16 ha, sont exploitées en accordant une attention particulière à certains aspects tels que la détermination de l'apport d'eau en fonction des caractéristiques de la nappe phréatique et du niveau des précipitations, les dates de plantation, la qualité du matériel de reproduction en pépinière et la provenance des semences. L'espacement varie selon que les peuplements sont purs ou associés à des espèces fourragères annuelles ou vivaces. Parmi les essences le plus souvent sélectionnées, mentionnons *E. camaldulensis*, *Borassus aethiopicum*, *Acacia holosericea* et *Khaya senegalensis*.

Les difficultés attribuables à l'utilisation de parcelles impropres à l'agriculture sont semblables à celles survenues dans le même cas au Soudan et décrites précédemment. De plus, ces plantations ne pourront vraisemblablement pas s'étendre sur plus de 5 % des terres agricoles, ce qui ne permettra guère

à la production totale de bois de satisfaire la demande. On a également souligné l'importance de bien faire comprendre aux agriculteurs intégrant la sylviculture à leurs activités que la réussite n'est possible que s'ils participent activement et constamment à la gestion des plantations. Il est maintenant urgent de poursuivre les recherches axées sur la mise au point de méthodes de gestion adaptées aux bassins d'inondation riverains et aux terrasses alluviales (Hamel 1985 ; J. Gorse, Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., communication personnelle, 1984).

Nigéria

R. Fishwick (Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.) a entrepris dans les années 60 une expérience intéressante, consistant à établir une plantation sur les sables lacustres de la région de Mallam Fattori, à quelque 30 km du lac Tchad, et à irriguer les peuplements pendant la première année (aucune sylviculture n'est possible à l'état naturel dans cette contrée située à l'extrême nord-est du Nigéria). C'est ainsi qu'il a irrigué un essai de diverses provenances de *E. camaldulensis* à l'aide d'arroseurs rotatifs pendant un an, jusqu'à ce que les racines parviennent à la nappe phréatique. Sur les zones les plus planes et les plus basses, la croissance des arbres a été remarquable, surtout pour les provenances « Petford » et « Katherine » ; selon Pryor (1970), une telle croissance n'avait jamais été observée chez les espèces d'*Eucalyptus* : 11 m de hauteur et plus de 10 cm de diamètre à hauteur d'homme au bout de 17 mois. À l'âge de quatre ans, les arbres de la provenance la mieux adaptée présentaient un accroissement annuel moyen de 21,8 m³/ha (Jackson 1976 ; Allan 1977). On ne détient pas de chiffres plus récents sur la croissance de ces peuplements.

Sénégal

Le bassin fluvial du Sénégal comprend le delta (s'étendant sur 140 km en amont de l'embouchure) et les régions de la basse, de la moyenne et de la haute vallée dont les principales villes sont respectivement Podos, Matam et Bakel. Étant donné que le fleuve s'écoule pendant plusieurs centaines de kilomètres sur une pente à peine perceptible, ses eaux de crue inondent chaque année une immense superficie, particulièrement en juillet et octobre. L'ampleur des crues est différente d'une année à l'autre et le niveau d'eau sur la plaine d'inondation varie sensiblement au cours de l'année ; en revanche, lorsque les eaux sont basses, l'océan envahit le lit du fleuve sur une grande distance, ce qui provoque un apport indésirable d'eau salée. Les barrages actuellement en construction régulariseront le cours du fleuve et empêcheront l'eau de mer d'envahir les terres.

La riziculture est une activité importante dans le bassin. On y pratique donc l'irrigation depuis longtemps, sous diverses formes : dans certaines zones agricoles fortement organisées, l'eau submergeant les plants de riz est transportée par canaux jusqu'à des parcelles d'environ 0,7 ha et les agriculteurs exploitent les terres par groupes de 20 à 30 familles ; pour les champs situés plus en hauteur, les habitants de petits villages pompent l'eau servant à l'irrigation, et enfin d'autres champs encore moins bien aménagés sont alimentés par l'eau de crue captée et retenue derrière des vannes automatiques. Dans les parties les plus inondées du bassin, le sol se compose d'alluvions hydromorphes à grain fin, généralement salines et renfermant une certaine quantité de sodium. Jusqu'à présent, on a pu répondre à la demande de bois de chauffage des 600 000 personnes habitant le bassin fluvial et des 800 000 habitants de Dakar,

située à 300 km plus au sud, grâce aux forêts naturelles de la région, mais celles-ci, en raison des coupes trop fréquentes, disparaissent rapidement et ont maintenant un taux de croissance inférieur à 1 m³/ha/an.

Étant donné la forte consommation de bois et les travaux entrepris pour régulariser le cours du fleuve et réduire l'inondation annuelle du bassin, l'Institut sénégalais de la recherche agricole (ISRA) mène depuis 1980 des recherches sur la sylviculture irriguée financées par le FAC. Les résultats et conclusions de ces recherches sont résumés ici à partir d'un document rédigé par Hamel (1985).

Les essais de plantations sans irrigation ont donné des taux de survie insuffisants et variables, démontrant ainsi que la sylviculture non irriguée n'est possible que le long des canaux.

Les essais d'irrigation à l'aide d'arroseurs légers et mobiles ont donné de meilleurs résultats au niveau de la survie mais la croissance était variable. On a conclu que cette méthode pourrait être utile lorsque l'on veut faciliter le développement des racines jusqu'à la nappe phréatique ou associer la sylviculture à l'agriculture ou au pâturage. Toutefois, elle ne convient généralement pas à ces conditions de plantation. L'irrigation par inondation, procédé coûteux à cause des travaux de nivellement précis qu'elle nécessite, peut s'appliquer aux arbres plantés le long des billons séparant les bassins de même qu'aux peuplements denses. L'irrigation localisée (par goutte à goutte ou selon le système SETI/Bas-Rhône) permet de bien contrôler l'apport d'eau quand l'approvisionnement est réduit ou lorsque l'on se trouve en présence de sols poreux. L'irrigation par rigoles, assurant une lente percolation de l'eau dans le sol, est sans doute la méthode convenant le mieux aux conditions locales, car elle est simple à mettre en place, à utiliser et à exploiter. Elle présente toutefois un inconvénient majeur qui réside dans la difficulté d'estimer la quantité d'eau distribuée, mais on peut y pallier dans les sols lourds en traçant des rigoles peu profondes.

Sur les 14 espèces d'*Eucalyptus* plantées, les mieux adaptées semblent actuellement *E. camaldulensis*, *Eucalyptus brassiana*, *E. tereticornis*, *Eucalyptus jenseni* et *Eucalyptus argillacea*. *Eucalyptus microtheca* présente une croissance variable tandis que les autres essences ont un développement lent. On a entrepris en 1984 des essais de provenances sur *E. camaldulensis* et *E. microtheca*. *A. holosericea* est, des sept espèces d'*Acacia* testées, celle qui a poussé le plus rapidement, presque au même rythme en fait que les eucalyptus ; *Acacia radiana*, *A. nilotica* et *P. juliflora* ont eu une croissance plus lente. *Leucaena leucocephala*, dont l'évaluation de quatre provenances se poursuit, paraît bien adaptée aux conditions locales et croît presque aussi rapidement que les meilleures essences d'eucalyptus. Son feuillage est abondant de même que sa régénération naturelle, mais celle-ci peut toutefois laisser craindre que ces arbres ne deviennent une plante adventice. *Parkinsonia aculeata* et *K. senegalensis* sont des essences prometteuses, tout comme *Gmelina arborea* ; au contraire, le potentiel de développement de *Melaleuca* et *A. indica* est faible. Les arbres fruitiers les plus recommandés sont les dattiers, les bananiers, les espèces du genre *Zizyphus*, les grenadilles et les papayers.

Les études menées sur les techniques sylvicoles démontrent l'importance de bien choisir le sol composite des pépinières, d'humidifier les plants et le sol avant la mise en terre et de planter les espèces par temps chaud et humide, c'est-à-dire au moment où arrive la zone de convergence intertropicale.

Certains essais récents ont porté sur l'espacement des arbres, les volumes d'eau et la fréquence d'arrosage, l'emploi d'engrais, le moment de la coupe de rajeunissement et les divers types de rideaux-abris.

L'orientation de l'ensemble des travaux effectués illustre la croyance voulant que, pour être rentable, la sylviculture doit être intégrée à l'agriculture. Cette association des cultures doit se faire dès le départ pour obtenir les meilleurs résultats, l'intégration réalisée postérieurement à la planification et à la réalisation de l'aménagement agricole causant un sérieux handicap (Hamel 1985).

Zimbabwe

Des essais empiriques de culture irriguée portant sur 45 espèces de 13 genres, plantées sur 138 parcelles sans replication, ont été effectués en 1959, 1965 et 1966 dans le bas Veld, caractérisé par des températures moyennes élevées et une pluviosité saisonnière faible et irrégulière. Selon Barrett et Woodvine (1971), qui ont décrit ces essais et résumé les résultats obtenus, la croissance, quoique variable, a été remarquablement rapide dans de nombreux cas.

Les essais ont été réalisés sur deux domaines exploités intensément depuis 1959 pour la production agricole sous irrigation, dans une région située à 425 m d'altitude, à 21° S. et 31° 5' E. Cette dernière se trouve donc dans la zone sylvicole V (Barrett et Mullin 1968) où aucune plantation d'espèces exotiques ne survit sans irrigation. Les sols sont moyennement profonds à peu profonds, bruns ou brun rouge, composés de limons sableux à argilo-sableux dérivés du gneiss et présentant un pH de 5,5 à 7,2. Le niveau des précipitations varie de 250 à 750 mm par année et de courtes périodes de temps nuageux et humide peuvent survenir en n'importe quelle saison. L'évaporation se fait facilement, même pendant les mois les plus chauds, en raison du fort ensoleillement et d'un taux d'humidité modéré à faible.

Par temps chaud, le taux d'évaporation peut être supérieur à 12,5 mm par jour. Le déficit de précipitation est donc élevé, atteignant 1 250 à 1 500 mm. La vitesse des vents est en moyenne de 8 à 11 km/h durant les mois les plus chauds et de 4 à 7 km/h pendant la saison humide. Des températures maximales supérieures à 32 °C surviennent tout au long de l'année et elles dépassent fréquemment 40 °C en été. Elles sont plus fraîches pendant trois mois de l'année, la moyenne des maxima se situant aux environs de 25 °C et la moyenne des minima entre 6-10 °C.

On a sélectionné des emplacements d'essai se rapprochant le plus possible des terres susceptibles d'être boisées dans les zones d'agriculture irriguée. Il s'agissait surtout de bandes de terrain longeant les canaux et de parcelles inculcées disséminées dans les champs irrigués de canne à sucre et d'autres cultures, la majorité de ceux-ci bénéficiant de la présence plus ou moins constante d'eau de suintement souterraine, un ou deux souffrant néanmoins quelque peu de la sécheresse, tout au moins en certaines périodes. Afin de procéder à diverses analyses, on a divisé les emplacements en six catégories selon la nature des effets de l'irrigation. Toutes les parcelles ont été irriguées soit manuellement, soit par inondation, pendant les premiers mois suivant la plantation, après quoi on a laissé la majorité d'entre elles subsister à même l'eau d'infiltration qu'elles pourraient trouver.

La préparation des emplacements s'est faite dans la mesure du possible par labourage et hersage bien que, dans certains cas, on ait creusé des trous pouvant atteindre 60 cm de profondeur et 45 cm de largeur. L'espacement entre les plantes allait de 2 m × 2 m à 2,4 m × 2,4 m. L'irrigation prolongeant considérablement la période propice à la plantation, celle-ci a été effectuée à différentes saisons selon la disponibilité de la main-d'œuvre. Les tubes de polythène que l'on avait utilisés à certains endroits ont été retirés au moment de la mise en terre. Les taux de survie ont été élevés, atteignant souvent 100 %. Dans certaines régions, les arbres n'ont pas survécu à l'arrêt de l'irrigation après la plantation. On a généralement pensé que les termites, que l'on n'a toutefois pas retrouvés dans toutes les parcelles, avaient contribué à ces échecs, sans en être cependant la seule cause. Le sarclage a été effectué de manière intensive.

Dès la plantation, on a soumis les arbres à des évaluations et à des mesures régulières à l'aide de méthodes normalisées. Les paramètres considérés touchaient entre autres la hauteur, le diamètre à hauteur d'homme, la rectitude du tronc, la dominance apicale, le mode de ramification et la présence ou l'absence de floraison. Les résultats présentés, y compris l'accroissement annuel moyen et la superficie basale par unité de surface, sont tirés des mesures effectuées lorsque les arbres étaient âgés de 4 ans et 5 mois à 5 ans et 8 mois (soit de 53 à 68 mois). Les conifères (*Araucaria cunninghamii*, *Pinus elliotii*, *Pinus halepensis*, *P. radiata* et *Pinus taeda*) ont eu un développement décevant à bien des égards. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les *Eucalyptus*, dont un grand nombre d'espèces ont été testées, les plus prometteuses étant *E. camaldulensis*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus punctata*, *E. resinifera* et *E. tereticornis*. À l'âge de 68 mois, l'accroissement annuel moyen pouvait atteindre 65 m³/ha. *Populus deltoides*, *Grevillea robusta*, *Tectona grandis*, *G. arboorea* et *Casuarina cunninghamii* ont procuré des rendements moyens.

On a prélevé une grume de chacune des 16 essences les plus prometteuses afin de procéder à des essais de sciage et d'examiner la densité fondamentale du bois et la longueur des fibres. Chaque grume a ensuite été découpée en planches que l'on a séchées à l'air. Une usine d'allumettes a cherché à déterminer comment les diverses essences réagissaient aux opérations de transformation telles que le déroulage et la production de tiges d'allumettes. Des comparaisons d'ordre général avec le bois provenant de plantations non irriguées ont montré que les méthodes de culture employées permettaient de produire des matériaux pouvant servir à une grande variété d'usages tels que la fabrication de poteaux de transmission ou la production de bois de sciage et de billes de déroulage.

Le compte rendu de ces essais fort intéressants se termine par une analyse économique illustrant l'importance de ces résultats d'un point de vue pratique et les réelles possibilités d'intégration de la sylviculture irriguée dans les grands projets d'irrigation.

Amérique du Nord

États-Unis d'Amérique

On a mené, auprès d'environ 150 sociétés industrielles d'exploitation forestière établies aux États-Unis, une enquête visant à déterminer le degré d'utilisation des techniques intensives de production forestière, dont l'irrigation. Sur les 109 entreprises ayant répondu au questionnaire, aucune n'avait pratiqué l'irri-

gation au cours de la période 1971-1974, bien que 6 % d'entre elles aient signifié leur intention d'avoir recours à ce procédé pendant la décennie à venir. Les prévisions concernant l'augmentation de la production nationale que permettait l'irrigation (l'une des 11 techniques culturales intensives possibles) variaient énormément mais se situaient à 13 % en moyenne (DeBell et al. 1977).

Par ailleurs, on a entrepris deux études sur l'irrigation visant plus particulièrement à déterminer s'il était possible, par l'emploi de techniques d'irrigation au cours de la période de végétation, d'augmenter la taille des *P. deltoides* plantés dans les États du Centre-Nord. Dans la première étude, l'eau était distribuée chaque jour à l'aide d'arroseurs, tandis que dans la seconde, l'apport d'eau se faisait par rigoles, selon les besoins des plantes. La deuxième étude avait également comme objectif secondaire de démontrer si l'irrigation pouvait réellement accroître l'efficacité des insecticides systémiques appliqués sur le sol. Au bout de la première année, les résultats ont prouvé que l'irrigation par aspersion pratiquée à la fin de l'été favorisait le développement des arbres en hauteur et en diamètre. Dans la deuxième étude, où l'on peut supposer que l'apport d'eau était faible, on n'a pas noté d'accélération du développement des arbres ; par contre, l'efficacité des insecticides avait été améliorée (Bélanger et Saucier 1975).

Alverson (1975) a analysé en profondeur l'ensemble des aspects, des choix et des mesures concernant l'emploi des eaux usées (effluents d'eaux usées et autres) pour l'irrigation des forêts de sapins de Douglas et de pruches de l'Ouest situées dans la région nord-ouest du Pacifique, un projet qui intéresse depuis deux ou trois décennies les sociétés forestières et les autorités civiles de la région et d'autres États. Il s'est servi des résultats de recherche publiés par la firme Weyerhaeuser (Woodman 1971, 1973) pour montrer que l'irrigation effectuée dans ce cas au moyen d'arroseurs placés au-dessus du couvert feuillu, pratiquée seule ou combinée à d'autres techniques comme la fertilisation ou la coupe d'éclaircie, ou les deux à la fois, pouvait accroître de façon sensible la production. Il a toutefois souligné l'importance de procéder à certains tests dans le but de s'assurer que les effluents d'eaux usées ne renfermaient pas d'éléments susceptibles d'avoir des effets néfastes sur les espèces cultivées ou les emplacements choisis : effets de la chloration de l'eau, de la demande en oxygène chimique et biochimique, des solides en suspension, de la quantité totale de phosphore, des bactéries, des virus ou des métaux lourds. Par ailleurs, il s'est interrogé sur les réactions du public face à cette pratique et sur les répercussions de celle-ci sur la vocation récréative des zones traitées. Il a aussi fait remarquer que les coûts élevés d'investissement et d'exploitation pourraient faire abandonner le projet. Il faut toutefois tenir compte du fait que la solution de rechange à l'évacuation des eaux usées dans la terre serait le traitement de ces eaux, opération coûteuse nécessitant une haute technologie.

On a effectué des tests, dans la région nord-ouest du Pacifique, pour connaître les effets de l'irrigation, avec ou sans boue résiduaire, sur l'aune d'Orégon et le peuplier de l'Ouest. Les résultats montrent que l'irrigation a augmenté le taux de survie des deux espèces mais que l'apport de boue résiduaire a provoqué une baisse du taux de survie et de l'accroissement en hauteur du peuplier de l'Ouest, et un ralentissement du développement en hauteur de l'aune d'Orégon (De Bell 1975).

Bien que la rareté des textes sur ce sujet indique un manque d'intérêt ou même un désintéressement total à l'égard de la sylviculture dans les vastes régions agricoles irriguées de la Californie, de l'Arizona et de la vallée du Colorado, il convient cependant de noter que la salinité est très répandue et cause de graves problèmes. Il faudrait pour y remédier installer des réseaux de drainage et de lessivage à l'eau douce (Eckholm 1975 ; Pillsbury 1981).

Amérique du Sud et Amérique centrale

Comme en Amérique du Nord, il semble que peu d'informations soient publiées sur les projets de plantations irriguées, même si cette technique est fort répandue dans certaines régions et si l'on cultive dans plusieurs pays des *Eucalyptus*, *Populus* et *Salix* pour former des rideaux-abris protégeant les terres agricoles irriguées.

En Argentine, la culture du peuplier et du saule se pratique surtout dans le delta du Panama, où quelque 100 000 ha sont consacrés à ces essences, de même que dans les secteurs agricoles comme Mendoza et Rio Negro, où elle s'intègre à l'agriculture de diverses façons (FAO 1979b). On rapporte que dans la région de Rio del Plata, on cultive ces mêmes espèces sur une superficie irriguée d'environ 300 000 ha. On emploie notamment des clones de *P. deltoides* et de *P. × euramericana*, y compris nombre d'essences choisies à partir d'améliorations génétiques d'Europe. Les rendements obtenus dans les meilleurs emplacements sont de l'ordre de 18-34 m³/ha par année à l'âge de 16 ans, et sur les terrains moins favorables, de 10-22 m³/ha par année (Carretero 1972).

Au Pérou, aux termes d'un projet financé par l'Agence américaine pour le développement international (USAID), on gère avec succès des plantations irriguées de *Prosopis* sur plus de 1 000 ha de dunes de sables mouvants, situés dans la région désertique proche de Piura, sur la côte nord-ouest. L'irrigation se fait à l'aide de 300 mm d'eau de fonte glaciaire par an, ce qui contraste fortement avec les 1 000 à 4 000 mm d'eau nécessaires à l'agriculture dans la région. On obtient notamment du bois de chauffage et six à sept tonnes par an de fourrage hautement protéiné pour le bétail (USDASF 1980). *Eucalyptus globulus* est l'une des principales ressources économiques des agriculteurs de la vallée du Mantaro, où les plantations remontent au 19^e siècle. À présent, les rangées d'arbres entourant les champs occupent quelque 8 000 ha, dont un grand nombre sont irrigués (Bohorquez Rejas 1972).

En Uruguay, on retrouve 3 000 ha de plantations composées en majeure partie de *P. deltoides*, mais comprenant également des hybrides de *P. × euramericana* et des saules (FAO 1979).

Un tiers des terres irriguées de la côte péruvienne connaissent des problèmes de saturation en eau et de salinité ; en Argentine, 20 % à 30 % des terres agricoles irriguées en Patagonie sont salines. La situation est également grave dans les régions de culture des peupliers situées en bordure du fleuve Colorado, dans la province de La Pampa. Au nord-est du Brésil, plus de la moitié du territoire irrigué souffre de saturation en eau et de salinité. Au nord-ouest du Mexique, de grands dispositifs d'irrigation connaissent des difficultés en raison d'un drainage insuffisant et d'un apport d'eau trop faible, dû à la volonté d'étendre l'irrigation sans augmenter les volumes distribués ; 80 % des terres du delta du fleuve Colorado sont touchées (Giunchi 1972 ; Eckholm 1975).

Australie

On a entrepris au nord de l'État de Victoria, qui bénéficie d'un climat chaud, des essais d'évacuation dans le sol d'effluents d'eaux usées municipaux ou provenant de fabriques de pâte à papier et d'établissements vinicoles afin de pouvoir comparer les résultats à ceux obtenus lorsqu'on utilise l'eau du fleuve. On a aménagé en 1972, 1973 et 1976 quatre emplacements offrant un éventail de sols allant du limon sableux profond à l'argile très lourde. On a inondé des terres et construit des digues de retenue en respectant les méthodes locales d'irrigation des pâturages. Au cours du premier essai, on a planté treize espèces d'*Eucalyptus*, *C. cunninghamiana*, deux peupliers et *Salix vitellina* dans trois types de sols, en utilisant l'eau d'irrigation normale. Six espèces ont donné régulièrement d'excellents résultats en ce qui concerne la survie et le développement en hauteur et cela, quelle que soit la nature de l'eau d'irrigation et, avec certains écarts, sur tout l'éventail des sols où a eu lieu l'essai. Il s'agit de *E. camaldulensis*, *Eucalyptus botryoides*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus globulus*, *E. grandis* et *C. cunninghamiana*. On a ensuite utilisé ces résultats pour sélectionner les espèces devant faire l'objet d'une série de nouveaux essais menés dans différentes régions de l'État et destinés à évaluer la survie, le développement en hauteur, la forme de l'arbre et la qualité du bois produit. Ces nouveaux essais avaient pour but de vérifier les effets des effluents (de quantité et qualité variables) sur les caractéristique des sols et la croissance des arbres, de même que le comportement des constituants des effluents.

Les plus récents essais comprenaient une expérience d'irrigation à l'aide d'effluents de fabriques de pâte à papier sur les *P. radiata* âgés de 16 ans, ainsi que des tests portant sur une série de provenances de *E. camaldulensis* (13 provenances), *E. globulus* sous-espèce *globulus* (10), *E. saligna* (3) et *E. grandis* (5). Très tôt, les écarts enregistrés entre les provenances ont surpassé les écarts entre les espèces.

Pour tous ces essais, on a préparé le terrain en procédant à un labour profond et à un scarifiage le long des lignes de plantation quand le sol avait une mauvaise structure ou renfermait des horizons gênant le drainage ou l'enracinement. Ensuite, on a travaillé la terre à l'aide d'un pulvérisateur pendant plusieurs semaines afin de réduire la végétation adventice avant la plantation. Au besoin, on a appliqué des herbicides puissants comme le Glyphosate² ou le Propazine (auxquels les espèces d'*Eucalyptus* sont sensibles) bien avant la plantation. Au moment de la plantation, on a épandu des engrais azotés, phosphatés et potassiques à raison de 40 g par arbre afin d'aider à combattre la pousse précoce des mauvaises herbes. L'espacement de 3 m × 1,5 m permettait de procéder mécaniquement au sarclage, qui a dû être répété six fois dans certains cas au cours de l'année suivant la plantation (Edgar et Stewart 1979).

On a procédé près de Canberra à un essai d'irrigation dans une plantation de *P. radiata* âgés de 15 ans et soumis aux contraintes liées aux faibles précipitations estivales caractéristiques du climat local. Après 11 ans d'irrigation, on a analysé les arbres alors âgés de 26 ans afin de déterminer leur accroissement en diamètre et d'analyser les caractéristiques du bois. L'irrigation a accéléré l'accroissement en diamètre et fait augmenter la densité maximale du bois, bien

² L'appellation commerciale n'est donnée qu'à titre d'information et ne signifie aucunement que le produit est recommandé.

que la densité globale ait été peu modifiée. Le chapitre 6 traite en détail des modifications subies par la structure du bois. Ces résultats ont confirmé la tendance à l'accélération de l'accroissement en diamètre et à l'augmentation de la proportion de cellules à parois épaisses associées à la croissance estivale et automnale, tendance déjà mise en relief lors d'un essai semblable réalisé près d'Adelaïde, en Australie du Sud (Nichols et Waring 1977).

Conclusion

Actuellement, l'irrigation sert surtout à améliorer la production des cultures annuelles et des cultures fruitières pérennes. Par contre, la sylviculture destinée à la production de bois occupe une très faible proportion des terres irriguées ; même dans la vallée de l'Indus au Pakistan, où les plantations forestières irriguées ont suscité beaucoup d'intérêt, elles ne représentent au maximum que 1,5 % de la superficie totale irriguée.

On estime à environ 200 millions d'hectares la superficie totale à l'échelle de la planète des terres irriguées consacrées aux divers types de cultures. Cela représente 40 % de la surface potentiellement irrigable. De nombreux facteurs expliquent ce faible pourcentage : la rareté de l'eau, le coût élevé des installations d'alimentation en eau d'irrigation, les lourds investissements nécessités par l'aménagement des systèmes eux-mêmes, y compris les réseaux de drainage indispensables pour assurer à long terme la productivité des terres.

Plusieurs milliers d'années de pratique de l'irrigation par les civilisations anciennes ont bien montré les problèmes pouvant découler d'un mauvais contrôle des apports d'eau : destruction des systèmes de production par le phénomène maintenant connu d'infiltration verticale et latérale, élévation de la nappe phréatique, salinisation des sols et enfin, baisse du rendement et perte totale des récoltes. De tels phénomènes ont fait disparaître des civilisations entières. Plusieurs centaines ou milliers d'années plus tard, certaines de ces terres demeurent encore incultes. Le coût de la remise en exploitation est élevé. Dans de nombreux cas, on peut éviter les risques ci-dessus en exerçant un contrôle réel et une bonne coordination à tous les niveaux des organismes gouvernementaux responsables, en passant par tous les paliers d'exécution, jusqu'aux simples agriculteurs et travailleurs forestiers qui ouvrent et ferment les vannes d'alimentation. Lorsque le réseau fluvial s'étend sur plusieurs pays, le contrôle et la coordination doivent être également assurés au niveau international si l'on veut éviter les catastrophes survenues par le passé.

En étudiant les programmes de plantations forestières irriguées élaborés par nombre de pays, on constate clairement que ceux-ci demandent un haut niveau de professionnalisme et de savoir-faire en matière de planification, de conception, de mise en œuvre, de gestion et d'organisation. Trop souvent, malheureusement, ces gages de succès font défaut. Face à ces besoins, de même qu'aux facteurs physiques, chimiques et biologiques complexes et souvent délicats intervenant à long terme, il est essentiel que le personnel en cause à tous les niveaux reçoive une formation appropriée, travaille avec des directives claires au sein d'organisations bien conçues et établies et possède les ressources physiques et le temps nécessaires au bon accomplissement de son travail. Enfin, chaque agriculteur doit recevoir des conseils techniques dans le cadre de programmes de vulgarisation appropriés.

Les projets de plantations forestières irriguées sont séduisants pour les régions à climat chaud et sec, car ils font miroiter de hauts taux de croissance. Cela est d'autant plus vrai dans les zones arides où les arbres, particulièrement s'ils représentent la principale source de bois de charpente, de bois de chauffage domestique et de fourrage, sont rares et où le prix de ces produits est élevé. L'arboriculture est fréquemment, et logiquement, intégrée à l'agriculture irriguée. Dans ces conditions, ces cultures peuvent être très profitables, même sans tenir compte de leurs effets positifs sur l'environnement. Il faudrait beaucoup plus de grands projets de ce genre, par exemple l'implantation de rideaux-abris destinés à améliorer les rendements agricoles et l'environnement en général tout en produisant des quantités appréciables de bois et autres produits forestiers.

On en est de plus en plus venu à considérer la production de bois à partir de plantations uniformes irriguées comme irréalisable, surtout sur le plan économique, mais souvent aussi d'un point de vue sociologique. On cherche donc principalement à intégrer de diverses façons l'arboriculture aux projets agricoles. Ce type d'intégration prend souvent la forme de plantations réalisées sur des lopins de terre relativement petits et impropres à l'agriculture, ou le long de routes et de canaux. Bien que ce type d'aménagement soit logique, il faut bien reconnaître que si les emplacements ne conviennent pas à l'agriculture, ils ne conviennent guère mieux à la sylviculture, ce qui explique que les rendements obtenus ne soient pas toujours optimaux. Par ailleurs, dans les régions où le bois est rare, des entreprises aussi limitées ne peuvent à elles seules répondre aux besoins. Il peut alors être économiquement rentable de réaliser des plantations par bouquets sur de grandes superficies, lorsque l'on dispose d'une alimentation sûre en eaux usées industrielles, municipales ou autres.

Il est clair que la réussite d'un programme d'irrigation repose sur une planification, des recherches et des analyses détaillées portant sur tous les éléments et facteurs déterminants, ainsi que sur une conception technique solide précédant la réalisation à grande échelle. En cas de doute sur le choix des espèces, des méthodes et des régimes d'irrigation, il convient de procéder à des essais sur le terrain et à des expériences pilotes à petite échelle. Enfin, il importe de ne pas négliger les aspects sociologiques et de mettre en place des structures et des règles d'organisation et de gestion efficaces.

4. Quelques principes fondamentaux

Sur les terres irriguées, la croissance des plantes est soumise à un ensemble complexe de facteurs et de processus physiques, chimiques et biologiques interreliés, eux-mêmes plus ou moins influencés par les différents aspects conceptuels et opérationnels des systèmes d'irrigation adoptés. S'il est vrai que nombre de ces facteurs et de ces processus interviennent davantage au cours de la phase de recherche et de développement que pendant la mise en œuvre du projet et de l'exploitation ultérieure, il est essentiel que l'irrigant ne les perde pas de vue, sous peine de déroger à d'importants principes de base. Ils seront donc brièvement examinés ci-après du point de vue des relations entre les plantes, le sol et l'eau atmosphérique. Enfin, on traitera de l'irrigation en fonction des propriétés du sol, de la topographie et des divers éléments hydrologiques.

Les relations entre les plantes, le sol et l'eau atmosphérique

Doneen (1972) a défini l'irrigation et sa gestion, ainsi que la manipulation des relations existant entre les plantes, le sol et l'eau. La nature de cette interdépendance et des influences atmosphériques ainsi que les processus mis en cause ont fait l'objet d'un grand nombre d'études scientifiques, dont la majorité ont été résumées par Fuchs (1973a-c), Gairon (1973), Gairon et Hadas (1973), Hadas (1973a, b), Plaut et Moreshet (1973), et dont se sont inspirés Ayers et Westcott (1976) pour établir les règles relatives à l'évaluation de l'eau.

L'eau du sol est soumise à un ensemble de forces mécaniques et moléculaires liées à la gravité, à la présence de solutés et aux interactions existant entre cette eau et les parois des cavités dans lesquelles elle circule. Ce sont ces forces qui font que l'eau est absorbée, retenue, transportée à l'intérieur même du sol, drainée, puisée par les plantes, rejetée par transpiration ou perdue par évaporation.

L'eau peut s'infiltrer de trois façons dans un profil pédologique : de haut en bas, après une inondation, une aspersion ou une pluie, de bas en haut, en provenance d'une nappe phréatique, ou horizontalement. Ces déplacements sont influencés par la texture et la structure du sol. Lorsque l'apport d'eau dépasse la capacité d'infiltration, l'excédent s'accumule et peut par la suite se libérer par ruissellement ou en provoquant une inondation. C'est en mesurant le volume d'eau retenu par le sol après évacuation de cet excédent que l'on obtient ce qu'on appelle la valeur au champ, généralement atteinte deux à cinq jours après la fin de l'irrigation.

La texture et la structure d'un sol influent également sur l'infiltration et

Tableau 3. Données générales sur la capacité de rétention de l'eau et la vitesse d'absorption en fonction du type de sol.

Type de sol	Capacité de rétention de l'eau ^a	Vitesse d'absorption (cm/heure)
Sablonneux	2,5	3,8-7,5
Limoneux	5-6,5	0,8-2,5
Argileux	4-6	0,3-0,8

Source : Thomas et al. (1981)

^aCentimètres d'eau par 30 centimètres d'épaisseur de sol.

la capacité de rétention de l'eau. On retrouve au tableau 3 les données générales concernant cette capacité de rétention et la vitesse d'absorption de l'eau.

Lorsque l'eau du sol se dissipe par évapotranspiration, il arrive un moment où la plante commence à se flétrir. On désigne par point de premier flétrissement la teneur en eau du sol à laquelle seules les anciennes feuilles ont subi un flétrissement définitif, les jeunes feuilles pouvant retrouver leur vigueur. Si la plante entière se flétrit de façon irréversible, on parle de point de flétrissement permanent.

Le volume d'eau absorbé par la plante dépend des caractéristiques et des qualités dynamiques de l'eau dans le sol, de la quantité d'eau dans la plante ainsi que de la nature, de la portée et de l'efficacité de son système racinaire. Par ailleurs, un certain nombre de facteurs susceptibles d'être améliorés par la pratique culturale interviennent dans le développement des racines : la densité et le compactage du sol, la quantité d'eau et d'oxygène présente dans le sol ainsi que la quantité d'azote, de phosphore et de potassium disponible.

On considère que la force assurant le transfert de l'eau du sol aux cellules racinaires est le gradient de potentiel entre l'eau du sol et l'eau à la surface des racines. En se dirigeant vers une racine, l'eau se déplace le long d'un gradient de potentiel dégressif. Pour compenser les pertes d'eau par évaporation dans l'atmosphère, processus déclenché dans les cellules parenchymateuses des feuilles et mettant également en cause la stomate et la cuticule, la plante absorbe de l'eau en phase liquide afin de maintenir ses tissus en état de saturation.

Thorntwaite et Hare (1955) ont expliqué l'évapotranspiration par le même principe dynamique que l'évaporation. Ils ont montré comment il était possible, à partir de ces concepts et de la notion d'évaporation potentielle, de prévoir le degré d'humidité d'un sol ainsi que les valeurs de l'excédent ou de la carence hydrique en se basant uniquement sur les données climatiques. Lorsque le degré d'humidité du sol correspond à la capacité au champ, l'évapotranspiration réelle est identique à l'évapotranspiration potentielle et toutes les précipitations supérieures à l'ETP constituent un excédent d'eau. Par contre, si les précipitations sont inférieures à l'ETP, l'écart est comblé par l'eau stockée dans le sol, la quantité ainsi puisée correspondant à la carence hydrique du sol.

Irrigation et propriétés du sol

Le sol est un système complexe comportant une phase liquide, une phase gazeuse assurant le processus essentiel de l'aération, une phase solide, composée de fragments minéraux et une faible phase organique biologiquement importante.

Les proportions relatives de sable, de limon et d'argile déterminent la texture du sol, laquelle influence fortement le degré d'infiltration et la capacité de rétention de l'eau, deux éléments servant à établir la fréquence de l'irrigation et les quantités d'eau à employer. Quant à la structure du sol, elle se définit selon le mode d'agencement et de réunion des particules en agrégats. Elle joue un rôle prépondérant dans la perméabilité, la capacité de rétention de l'eau et de l'air ainsi que la pénétration des racines. Pour l'irrigation, on préfère les sols à structure granuleuse ou grenue. Celle-ci peut d'ailleurs se détériorer suite au compactage du sol, à une culture à l'état humide ou à une culture trop intensive. Cette détérioration est due à une accumulation des sels de sodium qui cassent ou dispersent les agrégats argileux, abaissant ainsi le taux d'infiltration et rendant le sol pratiquement imperméable (Ali 1960 ; Doneen 1972 ; Yaron et Vink 1973).

Les particules chimiques du sol, dans l'optique de l'irrigation, ont été étudiées par Bresler (1973), Kalkafi (1973), Meiri et Levy (1973), Shainberg (1973) et Yaron et Shainberg (1973). Elles mettent en évidence les relations dynamiques existant entre les ions échangeables présents dans les solutions colloïdales. Par exemple, une irrigation pratiquée avec de l'eau de mauvaise qualité peut perturber cet équilibre et avoir par conséquent des répercussions néfastes sur les propriétés chimiques du sol. C'est ainsi qu'un apport d'eau salée peut amener le remplacement du calcium et du magnésium (principaux cations généralement présents) par le sodium. La structure du sol se modifie, les agrégats se cassent, d'où une réduction de l'infiltration et de la perméabilité.

Les sels solubles dans l'eau se déplacent, par diffusion, des points de forte concentration aux zones de moindre concentration. On dit que les ions dissous, transportés par l'eau, subissent un mouvement de convection dont la vitesse est déterminée par la répartition des pores de tailles et de formes différentes. Les variations de la teneur en eau du sol, résultant des phénomènes d'infiltration, de redistribution, d'évaporation et de transpiration, sont responsables du mouvement simultané de l'eau et des solutés. La quantité des éléments nutritifs susceptibles d'être absorbés par la plante fluctue selon la capacité d'échange du sol et les déplacements des solutés.

L'azote du sol est continuellement absorbé et rejeté par les organismes enfouis et les plantes. On retrouve surtout l'azote ammoniacal sous forme d'ions échangeables présents sur les formations argileuses et les matières organiques. Tout l'azote existant sous forme de nitrate, qui circule facilement dans le sol, est assimilable par les plantes.

Le potassium dans le sol se retrouve sous forme fixe dans les feldspaths, les micas et les minéraux argileux, sous forme échangeable sur les minéraux argileux, et sous forme dissoute dans les solutions circulant dans le sol. Sous ces deux dernières formes, il est facilement assimilable par les plantes. Le potassium tend à rester derrière la ligne d'apport d'eau dans le sol : sa pénétration est limitée à quelques centimètres par an.

On observe surtout le phosphore sous forme solide dans le phosphate de calcium légèrement soluble, ou encore absorbé sur les particules argileuses. En raison de leur faible mobilité, la plupart des phosphates ajoutés se retrouvent dans les couches supérieures du sol.

Lorsqu'on augmente la quantité d'un élément nutritif donné, la réaction

de la plante est linéaire à condition que cet élément soit le seul à manquer et à limiter le rendement. Si l'on évalue la production dans l'optique de la fertilisation par irrigation, il importe d'employer comme paramètre la production totale de matière sèche. En effet, pour une quantité d'eau d'irrigation donnée, la fertilisation peut multiplier par trois le taux de transpiration.

Irrigation et topographie

La topographie revêt une grande importance pour ce qui est du choix de la méthode d'irrigation, de la conception du projet, du fonctionnement du système et des coûts qui s'y rattachent. Elle intervient dans les processus hydrologiques comme le ruissellement, l'infiltration, la sédimentation et le drainage. Par le fait même, elle joue un rôle dans la pédogenèse en influant sur la répartition des matières transportées par l'eau, le mouvement des solutés et l'illuviation des matières argileuses. Il est toutefois impossible d'établir le cours des eaux souterraines uniquement à partir des éléments topographiques visibles, car il peut y avoir sous les sédiments des formations entravant considérablement le drainage souterrain, en particulier dans les plaines d'inondation.

La topographie constitue, par sa relation avec la force de gravité, un élément fondamental de l'irrigation, en particulier dans les réseaux d'irrigation par gravité où la distribution de l'eau est contrôlée par le relief lui-même et non par des moyens mécaniques. La conception de tels réseaux doit donc tenir compte de la topographie et des caractéristiques du sol. C'est pourquoi, plus la texture du sol est fine, plus le gradient de la pente sur laquelle l'eau peut couler sans risque d'érosion de la surface est accentué ; plus la pente est faible et le sol fin, plus la rigole peut être longue sans qu'il y ait d'infiltration excessive dans la zone d'apport d'eau (Kramer 1949 ; Rawitz 1973b).

Le nivellement du sol, qui est une opération coûteuse, ne peut entièrement modifier la pente naturelle du terrain (Doneen 1972 ; Rawitz 1973b). On a déjà parlé, au chapitre 3, des difficultés auxquelles s'est heurté le programme d'irrigation des plantations en terrain accidenté, situées sur les terrasses du Niger. On avait voulu éviter les dépenses coûteuses associées à la modification du relief en installant les canaux ou les canalisations près ou le long des courbes de niveau. Il s'ensuivit une perte importante de terre à l'intérieur de la zone de plantation. Dans ces conditions, l'irrigation goutte à goutte a donné de meilleurs résultats, car ce type de réseau peut, jusqu'à un certain point, être installé en terrain accidenté.

Incidences hydrologiques de l'irrigation

La pratique de l'irrigation dans une région, en particulier dans un milieu aride, amène d'importantes modifications du cycle hydrique. L'apport d'eau n'est plus uniquement limité aux précipitations occasionnelles, dont une grande partie disparaît généralement par évaporation pour ne laisser que peu ou pas d'eau en vue du renouvellement des eaux souterraines. L'eau d'irrigation, plus ou moins adaptée aux besoins des cultures, renferme des sédiments et des substances chimiques issus de sa propre source ou des zones qu'elle a traversées.

Si, dans une région donnée, l'excédent d'eau d'infiltration ou de crue ne peut être évacué, la nappe phréatique s'élève et risque d'entraîner une satu-

ration en eau et une remontée des sels dissous dans les horizons supérieurs du sol. On assiste alors à une baisse de rendement des cultures, due soit à un manque d'aération, soit à une accumulation de sels, ou aux deux facteurs conjugués. C'est en fait ce qui est survenu dans les vallées du Tigre et de l'Euphrate et, plus récemment, dans la plaine de l'Indus (voir le chapitre 3). Il importe donc de ne pas irriguer au-delà des besoins spécifiques des cultures et des besoins périodiques de lessivage du sol. L'excédent d'eau occasionnel, pouvant provenir entre autres des précipitations et du lessivage, doit être évacué au moyen de drains superficiels ou souterrains, assistés de pompes le cas échéant. Il convient parfois de traiter l'eau d'irrigation afin d'en réduire la teneur en sel.

Comme on l'a vu au chapitre 3 en étudiant la situation des pays de l'Asie du Sud, du Moyen-Orient et de la zone méditerranéenne, l'eau salée peut convenir à l'irrigation. Il faut dans ce cas, comme les Tunisiens le savent, garder l'horizon racinaire humide afin d'empêcher l'accumulation des sels et de favoriser leur lessivage vers le pourtour ou complètement en dehors de cette zone lorsque les précipitations apportent une quantité suffisante d'eau propre à cette fin. Il ne faut jamais laisser l'eau souterraine s'accumuler dans le sol.

L'irrigation impose des conditions et des processus artificiels au milieu. Il faut donc enrayer les effets néfastes de cette intervention en prenant des mesures très précises, dont le drainage fait souvent partie. À cet effet, il est essentiel de prévoir des installations dès le début, faute de quoi le projet risque d'échouer ou l'on risque d'avoir à prendre des mesures d'assainissement très coûteuses pour remettre les terres en état.

5. Les systèmes d'irrigation

Tout système d'irrigation a pour fonction d'amener de l'eau depuis une source jusqu'à la zone à arroser pour baigner le système racinaire des plantes cultivées. Un système d'irrigation correctement conçu et exploité doit assurer une rentabilité économique maximale et soutenue ; il doit permettre de réduire au minimum les pertes d'eau lors de l'amenée et de la distribution ; et il doit veiller à maintenir la production en empêchant l'érosion, la dégradation de la structure du sol, la salinisation et l'élévation de la nappe phréatique. Or, ces trois exigences dépendent du jeu de nombreux facteurs différents : il n'y a donc pas de systèmes tout faits qui s'appliquent à toutes les situations possibles. Dans chaque cas, il faut concevoir un nouveau système ou adapter un système existant en fonction des facteurs pertinents : l'étendue et la nature de la source d'eau ; la qualité de l'eau ; la profondeur et la qualité de l'eau souterraine ; les coûts de matériel ; les conditions du terrain, sa préparation et la main-d'œuvre ; et la disponibilité et la compétence des ressources humaines. Les principales méthodes de distribution sont l'irrigation par gravité, l'irrigation par aspersion, les systèmes localisés et certains systèmes spéciaux. Il existe aussi d'autres classements possibles des systèmes d'irrigation, comme ceux de Booher (1974) et de Vermeiren et Jobling (1980), qui n'en reconnaissent que deux.

Le premier type regroupe les systèmes qui mouillent toute la surface du sol dans le terrain à irriguer, quelle que soit la façon dont les cultures sont organisées. Ces systèmes se divisent en deux groupes : les systèmes souterrains qui régularisent le niveau de la nappe phréatique et les systèmes qui amènent l'eau à la surface du sol soit par l'effet de la gravité, comme dans l'irrigation par inondation ou par calants, soit dans des tuyaux sous pression placés à une certaine hauteur au-dessus du sol, comme dans l'arrosage par aspersion.

Le deuxième type regroupe les systèmes qui ne mouillent qu'une partie du sol. Il comprend les systèmes souterrains avec des tuyaux à faible débit (irrigation souterraine) et les systèmes d'irrigation en surface soit par gravité (irrigation par cuvettes ou par rigoles), soit par des tuyaux sous pression placés à une certaine hauteur au-dessus du sol.

Dans ce chapitre, nous passerons rapidement en revue les différentes méthodes d'irrigation pour l'aménagement de plantations forestières. Le classement n'est employé ici que pour des raisons de commodité.

Irrigation par gravité

Dans les systèmes d'irrigation par gravité (voir, en particulier, Bosshard 1966a ; France 1969, 1977 ; Rawitz 1973b ; Booher 1974), la distribution de l'eau est gouvernée, en dernière analyse, par la terre elle-même, plutôt que par des



Irrigation par rigoles d'Eucalyptus récemment plantés sur les berges de rigoles, près de Dongola, au Soudan.

appareils mécaniques. Le degré auquel il est possible de modifier la surface du terrain est régi par des facteurs physiques et économiques, y compris les conséquences d'une altération du sol.

Les systèmes d'irrigation en surface se caractérisent par la manière dont la surface du sol permet l'écoulement de l'eau d'irrigation. Il existe quatre types : l'inondation incontrôlée, l'irrigation par calants, l'irrigation par cuvettes et l'irrigation par rigoles.

L'inondation incontrôlée est la moins efficace des méthodes et donc la moins répandue. On l'emploie surtout pour les pâturages vivaces et les cultures de foin qui protègent le sol contre l'érosion. L'eau est déversée à des intervalles réguliers (de 2 à 3 m) à partir d'un fossé d'alimentation nivelé le long du côté supérieur du terrain et elle s'écoule par ruissellement le long de la pente. Un minimum de nivellement est nécessaire ; une fois mis en place, le système ne nécessite qu'une main-d'œuvre minimale pour son exploitation. Il ne s'applique pas aux plantations sylvicoles, car l'efficacité de la distribution de l'eau est faible.

Dans la méthode d'arrosage par calants (ou à la planche), des billons ou bourrelets de terre parallèles guident la lame d'eau qui s'écoule le long de la pente sur des planches de terre dont la largeur varie de 3 à 30 m et dont la longueur peut dépasser les 100 m. La quantité d'eau déversée doit être relativement grande et la pente du terrain, uniforme et parallèle aux billons. Cette méthode, qui exige une préparation minutieuse du terrain pour assurer la stabilité du sol, s'applique surtout à des sols profonds et perméables, à texture moyenne. En effet, cette méthode s'avère peu pratique sur les sols sablonneux, car l'infiltration y serait excessive à moins d'avoir des plantes (ou calants) très courtes, et sur les sols peu poreux, car l'infiltration y serait par contre trop lente.

Il est nécessaire d'aménager un fossé de drainage sur le petit côté inférieur de la planche pour évacuer l'excédent d'eau. Lors de la conception de ce type de système, il faut songer à assurer un équilibre optimal entre le type de sol, la pente, la largeur et la longueur des planches et l'écoulement d'eau pour que l'eau se distribue de façon uniforme et à la profondeur souhaitée sur la planche, sans qu'il y ait de percolation excessive près du fossé d'amenée. Cette méthode semble parfaitement adaptée aux utilisations agroforestières, car elle permet de planter une ou deux rangées d'arbres sur le billon, selon la largeur de celui-ci.

La méthode d'irrigation par cuvettes est simple et facile à contrôler. On divise le champ ou la parcelle en petites unités, la surface de chacune étant nivelée. Une fois les cuvettes remplies, l'eau s'infiltré dans le sol puis l'excédent est évacué. Lors du lessivage des sels du sol, il est possible de maintenir la profondeur de l'eau pendant de longues périodes en assurant un écoulement continu dans les cuvettes. Cette méthode sert souvent pour le lessivage, par exemple dans les plantations forestières sur les terrains salins de la vallée de l'Indus, où les cuvettes sont carrées et mesurent jusqu'à 0,25 ha. C'est la méthode préférée pour les petites plantations à faible écartement et à haut rendement des sols peu poreux du Niger et du Sénégal (voir le chapitre 3), cependant, elle exige une main-d'œuvre relativement abondante.

Dans l'irrigation par rigoles, l'eau est amenée dans des canaux transversalement ou longitudinalement à la pente du champ et s'infiltré dans le sol par les côtés et le fond des rigoles. Les arbres sont plantés sur les berges des rigoles ou près de celles-ci. Il est essentiel dans cette méthode de niveler soigneusement le champ et les rigoles pour régulariser et uniformiser l'apport d'eau. L'irrigation par rigoles ne baigne pas toute la surface du sol ; au contraire, elle dépend du mouvement latéral de l'eau à partir des rigoles. Cette méthode exige une main-d'œuvre relativement abondante, possédant en outre un degré élevé de compétence et d'expérience lui permettant d'acheminer l'eau des canaux d'alimentation aux rigoles et de régler l'écoulement de l'eau. Un des inconvénients de la méthode est que les racines des arbres se développeraient de façon linéaire le long des rigoles. Les arbres tendent à pousser en biais sur les rigoles et les déracinements sont courants vers la fin de la révolution. L'absence d'uniformité du sol peut provoquer le dénivellement des rigoles et, par conséquent, une distribution irrégulière de l'eau. Un entretien périodique des rigoles s'impose donc.

L'irrigation par rigoles est considérée généralement comme la technique la mieux adaptée à la sylviculture, surtout si la topographie est uniforme, la pente peu abrupte et le sol peu poreux. Les larges billons et les dépressions peu profondes (environ 3 m au centre) de la Gézière et de la ceinture verte de Khar-toum (voir le chapitre 3) sont une adaptation de la méthode d'irrigation par rigoles.

L'arrosage à la raie combine l'écoulement d'eau à la surface et l'irrigation par rigoles, grâce à des rigoles parallèles et peu profondes d'où l'eau déborde. Cette méthode connaît des utilisations particulières en agriculture, mais ne s'applique pas à la sylviculture.

Dans les méthodes d'irrigation par gravité, l'alimentation d'eau s'effectue au moyen de canaux ouverts ou de canalisations. Les canaux ouverts comportent souvent un revêtement qui, s'il manque, provoque des pertes élevées

d'eau par suintement et nécessite un entretien coûteux ; en outre, ce type de canal favorise la prolifération des mauvaises herbes. Les dispositifs de dérivation possibles, par ordre décroissant d'efficacité, peuvent être des structures permanentes en bois, en métal ou en béton ; des siphons portatifs ; des tuyaux qui traversent les berges du canal ; ou des solutions de continuité creusées provisoirement dans la berge du canal. Les structures permanentes incorporent souvent des dispositifs de mesure.

Les principaux avantages des méthodes d'irrigation par gravité sont une mise de fonds relativement modeste, à condition que le terrain soit déjà plus ou moins à niveau ; l'inutilité d'une source d'eau sous pression ; et des coûts de main-d'œuvre souvent faibles, pourvu que la conception et l'installation soient bien effectuées. Parmi les principaux inconvénients, notons l'enlèvement de la couche arable qui peut compromettre la fertilité du sol, parfois pendant des années, et le fait que de petits défauts de conception peuvent avoir des conséquences néfastes, notamment des coûts de main-d'œuvre très élevés, l'érosion du sol et des pertes d'eau. Or, il est difficile, voire impossible, d'effectuer des ajustements de petite envergure sans perturber ou interrompre le fonctionnement de tout le système (Bosshard 1966a ; France 1969, 1977 ; Rawitz 1973b ; Booher 1974).

Arrosage par aspersion

Les systèmes d'arrosage par aspersion sont utiles surtout dans les régions à topographie irrégulière où il est impossible de niveler le terrain, sur des terrains à pente irrégulière, et lorsqu'on désire apporter des quantités relativement faibles d'eau en peu de temps. Les utilisations en foresterie sont quelque peu limitées en raison de la hauteur des arbres et des coûts ; ces systèmes s'avèrent utiles surtout dans la première phase d'une plantation forestière, la phase d'implantation (par exemple, la plantation à Mallam Fattori près du lac Tchad, mentionnée au chapitre 3) ainsi que dans les contextes d'agroforesterie. Le système a servi dans des expériences d'irrigation et d'irrigation-fertilisation sur des jeunes sapins de Douglas aux étapes de la perche et du baliveau, réalisées par la société Weyerhaeuser dans la région du nord-ouest du Pacifique aux États-Unis à la fin des années 60 et au début des années 70 (Woodman 1971, 1973).

Tous les systèmes d'arrosage par aspersion comprennent les éléments suivants : une source d'eau sous pression ; un système de canalisations qui amène l'eau au point d'arrosage ; et des ajustages assurant le débit du jet d'eau.

Il existe trois types de systèmes de distribution. Le premier comporte des canalisations de distribution enterrées, donc fixes ; dans certains cas, les tuyaux verticaux et les têtes sont également fixes. Ce type de système nécessite les coûts d'installations les plus élevés, mais les frais d'exploitation les plus bas. Il s'adapte tout particulièrement aux cultures d'arbres vivaces. Le deuxième type est semi-permanent et ressemble au premier, sauf que les canalisations latérales sont amovibles, parfois individuellement, parfois par jeu de tuyaux. Dans le troisième type, tous les composants, y compris les pompes, sont portatifs. Cette méthode comporte les coûts d'installation les plus bas mais les frais d'exploitation les plus élevés.

Les dispositifs de décharge se regroupent également en trois types : les arroseurs statiques, les rampes d'arrosage et les arroseurs rotatifs. Comme la con-

ception du système et le choix des composants, notamment de la pompe et des composants principaux, comportent des considérations techniques, il est par conséquent nécessaire d'avoir recours à un spécialiste (Pillsbury 1968 ; Rawitz 1973a).

Les systèmes à arroseurs ont l'avantage de pouvoir être employés sur des terrains à topographie ou forme irrégulières sans besoin d'un nivellement préalable. On peut également les utiliser lorsque la nappe phréatique est élevée ou qu'il y a un horizon compact près de la surface, sans augmenter la salinité du sol. Il est facile de régler la quantité d'eau et la fréquence d'arrosage de manière à éviter le ruissellement et la percolation profonde, ce qui est très avantageux sur les terrains hautement perméables. Ces systèmes peuvent tirer un meilleur parti d'une alimentation en eau peu abondante mais continue que les systèmes d'irrigation par gravité. La distribution de l'eau est égale, à condition que les vents ne soient pas trop forts et il n'est pas nécessaire de réserver une partie du terrain aux canaux, aux fossés et aux billons, ce qui non seulement signifie une économie de terrain, mais permet aussi d'éviter les frais d'entretien et les ennuis des systèmes à distribution ouverte. En outre, on peut former plus facilement les opérateurs et les erreurs de conception prennent généralement des proportions moins désastreuses que dans le cas des méthodes d'irrigation par gravité. Par contre, le coût initial peut être beaucoup plus élevé que pour l'irrigation par gravité et il est nécessaire que l'eau circule sous pression dans les canalisations, ce qui signifie une mise de fonds élevée, des frais considérables d'entretien et d'exploitation et la dépréciation du matériel. Des vents forts peuvent perturber l'uniformité de l'arrosage et causer une percolation locale profonde et des pertes par évaporation, par déviation de l'eau arrosée ou par effet de pulvérisation. Enfin, le feuillage de certaines espèces tolère mal ce type d'arrosage, surtout si l'eau d'irrigation a une teneur en bicarbonate élevée et qu'elle est appliquée lorsque l'humidité atmosphérique est faible et que, par conséquent, l'évaporation sur les feuilles est rapide (Doneen 1972 ; Shmueli 1973 ; Arar 1975 ; Ayers et Westcot 1976).

Systèmes localisés

Les systèmes d'irrigation localisée, qui regroupent les divers systèmes d'irrigation goutte à goutte au moyen de baveurs, goutteurs, juteurs, etc., ne mouillent que la partie du sol qui se situe à la base de la plante et autour du système racinaire. Ils se caractérisent par un apport faible et lent d'eau à l'horizon racinaire au moyen de tuyaux de distribution munis d'orifices ou de buses soit enterrés, soit placés au-dessus de la surface du sol (Vermeiren et Jobling 1980).

Les composants de base sont une alimentation d'eau sous pression, une tête de réglage, une canalisation principale, des canalisations latérales et des distributeurs. Pour mettre l'eau d'arrosage sous la pression appropriée, il est nécessaire d'avoir une pompe et des réservoirs. La tête de réglage se trouve généralement au point le plus élevé du champ et est reliée au système d'alimentation d'eau ; elle sert à régler la pression et la quantité d'eau amenée, à filtrer l'eau qui entre dans le système et, le cas échéant, à ajouter des substances nutritives. La canalisation principale amène l'eau aux canalisations secondaires, qui fournissent, à leur tour, les canalisations latérales de chaque côté. Ces dernières sont munies de distributeurs à des endroits prédéterminés, c'est-à-dire en face d'arbres individuels ou de groupes d'arbres. L'eau est distribuée en petites quantités soit

goutte à goutte, soit en filets ; la pression de l'eau peut être légèrement supérieure ou légèrement inférieure à la pression atmosphérique qui s'exerce sur la canalisation. On peut ouvrir l'extrémité des canalisations secondaires et latérales afin de vidanger le réseau (Heller et Bresler 1973 ; Wood et al. 1975 ; Thomas et al. 1981 ; France s/d ; SETI s/d).

Les systèmes d'irrigation localisée ont l'avantage de pouvoir s'adapter à beaucoup de terrains ondulés, ils sont de gestion et d'exploitation faciles, et les coûts de main-d'œuvre sont relativement faibles. J. Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, États-Unis, communication personnelle, 1984) a signalé que les ouvriers des plantations près de Niamey au Niger (voir le chapitre 3) ont vite appris à installer et à faire fonctionner le système. Ces systèmes présentent aussi les avantages suivants : économies d'eau ; suppression facile des plantes adventices ; épandage facile des engrais ; et possibilité de maintenir la teneur en eau du sol de la zone mouillée près de la capacité maximale au champ, réduisant ainsi l'accumulation de sels dans cette zone. L'irrigation localisée peut être utilisée avec succès sur des sols excessivement lourds ou excessivement légers. Les coûts d'entretien sont, en règle générale, relativement faibles et ce type de système permet d'exploiter des points d'eau à rendement faible, comme des sources ou des puits peu profonds. Par contre, le principal problème des systèmes d'irrigation localisée vient de ce que les petits tuyaux et les distributeurs ont tendance à s'obstruer par le sable, le limon, les matières organiques, les algues, les pellicules biologiques et la précipitation d'éléments nutritifs, de matières colloïdales ou de calcaire. Comme la taille et l'étendue du système racinaire dépendent du volume d'eau répandu lors de chaque arrosage, le développement des racines peut être restreint par un arrosage insuffisant. Par ailleurs, les arbres peuvent mourir très rapidement si l'eau est coupée, même pour des périodes très courtes ; il est donc essentiel de pouvoir compter sur l'alimentation en eau.

L'irrigation localisée a été utilisée avec succès dans des plantations forestières arrosées à l'eau salée dans les zones désertiques d'Abu Dhabi (Wood et al. 1975) ; dans les plantations brise-vent des Grandes Plaines et d'autres régions arides des États-Unis (Thomas et al. 1981) ; et sur les terrains ondulants des terrasses alluviales le long du fleuve Niger, près de Niamey, et du fleuve Sénégal, au Sénégal (Barbier et Louppe 1980 ; BIRD 1982 ; Hamel 1985 ; SETI s/d ; J. Gorse, Banque mondiale, Washington, DC, États-Unis, communication personnelle, 1984). Des expériences utilisant ce type de système sont actuellement en cours au Pakistan (Sheikh et Masrur 1972). Ces projets permettent d'espérer qu'il sera possible d'appliquer ces systèmes dans des régions où les conditions climatiques et la quantité ou la qualité de l'eau rendent l'arboriculture presque impossible, et aussi comme option additionnelle dans des régions plus favorisées. Toutefois, les systèmes d'irrigation localisée ne constituent pas une panacée : chaque cas éventuel doit être soigneusement analysé avant de choisir la meilleure option apparente (Heller et Bresler 1973 ; NAS 1974 ; Vermeiren et Jobling 1980).

Systèmes et dispositifs d'irrigation spéciaux

Comme l'irrigation se pratique dans la plupart des régions arides et semi-arides du monde, elle comporte inévitablement des problèmes dus à l'insuffisance d'eau et à la teneur en sel souvent élevée. Par ailleurs, les sols sont

souvent trop chargés de sel, ou alors ils se salinisent très facilement sous l'effet de l'irrigation. Plus ces caractéristiques sont marquées, plus le rendement diminue et les coûts augmentent. Il est donc inévitable que des méthodes innovatrices fassent constamment leur apparition. L'introduction et la mise au point des diverses formes de systèmes d'irrigation localisée, étudiée dans la section précédente, constituent un bon exemple d'innovations qui répondent à des besoins particuliers. Il existe un grand nombre d'autres méthodes et dispositifs innovateurs, mais pas toujours nouveaux, dont beaucoup sont déjà utilisés ou pourraient l'être, quoique dans des cas précis et non de manière générale.

Parmi les essais effectués sur diverses variantes des systèmes d'irrigation localisée, on retrouve l'enfouissement de petits distributeurs terminaux dans l'horizon racinaire de l'arbre. Ces efforts ont rarement donné de bons résultats, car une fois que les distributeurs s'obstruent, il est impossible de les nettoyer sans nuire aux plantes. Des expériences effectuées sur des types spéciaux de distributeurs, par exemple les cracheurs et les barboteurs, ont buté sur les mêmes problèmes (Pillsbury 1968 ; Rawitz 1973c).

Les installations d'irrigation, y compris les systèmes d'irrigation par gravité, permettent parfois de réutiliser l'eau excédentaire qui s'échappe normalement par ruissellement, et même l'eau de suintement qui s'infiltre dans les fossés d'évacuation. Cette eau est amenée à l'entrée du système de distribution d'eau et réutilisée. Toutefois, on court le risque que l'eau ainsi recyclée soit excessivement salée (NAS 1974), comme c'est d'ailleurs le cas avec la réutilisation des effluents industriels et municipaux dans de nombreuses régions du monde, par exemple au Koweït (Firmin 1971), près de Melbourne (NAS 1974), dans la partie nord de Victoria (Edgar et Stewart 1979) et dans la région du nord-ouest du Pacifique, aux États-Unis (Alverson 1975). L'épuration de ces effluents s'impose s'ils contiennent des substances nocives pour les plantes ou qu'ils polluent le sol ou les eaux souterraines. Voilà pourquoi les eaux usées des usines de sucre au Soudan subissent un traitement avant de servir à l'irrigation des plantations d'*Eucalyptus*.

Il y a plusieurs façons de réduire les pertes hydriques par évaporation à la surface du sol ou des plans d'eau ; ces méthodes sont utilisées à l'heure actuelle surtout en agriculture plutôt qu'en sylviculture. On peut constater l'importance potentielle de ces méthodes, particulièrement dans les régions où l'eau est rare, lorsqu'on sait qu'entre 25 % et 50 % de l'eau apportée par irrigation à une culture est perdue par évaporation superficielle (BIRD 1979b). Une tendance récente répandue consiste à acheminer l'eau dans des canalisations plutôt que dans des canaux ouverts, surtout lorsque l'absence de revêtement entraîne des pertes additionnelles par suintement, ce qui a des implications importantes au niveau de la saturation du sol. On utilise parfois des produits chimiques liquides, des paraffines ou des feuilles de plastique pour couvrir la surface de l'eau dans des réservoirs ouverts, ainsi que des tabliers en plastique de 1 m de diamètre pour réduire l'évaporation de l'eau du sol autour de la plante (Wood et al. 1975). Le tablier a l'avantage supplémentaire de capter la rosée du sol et la pluie et, s'il a la bonne pente, de les diriger vers la base de l'arbre.

Étant donné qu'environ 99 % de l'eau absorbée par les racines de la plante se dissipe par transpiration à la surface des feuilles, on a mis au point de nombreuses méthodes pour réduire ce genre de pertes : élimination des phréatophytes indésirables et des autres mauvaises herbes le long des canaux ou dans les plan-

tations ; sélection et culture de types de plantes qui ne perdent que des quantités relativement faibles d'eau par transpiration ; pulvérisation d'antitranspirants sur la surface des feuilles ; et aménagement de rideaux-abris pour réduire la vitesse des vents.

L'arrosage par cruches (Goor et Barney 1968 ; NAS 1974) est une pratique très ancienne qui permet l'arrosage provisoire de plantes individuelles ou de groupes de plantes, surtout pendant la première et deuxième année, avant que les racines n'atteignent la nappe phréatique. Cette méthode compte parmi celles actuellement essayées et mises au point pour le reboisement des régions arides, par exemple du désert de Thar au Pakistan (Khan et Sheikh 1983). Dans une méthode semblable, utilisée en Espagne et dans d'autres pays, on arrose l'horizon racinaire des arbres d'une plantation en versant de l'eau dans un tuyau (en bambou, par exemple) enfoncé diagonalement dans le sol (Goor et Barney 1968). Un système analogue est utilisé dans les régions arides de l'Australie du Sud, où l'arrosage des arbres individuels s'effectue au moyen d'un tuyau perforé de 60 cm × 15 cm (Johnson et Hall 1970).

Les arbres sont souvent arrosés immédiatement après la plantation et pendant une ou deux saisons par la suite pour les aider à pousser jusqu'à ce que leur système racinaire prenne contact avec des sources permanentes d'humidité dans les horizons inférieurs du sol, après quoi l'arbre peut se défendre seul. Ce système est efficace surtout si l'on planifie la plantation et l'arrosage subséquent de sorte que la plante puisse bénéficier au maximum de la saison des pluies : la plantation a lieu au début de la saison des pluies, avec un arrosage d'appoint les jours où il ne pleut pas de façon à prolonger la saison des pluies. L'irrigation d'arbres dans les plaines fluviales d'inondation au Mali, au Niger et au Sénégal ne se fait que pendant une ou deux saisons après la plantation pour permettre aux racines d'atteindre la nappe phréatique peu profonde. C'est ainsi qu'on a procédé pour l'établissement de plantations d'*Eucalyptus* à croissance rapide à Mallam Fattori, au Nigéria (voir le chapitre 3). Un arrosage léger peut être nuisible dans la mesure où il aboutit au développement d'un système racinaire peu profond ; la quantité d'eau et la fréquence d'arrosage doivent assurer le mouillage du sol à la profondeur voulue pour permettre un développement adéquat des racines. Les déracinements étaient nombreux dans les plantations de *Pinus eldarica* près de Téhéran, en Iran, parce que le type d'irrigation a empêché le développement d'un système racinaire profond. L'arrosage manuel temporaire à l'aide de camions-citernes se pratique couramment, par exemple, dans la plaine de l'Indus et sur les pentes adjacentes, au Pakistan.

Il est peu probable que l'irrigation souterraine présente un grand intérêt en foresterie vu qu'elle ne s'applique qu'aux sols très perméables, par exemple de tourbe, situés sur une couche imperméable avec une nappe phréatique élevée. On mouille l'horizon racinaire en élevant la nappe phréatique par des moyens artificiels à des intervalles appropriés. Cette méthode comporte cependant des lacunes, dans la mesure où l'irrigation est pratiquée d'ordinaire dans des régions sèches où l'eau souterraine contient toujours une certaine quantité de sels dissous. L'élévation de la nappe phréatique fait remonter ces sels jusqu'à l'horizon racinaire où ils y restent une fois l'eau évaporée ou transpirée par les plantes. À cet égard, l'irrigation souterraine présente deux inconvénients majeurs inhérents au système, puisque d'une part ce sont les nappes phréatiques peu profondes qui ont généralement les teneurs en sels les plus élevées et que, d'autre part, la méthode exclut la possibilité d'éliminer les sels par lessivage. Deux zones



Une rigole en béton achemine, selon les besoins, de l'eau à des rigoles latérales sans revêtement, adjacentes à des rangées de peupliers (Tunisie).

agricoles importantes ont déjà été irriguées selon cette méthode : le delta du Sacramento au nord de la Californie et la vallée de Huleh dans le nord d'Israël ; ces deux zones sont actuellement irriguées par aspersion (Pillsbury 1968 ; Rawitz 1973c).

Une autre méthode permettant de réduire la consommation d'eau et qui n'a qu'une application restreinte en sylviculture, sauf peut-être à l'étape de la pépinière, consiste à circonscrire la percolation profonde au moyen de barrières souterraines en asphalté ou en plastique imperméables à l'eau ou de couches de compost ou de fumier riches en colloïdes. Pour mettre en place la barrière, il faut enlever la couche arable à la profondeur voulue, puis la replacer. La barrière est posée à environ 60 cm au-dessous de la surface du sol et comporte des orifices à des intervalles réguliers pour assurer le drainage (Mendizabal et Verdejo 1968 ; NAS 1974 ; France s/d).

Captage des eaux de pluie : l'irrigation par ruissellement

Depuis des millénaires, les habitants des régions arides du globe captent les eaux de pluie pour irriguer pendant la saison sèche (ou même, grâce à des réservoirs, pendant de plus longues périodes) leurs cultures et leurs vergers d'arbres fruitiers, d'agrément ou autres. Cette approche connaît un succès variable ; en effet, comme elle dépend de la pluviosité, elle n'est pas fiable. Elle trouve cependant une utilité dans les zones à climat méditerranéen. Des fouilles réali-

sées au Néguev, en Israël, et en Jordanie ont mis au jour d'anciens systèmes hydrauliques d'une grande complexité. En Afrique du Nord, les Romains avaient conçu des ouvrages analogues, dotés de citernes souterraines. Ces travaux ont été détruits lors de l'envahissement de la région par la tribu arabe des Hilaliens au 11^e siècle après J.-C.

Le captage des eaux de pluie est encore utilisé de nos jours, sous diverses formes, notamment en Afghanistan, en Australie, au Botswana, au Burkina Faso, en Inde, en Iran, en Israël, au Mexique, au Niger, dans le désert de Thar (Pakistan) et dans la province de Kassala, au Soudan. Les précipitations dans ces zones dépassent rarement 25 à 80 mm. L'eau est parfois utilisée immédiatement pour l'arrosage des arbres, parfois gardée dans des réservoirs. Ce système repose principalement sur la construction d'étangs, de fossés, de murs, de billons suivant les courbes de niveau ou de micro-bassins qui acheminent l'eau vers des zones précises, et sur la modification de la surface du sol en vue d'un ruissellement maximal.

On peut améliorer la capacité de ruissellement du sol par des moyens physiques : dérochement, défrichage, compactage du sol ; chimiques : ajout de sels de sodium, de silicones, de latex, d'asphalte ou de cire ; ou par l'emploi de feuilles couvre-sol imperméables en plastique, en caoutchouc ou en métal léger. La sélection de la méthode se fait généralement en fonction du terrain, car il faut tenir compte des conditions pédologiques, topographiques et climatiques. Ce système présente néanmoins certaines restrictions : il dépend de la hauteur des précipitations ; les matériaux utilisés se détériorent par l'effet des intempéries et doivent être soigneusement entretenus ou alors remplacés ; il y a parfois des effets secondaires indésirables, comme l'érosion du sol (Badi 1967 ; NAS 1974 ; Evenari et al. 1975 ; Ovrut et Ovrut 1977 ; Mehdizadeh et al. 1978 ; Walker 1979a, b ; M.I. Sheikh, Institut forestier du Pakistan, Peshwar, Pakistan, communication personnelle, 1984).

Un autre système de captage des eaux de pluie est employé dans les zones arides du nord du Mexique pour arroser individuellement des arbres fruitiers. On place une feuille de plastique carrée, d'environ 2,5 m × 2,5 m, autour de la base de l'arbre, que l'on retient au moyen de pierres. Le sol dénudé est aplani puis aménagé en pente vers la base de l'arbre. La feuille de plastique capte et dirige vers l'arbre non seulement l'eau de pluie, mais aussi la rosée qui se condense sur sa surface inférieure pendant la nuit (C. Palmberg, Division des ressources forestières, FAO, Rome, Italie, communication personnelle, 1983).

Critères pour le choix d'un système d'irrigation

On dit souvent qu'il est rare, sinon impossible, de trouver une méthode d'irrigation déjà existante qui soit parfaitement adaptée à un ensemble de circonstances donné. Dans chaque cas, il faut évaluer consciencieusement et de façon réaliste les différents facteurs avant de choisir le système qui donnerait le meilleur rendement économique. Même si certains critères ont plus de poids que d'autres, la sélection ne doit s'effectuer qu'une fois tous les aspects pertinents analysés. Dans cette section, nous étudierons les principaux critères à envisager. À cause des échelles de temps de la sylviculture irriguée, il est particulièrement important de faire un bon choix dès le départ, car les ajustements en cours de route, si tant est qu'ils soient possibles sans nuire à la plantation, sont souvent coûteux.

On ne procède pas de la même manière lorsqu'il s'agit de choisir un système destiné à une plantation sylvicole et un autre conçu pour un projet de sylviculture combiné à une agriculture irriguée. Dans le deuxième cas, si le forestier n'est pas consulté au début du processus et qu'il ne participe pas au choix du système à appliquer à un régime mixte, il devra peut-être essayer de tirer le meilleur parti d'une situation qui n'est sans doute pas idéale pour une plantation d'arbres vivaces. Il lui faudra alors adapter la conception de la plantation arboricole et le choix des espèces au système d'irrigation existant.

Parmi les critères qui ont une influence directe sur le coût et l'exploitation d'un système, le premier dont il faut tenir compte est la terre. Le nivellement est une opération coûteuse. Si le terrain présente des pentes abruptes et des ondulations marquées, le nivellement du sol pourrait amener certains arbres à pousser sur un sous-sol infertile. Dans ce cas, l'irrigation par gravité ne serait probablement pas le meilleur système, surtout si le terrain est suffisamment accidenté pour compliquer les travaux de distribution de l'eau. Si les conditions pédologiques ou topographiques font croire à la possibilité d'érosion, il vaudrait mieux employer un système d'irrigation localisée ou par aspersion pour réduire au minimum les travaux de nivellement nécessaires.

Les caractéristiques du sol jouent un grand rôle dans le choix d'un système d'irrigation. Les systèmes d'irrigation localisée et par aspersion permettent de régulariser et de contrôler facilement les apports d'eau et s'adaptent donc mieux que les systèmes d'irrigation par gravité aux sols légers ou peu profonds, aux sols sujets à une percolation excessive ou à l'érosion, aux sols à texture irrégulière, aux sols très salins ou comportant un horizon induré de calcaire près de la surface et aux sols dont la nappe phréatique est élevée. En revanche, les systèmes d'irrigation par gravité, surtout dans l'irrigation par cuvettes, conviennent mieux aux sols fins, à perméabilité lente, et aux sols salins ou alcalins présentant des possibilités de lessivage.

Le choix du système repose également sur un grand nombre de considérations touchant l'eau d'irrigation. L'eau est toujours chère et souvent rare si bien que, compte tenu des autres facteurs, il est souvent préférable d'installer des systèmes d'irrigation localisée ou par aspersion que des systèmes d'irrigation par gravité où la distribution de l'eau est souvent complexe et problématique. L'irrigation par aspersion permet l'arrosage rapide avec de petites quantités d'eau ; bien exploité, un tel système peut s'avérer économique sur le plan de la consommation d'eau même avec des vents de force moyenne. Les systèmes d'irrigation localisée et par aspersion font tous les deux un meilleur usage d'un apport d'eau continu mais faible que les systèmes d'irrigation par gravité qui nécessitent de grandes quantités d'eau distribuées de façon intermittente. Il est généralement reconnu que les méthodes qui permettent de régulariser et d'uniformiser soigneusement les apports d'eau et l'infiltration hydrique dans le sol aident à enrayer la salinité ; cela favoriserait donc le système d'irrigation localisée et par aspersion. Parmi les systèmes d'irrigation par gravité, l'irrigation par rigoles est celle qui permet le moins de corriger la salinité du sol.

Lorsque l'eau d'irrigation est elle-même salée, la distribution lente et uniforme des petites quantités d'eau nécessaires au maintien de la tension d'eau dans l'horizon racinaire rend le système d'irrigation localisée préférable aux autres. L'irrigation par aspersion s'applique moins à ce cas, car les sels contenus dans l'eau peuvent endommager le feuillage. Un autre inconvénient réside

dans le fait que l'eau doit circuler sous pression dans le système ; en effet, l'utilisation d'une pompe entraîne non seulement des frais d'exploitation, mais aussi des frais d'installation et d'entretien qui ne sont pas caractéristiques des autres méthodes.

Les cultures irriguées étant sensibles aux interruptions du calendrier d'arrosage, il est essentiel de pouvoir compter sur une source d'eau sûre, surtout dans le cas des systèmes d'irrigation localisée où le système racinaire de la plante est moins étendu que dans les autres méthodes, ce qui peut conduire très rapidement à la mort de l'arbre en cas d'interruption de l'irrigation.

Lorsqu'ils sont exploités de façon efficace, les systèmes diffèrent peu pour ce qui est de l'utilisation de l'eau et des pertes hydriques par évapotranspiration, exclusion faite toutefois de l'effet des vents sur les arroseurs (Doorenbos et Pruitt 1977). Doneen (1972) compare le taux d'efficacité de plusieurs systèmes d'irrigation, c'est-à-dire le rapport entre la quantité d'eau qui serait nécessaire pour amener le niveau d'humidité du sol à sa capacité maximale et l'apport réel d'eau. Ce rapport mesure en effet le degré de contrôle de l'irrigation. Doneen donne les chiffres généraux suivants : irrigation par cuvettes : 60 % à 80 % ; irrigation par calants : 40 % à 75 % ; irrigation par rigoles : 55 % à 70 % ; fossés suivant les courbes de niveau : 50 % à 55 % ; irrigation par aspersion : 65 % à 85 %. D'après ces données, l'irrigation par aspersion et l'irrigation par cuvettes sont les plus faciles à contrôler.

Quant aux critères biologiques, il est évident que l'irrigation par rigoles a l'inconvénient de provoquer la distorsion du système racinaire, qui suit l'axe de la rigole. C'est particulièrement vrai lorsqu'on a l'habitude de planter les arbres sur la berge de la rigole ou à proximité de celle-ci. Les arbres ont alors tendance à s'incliner et il y a de nombreux déracinements. Par ailleurs, la restriction du système racinaire constitue souvent une lacune inévitable des systèmes d'irrigation localisée, que l'on peut néanmoins corriger dans la mesure du possible par un plus grand apport d'eau afin de permettre aux racines de la plante d'atteindre des dimensions raisonnables.

La facilité de gestion, la simplicité de contrôle, la modicité des frais d'entretien et de main-d'œuvre et la facilité de formation du personnel en ce qui a trait à l'entretien et à l'exploitation des systèmes sont autant de facteurs militant souvent en faveur des systèmes d'irrigation localisée et d'irrigation par aspersion. Ces généralisations sont peut-être vraies, mais elles n'en dépendent pas moins des conditions, traditions, attitudes et motivations particulières à chaque situation. Lorsqu'il faut choisir parmi plusieurs systèmes, la seule méthode sûre consiste à comparer les options praticables en se fondant sur des analyses techniques, financières et économiques. Une caractéristique générale des systèmes d'irrigation par gravité est le fait que de petites erreurs de calcul ou d'installation peuvent être lourdes de conséquences, et que leur correction entraîne non seulement des coûts élevés, mais ne peut s'effectuer sans nuire à la plantation. Les grandes échelles de temps des programmes de sylviculture irriguée ont une incidence considérable sur le choix du système, car il s'agit de programmes permanents dont le rendement doit être constamment soutenu.

6. Évaluation des besoins et des possibilités

Tendances démographiques et socio-économiques

Les conséquences de la croissance démographique et de l'augmentation proportionnelle des besoins en bois et en produits forestiers, notamment dans les zones arides et semi-arides, font l'objet du chapitre 2.

Le tableau brossé par Glesinger (1960), confirmé par Thirgood (1981) et Meiggs (1982), de la dégradation du bassin méditerranéen sur une période de 2 000 ans ou plus laisse présager ce qui nous attend si la population poursuit son taux de croissance et que l'on continue d'exploiter les ressources naturelles et le sol au rythme observé ces dernières décennies. Glesinger a expliqué, en outre, comment une production à la fois intensive et inconsidérée, destinée à répondre aux exigences d'une société de plus en plus complexe, pouvait, à la longue, dégrader le paysage, épuiser les ressources de base d'une région, rendre le sol improductif et, par conséquent, entraîner la disparition des cités et des peuples. Un tel phénomène est d'ailleurs à l'origine de la désertification d'environ un demi-milliard d'hectares. Bien qu'on ne soit pas encore arrivé à mettre un terme à ce processus, il existe cependant une lueur d'espoir pour l'avenir, notamment en Afrique du Nord où l'on a établi, en partie grâce au projet régional de la FAO soutenu par Glesinger, des dispositifs d'irrigation bien conçus. Par ailleurs, Barbier (1978) et Barbier et Louppe (1980) exposent les conséquences de l'accroissement de la population et du bétail sur les ressources forestières naturelles et la productivité du sol dans la vallée du Niger et insistent sur le fait que les agglomérations urbaines provoquent l'épuisement et la désertification du sol. Notons que le Mali et le Sénégal connaissent des problèmes similaires (voir le chapitre 3).

Il va sans dire que l'accroissement et la répartition différente des populations, quelle que soit la zone climatique, continueront à menacer la terre et l'eau, ressources essentielles à la production vivrière et forestière. Pour cette raison, les spécialistes de divers domaines, tels qu'économistes, sociologues, agriculteurs et forestiers, devront s'unir afin de trouver des stratégies permettant à la fois de satisfaire les besoins de la population et d'atténuer les effets néfastes d'une production intensive sur le sol, l'eau, la forêt, etc. Ensemble, ils pourront déterminer les besoins essentiels, y compris les besoins en bois et autres produits forestiers, et étudier les possibilités d'y répondre, notamment grâce à des plantations forestières à haut rendement, dont les plantations irriguées.

Demande de produits forestiers

La nature des produits provenant des arbres et des forêts — notamment ceux qui sont cultivés par irrigation — ainsi que les notions s'y rattachant varient

énormément d'un pays à l'autre. Ainsi, le prétendu « monde occidental » emploie surtout son bois à des fins industrielles, en vue de la production de pâte à papier et de bois reconstitué, mais aussi de bois destiné à la construction et à des usages courants ainsi que de bois de qualité supérieure. Les quantités de bois consacrées à la production d'énergie sont généralement minimales. Dans les pays en développement, qui comprennent beaucoup de régions arides et semi-arides, le schéma est presque inversé. Ainsi, le bois sert principalement à la production d'énergie pour la consommation intérieure alors que le bois de construction, surtout des poteaux, vient au deuxième rang. Dans ces régions, les arbres constituent également une source de fourrage pour les animaux qui broutent en pleine nature ou qui sont engraisés à l'étable. En outre, ils servent à fabriquer de l'huile, des produits pharmaceutiques, des médicaments traditionnels et du tanin. On en tire des fibres, du miel, des fruits, du chaume pour toitures et de la nourriture pour les vers à soie. D'autre part, on s'intéresse vivement aux effets bénéfiques des plantations forestières sur l'environnement. Outre qu'elles donnent de l'ombre et un abri, elles forment des rideaux-abris et des brise-vent qui contribuent à ralentir le vent et, par conséquent, les déplacements de sable. Certains pays arides, notamment les grands producteurs de pétrole, tels que le Koweït, Abu Dhabi et l'Arabie saoudite, aménagent parfois des plantations forestières irriguées dans le but d'améliorer le cadre naturel et de donner un abri à la faune (Firmin 1971 ; Arar 1975 ; Wood et al. 1975 ; Satchell 1978 ; Wood et Synott 1978).

Toutefois, n'oublions pas que les plantations forestières deviennent souvent l'habitat de prédilection des animaux nuisibles, tels que les oiseaux granivores, les sangliers et les insectes.

Dans les pays qui utilisent le bois pour produire de l'énergie, le taux moyen de consommation du bois est habituellement exprimé en mètres cubes par habi-



Dans les régions arides, les plantations irriguées fournissent le combustible ligneux et d'autres produits qui, autrement, ne pourraient être obtenus qu'en parcourant de très grandes distances. Sur la photo, quelques villageois égyptiens ramenant chez eux des matières combustibles légères.

tant par année. Selon les rapports de la Banque mondiale, il varie entre 0,5 et 1,2 m³/ha/an, dans la mesure où d'autres combustibles, comme le kérosène et les résidus agricoles, sont disponibles. Seule une petite fraction — 10 % en général — sert à la fabrication de poteaux, le reste étant presque entièrement transformé en charbon. Comme nous l'avons dit plus tôt dans ce chapitre, la demande et la recherche de bois destiné à servir de combustible et de fourrage sont les deux facteurs principaux qui ont contribué à l'épuisement et à la désertification du sol autour des villes et des agglomérations rurales.

La nécessité de mettre en place des mesures concertées pour la production de bois, et notamment de bois de chauffage, afin de satisfaire les besoins des fortes concentrations humaines des zones arides est clairement illustrée par trois exemples où, pour répondre à la demande, on a eu recours à la sylviculture irriguée sur une grande échelle.

Premier cas : le Pakistan, où le pétrole représente 30 % des importations totales. Ici, l'aménagement de plantations d'arbres à des fins de combustible semble la solution toute indiquée pour répondre aux besoins futurs (M.I. Sheikh, Institut des forêts du Pakistan, Peshwar, Pakistan, communication personnelle, 1985).

Prenons maintenant le cas de Niamey, une ville prospère du Niger. Sa forêt naturelle, dont le niveau de productivité maximale atteignait 0,5 m³/ha/an, avait été épuisée en raison de récoltes intensives. Il a donc fallu commencer à envisager la possibilité de faire pousser des arbres par irrigation (voir le chapitre 3). Barbier (1978) estimait qu'entre 30 000 et 35 000 hectares de plantations seraient nécessaires pour suffire aux besoins. Un projet d'une telle ampleur semble pour le moment irréalisable. La ville étudie la possibilité d'un programme fondé dans une large mesure sur des combustibles de rechange, mais elle penchait cependant en faveur d'une intégration de la sylviculture irriguée à l'agriculture.

Venons-en maintenant au cas de la Gézireh exposé par Foggie (1967). Cette région, qui regroupait 1,2 million d'habitants en 1956 et 1,9 million en 1966, devait en compter 2,6 millions en 1981. Les besoins en bois par personne, estimés à 0,9 m³/an, passeraient de 1,5 million de mètres cubes en 1966 à 2,4 millions de mètres cubes en 1981. Or, en 1966, la production intérieure ne figurait que pour 3 % de ce total. Le reste provenait des vestiges de la forêt naturelle environnante qui croissait au rythme de 0,5 à 0,6 m³/ha/an et surtout du défrichement de plus en plus accentué de la savane indigène (située en moyenne à 270 km de la Gézireh) à des fins agricoles. Les plantations irriguées, pour leur part, produisaient en moyenne 6,6 m³/ha/an, soit la moitié de leur capacité. Malgré l'expansion des programmes de sylviculture irriguée et la planification de nouveaux programmes, ces démarches pourtant appréciables, si l'on considère que la Gézireh et d'autres plantations environnantes devaient approvisionner en bois plusieurs villes populeuses de la région, ne permirent pas d'atteindre l'auto-suffisance. Si nous comparons le développement réel des plantations aux besoins futurs prévus par Foggie, nous sommes bien loin du compte.

Même si l'agroforesterie, qui comprend l'implantation des rideaux-abris sur une grande échelle, doit contribuer à régler en partie les problèmes d'approvisionnement, il devrait être possible, dans certains cas, d'aménager de grandes plantations irriguées, en dépit des coûts que cela comporte et de la demande

de terres agricoles. Ces plantations donneraient un répit à la forêt indigène et contribueraient ainsi à résoudre le problème de la désertification régionale de façon plus efficace.

Les terres et l'eau dans la production du bois

Le manque d'eau n'est pas unique aux régions arides puisqu'une foule de régions à climat humide subissent aussi ce problème qui survient lorsque l'approvisionnement naturel ne suffit pas à répondre aux besoins agricoles et industriels. Selon Gindel (1973), même l'Europe s'inquiète de plus en plus de ses réserves d'eau qui menacent de s'épuiser si l'industrie continue à se développer. Aux États-Unis, entre 1925 et 1975, la demande d'eau a doublé par rapport au taux de croissance démographique et le pays connaît régulièrement des problèmes de pénurie.

James (1973) a décrit les efforts déployés pour répartir cette denrée rare de façon équitable entre la population, l'agriculture et le bétail au nord-est du Nigéria, tandis que Khan (1960b) et Schechter (1977) soulevaient la question de la répartition des ressources en eau entre l'agriculture et la foresterie, respectivement dans le désert du Thal (au Pakistan) et en Israël. Aux États-Unis, l'eau est rare ; aussi les Américains récupèrent-ils de plus en plus les effluents municipaux et industriels pour irriguer les terres agricoles et, dans une moindre mesure, les plantations forestières (Alverson 1975 ; Urie 1975). Mais que ce soit en Australie, en Chine, en Russie, en Amérique du Nord ou du Sud, il a fallu, au cours des dernières décennies, établir des plans d'irrigation pour faire face aux besoins des populations de plus en plus nombreuses.

Dans les régions pauvres en terres fertiles et en eau, la production de bois d'œuvre sur ces terres entre en conflit avec l'agriculture. Ainsi, dans la vallée de l'Indus, au Pakistan, les agriculteurs s'insurgent parfois contre les plantations forestières d'État, surtout lorsque celles-ci sont visiblement peu productives. Kanschik (1961) proposait d'intégrer la sylviculture irriguée à l'agriculture, dans les régions où la terre et l'eau sont consacrées à la production agricole. Swaminathan (1980) est venu renforcer cette proposition en déclarant que la sylviculture, pour réussir, doit être mise en œuvre par les habitants eux-mêmes, et non imposée arbitrairement par le ministère des Forêts. Par exemple, dans la vallée de l'Indus, au Pakistan, les agriculteurs incapables de se procurer des terres irrigables en zone agricole sont souvent prêts à conclure des ententes avec les bureaux de foresterie provinciaux afin de participer aux activités d'agroforesterie irriguée sur les terres contrôlées par ces derniers. Toutefois, nous l'avons vu, l'agroforesterie ne règle pas nécessairement les problèmes d'approvisionnement en bois dans les grandes agglomérations, comme le confirment les cas de N'Debougou (CRDI 1981) et de la région de Mopti, au Mali. Ainsi, à Mopti, la forte demande de bois de chauffage d'une entreprise de fumage de poisson récemment établie a sérieusement entamé les réserves de bois locales (M. Grut, Banque mondiale, Washington, DC, États-Unis, communication personnelle, 1984). Qu'il s'agisse de produire du bois et des vivres, ou seulement du bois, il est nécessaire d'analyser soigneusement tous les besoins en concurrence et toutes les solutions possibles (Glesinger 1960).

Fait remarquable, les peuplements forestiers irrigués sont souvent situés dans de petites zones éparpillées et incultes, notamment sur des bandes de terre

en bordure des frontières, des routes, des canaux de même que sur des lopins de terre de forme et à microrelief irréguliers. On en retrouve des exemples au Zimbabwe (Barrett et Woodvine 1971), au Mali (CRDI 1981), au Niger (Barbier 1978 ; BIRD 1982 ; Hamel 1985 ; J. Gorse, Banque mondiale, Washington DC, États-Unis, communication personnelle, 1984) et au Soudan (Foggie 1967 ; Jackson 1976 ; Ali 1979). Bien qu'on puisse en tirer une certaine quantité de bois, ces terres, selon certains auteurs, sont trop petites, dans l'ensemble, pour suffire aux besoins. De plus, ces coins perdus, comme dans certaines parties de la Gézireh, constituent ni plus ni moins des lieux de déversement des eaux d'irrigation usées et deviennent souvent saturées d'eau et, par conséquent, infertiles. Selon le groupe parrainé par la FAO qui a visité l'URSS, les plantations forestières sur les terres incultes des zones agricoles servent à la fois à produire du bois et à abaisser le niveau de la nappe phréatique grâce à la transpiration végétale. Il ne faut pas oublier, comme le soulignent Pryor (1953) à propos de certaines régions de la vallée de l'Euphrate, en Iraq, et Veltkamp (s/d), qu'il est souvent plus rentable de pratiquer l'arboriculture que la culture de plein champ sur les terres marginales ou épuisées.

Il est évident que plus un sol est pauvre, moins on se le dispute. Ainsi, Firmin (1971), Wood et al. (1975) et Busby (1979) ne mentionnent pas de difficultés particulières liées à l'acquisition au Koweït, en Abu Dhabi et en Iraq de terres désertiques et salines destinées aux plantations d'agrément.

Nous pouvons conclure, d'après les arguments des divers auteurs, qu'il est possible d'utiliser de façon efficace certaines régions comme celles dont nous avons parlé, pourvu que l'on évalue précisément leurs caractéristiques, avant d'y consacrer les maigres ressources nécessaires à leur mise en valeur. Ainsi, lorsqu'une terre est saline, il faut le reconnaître et la traiter en conséquence (Khan 1966). Par ailleurs, si les terres destinées à la sylviculture ne permettent pas d'atteindre les objectifs de production, il faut indiquer clairement le besoin de terres supplémentaires ou meilleures.

Il arrive fréquemment, par exemple au Soudan (voir le chapitre 3), qu'on récupère les eaux usées industrielles, municipales et d'irrigation pour irriguer d'assez vastes plantations par bouquets. Toutefois, ces effluents contiennent souvent des sels et des minéraux et peuvent, à la longue, nuire à la santé des habitants ou rendre le sol improductif s'ils ne sont pas traités (Laurie 1974 ; Alverson 1975 ; Urie 1975 ; Edgar et Stewart 1979).

De nombreux essais montrent qu'une terre qui ne reçoit pas assez d'eau ou est irriguée de façon irrégulière produit peu ou devient improductive. Ainsi, dans la vallée de l'Indus, les plantations forestières situées aux extrémités de conduites latérales d'irrigation, ou près de celles-ci, manquent souvent d'eau ou, du moins, en reçoivent insuffisamment, à cause de défaillances ou de défauts de conception du système d'alimentation. D'autre part, dans la pratique, on ne respecte pas toujours les taux d'arrosage prescrits (Lerche et Khan 1967). L'irrigation de la Gézireh et d'une partie des plantations de la ceinture verte de Khartoum¹ à l'aide des eaux du Nil est interrompue chaque année de la mi-mars à la mi-août, conformément aux dispositions du « Nile Waters Agreement » passé entre le Soudan et l'Égypte. Cette interruption influence donc con-

¹ L'autre moitié des plantations de la ceinture verte de Khartoum n'est pas touchée par ce facteur puisqu'elle est irriguée avec des effluents d'eaux usées provenant de la ville.

sidérablement le calendrier d'irrigation et explique, selon Bayoumi (1976), pourquoi 35 % des terres disponibles ne sont pas irriguées. D'après Masson et Osman (1963) et Khan (1966), il est important de bien connaître les quantités d'eau nécessaires et le moment auquel elles sont disponibles, afin de pouvoir planifier et établir des calendriers d'irrigation adéquats. Une interruption inattendue des apports d'eau, surtout lorsqu'elle est prolongée, peut avoir des effets catastrophiques. On n'a qu'à penser au désastre qui a frappé la moitié des plantations de la ceinture verte de Khartoum (voir le chapitre 3) qui dépendent du canal de la Gézireh. Par ailleurs, une alimentation excessive en eau peut être également néfaste, comme c'est le cas lorsqu'on déverse dans les zones sylvi- coles l'excédent d'eau provenant de l'irrigation agricole (Bosshard 1966e ; Foggie 1967 ; Laurie 1974 ; Jackson 1976 ; Ali 1979).

Plusieurs auteurs ont souligné la nécessité d'économiser l'eau. Selon Khan (1966) et Schechter (1977), les utilisateurs doivent se faire un devoir de ne pas gaspiller cette denrée rare. Pour les spécialistes de l'irrigation, il importe de faire un usage opportuniste ou polyvalent de l'eau, par exemple en récupérant les eaux de drainage, les eaux d'aval et toutes sortes d'eaux secondaires en vue de l'irrigation des plantations. D'autre part, Gindel (1973) a proposé de ne pas planter de végétaux à haut taux de transpiration puisqu'ils peuvent, dans certains cas, provoquer un épuisement des ressources en eau. Pryor (1970) et Jackson (1976) ont conseillé de dresser des calendriers d'irrigation en fonction des caractéristiques des arbres. Ainsi, certains ont besoin d'eau le temps que leurs racines atteignent la source souterraine. D'autres, par contre, qui doivent être constamment irrigués, ont généralement moins besoin d'eau au début de leur croissance. Par ailleurs, on a déjà mentionné que les rideaux-abris produisaient des effets bénéfiques sur la productivité agricole et ailleurs grâce à leur capacité de conserver l'eau (voir, entre autres, Bayoumi 1976, 1977 ; Saleem 1973, 1975 ; Thomas et al. 1981).

Toutefois, l'irrigation des plantations forestières n'entre pas toujours en conflit avec les besoins de l'agriculture. Ainsi, Barbier (1978) parle de certaines basses terres situées en bordure du Niger qui font l'objet de crues saisonnières et d'un suintement latéral, deux facteurs qui contribuent conjointement à la croissance des arbres. Or, dans cette même région, le pompage des eaux du Niger pour l'irrigation des plantations forestières en saison sèche ne gêne pas l'irrigation des terres agricoles, car durant cette saison, le fleuve près de Niamey déborde suffisamment pour satisfaire la totalité des besoins et ce, même si la demande d'eau pour l'agriculture culmine à ce moment (BIRD 1978 ; Barbier et Louppe 1980). J. Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, États-Unis, communication personnelle, 1984) soutient, en se basant sur une expérience récente conduite au Niger, qu'on ne devrait irriguer les forêts que si l'eau peut y être acheminée sans frais, ou presque, car le pompage est un procédé très coûteux.

On est même parvenu à irriguer des plantations d'arbres avec de l'eau salée qui provenait de trous de forage et de puits creusés à la main, en adoptant toutefois des méthodes de distribution qui atténuent les effets de la salinité sur les plantes. Van Hoorn et al. (1968) et Arar (1975) ont décrit les méthodes servant en Tunisie et dans d'autres régions de l'Afrique du Nord ; Wood et al. (1975), Satchell (1978) et Hallsworth (1981), celles employées en Abu Dhabi et Firmin (1968) ainsi que Wood et Synott (1978), celles utilisées au Koweït.

Faisabilité technique

Eau d'irrigation

Qualité

L'eau d'irrigation contient toujours des impuretés sous forme de matières dissoutes ou en suspension, dont la quantité et la nature permettent de déterminer l'utilité de l'eau à cette fin. La teneur de l'eau en sels dissous, la quantité de solides en suspension et le volume de polluants d'origine humaine constituent de bons indicateurs de la qualité de l'eau. Les sels dissous risquent d'affecter la croissance des plantes et les propriétés du sol ; les résidus agrochimiques peuvent compromettre l'équilibre biologique du sol. Même si elle est partiellement responsable du fort rendement de certains sols irrigués, tels que ceux de la vallée du Nil, la matière en suspension peut également avoir un effet néfaste sur les dispositifs et les mécanismes d'alimentation en eau et de distribution. Il est donc important de connaître les caractéristiques de l'eau ainsi que les effets particuliers et combinés des substances qui s'y trouvent, par rapport à tous ces facteurs (Yaron 1973).

En matière d'irrigation, on évalue généralement la qualité de l'eau en fonction des problèmes que peut provoquer une eau de piètre qualité. Quatre catégories de problèmes de ce type figurent dans les directives d'Ayers et Westcot (1976) : la salinité, qui influe sur la disponibilité de l'eau destinée aux cultures ; la perméabilité, qui a un effet sur le rythme d'infiltration de l'eau dans le sol ; la toxicité ionique spécifique, qui se répercute sur les cultures sensibles ; et divers facteurs qui exercent une influence sur ces cultures. Vu que plusieurs de ces facteurs peuvent modifier simultanément la qualité de l'eau, l'évaluation se fait séparément pour chaque catégorie, en fonction, dans chaque cas, du volume de sels susceptible de provoquer des problèmes ; des mécanismes d'interactions sol/eau/plante qui risquent d'être suffisamment perturbés pour qu'il y ait perte de production ; de la gravité probable du problème après un usage à long terme de l'eau en question ; et des procédés de rechange dont on dispose pour corriger ou minimiser le problème.

Un sol à salinité excessive, surtout dans les horizons supérieurs où la plupart des plantes puisent le gros de leur eau et de leurs éléments nutritifs dissous, entrave l'absorption de l'eau par les racines. L'objectif des procédés visant à surmonter les problèmes de salinité consiste donc à améliorer l'accessibilité de l'eau et du sol aux récoltes. Il pourra s'agir d'irriguer plus fréquemment (sans pour autant provoquer ou aggraver d'autres problèmes relatifs au sol et à l'eau), d'utiliser des espèces ou des variétés tolérantes, de recourir systématiquement à de l'eau supplémentaire pour le lessivage, de modifier les façons culturales (par exemple en épandant les engrais qui conviennent), et d'adopter une méthode d'irrigation assurant un meilleur contrôle de la salinité du sol. Au nombre des mesures plus radicales, on peut changer de source d'alimentation en eau et mettre en place un drainage artificiel (s'il n'en existait pas jusque là) si la nappe phréatique pose un problème.

On connaît un certain nombre d'exemples de mesures qui ont été prises pour permettre l'emploi d'eau saline. Dans les régions arides de Tunisie, où la superficie irriguée a considérablement augmenté ces dernières années, on a constaté que les arbres poussaient fort bien dans des sols irrigués avec de l'eau

contenant jusqu'à 5 grammes de matière salée anhydre par litre, et également avec de l'eau gypseuse. Le succès de cette opération dépend de l'apport fréquent de petites quantités d'eau pour réduire la tension entre l'eau et le sol, d'un drainage correct et d'un lessivage périodique, compte tenu du lessivage causé par les précipitations hivernales (Cointepas 1968 ; Van Hoorn et al. 1968 ; Arar 1975).

On a réussi à établir des plantations dans les régions désertiques d'Abu Dhabi, malgré l'emploi d'eau de forage contenant entre 2 500 et 16 000 ppm de sels. *Casuarina glauca* et *Eucalyptus camaldulensis* ont poussé en moyenne de 1,7 m/an au cours des sept premières années (Wood et al. 1975 ; Hallsworth 1981).

La perméabilité d'un sol peut diminuer par suite de nombreux facteurs, notamment ceux qui ont trait à la qualité de l'eau. Une eau fortement sodique modifie la structure pédologique, amenant les particules de sol plus fines à se disperser dans les pores du sol et à sceller la couche superficielle. Une eau à faible taux de salinité est corrosive et provoque l'épuisement, dans les horizons supérieurs du sol, des minéraux et des sels facilement solubles, comme ceux du calcium par exemple, avec des effets semblables à ceux des eaux à forte teneur en sodium. D'autres procédés consistent à irriguer plus fréquemment, à labourer et à scarifier en profondeur (ce qui n'est pas toujours possible lorsque les arbres ont été plantés), à prolonger la durée d'une opération d'irrigation donnée, à collecter et à recycler l'eau de ruissellement, à faire concorder les rythmes d'application et d'infiltration lorsqu'on se sert d'arroseurs, et à épandre des résidus organiques sur le sol.

La toxicité ionique spécifique est provoquée par les ions de sodium et de chlorure, auxquels beaucoup d'espèces d'arbres sont sensibles. Pour minimiser ou corriger ce type de problème, il convient d'irriguer plus fréquemment, d'accroître la quantité d'eau utilisée pour le lessivage, et, dans le cas d'une toxicité sodique, d'employer un rectificateur comme le gypse, comme cela se fait dans la vallée de l'Indus, au Pakistan (Shah Mohammad 1978), ou comme l'acide sulfurique.

Certaines cultures sont sensibles à un excès de nitrate ou d'azote ammoniacal. Même si d'aucuns soutiennent qu'un pH anormal du sol pose un problème, il n'en est pas un à proprement parler, mais plutôt un de ses symptômes. Dans ce cas, il faut planter des récoltes plus tolérantes, mélanger ou changer les sources d'alimentation en eau, modifier la méthode d'irrigation ou épandre du soufre ou du gypse sur les sols à pH élevé, et de la chaux dans le cas contraire.

Des essais spécifiques ont eu lieu au Koweït avec de l'eau contenant 4 000 à 5 000 ppm de sels. On s'est assuré pendant l'irrigation de maintenir une humidité permanente dans l'horizon racinaire. Les espèces ont ensuite été triées selon les diverses concentrations de bore, de zinc et de bicarbonate et les taux de Mg/Ca, Na/K et Na/Ca + Mg (les résultats paraissent au tableau 10 de l'annexe 2). On a constaté que *Prosopis* poussait fort bien dans l'eau de mer de cette région du Golfe, à la condition de remplacer le sodium contenu dans l'eau par du potassium (Firmin 1968). Arar (1975) a souligné le problème qu'une eau à teneur excessive en azote avait posé dans des plantations irriguées.

Lorsqu'on se sert d'effluents d'eaux usées pour irriguer des plantations d'arbres, notamment au Koweït (Firmin 1971), dans la partie nord de Victoria

(Edgar et Stewart 1979) et aux États-Unis (Urie 1975), on s'expose à d'importantes conséquences à long terme du fait que ces eaux contiennent des quantités élevées d'ions et d'autres matières qui risquent de s'accumuler dans le sol, de nuire à la croissance des plantes et de polluer les eaux souterraines. Ayers et Westcot (1976) ont beaucoup insisté sur la nécessité de procéder à des contrôles et à des évaluations minutieuses dans ce genre d'irrigation.

Quantité

La prévision des besoins en eau d'irrigation est un processus complexe qui doit tenir compte d'un grand nombre de facteurs interactifs souvent très variables. Les méthodes éminemment théoriques et scientifiques décrites dans la documentation s'appliquent à des cultures agricoles, la plupart annuelles, et s'accompagnent d'extrapolations convenant aux cultures vivaces. Par contre, il n'y a que relativement peu d'études comparables sur les plantations forestières irriguées, dont la pratique semble reposer au moins autant sur une démarche empirique ou sur l'expérience et le jugement (et même l'intuition) de certains spécialistes que sur l'expérimentation scientifique (Raeder-Riotzsch 1965).

Une démarche empirique est probablement la meilleure façon d'évaluer les besoins en eau d'une culture, car les méthodes théoriques ne permettent généralement pas de répondre aux questions qui ont trait à la disponibilité effective de l'eau sur le terrain (par exemple, de combien d'eau les arbres ont réellement besoin, quand et pour combien de temps cette eau est nécessaire, combien de temps un arbre peut tolérer de ne pas être irrigué et à quels moments de l'année). Il est important d'établir une distinction entre les besoins en eau d'un peuplement forestier aux fins de sa croissance et la consommation potentielle d'eau, c'est-à-dire la quantité qui serait nécessaire si les réserves étaient plus ou moins inépuisables, mais qui n'entraînerait pas pour autant une hausse marquée du taux de croissance. N'oublions pas que dans beaucoup de régions sèches du monde, les agriculteurs parviennent à obtenir des récoltes satisfaisantes en n'appliquant pas plus de 500 mm d'eau. Les sylviculteurs ont coutume d'utiliser deux ou trois fois cette quantité, mais rien ne prouve qu'ils aient raison.

Au Pakistan, les quantités d'eau destinées à l'irrigation des cultures sylvoles dans la plaine de l'Indus sont depuis de nombreuses années allouées sur la base de 70 (et parfois de 100) cusecs² par 100 acres. Le premier chiffre équivaut à environ 1,46 m/ha/an ou à une pluviosité de 1 460 mm par année. Cela est tout juste supérieur à ce que les sylviculteurs appliquent généralement dans la pratique, comme l'atteste le tableau 4.

D'après certaines expériences pratiquées à Khanewal, au Pendjab, Sheikh (1974a) a conclu qu'une irrigation de 91 à 122 cm par an suffit à *Dalbergia sissoo* pour atteindre sa croissance optimum après la deuxième éclaircie la 10^e année. Les résultats d'autres recherches visant à déterminer les taux d'arrosage au Pakistan figurent au chapitre 3.

À Gézireh, Khan (1966a) a procédé à des essais qui ont révélé qu'au Soudan, *Eucalyptus microtheca* nécessite des apports d'eau toutes les deux semaines de juillet à décembre et toutes les six semaines de janvier à mars, pour un total

² Le cusec est une unité volumétrique correspondant à un débit d'un pied cube par seconde à un point donné.

Tableau 4. Moyenne des besoins annuels en eau de diverses cultures annuelles et vivaces.

Culture	Besoin en eau (cm)
Blé	33
Coton (Dési)	46
Coton (américain)	63
Maïs	63
Riz	162
Canne à sucre	140
Plantations forestières	137

Source : Lerche et Khan (1967).

de 124 cm par année. Les travaux d'Ahmed (s/d) ont confirmé ces constatations. Lors d'essais portant sur *E. camaldulensis* réalisés sur les terrasses fluviales au Niger, Delwaulle (1979) n'a constaté à peu près pas d'écart de croissance entre deux groupes d'arbres de deux ans qui avaient reçu respectivement 270 cm et 460 cm d'eau par année ; Barbier (1978) a obtenu des résultats analogues avec des quantités de 250 cm et 500 cm par année. Dans chaque cas, les arbres irrigués ont affiché une croissance nettement supérieure à celle des sujets non irrigués.

Les essais portant sur deux clones de peuplier plantés sur un sol limoneux-sableux à limoneux en Israël ont indiqué que le meilleur régime d'irrigation consiste à arroser toutes les deux semaines (lorsque l'humidité du sol correspond environ aux deux tiers de la capacité au champ), sans dépasser au total 135 cm par année, en sus des 60 cm de précipitations annuelles qui tombent dans la région. Ces essais illustrent le type de travaux empiriques qu'il faut réaliser pour déterminer les meilleurs taux d'irrigation dans des régions particulières, avec des espèces données.

Certains experts prétendent que les peuplements forestiers nécessitent plus d'eau pour une croissance optimum que les cultures agricoles, peut-être en partie à cause du caractère pérenne de ces peuplements. Goor et Barney (1968) ont affirmé que les arbres ont besoin de deux fois plus d'eau que les cultures agricoles, mais dans les conditions particulières qui les intéressaient, Foggie (1967) soutenait un apport 3,5 fois plus important, tandis qu'Edgar et Stewart (1979), pour leur part, proposaient 2,2 fois plus d'eau.

Pour décider du moment d'irriguer, il faut d'abord déterminer la réaction des plantes à divers stades de déshumidification du sol et leur croissance selon divers traitements humidifiants du sol. Ces rapports fournissent les données nécessaires pour établir les meilleures conditions et époques d'irrigation, la quantité d'eau à chaque occasion, l'efficacité de l'irrigation et l'emploi saisonnier d'eau.

Les spécialistes chargés de dresser les calendriers d'irrigation peuvent utiliser plusieurs indicateurs de la teneur en eau des plantes pour déterminer les besoins d'irrigation : ainsi, le brunissement des feuilles chez certaines espèces, qui peut indiquer un manque d'humidité, le retournement des feuilles ou la modification de leur angle, la diminution du rythme d'allongement des pousses, le ralentissement de croissance du diamètre de la tige et la réduction de l'ouverture stomatale. Le potentiel de rétention d'eau du sol se mesure à l'aide d'instruments tels que des tensiomètres ou des sondes à neutrons.

Doorenbos et Pruitt (1977) expliquent que l'emploi de méthodes de prévision des besoins d'irrigation des cultures devient nécessaire à cause de la difficulté d'obtenir sur le terrain des mesures précises à cette fin. Ils proposent des formules détaillées pour calculer les besoins d'irrigation des cultures dans diverses conditions climatiques et culturales, informations essentielles à la planification d'un objet. Leurs directives servent également de point de départ fort utile aux recherches sur les besoins d'irrigation des cultures. Ils définissent les besoins d'irrigation d'après la hauteur d'eau dont une culture a besoin pour compenser les pertes qui se produisent par évapotranspiration (taux d'évaporation d'une culture) ; la culture doit être exempte de toute maladie et pousser sur une vaste superficie dans des conditions d'humidité et de fertilité du sol qui lui permettent d'atteindre son plein potentiel de production dans un milieu de croissance donné.

Pour calculer le taux d'évapotranspiration d'une culture, on recommande une démarche en trois phases : premièrement, il faut calculer l'effet du climat sur les besoins d'irrigation ; deuxièmement, il faut calculer l'effet des caractéristiques propres à une culture sur ces besoins d'irrigation ; et, en troisième lieu, il faut calculer l'effet des conditions locales et des façons culturales sur les besoins d'irrigation. La façon de procéder à ces calculs est exposée en détail à l'aide d'exemples et de programmes informatiques (Doorenbos et Pruitt 1977).

Espèces d'arbres à irriguer

Les types d'environnements où l'on cultive des arbres par irrigation, et les raisons d'une telle culture sont aussi diversifiés que les emplacements des plantations. Aussi, le nombre d'espèces qui se sont révélées appropriées dans des conditions et à des fins précises est très élevé. Il serait vain ici d'essayer d'en dresser une liste complète. Le but de cette section est d'examiner les principaux critères de sélection ou de rejet des espèces, le besoin de tester et de sélectionner d'autres espèces et la manière générale de procéder. Nous renvoyons le lecteur aux espèces qui figurent à l'annexe 1 qui a été compilée à partir de la documentation consacrée à l'irrigation des arbres forestiers à l'étude. Celle-ci englobe quatre listes différentes :

- Une liste de certaines des principales espèces utilisées qui indique, par pays, les statistiques publiées sur les rythmes de croissance dans des conditions d'irrigation.
- Une liste compilée par Firmin (1968) sur la base des essais menés au Koweït, dans laquelle il classe les espèces selon leur niveau de tolérance à divers taux de salinité.
- Les listes dressées par Boyko et Boyko (1968) des espèces qui réagissaient bien ou modérément bien aux essais d'irrigation dans des conditions désertiques à Eilat, en Israël.
- Le classement établi par Bosshard (1966c) des espèces testées dans la ceinture verte de Khartoum, au Soudan, quant à leur degré de tolérance à une interruption d'irrigation pendant divers intervalles de temps.

Les trois dernières listes sont reproduites telles qu'elles ont été publiées par les auteurs en question. La compilation de la première liste reflète principalement les taux de croissance du cubage publiés. Son objectif primordial, comme celui des trois autres listes, est de faire mieux comprendre la sélection des espèces, ce qui pourra s'avérer d'une précieuse utilité aux forestiers hydrauliciens

chargés de planifier et de réaliser les projets d'irrigation forestière dans leur propre sphère.

Les critères de sélection des espèces varient selon les objectifs et les conditions qui s'appliquent à chaque cas. On sélectionne généralement des espèces adaptées à l'environnement et au système sylvicole utilisé à l'endroit de la plantation, et celles dont les besoins d'irrigation sont susceptibles d'être satisfaits avec l'eau dont on dispose (Ali 1962). À titre d'indication de l'extrême minutie dont il faut faire preuve dans la sélection des espèces, on remarquera que *D. sissoo*, par exemple, est une espèce à feuilles caduques qui pousse particulièrement bien dans les régions où il existe une saison dormante annuelle, comme dans les parties septentrionales de la vallée de l'Indus ; cette espèce pousse moins bien sous un climat chaud ou très chaud toute l'année, par exemple dans la partie méridionale de cette même vallée. Les peupliers plantés dans les régions à climat chaud continu donnent souvent l'impression d'une mésadaptation analogue. Par ailleurs, *Acacia nilotica*, espèce polyvalente très importante pour la sylviculture irriguée en Inde et au Pakistan, présente, selon sa provenance, des variations de tolérance au gel. À quelques exceptions près, comme certaines espèces de *Pinus* et de *Cupressus*, les conifères ne supportent pas des températures élevées pendant de longues périodes, au contraire de nombreux bois durs.

Il arrive parfois que l'on sélectionne des espèces à des fins particulières, par exemple pour un rendement fibreux à partir de systèmes de production irrigués à très courtes révolutions. Dickmann (1975) a établi certains critères relatifs à l'idéotype de ces systèmes :

- Croissance rapide du jeune plant ;
- Croissance échelonnée sur une longue période : ainsi, en dehors des plantations non irriguées, *Pinus radiata* l'emporte sur le sapin de Douglas dans les zones moins tempérées de la Nouvelle-Zélande, auxquelles ces deux espèces sont bien ajustées, car il pousse pendant 11 à 12 mois de l'année alors que le sapin de Douglas ne croît que pendant environ six mois de l'année seulement, ce qui en fait un moindre producteur ;
- Tige unique à port dressé excurrent, c'est-à-dire un niveau élevé de dominance apicale ;
- Angle des branches aigu, donnant une couronne étroite : il existe un parallèle ici avec les types qui ont parfois la faveur des agriculteurs ;
- Rapport racines-rejets élevé ;
- Implantation et régénération aisées, par exemple par coupe de rajeunissement ;
- Propriétés du bois acceptables ; et
- Absence de dommages causés par les ravageurs et les maladies.

Les essences qui tolèrent les conditions salines ou alcalines du sol ou de l'eau d'irrigation, ou les deux, constituent d'importants exemples d'espèces spéciales. Bon nombre de ces espèces figurent aux annexes 2 et 3. Des espèces comme *Acer negundo*, qui ont des systèmes racinaires denses et résistants, sont parfois recommandées pour lier les rives de canaux sans revêtement. Réciproquement, des facteurs de sélection négatifs conviennent fréquemment. Ainsi, la cime de certaines espèces a tendance à s'étaler, ce qui les rend impropres à une culture intensive, même si elles peuvent fort bien servir à d'autres applications. La plupart des essences d'*Albizia* et de *Terminalia* sont de ce type. Les espèces hautement drageonnantes ou autogames sont peu souhaitables, surtout lorsqu'elles risquent de devenir des plantes adventices envahissantes dans les

terres agricoles ou les plantations d'arbres. Goor et Barney (1968) citent *Robinia pseudacacia* comme espèce fortement drageonnante. Certains peupliers (par exemple *P. alba*) et *C. glauca* sont d'autres espèces drageonnantes. Au nombre des espèces qui sont des plantes adventices dans les plantations irriguées, mentionnons *Morus alba*, *Prosopis cineraria* et *Prosopis juliflora*, que l'on trouve dans la plaine de l'Indus, au Pakistan, dont les graines sont distinguées par les oiseaux et les chèvres. Les agriculteurs évitent parfois (comme souvent la plupart des arbres) certaines espèces qui attirent les oiseaux granivores en leur offrant un abri ou un lieu convenable de nidification, comme *Acacia nilotica* qui pousse près des cultures de sorgho dans les régions du projet de la Gézireh, au Soudan (Jackson 1976), et sur les terres céréalières de la plaine de l'Indus. D'aucuns affirment que les oiseaux endommagent les récoltes de toute façon, car ils parcourent de longues distances pour atteindre les terres où ils s'alimentent, ou encore qu'ils font autant de bien en se nourrissant des insectes prédateurs qu'ils font de mal en mangeant le grain. Toutefois, il existe des espèces qui attirent moins les oiseaux, comme la plupart des *Eucalyptus*, et qui sont souvent acceptables à bien d'autres égards. On peut parfois minimiser les dégâts occasionnés par les oiseaux granivores en rendant le grain des épis inaccessible aux oiseaux par une manipulation génétique de la plante.

D'après la documentation existante, il est clair qu'il existe très peu d'espèces à haut rendement qui soient économiquement rentables et polyvalentes par rapport au milieu, à la qualité de l'eau et aux méthodes de culture et qui produisent d'importants volumes de bois d'œuvre et parfois aussi du fourrage, de la gomme, du latex et de l'écorce à tan. On trouvera à l'annexe 1 une liste de certaines de ces espèces avec des données sur leur taux de croissance. Parmi les plus importantes, mentionnons *A. nilotica* (syn. *arabica*) dont il existe plusieurs sous-espèces (Brenan 1983); *D. sissoo*; plusieurs bambous (comme *Dendrocalamus strictus* et *Oxytenanthera abyssinica*); plusieurs espèces d'*Eucalyptus* (*E. camaldulensis*, *E. microtheca*, *E. tereticornis* et *E. resinifera*); les peupliers (comme certains clones de *Populus* × *euramericana*), pourvu qu'il y ait une saison dormante et pas de salinité; *Sesbania grandiflora*; et, pour leur extrême résistance à la chaleur, à la salinité et même à l'alcalinité, certaines espèces de *Tamarix*, notamment *T. articulata*. Dans les plantations denses, ces espèces manifestent le meilleur comportement en peuplements homogènes: il est très rare que les mélanges d'espèces donnent de bons résultats dans les plantations irriguées. On trouve une exception dans *Broussonetia papyrifera*, le mûrier nain, arbuste qui tolère bien l'ombre et qui pousse fort bien sous *D. sissoo* ou *A. nilotica*, notamment dans la vallée de l'Indus. La tolérance à l'ombrage de la première de ces trois espèces lui permet de bien se mélanger aux deux autres. Même ici, toutefois, il faut combattre la tendance du mûrier à former des fourrés. Par ailleurs, le mûrier ne peut pousser sous l'étage dominant sans porter dans une certaine mesure atteinte à la production des espèces de cet étage, ce qui explique qu'il doive fournir une compensation économique suffisante.

On se gardera de cultiver inconsidérément dans une région où elle est moins bien acclimatée une espèce prospère dans certaines conditions bien définies. Or, on procède souvent ainsi, comme dans le cas d'*E. microtheca*, au Soudan, où cette espèce s'adapte biologiquement aux conditions d'irrigation des sols argileux de la région de la Gézireh, mais se développe moins bien dans les sols sableux qui bordent le Nil dans le nord du Soudan, notamment dans la région de Shendi-Atbara.

Il y a toujours moyen de planter d'autres espèces, ou de remplacer celles en place par de meilleures. Dans certains cas, il s'agit d'un besoin prioritaire qui appelle des programmes de plantation et d'essai des nouveaux sujets. Les exemples de réussite à cet égard abondent. Ainsi, grâce en partie aux récents travaux biologiques et taxonomiques de spécialistes australiens, notamment Barlow (1983) et Johnson (1980, 1982), on entrevoit la possibilité d'exploiter les ensembles génétiques potentiellement précieux que représentent les quatre genres de casuarinacées en Asie du Sud et du Sud-Est, en Océanie et en Australie. Les succès obtenus avec *Casuarina* dans les brise-vent et les rideaux-abris irrigués d'Égypte et de Thaïlande donnent à penser que ce genre offre un potentiel beaucoup plus grand dans les régions irriguées. Hall et al. (1972) ont dressé la liste d'un certain nombre d'espèces australiennes de climat sec, notamment des espèces d'*Acacia* et de *Casuarina* dont certaines présentent un bon potentiel pour l'irrigation ; Pryor (1963, 1970 et autres rapports non mentionnés ici) a recommandé de procéder à des essais avec une gamme d'espèces d'*Eucalyptus* ; le genre *Malaleuca* semble revêtir une importance particulière à cet égard ; le *Colophospermum* d'Afrique centrale et australe offre un potentiel certain pour ce qui est des sols des régions chaudes à grain fin et à pH élevé (Armitage et al. 1980). Ce dernier et Palmberg (1981) mentionnent qu'*Acacia* et d'autres espèces sont susceptibles d'élargir les ensembles génétiques se prêtant à une irrigation et font actuellement l'objet de tests de provenance intensifs aux termes d'un programme international d'exploration et de contrôle génétiques parrainé par la FAO et le Bureau international pour les ressources phytogénétiques.

Felker et al. (1983) ont démontré l'existence d'importantes différences génétiques en matière de croissance avec irrigation entre individus et provenances ainsi qu'entre espèces de *Prosopis* étroitement apparentées. Ils ont mesuré la production de biomasse de 32 obtentions de *Prosopis* au bout de trois ans dans diverses conditions d'irrigation, dans la zone sèche du Texas, mais ils n'ont noté que de faibles écarts entre les traitements. Toutefois, ils ont constaté des différences de croissance pouvant atteindre 2 000 % entre certaines des obtentions. La plus forte production (13,4 tonnes anhydres/ha par année) provenait d'une collection de *Prosopis chilensis* d'Argentine.

On dispose d'excellentes stratégies et directives relatives à l'introduction et à l'essai d'espèces destinées à des applications particulières, notamment l'exploitation extrêmement avantageuse de la diversité des provenances au sein d'une même espèce. Burley et Wood (1976) proposent à cet égard certains principes directeurs, tandis que Bosshard (1966e), Jackson (1976) et Sheikh (1978) font partie de ceux qui insistent sur la nécessité d'essais visant à vérifier la transférabilité des espèces, des provenances ou des clones qui se sont révélés satisfaisants dans plusieurs ensembles de conditions.

Parmi les critères qui revêtent un intérêt particulier lorsqu'on met à l'épreuve des espèces et des provenances à des fins d'irrigation dans les régions arides, il faut mentionner le niveau de production, le niveau de tolérance à la salinité, les économies d'eau réalisées grâce aux mécanismes stomataux qui réduisent l'évapotranspiration, et la capacité de supporter des températures élevées tout au long de l'année (NAS 1974). Ahmed (1977) et Bosshard (1966c) sont d'avis que l'horrible forme de la tige de toutes les espèces d'*E. microtheca*, à l'exception des espèces récemment introduites, dans les projets d'irrigation du Soudan est attribuable à la dégénérescence par consanguinité, qui tient au fait que toutes les graines remontent à un seul et même arbre. Cela prouve à quel point

il est important d'adopter des méthodes et des principes génétiques solidement établis avant de planter de nouvelles espèces, variétés ou provenances. Il en va de même de la confirmation d'importants écarts de provenance parmi les espèces d'*Eucalyptus* qui poussent sous irrigation au Niger (Barbier 1978 ; Delwaulle 1979) ainsi qu'au Soudan (Bosshard 1966c) et dans bien d'autres pays, comme l'a notamment mentionné Pryor (1953, 1970).

Lorsque l'eau d'irrigation est rare ou que son approvisionnement risque de diminuer ou même de cesser à tout moment, il est généralement prudent de choisir des espèces qui n'ont pas nécessairement le meilleur rendement au niveau du cubage, mais qui sont capables d'autres prouesses, notamment de mieux pousser dans des conditions d'irrigation sans pour autant arrêter de croître lorsque celle-ci cesse. L'une des espèces qui répond à ces critères est *A. nilotica*.

Tolérance à la saturation en eau et à la salinité

La tolérance des espèces végétales à la salinité et à la saturation en eau qui l'accompagne varie considérablement. On le constate par exemple dans les listes des espèces halophiles aux annexes 2 et 3, qui sont basées sur les essais réalisés par Firmin (1968) au Koweït, et par Boyko et Boyko (1968) en Israël. Les chercheurs australiens ont observé d'importantes variations entre diverses provenances d'*Eucalyptus*, y compris *E. camaldulensis*. Le sujet a été traité par Arar (1975) en ce qui concerne l'Arabie saoudite, et par Quraishi et Khan (1979) pour ce qui est du Pakistan. Kramer (1949) a noté que la tolérance varie selon la nature des ions. Yadav (1980) a fait l'inventaire de certaines espèces halophiles en Inde, dans son étude des traitements d'amélioration basés sur le gypse, l'azote, les engrais phosphatés et le fumier. Tomar et Yadav (1980) ont remarqué que la tolérance à l'égard des sels peut varier selon la phase de développement, c'est-à-dire depuis le semis jusqu'à l'arbre adulte proprement dit. Les plantes sensibles à la salinité sont appelées glycophytes, et celles qui la tolèrent, d'halophytes. Certaines halophytes accumulent des sels dans leurs tissus : citons à titre d'exemple *Salvadora persica*, *Tamarix aphylla*, *Melaleuca leucodendron* et le palmier doum.

La croissance des plantes peut être affectée par la salinité du sol, mais aussi par le sel accumulé sur les feuilles et les pousses ou, dans le cas d'une irrigation par aspersion, par l'emploi d'eau salée (voir le chapitre 3). Trois facteurs ayant trait aux solutés du sol peuvent influencer sur la croissance et le rendement dans des conditions salines ou alcalines :

- La réduction du potentiel hydrique du milieu de croissance (effet osmotique) touche directement la croissance de la plante ;
- L'accumulation de concentrations toxiques d'ions particuliers ou le déséquilibre des éléments nutritifs dans la plante (effet ionique spécifique) touche directement la croissance de la plante ; et
- La dégradation physique du sol résultant d'importantes concentrations de sodium échangeable (effet alcalin) touche indirectement la croissance de la plante.

De façon générale, les végétaux très sensibles à la salinité, dont bon nombre d'arbres à feuilles caduques, sont également affectés par une toxicité ionique spécifique. C'est ainsi qu'à concentration ionique égale, la salinité attribuable à des ions de sodium et de chlorure est plus nuisible pour ces espèces que

la salinité due à des ions de calcium et de sulfate. Les espèces plus tolérantes peuvent supporter des concentrations élevées de sel, peu importe les ions qui entrent en jeu. Dans ce cas, l'effet osmotique est le principal facteur qui influera sur leur croissance.

Les ions qui prédominent dans le sol sont le sodium, le calcium, le magnésium, les chlorures, les sulfates, les bicarbonates et les carbonates. La salinité provient le plus souvent d'une concentration de sodium et de chlorure de calcium et de sulfate. Le bicarbonate peut également être néfaste, tout comme de fortes concentrations d'autres ions tels que les nitrates contenus dans les engrais, ou une faible élévation de la teneur d'oligo-éléments particuliers comme le bore. La salinité engendre de nombreux symptômes analogues à ceux causés par la sécheresse : les plantes touchées sont plus petites et affichent un rapport racines/rejets plus faible ; les feuilles sont sous-développées, prennent une coloration bleu-vert foncé et, dans certains cas, présentent une nécrose et des brûlures.

Les sels peuvent nuire à la croissance des plantes de quatre manières : en réduisant l'apport d'eau, en bouleversant l'équilibre hormonal de la plante, en endommageant les cellules végétales et leurs composants, et en augmentant la respiration, ce qui a pour effet de réduire la photosynthèse. Les facteurs qui déterminent les niveaux de tolérance sont complexes. Selon les physiologistes, ces niveaux dépendent de la variabilité de la salinité et de l'exposition des plantes à cette dernière selon l'époque et la région, des conditions physico-chimiques du sol et des conditions climatiques (par exemple, les effets sont plus marqués lorsque la température est élevée et l'humidité de l'air faible que l'inverse). Dans la pratique, on peut réduire les effets de la salinité en sélectionnant les espèces et les variétés appropriées, en recourant à des méthodes d'irrigation et de traitement de l'eau qui empêchent une accumulation excessive de sel dans l'horizon racinaire et en lessivant les sels hors du sol avec de l'eau douce.

On se sert de quatre méthodes pour connaître les réactions des plantes à la salinité : étude de la salinité des sols par rapport au rendement des cultures ; expériences sur le terrain visant à comparer les niveaux de salinité, les fréquences et l'ampleur de l'irrigation ainsi que les intensités de lessivage par rapport à la croissance ; parcelles artificiellement salinées ; et enfin expériences en pot (Meiri et Shalhevet 1973).

Systèmes racinaires

Selon les données dont on dispose, il apparaît que l'agencement et le développement racinaires varient avant tout en fonction de l'espèce et qu'ils dépendent également des caractéristiques du profil pédologique ainsi que du régime hydrique du sol, après modification par l'irrigation. Certains chercheurs ont constaté, par exemple, que les citrus ont des systèmes racinaires peu profonds. Toutefois, cela signifie peut-être simplement que les racines ont tendance à réagir à la profondeur du sol et à pousser et à se développer dans ses zones humides ; dans les sols profonds, le système racinaire principal des citrus se situe d'ordinaire entre 0 et 90 cm alors que le reste peut atteindre une profondeur de 150 à 180 cm. Certains végétaux, comme bon nombre de plantes annuelles et, parmi les arbres du désert, *Acacia tortilis*, ont effectivement des systèmes racinaires peu profonds qui ne s'étendent pas au-delà de 30 à 50 cm, alors que d'autres dépassent le seuil des 300 cm.

Une mauvaise aération du sol limite la profondeur des systèmes racinaires, ce qui expliquerait que sur les terrasses fluviales qui longent le Niger, le système racinaire des jeunes arbres se forme mieux dans les sols légers que dans les sols lourds (Barbier et al. 1981). D'après Bielorai (1973), Bielorai et al. (1973) et Ali (1960), il est généralement possible de définir comme suit les rapports entre l'eau du sol, le développement des racines et le rendement :

- Une carence en eau du sol produit un volume racinaire relativement important et un faible rendement ;
- Une teneur en eau suffisante du sol va généralement de pair avec un volume racinaire modéré et un rendement élevé ; et
- Un excédent d'eau dans le sol provoque une mauvaise aération, un faible volume racinaire et un faible rendement.

On a constaté que, chez les citrus, 85 % à 90 % de l'apport d'eau total provient de la zone racinaire principale et seulement 10 % à 15 % des couches plus profondes (Bielorai et al. 1973). Dans une étude de Rawitz et al. (1966) qui a permis de déterminer le meilleur régime d'irrigation des peupliers dans le sol limoneux-sableux à limoneux d'une région d'Israël recevant 600 mm de précipitations, on a constaté que l'absorption d'eau était uniforme jusqu'à une profondeur de 120 cm, la répartition du total dans des couches successives de 30 cm à partir de la surface s'établissant à 32 %, 25 %, 26 % et 17 % respectivement. Dans ce cas, la distribution racinaire, attestée par son activité, a été relativement uniforme dans l'ensemble du profil.

Bosshard et Wunder (1966), en étudiant les systèmes racinaires des peuplements irrigués établis à Gézireh et dans la ceinture verte de Khartoum, caractérisés dans les deux cas par de larges rigoles entre les billons, ont effectué une série d'observations et émis des conclusions fort pertinentes après avoir déterré 140 systèmes racinaires représentant neuf espèces. En résumé, leurs conclusions étaient les suivantes :

- *Azadirachta indica* : système racinaire bien développé si l'irrigation n'est pas excessive, et mal formé dans le cas contraire.
- *Albizia lebbek* : bon système racinaire vigoureux de profondeur moyenne. La racine principale est absente si le développement des semis a lieu dans des pots en polythène.
- *Conocarpus lancifolius* : en cas de plantation sur terrain plat, les systèmes racinaires sont prolifiques, profonds et vigoureux. Dans les régions irriguées par rigoles, le système racinaire est moins profond et il est confiné aux billons.
- *Eucalyptus microtheca* : sur terrain plat, les systèmes racinaires sont profonds et vigoureux avec de longues racines. Dans les régions irriguées par rigoles, le système racinaire est généralement vigoureux mais moins profond, et il est confiné aux billons. Son développement peut être entravé par l'emploi de pots à semis en polythène.
- *Eucalyptus camaldulensis* : système racinaire relativement peu profond. Pas de racine principale à moins que les conditions de son développement soient favorables. Longues racines vigoureuses se confinant aux billons entre les rigoles. Certains indices de variation dans le développement des racines, selon la provenance de l'espèce.
- *Eucalyptus tereticornis* : système racinaire vigoureux avec racine principale de profondeur moyenne. Ces caractéristiques sont moins marquées en cas d'irrigation.

- *Eucalyptus gomphocephala* : système racinaire peu profond et faible dans les régions irriguées.
- *Eucalyptus rudis* : système racinaire bien développé mais peu profond.
- *Prosopis chilensis* (localement appelé *P. juliflora*): système racinaire vigoureux, profond et dense, caractéristique de certaines espèces xéro-philés.

Les deux chercheurs ont conclu de tout cela que, dans des conditions d'irrigation par rigoles, le système racinaire est long et étroit, conformément à la structure des billons. Les profondeurs maximums et moyennes diminuent, vraisemblablement à cause de la saturation en eau du sous-sol. Ces caractéristiques abaissent la résistance à la sécheresse et la stabilité au vent. On retrouve une situation parallèle avec *D. sissoo* et d'autres espèces dont l'irrigation se fait par tranchées dans la vallée de l'Indus, au Pakistan, ce que confirme la FAO (1969). La concentration des racines dans les billons entre les rigoles intensifie leur lutte pour les éléments nutritifs, et pour l'eau lorsque celle-ci est rare. Toutes les essences, et notamment les plus intéressantes (par exemple les deux premières espèces d'*Eucalyptus* dont il est question ci-dessus), sont extrêmement sensibles à une irrigation excessive. Comme l'indiquent les notes sur les espèces individuelles, ces conditions amènent un affaiblissement général de tout le système racinaire. Les auteurs recommandent l'adoption de méthodes d'irrigation associées à une implantation sur un sol plat, et non pas le long des billons dans une configuration billon-rigole, afin que les racines puissent se développer à l'horizontale dans toutes les directions. Si l'irrigation se fait par rigoles, il faut éviter une saturation générale à chaque apport, c'est-à-dire une irrigation excessive. Les calendriers d'irrigation doivent être adaptés aux conditions météorologiques, à la nature du sol, aux caractéristiques des espèces et à leur stade de développement. On prendra soin de ne pas repiquer du matériel dont le séjour dans des pots de polyéthylène a nui au développement des racines ; il faudra donc planifier la reproduction en pépinière en conséquence. Dans les régions irriguées par rigoles, l'éclaircie doit tenir compte du fait que la concurrence racinaire entre les arbres se fait le long des billons et non d'une rigole à l'autre.

Croissance des arbres et qualité du bois

L'influence de l'irrigation sur les propriétés et la qualité du bois n'est que très peu documentée, comme l'ont observé Nichols et Waring (1977).

Briskin et Murphy (1970) ont étudié les propriétés de spécimens de bois de *Pinus resinosa* âgés de 24 ans, après une irrigation de quatre ans à l'aide de 25 à 50 mm d'eaux usées par semaine, et constaté que le taux d'irrigation le plus faible produisait une augmentation marquée de la longueur et du diamètre tangentiel de la tranchéide et de l'épaisseur de la membrane cellulaire. Par contre, un taux supérieur n'a eu aucune incidence sur les dimensions de la tranchéide, alors qu'il diminuait de façon appréciable l'épaisseur de la membrane cellulaire.

Nichols et Waring (1977) ont étudié des spécimens de bois provenant d'un peuplement de *P. radiata* de 26 ans situé à 5 km à l'ouest de Canberra ; ce peuplement avait subi un régime d'irrigation supplémentaire et de sécheresse artificielle pendant 11 ans qui avait débuté alors que le peuplement poussait vigoureusement et s'apprêtait à terminer sa couronne. Ils ont constaté que la largeur annulaire augmentait avec une irrigation supplémentaire surtout en été

et en automne et diminuait après une sécheresse partielle au printemps. Aucun des deux traitements n'a semblé affecter la croissance spiralée du bois. La sécheresse partielle provoquait un stress hydrique grave tout au long de la période de végétation, augmentant la densité minimum et le ratio de bois final et réduisant la densité maximum. Par contre, étant plus efficace en été et en automne, l'irrigation produisait surtout une hausse de la densité maximum. L'intégration de ces éléments dans l'ensemble de la densité moyenne s'est soldée par une légère augmentation pour les deux traitements. Les changements mineurs constatés n'étaient pas censés avoir d'effet indésirable sur l'utilisation du bois. Les résultats ont généralement confirmé les conclusions d'une étude préalable menée par Nichols (1971) sur les mêmes espèces cultivées près d'Adelaïde, dans le sud de l'Australie, où les arbres poussent normalement dans des conditions de stress durant l'été. On a procédé à des apports d'eau supplémentaires à la cadence de 25 mm par semaine durant l'été et l'automne, ce qui a entraîné un accroissement notable du diamètre ainsi qu'une augmentation de la proportion des cellules à membrane épaisse associées à la croissance estivale et automnale.

Comme on l'a vu au chapitre 3, les essais empiriques menés sur 45 espèces sous irrigation dans le bas Veld du Zimbabwe portaient sur la densité basale et la longueur des fibres ainsi que sur le sciage, le séchage et le déroulage réalisés sur un seul spécimen de chacune des 15 espèces les plus prometteuses. La comparaison des propriétés d'utilisation et des normes générales d'utilisation du bois provenant des mêmes espèces cultivées en l'absence d'irrigation a révélé que ces matériaux se prêtaient bien au sciage, au déroulage et à la production de poteaux de transmission. On n'a pas noté d'écart significatif dans la densité basale et la longueur des fibres entre ce bois et celui cultivé dans des conditions normales. Qu'elles bénéficient ou non d'une irrigation, les espèces d'*Eucalyptus* passent généralement pour convenir particulièrement bien à la production de poteaux et également de bois de chauffage, les peupliers, comme billes de déroulage et pour la production de bois d'allumettes ; *D. sissoo* et *Anogeissus leiocarpus*, dans la composition de rideaux-abris et comme fourrage, et *Kaya senegalensis*, tout comme la plupart des espèces mentionnées plus haut, comme bois de sciage. *Acacia nilotica* passe pour convenir à tous ces différents usages (Barrett et Woodvine 1971).

Rentabilité socio-économique

Compte tenu du besoin de produits ligneux dans les régions arides et semi-arides, il n'en reste pas moins que la terre et l'eau nécessaires à leur production sous irrigation sont rares, et que les besoins agricoles reçoivent presque toujours la priorité. La balance ne penche pas non plus en faveur de l'usage des ressources de base pour la création de forêts pérennes pour la bonne raison que le bois de chauffage, principal produit extrait des plantations irriguées dans ces régions, est un bien bon marché. À vrai dire, dans certaines régions, comme en Afrique orientale et occidentale, la plupart des gens sont d'avis que le bois de chauffage n'a pas vraiment de valeur monétaire étant donné que, dans les forêts naturelles, c'est un don de Dieu. L'intérêt économique des plantations forestières irriguées prend bien sûr de l'ampleur lorsqu'elles produisent des poteaux de construction et autres, des billes de sciage, des fruits et du fourrage. Les politiques de tarification, qui sont sujettes à des changements périodiques et parfois soudains, peuvent modifier la conjoncture, comme c'est le

cas de la production actuellement lucrative de poteaux d'*Eucalyptus* que l'on semble préférer à la culture vivrière sur les terres agricoles irriguées de l'État indien du Gujarat (voir le chapitre 3 et la fin du présent chapitre).

Il n'est pas surprenant qu'à la lumière de certains des facteurs mentionnés plus haut, entre autres, on cherche de plus en plus à intégrer sous diverses formes les peuplements forestiers à l'agriculture irriguée. Malgré cela, les énormes problèmes d'approvisionnement en combustible ligneux, liés à l'épuisement des forêts naturelles et à la désertification, demeurent. L'agroforesterie, qui est la culture judicieuse d'arbres sur des parcelles de terre non agricoles, et l'utilisation polyvalente de l'eau sont fréquemment et très sérieusement citées comme de mauvaises stratégies de production du bois, et notamment de combustible ligneux. Les plantations par bouquets constitueraient l'un des éléments essentiels des stratégies de production dans un certain nombre de pays, notamment au Pakistan et au Soudan.

Lorsqu'on évalue la rentabilité économique des diverses utilisations des ressources de base rares afin de formuler une politique, il faut tenir compte des coûts non quantifiés tels que le coût véritable et total de l'eau, de la possibilité des effets à long terme, comme la salinisation artificielle qui provoque le déclin de la sylviculture et de l'agriculture, ainsi que des avantages indirects, par exemple lorsque les plantations irriguées réussissent à empêcher l'épuisement des forêts naturelles. Un autre facteur dont il faut parfois tenir compte, comme en Inde, est l'effet possible sur le marché de l'arrivée soudaine de vastes quantités de bois.

L'évaluation économique des options, qui vise à retenir la solution la plus pratique et la moins coûteuse par rapport aux avantages escomptés dans des conditions prévisibles, peut être basée sur le rendement hypothétique des facteurs de production (notamment ceux à caractère administratif) et des extrants que l'on n'atteint pas dans la réalité. Il est donc essentiel de faire preuve du plus grand réalisme possible et de tenir pleinement compte des risques et facteurs défavorables. Une façon d'y arriver consiste à analyser après coup la conception, la mise en œuvre, l'exploitation et la gestion d'un projet, ainsi que les marges de sécurité et la flexibilité. L'un des traits encourageants de la plupart de ces évaluations est l'optimisme qui s'en dégage malgré les erreurs et les omissions du passé : le succès, c'est-à-dire une issue économiquement favorable, est possible pourvu que l'on tire parti de certaines carences (Hagan et al. 1968 ; FAO 1972 ; CRDI 1981). Il peut être salutaire d'effectuer ces analyses, du moins partiellement, sur la base des unités d'eau nécessaires plutôt que sur une base monétaire.

Dans le contexte actuel, nous connaissons les résultats de certaines évaluations économiques de programmes de plantations irriguées, notamment celui des plantations de la Gézireh (Foggie 1967 ; Ali 1979) et celui des plantations gouvernementales du bassin de l'Indus (Lerche et Khan 1967). L'analyse économique de quelques-unes de ces dernières plantations revêt également de l'intérêt (Khan 1966) ; on mentionnera également l'analyse des plantations irriguées du bas Veld du Zimbabwe (Banks dans Barrett et Woodvine 1977) ; l'analyse des plantations agricoles irriguées du Gujarat (Gupta 1979) et des analyses non publiées de la BIRD relatives à des projets de développement au Niger (Hamel 1985).

Foggie (1967) a analysé l'énorme demande insatisfaite de bois dans la région desservie par le projet de la Gézireh. Il a constaté que l'ampleur et la régularité

de l'arrosage des plantations fluctuaient, la quantité d'eau appliquée étant très souvent bien inférieure à ce qu'aurait nécessité une croissance optimale, que la gestion manquait de réalisme à plusieurs autres égards et que les prix du bois étaient subventionnés. À son avis, sans tenir compte des avantages écologiques, si l'on remédiait aux carences précitées, les plantations procureraient un bénéfice, même avec un taux d'intérêt de 10 % sur le capital engagé, ce qui était déjà supérieur aux plus mauvaises récoltes agricoles. Si ces plantations pouvaient être administrées de manière à se rapprocher d'une productivité potentielle, le taux de rendement équivaldrait à celui des meilleures régions productrices de coton. Après avoir évalué la situation quelques années plus tard, Ali (1979) a conclu que les plantations en général étaient commercialement rentables, économiquement viables et socialement souhaitables. Il a analysé plusieurs ensembles de méthodes culturales, en comparant notamment les procédés de régénération par taillis et par semis et différents intervalles de révolution par rapport à des indices de localisation élevés, moyens et bas, pour ensuite indiquer ceux qui valoriseraient le rendement. Bayoumi (1976) a calculé que l'économie d'eau qui résulterait d'une diminution de l'évaporation associée à la plantation d'un réseau de rideaux-abris dans la région, sur une superficie équivalente à 8 400 hectares de plantations par bouquets (1,5 % de toute la superficie du projet), atteindrait environ 400 millions de mètres cubes par année, quantité suffisante pour irriguer 33 600 hectares supplémentaires de plantations de coton. Naturellement, on n'a pas encore compté le rendement des plantations sylvoles elles-mêmes.

Lerche et Khan (1967), qui ont analysé en profondeur l'aménagement et les performances économiques des plantations gouvernementales irriguées du bassin de l'Indus, ont conclu qu'en général leurs rendements se compareraient avantageusement avec ceux de l'agriculture, notamment en ce qui concerne les plantations de riz et de canne à sucre irriguées, sous réserve qu'on introduise un certain nombre de changements au niveau des techniques utilisées et de l'aménagement des plantations afin d'optimiser la production de bois, qu'on n'augmente pas l'arrosage et qu'on élimine certains petits bouquets de plantations non rentables. Khan (1966) a analysé les méthodes en cours d'utilisation de l'eau et en a conclu qu'on obtiendrait une très nette amélioration des résultats en modernisant le système et les méthodes d'organisation.

Pour ce qui est des perspectives des plantations irriguées le long du Niger, au Niger, Barbier (1978), après avoir analysé les résultats (ainsi que certaines des difficultés éprouvées) des premiers essais pratiqués sur des espèces d'*Eucalyptus* dans la région, a soutenu que la rentabilité économique d'une telle entreprise ne faisait aucun doute, pourvu qu'on disposât d'un système d'alimentation en eau efficace et peu coûteux et d'une superficie raisonnablement fertile et non saline. Six années plus tard, après plusieurs tentatives d'établissement d'un projet opérationnel dans la région, et en dépit des difficultés survenues, dont certaines ont entraîné des dépenses imprévues considérables, Jean Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, États-Unis, communication personnelle, 1984) a conclu qu'il était raisonnable de s'attendre à ce que les plantations forestières des basses terres aient un taux de rendement interne favorable de 10 %, équivalent à celui des plantations de riz irriguées, ou d'environ 5 % sur les terrasses fluviales moins propices, à la condition de maintenir les coûts de l'eau à un niveau relativement bas et de veiller à toujours se doter des techniques les plus efficaces. Cependant, Hamel (1985) a manifesté moins d'optimisme. Selon lui,

du moins jusqu'à l'épuisement des ressources locales en bois, l'évolution économique des plantations irriguées exigera leur intégration à la production agricole comme seul cheminement possible, compte tenu notamment de la nécessité de stimuler la participation et l'engagement des premiers intervenants, à savoir les gens eux-mêmes.

Dans une brève note complétant l'article de Barrett et Woodvine (1971), P.F. Banks a illustré le potentiel des plantations irriguées du bas Veld du sud-est du Zimbabwe dans l'économie régionale. Le bien-fondé des plantations irriguées d'essences à croissance rapide destinées à la production locale de bois de chauffage et de poteaux était considéré comme une question essentiellement interne dont les coûts et les avantages sont désormais connus. Toutefois, l'aménagement de plantations à vocation industrielle, destinées à produire par exemple des billes de sciage et de placage, du bois à pâte ou des poteaux de transmission, relève de considérations économiques plus générales. Les principales plantations à caractère industriel de la région sont situées à haute altitude, dans des zones à fortes précipitations qui alimentent en grande partie des bassins hydrographiques importants. Dans certains cas, cela a entraîné le confinement des plantations dans ces régions élevées très productives. La forte capacité de production de bois destiné à un usage local et industriel, dans un contexte beaucoup plus large, ne faisait aucun doute. Pour l'investisseur, les avantages économiques des plantations irriguées résidaient dans la courte durée des révolutions applicables et dans les rendements financiers supérieurs. Les coûts de production ne tenaient pas compte du coût élevé des mesures de protection anti-incendie et diminueraient encore plus par la formation rapide du couvert et par les conditions de travail relativement aisées sur les terrains plats des zones de plantation. Au nombre des inconvénients, il faut citer le coût élevé de la préparation du terrain à irriguer et de l'eau. La rentabilité économique des plantations irriguées dépend du rapport qui existe entre l'équilibre partiel de ces facteurs de coût d'une part et les hauts rendements associés aux révolutions brèves d'autre part. Une analyse a révélé que les coûts actualisés plus élevés par volume unitaire de bois produit dans les plantations irriguées à basse altitude seraient sans doute largement amortis par les rendements sensiblement plus élevés par unité de surface qu'elles procurent, par comparaison aux meilleures plantations soumises au même système de révolutions brèves dans les régions à haute altitude et à forte pluviosité. Les avantages économiques de la plantation d'étroits rideaux d'arbres dans des zones d'infiltration et le long des canaux d'irrigation, parmi la canne à sucre et d'autres cultures, ne font aucun doute puisque la nouvelle activité sylvicole ne nécessiterait à peu près aucun frais imputable à la construction de réseaux d'irrigation ou à l'alimentation en eau.

Dans son analyse financière d'une exploitation forestière de 65 hectares située à quelques kilomètres au sud d'Ahmedabad, dans le Gujarat, Gupta (1979) émet une opinion optimiste au sujet des rendements d'une éventuelle plantation irriguée d'*Eucalyptus* « hybrides » destinée à la production de poteaux. La zone de plantation servait autrefois à des cultures agricoles sur un sol limoneux-sableux à l'aide d'une eau d'irrigation légèrement saumâtre. La plantation a débuté en 1971 et les arbres ont été coupés ras à l'âge de cinq ans. D'après les premières indications, le premier peuplement de taillis a poussé apparemment plus vite que le semis initial. Il existait un marché ferme et assuré pour les poteaux. L'analyse était basée sur un semis et trois révolutions de taillis, d'une durée de cinq années chacune, même si l'on était d'avis que des révolu-

tions sur cinq taillis étaient possibles. Sans tenir compte de la valeur des terres, le taux de rendement financier (voir le chapitre 9) a été évalué à 129 % pour la première récolte et à 213 % pour chaque révolution sur taillis. En incluant la valeur des terres, les rendements sont passés respectivement à 36 % et à 61 %. Cela représente un rendement du capital et des coûts d'exploitation sensiblement plus élevés que ceux des cultures agricoles sur la même terre. Toutefois, la forte consommation d'eau de la production arboricole constituait l'un des inconvénients.

Pryor (1953) et Velcamp (s/d) sont arrivés à la conclusion que, dans les régions irriguées les moins fertiles de l'Iraq et de la vallée du Jourdain respectivement, les plantations de peupliers sont plus rentables que les cultures annuelles. Velcamp a prédit que cette tendance se généraliserait dans la vallée du Jourdain en raison des cultures maraîchères intensives qui s'y pratiquent pendant de longues périodes.

Tous ces analystes s'accordent pour dire que, moyennant certains critères importants d'aménagement, la sylviculture est économiquement rentable et même, dans certains cas, au moins aussi intéressante que certaines récoltes agricoles plus médiocres, et qu'elle équivaut parfois même aux meilleures d'entre elles. Un examen de ces analyses révèle clairement que, sous réserve de bons procédés techniques, les façons culturales demeurent les facteurs de production les plus importants sur le chapitre de la rentabilité et du succès. Beaucoup de pays en développement n'ont pas les techniciens requis pour exploiter des plantations forestières irriguées, ce qui explique principalement pourquoi, selon Hamel (1985), la pleine intégration des cultures arbustives et des cultures agricoles irriguées serait l'unique solution au Niger, et plus particulièrement au Sénégal. Il faudrait prendre certaines mesures pratiques, au moins au début, pour rendre l'arboriculture aussi intéressante aux yeux des agriculteurs que la culture du riz ou du sorgho. Les agriculteurs devront suivre des cours de formation et être appuyés par des services de vulgarisation. Dès la mise en place, il faudra qu'ils sachent clairement que leur participation dans ces activités serait on ne peut plus fondamentale. Comme toujours, pour que la stratégie aboutisse, il faudra confier à des spécialistes le soin d'évaluer les facteurs sociologiques d'importance, par exemple le régime foncier, les traditions et coutumes, les points de vue et les attentes des intéressés au sujet des récoltes, des animaux et, surtout, de la sylviculture. On tentera d'établir, par exemple, pourquoi ils ne pratiquent pas déjà la sylviculture, quelle expérience ils ont de ce type d'activité, les raisons du succès ou de l'échec de leurs efforts, et les essences qu'ils préfèrent, y compris en matière d'arbres fruitiers. Ces analyses sociologiques devront avoir lieu le plus tôt possible pour éviter, par exemple, de promouvoir et d'utiliser des essences inacceptables aux yeux des personnes intéressées. Si l'on veut inciter à l'autonomie dans ce domaine, il ne faut pas oublier que bien des gens, en particulier les paysans agriculteurs, n'ont pas l'habitude des projets nécessitant des investissements à long terme.

Critères décisionnels relatifs à la mise en place de plantations forestières

Les rubriques des différentes sections de ce chapitre constituent un répertoire de la plupart des critères décisionnels relatifs à l'exploitabilité des planta-

tions irriguées dans chaque cas particulier, qu'il s'agisse de peuplements uniformes ou de plantations intégrées à l'agriculture.

- *Existe-t-il une demande pour les produits et les sous-produits du bois ?* Bois de chauffage, poteaux, bois spéciaux, fourrage, fruits, tanin, miel, sériciculture, produits pharmaceutiques, aménagement écologique, fertilité et fixation du sol.
- *L'irrigation peut-elle jouer un rôle dans la production ?* Les arbres poussent-ils sans eau ? Leur croissance serait-elle supérieure dans des conditions d'irrigation ?
- *Dispose-t-on de la terre et de l'eau nécessaires ?* Qualité, quantité, fiabilité, coût et demandes concurrentes.
- *Le projet est-il techniquement réalisable ?* Irrigation et sylviculture.
- *Quel est l'impact sur l'environnement ?* Sur les terres, l'eau et la santé humaine.
- *L'irrigation est-elle socialement praticable ?* Régime foncier, environnement culturel relatif à la sylviculture et à l'irrigation, compétences administratives sur place.
- *Quelle est la rentabilité économique ?*

7. Aménagement des plantations irriguées

Formes et échelle des plantations irriguées

Beaucoup s'accordent à penser que les possibilités d'aménagement de nouvelles plantations forestières irriguées à grande échelle sont limitées. Cela tient au fait que les perspectives de rendement financier ne sont pas optimales, compte tenu du bas prix des matériaux produits après des révolutions sur plusieurs années et des coûts d'aménagement élevés que cela entraîne. Par ailleurs, les cultures à longue révolution comportent de plus gros risques que les cultures annuelles et, comme nous l'avons déjà vu, les besoins concurrents de l'agriculture sont généralement prioritaires. D'un autre côté, on avance des arguments économiques invoquant d'importants avantages non quantifiables ou une baisse prévisible majeure des coûts, comme c'est le cas avec la réutilisation des eaux industrielles, à l'appui de projets de plantations par bouquets à grande échelle. Chaque cas doit être jugé en fonction d'une analyse financière et économique réaliste.

L'intégration de la sylviculture à l'agriculture est intéressante à plusieurs égards. Cela signifie des critères d'aménagement moindres lorsqu'on tire parti de l'infrastructure nécessaire à l'agriculture ; cela incite également à une utilisation polyvalente de l'eau, maximise l'affectation des terrains sans pour autant réduire (bien au contraire, ils augmentent même souvent) les rendements annuels et enfin, favorise le rendement précoce des peuplements forestiers et valorise les avantages des projets essentiellement agricoles. Pour ce qui est des projets intéressants un grand nombre de petites exploitations, l'arboriculture doit être basée sur des initiatives individuelles à petite échelle. Il faut remarquer, cependant, que de tels programmes peuvent se solder par un échec en raison de l'extrême petitesse de leurs composants, ce handicap risquant de les affaiblir de plusieurs manières et d'engendrer trop facilement des effets catastrophiques.

L'agroforesterie n'est pas nécessairement synonyme de simplicité technique, et sa pratique complique quelque peu l'exploitation d'une ferme. Aussi, des directives s'imposent pour optimiser les applications de ce type de production, où l'élément ligneux peut revêtir plusieurs formes qui appellent des méthodes techniques très particulières. En même temps, le plan doit tenir compte du fait que dans un système mixte, un des éléments est prioritaire et il faut assurer la rotation des composants agricoles. En d'autres termes, les composants ligneux et leur gestion doivent être intégrés de manière cohérente. Il est nécessaire d'avoir recours à des projets pilotes pour optimiser et préciser les conceptions, la sélection des espèces et les méthodes sylvicoles.

Utilisation et occupation du sol

À l'exception probable de petits projets appartenant à des particuliers, à des sociétés ou même parfois à des organismes publics, l'utilisation et l'occupation du sol dans les projets d'irrigation revêtent une importance essentielle. En effet, ces deux concepts symbolisent les intérêts réels et à long terme des gens et comportent des considérations sociologiques délicates que l'on ne peut ignorer lorsqu'on planifie et réalise un projet d'irrigation. Glesinger (1960) a souligné que les principaux obstacles à la réussite des projets d'irrigation sont de nature sociologique, touchant, entre autres choses, le régime foncier et le morcellement des exploitations. Lorsqu'on planifie et administre un tel projet, il est indispensable de pleinement tenir compte du point de vue des gens à cet égard, ce qui entraîne normalement la participation de spécialistes qui établiront les paramètres sociologiques essentiels.

La mise sur pied d'un projet de plantation forestière irriguée, qu'il soit seul ou associé d'une façon quelconque à l'agriculture, nécessite des terres, des réserves d'eau et des dépenses d'équipement, l'apport de techniques et services complexes et l'acceptation d'un calendrier indéfini. Il faut, en outre, s'assurer d'un niveau de sécurité écologique élevé, que l'on peut atteindre par des mesures de contrôle techniques, notamment en prévenant la saturation et la salinisation du sol. Sans l'appui de ceux qui ont un intérêt fondamental, comme une certaine forme de propriété dans les terres en question, tous ces éléments de réussite sont mis en péril. Dans son analyse générale des facteurs de succès des programmes de foresterie en Inde, Swaminathan (1980) insiste sur le fait que la foresterie doit devenir une « activité populaire », et plus particulièrement la foresterie d'irrigation qui sera sans doute pratiquée fréquemment dans le cadre d'un programme quelconque d'agroforesterie. Le contrôle intégral que le gou-



Inspiré par un projet de réaménagement foncier financé par le CRDI près de chez lui, un agriculteur met en place un ou deux Prosopis dans chaque petit bassin irrigué, le long de la bordure sous le vent, pour protéger ses terres du sable éolien.

vernement exerce sur toutes les ressources hydriques d'Israël, comme l'explique Schechter (1977), ne pourrait être maintenu sans l'approbation active des habitants, qui se manifeste par une participation et des avantages. La volonté de participation des agriculteurs locaux constitue le critère de base dans la sélection des villages qui doivent œuvrer aux projets de plantations forestières irriguées associées à des cultures de plein champ près de N'Debougou, au Mali, dans le cadre d'un programme financé par le CRDI et visant à remédier à la grave pénurie locale de bois de chauffage et de poteaux.

Il faut reconnaître la réalité des régimes fonciers existants, des méthodes traditionnelles de rotation des cultures et des coutumes et des besoins relatifs au dépâturage du bétail domestique. Le moindre écart à ces coutumes oblige à la participation et à l'appui des personnes visées. La formulation, la planification, la mise en œuvre et la gestion efficaces des programmes d'irrigation tient déjà pleinement compte de ces aspects sociologiques ainsi que des facteurs techniques et économiques. On consulte les intéressés et on cherche à obtenir dès que possible leur appui de la manière et aux moments qui conviennent. Leurs préoccupations doivent faire partie intégrante des paramètres à surveiller pendant l'aménagement du projet.

Les remarques qui précèdent ne présupposent pas en principe l'inutilité d'investir dans les projets à grande échelle de plantations par bouquets, pourvu toutefois qu'ils soient bien conçus et qu'ils respectent certains critères économiques, techniques et sociologiques.

Études physiques et écologiques

La conception et la mise en œuvre des systèmes d'irrigation doit reposer sur des études pédologiques et des relevés topographiques détaillés. Avant de commencer, toutefois, il est nécessaire de connaître les conditions et les caractéristiques générales du terrain, telles qu'elles figurent sur les cartes à petite échelle (1 : 250 000 ou plus petit) qui fournissent les détails physiographiques, géographiques, écologiques et infrastructurels généraux. Pour ce qui est de l'infrastructure, il est prudent d'établir non seulement les caractéristiques existantes, mais également toute initiative prévue qui risque d'influer sur le projet. Les registres de propriété foncière, accompagnés des cartes et des plans pertinents, sont également riches en enseignement. Les données relatives aux études géologiques et pédologiques existantes sont intégrées à l'ensemble des informations de base. Dans bien des pays, ces études comportent des données importantes sur les caractéristiques générales du paysage et des eaux souterraines. On pourrait citer, à titre d'exemple, les données sur la salinité du sol et la qualité des couches aquifères salines peu profondes des régions karstiques du sud et du centre de l'Australie, qui sont analysées par Holmes et Colville (1970).

On a vu au chapitre 4 les caractéristiques topographiques et édaphiques qui jouent un rôle important dans la conception et la mise en œuvre des systèmes d'irrigation. Le lecteur voudra bien se reporter aux sections appropriées en même temps qu'il abordera l'analyse des études géologiques et topographiques qui suit.

Les études pédologiques recommandées par la FAO ainsi que dans l'aperçu de Yaron et Vink (1973) pour la conception et l'aménagement de projets d'irri-

gation agricole se font en trois étapes successives. (Les photographies aériennes sont particulièrement utiles pour les deux premières étapes.)

En premier lieu, on procède à un levé d'exploration à l'échelle de 1 : 100 000 ou 1 : 250 000 pour connaître les unités physiographiques et les associations des grands groupes de sols et des familles de sols, les familles pédologiques individuelles et les phases des associations et des familles de sols. Au cours de cette étape, on met en regard les unités pédologiques et les unités irrigables.

En deuxième lieu, on effectue une étude de faisabilité semi-détaillée à l'aide de cartes à l'échelle de 1 : 50 000 à 1 : 100 000 pour connaître les associations des séries pédologiques, les unités physiographiques, les séries pédologiques individuelles, les complexes et les types de sols et les phases d'association.

En troisième lieu, on passe à la phase de conception et d'exécution détaillées, l'échelle des cartes pouvant atteindre 1 : 2 000, afin de faire ressortir les séries, les types et les phases pédologiques ainsi que les courbes de niveaux à des intervalles d'un mètre ou moins.

Lors de la première ou de la deuxième étape, il est souvent utile de procéder à une évaluation écologique pour interpréter les caractéristiques physiographiques et topographiques, les indications des conditions physiques et chimiques ainsi que des conditions de drainage des sols en surface ou à faible profondeur et les indices fournis par les indicateurs végétaux tels que les halophytes et les glycophytes, c'est-à-dire les données qui pourront guider la conception des systèmes sylvoles du projet, et notamment la sélection des essences.

En ce qui concerne les relevés pédologiques semi-détaillés de faisabilité, l'échelle utilisée variera en fonction de la superficie de la région à l'étude et de la dimension de l'échantillon arpenté, probablement entre 5 % et 15 % selon l'étendue de la surface en cause. On tirera une série de cartes interprétatives de ces relevés afin de représenter les possibilités d'irrigation et d'amendement, la qualité du sol et le degré d'adaptation du sol aux divers types d'irrigation et de cultures.

Les relevés pédologiques détaillés nécessaires à la conception et à la mise en œuvre d'un projet n'ont pas besoin de toujours englober la totalité de la région, mais ils devront au moins prendre en compte les parties du terrain qui nécessitent un amendement ou un système d'irrigation spécial.

La hiérarchie des études et relevés décrits et le caractère détaillé des données recueillies peuvent paraître idéalisés. Cependant, le genre de problèmes qui surviennent une fois le système d'irrigation mis en place, et qui sont évoqués dans la documentation, nous laisse croire que les études et les évaluations du type décrit plus haut, qui ne figurent généralement pas pour plus que 2 % du budget total des préparatifs d'un système d'irrigation, ne sont pas superflues. Wood (1977) a fortement insisté sur l'importance d'une conception et d'une mise en œuvre globales des projets d'irrigation. Il est clair qu'un équipement coûteux conçu de manière analytique, systématique et réfléchi et résistant à l'usure du temps représente un investissement pleinement justifié. Enfin, les forestiers n'ont pas, de toute évidence, la formation technique nécessaire pour agir seuls en la matière : ils ont besoin de l'aide et de l'appui de pédologues et de spécialistes de l'irrigation.

Évaluation et aménagement des ressources en eau

Il va de soi que la conception et la mise en place d'un projet d'irrigation doivent être précédées d'une étude de la quantité, de la qualité et de la régularité des sources d'approvisionnement en eau. Le choix du meilleur système d'irrigation dépend, entre autres, d'une bonne évaluation des ressources hydriques disponibles (Buras 1973a). Il arrive parfois que l'on constate l'insuffisance des ressources en eau une fois la mise en œuvre commencée. Les raisons d'une telle situation sont généralement imprévisibles, mais comme les répercussions peuvent être néfastes au projet, on ne saurait trop souligner l'importance d'une extrême circonspection si le moindre doute vient à se poser à cet égard. Ce point est souvent abordé dans la documentation, tout comme le sont les cas d'absence de vérification des caractéristiques de l'alimentation en eau avant le lancement d'un projet.

On a vu au chapitre 3 un certain nombre de cas précis illustrant les caractéristiques propres à l'alimentation en eau d'irrigation et les études effectivement menées à ce sujet, notamment pour ce qui est du Mali, du Niger et du Zimbabwe. Selon Booher (1974), il importe de ne pas être tributaire d'un cours d'eau, dont le débit fluctue selon la saison. S'il faut procéder à un arrosage, par exemple à la main depuis une remorque, pendant un an ou deux après le semis pour amener les racines de l'arbre à atteindre les eaux souterraines, il convient de s'assurer de la présence d'un point d'eau à distance raisonnable du système racinaire ainsi que de la nature et de l'ampleur de ses fluctuations saisonnières.



*Exemple d'irrigation temporaire : un camion-citerne approvisionne des réservoirs tirés par des mulets, qui serviront à arroser une nouvelle plantation d'*Acacia cyanophylla* dans le centre de la Tunisie.*

Les données nécessaires à la planification et à l'aménagement du système d'alimentation d'un projet d'irrigation supposent une étude et une évaluation détaillées de la qualité et de la quantité d'eau, des variations saisonnières, diurnes et autres en matière d'accessibilité, de la fiabilité de la source à court et à long terme, des changements prévus en ce qui concerne les quantités, les sources ou les dispositifs futurs de distribution, et enfin les coûts.

Comme pour les relevés et évaluations pédologiques, les forestiers n'ont généralement pas la qualification voulue pour entreprendre seuls les analyses et les évaluations appropriées. Ils devront donc faire habituellement appel à des spécialistes, notamment durant les phases d'évaluation et de planification.

Buras (1973b) aborde plusieurs questions se rapportant à l'aménagement des systèmes d'alimentation en eau de surface et en eau souterraine. Les cours d'eau et les eaux souterraines, qui sont souvent captés et conservés dans des réservoirs, ne fluctuent pas seulement de façon saisonnière, mais également d'année en année, l'ampleur de ces variations étant plus réduite dans les régions tempérées que dans les régions arides. En zone aride, le débit d'un cours d'eau peut varier au cours d'une même année de plusieurs milliers de mètres cubes à la seconde à zéro, tout comme il peut le faire de la même façon d'une année à l'autre. Ces caractéristiques introduisent dans chaque cas un élément d'incertitude qui occasionne bien des problèmes de conception, y compris le besoin de prévoir les risques de pénurie.

Dans beaucoup de régions, les eaux souterraines alimentent presque en entier les systèmes d'irrigation ou de distribution d'usage industriel ou domestique. Caractéristique importante de ces ressources en eau, elles peuvent être exploitées de manière beaucoup plus progressive que les eaux de surface. Ainsi, on peut ajuster le débit d'un puits en fonction de la demande, de manière à profiter de la capacité de pompage quasi-totale pendant de longues périodes. Cela tranche sur les énormes investissements requis pour l'accroissement des réserves en eau de surface, qui exige des aménagements souvent conçus par nécessité pour répondre à la demande future et donc sous-utilisés pendant un certain temps.

L'aménagement des ressources hydriques souterraines vise à faire concorder l'offre avec la demande, ou vice-versa, tout en minimisant les risques de dégradation de la qualité et de la quantité de l'approvisionnement. Lorsqu'on exploite une nappe aquifère, l'un des concepts importants de l'aménagement consiste dans le « rendement sûr », qui correspond à la quantité que l'on peut extraire chaque année d'un bassin hydrogéologique sans dépasser sa capacité de recharge.

Au risque de se répéter, la conceptualisation, la conception et l'aménagement des systèmes d'alimentation en eau souterraine, à quelque échelle que ce soit, est un travail éminemment spécialisé qui nécessite la participation d'hydrologues.

Conception des exploitations irriguées

Systèmes d'irrigation et régimes d'arrosage

Le succès d'un système d'irrigation doit reposer sur les critères fondamentaux suivants : rendement économique optimal, parcimonie dans l'usage de l'eau

et maintien indéfini de la fertilité et de la productivité du terrain. La réalisation de ces objectifs dépend dans une large mesure de tous les aspects économiques, sociaux, physiques, chimiques et biologiques pertinents dont on aura tenu compte au moment de la conception. Étant donné que ces critères varient selon les cas, chaque système possède donc des caractéristiques qui lui sont propres. Par ailleurs, la conception ne serait pas complète sans un ensemble de directives et de calendriers détaillés concernant l'établissement et l'exploitation du système. En raison de la durée indéfinie du programme, le système doit être suffisamment flexible pour qu'on puisse l'adapter aux changements de techniques, de régimes culturaux et de calendriers d'irrigation qui surviennent presque inmanquablement au cours des ans. La conception est donc une tâche très complexe qui requiert la collaboration de spécialistes de différents domaines (Lerche et Khan 1967 ; Yaron et al. 1973 ; France s/d).

Avant de s'attaquer aux aspects techniques de la conception, il faut commencer par rassembler, analyser et évaluer l'ensemble des renseignements pertinents disponibles, soit :

- les possibilités d'action et le contexte socio-économique général, y compris les besoins prioritaires et complémentaires en ressources pédologiques et hydriques ;
- le milieu physique et l'infrastructure ;
- les données sur tous les paramètres climatiques pertinents, extrapolées au besoin des données recueillies dans les stations météorologiques voisines ;
- les caractéristiques géologiques et hydrologiques de la région et, notamment, de la zone d'alimentation en eau ;
- les renseignements à l'égard du sol, de l'eau du sol, de la topographie détaillée et du milieu écologique en cause ;
- des relevés et évaluations des ressources en eau, en particulier de leur quantité, de leur qualité et de leur fluctuation prévisible ;
- les données sur les matériaux et les effets bénéfiques que procurent les plantations forestières ;
- les caractéristiques générales du peuplement forestier projeté qui sont susceptibles d'influencer la conception du système d'irrigation, c'est-à-dire la disposition générale, les principales essences, le type d'aménagement sylvicole, la révolution et la récolte.

Il convient de choisir le mode d'irrigation d'après les caractéristiques, les avantages et les inconvénients que présente chaque système, eu égard aux conditions d'exploitation qui lui sont propres et à la nécessité d'économiser l'eau et de préserver la fertilité du sol (voir les chapitres 4 et 5).

Avant de passer à la conception du système d'alimentation et de distribution, il importe de déterminer l'ordre des opérations d'irrigation ainsi que les besoins d'eau de chaque section de la plantation (par exemple de chaque parcelle) durant la période d'arrosage maximal, de manière à établir correctement le débit et la capacité pour chaque partie du système.

L'évaluation des besoins d'irrigation sert à déterminer les quantités saisonnières et les apports de pointe que devra fournir le système. Elle tient compte des précipitations réelles, de la mise à contribution des eaux souterraines, des besoins de lessivage et de l'efficacité de l'irrigation. Pour concevoir un système d'irrigation et l'exploiter, il faut évaluer en détail les calendriers d'alimenta-

tion des champs ou des parcelles, en commençant par la plus petite unité d'irrigation, puis en passant aux blocs de parcelles, aux zones alimentées par chaque canal latéral et, enfin, aux zones alimentées par les canaux principaux. Cela suppose le calcul de trois paramètres particuliers : l'ampleur et la fréquence de l'irrigation de chaque parcelle pendant la période de végétation ; les calendriers d'irrigation pour chaque parcelle ; la conception et l'exploitation du système globale d'alimentation en eau.

En pratique, il s'agit d'amener le degré d'humidité du sol dans l'ensemble de l'horizon racinaire à sa capacité au champ, en procédant à des apports selon des taux et des fréquences qui empêchent le flétrissement ou, en cas d'irrigation localisée à l'eau salée, qui n'étendent pas les zones d'arrosage au-delà de profondeurs déterminées. Après la mise en œuvre des programmes d'irrigation, on aura toute latitude de les modifier et de les ajuster en se fondant sur une surveillance constante ainsi que sur des recherches et des essais appropriés.

Le système d'irrigation devrait être en mesure de distribuer les quantités d'eau requises en quelque point que ce soit pour peu qu'il dispose d'un contrôle précis du débit, que l'érosion du sol et les pertes par suintement soient maintenues à un minimum et que l'entretien et le désherbage ne présentent pas de difficulté. Il faut donc un système pratique qui puisse fonctionner sans recourir à une main-d'œuvre abondante.

La taille du dispositif d'irrigation est très variable. Si la plupart des ouvrages traitent de systèmes de grande envergure, France (1969) donne, pour sa part, des directives particulièrement utiles au sujet de la conception de petits systèmes d'irrigation par gravité à l'intention des agriculteurs et des petits groupes de propriétaires fonciers.

Dans les premiers stades de la conception, il faut déterminer si le système d'irrigation sera à découvert ou partiellement canalisé et quel type de revêtement employer. Ces éléments sont d'une grande importance, en raison de la nécessité d'économiser une eau rare et coûteuse et d'empêcher le suintement qui, outre la question de gaspillage, élève le niveau de la nappe phréatique et provoque une saturation en eau et une détérioration du sol due à la salinisation. Concernant le bassin de l'Indus, au Pakistan, Trout (1979) signale que 30 % à 50 % de l'eau qui circule dans la plupart des canaux sans revêtement n'atteint pas les terres à irriguer, d'où un apport excessif d'eau souterraine suivi d'une salinisation. Ces taux de perte sont d'ordinaire presque proportionnels au débit habituel du canal, inférieurs dans les canaux les plus utilisés et supérieurs dans les canaux élevés, outre qu'ils soient très sensibles aux changements de la profondeur du débit. Les fuites sont particulièrement abondantes dans la partie supérieure des berges, en raison de la présence de nombreux terriers de rongeurs et de nids d'insectes. Kramer (1949), Doneen (1972), Booher (1974), NAS (1974) et France (s/d) ont également souligné les effets néfastes du suintement.

Booher (1974) et NAS (1974) indiquent comment concevoir et choisir les soupapes d'admission, d'échappement, de dérivation, de retenue, à charnières et de réglage de débit, les événements, les vannes et les autres éléments pertinents.

La NAS (1974) conseille de concevoir, si possible, des systèmes d'alimentation combinant sources d'eau superficielle et souterraine. Elle indique, par ailleurs, que s'il est tout à fait convenable d'employer l'eau d'irrigation usée,

une méthode souvent pratiquée, il faut toutefois veiller à ce qu'elle ne soit pas salée.

De nombreux auteurs et maints exemples (dont certains sont mentionnés au chapitre 3) démontrent que presque tous les projets d'irrigation menés à bien comportent un dispositif de drainage qui permet d'éliminer l'excès d'eau souterraine causé par le suintement et le lessivage délibéré du sol. L'élévation du niveau de la nappe phréatique par suite d'une irrigation excessive ou du suintement de l'eau d'irrigation circulant dans des canaux sans revêtement rend le sol salin ou alcalin (voir, entre autres, Khatib 1971 ; Doneen 1972 ; Costin et Dooge 1973 ; Unesco 1974 ; Eckholm 1975). Doneen (1972) signale que les horizons imperméables qui se forment dans les sols lourds peuvent entraîner rapidement la formation de nappes phréatiques perchées et une condition semblable de salinité ou d'alcalinité. Il indique en outre que la nappe phréatique qui s'élève au-dessus de la zone argile alluvionnaire accumulée dans les horizons pédologiques inférieurs charrie avec elle du sel qui nuit à la croissance des plantes. Cet effet s'aggrave lorsque l'eau remonte à la surface par capillarité pour s'y évaporer. Étant donné que seule l'eau pure s'évapore, il s'agit là d'une véritable distillation qui dépose les sels dans le sol. Dan (1973) se sert des cas des vallées du Nil, du Tigre, de l'Euphrate et de l'Indus pour démontrer que les plaines d'inondation recueillent le limon fin en suspension dans l'eau qui provient des zones à fortes précipitations de leurs bassins versants et que ce limon, en nuisant au drainage, peut provoquer une augmentation de la salinité. Il est donc essentiel de bien planifier des systèmes de drainage qui préserveront la fertilité des sols, notamment celle des basses terres de ces vallées, faute de quoi il faudra prendre des mesures d'assainissement très coûteuses (Unesco 1974).

Selon Shalhevet (1973), il n'est pas nécessaire de recourir au drainage artificiel si le drainage naturel est satisfaisant ; c'est le cas lorsque le sol et les couches aquifères sont perméables ou que la nappe phréatique est très profonde. Par contre, il est préférable de prévoir un tel système si le potentiel de drainage naturel est restreint ou si l'on prévoit une montée du niveau de la nappe phréatique dans l'horizon racinaire. Trois facteurs principaux entrent en ligne de compte dans la conception d'un système de drainage.

Premièrement, la nappe phréatique permanente ou temporaire, bien que sa profondeur varie selon le sol ou le type de culture, devrait être normalement située entre 150 et 180 cm de la surface, en particulier s'il s'agit d'un sol à grain moyen sur lequel le suintement de sources extérieures et la percolation des précipitations risquent fort de provoquer une remontée suffisante de la nappe pour que se produisent capillarité et évaporation superficielle. Cette profondeur peut être moindre dans le cas de sols sablonneux ou argileux, mais doit être supérieure pour des sols limoneux. Cointepas (1968), Van Hoorn et al. (1968) et Arar (1975) soulignent à quel point la profondeur de la nappe phréatique peut être critique en Tunisie dans les endroits irrigués à l'eau saumâtre.

Deuxièmement, l'excès d'eau d'irrigation à éliminer dépend du degré de lessivage nécessaire pour empêcher la salinisation du sol, autrement dit du « besoin de lessivage » qui peut être calculé. Il convient aussi de tenir compte du lessivage causé par les précipitations.

Troisièmement, on peut mesurer les caractéristiques physiques du sol, surtout celles qui déterminent sa conductivité hydraulique.

Elgabaly (1971) recommande d'éviter tout suintement du sol, en posant des dispositifs efficaces et acceptables de drainage destinés à éliminer l'excès d'eau d'irrigation dans les 48 à 72 heures suivant l'arrosage.

Le plan du système comprendra des prescriptions et des instructions détaillées à propos du nivellement du terrain, de l'alimentation et de la distribution de l'eau, dont la disposition des calants et autres, ainsi que du réseau routier, caniveaux et ponts compris. Il faudra préparer la terre avec précision et beaucoup de soins, surtout si l'on utilise des rigoles ou des calants ; on veillera d'abord à ne pas compromettre la fertilité du sol en enlevant une trop grande partie des horizons supérieurs, ce qui exposerait un sous-sol salin, graveleux, dense, infertile ou imperméable ou le rapprocherait trop de la surface nivelée. À cet effet, des relevés topographiques détaillés et précis permettront de choisir les pentes que l'on pourra niveler à moindres frais et d'équilibrer judicieusement les excavations et les remblais que suppose tout travail de terrassement. Il faudra en outre veiller à ce que la pente et le compactage de la surface nivelée soient uniformes afin d'assurer une percolation et un arrosage égaux.

Systemes et régimes sylvicoles

Le choix d'un système sylvicole et des régimes d'aménagement qui seront appliqués repose sur quatre ensembles de facteurs. Ce sont : les produits ou les effets escomptés ; le milieu d'affectation du sol et les facteurs socio-économiques qui s'y rattachent ; le besoin d'optimiser les rendements économiques au moyen d'une gestion efficace et d'une diminution des coûts d'investissement et d'exploitation ; et enfin les contraintes ou les possibilités propres aux facteurs écologiques prédominants.

Une plantation forestière à but récréatif ou écologique peut comporter des arbres isolés, groupés ou disposés en rangées ou des rideaux-abris constitués de deux rangées d'arbres ou plus, souvent intégrés à d'autres utilisations du sol. Si l'objectif principal est la production de bois de chauffage, de poteaux ou de bois d'œuvre, peut-être en combinaison avec du fourrage, la plantation peut être aménagée selon une des configurations précédentes ou par bouquets, si les modes de culture associées et les conditions économiques s'y prêtent. Les plantations irriguées prennent souvent la forme soit de rideaux-abris, soit de plantations par bouquets. Dans leur projet d'utiliser les eaux usées municipales pour irriguer les cultures agricoles au Koweït, Wood et Synott (1978) donnent un exemple de programme qui allie ces deux formes de plantations : des plantations denses d'*Eucalyptus camaldulensis* où les arbres espacés de 4 m × 4 m sont destinés à produire du bois (combustible, poteaux, etc.) selon une révolution de 10 à 15 ans ; quatre rangées d'arbres situées à 20 m l'une de l'autre, à l'intérieur desquelles les arbres, plantés à 4 m d'intervalle, servent à protéger l'environnement près des zones urbaines et industrielles ; enfin, des rideaux-abris de trois à quatre rangées d'arbres à 2 m de distance destinés à protéger les cultures agricoles et horticoles.

Nous avons parlé au chapitre 3 des plantations forestières intégrées à une agriculture prépondérante, aux États-Unis et au Soudan. Concernant la demande de bois de chauffage et de poteaux et le besoin d'améliorer le paysage au Soudan, Foggie (1967) suggérait de planter 7 560 km de rideaux-abris supplémentaires et insistait sur les avantages qu'ils procureraient aux agriculteurs participants. La région de la Gézireh fournit des exemples de l'influence des autres formes

d'utilisation du sol sur la nature des plantations forestières, établies en l'occurrence sur des bandes ou des lopins de terre incultes. On signale des cas similaires au sujet des plantations irriguées de N'Debougou, au Mali (CRDI 1981) et près de Niamey, au Niger (Barbier et Louppe 1980; Hamel 1985). Le chapitre 3 fait mention d'agriculteurs pakistanais qui se servent de plantations par bouquets d'*Acacia nilotica* pour améliorer leurs terres.

Selon plusieurs experts, il importe de concevoir des systèmes sylvicoles qui soient faciles à gérer et dont les coûts d'investissement et d'exploitation soient raisonnables, tout en procurant des rendements optimaux. À cet égard, Khat-tack (1976) nous met en garde contre le remplacement inconsidéré d'espèces productives polyvalentes telles que *A. nilotica* par des espèces comme *Prosopis juliflora* et *Prosopis glandulosa*, difficiles à cultiver et susceptibles de devenir des plantes adventices. Ali (1979) illustre à ce propos les avantages relatifs des techniques du semis et de la régénération par taillis.

Le choix d'un système sylvicole, plus ou moins imposé par la culture agricole prédominante, influence à son tour la sélection des espèces, des régimes et des méthodes. Il faut soigneusement choisir les espèces en fonction de l'emplacement et des conditions d'aménagement, de façon à obtenir des rendements optimaux compte tenu des objectifs établis (Laurie 1974). Ainsi, Lerche et Khan (1967) mentionnent que, dans certaines parties du nord du bassin de l'Indus, on favoriserait la culture des peupliers, qui est deux fois plus rentable que celle des espèces *Eucalyptus*, pourvu que les conditions de marché s'y prêtent. Par ailleurs, dans les zones vraiment tropicales, par exemple dans les basses terres du bassin de l'Indus, on plante à tort *Dalbergia sissoo* qui a pourtant besoin d'une période de dormance annuelle, alors qu'on cultive des provenances inadéquates d'*A. nilotica* dans les hautes terres du même bassin où leur croissance risque d'être compromise par le gel (voir le chapitre 6). Ces initiatives malheureuses ne contribuent évidemment pas à la production d'un cubage maximum. La plupart des espèces *Albizia*, *Azadirachta indica* et *Terminalia* ne fournissent pas habituellement un cubage optimal, parce que leur couronne étalée traditionnelle a tendance à réduire le matériel sur pied et, par conséquent, la production de bois. Elles pourraient cependant convenir là où l'on attache une grande importance à l'ombrage et à l'agrément.

On favorise habituellement le régime du taillis, surtout dans les endroits où la culture des *Eucalyptus* donne les résultats escomptés, car il permet d'éviter les coûts de plantation tant qu'il est possible d'effectuer des coupes de rajeunissement. Laurie (1974) et Gupta (1979) signalent que les rendements de la première révolution sur taillis sont habituellement supérieurs à ceux obtenus suite à une révolution sur semis et qu'en outre, la forme des arbres est plus satisfaisante. Les rendements de la deuxième révolution sur taillis sont au moins égaux à ceux de la révolution sur semis. Dans le bassin de l'Indus, des peuplements de *D. sissoo* exploités selon le régime du taillis-sous-futaie à deux étages sont monnaie courante depuis de nombreuses années. Ils servent à produire du bois de chauffage et des poteaux, après des révolutions sur taillis de 20 ans, et du précieux bois de rose à scier provenant d'arbres de haute tige obtenus à la suite d'une révolution de 60 ans. Ce système procure cependant des rendements sous-optimaux en raison du taux d'occupation restreint du sol pendant presque toute la révolution. Du reste, il est complexe et difficile à gérer, principalement parce que les larges cimes des arbres de haute tige empêchent la croissance d'une grande partie du taillis. En outre, beaucoup d'arbres, surtout

lorsqu'ils sont irrigués par rigoles — ce qui est très courant — souffrent d'une maladie racinaire ou sont déracinés bien avant d'atteindre l'âge d'exploitabilité. Par contre, on peut mener à bien le régime du taillis-sous-futaie avec *Eucalyptus* et d'autres espèces dont les cimes sont plus étroites ou moins ombreuses et qui atteignent l'âge d'exploitabilité bien avant 60 ans. Dans le bassin de l'Indus, on s'adonne aussi depuis longtemps à la sylviculture mixte à un ou deux étages de *D. sissoo* et *Morus alba*.

Toutefois, les peuplements mixtes, notamment lorsqu'on cultive *D. sissoo* selon le régime du taillis-sous-futaie déjà mentionné, sont peu favorables à la seconde espèce et donnent souvent de mauvais résultats. Les mélanges d'espèces signifient souvent une diminution du rendement global (Lerche et Khan 1967) et ce, même si l'une des deux espèces est une essence d'ombre (*M. alba*) et l'autre (*D. sissoo*), une essence de lumière (Ali 1962). La sylviculture mixte est difficile à gérer pour plusieurs raisons, dont le fait que, comme dans le cas du mélange *M. alba* et *D. sissoo*, chacune des espèces a un taux de croissance qui lui est propre (Hakim 1951). Selon Khattack (1976), on tend actuellement à simplifier la plantation en convertissant les peuplements mixtes en peuplements homogènes équiennes.

Lerche et Khan (1967) ont étudié les rendements de plantations de *D. sissoo* aménagées selon les modes d'espacement désormais usuels. Après examen des diverses possibilités, ils ont confirmé l'incidence de la durée de la révolution sur la production de matériaux requis et sur les rendements globaux. Ils ont notamment établi que la coupe d'éclaircie normalement effectuée tous les cinq ou six ans était ordinairement assez importante pour dégarnir le terrain pendant le reste de la révolution, avec comme conséquence des rendements inférieurs à la capacité de production de la plantation. Il importe donc de combiner avec soin les régimes de coupe d'éclaircie en fonction de la révolution afin d'assurer un rendement maximal (Lerche et Khan 1967 ; Sheikh et Raza-ul-Haq 1982a).

L'espacement initial et la vitesse à laquelle le couvert forestier se constitue et élimine par conséquent les herbes et les plantes adventices dont la croissance est favorisée par l'irrigation influencent également le taux d'occupation optimal de l'emplacement pendant toute la révolution. Ce taux peut également varier par l'introduction inconsidérée d'arbres et d'espèces arbustives qui deviennent des plantes adventices. C'est ainsi le cas de *M. alba* que l'on a mentionné auparavant.

Lorsque la sylviculture est intégrée à l'agriculture, ces deux formes de production peuvent exercer une influence considérable l'une sur l'autre. Les exemples de l'effet positif des rideaux-abris sur les conditions de croissance des cultures agricoles abondent. À défaut de mesures appropriées, la sylviculture a habituellement un effet néfaste sur les cultures de plein champ situées à proximité, contrebalancé toutefois par l'effet bénéfique des rideaux-abris sur la région en général. Ainsi, les agriculteurs indiens signalent à peu près tous que la baisse de rendement des rangs proches des rideaux-abris est largement compensée par la valeur du bois d'oeuvre ou du fourrage, ou des deux, tirés des arbres. Du reste, on peut facilement corriger cet effet en laissant un sillon à découvert entre la plantation forestière et la culture annuelle (Barbier et Louppe 1980 ; M.I. Sheikh, Institut forestier du Pakistan, Peshawar, Pakistan, communication personnelle, 1983). Khan (1966d) et la FAO (1969), lors d'essais menés pen-

dant le projet de la Gézireh, au Soudan, ont signalé un certain ralentissement de la croissance des arbres pendant la première année en raison de la concurrence avec les cultures de sorgho, de maïs et d'herbages adjacentes ; on ne put toutefois mesurer ces effets par la suite.

Pour ce qui est des systèmes agroforestiers, les cultures intercalaires comprenant arbres et cultures annuelles ou bisannuelles n'entraînent qu'une interaction partielle entre les arbres, sans fermeture du couvert forestier. Les arbres sont habituellement espacés de façon à agir davantage sur les cultures agricoles qu'entre eux. La production totale d'un bon système agroforestier est supérieure à celle de ses composants pris séparément, parce que les arbres et les cultures agricoles occupent et exploitent normalement de diverses manières ou à des degrés divers des parties différentes de l'environnement aérien ou souterrain.

Lors de l'établissement des systèmes agroforestiers, on devrait, dans la mesure du possible, permettre à l'agriculteur de maximiser le rendement de la culture sylvicole ou de la culture agricole annuelle. Il pourrait ainsi obtenir rapidement un rendement optimum d'une plantation forestière très dense cultivée selon de courtes révolutions. Par contre, si les arbres sont très espacés, les cultures annuelles procureront habituellement l'avantage précité. N'oublions pas que les agriculteurs ont généralement besoin de rendements à la fois élevés et hâtifs (Hamel 1985).

Il est préférable d'exploiter une plantation forestière et de choisir le système sylvicole en fonction du régime agricole auquel on veut les intégrer. Prenons l'exemple des techniques forestières mises au point dans les plantations de N'Debougou, au Mali, dont il est question au chapitre 3. En effet, on y effectue actuellement des recherches visant à établir la plantation après la pleine saison agricole, au lieu de les faire coïncider, tout en la faisant correspondre avec le cycle saisonnier des crues fluviales ainsi que l'élévation et la baisse de la nappe phréatique.

Les caractéristiques de la méthode d'irrigation peuvent entraver la croissance et le développement des plantations forestières. Il convient donc d'en tenir compte au moment de concevoir l'un ou l'autre ou les deux systèmes. Ainsi, comme on l'indique au chapitre 6, l'irrigation par rigoles est susceptible de déformer les systèmes racinaires et de les rendre plus ou moins linéaires dans le plan horizontal, ce qui provoque parfois la déformation des tiges ou le déracinement des arbres. Par ailleurs, les systèmes d'irrigation localisée peuvent limiter la résistance des arbres au vent si la zone d'arrosage restreint celle du système racinaire ou si un arrosage excessif continu empêche le développement du système racinaire en profondeur.

Lorsqu'il y a saturation en eau ou que le sol est utilisé depuis plusieurs décennies, les arbres des plantations irriguées, par exemple *D. sissoo*, au Pakistan, seront enclins à souffrir d'une maladie racinaire. Cet état s'aggrave si le système racinaire du matériel de reproduction en pépinière est endommagé ou déformé. Un arrosage excessif peut nuire autant à la croissance des arbres qu'un apport d'eau insuffisant ; l'alternance des deux est souvent fatale. Selon Lerche et Khan (1967), la superficie cultivée ne devrait donc jamais dépasser la capacité du système d'alimentation en eau.

8. Mise en œuvre et production

Installation des systèmes d'irrigation et de drainage

Aussi exhaustive et rationnelle que soit sa conception, un système d'irrigation ne fonctionnera efficacement à long terme que si son installation a été réalisée avec soin et précision. Essentiellement, les éléments techniques et la construction doivent assurer un contrôle et un fonctionnement faciles et, avant tout, un débit uniforme et une distribution d'eau répondant aux besoins avec un minimum d'interruptions imprévues. Une exploitation efficace exige également que le système de drainage élimine rapidement l'excès d'eau du sol, que ce soit de façon naturelle ou par un lessivage délibéré. Bien qu'une conception pratique et judicieuse et une alimentation en eau sûre et fiable soient des éléments essentiels, elles ne caractérisent pas toutes les exploitations. Ainsi, Wood (1977) souligne les limites que peut imposer une méthode peu rigoureuse d'aménagement des plantations irriguées. Il est par ailleurs question, au chapitre 3, de la réalisation d'un projet de recherche appliquée sur le Niger qui a piétiné pendant deux ans à cause de l'absence d'une alimentation fiable en eau ; l'arrosage insuffisant y a entraîné l'échec de 50 % des plantations au cours des deux premières saisons (BIRD 1982).

Pour que le débit soit uniforme, les structures de distribution et d'alimentation en eau à ciel ouvert doivent présenter une pente et des dimensions en coupe transversale également uniformes. Une variation de l'inclinaison des canalisations est acceptable dans la mesure où elle ne provoque pas une pression hydrostatique supérieure aux pressions de service pour lesquelles les conduites ont été conçues. Il importe que la déclivité des canaux sans revêtement ne soit pas prononcée au point d'entraîner l'érosion du sol. Il convient d'implanter des rideaux-abris lorsqu'il est nécessaire de protéger les canaux de l'envasement par le sable éolien. Les berges doivent être stabilisées. Cette mesure a un triple effet : porter à leur maximum le débit et le stockage à l'intérieur des canaux, réduire la surface d'évaporation et entraver partiellement la croissance des plantes adventices. Les coûts d'entretien et d'élimination des plantes adventices dans les canaux sans revêtement sont toujours élevés et il est souhaitable de prendre toutes les mesures réalisables pour les réduire. Les fuites et les débordements des canalisations et des canaux favorisent la croissance de la végétation adventice. Les canaux à ciel ouvert assurent en outre la dispersion des semences de ces mauvaises herbes dans tout le système. L'eau des canaux qui se répartit directement dans les parcelles doit s'écouler à un niveau plus élevé que la surface à irriguer. Par conséquent, les canaux doivent être dotés de berges suffisamment élevées ou être creusés dans des digues surélevées.

Dans les systèmes d'irrigation par gravité, la distribution de l'eau est contrôlée par la surface même du sol plutôt que par des dispositifs mécaniques.

Ainsi, l'étape fondamentale la plus importante de la construction d'un système d'irrigation de surface par gravité, et même de tout système d'irrigation de surface, est sans conteste le nivellement du terrain. Cette tâche absorbe une grande part de l'investissement initial et, tout particulièrement dans le cas des cultures vivaces, les défauts sont difficiles à corriger une fois le système en service. Dans un système bien conçu, la surface nivelée ne doit pas trop s'écarter de l'inclinaison naturelle du terrain. Booher (1974) et Rawitz (1973b) donnent les principes de base du nivellement d'un terrain.

Dans le bassin de l'Indus, le nivellement du terrain est souvent suivi d'une irrigation d'essai de toute la surface de la parcelle, suivie à son tour d'un nivellement et d'un compactage des zones consolidées et affaissées. On répète ce cycle jusqu'à l'obtention d'une surface nivelée uniformément consolidée. Ce n'est qu'à ce moment qu'on entreprend la sylviculture. Selon Kramer (1949), Doneen (1972) et Ahmad (1975), il importe d'éviter les zones basses où se forment des mares ainsi que les zones élevées qui reçoivent moins d'eau. Il est pratiquement impossible de corriger les niveaux une fois le peuplement forestier en place. Les tuyaux de drainage souterrain doivent être installés après le nivellement final, mais avant les derniers travaux d'aplanissement et de compactage de la surface ; Shalhevet (1973), Van Hoorn et al. (1968) ainsi que Cointepas (1968) proposent des moyens de déterminer les espacements et la profondeur de ces canaux d'écoulement.

Les rigoles des systèmes d'irrigation par gravité ou les canalisations des systèmes d'irrigation localisée sont parfois aménagées en terrain accidenté (terrasses fluviales par exemple) après un nivellement minimal, et parfois sans aucun nivellement préalable, afin de restreindre les coûts de déplacement de la terre. Jean Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., communication personnelle, 1984) indique que, du fait de l'irrégularité du relief et par conséquent de l'utilisation d'une partie seulement des terres, cette méthode peut entraîner le gaspillage d'un terrain qui serait autrement utile et nuire au travail, pour finalement causer une augmentation des coûts par unité de terre irriguée.

Implantation des arbres et soins cultureux

De nombreux documents et ouvrages de sylviculture traitent de l'implantation des arbres et des techniques de soins cultureux ; aussi, il est inutile d'en faire ici un compte rendu détaillé. Il convient toutefois de souligner certaines particularités ou techniques qui contribuent à la réussite de l'adaptation à la culture en terrain irrigué.

Production de pépinière

Pour que des plantations tirent immédiatement le maximum de profit de l'irrigation, le matériel de reproduction en pépinière doit être d'une taille appropriée selon les espèces, ne pas avoir atteint un trop grand degré de maturité, être très bien formé, vigoureux et doté d'un système racinaire fasciculé bien développé dont les racines ne sont pas enroulées, malformées, malades ni endommagées.

La condition physiologique des plants doit permettre à ces derniers de croître vigoureusement dès qu'ils sont repiqués. L'exploitation d'une pépinière doit viser la production d'un matériel de reproduction conforme aux caractéristiques pré-

déterminées à la date normale de plantation, qu'il s'agisse de semis, de plants repiqués, de boutures de racines ou de boutures racinées. Les régimes culturaux doivent donc être élaborés en conséquence et comprendre l'élimination des plants qui ne sont pas conformes aux normes. Il importe avant tout d'éviter la stagnation de semis dans le récipient ou la planche de pépinière. On ne doit en aucun cas conserver à la pépinière des plants de trop petite taille pour tenter de les faire croître normalement ; il faut plutôt les considérer comme des rebuts et les rejeter. Souvent, on garde les plants trop longtemps à la pépinière et ceux-ci ne sont plus dans un état convenable au moment de la plantation. C'est ainsi qu'après avoir réalisé dans la plantation de la Gérizeh, au Soudan, des essais sur *Eucalyptus microtheca* visant à déterminer l'état optimum d'un plant lors de la plantation, Ahmed (1977) a établi une série d'instructions relatives au matériel de reproduction en pépinière.

Dans les régions arides, les plants doivent avoir au moins 30 cm de haut au moment de leur plantation en pleine terre. Des plants plus petits seraient trop facilement endommagés par le sable éolien, le sel (lorsqu'il y a lieu), les petits animaux qui broutent et les sauterelles.

On produit rarement un matériel de reproduction en pépinière de bonne qualité dans des récipients dont la partie inférieure est fermée, à cause de la saturation en eau et du manque d'aération au fond du pot. En outre, les racines s'enroulent très tôt dans la partie inférieure du récipient. Il faut apporter un soin tout particulier au choix d'un mélange de terre qui ne se désagrège pas trop facilement ou qui ne durcisse pas excessivement autour des racines ; il importe également de transporter avec beaucoup de précaution le pot jusqu'à l'emplacement de plantation, d'utiliser un tube ouvert à son extrémité inférieure et de tailler les racines qui dépassent à intervalles réguliers. Cette mesure est pratique courante, par exemple au Soudan (Ahmed 1977) et en Iraq (Pryor 1953). Cette manière de cultiver les plants favorise le développement d'un système racinaire fasciculé qui peut être conservé dans un état physiologique vigoureux. Elle permet également d'éviter d'endommager le système racinaire et de le prédisposer aux maladies auxquelles l'expose souvent un milieu irrigué.

Dans les régions chaudes et dans les pépinières où le sol tend à être salin, l'arrosage doit être effectué de façon à éviter la formation d'une croûte de sel à la surface du sol. Ainsi, lorsque des planches de pépinière sont soumises à une irrigation par inondation, il faut s'assurer d'inonder suffisamment les récipients pour que la surface du sol soit couverte d'eau afin d'éviter qu'une accumulation de sel dans la partie supérieure des pots ne vienne endommager les plants. Pour prévenir la saturation du sol en eau, un bon drainage de la terre des pots et des planches est essentiel (Laurie 1974 ; Wood et al. 1975).

La terre d'emportage comprend généralement des matières végétales pourries ou du fumier (Pryor 1953 ; Wood et al. 1975). Il importe de tester soigneusement les traitements aux engrais et de déterminer leur efficacité avant d'en faire une application générale : l'azote, par exemple, peut être mortel pour les semis dans certaines conditions (FAO 1969). De même, dans les régions arides, on protège généralement les planches de pépinière des vents secs et du sable qu'ils entraînent en posant des grillages autour des groupes de planches et des sections dispersées. Les pots ou les tubes de polyéthylène exposent les plants aux dommages qu'infligent les températures élevées du côté des récipients exposés au soleil dans les régions chaudes. Wood et al. (1975) recommandent comme

remède de placer des levées de terre contre les pots extérieurs dans les secteurs de repiquage.

Préparation de l'emplacement des plants : espacement

La méthode traditionnelle de préparation des terrains de plantation, utilisée dans les projets de la Gézireh et de la ceinture verte de Khartoum, au Soudan, consiste à former une série de larges billons bas écartés de 2,7 m à l'aide d'une lourde charrue à tracteur ; la hauteur séparant le sommet et le creux des larges rigoles d'irrigation est d'environ 60 cm (FAO 1969 ; Laurie 1974 ; Jackson 1976). Foggie (1967) fait observer qu'il est souhaitable, pour obtenir une irrigation uniforme, de niveler les secteurs de plantation avant de les labourer et de les billonner. L'expérience pakistanaise (M.I. Sheikh, Institut forestier du Pakistan, Peshawar, Pakistan, communication personnelle, 1974) démontre également qu'il importe de commencer l'installation par un bon nivellement du terrain. Jean Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., communication personnelle, 1984) mentionne la difficulté d'aménager des plantations irriguées dans les terrasses fluviales non nivelées du Niger. Dans le bassin de l'Indus, au Pakistan, où l'irrigation se faisait traditionnellement à l'aide de rigoles à côtés verticaux de 20 à 30 cm de profondeur et espacées de 3 m, la préparation du secteur de plantation, après nivellement, consistait à pratiquer des entailles à mi-chemin des côtés des rigoles afin de créer des plateaux destinés à recevoir les plants. Là comme au Soudan, on a observé que les plants mis en terre trop près des rigoles avaient des systèmes racinaires mal formés et que les arbres qui en résultaient étaient inclinés et facilement déracinés par le vent.

Lors d'essais d'irrigation à l'aide d'effluents d'eaux usées et d'eaux résiduaires non traitées au Koweït, on a creusé des tranchées larges de 0,8 m, profondes de 1 m et espacées de 6 m ou encore des potets de 1 m³ là où les arbres étaient plantés à une grande distance les uns des autres. Pour réduire les dommages causés par le vent aux plants repiqués, ces tranchées et ces potets n'étaient pas complètement remplis de terre au moment de la plantation : on empilait le reste de la terre du côté nord-est, c'est-à-dire du côté exposé au vent. Dans d'autres cas, on labourait peu profondément la terre après l'avoir scarifiée jusqu'à une profondeur de 1 m, selon l'espacement prévu pour la plantation (Firmin 1971).

Khan (1966b) décrit un autre cas spécial d'implantation d'*Acacia nilotica*, semé dans les plaines alluviales du Nil Blanc. Parce qu'elles sont saisonnières, il est possible de prévoir la période et la hauteur des crues. La formation de billons parallèles à la direction d'abaissement du niveau des eaux de crues et dépassant d'au moins 30 cm le niveau de hautes eaux s'est révélée satisfaisante, bien que des billons de 45 ou 60 cm donnent de meilleurs résultats. Dans ce cas particulier, l'espèce utilisée (*A. nilotica*) tolère bien les conditions de culture des plaines alluviales.

Comme l'irrigation des cultures est relativement coûteuse, seule une préparation très soignée des potets de plantation ou des lits de germination d'une profondeur permettant l'ensemencement direct peut convenir à ce type d'exploitation. C'est ainsi que procèdent, par exemple, les forestiers pakistanais dans les régions irriguées par inondation ou par submersion, comme le sont

aujourd'hui la plupart des prolongements des plantations en terrain irrigué du bassin de l'Indus.

Pryor (1953) ainsi qu'Edgar et Stewart (1979), au sujet des conditions de culture irriguée en Iraq et (avec les effluents municipaux et industriels) dans la partie nord du Victoria respectivement, soulignent qu'il convient de scarifier les terres fortes ou celles dont l'horizon pédologique est entravé afin de les rendre plus perméables et d'améliorer le drainage du sol. Pryor indique qu'il y aurait avantage à répéter cette opération régulièrement à quelques années d'intervalle pendant toute la vie du peuplement, qu'il s'agisse de plantations de peupliers et de taillis d'*Eucalyptus*. Au chapitre précédent, on mettait en parallèle la réalisation de ces travaux et le nivellement du terrain. En effet, il est souvent possible d'appliquer ce traitement alors que le matériel lourd nécessaire se trouve déjà sur place suite aux travaux de nivellement. Il faut procéder de préférence en respectant les espacements dans les deux directions perpendiculaires, les arbres étant plantés à l'intersection des fentes de scarifiage.

Dans la plaine de l'Indus, le lit de germination destiné à l'ensemencement direct d'*A. nilotica*, par exemple, est préparé sur un terrain nivelé et scarifié et à l'aide de matériel d'ensemencement mécanique que l'on a pourvu à cet effet de deux ou trois lames.

L'espacement des arbres plantés et, par conséquent, des placeaux de plantation dépend de l'objectif de la culture, de la révolution, de l'éventualité d'une éclaircie et du système d'éclaircie adopté ainsi que des caractéristiques sylvicoles des espèces utilisées. Dans le cas d'une plantation mixte, comme des rideaux-abris constitués souvent de deux ou trois espèces, l'espacement des arbres et des rangées est déterminé en fonction du taux de croissance et de la taille finale des arbres, de leurs caractéristiques sylvicoles ainsi que des caractéristiques du système d'irrigation utilisé.

Implantation des peuplements forestiers

L'ensemencement ou la plantation en pleine terre dans les zones de culture irriguée s'effectue invariablement lorsque les dispositifs d'irrigation sont déjà en place ou — si on procède à un arrosage manuel pendant un ou deux ans afin de permettre au système racinaire des plants d'atteindre les couches du sol humides en permanence — lorsqu'on dispose du matériel nécessaire (Wood et al. 1975).

Le choix entre la plantation et l'ensemencement direct dépend généralement des espèces utilisées ainsi que du type de projet, qu'il s'agisse de plantations par bouquets, d'arbres individuels ou de rangées d'arbres très espacées. L'arboriculteur peut utiliser au choix l'une ou l'autre de ces techniques lorsqu'il s'agit d'espèces telles qu'*A. nilotica* qui produit beaucoup de semences qui germent facilement aussi bien quand elles sont fraîches que préalablement traitées et qui croissent rapidement une fois germées. Pour l'ensemencement direct, il convient d'employer d'assez grandes quantités de semences, tout particulièrement s'il s'agit de produire du fourrage ou du bois de chauffage léger, très demandé.

On enseme généralement en lignes ou en placeaux alignés afin de permettre l'irrigation par rigoles et de faciliter les travaux de dégagement, de désherbage, d'élagage et d'éclaircie. Ainsi, dans le cadre du projet d'irrigation des

peuplements de Bura, sur la rivière Tana au Kenya, *Prosopis juliflora* est ensemencée sur placeaux (400 à 500 placeaux/ha). Le nombre relativement restreint de placeaux par hectare résulte de la difficulté qu'il y aurait à dégager les jeunes peuplements de cette espèce épineuse si les jeunes arbres étaient peu espacés (N. Brouard, Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., communication personnelle, 1984). L'ensemencement à la volée est pratique courante dans les zones d'irrigation par inondation ou par submersion ; dans le bassin de l'Indus par exemple, les graines d'*A. nilotica* et de *Sesbania grandiflora* sont répandues dans une culture céréalière (riz, par exemple) en plein mûrissement. La difficulté d'élaguer une jeune plantation épineuse d'*Acacia* ne fait aucun doute, mais il est possible de la surmonter en effectuant le travail sans délai ; dans ce cas, le rendement précoce en fourrage et en bois de chauffage léger constitue une compensation.

Des essais d'ensemencement ont été effectués dans les plantations de la ceinture verte de Khartoum afin de mettre au point des techniques d'implantation de culture en terrain irrigué qui seraient moins exigeantes en fait de main-d'œuvre et de coûts que la méthode de plantation. Les résultats de l'ensemencement de cinq espèces d'*Acacia* (*Dichrostachys cineraria*, *Leucaena leucocephala*, *Parinsonia aculeata*, *Albizia lebbek*, et *Azadirachta indica*) dans des placeaux espacés de 2 m × 2 m ont fait assez bien pour que l'on recommande des essais à l'échelle opérationnelle. La profondeur de l'ensemencement n'avait que peu ou pas d'effet mesurable en sol argilo-sablonneux ; cependant, l'ensemencement profond dans les limons du Nil a ralenti la germination et s'est étendu sur de plus longues périodes. Dans ce type de sol, l'ensemencement a donné de meilleurs résultats à 0,5 cm et 1,5 cm de profondeur qu'à 3 cm (Bosshard 1966d).

Une troisième méthode d'implantation en pleine terre consiste à introduire des boutures non racinées. Cette méthode s'applique aux espèces qui prennent facilement racine, comme la plupart des espèces *Tamarix*, de nombreux peupliers, la plupart des saules, les mûriers, *Gleditsia triacanthos*, les espèces *Ipomea* et *Euphorbia tirucalli*.

Cette méthode s'est révélée extrêmement efficace dans le cas des boutures de *Tamarix aphylla* de 1 à 1,5 cm d'épaisseur sur 1 m de long, enfoncées de 50 à 70 cm dans des potets ou des tranchées de 1 m, dans le cadre d'essais d'irrigation à l'aide d'effluents d'eaux usées et d'eaux résiduaires non traitées, au Koweït. Les boutures tendaient toutefois à pourrir lorsque l'humidité demeurait plus ou moins continuellement trop près de la surface (Firmin 1971). Selon Bosshard (1966d), des résultats passables ont été obtenus dans les plantations de la ceinture verte de Khartoum ; toutefois, d'autres espèces, telles que *A. indica*, *A. nilotica*, *Ceiba pentandra*, *E. tirucalli*, *Poinciana regia*, *Melia azadirach* et *Peltophorum pterocarpum*, n'ont donné qu'un piètre rendement.

Bien que les essais réalisés dans les zones irriguées du Soudan (FAO 1969) aient indiqué que, dans un sol en bon état, il importait peu de laisser ou d'enlever les pots de polyéthylène dans lesquels se trouvaient les plants d'*E. microtheca*, il vaut toujours mieux retirer le récipient immédiatement avant la plantation pour que le système racinaire soit aussi libre que possible de s'étendre dans le sol. On doit prendre bien soin de ne pas annuler l'effet bénéfique de l'utilisation d'un pot en laissant se désagréger la motte de terre entourant le système racinaire. Il convient toutefois de dérouler toutes les racines enroulées à la base de la motte et de couper de préférence celles qui en sortent. Une

fois les plants enlevés, on peut se servir du matériel de polyéthylène comme paillis autour de la base des plants ou, dans les régions désertiques ou semi-désertiques, l'enrouler autour de la tige afin de la protéger du sable éolien (Wood et al. 1975). On protège souvent les plants du sable et du broutement en les entourant de feuilles de palmier ou de petites branches épineuses.

On effectue parfois la plantation de plants à racines nues. Toutefois, dans les régions arides ou semi-arides, les risques auxquels on expose le matériel végétal pendant les quelques heures de transport et de manipulation sont trop élevés et il est préférable de conserver les plants dans des récipients. Grâce aux essais réalisés dans les plantations de la ceinture verte de Khartoum, on a démontré que la croissance de plants à racines nues d'*E. microtheca* se révélait satisfaisante dans la mesure où les ouvriers agricoles effectuaient le travail avec suffisamment de soin (FAO 1969).

Le transport des plants de la pépinière à l'emplacement de plantation doit toujours s'effectuer avec le plus grand soin afin que le matériel ne se détériore pas, qu'il ne sèche pas et que son système racinaire ne s'abîme pas. Les plants doivent être arrosés régulièrement si l'on attend un ou deux jours avant de les planter.

On doit procéder aux plantations une fois le sol bien humidifié, mais pas au cours des mois les plus chauds dans les régions chaudes (Pryor 1953 ; Wood et al. 1975). Le bassin de l'Indus, et notamment sa partie nord, est un exemple de régions présentant deux saisons possibles de plantation ; les stocks dormants d'espèces feuillues telles que peupliers et *Dalbergia sissoo* sont plantés au cours de l'hiver tandis que les stocks physiologiquement actifs des espèces à feuilles persistantes le sont pendant l'été.

Comme on l'indiquait au chapitre 5, on limite parfois l'irrigation à une ou deux saisons après la plantation afin de permettre aux racines des arbres d'atteindre les niveaux humides de l'horizon pédologique. Cela peut se faire manuellement à partir de remorques d'eau, comme c'est le cas dans les plantations en bordure des routes dans les régions semi-arides du Pakistan, ou au moyen de tranchées temporaires creusées le long des rangées d'arbres comme on l'a fait à N'Debougou, au Mali (CRDI 1981).

Il importe de s'assurer que les plantations sont pourvues assez tôt de plants bien implantés. La norme souvent utilisée est de 90 % de survie avec une répartition égale des bons plants. Il convient d'effectuer des inspections et des enquêtes expérimentales quatre à six semaines après la plantation afin de remplacer, s'il y a lieu, les plants morts ou en mauvais état, tout particulièrement si les dommages sont concentrés dans différentes parties de la zone de peuplement.

Fertilisation

La documentation sur l'agriculture irriguée renferme énormément d'informations sur l'amélioration du rendement par la fertilisation. Kalkafi (1973) indique que, dans le cas d'une culture irriguée, le choix d'un engrais particulier selon un dosage précis dépend du type de culture, de l'état de celle-ci et de son stade de développement, du type de sol et de sa teneur en éléments nutritifs, du moment de l'épandage ainsi que du coût. La modification de l'apport en éléments nutritifs au moyen de la fertilisation peut influencer de manière significative le rendement en matière sèche. Pour une quantité donnée d'eau d'irri-

gation, la fertilisation peut modifier jusqu'à trois fois le taux de transpiration des plantes. Hadas (1973b) souligne que la fertilité du sol est l'un des facteurs qui touche le plus le développement des racines et qu'un manque ou un excès d'azote peut avoir un effet grave. Les travailleurs qui se consacrent à la fertilisation des cultures signalent souvent les dangers de certains engrais sur la production dans des conditions données ; il importe donc de tester tout traitement particulier avant de l'appliquer sur une grande échelle.

Contrairement aux ouvrages sur l'agriculture, la documentation sur les plantations forestières irriguées et non irriguées ne fait guère état de la fertilisation et est grandement dépourvue de descriptions d'expériences visant à déterminer les programmes économiques de fertilisation. Malgré tout, les engrais azotés, phosphatés et potassiques sont régulièrement utilisés dans la production de pépinière, souvent avec des amendements afin de remédier aux carences en oligo-éléments (comme le bore) dans les plantations forestières non irriguées. Urie (1975), Edgar et Stewart (1979), Alverson (1975) et De Bell (1975) illustrent bien les effets bénéfiques possibles de cet apport supplémentaire d'éléments nutritifs lorsqu'ils affirment que l'introduction « gratuite » de ces éléments explique en partie pourquoi les effluents municipaux et industriels constituent un facteur de développement sous forme de foresterie irriguée à haut rendement. Des études sur cette question s'imposent et il conviendrait d'effectuer des essais empiriques dans le but de formuler les principes permettant de mettre au point des programmes de fertilisation qui pourraient être testés en vue d'une éventuelle application générale.

L'épandage de gypse sur les sols affectés salins est une autre forme peu commune de fertilisation, quelquefois utilisée dans les zones irriguées. Le gypse fournit du calcium qui remplace le sodium et contribue ainsi à l'assainissement des sols sodiques. C'est de cette façon qu'on l'utilise dans le bassin de l'Indus, au Pakistan. On l'emploie parfois pour traiter les eaux d'irrigation salines.

Il est bien connu que les matières organiques (engrais vert, compost et fumier) jouent un important rôle de tampon lorsqu'elles sont ajoutées aux sols sodiques ou salins. On les utilise pour l'assainissement des régions souffrant de ces problèmes (Shah Mohammad 1978 ; Nishat 1978). Firmin (1971) observait que, pour cette raison, il importait d'ajouter des boues d'égout au sol lors des essais de sylviculture irriguée réalisés au Koweït dans des conditions de salinité marquée.

Désherbage et dégagement

Le désherbage est l'enlèvement de la végétation spontanée qui menace et réduit le rendement des cultures. Le dégagement, qui s'applique habituellement aux cultures à semis naturel ou à la volée, désigne l'enlèvement, généralement par des opérations répétées deux ou trois fois à des intervalles relativement brefs, des plants excédentaires ; ce procédé vise à ne laisser croître que des spécimens également espacés (généralement les jeunes arbres les plus beaux et les plus vigoureux) et, dans la mesure du possible, à exploiter au maximum le potentiel du terrain. Les deux opérations ont certains points en commun, dont la nécessité de les répéter de nombreuses fois au cours des trois premières années. On les entreprend généralement ensemble et aucune ne peut être retardée. Le travail de dégagement est soumis à des règles précises au sujet de l'espacement moyen des tiges à des stades végétatifs déterminés à partir de l'ensemencement ou de la plantation.

Bien qu'il soit possible de contrôler le nombre de plants par unité de surface, du moins jusqu'à un certain point, au moyen de la densité de l'ensemencement, il est impossible de contrôler l'apparition des mauvaises herbes. Celles-ci surgissent des systèmes racinaires qui survivent à la préparation du terrain ou se développent à partir des semences apportées par le vent ou les oiseaux (*Morus alba*, par exemple, dans la plaine de l'Indus), par les chèvres (graines des espèces *Prosopis* par exemple, dans la même région) ou par l'eau d'irrigation. Elles croissent bien en condition d'irrigation et infestent de manière caractéristique les berges et les abords des canaux ou tout endroit où se produit une fuite le long des canalisations. Évidemment, elles peuvent aussi se développer dans toute la zone irriguée. On retrouve souvent parmi ces mauvaises herbes des rhizomes ainsi que des graminées profondément enracinées, des plantes annuelles, des arbustes, des arbres et même des plantes grimpanes nuisibles. Elles poussent rapidement et peuvent grandement affecter la croissance des arbres cultivés ; si on ne les enraie pas, elles peuvent même rapidement étouffer les arbres.

Il ne suffit pas d'arracher les plantes adventices pour les éliminer, du moins dans les premiers stades de développement de la culture. Il convient généralement de dégager l'exploitation une ou deux fois par année, tout particulièrement lorsqu'il s'agit d'arbres tels que les espèces d'*Eucalyptus*, bien connues pour leur sensibilité aux mauvaises herbes, et notamment aux graminées qui rivalisent avec les arbres pour l'absorption d'eau. Pryor (1953), Ali (1962), Goor et Barney (1968), Booher (1974), Ahmed (1977), Ali (1979), ainsi qu'Edgar et Stewart (1979) insistent sur l'importance du désherbage dans les plantations irriguées.

L'établissement de calendriers d'éclaircie des plantations doit tenir compte de la lutte contre les mauvaises herbes. Il peut être nécessaire par exemple, de sacrifier jusqu'à un certain point l'importance qu'on accorde au diamètre en exécutant des travaux d'éclaircie qui ne laissent sur pied que quelques spécimens par hectare ; il convient plutôt de conserver une plus grande population d'arbres afin de maintenir un couvert suffisant pour enrayer la prolifération des mauvaises herbes. Malheureusement, cette mesure reste sans effet dans le cas d'espèces telles que la plupart des *Eucalyptus* dont le bord des feuilles est tourné vers le soleil et laisse ainsi pénétrer librement la lumière jusqu'au sol du peuplement. En ce cas, il faut effectuer des désherbages périodiques pendant la révolution.

Soins culturaux : éclaircie et élagage

En règle générale, il est souhaitable de planter ou d'ensemencer à de faibles espacements, par exemple, 2 m × 2 m, 2 m × 3 m, ou 3 m × 3 m ou, à la suite d'un ensemencement direct, d'effectuer le dégagement en fonction de ces espacements. Cela permet d'assurer l'occupation continue et précoce du terrain et de maximiser ainsi les rendements intermédiaire et final ainsi que la possibilité de sélectionner, au cours des travaux d'éclaircie, les arbres de premier choix qui formeront la culture définitive. Un faible espacement initial contribue également à la production précoce de menu bois résultant des travaux d'éclaircie exécutés dès la deuxième ou la troisième année. On peut parfois observer cette « maximisation » de la production lors des programmes d'ensemencement d'*A. nilotica* dans le bassin de l'Indus et en Inde ; à ce propos, Kaul et Chand (dans Kaul 1970) indiquent que l'espacement progressif et l'éclaircie

au cours des première, deuxième et troisième années favorisent l'accroissement du diamètre et la hauteur des arbres du peuplement et, en conséquence, l'augmentation du cubage tant au cours des premières années qu'à des stades ultérieurs de la révolution.

Le régime d'éclaircie dépend de la nature des produits ou des objectifs du projet, des possibilités de l'emplacement et des caractéristiques sylvicoles des espèces. Il convient de sélectionner avec soin les espèces en fonction de ces facteurs. Les travaux d'éclaircie modifient la densité de peuplement pendant la révolution de sorte que, s'ils sont faits à une fréquence raisonnable, ils établissent un équilibre optimal entre l'utilisation continue du potentiel du terrain, la concentration du cubage et de la qualité sur les tiges du peuplement final, et les rendements intermédiaires optimaux. Les résultats d'une étude sur l'espacement des plants de *D. sissoo* menée par Sheikh et Raza-ul-Haq (1982a) constituent un exemple des renseignements nécessaires à la détermination du meilleur régime répondant à ces critères ; les auteurs indiquent qu'ils ont testé des espacements de 4 m × 4 m, 3 m × 3 m et 2 m × 2 m dans des plantations irriguées et ont découvert qu'à quatre ans, plus les plants étaient rapprochés, plus le diamètre moyen de la tige à hauteur d'homme (soit à 1,2 m du sol) de même que le nombre, l'épaisseur et la longueur des branches diminuaient tandis que la longueur du fût net augmentait ; les données quantitatives sur ces paramètres, sur la surface terrière et sur le cubage par hectare selon l'espacement ont servi à établir les programmes d'éclaircie et les prévisions relatives à la croissance.

La surface terrière représente le meilleur paramètre sur lequel il convient de fonder les travaux d'éclaircie à chaque étape. Le nombre de tiges par unité de surface peut servir à cette fin dans la mesure où l'on connaît, dans chaque cas, la surface terrière correspondant aux tiges enlevées et à celles qui restent. Dans les systèmes d'irrigation par rigoles, il ne faut pas oublier que le système racinaire des arbres est aligné et disposé de telle sorte que la concurrence souterraine oppose principalement les arbres d'une même rangée et ne se manifeste pour ainsi dire pas d'un côté à l'autre des rigoles.

Il importe de surveiller la croissance des plantations grâce à des mesures périodiques des paramètres de croissance d'échantillons représentatifs des diverses classes de cimes afin de s'assurer qu'elles ne stagnent pas faute d'éclaircissement.

La planification des éclaircies des rideaux-abris exige le plus grand soin. Il s'agit en effet d'un facteur d'aménagement important qui permet à ce type de plantations de remplir de façon continue et efficace son rôle de barrière protectrice contre le vent. C'est pourquoi on inclut souvent dans le mélange des espèces qui se régénèrent par rejets, afin que le renouvellement du feuillage dans l'étage inférieur se produise facilement et rapidement. Les taillis eux-mêmes doivent être exploités, qu'il s'agisse de rideaux-abris, de peuplements équiennes ou de régimes de taillis-sous-futaie. Dans les peuplements d'*Eucalyptus*, par exemple, on retire en général à la main les innombrables rejets des souches coupées afin de les réduire à environ six par souche mère environ six mois après l'abattage, puis à deux ou trois, six mois plus tard.

L'élagage vise à donner accès aux plantations (tout particulièrement dans le cas des espèces épineuses), à produire des fûts de forme nette et, s'il s'agit de plantations destinées au sciage, une surface extérieure exempte de noeuds.

Les branches font un bon combustible léger et le feuillage peut servir de fourrage, le cas échéant. Pour être efficace, l'élagage doit être effectué tôt dans le développement d'un peuplement, soit vers deux ou trois ans. Sheikh (1981) indique, à propos de l'élagage des peupliers dans le bassin de l'Indus, les degrés maximums de taille qui peuvent être effectués sans affecter outre mesure la croissance des arbres.

Régime des eaux

Fréquence et méthodes d'application

On a vu au chapitre 6 la façon de déterminer les besoins en eau d'une culture et, au chapitre 7, la méthode de calcul et de planification des besoins saisonniers et de pointe en matière d'irrigation ainsi que la conception de systèmes d'alimentation et de distribution. Un grand nombre de facteurs connexes interviennent à cet égard et leur importance relative varie en fonction des conditions du milieu, de la saison, du type de culture et du degré de développement. Comme on l'a vu plus tôt dans le présent chapitre, certaines exigences peuvent être modifiées par l'emploi d'engrais. L'irrigation suppose toujours une utilisation efficace de l'eau, assurant un rendement optimal des cultures et le maintien de la fertilité du terrain. Comme nous le suggérons au chapitre 7, il importe de prendre des mesures afin de perfectionner les calendriers calculés, que ce soit par une surveillance ininterrompue, des recherches sélectives ou appliquées et des ajustements apportés et vérifiés une fois le projet devenu opérationnel. Outre qu'ils aient décrit la manière de procéder au perfectionnement et à la surveillance des calendriers d'alimentation, France (s/d) et Doorenbos et Pruitt (1977) affirment qu'en plus de l'amélioration des critères d'approvisionnement, l'activité doit également porter sur les propriétés hydrauliques du système de distribution ainsi que sur son fonctionnement et son exploitation.

Les recherches sélectives doivent être entreprises sur des sols représentatifs de la zone du projet. Les essais doivent porter sur un réseau choisi avec soin : ils ne doivent pas constituer un ensemble disparate de plateaux expérimentaux non intégrés. Le programme d'essais doit débiter au cours de la phase de conception et se poursuivre sans interruption. La nature et l'étendue du programme dépendront de la disponibilité des spécialistes-conseils et des aptitudes du personnel. On peut s'assurer de la participation d'un certain nombre de spécialistes en entreprenant le programme avec la collaboration d'instituts de recherches nationaux concernés. Les éléments suivants doivent faire partie des études et des travaux de surveillance :

- Pour ce qui touche l'eau, évaluation des calendriers et des méthodes d'irrigation des champs, des types de culture et des stades de développement ;
- Étude de la fréquence et de l'ampleur de l'irrigation ;
- Mise au point de techniques de lessivage et d'autres façons culturales visant à lutter contre la salinité ;
- Étude de l'effet de la planification de l'irrigation et de toute pénurie saisonnière périodique en eau sur les rendements ;
- Étude des méthodes d'irrigation, y compris les essais avec d'autres schémas, des longueurs de canalisation et de l'intensité acceptable du courant ;

- Essai des engrais, y compris l'étude des interactions irrigation-fertilisation.

Doneen (1972) fournit les principes directeurs de toute expérience et étude visant à améliorer les techniques d'irrigation. Les résultats des essais doivent se traduire en recommandations au sujet de l'ampleur et de la profondeur de l'irrigation selon la saison, l'emplacement et le stade de la culture. Les calendriers d'irrigation et la mise en service du système de distribution doivent être modifiés en conséquence.

Il importe de recueillir sans arrêt des données sur les conditions climatiques (dans certains cas, il convient d'installer une véritable station agroclimatique), les fluctuations de la nappe phréatique, la disponibilité et la quantité de l'eau ainsi que l'état des sédiments. On devrait effectuer des examens périodiques des propriétés chimiques et physiques du sol pour être au fait des modifications qui peuvent résulter de l'irrigation, afin que des mesures correctives puissent être prises si cela se révélait nécessaire. Yaron et Vink (1973) affirment que, puisque l'irrigation modifie tous les facteurs de formation des sols tant du point de vue qualitatif que quantitatif, la surveillance de ces facteurs constitue un élément essentiel d'une exploitation efficace. Lorsqu'il y a lieu, ces études et ces activités de surveillance doivent aussi porter sur le rendement des peuplements forestiers.

Il est préférable d'irriguer juste avant le flétrissement et de n'appliquer que la quantité d'eau nécessaire pour amener le sol de la zone racinaire à la capacité de rétention au champ. Lorsqu'il est irrigué, le sol peut soit être humidifié dans une zone qui s'étend avec le temps par percolation, soit ne pas être humidifié : les racines des plants peuvent expliquer l'humidité partielle d'une région du sol. On présente, dans la section suivante, les principes gouvernant l'apport de quantités convenables d'eau. On peut toutefois remarquer ici qu'un arrosage insuffisant du sol diminue les rendements et peut mener par lessivage à une perte de nitrates. Ce problème s'est manifesté au cours des premières années d'utilisation des systèmes d'irrigation par aspersion aux États-Unis et en Israël (Kalkafi 1973 ; Shmueli 1973). À la longue, les calendriers d'irrigation d'un projet particulier doivent tenir compte de trois considérations : les sols sableux exigent une irrigation plus fréquente mais des quantités d'eau à chaque fois moindres, contrairement aux terres plus fortes ; la consommation d'eau varie selon le stade de développement de la culture ; enfin, l'apport d'eau est moins important par temps nuageux et frais que par temps clair, chaud et sec (Kramer 1949).

Il est intéressant de noter des exemples des quantités d'eau d'irrigation appliquées ainsi que d'autres éléments pertinents des programmes d'irrigation de plantations réalisés dans diverses régions arides du monde. En ce qui concerne les travaux d'irrigation de la Gézireh, au Soudan, il n'y a pas d'eau disponible pendant la période la plus chaude de l'année, soit d'avril à juin, à la suite des accords conclus avec l'Égypte au sujet des eaux du Nil. Le système d'irrigation par rigoles fournit au total quelque 1 240 mm d'eau à *E. microtheca* en 12 ou 13 applications égales, soit toutes les deux semaines de juillet à décembre (période de croissance en hauteur modérément rapide) et une fois par mois de janvier à mars lorsque la croissance est plus rapide (Masson et Osman 1963 ; FAO 1969 ; Bayoumi 1976 ; Ali 1979 ; Ahmed s/d). Ces quantités et ces fréquences sont confirmées dans des essais rapportés par Khan (1966a). Toutefois, Foggie (1967) estime qu'un cubage maximal nécessite un apport total d'environ 1 700 mm d'eau.



Au Néguev, au sud de Beersheba, en Israël, une digue judicieusement construite en bordure d'une plantation retient et entrepose de rares eaux de ruissellement.

Dans le bassin de l'Indus, l'irrigation par submersion ou par inondation, qui consomme de plus grandes quantités d'eau mais convient aux régions affectées par la salinité, semble supplanter le système complexe d'irrigation traditionnelle par rigoles. Raeder-Riotzsch et Masrur (1968), Khattack (1976) et Ali (1960) indiquent que les calendriers d'irrigation utilisés ont été mis au point de manière empirique, ce qui signifie qu'ils ne reflètent pas nécessairement les degrés d'arrosage correspondant aux espèces et aux emplacements. Selon Lerche et Khan (1967), l'apport d'eau d'irrigation devrait être en moyenne de 1 370 mm par année pendant au moins six mois, été compris, bien que l'ampleur réelle des apports soit très variable et que l'on connaisse rarement les quantités exactes. Sheikh (1974a et communication personnelle, 1984) rapporte les résultats d'essais de systèmes d'irrigation par tranchées et par inondation qui ont été entrepris et qui sont encore en cours aujourd'hui afin d'établir le calendrier le mieux adapté à *D. sissoo*. Des apports annuels de 450 mm, 900 mm, 1 350 mm, 1 800 mm et 2 250 mm d'eau, avec application toutes les deux ou trois semaines, ont fait l'objet d'études. On a observé une amélioration marquée des rendements obtenus avec un apport de 1 350 mm d'eau comparativement à des apports inférieurs à 900 mm ; des apports réduits limitent en effet la croissance tandis que des apports supérieurs n'entraînent aucune amélioration notable. Les applications aux deux semaines donnent de meilleurs résultats que si elles ont lieu toutes les trois semaines. On n'a constaté aucune différence notable due à la méthode d'irrigation. De manière générale, ces résultats ne font que confirmer l'expérience courante. Il semble, d'après les essais réalisés avec *E. camaldulensis*, *M. alba* et des peupliers, que des apports annuels atteignant 1 500 mm d'eau soient excessifs. L'une des particularités des documents illustrant les résultats de ce travail est qu'il n'existe aucune indication d'ajustement des apports en fonction des quantités variables de précipitations.

Les taux d'apport testés au cours des essais d'espèces et de provenances le long du Niger, au Niger (Barbier 1978 ; Louppe 1979) équivalent à 250 mm et à 500 mm par année, appliqués pendant la saison sèche. Bien qu'on ait noté l'effet bénéfique de ces apports sur la croissance, on a constaté que, dans les deux cas, la croissance était presque identique, ce qui laisse croire que les arbres puisent une partie de l'eau dont ils ont besoin dans la nappe phréatique.

Pour ce qui est du système d'irrigation goutte à goutte aménagé dans les conditions désertiques d'Abu Dhabi, Wood et al. (1975) indiquent qu'il fallait 9 000 litres par hectare et par jour. La plantation comptait 200 arbres par hectare, de sorte que chaque arbre recevait 45 L d'eau par jour. On ignore pendant combien de temps l'irrigation s'est poursuivie mais, pour une période de six mois, la quantité d'eau utilisée équivaldrait à 1 650 mm. Calculées de la même manière, les quantités prescrites par Wood et Synott (1978) pour trois dispositifs d'irrigation goutte à goutte, au Koweït, varient de 1 470 mm à 2 940 mm.

Dans la région des pluies hivernales de la côte d'Israël, les quantités optimales distribuées par aspersion pour deux clones de peupliers, selon les expériences de Rawitz et al. (1966), s'élèvent à 1 350 mm par année avec apport toutes les deux semaines. Karschon (1970) a établi qu'à Ilanot (30 m d'altitude), dans des conditions de précipitations similaires, des applications totalisant 2 000 à 2 200 mm par année par aspersion permettaient d'obtenir les meilleurs résultats avec *E. camaldulensis*. Un essai préliminaire d'irrigation estivale s'est soldé par un échec parce que les espèces sont dormantes pendant cette période très chaude et sèche de l'année. Les spécialistes de l'irrigation en Israël insistent sur l'importance des effets cumulés des précipitations et des eaux d'irrigation sur la percolation en profondeur et la saturation du sol en eau ; il est donc essentiel, selon eux, de tenir compte de ces effets lors de l'aménagement et de la planification du système d'irrigation (Unesco 1974).

Lors d'essais d'irrigation empiriques de 45 espèces représentant 13 genres, dans le bas Veld semi-aride du Zimbabwe (Barrett et Woodvine 1971), on a utilisé le bord de certains canaux directement irrigués et des endroits d'infiltration. Dans la plupart des cas, un arrosage manuel a été effectué au cours des premiers mois suivant la plantation afin de s'assurer que le système racinaire des arbres entraînait en contact avec les sections humides du sol. On a évalué chaque endroit selon la nature et la quantité d'eau disponible pour les plants. On s'est ensuite basé sur la durée des périodes d'arrosage manuel ainsi que sur les caractéristiques des eaux d'irrigation ou d'infiltration afin de déterminer les particularités des endroits utilisés et de regrouper les placeaux d'essai à des fins d'analyse de manière à associer les résultats à des régimes d'arrosage plus vastes et à les extrapoler à volonté. On a pu ainsi établir six régimes d'arrosage, certains étant plus favorables à la croissance des arbres que d'autres.

Efficacité de l'irrigation : les pertes d'eau

L'efficacité de l'irrigation, c'est-à-dire le rapport entre la quantité d'eau calculée nécessaire pour amener le sol de la zone racinaire à la capacité de rétention au champ (ce qui constitue l'objectif des spécialistes de l'irrigation) et la quantité réellement fournie, dépend du mode d'irrigation utilisé ainsi que de l'habileté avec laquelle ont été conduites les opérations. Si l'apport d'eau excède la quantité nécessaire au remplacement de l'humidité perdue par évapotranspiration, l'irrigation perd presque toute efficacité. D'autre part, comme on l'a vu à la section précédente, un apport trop faible peut faire diminuer la teneur en éléments nutritifs et entraîner un degré de croissance inférieur au rendement optimal. Toutefois, même les meilleurs systèmes de contrôle ne peuvent empêcher les pertes d'eau en cours d'irrigation, principalement par percolation sous la zone racinaire, ou par petites quantités sous forme d'écoulement en surface,

d'évaporation ou de suintement à partir des canaux de distribution. Il importe de maintenir toutes ces pertes au minimum, notamment si elles provoquent une remontée de la nappe phréatique, mais également à cause du coût de l'eau et de la perte des éléments nutritifs qu'elles entraînent.

Il est important de parvenir à une distribution uniforme de l'eau dans tout le secteur irrigué. La plupart des modes d'irrigation ne permettent pas d'assurer exactement la même durée d'irrigation sur toutes les parties du terrain, mais il convient d'approcher autant que possible cet idéal. Pour rendre l'irrigation aussi efficace que possible, Doorenbos et Pruitt (1977) ainsi que France (s/d) indiquent certaines vérifications périodiques utiles et recommandent les méthodes suivantes :

- Avant l'irrigation, vérifier l'humidité du sol dans la zone racinaire en plusieurs endroits ; évaluer la quantité d'eau nécessaire pour amener le sol à sa pleine capacité de rétention deux ou trois jours après le début de l'irrigation.
- Après l'irrigation, vérifier une fois encore l'humidité du sol afin de s'assurer qu'elle correspond à peu près à la capacité de rétention au champ à la profondeur du système racinaire et qu'il n'y a aucune zone sèche dans les parcelles.
- Déterminer le degré d'efficacité du système d'irrigation ; s'il est anormalement élevé ou faible, chercher les causes et effectuer des tests.
- Au cours de l'irrigation, vérifier si le temps que prend l'eau pour s'infiltrer dans le sol est plus ou moins uniforme dans tout le champ ou sur l'ensemble du secteur compris entre les digues ; vérifier également si les cuvettes et les digues en palier se remplissent rapidement et, s'il y a des rigoles, s'assurer que l'eau atteint l'extrémité inférieure en un quart à peu près du temps total qu'il lui faut pour apparaître au-dessus du fond de la rigole, à l'extrémité supérieure.
- Si un ruissellement se produit à l'extrémité inférieure d'une digue ou d'une rigole, c'est que le courant n'est pas réduit ou interrompu suffisamment tôt à l'extrémité d'alimentation ; ajuster le débit d'alimentation au cours des irrigations suivantes jusqu'à l'obtention d'une distribution aussi égale que possible.

Dans les systèmes d'irrigation localisée, il semble qu'une croissance optimale exige un volume minimal de sol humide. Ce volume est fonction de la quantité d'eau fournie à chacune des irrigations et doit être augmenté progressivement à mesure que les arbres se développent (Doneen 1972 ; Vermeiren et Jobling 1980).

Lorsqu'on dispose d'une bonne source d'alimentation, on a tendance à trop irriguer pour que les plants reçoivent suffisamment d'eau (Costin et Dooge 1973 ; NAS 1974). Toutefois, le volume d'eau utilisable par les plants est limité (Clements 1934) et l'excédent se perd par infiltration en profondeur. Il faut donc se garder de trop irriguer, à moins qu'il ne s'agisse de lessiver délibérément le sol pour le débarrasser de ses sels. L'infiltration en profondeur peut également résulter d'un apport non uniforme de la quantité totale d'eau prévue (Rawitz 1973a). Aussi, bien qu'il importe de connaître la quantité d'eau nécessaire à une culture, il est également essentiel de surveiller sa répartition sur les terres que l'on désire irriguer, comme le soulignait Chardenon (1979) après que des mesures périodiques eurent permis d'améliorer les modes d'irrigation des peupliers en Turquie.

Il est quelquefois recommandé d'appliquer rapidement les quantités d'eau prévues, selon le rythme d'infiltration dans le sol, afin de réduire le temps de stagnation ou de déplacement superficiel de l'eau, et par le fait même son évaporation. Il convient cependant d'être prudent, car en cas d'irrigation par inondation, par rigoles et par aspersion, cette technique pourrait entraîner des phénomènes d'érosion et de ruissellement. Dans une irrigation par aspersion, une pression excessive accentue la dérive provoquée par le vent et provoque un effet de pulvérisation, lorsque le jet d'eau se transforme en minuscules gouttes qui se dispersent dans l'atmosphère (Rawitz 1973a).

Certaines pertes par évaporation à la surface du sol sont inévitables ; mais ce phénomène est néfaste parce qu'il fait remonter les sels et en accroît la concentration à la surface. Rawitz (1973a) recommande certaines modifications judicieuses des calendriers d'irrigation consistant à réduire la fréquence des irrigations et à accroître le volume de chacune d'elles afin d'atténuer la remontée des sels.

On peut utiliser l'eau de façon plus économique et accroître l'efficacité globale de l'irrigation en adoptant une approche attentive et souple et en surveillant de façon rigoureuse et continue les arrosages et leurs effets. Il faut combattre chez les responsables de l'irrigation toute tendance à une distribution arbitraire et à l'application inflexible des calendriers préétablis. Dans les zones arides où l'eau est rare, où l'évaporation à la surface du sol pose de graves problèmes et où l'on rencontre surtout des arbres isolés ou plantés en petits groupes, on utilise certains procédés pour réduire l'évaporation ou l'évapotranspiration, par exemple en recouvrant le sol d'un paillis de feuilles ou d'autres substances végétales, ou encore de pierres plates, de plastique ou d'autres matériaux, en éliminant la végétation inutile qui accroît la transpiration, et particulièrement les phréatophytes, et en plantant ou sélectionnant des espèces d'arbres présentant des taux de transpiration inférieurs à la moyenne. La limitation des pertes d'eau par évaporation est l'un des principaux objectifs des rideaux-abris (NAS 1984). À partir des observations faites dans les plantations de la Gézireh, au Soudan, il a été recommandé que, dans de nombreuses situations, on utilise l'eau de façon parcimonieuse et que l'on veille à prévenir les problèmes résultant d'une trop forte irrigation en n'arrosant que pendant deux ou trois mois à la fin de la saison des pluies, plutôt que de le faire pendant toute la saison sèche. Cette mesure a pour effet de prolonger la saison des pluies (Nigéria 1957).

Entretien des systèmes d'irrigation et de drainage

Il va sans dire que les systèmes d'alimentation et de distribution de l'eau d'irrigation, du canal principal jusqu'aux rigoles ou aux dispositifs ultimes de distribution, doivent faire l'objet d'un entretien minutieux et régulier si on veut assurer la réussite du projet. À cet effet, la première mesure propre à faciliter l'entretien consiste à tenir compte de ces questions dès la conception du système, de manière à pouvoir éliminer à temps ou tout au moins réduire au minimum les points faibles du système et les causes de problèmes éventuels. Comme on le verra au chapitre 10, l'entretien courant est un élément important de l'administration et de la gestion du projet. Le degré d'efficacité de l'entretien se reflète sur le rendement des cultures : un entretien convenable peut en effet contribuer à optimiser les rendements et, par conséquent, les résultats financiers et économiques de l'entreprise.

L'entretien courant de canaux d'irrigation principaux et latéraux ou des conduites assurant l'alimentation en eau de chaque parcelle, ainsi que des dispositifs de commande et de débit est donc essentiel si l'on désire régulariser et uniformiser l'alimentation en eau. Il devrait porter prioritairement sur les points de consommation dans la partie inférieure du système ; il devrait également viser à prévenir les pertes par suintement dans le réseau de distribution. L'entretien courant comporte l'enlèvement des sédiments accumulés, le colmatage des fuites, des fissures et des autres défauts dans les structures, et notamment des tunnels creusés par les rongeurs et les insectes dans les berges des canaux et des rigoles, le désherbage, la réparation des dommages causés aux rives des canaux aux points d'écoulement de l'eau et la vérification régulière des appareils de pompage et de distribution. Il est important de planifier les travaux d'entretien et les interruptions temporaires d'alimentation qu'ils entraînent inévitablement de manière à ne pas perturber les calendriers d'irrigation au point de nuire à la croissance et à la santé des cultures. Ainsi, certains programmes prévoient la mise hors service régulière et annuelle de secteurs de distribution entiers pendant au moins un mois ; c'est, par exemple, le cas du programme d'irrigation de la Gézireh, au Soudan, et de certains secteurs d'irrigation dans la vallée de l'Indus. La plupart du temps, ces mises hors service se font pendant la saison sèche, et le moment choisi est déterminé par la nécessité des rythmes de production saisonnière. Elles peuvent donc causer des retards et des dommages graves aux cultures vivaces pour lesquelles l'alimentation en eau est alors essentielle. Il importe de tenir compte de ces caractéristiques lors de l'analyse de la faisabilité économique de programmes de culture irriguée ; ces caractéristiques peuvent même constituer un facteur justifiant le rejet de telles mesures (Ali 1960 ; Lerche et Khan 1967 ; NAS 1974 ; Unesco 1974).

Le bon entretien des systèmes d'irrigation ne peut se faire sans vérification et surveillance périodique tant de l'eau utilisée que des sols, de sorte que l'on puisse remédier à tout problème (par exemple en ce qui a trait au drainage) avant qu'il ne devienne trop grave (Yaron et Vink 1973 ; Yaron et al. 1973 ; France s/d).

Il serait opportun de signaler l'entretien dont les systèmes d'irrigation localisée doivent faire l'objet, car, du fait de leur petite taille, leurs canalisations de distribution sont facilement obstruées. Dans le cas de cultures vivaces, ces installations peuvent fournir jusqu'à 10 L d'eau à l'heure (Heller et Bresler 1973) ; toute interruption prolongée peut donc avoir des conséquences graves. L'obstruction résulte notamment de l'accumulation de sable, de boue, de matières organiques, d'algues, de déchets bactériens, ou encore de la précipitation de sels et de substances colloïdales. Vermeiren et Jobling (1980) indiquent que les résultats d'une étude portant sur les causes d'obstruction se répartissent comme suit : biologique : 37 %, chimique : 22 %, physique : 31 %, autres (incertaines) : 10 %.

Dans de tels systèmes, on peut prévenir l'engorgement en soumettant l'eau à un filtrage efficace, ou en utilisant des filtres à aspiration autonettoyants et de filtres à lit de sable et de gravier ; on peut également faire subir à l'eau un traitement chimique préalable afin de prévenir la précipitation des substances chimiques ou la croissance de bactéries oxydant le fer dans le système. Dans l'installation construite dans une zone désertique de l'intérieur d'Abu Dhabi (Wood et al. 1975), chaque module de 20 à 25 hectares (4 000 à 5 000 arbres) est confié à un ouvrier agricole bien formé. L'une des fonctions de ce dernier

consiste à vérifier et à entretenir les dispositifs d'irrigation goutte à goutte, en procédant régulièrement à leur nettoyage et à l'enlèvement du sable, des poussières et des autres sédiments. Les conduites en chlorure de polyvinyle (PVC) ou en polyéthylène facilitent l'entretien et présentent d'autres avantages ; il faut donc les préférer aux conduites constituées d'autres matériaux tels que les métaux. Ce fait a également été signalé par Jean Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., communications personnelles, 1984) en ce qui concerne l'installation et l'entretien de systèmes d'irrigation localisée au Niger.

Problèmes liés à l'irrigation

Saturation en eau et salinité

Il existe plusieurs causes possibles de la salinité secondaire, c'est-à-dire de la salinité des sols irrigués n'ayant pas auparavant présenté ce problème. Deux de ces causes sont l'irrigation à l'eau salée et un taux d'évaporation élevé qui entraîne une remontée des sels à la surface ; dans les deux cas, l'apport d'eau est insuffisant pour éliminer les sels du profil pédologique par lessivage. Les sels peuvent également remonter jusqu'à l'horizon racinaire — et même finir par affleurer par évaporation — si la nappe phréatique s'élève suite à une irrigation excessive, à un suintement latéral provenant d'un canal sans revêtement ou à un drainage inadéquat. La salinité, qui n'est pas forcément associée à la saturation en eau, peut se produire très rapidement suite à l'une des causes mentionnées. Il est possible d'éliminer ces causes ou d'en réduire la portée, d'abord par une conception convenable du système, puis par une exploitation adéquate et par le recours à diverses options de gestion (voir le chapitre 6). Ces problèmes ainsi que les moyens de les prévenir ou de les circonscrire ont été documentés par de nombreux auteurs, notamment : Elgabaly (1971), Khatib (1971), Shalhevet (1973), Yaron et al. (1973), l'Unesco (1974) et Shah Mohammad (1978). Les méthodes pour contrecarrer les effets de l'irrigation à l'eau salée sont décrites tout particulièrement par Van Hoorn et al. (1968), Arar (1975), Wood et al. (1977), Vermeiren et Jobling (1980) et Yadav (1980).

La saturation en eau du sol et la salinité qu'elle entraîne sont associées aux basses terres, aux barrières souterraines faisant obstacle au drainage naturel, à des conditions physiques défavorables accompagnées d'un mauvais drainage interne du sol (comme dans de nombreuses plaines d'inondation et la plupart des plaines deltaïques) et à une faible conductivité hydraulique du sol, liées à des précipitations peu abondantes qui ne fournissent pas une quantité suffisante d'eau claire pour le lessivage. Il s'ensuit que les systèmes d'irrigation doivent s'accommoder de ces conditions, par exemple en évitant l'irrigation excessive, en apportant suffisamment d'eau pour permettre le lessivage à des taux et à des intervalles acceptables et surtout en assurant un bon drainage afin d'évacuer les percolats salins et l'eau souterraine en excès, c'est-à-dire de régulariser la nappe phréatique. Des problèmes peuvent surgir lors de l'élimination de l'eau excédentaire, généralement salée. Le spécialiste en irrigation doit toujours connaître la quantité d'eau utilisée ainsi que sa teneur en sel. La saturation en eau et les problèmes associés ainsi que les mesures nécessaires pour les corriger ont été examinés et décrits par les auteurs mentionnés au paragraphe précédent du point de vue de la salinité secondaire, et par d'autres auteurs comme Dan (1973), Shmueli (1973) et Eckholm (1975). Trout (1979), en particulier,

décrit l'assainissement des régions de la vallée de l'Indus affectées par l'élévation de la nappe phréatique et la saturation en eau.

La conception et la gestion d'un système d'irrigation bien planifié et bien réalisé comprennent plusieurs mesures destinées à empêcher l'accumulation de sels dans le sol suite à l'élévation de la nappe phréatique et à corriger les problèmes dès qu'ils surgissent :

- Des méthodes d'alimentation en eau et de distribution qui réduisent au minimum les pertes d'eau ;
- Un calendrier d'irrigation flexible qui correspond aux quantités nettes nécessaires pour compenser l'évapotranspiration et assurer le lessivage, compte tenu des précipitations effectives ;
- Un nivellement du terrain, un aménagement des dispositifs d'irrigation et une régulation de l'apport d'eau répondant à des normes qui assurent l'uniformité de l'irrigation dans l'espace et qui permettent de régler les quantités dans le temps ;
- Le traitement de l'eau pour enlever les sels en excès, si cela se justifie ;
- Le lessivage des sels en excès du sol ;
- Des systèmes de drainage par tuyaux ou autres qui permettent d'éliminer rapidement l'excédent d'eau du sol dans le périmètre affecté ;
- Un contrôle effectif des changements qualitatifs et quantitatifs des propriétés pertinentes du sol et de l'eau qu'il contient afin d'être en mesure d'intervenir lorsque des problèmes surgissent.

Les systèmes d'irrigation localisée, et tout particulièrement ceux destinés à l'irrigation à l'eau salée, comportent autant de risques de salinité du sol que les systèmes d'irrigation en surface. Ces problèmes se produisent surtout à la périphérie des zones arrosées, ce qui exige un contrôle minutieux de l'étendue de ces dernières. Il est possible de répondre aux besoins de lessivage en incluant périodiquement ou, dans les zones à climat méditerranéen, en saturant partiellement le sol au début de la saison pluvieuse, puis en laissant les précipitations achever le travail. Selon la quantité et la nature des précipitations, il est possible de procéder à une irrigation supplémentaire en surface ou par aspersion afin de réaliser le processus en totalité ou seulement en partie.

L'assainissement des zones affectées et l'amélioration des conditions de salinité secondaire doivent être assurés en traitant le système dans son ensemble et en se concentrant avant tout sur l'élimination de la cause principale et des manifestations du problème. Ces opérations peuvent être techniquement complexes et coûteuses. En premier lieu, on doit sceller les sources d'eau de suintement, par exemple en revêtant les canaux. L'excès d'eau souterraine doit être enlevé par pompage dans les puits crépinés ou par drainage de l'eau hors du périmètre affecté ; le lessivage des sels du sol doit se faire par inondation, c'est-à-dire en rinçant le sol à l'eau « douce », le lessivage étant d'autant plus efficace que le sol n'est saturé. Le percolat doit ensuite être évacué de l'endroit. Pour favoriser le processus d'élimination des sels provenant du sol ou de l'eau salée, on ajoute parfois des amendements chimiques acidogènes tels que le gypse, le soufre, le fer ou le sulfate d'aluminium. Yaron et al. (1973) signalent qu'il est possible, dans un projet d'irrigation efficace, de faciliter le contrôle de l'accumulation des sels dans le sol en prévoyant leur niveau d'accumulation ainsi que la quantité d'eau qu'il faut fournir périodiquement pour les éliminer.

Une fois les problèmes enrayés ou circonscrits par ces moyens, il est possible d'appliquer des méthodes biologiques pour amener le sol à sa capacité productive potentielle. On peut, entre autres, ajouter de l'engrais vert, du fumier d'étable, du compost et d'autres substances semblables pour compenser l'effet des sels sur le pH ; on peut dans le même but planter des espèces qui améliorent le sol, comme *Acacia* et *Sesbania* ; on peut, enfin, épandre des doses supplémentaires d'engrais conçues par des spécialistes. Il importe de ne pas appliquer ces mesures avant d'avoir résolu les problèmes fondamentaux. Sheikh (1974b) note des cas où le rendement des cultures améliorantes décline après un ou deux ans parce que les problèmes de base n'ont pas été corrigés. La stratégie globale doit consister à appliquer une gamme de mesures visant à ramener la salinité à un niveau tolérable et à l'y maintenir. La culture d'espèces halophiles ne résout pas en soi le problème de la salinité et les espèces qui accumulent du sel dans leurs tissus ne peuvent pas réduire la teneur en sel du sol, à moins que l'on ne retire les tissus des lieux.

Troubles de croissance et maladies du système racinaire

Les systèmes racinaires s'ancrent dans les zones humides du sol. Ils tendent à devenir moins actifs si la quantité d'eau disponible diminue, et meurent si la zone se dessèche. Les racines peuvent tolérer des périodes limitées de saturation en eau du sol ; certaines espèces, comme *A. nilotica*, résistent mieux que d'autres à cet égard. Dans la plupart des cas, néanmoins, une bonne aération du sol est nécessaire pour la santé du système racinaire. Ces caractéristiques ont diverses répercussions sur la pratique de la sylviculture irriguée. Si la quantité d'eau disponible fluctue, l'efficacité du système racinaire s'en trouve amoindrie, ce qui aboutit à une croissance sous-optimale. C'est pourquoi il est important que l'irrigation soit uniforme sur le plan de la quantité et de la fréquence. Lerche et Khan (1967) citent l'irrégularité de l'arrosage comme une des raisons du manque de vigueur de *D. sissoo* dans certaines plantations du bassin de l'Indus et Laurie (1974) signale le même problème dans la Gézireh. Un arrosage excessif au début de la vie d'une plantation entraîne un développement limité en profondeur du système racinaire, ce qui peut aboutir à de nombreux cas de déracinement par le vent et, si le taux d'irrigation est réduit par la suite, à la mort de la plantation tout entière (M.I. Sheikh, Institut forestier du Pakistan, Peshawar, Pakistan, communication personnelle, 1984). Vermeiren et Jobling (1980) remarquent que si, dans des conditions d'irrigation localisée, la partie mouillée de l'horizon racinaire est trop limitée, le déploiement des racines s'en trouve restreint, ce qui non seulement nuit au rendement mais diminue aussi la résistance des arbres au vent. Pour la même raison, les arbres soumis à une irrigation localisée sont plus perturbés par une réduction de l'alimentation en eau que les arbres irrigués par inondation. Par conséquent, l'alimentation en eau d'un système d'irrigation localisée doit être absolument fiable et les apports réguliers.

Une mauvaise aération du sol due à une saturation plus ou moins permanente, du moins dans les zones immédiatement adjacentes aux canaux dans les plantations irriguées par rigoles, nuit au développement des racines et aboutit à la formation d'un système racinaire asymétrique. Si le manque d'aération touche une proportion importante de la région et que l'irrigation est irrégulière, le système racinaire présente une apparence « boîteuse ». Ces caractéristiques restreignent la croissance et la résistance au vent de l'arbre, favorisent parfois

le développement de maladies fongiques dans les systèmes racinaires et peuvent même entraîner la mort des arbres, comme dans les plantations d'*Eucalyptus* qui ont souffert de ces conditions en Iraq (Pryor 1953 ; Raeder-Riotzsch 1965) et dans la Gézireh (Bosshard 1966a). Pryor suggère de creuser périodiquement la terre entre les rangées à une profondeur d'environ 2 pieds (0,6 m) pour favoriser la percolation et l'enracinement. Kadambi (1946, 1951) décrit les maladies racinaires associées au champignon *Trichosporium versiculosum* dans des plantations de *Casuarina* de l'État de Mysore, en Inde, et signale qu'elles semblent surtout provenir de périodes d'arrosage excessif alternant avec de longues interruptions de l'irrigation.

Khan et al. (1956) décrivent les dégâts généraux subis localement par *D. sissoo*, *M. alba* et *M. azaderach* et même la mort de ces espèces dans des plantations irriguées du Pendjab, au Pakistan, affectées par des absences répétées d'irrigation, les problèmes étant particulièrement graves dans les zones occupées auparavant par des bouquets de forêt naturelle. L'organisme à l'origine du problème est, dans ce cas, un champignon qui attaque l'écorce des arbres, *Hendersonula toruloidea*. Khan et Bokhari (1970) signalent l'infection de *D. sissoo*, *M. alba* et *A. nilotica* par *Fomes lucidus*, *Poria ambigua* et *Polyporus gilvus* pour les mêmes raisons dans la région de Faisalabad au Pendjab. *Ganoderma lucidum* est aussi communément associé à la pourriture du pied et des racines de *D. sissoo* dans les plantations irriguées de la même région ; les raisons fondamentales sont les mêmes. D'après Prevosto (1971), l'interruption ou l'irrégularité de l'irrigation expliquerait pourquoi les peupliers irrigués de la vallée du Pô en Italie ont été gravement atteints par le champignon *Marssonina bruna*, qui peut retarder considérablement la croissance.

Le chapitre 6 examine d'autres aspects de la croissance et de la formation des racines du point de vue de l'irrigation. À l'instar des problèmes cités ici à titre d'exemple, ces aspects supposent également que la solution ne réside pas dans la suppression directe du champignon ou de tout autre agent associé au problème, car le problème central est la méthode d'irrigation et la façon dont elle est appliquée. Dans un sens, les troubles fongiques et physiologiques constituent des avertissements qui doivent servir à contrôler et à régler les systèmes d'irrigation, même s'il est nécessaire de prévenir, dans la mesure du possible, l'apparition de ces problèmes au moment de la conception du projet.

Oiseaux, insectes et animaux

Dans les régions adjacentes aux blocs de plantations irriguées ou dans les endroits où l'arboriculture est étroitement intégrée à l'agriculture, comme dans le cas des rideaux-abris et d'autres applications de l'agroforesterie, les agriculteurs refusent souvent de planter des arbres parce qu'ils favorisent la présence de volées d'oiseaux granivores (pinsons, tisserins ou queleas dans la Gézireh), qu'ils encourageraient, semble-t-il, la prolifération des insectes nuisibles (comme certains ravageurs de coton), ou encore qu'ils constituent des hôtes intermédiaires des maladies fongiques des plantes annuelles (Masson et Osman 1963 ; Jackson 1976 ; Barbier 1978). Des doléances semblables ont été formulées dans les régions irriguées du bassin de l'Indus. Le forestier averti fera bien de s'en soucier, de prendre en considération et d'examiner de près chaque cas invoqué, et d'appliquer, si les circonstances le justifient, les mesures correctives nécessaires en choisissant, par exemple, d'autres variétés d'arbres ou en suggérant

certain remède au problème, comme des cultures réfractaires aux oiseaux. Dans au moins un cas au Pakistan, il semblerait que des oiseaux supposément destructeurs faisaient plus de bien en se repaissant des insectes dans le champ d'un agriculteur que de mal en mangeant les semences.

Les ravages des gerboises dans les champs cultivés et sur les berges des canaux suivent souvent la croissance d'une végétation luxuriante dans les zones irriguées (P.J. Wood, International Council for Research in Agroforestry, Nairobi, Kenya, communication personnelle, 1984).

Il existe peu de cas documentés de ravages économiques importants causés par des insectes dans des plantations irriguées. Wood et al. (1975) mentionnent les dommages causés par les mineuses, les cicadelles du rosier et les chenilles sur les jeunes arbres des plantations irriguées par aspersion dans la zone désertique d'Abu Dhabi, surtout pendant la saison chaude, lorsque la croissance est luxuriante. Les deux premiers insectes peuvent être enrayerés par des insecticides systémiques incorporés à l'eau du système d'irrigation. Bélanger et Saucier (1975) soulignent également l'efficacité des insecticides appliqués de cette manière dans la lutte contre les ravageurs des plantations de peupliers dans la zone des Grandes Plaines des États-Unis ; le traitement a donné de meilleurs résultats dans les systèmes d'irrigation par rigoles que par aspersion. Les sauterelles occasionnent souvent des ravages sérieux, comme dans certaines parties du bassin de l'Indus. Durant (1958) signale aussi les ravages des sauterelles dans les jeunes plantations irriguées de l'intérieur de l'Algérie et du Maroc. Les termites peuvent aussi être nuisibles, surtout si l'eau est répandue en quantités réduites dans les régions chaudes pendant la saison sèche. Mathur (1961) mentionne les ravages de termites dans des plantations irriguées de *Casuarina equisetifolia* au Rajasthan. Il est facile de remédier à ces situations grâce à des insecticides comme l'aldrin (là où l'emploi de telles substances est permis). Singh (1963) indique que dans le même État, on a mis un terme aux dommages causés par les termites aux plantations irriguées par l'application d'infusions de tabac ou d'Aldrex 30E.

Une maladie des dattiers de certaines oasis de l'Afrique du Nord, connue sous le nom de « bayoud » et probablement d'origine virale, est transmise par l'eau souterraine (K.Oka, CRDI, Ottawa, Canada, communication personnelle, 1984). Même si l'on ne connaît aucun cas du genre dans les plantations forestières irriguées, il faut néanmoins tenir compte de la transmission éventuelle de phytopathogènes par cette voie. La possibilité de transmission d'agents viraux de cette façon suite à la réutilisation de l'eau d'irrigation est examinée par l'Unesco (1974).

Les animaux brouteurs, comme les chèvres et les chameaux, causent parfois des ravages dans les plantations irriguées. Dans les propositions formulées au sujet des plantations irriguées avec des effluents d'eaux usées au Koweït, Wood et Synott (1978) recommandent, pour prévenir ces ravages, un contrôle direct des animaux, comme c'est le cas pour les cultures annuelles dans le bassin de l'Indus. Cependant, à la morte-saison, les chèvres et les bovins, qui sont détachés de leurs longes ou relâchés de leur stalles, peuvent endommager les jeunes plantations. Outre le dommage physique causé aux arbres qu'ils broutent, ces animaux contribuent à la dissémination des graines de mauvaises herbes, notamment celles de certaines espèces d'arbres indésirables, comme *Prosopis glandulosa*.

Effets de l'irrigation sur l'environnement et la santé humaine

Nous avons déjà fait allusion, au chapitre 6, aux effets sur l'environnement de l'utilisation d'eaux usées et d'effluents industriels contenant des minéraux et des ions susceptibles de s'accumuler dans le sol et de mettre en cause sa productivité, ainsi qu'aux propriétés de l'eau souterraine. L'altération de cette dernière pourrait mettre gravement en cause la potabilité de l'eau par l'accumulation d'ions azotés (Alverson 1975 ; Urie 1975 ; Edgar et Stewart 1979). En aval, les effets de la salinité due à l'irrigation et du problème connexe de la saturation en eau du sol ont été examinés dans plusieurs sections, notamment au début de ce chapitre. Il faut ajouter à ces effets toutes les conséquences éventuelles de l'emploi d'engrais chimiques.

Il est connu que les régions d'irrigation, comme l'Égypte, l'Inde et le Pakistan, sont infestées de parasites, y compris des parasites intestinaux comme ceux qui causent la schistosomiase (bilharzie) et la malaria, et de vecteurs de maladies, comme les escargots et les moustiques. Parmi les agences internationales directement intéressées par ces problèmes, mentionnons l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la Division de la mise en valeur de la terre et des eaux de la FAO pour qui Mather et Trinh Ton That (1974) ont effectué une analyse détaillée des problèmes ainsi qu'une révision de stratégies de lutte propres à la riziculture irriguée. Les principes fondamentaux et les stratégies qu'ils présentent sont pertinents dans le contexte qui nous intéresse. Ils signalent que, même si les méthodes de suppression des maladies et de leurs vecteurs au moyen de médicaments et d'insecticides jouent un rôle important, elles sont remises en cause par les problèmes de coût, la résistance des vecteurs aux insecticides et leurs effets sur l'environnement et la santé humaine.

Ces facteurs ont permis d'identifier d'autres moyens d'éliminer les vecteurs, notamment des méthodes environnementales et biologiques qui peuvent être intégrées aux méthodes chimiques. La suppression des vecteurs par la gestion de l'environnement comprend trois volets : l'utilisation et la gestion de l'eau ; la nature et la manipulation de la végétation, y compris des cultures ; et les mesures liées aux modèles d'habitation et de comportement humains. De ces trois volets, les deux premiers revêtent un intérêt particulier pour le spécialiste en irrigation dans la mesure où il est possible d'intégrer certains aspects de la suppression ou de la réduction des vecteurs et des maladies à la conception, à l'exploitation et à l'entretien des systèmes d'irrigation et de culture. Les auteurs mettent l'accent sur les avantages des stratégies qui comportent une manipulation de facteurs écologiques et qui minimisent, surtout à longue échéance, les apports chimiques et les coûts globaux.

Fowler et Helvey (1974) examinent les effets d'une pratique généralisée de l'irrigation sur le climat local, en prenant comme zone d'étude la région du projet du bassin du Columbia, dans le nord-ouest du Pacifique. L'étude des données disponibles sur la température de l'air en juillet et la hauteur des précipitations en juillet et août montre la très faible incidence apparente de l'irrigation. Le taux d'évaporation en bac ouvert semble donner la mesure la plus précise de ce faible effet intégré sur l'environnement de la région. Les chercheurs ont noté que la largeur des anneaux de la grande armoise, plante particulièrement utile pour détecter des changements dans l'environnement et notamment une amélioration de l'économie de l'eau, est restée stable au cours de l'aménagement

de la zone irriguée. Ils en ont conclu que, même s'il était possible de déceler des changements microclimatiques et qu'une modification de l'emplacement était tout à fait plausible, les effets climatiques généraux semblaient être minimes.

Les actions entreprises pendant un projet peuvent avoir des effets physiques importants, lourds de conséquences économiques et sociales que l'on doit, dans la mesure du possible, prévoir et intégrer aux phases de conception et d'implantation des projets d'irrigation. Citons, à titre d'exemple, le cas signalé par Gittinger (1982) du revêtement des canaux existants avec du béton pour empêcher le suintement. Cette mesure a entraîné le dessèchement des puits à proximité qui s'alimentaient précisément grâce au suintement et desquels les gens dépendaient pour leur approvisionnement en eau.

Croissance et rendement

On dispose des taux de croissance et des rendements de nombreuses plantations irriguées des régions arides et semi-arides ; ils sont intéressants dans la mesure où ils indiquent qu'il est possible d'atteindre des niveaux de production très élevés grâce à l'irrigation. Le résumé que nous présentons ici concerne la production mesurée en cubage utilisable par hectare. Les données exprimées sous forme de croissance en hauteur ou en diamètre sont des critères valables pour évaluer la croissance des jeunes peuplements forestiers. Il faut toutefois les exclure ici, car, dans ce contexte, elles ne constituent pas un indice économiquement valable de la production et ne permettent pas toujours d'établir des comparaisons précises entre des régions très éloignées entre elles. Les données en cubage qui suivent doivent servir tout simplement à indiquer l'ordre de grandeur du potentiel de chaque espèce dans des situations types. On doit les interpréter avec prudence, car elles proviennent de peuplements d'âges divers poussant dans des environnements, des conditions d'aménagement et sous des régimes d'irrigation différents. Certaines données proviennent de mesures exactes, d'autres ne sont que des calculs approximatifs et d'autres encore ne sont, comme nous l'indiquons, que des prévisions générales ou des estimations fondées probablement sur des résultats locaux (ces données sont résumées sous forme de tableau à l'annexe 1).

Asie du Sud et Moyen-Orient

Inde

Nous ne disposons malheureusement pas des données de production en cubage de bon nombre de projets intéressants, par exemple de l'exploitation forestière près d'Ahmedabad dans le Gujarat décrite par Gupta (1979). Par contre, certains de ces projets sont décrits en fonction d'autres paramètres économiques au chapitre suivant.

Les plantations d'un hybride d'*Eucalyptus* établies en bordure de canaux dans le cadre d'un projet social de foresterie dans l'Uttar Pradesh devaient produire, au bas mot, du combustible ligneux à un accroissement annuel moyen de 12 m³/ha au bout de 5 ans ; les rendements prévus par *A. nilotica*, *M. alba*, *P. juliflora* et *Terminalia arjuna* pour la même période sont d'environ 6 à 8 m³/ha par an.

Iraq

Les perspectives de production des plantations irriguées projetées dans la plaine mésopotamienne ont été établies par Busby (1979) d'après les seules données disponibles à l'époque qui provenaient de peuplements expérimentaux exploités dans la région. D'après Busby, les rendements obtenus dans les régions les plus propices atteignaient 36 m³/ha par an au bout de 5 ans pour le peuplier noir et 16 m³/ha par an au bout de 10 ans pour *E. camaldulensis*.

Israël

Dans des essais d'irrigation à Ilanot, dans la plaine côtière centrale (altitude : 30 m ; hauteur annuelle moyenne des précipitations en hiver : 603 mm), où *E. camaldulensis* est dormant pendant l'été chaud et sec, l'apport en hiver de 368 mm d'eau pendant la première année, de 538 mm pendant la deuxième, de 593 mm pendant la troisième et de 689 mm pendant la quatrième avait donné un accroissement annuel moyen à ce stade de 14,3 m³/ha par rapport à 7,2 m³/ha dans le peuplement témoin non irrigué. Dans une autre expérience dont la seule différence par rapport à la précédente était l'apport pendant la première année de 192 mm d'eau au lieu de 368 mm, l'accroissement annuel moyen au bout de quatre ans s'établissait à 15,8 m³/ha. Donc, l'irrigation qui a amené l'apport d'eau, y compris les précipitations, à un niveau variant de 970 à 1 290 mm pendant la période de végétation, a permis de doubler la croissance en cubage au bout de quatre ans (Karschon 1970). Dans la même région, lors d'une expérience portant sur le degré d'irrigation, avec un régime optimal correspondant à un apport de 1 350 mm d'eau par saison en plus de 600 mm de précipitations, l'accroissement annuel moyen pour deux clones de *Populus deltoides* a atteint respectivement 24 et 39 m³/ha au bout de 4 ans.

Tableau 5. Production de *Dalbergia sissoo* dans des plantations irriguées de la vallée de l'Indus.

Catégorie de qualité	Âge (Années)	Accroissement annuel ^a moyen ^a (cubage en m ³ par hectare)
1	10	5,9
	15	8,2
	20	10,1
2	10	4,2
	15	5,7
	20	7,6
3	10	3,1
	15	4,2
	20	5,0

Source : Troup (1921).

^a Comprend le menu bois d'un diamètre inférieur à 2,5 cm.

Koweït

Wood et Synott (1978) ont projeté la mise en culture, près de la ville de Koweït, de rideaux-abris et de plantations forestières destinées à la production intensive de bois et à la protection de l'environnement, parfois assez espacés les uns des autres. Ces diverses plantations devaient être irriguées par les eaux usées en provenance de la ville. *Eucalyptus camaldulensis* devait être une des principales espèces plantées. En se fondant sur d'autres plantations plus anciennes des environs, par exemple celles signalées par Firmin (1971), et sur des

plantations croissant dans des conditions semblables mais dans d'autres régions, ils ont prédit que l'accroissement annuel moyen de cette espèce atteindrait au bout de 10 ans à peu près 25 m³/ha dans les peuplements bien fournis.

Pakistan

Troup (1921) a relevé les accroissements annuels moyens de *D. sissoo* dans les plantations irriguées de la vallée de l'Indus (tableau 5). Dans un travail plus récent, Lerche et Khan (1967) signalent que l'accroissement annuel moyen du bois commercialisable se situe autour de 3,5 m³/ha pour la même espèce dans la même zone, ce qui indique que de nombreux aspects de l'aménagement doivent être modifiés et améliorés afin d'augmenter la production d'à peu près 3,5 fois pour atteindre le rendement potentiel d'environ 9 m³/ha par an. Même ce chiffre ne semble pas refléter la capacité de la zone, du moins dans les régions qui n'ont pas été affectées par la salinité, car d'autres éléments de la biomasse totale produite, comme les petites branches et les feuilles, peuvent être vendus comme fourrage ou comme combustible léger. Les tableaux de rendement locaux ne tiennent généralement pas compte des matériaux dont le diamètre est inférieur à 8 cm et ne s'appliquent pas par conséquent à l'aménagement des plantations exploitées intensivement, comme la plupart des plantations en question.

Dalbergia sissoo et *A. nilotica* sont des espèces utiles cultivées traditionnellement dans la région et qui seront toujours importantes. D'autres espèces, cependant, comme les peupliers et les *Eucalyptus*, peuvent procurer un meilleur cubage. D'après Lerche et Khan (1967), Pryor aurait dit que les *Eucalyptus* devraient produire une moyenne d'au moins 18 m³/ha par an, et ce chiffre est corroboré par les données provenant de petits peuplements et des essais.

Afrique

Niger

Sur des sols de bassins de rivière inondés régulièrement près de Goudel, l'accroissement annuel moyen du cubage total (sans compter l'écorce) au bout de 5,5 ans était de 31,6 m³/ha lors d'un essai sur *E. camaldulensis* et de 42,6 m³/ha pour *Eucalyptus resinifera*. À Karma, sous un régime d'irrigation de 270 mm d'eau d'octobre à mai qui viennent s'ajouter à des précipitations annuelles moyennes de 550 mm, l'accroissement annuel moyen constaté lors d'un essai de provenance sur *E. camaldulensis* variait au bout de 3 ans de 7,8 à 20,0 m³/ha. Dans un essai non replicatif portant sur les volumes d'irrigation, l'accroissement annuel moyen de la même espèce s'établissait à 4,6, 12,1 et 12,9 m³/ha pour des volumes d'irrigation de 0, 270 et 460 mm par saison ; il est évident que, dans le deuxième et le troisième cas, les racines des arbres avaient atteint la nappe phréatique. Lors d'un essai d'espacement avec irrigation par inondation, l'accroissement annuel moyen d'*E. camaldulensis* au bout de 2 ans variait de 16 m³/ha pour un espacement de 3 m × 3 m à 38 m³/ha pour un espacement de 1 m × 1 m (Hamel 1985). Jean Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, États-Unis, communication personnelle, 1984) est d'avis que les plantations irriguées bien conçues et bien exploitées d'*Eucalyptus* produiraient en moyenne entre 15 et 20 m³/ha par an dans la région en question.

Nigéria

Dans un essai de provenance, *E. camaldulensis* a été planté sur des sables lacustres dans l'extrême nord-ouest du Nigéria, près du lac Tchad, et irrigué par aspersion au cours de la première année jusqu'à ce que le système racinaire des arbres atteigne l'eau souterraine. La croissance a été remarquablement hâtive, surtout pour les provenances « Petford » et « Katherine » : Pryor (1970) dit que le diamètre à hauteur d'homme de 10 cm et la hauteur de 11 m atteints au bout de 17 mois correspondaient au taux de croissance le plus rapide jamais enregistré pour *Eucalyptus* dans le monde entier. Allan (1977) et Jackson (1976) signalent que l'accroissement annuel moyen au bout de 4 ans de la provenance qui présentait le taux de croissance le plus rapide était de 21,8 m³/ha. Ce chiffre constitue sans doute un ralentissement de la croissance par rapport aux mesures prises au bout de 17 mois ; il s'explique par le fait que la plantation n'a été irriguée que jusqu'au moment où les racines ont atteint la nappe phréatique.

Soudan

D'après Masson et Osman (1963), le rendement moyen des plantations irriguées d'*E. microtheca* dans la Gézireh était de 7,3 m³/ha par an au bout de 7,5 ans. Dans son analyse de la production et des perspectives de production pour ces plantations, Foggie (1967) signale que l'apport d'eau était irrégulier et souvent inadéquat. Dans ces conditions, le rendement moyen était de 6,6 m³/ha par an, même si parfois, sous des régimes d'arrosage plus cohérents, l'accroissement annuel moyen a atteint 9,9 m³/ha. Il est d'avis qu'une irrigation plus appropriée et régulière donnerait un accroissement annuel moyen de 12 m³/ha. Ahmed (s/d), dans ses tableaux de gestion pour la même espèce dans la Gézireh, signale qu'au bout de 9 ans, l'accroissement annuel moyen dans un peuplement de jeunes arbres était de 23,3, 14,1 et 6,9 m³/ha pour les emplacements de catégories I, II et III, ce qui correspond à des hauteurs moyennes respectives de 40 à 60 m, de 40 m et de 30 à 40 m. Ahmed remarque également que l'accroissement annuel moyen dans le cas de révolutions successives sur taillis devrait être en moyenne supérieur de 15 % à celui correspondant à des révolutions sur semis dans des emplacements de catégorie I, et de 10 % pour ce qui est des peuplements de catégorie II, bien qu'il puisse être inférieur de 17 % dans le cas de peuplements de catégorie III. Ali (1979) confirme les prévisions d'Ahmed et indique les possibilités d'accroissement liées à un meilleur aménagement. Il commente la prévision de rendement apparemment anormale concernant les taillis de la catégorie III et suggère qu'il serait nécessaire d'en chercher la cause au niveau de la sylviculture.

D'après Foggie (1967), l'accroissement annuel moyen de la forêt naturelle aux alentours de la plantation de la Gézireh est d'environ 0,5 à 0,6 m³/ha, sans irrigation.

Zimbabwe

Dans une analyse soigneusement compilée et interprétée des données de croissance, Barrett et Woodvine (1971) citent les résultats obtenus au bout de 4 à 6 ans dans 138 placettes d'essai sans replication, généralement petites, regroupant 45 espèces de 13 genres sous irrigation dans la zone sylvi-cole V du Zimbabwe (il s'agit d'une région semi-aride avec une hauteur annuelle

Tableau 6. Taux de croissance types obtenus lors d'essais d'irrigation au Zimbabwe.

Espèces	Âge (années/mois)	Accroissement annuel moyen (m ³ /ha par an)
<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	5/8	7,1-8,3
<i>Casuarina cunninghamii</i>	4/11	6,6-12,5
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	5/8	14,9-65,5
<i>Eucalyptus citriodora</i>	5/7	6,9-26,8
<i>Eucalyptus cladocalyx</i>	5/8	7,3-18,3
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	5/8	26,4
<i>Eucalyptus crebra</i>	5/8	12,4-12,8
<i>Eucalyptus gomphocephala</i>	5/8	15,0-18,9
<i>Eucalyptus grandis</i>	5/8	20,7-47,4
<i>Eucalyptus leptophleba</i>	5/8	14,8
<i>Eucalyptus maculata</i>	5/8	19,0-19,4
<i>Eucalyptus paniculata</i>	5/8	15,0
<i>Eucalyptus punctata</i>	5/8	18,8-28,9
<i>Eucalyptus resinifera</i>	5/8	21,6-41,7
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	5/8	16,6-40,8
<i>Eucalyptus tessellaris</i>	4/8	14,4
<i>Eucalyptus torelliana</i>	4/8	17,6
<i>Gmelina arborea</i>	4/11	10,8
<i>Grevillea robusta</i>	5/8	16,1
<i>Populus deltoides</i>	5/1	14,5
<i>Tectona grandis</i>	4/11	8,5
<i>Tectona grandis</i>	7/9	14,8

Source : Barrett et Woodvine (1971).

moyenne de précipitation en été de 450 à 635 mm, 3 mois de fraîcheur et des étés chauds ou très chauds) où le taux de croissance de la forêt naturelle est de 0,50 à 0,75 m³/ha par an). Plusieurs terres irriguées ou présentant un suintement latéral de l'eau ont été utilisées pour les essais. On les a regroupées en six types de régimes; dont quelques-uns ont été modifiés en cours d'essai, ce qui a soumis les placettes en question à un certain degré de stress hydrique. Les données des placettes affectées ayant été exclues, le tableau 6 donne l'accroissement annuel moyen à différents âges pour les espèces les plus prometteuses de chaque placette.

Les rendements atteints correspondent à des conditions d'irrigation qui peuvent être décrites comme opportunistes, c'est-à-dire aux conditions qui règnent à la périphérie de plantations irriguées de canne à sucre et de citrus et le long des canaux traversant ces plantations. Ils ne correspondent pas nécessairement à la production dans des conditions d'irrigation optimales; cependant, il faut noter que les résultats des placettes ayant subi un stress hydrique ont été exclus. La forêt naturelle qui couvrait auparavant la région comprenait surtout des peuplements ouverts dominés par des espèces de *Combretum* et d'*Acacia* accompagnées de *Colophospermum mopane* et parfois d'*Adansonia digitata*. Le taux de croissance global moyen de ces espèces aurait été de l'ordre de 0,6 à 0,75 m³/ha par an.

Généralités

Pour conclure ce survol rapide des taux de croissance et des rendements en situation d'irrigation, notons les trois points suivants :

- Les données publiées portant sur la croissance et le rendement sont peu abondantes. Même s'il est possible de trouver dans certains pays des don-

nées non publiées, il s'agit là sans aucun doute d'un sujet de recherche prioritaire.

- Les données de croissance et de rendement disponibles dans tous les cas — sauf les données de Troup (1921) pour *D. sissoo* dans la vallée de l'Indus — excluent au moins les petites branches, les brindilles et le feuillage. Dans la plupart des cas, ces éléments exclus ajouteraient 20 % à 30 % au cubage indiqué. Un autre sujet de recherche prioritaire serait l'élargissement des tableaux existants de cubage et de rendement de façon à inclure ces éléments de production.
- Dans tous les cas, le rendement sans irrigation de référence devrait être celui de la forêt naturelle qui occupait auparavant les emplacements des plantations irriguées, soit de 0,50 à 0,75 m³/ha par an, comme nous l'indiquons dans les sections sur le Soudan et le Zimbabwe.

Impératifs de recherche

Selon l'impression générale qui se dégage de la documentation sur l'irrigation, et tout particulièrement sur l'irrigation des peuplements forestiers, la question qui nécessite sans aucun doute les éclaircissements les plus complets et les plus urgents est celle des besoins d'eau et de la réaction des plantes cultivées soumises à un régime d'irrigation à des étapes de leur croissance, dans des types de plantations et dans des conditions d'environnement (y compris la nature du sol) différents ; il ne s'agit pas d'établir simplement les conditions idéales, mais aussi de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour maintenir une réponse acceptable sur le plan pratique et de savoir quand et à quelle fréquence cet apport est nécessaire. Cette nécessité a été confirmée par des spécialistes qui se sont intéressés aux plantations irriguées dans des pays aussi divers que le Mali (BIRD 1979a), les Émirats arabes unis (Satchell, 1978), le Niger (Delwaulle 1979 et autres), le Pakistan (Ahmad 1975 ; M.I. Sheikh, Institut forestier du Pakistan, Peshawar, Pakistan, communication personnelle, 1984) et l'Iraq (Raeder-Riotzsch 1965). Il est nécessaire d'avoir des données sur ces sujets avant de pouvoir formuler des régimes efficaces d'irrigation quant à la quantité et à la fréquence, dans le but d'atteindre une production optimale (NAS 1974), d'économiser de l'eau (Van der Zel et Wicht 1974), de préserver la fertilité du sol et de minimiser les exigences et les coûts de drainage (y compris l'élimination de l'excès d'eau). Ces résultats ne seraient pas nécessairement transposables sans essais préalables sur le nouvel emplacement, mais ils n'en demeureraient pas moins précieux à cause de leur applicabilité générale dans des conditions très diverses, ainsi qu'au niveau local.

Même s'il est probable, comme nous l'avons vu dans ce chapitre, que la question des besoins d'eau d'une espèce cultivable continue à présenter un très grand intérêt du point de vue de la recherche sélective, il manque des règles et des principes établis permettant d'intégrer les divers aspects de l'alimentation en eau à la conception de systèmes d'irrigation pour les diverses espèces d'arbres. À cet égard, les résultats publiés des travaux de Karschon (1970) et de Rawitz et al. (1966) constituent des exemples du type d'étude nécessaire. Même si les études de Raeder-Riotzsch et Masrur (1968) au Pakistan et de Chaturvedi et al. (1984) en Inde, mentionnées au chapitre 3, portent sur les jeunes arbres, elles illustrent des recherches concrètes contribuant à la détermination des régimes d'arrosage des terres.

Les exploitations tunisiennes étudiées par Van Hoorn et al. (1968) indiquent le taux de succès qu'il est possible d'obtenir grâce à des recherches visant à mettre au point des méthodes d'irrigation qui utilisent de l'eau de qualité marginale, en l'occurrence de l'eau saumâtre. Ces recherches, commencées en 1935, ont abouti à l'identification des limites de tolérance au sel des plantes (surtout, mais pas exclusivement, des plantes annuelles); des méthodes, des taux et des fréquences d'irrigation; et des systèmes de drainage des dispositifs d'irrigation couronnés de succès et comprenant des arbres. Comme nous l'avons déjà dit, des travaux de cette nature (quoique plus empiriques) sont en cours dans d'autres zones désertiques et semi-désertiques comme au Koweït et en Abu Dhabi. On peut s'attendre à ce que la nécessité de mettre au point des méthodes adaptées à ces situations difficiles se fasse plus pressante. Cela s'impose d'ailleurs dans le cas de l'assainissement et de l'exploitation, en vue de la production de bois, des zones chargées de sels par suite d'un suintement, d'une irrigation excessive ou des deux à la fois. Il faut donc concevoir des méthodes d'assainissement et, notamment, des méthodes applicables à la suite de l'assainissement de base par pompage et élimination de l'excédent d'eau et du lessivage.

Comme nous l'avons signalé plus haut dans le présent chapitre, Doneen (1972) fournit des directives pour la conception expérimentale de projets de recherche sur les besoins d'eau des plantes. Quoiqu'elles portent principalement sur les cultures annuelles, ces directives peuvent être adaptées facilement aux recherches sur l'arboriculture. Les personnes chargées de la supervision d'un programme de plantation forestière irriguée au Mali, subventionné par la Banque mondiale, suggèrent qu'il serait prudent, là où il est difficile de prévoir le rendement des plantations forestières soumises à un régime d'irrigation, d'effectuer des essais préliminaires empiriques de petite envergure avant de se lancer dans des travaux majeurs. Les recherches décrites par Barrett et Woodvine (1971) constituent un bon exemple de l'approche qui serait souhaitable, même si la conception devrait inclure l'étude des taux et des fréquences d'irrigation ainsi que des possibilités de replication.

Un autre sujet de recherche sur les plantations irriguées, qui revient presque aussi souvent dans la documentation que celui décrit plus haut, concerne l'essai, la sélection et l'amélioration des variétés qui s'adaptent particulièrement bien à cette forme de culture, et notamment des espèces, des provenances et des cultivars halophiles. Cette nécessité est mentionnée entre autres par Edgar et Stewart (1979), Barbier (1978) et la NAS (1974). Il est également évident que la provenance présente des variations en fonction de la culture irriguée, comme le montrent, par exemple, les essais sur des espèces d'*Eucalyptus* dans le Niger (Barbier 1968 et autres), à Mallam Fattori au Nigéria (Pryor 1970) et dans les plantations de la Gézireh (FAO 1969). Comme nous l'avons signalé au chapitre 6, Dickmann (1975) suggère l'emploi d'un idéotype hypothétique afin de faciliter l'établissement d'objectifs dans le cadre des travaux d'amélioration destinés à sélectionner des types d'arbres permettant la production de qualités particulières de bois dans des plantations irriguées intensives. Au cours des essais menés au Zimbabwe sur des plantations forestières irriguées, il a fallu, entre autres, déterminer à quel point l'arbre poussait droit. En outre, la présence ou l'absence de floraison et de fructification ont été notées dans chaque évaluation. On a recueilli ces données à cause de leur valeur au moment du choix des provenances ou des phénotypes dans les programmes d'amélioration des essences et lors de la mise en œuvre des dispositifs de production de semences.

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 6, il importe d'explorer des ensembles génétiques importants, par exemple, certains genres des casuarinacées, au moyen d'essais portant sur l'espèce et la provenance et conduisant à une sélection et à une amélioration plus intensives.

Des recherches sont nécessaires pour déterminer les doses optimales d'engrais à appliquer dans des conditions précises d'irrigation.

Les régimes et les taux de production sylvicoles par unité de surface ainsi que la durée de la révolution selon l'espèce d'arbre sont en général extrêmement variables dans une zone donnée. Cela reflète la variabilité du traitement cultural, y compris des régimes d'irrigation, aussi bien que d'autres facteurs. Les possibilités de rectifier cette situation procèdent, pour la plupart, du domaine de la gestion et de la supervision des programmes. Cependant, cela rappelle qu'il est nécessaire de perfectionner, en général mais aussi localement, les systèmes d'irrigation, de mettre à l'épreuve les divers régimes sylvicoles et d'élaborer des principes opérationnels fondés sur les progrès de la recherche dans les domaines mentionnés. Il sera nécessaire d'effectuer des recherches pour mettre au point des méthodes de conception et de traitement sylvicoles adaptées à la culture irriguée, y compris l'intégration de l'arboriculture et de l'agriculture.

Il faut perfectionner les modèles combinant l'arboriculture et les cultures annuelles à l'intention de l'agriculteur individuel ; il faut également perfectionner les techniques connexes d'aménagement et de récolte forestière, comme la coupe de rajeunissement, l'émondage et l'ébranchage. Dans les recherches en agroforesterie portant sur la conception et l'aménagement sylvicole, il faut mettre l'accent sur les interactions entre l'arboriculture et l'agriculture et sur les moyens de les minimiser ou de les optimiser. Il est nécessaire également d'effectuer des recherches sur les méthodes d'établissement et d'aménagement de plantations dans des zones salines saturées d'eau.

Pour gérer des plantations, il importe de pouvoir recourir à des moyens d'information (par exemple, des indices d'emplacement et des tables de rendement) beaucoup plus complets que ceux dont on dispose actuellement en général, même après de nombreuses années de pratique de l'irrigation. Il faut donc effectuer des recherches sur la croissance et le rendement et se servir de ces données pour produire des modèles de croissance utilisables par les planificateurs et les directeurs de projets. Les tableaux de prévision du rendement doivent porter sur la production totale de la biomasse (qui peut être subdivisée en plusieurs assortiments), en fonction des différents systèmes et des différentes méthodes d'aménagement sylvicole. La plupart des tableaux existants relatifs au cubage, au rendement et à l'assortiment ne comprennent que le bois d'œuvre et les grands poteaux ; ils pourraient facilement être étendus de façon à refléter le rendement total de bois et de fourrage.

Là où des eaux usées municipales ou industrielles sont utilisées pour irriguer des peuplements forestiers, il faut effectuer des recherches pour déterminer l'évolution des éléments et des composés dissous et en suspension dans ces eaux, leurs effets à court terme et à long terme sur la nature et la production du sol et sur les eaux souterraines ainsi que les effets des variations de ces effluents sur la croissance des arbres (Edgar et Stewart 1979). Ces recherches sont d'autant plus urgentes qu'il y a risque d'effets indirects sur la santé humaine et animale ou sur la productivité à long terme de la zone irriguée.

On retrouve souvent dans la documentation des recommandations en faveur de recherches économiques dans le domaine des plantations forestières irriguées, ce qui signifie qu'il existe un besoin d'analyses économiques plus fréquentes des programmes de ce type. Ces analyses exigeraient, à leur tour, plus de données sur les systèmes de plantations, leurs coûts et leurs rendements dans diverses conditions environnementales et sociales bien définies. Ce besoin constitue un défi aussi bien au niveau de la collecte et de la production des données, en tant que fonctions de la gestion d'un programme, qu'à celui des recherches qui en constitueraient le fondement.

À titre de conclusion, notons que les activités de recherches dans le domaine des plantations irriguées peuvent prendre au moins une des trois formes générales suivantes :

- Des recherches de base visant à établir de nouveaux principes qui permettraient la mise au point de techniques innovatrices ;
- Des travaux de recherche et de développement supposant l'application de principes établis et de concepts neufs en vue de concevoir de nouvelles méthodes d'irrigation ou de plantation, ou de découvrir des espèces, des provenances, des populations naturelles ou des cultivars d'arbres nouveaux ou meilleurs ; et
- Des recherches appliquées visant à mettre à l'épreuve, à raffiner ou à améliorer les méthodes et les systèmes pratiqués actuellement.

Dans des projets de plantations irriguées, c'est ce dernier type de recherche qui est le plus couramment pratiqué, car une entreprise pourrait difficilement réussir et progresser sans des études constantes de cette sorte. La deuxième forme de recherche est moins courante, quoiqu'elle soit généralement nécessaire et importante dans les premières phases de la réalisation d'un projet. Quant à la recherche fondamentale, généralement coûteuse et peu rentable à court terme, son besoin ne se fait sentir qu'à l'occasion. Si c'est le cas, il convient de la relier, dès le début du projet et de la manière la plus appropriée, aux étapes pratiques qu'elle est censée faciliter.

9. Aspects économiques des plantations irriguées

Besoins, possibilité et nécessité d'une évaluation

L'envergure et la portée des plantations forestières irriguées varient beaucoup. Elles peuvent consister en quelques arbres plantés par des agriculteurs soucieux d'agroforesterie le long des chemins et des canaux d'irrigation, au bord des champs, ou sur de petites parcelles non cultivées. Dans ce cas, l'apport d'eau se fait par suintement ou par réutilisation de l'eau ayant servi principalement à l'irrigation des cultures de plein champ. De telles initiatives, lorsqu'elles se répètent dans une même localité, peuvent être coordonnées dans un programme de création de rideaux-abris bénéfiques à tous. Par ailleurs, un agriculteur, une compagnie ou une société peuvent faire de l'exploitation des peuplements forestiers leur activité principale, tout comme les divers paliers de gouvernement (local, régional ou national) peuvent décider de cultiver certaines plantations. Des initiatives comparables peuvent enfin naître de la volonté d'utiliser de façon productive les eaux usées, par exemple les effluents municipaux ou industriels.

Dans tous les cas, l'entreprise arboricole répond à un besoin défini. Ce peut être, dans le cas d'un agriculteur, le besoin de combustible ménager, de rames à haricots, de poteaux ou de piquets pour la construction, de matériaux pour clôtures ou de fourrage. Dans un tel cas, certains avantages indirects découlent de la substitution des biens préalablement employés : le bois peut remplacer le kérosène ou le charbon comme combustible, la bouse peut servir de fumier plutôt que de combustible, et il devient possible d'éviter les dépenses occasionnées par l'achat de fourrage, de matériaux de construction ou d'emballage. L'exploitant peut vendre des produits arboricoles, y compris les excédents qui restent après satisfaction des besoins de sa famille, pour augmenter le revenu de sa ferme. Il y a aussi des avantages moins tangibles, comme la commodité qu'offre la production des articles nécessaires sur les lieux, l'économie du temps qui aurait été consacré au transport du combustible ligneux à partir de sources éloignées, les influences bénéfiques des rideaux-abris, les bienfaits de l'ombre pour la famille et pour le bétail, la valeur esthétique et l'amélioration de la qualité de vie. Les tâches que supposent l'établissement et la gestion d'un peuplement forestier dans une petite exploitation agricole ne devraient pas sérieusement concurrencer sur le plan du temps l'activité principale, à savoir l'agriculture, car l'irrigation introduit une certaine flexibilité dans l'accomplissement des tâches qui, autrement, seraient saisonnières. Cette souplesse signifie aussi que ces activités permettront la création éventuelle de nouveaux emplois durant la morte-saison agricole.

Le secteur public ou privé peut décider de financer des exploitations forestières plus importantes bénéficiant de l'irrigation pour répondre aux besoins de communautés rurales ou urbaines en matière de combustible ligneux, de



Les plantations forestières irriguées prennent de nombreuses formes, dont des rideaux-abris à rangées multiples dans les champs agricoles. Sur la photo, un rideau de Casuarina en bordure d'une rizière irriguée à Burkina Faso (la croissance de la céréale ne semble pas, ici, avoir été touchée).

poteaux et de billes à scier, ou encore pour agrémenter l'environnement de ces communautés. De telles entreprises présentent des avantages directs, indirects et incorporels semblables à ceux de la petite exploitation mixte, même si l'échelle, les coûts et la complexité sont plus grands, et sont souvent associés à des activités agricoles, au moins pour ce qui est de l'alimentation commune en eau.

Tous les projets de plantations irriguées, quelle qu'en soit l'échelle et pour critique que soit le besoin des produits dérivés, font l'objet à un moment donné d'une analyse économique permettant d'évaluer la faisabilité du projet, puis les mérites et les inconvénients des autres stratégies possibles, y compris les méthodes techniques et les procédés de contrôle. Pour l'agriculteur qui veut intégrer quelques arbres à son exploitation, la faisabilité se calculerait en comparant l'investissement nécessaire de temps et d'autres ressources et les bénéfices escomptés. Plus l'entreprise est grande et donc complexe, plus l'analyse doit être complexe et formelle. Dans les deux cas, pour intéressante qu'une telle entreprise puisse paraître de prime abord, elle risque cependant de procurer des revenus inférieurs aux prévisions si des analyses ne sont pas effectuées avant d'investir des ressources, puis périodiquement par la suite. Dans les sections suivantes du présent chapitre, nous examinerons des méthodes d'analyse économique applicables dans ces divers cas, en nous reportant à certains des programmes étudiés dans les chapitres précédents.

Analyse et évaluation économiques

Au début de cette section, nous présentons très brièvement quelques cas. Il s'agit d'analyses préliminaires ou de « pré-faisabilité » permettant d'identi-

fier des besoins ou des occasions de projets de plantations irriguées qui semblent mériter une analyse plus approfondie. Cette présentation est suivie d'un aperçu des méthodes d'analyse économique utilisées communément pour l'analyse et la comparaison de différentes options ; nous présentons ici brièvement quelques cas concrets. Finalement, nous examinons l'application de certaines de ces méthodes dans l'étude de trois programmes existants : les plantations irriguées de la plaine de la Gézireh et de l'Indus et les essais sur des espèces irriguées au Zimbabwe.

Les évaluations préliminaires visant à repérer les projets de plantations irriguées réalisables se fondent sur une analyse quelque peu générale, reposant d'ordinaire sur des données limitées augmentées par des hypothèses raisonnables. Elles peuvent être suivies d'une ou de plusieurs études des principales caractéristiques avant que le potentiel de réalisation ne soit confirmé. Certains projets font également l'objet d'une évaluation généralisée visant à cerner les aspects qui auraient besoin d'une analyse plus détaillée afin de pouvoir introduire des modifications fondées sur une connaissance des faits. On effectue par la suite des analyses rigoureuses à l'aide de données supplémentaires provenant de relevés effectués à cette fin, ce qui conduit à la sélection du type de modèle le plus approprié. Les raccourcis — avant ou pendant l'étape de la conception — peuvent aboutir à un développement peu clair et insatisfaisant.

On peut mentionner plusieurs exemples d'évaluations préliminaires de ce type. Par exemple, compte tenu des indications générales d'un besoin de bois de chauffage et de matériaux de construction, des concentrations démographiques et des possibilités biologiques une fois l'alimentation en eau assurée, Ferlin (1977) estime que dans la zone sahélienne, les plantations forestières irriguées devraient jouer un rôle incontestable et être indubitablement durables. Pryor (1953) signale que les plantations concurrencent avec succès l'agriculture dans les zones irriguées de l'Iraq. Il semble désapprouver dans une certaine mesure cette évolution, mais mentionne que ce sont les zones les moins fertiles qu'on a tendance à utiliser pour la sylviculture. Cela se justifiait de toute manière par la forte demande de bois et l'effet bénéfique des rideaux-abris sur les cultures de plein champ. Au Gujarat et au Karnataka, le remplacement des cultures vivrières exigeant une main-d'œuvre abondante par des plantations commerciales d'arbres a également fait l'objet de commentaires sociologiques négatifs. Veltcamp (s/d) note que, dans la vallée du Jourdain, les peupliers à croissance rapide concurrencent favorablement l'agriculture, y compris les cultures maraîchères ; il s'attend que les peupliers remplacent de plus en plus l'agriculture irriguée à mesure que les champs destinés à celle-ci se détérioreront à cause des pratiques d'irrigation intensive des cultures.

L'étude classique de Foggie (1967) au sujet des plantations et des autres ressources forestières de la région de la Gézireh, au Soudan, vise à déterminer les besoins de la population de la région en matière de produits forestiers ; à estimer la superficie supplémentaire à boiser ; à prendre des mesures en vue de la mise au point de méthodes de production forestière (y compris les régimes d'irrigation), d'aménagement, de récolte et de mise en marché ; à entreprendre des études du rôle des rideaux-abris et de leur incidence sur le rendement agricole de la Gézireh ; et à recommander des mesures appropriées à cet égard. La superficie couverte par l'étude est d'environ 27 000 km², pour une population de 1,65 million d'habitants devant passer d'après les prévisions à 1,9 million en 1971 et à 2,6 millions en 1981. La région a connu une pénurie aiguë de pro-

duits forestiers depuis quelque 45 ans. Les terres irrigables susceptibles de satisfaire les besoins de bois de cette population représentent 0,39 % de la superficie du projet de la Gézireh, y compris 3 700 ha (0,14 % de la superficie) déjà boisés qui satisfont à 3 % de la demande actuelle. L'auteur recommande que la superficie affectée aux plantations dans les zones d'irrigation agricole en expansion soit portée à 69 300 ha et que les métayers participent à cet effort. Ces plantations répondraient à 26 % des besoins de bois de la population future. L'auteur a également proposé que le pourcentage restant soit assuré par la mise en réserve et l'aménagement de 1,47 million d'hectares de savanes boisées au sud-est et au sud, ainsi que sur l'autre rive du Nil Blanc, au sud-ouest et à l'ouest.

Après avoir étudié les pratiques de plantation, Foggie recommande un meilleur nivellement des terrains plantés et une irrigation plus abondante et plus régulière, en attendant les résultats d'un certain nombre d'études en recherche et développement qu'il a proposées en vue d'améliorer l'établissement et la gestion des plantations. L'analyse de Foggie, effectuée en 1966–1967 avec des données souvent insuffisantes, porte à croire que le manque de rentabilité des plantations provenait du retard de certaines activités, de la politique circospecte de ventes, de la mise en marché à des prix subventionnés et de la préparation et de l'irrigation inadéquates du terrain. Il est d'avis qu'une fois ces facteurs corrigés, les bénéfiques pourraient s'élever à au moins 10 % de la mise de fonds.

Les objectifs proposés par Foggie pour l'expansion des plantations n'ont jamais été réalisés. En revanche, toutes les études publiées par la suite sur les plantations irriguées au Soudan sont le fruit de ses recommandations.

Dans son étude sur l'aménagement le long du Nil, à Shendi au Soudan, de plantations destinées à produire du combustible ligneux, Wood (1977) signale que, compte tenu du prix élevé de ce produit, il y a des raisons de croire que des plantations irriguées seraient rentables. Il relève un certain nombre de modifications à apporter aux méthodes de mise en valeur utilisées et insiste sur la nécessité de tenir un registre exact des coûts.

Aussi bien l'analyse économique que l'analyse financière dépendent de la présence de données fiables et complètes sur les coûts et les avantages, y compris les entrées et les sorties physiques : main-d'œuvre, quantités d'eau, cubages de bois, etc. Il est nécessaire de produire ces données dans le cadre du processus habituel de gestion, ce qui ne devrait poser aucun problème, car il s'agit en effet d'une opération très simple. Des difficultés surgissent parfois, comme le montrent les observations de Wood (1977) portant sur les travaux d'irrigation des plantations le long du Nil, près de Shendi. Quant aux projets futurs, il importe pour les mener à bien d'utiliser les meilleures évaluations fondées sur des situations aussi comparables que possible ou sur des recherches visant à quantifier les variables (Mace et Gregerson 1975). La méthodologie et la présentation utilisées pour la compilation des données sur les coûts et les avantages sur le plan de la gestion et de la comptabilité sont étudiées par France (1977), Openshaw (1980) et Sagardoy et al. (1982).

Gittinger (1982) décrit des méthodes d'analyse économique permettant de comparer divers projets ou divers éléments d'un projet afin de savoir lequel choisir. Son compte rendu porte principalement sur des programmes agricoles, y compris les travaux d'irrigation, mais il s'applique aussi aux plantations forestières irriguées. Il est à la base de la présentation qui suit, incluse dans cette

étude parce que les techniciens et les gestionnaires de terrains n'ont pas toujours accès à la documentation exposant les méthodes.

Une analyse vise à fournir des normes qui permettent de définir les coûts et les avantages ; la méthode la plus simple considère tout ce qui réduit le revenu comme un coût et tout ce qui l'augmente comme un avantage. Les coûts peuvent être tangibles (par exemple : biens corporels, services, main-d'œuvre, terre, faux frais divers) et les avantages aussi (rendements, production accrue, amélioration de la qualité). Les coûts et les avantages peuvent aussi être secondaires, mais dans ce cas, ils ne font pas partie intégrante du projet et on n'en tient généralement pas compte dans l'analyse financière ; c'est d'ailleurs le fait que les analyses économiques en tiennent compte qui distingue les deux types d'analyse. Donc, un avantage secondaire ou indirect d'un projet de plantation irriguée visant à produire du combustible ligneux pour une ville pourrait consister dans le fait que les forêts naturelles restantes, en voie d'épuisement, n'auront plus à subir la pression découlant de la demande de ce produit, ce qui empêchera leur disparition. Cela entrerait en ligne de compte dans une analyse économique, mais non dans une analyse financière. L'analyse économique, plutôt que d'essayer de faire entrer directement les coûts et les avantages secondaires, ajuste les valeurs tangibles. Les coûts intangibles, par exemple la saturation en eau et la salinisation du sol, ne sont pas très courants ; les avantages intangibles, par contre, le sont plus : par exemple, la création d'emplois ou les avantages sur le plan des loisirs. Dans les deux cas, il est difficile d'en quantifier la valeur, la méthode généralement adoptée consiste alors à les repérer et à les quantifier de la manière appropriée, sans toutefois leur attribuer de valeur monétaire.

Une fois qu'on a identifié tous les coûts et les avantages, qu'on leur a attribué un prix et qu'on les a évalués en termes économiques (par exemple, en tenant compte des transferts et des distorsions de prix), on peut les comparer afin de savoir quelle option accepter et laquelle rejeter. Dans certains cas, on peut procéder en examinant tout simplement les données relatives aux coûts et aux avantages et en choisissant l'option qui est sans doute la meilleure. Cependant, surtout dans le cas des programmes étalés sur plusieurs années et qui portent sur des cultures vivaces, les diverses options peuvent présenter des tendances différentes au niveau des coûts et des avantages, être de dimensions différentes ou correspondre à des périodes différentes. Cela rend la sélection fondée sur une simple inspection difficile, voire impossible, et il faut alors avoir recours à des techniques qui tiennent compte de l'effet du temps sur la valeur de l'argent en actualisant les coûts et les avantages et en les réduisant ainsi à des valeurs nettes comparables. Quatre mesures actualisées se sont avérées utiles à l'analyse de programmes agricoles, y compris les travaux d'irrigation : la valeur actualisée nette ; le taux de rendement interne ; le rapport bénéfices nets/investissements ; et le rapport avantages/coûts.

Ces quatre méthodes actualisées comportent des calculs, des interprétations et des restrictions semblables, qu'il s'agisse d'une analyse économique ou financière. Dans la première, toutefois, on utilise des valeurs économiques, et dans la deuxième des prix financiers. Il ne faut pas perdre de vue que ces techniques, dont aucune ne permet une estimation parfaite du bien-fondé d'un projet, permettent d'établir de meilleures comparaisons et donc d'améliorer la prise de décisions ; elles ne remplacent cependant pas le jugement.

Dans les trois premières méthodes, on soustrait les coûts des avantages année par année pour en arriver au flux différentiel des bénéfices nets, ou flux monétaire, qu'il faut ensuite actualiser. Dans la dernière méthode, on détermine séparément la valeur actualisée du flux des coûts et du flux des avantages, puis on calcule le rapport entre les deux. Comme le flux des coûts est actualisé séparément du flux des avantages, au lieu d'en être retranché chaque année, le rapport avantages/coûts n'est pas une méthode d'actualisation du flux monétaire. Avant d'examiner la dérivation de ces méthodes et les caractéristiques qui influencent leur application, il faut parler des diverses méthodes de sélection du taux d'actualisation à utiliser.

Le taux d'actualisation appliqué dans l'analyse financière est souvent appelé seuil d'admissibilité, au-dessous duquel le taux de rendement interne deviendrait inacceptable. Ce taux est égal au taux marginal pour l'emprunt d'argent. En pratique, il s'agit généralement du taux auquel on peut emprunter de l'argent.

L'analyse économique fait appel à trois taux d'actualisation. Le premier est la valeur de renonciation du capital, une mesure quelque peu théorique, difficile à déterminer avec précision et peu pratique comme outil de travail ; toutefois, dans les pays en développement, on considère qu'elle se situe entre 8 % et 15 % en termes réels et on utilise généralement 12 % dans la pratique. Le deuxième taux utilisé est le taux d'emprunt propre à un pays donné, qui est influencé par les conditions financières d'emprunt d'argent et non pas seulement par la contribution relative potentielle du projet à l'économie nationale ; s'il y a deux sources de prêt à des taux d'intérêt différents, on utilise la moyenne des taux. Le troisième est le taux de préférence collective pour le présent, préféré parfois parce qu'il reflète l'intérêt que présente le projet pour la société et non pas simplement pour un particulier (auquel cas le taux serait plus élevé).

Pour calculer le flux différentiel des bénéfices nets ou le flux monétaire à l'aide des trois premières méthodes actualisées, il faut retrancher des avantages pour chaque année les investissements de capital et les frais d'exploita-



La teneur globale en humidité ainsi que la fréquence et la quantité des arrosages influencent de façon marquée la croissance des arbres. Dans cette plantation d'Eucalyptus camaldulensis, dans la province de Tahrir, en Égypte, on constate l'écart de croissance entre les arbres irrigués (au fond, à droite) et non irrigués (à l'avant, à gauche).

tion. La différence, ou reste, est le flux des bénéfices nets (qui diffère du profit, car il ne tient pas compte de l'amortissement). On tient compte du rendement du capital en actualisant le revenu résiduel de chaque année avant de le reporter à l'année suivante. Dans l'analyse économique, les droits et les taxes ne sont pas considérés comme des coûts à retrancher lors du calcul du flux différentiel des bénéfices nets, mais ils le sont, par contre, dans l'analyse financière. Pendant les premières années de réalisation d'un projet, avant que le rendement ne s'accroisse de façon substantielle, les bénéfices nets différentiels sont généralement négatifs.

La valeur actualisée nette (VAN) est la mesure la plus simple de la valeur d'un projet. Il s'agit de la valeur actualisée du flux différentiel des bénéfices nets, ou flux monétaire différentiel. Comme pour le taux de rendement interne et le rapport bénéfices nets/investissements, et à la différence du rapport avantages/coûts, elle permet de déterminer la valeur nette pour chaque année ou à n'importe quel point du calcul.

Le taux de rendement interne est le taux d'intérêt maximum qu'un programme peut payer pendant qu'il rembourse ses coûts d'investissement et d'exploitation, sans tomber sous le seuil de la rentabilité. Cette mesure est utilisée par la Banque mondiale et par de nombreux autres organismes internationaux. Il porte le nom de taux de rendement financier en analyse financière et de taux de rendement économique en analyse économique. Il est important de souligner que la comparaison directe des taux de rendement internes de projets qui s'excluent mutuellement peut conduire à des décisions d'investissement erronées ; dans ce cas, il faut utiliser la valeur actualisée nette. Le taux de rendement interne indique le taux de rendement d'un programme pour le revenu national par rapport aux ressources utilisées et ne permet donc de classer les programmes que de façon très générale.

Le rapport bénéfices nets/investissements est le rapport entre la valeur actualisée des bénéfices nets et la valeur actualisée des investissements. Il pourrait être décrit plus clairement comme la somme des valeurs actualisées une fois que le flux différentiel des bénéfices nets devient positif, divisée par la somme des valeurs actualisées correspondant aux premières années de vie du programme.

Le rapport bénéfices nets/investissements est un critère pratique permettant de comparer entre eux des projets indépendants, mais ne s'excluant pas réciproquement. Sa valeur réside dans cette caractéristique, car aucune des trois autres méthodes ne peut être utilisée de cette manière. Celles-ci sélectionnent tous les projets qui ont soit une valeur actualisée nette égale ou supérieure à zéro, soit un taux de rendement interne égal ou supérieur à la valeur de renonciation du capital, soit encore un rapport avantages/coûts supérieur à l'unité pour la valeur de renonciation du capital. Les méthodes du taux de rendement interne et du rapport avantages/coûts sont couramment employées, mais les restrictions qu'elles comportent rendent souvent préférable le rapport bénéfices nets/investissements.

Le rapport avantages/coûts est une mesure actualisée de la valeur des programmes. Cependant, comme le flux des coûts est actualisé séparément du flux des avantages au lieu d'en être retranché chaque année, ce rapport ne constitue pas un flux monétaire. Il n'est pas souvent utilisé comme critère d'évaluation d'un programme dans les pays en développement, car la valeur du rapport peut varier énormément selon le moment auquel se fait le calcul de la valeur nette.

Comme on pourrait s'y attendre, le rapport diminue à mesure que le taux d'intérêt utilisé augmente. Nous avons déjà signalé que l'emploi du rapport avantages/coûts dans la comparaison de projets qui s'excluent mutuellement peut conduire à des décisions erronées, ce qui n'est pas le cas si l'on utilise la valeur actualisée nette. Une des caractéristiques du rapport est qu'il permet d'établir le seuil jusqu'où les coûts peuvent augmenter avant qu'un programme ne perde tout intérêt économique. La quantité dont peut changer un élément d'un programme avant que ce dernier n'atteigne ce point critique porte le nom de valeur limite de rentabilité. Même si les projets qui ont un rapport avantages/coûts élevé sont considérés généralement comme préférables à ceux qui ont un rapport avantages/coûts plus bas, le classement selon ce critère peut conduire à des décisions erronées, car il établit une discrimination contre les projets qui ont des rendements bruts et des frais d'exploitation relativement élevés, même s'ils ont une plus grande capacité de générer des richesses.

Gittinger (1982) illustre l'emploi des techniques décrites ci-dessus en vue de la sélection d'un projet parmi plusieurs possibles en les appliquant à quatre options hypothétiques d'investissements dans des pompes pour l'irrigation. Pillsbury (1968) donne également les grandes lignes de ce type d'analyse pour différentes options d'investissement dans du matériel d'irrigation par aspersion.

Pour terminer ce tour d'horizon des techniques analytiques permettant d'effectuer un choix entre plusieurs projets possibles, il serait pertinent de reprendre les principaux problèmes relevés par Gittinger (1982) en ce qui concerne la conception et la mise en œuvre des programmes après avoir étudié un grand nombre de projets de la Banque mondiale. Les problèmes en question relèvent d'une technologie inappropriée, d'une infrastructure et de systèmes de soutien inadéquats (y compris les services de vulgarisation, la formation et autres), d'un défaut d'appréciation de l'environnement social des projets et d'une gestion et d'une administration médiocres. Les principales raisons citées de la faiblesse des analyses de projet sont la faiblesse de l'analyse (sic), la sous-estimation des coûts, le caractère excessivement optimiste des projections (prévisions), la mauvaise appréciation de la variabilité climatique et de ses effets, l'irréalisme des échéanciers et l'incapacité d'apprécier les répercussions de certains aspects d'un projet, comme dans les cas où la décision de poser un revêtement sur les canaux existants pour empêcher le suintement a eu pour effet de dessécher les puits alimentés par ce suintement.

Un bon exemple de l'emploi des méthodes d'analyse économique pour mesurer le degré de développement ainsi que les forces et les faiblesses relatives des programmes de plantations sylvoles irriguées est fourni par l'évaluation très étendue faite par Lerche et Khan (1967) des plantations irriguées gérées par l'État dans le bassin de l'Indus au Pakistan. Les auteurs ont cependant rencontré certains problèmes à cause de l'insuffisance des données, et notamment de celles concernant les rendements. Après un historique des activités depuis l'inauguration du programme en 1864, les auteurs examinent d'un œil critique l'aménagement des plantations du point de vue des objectifs des projets, et tout particulièrement de la préparation des emplacements, du système complexe d'irrigation par rigoles, de la sélection des espèces, ainsi que des révolutions et des régimes sylvoles et d'irrigation. En se basant sur un taux d'intérêt de 5 %, ils ont actualisé les frais moyens d'investissement, d'exploitation, de personnel, de récolte et de mise en marché par acre de plantation et les ont comparés aux rendements moyens et à leurs assortiments évalués selon leurs prix de vente

moyens afin d'obtenir le rendement net moyen par acre. Ils ont estimé de façon analogue les résultats obtenus après adoption de régimes de peuplement espacés plus productifs ainsi que d'intervalles de révolution, de calendriers d'irrigation et d'espèces différents. Ils indiquent l'ordre de grandeur des meilleurs résultats qu'il est possible d'obtenir grâce à des changements importants de l'aménagement. Ils concluent que l'entreprise pourrait concurrencer favorablement la production rizicole et sucrière si les mesures recommandées étaient introduites, même si les exploitations forestières ne jouissent pas de tarifs préférentiels pour l'eau d'irrigation. À un taux d'intérêt plus élevé, d'autres formes de production agricole présenteraient un plus grand attrait économique. Il s'agit d'une analyse très intéressante, car non seulement elle est instructive, mais elle permet aux auteurs de recommander une série de changements concernant les types de matériaux à produire ainsi que les espèces végétales et les méthodes sylvicoles, d'irrigation et de gestion les mieux appropriées à cette production.

Un autre exemple de l'application de techniques d'analyse économique aux plantations forestières irriguées consiste dans l'évaluation des plantations réalisées par Ali (1979) dans la Gézireh, au Soudan. La méthode de la valeur actualisée nette lui a permis de comparer le régime actuel de plantations d'*Eucalyptus microtheca* comportant une révolution sur semis de huit ans et deux révolutions sur taillis de sept ans et le régime du semis selon l'âge d'exploitabilité absolu (huit ou neuf ans selon l'indice du terrain); de décider s'il faut régénérer les plantations par taillis ou replanter à la fin de la révolution sur semis; et de déterminer pour chacune des trois classes de terrain l'âge d'exploitabilité économique le plus approprié en l'absence de coupe de rajeunissement. Dès le début de l'analyse, il devient évident que rien ne semble justifier la croyance selon laquelle le régime du taillis serait préférable d'un point de vue économique à la plantation à la fin de la révolution sur semis, si ce n'est la perte de l'effet brise-vent des peuplements forestiers pendant la courte période de régénération. Comme il s'agit d'un résultat inattendu et anormal (la pousse pendant la première révolution sur taillis est habituellement de 10 % à 15 % plus rapide que la repousse des semis), l'analyse recommande des études sylvicoles pour en déterminer la raison. Sous réserve des résultats de ces études, et après avoir appliqué les méthodes de la valeur actualisée nette et du rapport avantages/coûts à l'analyse financière et économique, l'auteur conclut que, de façon générale, une révolution sur semis de huit ans dans le cas de terrains de catégorie I ou de neuf ans dans le cas de terrains de catégorie II ou III rapporterait plus qu'un régime comportant une révolution sur semis et deux révolutions sur taillis, quelle que soit la catégorie du terrain. L'analyse financière donne des résultats légèrement plus favorables pour le régime du taillis que l'analyse économique. L'auteur expose l'accroissement annuel moyen (voir chapitre 8, section « Croissance et rendement ») pour les révolutions optimales sur semis et sur taillis pour chacune de trois catégories de terrain. L'analyse conclut aussi qu'il serait souhaitable que les régimes d'irrigation adoptés soient plus réguliers (ce qui a été confirmé, comme nous l'avons signalé au chapitre 8) et que les forestiers fassent preuve d'une plus grande discrimination dans la sélection des zones de plantation afin d'éliminer les terrains présentant des problèmes de sursaturation ou de salinité.

La valeur des essais d'irrigation forestière dans le bas Veld du sud-est du Zimbabwe, décrits par Barrett et Woodvine (1971), est corroborée par une analyse économique concise effectuée par P.F.Banks qui met les essais et leurs

résultats dans une perspective régionale significative. L'auteur se fonde sur les valeurs et les coûts actualisés pour comparer la production de plantations à révolution de cinq à sept ans et celle des meilleures plantations à révolutions semblables, situées dans la région voisine sur des terrains élevés bénéficiant de fortes précipitations et destinés généralement à la production de bois industriel. L'analyse repose sur trois taux d'actualisation différents, soit 6 %, 10 % et 15 %. Elle indique que le coût de production légèrement plus élevé des plantations irriguées en zone semi-aride de faible altitude était d'ordinaire largement compensé par la valeur supérieure de l'accroissement de la production par rapport aux terrains de plus grande altitude bénéficiant de fortes précipitations.

10. Organisation et gestion

Le fait que le rendement d'un grand nombre de programmes d'irrigation fort coûteux soit nettement inférieur au rendement prévu est une source fréquente d'inquiétude. Cela n'est pas dû uniquement aux déficiences techniques de la conception. De nombreux problèmes proviennent d'une faiblesse de l'organisation et de la gestion, aggravée souvent par le manque de vigueur de l'analyse et des mesures correctives proposées. Les meilleurs programmes résultent d'une bonne gestion à tous les niveaux, c'est-à-dire à celui de l'exploitant individuel, à celui du programme dans lequel il évolue et enfin à celui des organisations responsables à l'échelle de la vallée, du bassin hydrographique ou du pays. C'est au deuxième niveau, celui du programme, que la gestion est le plus souvent inadéquate et qu'elle échoue dans ses tentatives d'amélioration, probablement parce qu'il s'agit là du niveau le plus complexe qui s'intéresse au système dans son ensemble alors que le niveau supérieur touche les phases plus générales et que le niveau inférieur, bien que techniquement important, est d'une portée et d'une complexité technique plus étroites, et donc plus facile à organiser convenablement.

La gestion du programme exige une série d'unités bien coordonnées et pourvues d'un personnel adéquat, chacune étant responsable d'un ensemble d'activités précises. La manière dont les multiples fonctions à réaliser sont groupées dépend de la dimension, de la nature et des circonstances particulières de chaque programme. Ces fonctions concernent grosso modo l'exploitation, la vulgarisation, l'entretien, l'administration et les services financiers.

Les principales fonctions du service d'exploitation sont :

- La planification des activités, par exemple, amorcer l'alimentation en eau, évaluer la courbe des besoins d'eau pour l'irrigation ainsi que les quantités d'eau à fournir, régler l'alimentation en eau pour qu'elle corresponde exactement aux besoins ;
- La distribution de l'eau selon les méthodes en usage ;
- L'établissement et l'aménagement du peuplement forestier lorsque ces activités ne sont pas exécutées par les exploitants individuels ;
- La vulgarisation ; et
- La surveillance à courte et à longue échéance de ces activités.

Les principales responsabilités du service d'entretien consistent à planifier en détail, à mettre en oeuvre et à surveiller l'entretien des réservoirs, des canaux, des conduits de distribution, des canalisations, des appareils et du réseau de drainage, y compris le matériel connexe. Les responsabilités de ce service peuvent aussi comprendre l'entretien des voies et des bâtiments, et du matériel de transport et d'utilité générale, auquel cas il ne faudrait pas que ces tâches gênent ou empêchent l'exécution de la fonction principale.

Le service d'administration doit rendre compte au directeur du programme de tout ce qui concerne la comptabilité, le personnel, les affaires juridiques, l'administration générale, l'approvisionnement et les achats.

Les exigences fondamentales d'une gestion efficace sont une structure appropriée au niveau de l'organisation, l'application de méthodes de gestion adéquates fondées sur une approche hautement analytique tempérée de réalisme et la mise sur pied de services techniquement adéquats. Le personnel de fonction et les techniciens doivent recevoir une formation complète en organisation et en gestion, car ce besoin est malheureusement trop souvent négligé dans les établissements d'enseignement qu'ils fréquentent. Il n'est donc pas surprenant que, parmi les problèmes de mise en œuvre et d'exploitation des programmes d'irrigation identifiés par Gittinger (1982), Lerche et Khan (1967) et Ahmad (1975), on retrouve une gestion et une administration déficientes.

Le ministère français de la Coopération (France s/d) et la FAO (Sagardoy et al. 1982) ont publié des manuels complets sur l'organisation, la gestion, l'exploitation et l'entretien de projets d'irrigation. Il s'agit de références utiles et détaillées fondées sur l'expérience et l'analyse de programmes d'irrigation de dimensions variées, exécutés dans de nombreux pays dans un cadre institutionnel différent. Bien que ces manuels mettent l'accent sur l'agriculture irriguée, les structures et les fonctions qu'ils décrivent peuvent aussi s'appliquer à des programmes d'irrigation forestière, qui peuvent parfois être associés et même intégrés à des programmes agricoles. Ces deux références constituent en grande partie la base du présent exposé.

Les structures organisationnelles se divisent en deux types fondamentaux : les structures séparées et les structures intégrées. Les premières partent de l'hypothèse qu'il est possible d'atteindre l'objectif global de production par l'interaction d'organismes individuels agissant indépendamment les uns des autres, bien que de façon coordonnée, afin de réaliser certains objectifs comme une utilisation efficace de l'eau, une production optimale compte tenu des ressources disponibles ou une commercialisation des produits qui rapporte le maximum de bénéfices aux producteurs. Les structures organisationnelles de ce type s'appliquent principalement aux réseaux d'irrigation agricole qui regroupent un grand nombre d'agriculteurs. Elles pourraient également s'appliquer aux programmes d'irrigation forestière réunissant un grand nombre d'exploitants forestiers. Cependant, comme elles présentent généralement des défauts, surtout en ce qui concerne les facteurs autres que ceux qui règlent l'alimentation en eau, nous ne les examinerons pas plus longtemps ici. Les structures organisationnelles intégrées comportent plusieurs unités coordonnées qui agissent les unes sur les autres selon une voie hiérarchique clairement établie. Lorsque le programme regroupe un grand nombre de propriétaires terriens individuels, comme c'est le cas des programmes de colonisation, il faut veiller à ce qu'il n'y ait pas de double emploi ou de conflits avec les dispositions déjà en place pour certaines fonctions, par exemple l'obtention de crédit, les services de vulgarisation et la recherche appliquée. Il importe que ces structures soient bien organisées et convenablement équipées sur le plan technique et qu'elles bénéficient d'un financement adéquat, surtout au niveau du programme dont les exécutants doivent disposer de tous les pouvoirs nécessaires pour assurer une exploitation sans heurts.

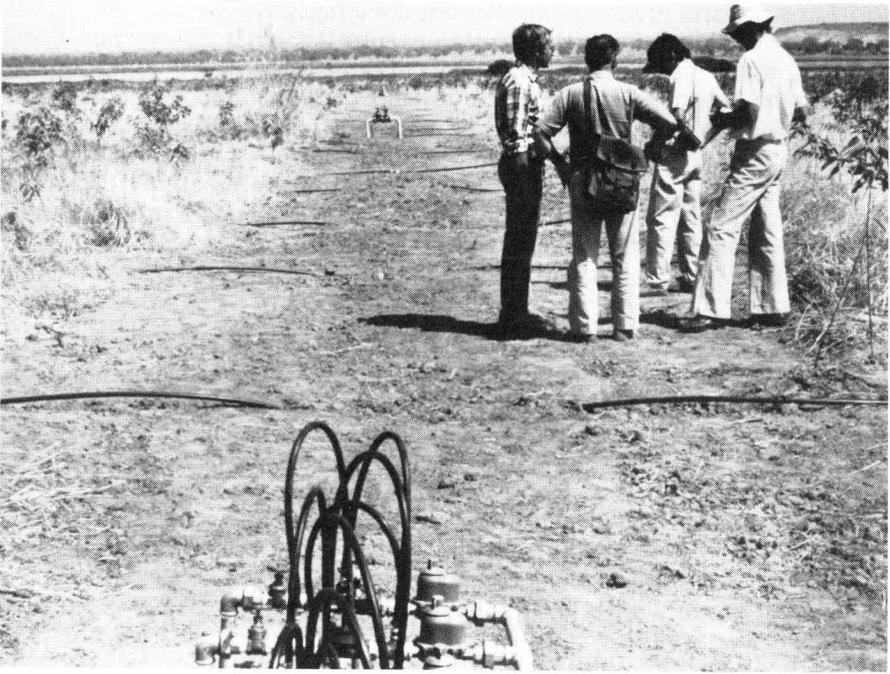
Les structures organisationnelles ont des dimensions horizontales, reliées à la différenciation rationnelle des fonctions entre des unités séparées mais coordonnées, et une dimension verticale, qui concerne la manière dont les responsabilités sont assignées aux différents niveaux de l'organisation. La forme de l'organisation horizontale et la façon dont sont réparties les responsabilités dépendent apparemment du niveau de développement économique atteint, de l'envergure du projet et aussi, dans une large mesure, de la nature et du caractère des institutions en cause ; il faut donc savoir si les plantations sont exploitées et gérées par des propriétaires terriens individuels ou bien par un organisme public ou une société et connaître l'importance relative de l'irrigation dans l'économie locale.

Dans les projets importants comportant un grand nombre d'exploitants individuels, la structure organisationnelle comprend d'ordinaire des unités affectées à la distribution de l'eau, à l'entretien du système, à l'évaluation et à la perception de la taxe d'eau, à la vulgarisation et à l'aide en matière d'utilisation de l'eau ainsi que d'exploitation et de gestion des peuplements forestiers, au développement de la recherche, à l'infrastructure et à la mise en marché. Le degré de regroupement de ces fonctions, c'est-à-dire le degré de subdivision, dépend du personnel technique disponible et du niveau d'avancement du projet. La structure organisationnelle évolue à mesure que le projet passe de l'étape de la planification à celles de la mise en œuvre, de la transition et du plein développement.

Les plus petits programmes regroupant des exploitants individuels sont souvent gérés par des associations et de petits groupes de gestion qui représentent les exploitants eux-mêmes et qui font appel, pour les questions techniques et administratives, à l'aide et aux conseils de fonctionnaires dûment qualifiés. Ces organisations peuvent être extrêmement efficaces, bien qu'elles aient besoin d'un certain encadrement pendant la phase initiale. Il est souhaitable, dans la plupart des cas, que les fonctionnaires délèguent le plus de pouvoirs possible aux exploitants eux-mêmes. Le degré de délégation dépend du niveau d'instruction des exploitants et de leur expérience en matière d'irrigation. Au niveau gouvernemental, il convient de déléguer le plus de responsabilités possible au directeur et au personnel du programme pour que ceux-ci puissent s'acquitter avec diligence de leurs fonctions techniques et administratives.

Dans le domaine de l'agriculture irriguée, il existe de nombreuses sortes d'organisations qu'il est possible de classer selon que la responsabilité de toutes les activités en cause (gestion de l'eau, vulgarisation, recherche appliquée, mise en marché, etc.) ou seulement de certaines d'entre elles sont incluses dans les structures organisationnelles, et selon le degré de participation du secteur public ou des exploitants dans la gestion. Ces diverses options sont toutes pertinentes ici parce que, comme l'agriculture, les plantations irriguées font souvent partie intégrante de l'économie rurale. Voici les types d'organisation les plus importants :

- Les organisations de gestion intégrée possédant les caractéristiques mentionnées ci-dessus. Certaines organisations de ce type, appelées généralement coopératives de service, sont gérées par les exploitants eux-mêmes. Quant aux deux autres formes d'organisation entrant dans cette catégorie, soit les exploitations d'État (grandes unités de production) et les programmes d'établissement rural reposant sur l'irrigation (unités de pro-



Système d'irrigation localisée (goutte à goutte) adapté au milieu, dans un projet financé par la Banque mondiale près de Niamey, au Niger : une vue générale quatre mois après la plantation montre les tuyaux latéraux enfouis le long d'un dégagement, avec conduits de distribution jusqu'aux rangées d'arbres de chaque côté (photo du haut) ; l'autre photo nous fait voir deux rangées d'arbres 20 mois après la plantation.

duction rurales), elles sont généralement gérées par des fonctionnaires gouvernementaux.

- Les organisations spécialisées dans la gestion de l'eau, c'est-à-dire les organisations sociales dont la fonction est d'assurer une distribution opportune et équitable de l'eau parmi les exploitants de la communauté. Les unités de gestion opérationnelle responsables des systèmes d'irrigation et de drainage, de l'entretien et de la perception de la taxe d'eau bénéficient du soutien d'unités de service qui s'occupent des finances, du personnel, de la planification et de la surveillance. Grosso modo, on distingue trois grandes catégories : les organisations contrôlées principalement par les exploitants eux-mêmes (par exemple, les associations d'irrigation), les dispositifs publics d'irrigation contrôlés principalement par les représentants de l'État et les programmes à gestion mixte.
- Les organisations de gestion d'eau polyvalentes qui ont des responsabilités liées directement à la gestion de l'eau, des unités distinctes assurant les fonctions essentielles, telles que la vulgarisation, la recherche et la mise en marché. Ce type d'organisation pourrait ainsi convenir lorsqu'une organisation de gestion de type intégré s'avérerait trop complexe ou qu'elle ferait double emploi avec les institutions existantes, et qu'une structure spécialisée en gestion de l'eau ne serait pas en mesure de fournir les services nécessaires.

Chaque pays tend à avoir une préférence pour un ou plusieurs types d'institutions dont les principales caractéristiques sont décrites par Sagardoy et al. (1982) avec des modèles d'organisation fournis à titre d'exemple.

Une des deux principales phases fonctionnelles de la gestion des dispositifs d'irrigation a trait à la direction et à la coordination de la prise de décisions dans le cadre du programme. Elle se propose d'amener toutes les personnes visées à oeuvrer en vue de la réalisation des objectifs du programme. L'autre phase touche l'exécution des activités techniques spécialisées comme la distribution de l'eau, l'entretien du système, la sylviculture et la gestion des plantations, la vulgarisation et la comptabilité. Ces fonctions exigent des aptitudes à la gestion et des styles d'intervention différents.

La gestion d'un programme, outre l'établissement du budget, la programmation et la surveillance, comporte une phase de mise en oeuvre de cycle de planification (formulation, exécution, évaluation et reformulation du plan). Le directeur du programme est plus qu'un simple administrateur qui applique des solutions pratiques à mesure que surgissent des problèmes ; en fait, la planification est une de ses fonctions les plus importantes. Celles-ci sont les suivantes :

- Établir des objectifs et des priorités ;
- Diriger la planification et l'établissement du budget annuel ;
- Diriger la formulation de programmes de travail détaillés pour les unités chargées de la réalisation du projet et le personnel affecté à ces unités ;
- Surveiller et former le personnel et les exploitants en vue de la mise en oeuvre du programme ;
- Superviser quotidiennement la mise en oeuvre du programme et chercher des solutions aux problèmes qui surgissent ;
- Comparer le rendement du programme aux objectifs établis ;
- Comparer le rendement du personnel aux objectifs de travail convenus ;

- Demander l'opinion des exploitants au sujet de la qualité des services fournis par les programmes ; et
- Cerner les forces et les faiblesses et trouver ou proposer des remèdes à ces dernières. Pour s'acquitter de cette tâche, le directeur du programme a besoin d'un système qui lui permette de contrôler et de repérer les besoins de renforcement ou de rectification dans les trois domaines suivants : les ressources de financement, de main-d'œuvre et d'équipement ; les capacités techniques, de gestion et de communication ; et les primes de motivation matérielles et non matérielles.

Parmi les conditions qui sont indispensables à la bonne gestion du programme et dont il faut tenir compte à l'étape de la planification, on retrouve :

- Une conception convenable du système de gestion de l'irrigation et des plantations forestières ;
- Une structure organisationnelle appropriée ;
- L'établissement d'objectifs cohérents et clairement définis ;
- Une bonne conception du système de gestion du programme (méthodes de gestion, descriptions des fonctions, systèmes d'information et de surveillance) ;
- Des politiques bien définies en ce qui concerne le recrutement du personnel, la production et les conditions de service, qui constituent un encouragement à la réalisation des objectifs du projet ;
- Un financement adéquat pour couvrir les frais fixes ; et
- Un cadre juridique effectif pour faire respecter le règlement sur la distribution de l'eau et contrôler l'extraction d'eau souterraine.

La liste précédente correspond aux exigences idéales. En pratique, les trois dernières sont souvent les plus difficiles à fournir, pour des raisons qui échappent au contrôle du projet. Elles doivent, par conséquent, être étudiées, revues et examinées de façon prioritaire par les cadres supérieurs des agences qui contrôlent le projet et ses ressources. Les problèmes dus à une conception inadéquate du système, y compris la conception de la structure organisationnelle et administrative elle-même, peuvent constituer un grave obstacle au succès.

L'exécution de la fonction de gestion globale ainsi que des activités spécialisées nécessite des directives générales. Un exemple d'un système qui est particulièrement pertinent au niveau de la fonction de gestion globale, et dont les principes s'appliquent également aux activités spécialisées, est le « Système de gestion de la programmation et de la mise en oeuvre » mis au point par Belshaw et Chambers (1973) pour les programmes de développement au Kenya. Il comporte trois éléments principaux : un exercice de programmation ; une réunion d'administration et un rapport d'activité.

- L'exercice de programmation a lieu une fois par an, immédiatement avant ou juste après le début de l'année financière. Pour cet exercice, toutes les personnes qui participent à la mise en oeuvre, y compris les superviseurs et les cadres supérieurs et inférieurs, élaborent conjointement un programme de travail comportant plusieurs phases pour l'année à venir. Ce programme est une liste des opérations qu'on est convenu d'effectuer, accompagnées chacune du nom de la personne responsable, de la date de début et de fin, des objectifs et des indicateurs d'avancement. Chaque membre du groupe vérifie la faisabilité de chaque aspect du programme et accepte les objectifs fixés.

- La réunion de gestion a généralement lieu une fois par mois. Lors de cette réunion, les mêmes cadres supérieurs ou inférieurs se penchent sur les progrès effectués, en les comparant aux objectifs du programme. Ils identifient les blocages et se mettent d'accord sur les mesures rectificatives qui s'imposent.
- Le rapport d'activité est également mensuel. Il résume le progrès effectué et les problèmes survenus et cite le nom des personnes responsables des diverses activités. Il est envoyé à tous les intéressés, y compris aux hauts fonctionnaires dont l'intervention, portant par exemple sur le déblocage de fonds, peut avoir des répercussions sur le calendrier des travaux.

L'évaluation de ce système dans la pratique indique qu'il contribue à améliorer le rendement non seulement parce qu'il assure une répartition efficace des ressources du projet, mais aussi parce qu'il met l'accent sur l'action conjointe, qu'il restreint toute tendance à l'autoritarisme et qu'il renforce le moral et la motivation du personnel subalterne.

Un bon manuel d'exploitation peut être d'un grand secours dans un programme d'irrigation. Il doit inclure une description détaillée des techniques d'évaluation de l'approvisionnement et des besoins d'eau et des méthodes de contrôle du rendement du programme et du personnel sur le terrain. Malheureusement, la plupart des manuels disponibles sont inadéquats ou périmés et ont besoin d'être refondus entièrement. Ce type de manuel est inutile s'il n'est pas à jour.

L'organisation de programmes de formation est un élément d'une importance primordiale, qui est souvent négligé, manifestement aux dépens du succès du projet. Il est nécessaire avant tout que les forestiers et les autres cadres responsables des dispositifs d'irrigation reçoivent une formation, généralement sur place, en gestion de l'eau et aussi en gestion générale du programme et des activités. La formation sur le tas du personnel subalterne doit faire partie intégrante des programmes de gestion de projet.

11. Planification

Dans le chapitre d'introduction, nous avons énuméré les éléments du processus de planification, en soulignant qu'une bonne planification est essentielle à la réussite d'un projet. Le succès soutenu des programmes d'irrigation dépend non seulement de l'alimentation en eau, du choix du moment et du volume de l'apport, mais aussi de l'intégration de ces facteurs aux nombreux autres aspects déterminants d'un plan complet et équilibré, comme l'aménagement du territoire, la sylviculture, l'économie, la gestion et l'organisation. Pour qu'une plantation forestière irriguée prospère, il est nécessaire de combiner judicieusement les connaissances accumulées dans de nombreux domaines professionnels : génie, sciences de l'eau et du sol, phytotechnie, sylviculture et aménagement forestier, économie et sciences sociales. Les étapes de préparation, d'évaluation, de mise en œuvre et de gestion exigent un jugement sûr qui se fonde sur un niveau élevé de compétence professionnelle. Beaucoup de projets d'irrigation ont été abandonnés parce qu'on n'avait pas prêté suffisamment attention à la nécessité d'assurer une exploitation soutenue de toutes les ressources nécessaires, en eau, en terres et en main-d'œuvre (Hagan et al. 1968).

Nous avons déjà mentionné certains cas problématiques dus à une mauvaise planification des plantations forestières irriguées. Ces cas comprennent le plaidoyer de Wood (1977) en faveur d'une bonne planification du projet qui évite les solutions de rapiécage, ainsi que la critique constructive d'Ahmad (1975) au sujet de certains cas où bien des problèmes auraient pu être évités si la conception du projet avait été meilleure et avait tenu compte des résultats des enquêtes de planification qui auraient permis d'identifier les terrains saturés ou salins, et si les objectifs de production annuelle établis avaient été plus réalistes. L'échec était inévitable dans le cas cité par Ahmad et ceux décrits par Singh (1963), car la mise en œuvre des nouveaux projets ou des nouvelles phases s'est faite sans qu'on ait corrigé les erreurs commises dans le passé et sans que quelqu'un ait eu le courage de dénoncer le caractère irréalisable du projet avant l'affectation des ressources. Dans la discussion portant sur les principes d'organisation et de gestion du chapitre précédent, nous avons souligné à quel point la bonne gestion d'un projet d'irrigation nécessite une planification adéquate, comme le soulignent Sagardoy et al. (1982).

Le principe et l'essence du processus de planification restent identiques, que le processus s'applique à une exploitation relativement modeste ou à un projet d'envergure, qu'il porte sur la totalité du projet ou sur n'importe lequel de ses éléments et qu'il concerne exclusivement la sylviculture ou une combinaison de cette dernière avec l'agriculture irriguée. La discussion qui suit s'appuie dans une large mesure sur les études de Hagan et al. (1968) et de Gittinger (1982), sur les sections pertinentes des travaux de France (1977) et sur le compte rendu

du colloque de la FAO au sujet de la méthodologie relative à la planification de l'irrigation, tenu à Bucarest en 1971 (FAO 1972).

Il est toujours souhaitable de définir une politique d'ensemble qui s'appuie sur des dispositions ayant force exécutoire afin d'assurer la mise en valeur systématique des ressources hydriques d'un pays, et notamment de minimiser les conflits ultérieurs entre les usagers des secteurs agricole et sylvicole, et aussi entre ceux-ci et les usagers d'autres secteurs. Dans l'intérêt de tous les usagers et de tous les organismes en cause, il est essentiel qu'il y ait une pleine collaboration dès les premières étapes de la planification. Cette collaboration peut prendre la forme d'un plan ou d'un projet intégré de mise en valeur d'un bassin fluvial, nécessitant une entente internationale si le bassin chevauche plusieurs pays. La coordination de la politique d'ensemble et de la planification à travers le bassin fluvial, que ce soit au niveau national ou, le cas échéant, au niveau régional, ainsi que le contrôle réel des pratiques d'irrigation et de drainage sont indispensables pour qu'un projet puisse prospérer à longue échéance plutôt que de périr, par exemple suite à la saturation en eau ou à la salinisation causées par un contrôle inadéquat (Unesco 1974).

Le processus de planification ou de formulation de plans, que ce soit au niveau national, régional ou au niveau du projet lui-même, comporte cinq éléments :

- Une définition claire et précise des objectifs à atteindre et des activités à entreprendre ; cette responsabilité incombe normalement aux organes de direction et aux cadres supérieurs du niveau approprié ;



Dans les régions désertiques, les terrains cultivés, y compris les plantations forestières, doivent être protégés des inondations et de l'action abrasive du sable éolien. La photo montre, près de Dongola, au Soudan, le développement initial d'un rideau-abri irrigué d'Eucalyptus ; on remarquera les tas de sable provenant du nettoyage des rigoles.

- La sélection des critères d'évaluation et de comparaison des différentes options ; ces critères déterminent dans une certaine mesure le type de données à rassembler, tout comme le manque de renseignements critiques peut influencer la sélection des critères à employer ;
- La compilation de données en quantité suffisante et de la qualité nécessaire au succès du processus de planification ;
- L'élaboration d'autres options ou d'autres éléments d'une même option visant la réalisation des objectifs fixés et permettant l'évaluation et la comparaison de ces objectifs en termes économiques ; en règle générale, l'évaluation, du moins à l'étape des décisions finales, doit s'effectuer avec une représentation appropriée du niveau de financement du projet ; et
- La sélection du plan optimal, généralement l'option qui permet d'atteindre soit la production requise au coût le plus faible, soit la production maximale pour une mise de fonds donnée.

Les renseignements nécessaires à la planification du projet comprennent des données pertinentes sur le milieu physique et les ressources en eau : climat, eau disponible, eau souterraine, topographie, hydrologie, pédologie, salinité et drainage. Il convient également de rassembler des données portant sur d'autres facteurs : espèces et variétés à cultiver, sources de semences, parasites et maladies, caractéristiques et régimes sylvicoles, matériel, équipement, transport, matériaux de construction, personnel, salaires et traitements, dispositions foncières, rendements, prix et coûts. Tous ces aspects ont déjà été mentionnés et étudiés dans les chapitres précédents.

L'élaboration d'autres options de planification devrait couvrir la totalité ou une partie des phases examinées aux chapitres 7, 8 et 10, c'est-à-dire : la sélection et la conception détaillée du système d'alimentation en eau ; les besoins d'eau d'irrigation ; les systèmes d'adduction, de distribution, d'irrigation et de drainage ; le défrichement, le nivellement, l'amélioration du profil et l'assainissement ; les systèmes et les modèles arboricoles ; la production ; la récolte ; la recherche appliquée ; les apports complémentaires, notamment les engrais ; les installations d'entreposage et de manutention du bois d'œuvre ; la mise en marché ; le logement ; les installations communautaires ; la vulgarisation ; des arrangements fonciers adéquats ; la formation ; l'organisation et la gestion de la vulgarisation ; et les coûts et les prix. Il est important d'incorporer dans tous ces facteurs les dimensions appropriées d'échelle et de temps.

Une analyse économique et financière fondée sur une des techniques examinées au chapitre 9, ou sur plusieurs d'entre elles, permet de choisir une des différentes options disponibles (méthodes d'irrigation, équipement et matériel, méthodes sylvicoles, régimes d'aménagement arboricole) ainsi que le meilleur plan global. Il est possible de faciliter ces analyses très complexes par la simulation sur ordinateur, à l'aide de modèles comme ceux décrits par Crandall et Luxmore (1982).

La conception et la planification sont habituellement des tâches extrêmement complexes, regroupant presque à chaque étape un grand nombre d'aspects, de facteurs, de disciplines et d'options. La réalisation adéquate de ces tâches nécessite l'intervention de représentants d'au moins deux disciplines.

Pour faire face, dans une certaine mesure, à cette complexité, on a souvent recours à des méthodes d'analyse de réseau assistées par ordinateur. Les

avantages que présente l'analyse de réseau d'un projet ne se limitent pas à une réduction du temps requis pour la planification ; ils sont en effet beaucoup plus nombreux. La première étape du processus de planification, c'est-à-dire l'établissement des objectifs et des activités, exige une analyse rigoureuse et détaillée du projet, qui puisse donner au spécialiste responsable une vision d'ensemble du système total envisagé. La participation de spécialistes de chacune des disciplines en cause donne lieu à une confrontation et à des discussions fructueuses. Au cours de cette étape, de nombreux problèmes se manifestent et il est possible de résoudre un grand nombre de conflits éventuels avant qu'ils ne se produisent. L'analyse de réseau exige une étude approfondie de la planification du projet elle-même. Ainsi, si l'étude du chemin critique du projet révèle des échelles de temps inacceptables, il faudra ajuster le tir ou trouver un autre plan pour le projet qui permette de réaliser les objectifs dans un délai plus court. Toutefois, l'analyse de réseau isolée ne fournit pas des solutions aux problèmes techniques, ni ne garantit qu'une méthode donnée soit la meilleure ; il s'agit simplement d'un outil qui permet au planificateur d'analyser et de visualiser l'évolution d'un projet provisoirement défini, de repérer les contraintes et les problèmes d'exécution éventuels et de prendre rapidement des décisions visant à rectifier les erreurs. L'analyse de réseau est une technique très perfectionnée qui permet de manipuler des données fournies par des spécialistes de deux ou de plusieurs disciplines. Cela explique pourquoi les données rassemblées doivent être de bonne qualité, ce à quoi contribue une première analyse rigoureuse et approfondie du projet. En pratique, le travail nécessaire pour mettre au point un réseau peut être considérable, ce qui entraîne des coûts élevés, quoique probablement inférieurs à ceux occasionnés par une conception erronée du projet.

La planification et la gestion font partie intégrante du processus continu, connu généralement sous le nom de « cycle de planification » et comprenant la formulation du plan (le processus de planification décrit précédemment), l'exécution, l'évaluation et la reformulation. Les deuxième et troisième phases de ce cycle comportent l'établissement d'un budget, la programmation et la surveillance. Il est impossible d'assurer une bonne gestion sans un plan adéquat, constamment reformulé suite à l'application de ce cycle.

Annexe 1. Essences cultivées sous irrigation

Tableau 7. Taux de croissance des principales essences cultivées^a.

Essences	Pays	Croissance annuelle moyenne ^b		Observations	Source
		Cubage (m ³ /ha)	Âge (ans)		
<i>Acacia nilotica</i> ^c	Uttar Pradesh, Inde	6-8	10-20	Moyenne sur les berges des canaux	Rapports de la BIRD
<i>Dalbergia sissoo</i> ^c	Pakistan	5,9-10,1	10-20	1 ^{re} catégorie	Troup (1921)
		4,2-7,6	10-20	2 ^e catégorie	Troup (1921)
		3,1-5,0	10-20	3 ^e catégorie	Troup (1921)
		2,5	—	Moyenne	Lerche et Khan (1967)
		9	—	Moyenne potentielle	Lerche et Khan (1967)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> ^c	Iraq	16	10	Meilleurs terrains	Busby (1979)
	Israël	14,3	4	Non irrigué 7,2	Karschon (1970)
		15,8	4	Moins d'eau	Karschon (1970)
	Koweït	25	10	Prévision	Wood et Synott (1978)
		32	5,5	Volume total	Hamel (1985)
	Niger	8-20	3	Gamme de provenances	Hamel (1985)
		5-13	3	Gamme de taux d'irrigation	Hamel (1985)
		16-38	2	Gamme d'espacements	Hamel (1985)
	Nigéria	15-20	—	Prévision pour une bonne pratique	Gorse ^d
		22	4	Irrigués la 1 ^{re} année seulement	Jackson (1976)
	Pakistan	18	—	Prévision pour une bonne pratique	Pryor ^e
Zimbabwe ^e	15-27	5,7	Variabilité des 4 terrains	Barrett et Woodvine (1971)	
	65,5	5,7	Terrain exceptionnel	Barrett et Woodvine (1971)	
<i>Eucalyptus</i> « hybride » ^g	Uttar Pradesh, Inde	12	5	Moyenne sur les berges des canaux	Rapports de la BIRD

(suite)

Tableau 7. (fin)

Essences	Pays	Accroissement annuel moyen ^b			Observations	Source
		Cubage (m ³ /ha)	Âge (ans)			
<i>Eucalyptus microtheca</i>	Soudan ^h	7,3	7,5	Moyenne	Masson et Osman (1963)	
		10	—	Moyenne réelle	Foggie (1967)	
		12	—	Moyenne potentielle	Foggie (1967)	
		23	9	1 ^{re} catégorie	Ahmed (s/d)	
		14	9	2 ^e catégorie	Ahmed (s/d)	
		7	9	3 ^e catégorie	Ahmed (s/d)	
<i>Eucalyptus resinifera</i>	Niger	42,6	5,5	—	Hamel (1985)	
<i>Populus deltoides</i>	Israël	24	4	Clone « A »	Karschon (1970)	
		39	4	Clone « B »	Karschon (1970)	
Peuplier noir	Zimbabwe	14	5	—	Barrett et Woodvine (1971)	
	Iraq	36	5	Meilleurs terrains	Busby (1979)	
<i>Prosopis juliflora</i> ^c	Uttar Pradesh, Inde	6-8	—	Moyenne sur les berges des canaux	Rapports de la BIRD	

^a Pour une discussion de ces taux de croissance, voir le chapitre 8. Les taux de croissance des autres essences cultivées à titre d'essai au Zimbabwe figurent dans le texte.

^b À l'exception des données pour *D. sissoo*, tirées de Troup (1921), la valeur de l'accroissement annuel moyen exclut, en général, les branches et le feuillage. Pour obtenir une estimation de la production totale de la biomasse, il faudrait ajouter entre 20 % et 30 % aux volumes indiqués. Les données de Troup comprennent les brindilles dont le diamètre est inférieur à 2,5 cm.

^c Essences relativement halophiles.

^d Jean Gorse, Banque mondiale, Washington, DC, États-Unis, communication personnelle.

^e Dans Lerche et Khan (1967).

^f Le taux d'accroissement de la forêt naturelle dans la zone était de 0,6 à 0,75 m³/ha par an (Barrett et Woodvine 1971).

^g *Eucalyptus tereticornis*.

^h Le taux d'accroissement de la forêt naturelle dans la zone était de 0,5 à 0,6 m³/ha par an (Foggie 1967).

Annexe 2. Évaluation provisoire de la tolérance au sel des arbres et des arbustes au Koweït

Tableau 8. Classement en fonction de la tolérance à l'égard de la conductivité électrique maximale^a de la solution du sol^b.

CE × 10 ³	Essences
≥ 50	<i>Avicennia marina</i> , <i>Suaeda vermiculata</i>
40	<i>Casuarina glauca</i> , <i>Conocarpus lancifolius</i> , <i>Phoenix dactylifera</i> , <i>Tamarix jordanis</i> , <i>T. maris-mortui</i>
35	<i>Prosopis stephanianna</i> , <i>P. tamarugo</i> , <i>Tamarix arvensis</i> , <i>T. deserti</i> , <i>T. mannifera</i> , <i>T. orientalis</i> , <i>T. pentandra</i> , <i>T. meyeri</i>
30	<i>Acacia ligulata</i> , <i>Casuarina equisetifolia</i> , <i>Kochia indica</i> , <i>Prosopis juliflora</i> , <i>Tamarix aphylla</i> , <i>Zizyphus vulgaris</i>
25	<i>Tamarix nilotica</i>
18	<i>Acacia pendula</i> , <i>A. salicina</i> , <i>Casuarina stricta</i> , <i>Eucalyptus sargentii</i> , <i>E. spathulata</i> , <i>Nerium oleander</i> , <i>Parkinsonia aculeata</i>
16	<i>Acacia farnesiana</i> , <i>Callistemon lanceolatus</i> , <i>C. cristata</i> , <i>Eucalyptus camaldulensis</i> var. <i>obtusata</i> , <i>E. kondinensis</i> , <i>E. microtheca</i> , <i>Prosopis chilensis</i> , <i>P. juliflora</i>
14	<i>Acacia arabica</i> , <i>Casuarina lehmanii</i> , <i>Haloxylon salicornicum</i> , <i>Sesbania grandiflora</i>
12	<i>Acacia stenophylla</i> , <i>Cailitris glauca</i> , <i>Dodonea viscosa</i> , <i>Eucalyptus gomphoccephala</i> , <i>E. kruseana</i> , <i>Melaleuca pauperifolia</i> , <i>Melia azaderach</i> , <i>Thevetia nerifolia</i>
10	<i>Albizia lebbek</i> , <i>Eucalyptus annulata</i> , <i>E. brachycorys</i> , <i>E. cornuta</i> , <i>E. melliodora</i> , <i>E. stricklandii</i> , <i>Ficus carica</i> , <i>F. religiosa</i> , <i>Lagenaria patersoni</i> , <i>Salvadora oleoides</i> , <i>Thespesia populnea</i> , <i>Vitex agnus-castus</i>
8,5	<i>Casuarina cunninghamiana</i> , <i>Dalbergia sissoo</i> , <i>Eucalyptus cladocalyx</i> , <i>E. forestiana</i> , <i>E. grossa</i> , <i>E. lansdowneana</i> , <i>E. largiflorens</i> , <i>E. robusta</i> , <i>E. salubris</i> , <i>Inga dulcis</i> , <i>Terminalia arjuna</i>
8	<i>Eucalyptus brockwayi</i> , <i>E. dundasi</i> , <i>E. intertextia</i> , <i>E. woodwardii</i> , <i>Ficus bengalensis</i> , <i>Myrtus communis</i> , <i>Prosopis spicigera</i> , <i>Schinus molle</i> , <i>Terminalia catappa</i>
6	<i>Balanites aegyptiaca</i> , <i>Cupressus arizonica</i> , <i>Eucalyptus torquata</i> , <i>Grevillea robusta</i> , <i>Olea europea</i> , <i>Tamarindus indica</i> , <i>Tecoma stans</i>
5	<i>Cordia myxa</i> , <i>Cupressus sempervirens</i> var. <i>stricta</i> , <i>Elaeagnus angustifolia</i> , <i>Eucalyptus astringens</i> , <i>E. campaspe</i> , <i>E. flocktoniae</i> , <i>E. lansdowneana</i> , <i>E. longicornis</i> , <i>E. patellaris</i> , <i>E. transcontinentalis</i> , <i>Lantana aculeata</i> , <i>Populus euphratica</i> , <i>Terminalia belerica</i>
4,5	<i>Bombax malabaricum</i> , <i>Eucalyptus citriodora</i> , <i>Populus folleana</i>
3	<i>Acacia tortilis</i> , <i>Ficus sycomorus</i> , <i>Robina pseudacacia</i> , <i>Salix alba</i>
2,5	<i>Acacia cyanophylla</i> , <i>A. mellifera</i> , <i>A. raddiana</i> , <i>A. forestiana</i>
2	<i>Eucalyptus teriticornis</i> , <i>Hyphaene thebaica</i> , <i>Poinciana regia</i> , <i>Duranta plumieri</i> , <i>Populus obolegata</i>
1	Espèces <i>Azalea</i> , espèces <i>Bougainvillea</i> , <i>Populus thevestina</i> , <i>P. × euramericana</i>

^a Conductivité électrique de la solution du sol exprimée en valeurs relatives sous la forme CE × 10³.

^b D'après Firmin (1968).

Tableau 9. Arbres croissant bien près de puits d'eau saline^a.

CE × 10 ³	Essences
59	Espèces <i>Zizyphus</i> , espèces <i>Phoenix</i>
51	Espèces <i>Tamarix</i>
46	<i>Prosopis juliflora</i>
22,5	<i>Tamarix aphylla</i> , <i>Eucalyptus camaldulensis</i> , <i>Nerium oleander</i> , <i>Parkinsonia aculeata</i> , <i>Inga dulcis</i> , <i>Acacia farnesiana</i> , <i>A. nilotica</i>

^a D'après Firmin (1968).

Tableau 10. Arbres croissant au-dessus de nappes phréatiques à taux ioniques variés^a.

Na/Ca	Essences	Na/Ca + Mg	Essences
16,4	Espèces <i>Prosopis</i>	4,7	Espèces <i>Zizyphus</i>
12,75	Espèces <i>Zizyphus</i>	4,8	Espèces <i>Prosopis</i>
11,4	Espèces <i>Phoenix</i>	3,3	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> , <i>Nerium oleander</i> , <i>Tamarix aphylla</i> , <i>A. farnesiana</i>
8,8	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		
6,5	<i>Parkinsonia aculeata</i> , <i>Acacia farnesiana</i>		

^a D'après Firmin (1968).

Annexe 3. Essences croissant bien sous irrigation saline à Eilat (Israël)¹

Rendement supérieur

Acacia cyanophylla, *A. longifolia*, *A. raddiana*, *A. spirocarpa*, espèces *Albizia*, *Balanites aegyptica*, *Capparis aegyptica*, *Cordia myxa*, *Dalbergia sissoo*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. gomphocephala*, *Ficus nitida*, *F. sycamorus*, *Haloxylon salicornicum*, *Hyphaena thebaica*, *Nerium oleander*, *Parkinsonia aculeata*, *Phoenix dactylifera*, *Poinciana regia*, *Schinus terebrinthifolius*, *Tamarix articulata*, *Thevetia nereifolia*, *Vitex agnus*, *V. pseudonegundo*, *Washingtonia filifera*, *Zizyphus spina-christi*

Bon rendement

Acacia caven, *A. farnesiana*, *A. karroo*, *A. melanoxylon*, *Cassia obovata*, *C. sturtii*, *Casuarina cunninghamii*, *Ceratonia siliqua*, *Dracaena draco*, *Elaeagnus angustifolia*, *Ficus carica*, *Haloxylon persicum*, *Melaleuca myrtifolia*, *Morus alba*, *Olea europea*, *Schinus molle*

Annexe 4. Essences ayant résisté à une interruption de l'irrigation à Khartoum (Soudan)^{2,3}

Très résistantes

Acacia farnesiana, *A. mellifera*⁴, *A. nilotica*⁴, *A. senegal*, *Conocarpus lancifolius*

Modérément résistantes

Albizia lebbek, *A. procera*, *Cassia auriculata*, *C. siamea*⁴, *Casuarina equisetifolia*, *Dalbergia sissoo*, *Dicrostachys cinerea*, *Eucalyptus microtheca*, *E. tereticornis* (« hybride »)

Peu résistantes

Ceiba pentandra, *Combretum aculeatum*, *Dendocalamus strictus*⁴, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. gomphocephala*, *E. microcorys*, *E. tereticornis*, *Khaya senegalensis*⁴, *Leucaena glauca*⁴, *Pongamia pinnata*, *Populus × euramericana*, *Stereospermum kunthianum*⁴

¹ D'après Boyko et Boyko (1968).

² D'après Bosshard (1966c).

³ Le nombre d'essences mises à l'essai a été limité aux essences courantes de la région.

⁴ Observations limitées.

Bibliographie

Sources principales

Chapitre 2. Les conditions environnementales dans les zones arides

Climat — Fuchs (1973a), Jones et al. (1981), Kaul (1970), Reitan et Green (1968), Thornthwaite et Hare (1955)

Géomorphologie — Jones et al. (1981), Lustig (1968)

Sols — Dan (1973), Kaul (1970)

Hydrologie et ressources hydriques — Buras (1973a), Jones et al. (1981), Mandel (1973)

Drainage et salinité — Elgabaly (1971), Mandel (1973), Shah Mohammad (1978)

Végétation — Gindel (1973), McGinnies (1968)

Chapitre 3. Les plantations forestières irriguées

Généralités — Eckholm (1975), Unesco (1974)

Réalisations régionales et nationales

Asie du Sud et Moyen-Orient

Pakistan — Ali (1960, 1962), Lerche et Khan (1967), Shah Mohammad (1978), Sheikh (1980 et autres)

Inde — Rapports de la Banque mondiale, plusieurs ouvrages locaux dont ceux de Gupta (1979)

Iraq — Busby (1979), Gorrie (1956), Pryor (1953)

Koweït — Firmin (1968, 1971), Wood et Synott (1978)

Émirats arabes unis — Barbier (1978), Satchell (1978), Wood et al. (1975)

Autres pays du Moyen-Orient — Khatib (1971)

Région méditerranéenne

Tunisie — Arar (1975), Cointepas (1968), Van Hoorn et al. (1968)

Algérie — Durand (1958), Metro (*in* Kaul 1970)

Égypte — Khatib (1971)

Israël — Boyko et Boyko (1968), Karschon (1970), Rawitz et al. (1966)

Afrique orientale, occidentale et australe

Soudan — Ahmed (1977, s/d) Ali (1979), Bosshard (1966a-e), Foggie (1967), Khan (1966a-d), Masson et Osman (1963)

Mali — CRDI (1981)

Niger — Barbier (1977), Barbier et Louppe (1980), Hamel (1985), Jean Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, É.-U., communication personnelle)

Nigéria — Allan (1977), Pryor (1970)

Sénégal — Hamel (1985)

Zimbabwe — Barrett et Woodvine (1971)

Amérique du Nord

États-Unis d'Amérique — Alverson (1975), De Bell (1975), Woodman (1971, 1973)

Amérique du Sud et Amérique centrale — FAO (1979)

Australie — Edgar and Stewart (1979), Nichols et Waring (1977)

Chapitre 4. Quelques principes fondamentaux

Les relations entre les plantes, le sol et l'eau atmosphérique

L'eau atmosphérique — Fuchs (1973a, c), Gairon (1973), Gairon et Hadas (1973), Hadas (1973a, b), Plaut et Moreshet (1973), Thornthwaite et Hare (1955)

Irrigation et propriétés du sol — Bresler (1973), Doneen (1972), Kalkafi (1973), Meiri et Levy (1973), Yaron and Shainberg (1973)

Irrigation et topographie — Doneen (1972), Lustig (1968)

Incidences hydrologiques de l'irrigation — Jones et al. (1981), Lustig (1968)

Chapitre 5. Les systèmes d'irrigation

Généralités — Booher (1974), Vermeiren et Jobling (1980)

Irrigation par gravité — Ali (1960), Booher (1974), France (s/d), Rawitz (1973b)

Arrosage par aspersion — Pillsbury (1968), Rawitz (1973b)

Systèmes localisés — France (1977), Heller et Bresler (1973), SETI (s/d), Vermeiren et Jobling (1980), Wood et al. (1975)

Chapitre 6. Évaluation des besoins et des possibilités

Tendances démographiques et socio-économiques — Foggie (1967), Glesinger (1960)

Demande de produits forestiers — Barbier et Louppe (1980), Delwaulle (1979), Foggie (1967)

Faisabilité technique

Eau d'irrigation — Bielorai (1973), Doorenbos et Pruitt (1977), Shalhevet (1973), Yaron (1973)

Espèces d'arbres à irriguer — Voir les annexes 1-4. Aussi Goor et Barney (1968), Pryor (1953, 1970, et autres)

Tolérance à la saturation en eau et à la salinité — Meiri et Levy (1973), Meiri et Shalhevet (1973)

Systèmes racinaires — Bielorai (1973), Bielorai et al. (1973), Bosshard et Wunder (1966)

Croissance des arbres et qualité du bois — Barrett et Woodvine (1971), Nichols et Waring (1977)

Rentabilité socio-économique — Ali (1979), Banks (in Barrett et Woodvine 1971), Foggie (1967), Gupta (1979), Hamel (1985), Khan, (1966), Lerche et Khan (1967)

Chapitre 7. Aménagement des plantations irriguées

Utilisation et occupation du sol — Glesinger (1960), Swaminathan (1980)

Études physiques et écologiques — Yaron et Vink (1973)

Évaluation et aménagement des ressources en eau — Buras (1973a, b)

Conception des exploitations irriguées

Systèmes d'irrigation et régimes d'arrosage — Booher (1974), Doneen (1972), France (1969, s/d), Khatib (1971), NAS (1974), Rawitz (1973a, b), Shalhevet (1973)

Chapitre 8. Mise en oeuvre et production

Généralités — Voir le texte.

Chapitre 9. Aspects économiques des plantations irriguées

Analyse et évaluation économiques — France (1977), Gittinger (1982), Openshaw (1980), Pillsbury (1968), Sagardoy et al. (1982)

Chapitre 10. Organisation et gestion

Généralités — France (s/d), Sagardoy et al. (1982)

Chapitre 11. Planification

Généralités — FAO (1972), France (1977), Gittinger (1982), Hagan et al. (1968)

Ouvrages de référence

- Ahmad, J. 1975. Management of irrigated plantations in Kotri Barrage zone. *Pakistan Journal of Forestry*, 25(1), 26-30.
- Ahmed, A. El Houry. s/d [1969]. Introduction to the silviculture of *Eucalyptus microtheca* in the Gezira. University of Khartoum, Khartoum, Sudan. Thèse de maîtrise, 19 p.
- 1977. The silviculture and management of *Eucalyptus microtheca* in irrigated plantations in the Gezira of the Sudan. Forest Research Institute, Sudan Forest Administration, Khartoum, Sudan. Bulletin 3, 18 p.
- Ali, G.E.F. 1979. The appraisal of irrigated plantations in the Gezira in Northern Sudan. University College of North Wales, Bangor, U.K. Thèse de maîtrise, 130 p.
- Ali, Z. 1960. Principles and practice of irrigation in the irrigated plantations of West Pakistan. West Pakistan Department, Peshawar, Pakistan. Record 3, 249 p.
- 1962. Forestry practices in the irrigated forest plantations of West Pakistan, West Pakistan Forest Department, Peshawar, Pakistan. Record 7, 97 p.
- Allan, T.G. 1977. Handbook of plantation establishment techniques in the Nigerian savanna. FAO, Rome, Italy. Savanna Forestry Research Station Project Document DP, NIR/73/007, 64 p.
- Alverson, J.E. 1975. Wastewater irrigation and forests [in Pacific Northwest]. In *Water spectrum: Issues, choices, actions*. U.S. Army, Corps of Engineers, Washington, DC, USA, 6(4), 29-36.
- Arar, A. 1975. Quality of water in relation to irrigating sandy soils. In *Sandy soils: Report on the FAO-UNDP Seminar on reclamation and management of sandy soils in the Near East and North Africa, Nicosia, 3-8 décembre 1973*. FAO, Rome, Italy. Soils Bulletin 25, 73-83.

- Armitage, F.B., Joustra, P.A., Ben Salem, B. 1980. Genetic resources of tree species in arid and semi-arid areas. FAO, Rome, Italy. 118 p.
- Ashraf Ali, M. 1971. Climate and hydrology in West Pakistan : A summary. Soils Research Institute, Lahore, Pakistan. Soils Bulletin, 23 p.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W. 1976. Water quality for agriculture. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 29, 97 p.
- Badi, K.H. 1967. Afforestation in the clay plains of Kassala Province. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan. Bulletin 13, 20 p.
- Barbier, C. 1977. Rapport de stage: Plantation expérimentale d'*Eucalyptus* en irrigué. Ministre de l'éducation nationale, Direction de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, Bamako, Mali. 33 p.
- _____. 1978. L'irrigation des arbres forestiers. Rapport à un Séminaire forestier, CILSS/DSE, Ouagadougou, Burkina-Faso, janvier 1978. Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel, Ouagadougou, Burkina-Faso. 11 p.
- Barbier, C., Louppe, D. 1980. Interventions forestières sur l'unité expérimentale de cultures irriguées de Lossa (Niger) : Première campagne, 1978-1979. Centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne, France. 32 p.
- Barbier, C., Quideau, P., Boguetteau, K. 1981. Bilan des interventions forestières sur l'unité expérimentale des cultures irriguées de Lossa (Niger). Institut national de recherches agronomiques du Niger et Centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne, France. 28 p.
- Barghava, O.P. 1948. Saline and alkaline soils and their afforestation problem. *Indian Forestry*, 74(8), 303-306. (Cité dans Sheikh 1974b.)
- Barlow, B.A. 1983. Casuarinas — a taxonomic and biographic review. *In* Proceedings of the casuarina ecology, management and utilization international workshop, Canberra, Australia. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Canberra, Australia. 10-18.
- Barrett, R.L., Mullin, L.J. 1968. A review of introductions of forest trees in Rhodesia. Government Printer, Harare, Rhodesia. *Rhodesia Bulletin of Forest Research*, 1, 227 p.
- Barrett, R.L., Woodvine, F. 1971. Possibilities for irrigated forestry in the Rhodesian low veld. Rhodesia Forestry Commission, Harare, Rhodesia. Research Paper 1, 50 p.
- Bayoumi, A.A. 1972. The role of shelterbelts in the Sudan Gezira. Oxford University, Oxford, U.K. Thèse de maîtrise, 55 p.
- _____. 1976. The role of shelterbelts in Sudanese irrigated agriculture with particular reference to the Gezira. *Sudan Sylva*, 21, 24-39.
- _____. 1977. The role of shelterbelts in Sudanese irrigated agriculture with special reference to the Gezira. *Sudan Sylva*, 22, 25-39.
- Bélangier, R.P., Saucier, J.R. 1975. Intensive culture of hardwoods in the South. *Iowa Journal of Research*, 49(3), part 2, 339-344.
- Belshaw, D., Chambers, R. 1973. A practical management system for implementing rural development programmes and projects. Institute for Developmental Studies, University of Nairobi, Nairobi, Kenya. Discussion Paper 162, 35 p. (Publié ensuite dans Sagardoy et al. 1982.)
- Bhatia, K.S. 1980. The growth of *Eucalyptus* hybrid (*E. tereticornis*) on eroded alluvial soils of Uttar Pradesh in relation to spacing, irrigation and manuring. *Indian Forester*, 106(10), 738-743.
- Bielorai, H. 1973. Prediction of irrigation needs [of water]. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 359-368.
- Bielorai, H., Levin, I., Assaf, R. 1973. Irrigation of fruit trees. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 203-213.
- BIRD (Banque internationale pour la reconstruction et le développement). 1978. Proposed credit to the Republic of Niger for a forestry project. World Bank, Washington, DC, USA. Report P-2218 NIR, 17 p.
- _____. 1979a. Mali forestry project. World Bank, Washington, DC, USA. Staff Appraisal Report Report 2148a-MLI, 25 p.
- _____. 1979b. Uttar Pradesh social forestry project, India. World Bank, Washington, DC, USA. Staff Appraisal Report 2386a-IN, 39 p.
- _____. 1982. Niger pilot and technical assistance forestry project : Completion report. World Bank, Washington, DC, USA. IBRD Credit 800-NIR, 29 p.
- Bohorquez Rojas, A. 1972. El *Eucalyptus globulus* : Regeneración natural, producción y costos en el valle del Rio Mantaro (Peru). *In* Proceedings of the 7th World Forestry Congress. 1783-1788.
- Booher, L.T. 1974. Surface irrigation. FAO, Rome, Italy. Agricultural Development Paper 95, 160 p.
- Bosshard, W.C. 1966a. Irrigation methods in the Khartoum Greenbelt. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan, et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 1, 22 p.

- _____. 1966b. Irrigation methods in the Khartoum Greenbelt. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan, et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 21, 25 p.
- _____. 1966c. Tree species for the Khartoum Greenbelt and other irrigated plantations in arid zones. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan, et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 22, 49 p.
- _____. 1966d. Sowing and planting under arid conditions. Sudan Forest Department, Khartoum, et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 31, 62 p.
- _____. 1966e. Drought resistance of tree species. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan, et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 32, 45 p.
- Bosshard, W.C., Wunder, W.G. 1966. Root studies in irrigated tree plantations. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan, et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 29, 50 p.
- Boyko, E., Boyko, H. 1968. The desert garden of Eilat. *In* Boyko, H., éd., Saline irrigation for agriculture and forestry. Junk N.V., The Hague, The Netherlands. 133-160.
- Brennan, P.J. 1983. Manual on taxonomy of *Acacia* species. FAO, Rome, Italy, 47 p.
- Bresler, E. 1973. Solute movement in soils. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 165-175.
- Briskin, R.L., Murphey, W.K. 1970. Influence of sewage effluent irrigation on physical and mechanical properties of plantation-grown red pine. School of Forest Resources, Pennsylvania State University, University Park, PA, USA. Research Briefs, 1, 1-3.
- Buras, N. 1973a. Hydrological fundamentals. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 31-40.
- _____. 1973b. Development and management of water resources. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 51-69.
- Burley, J., Wood, P.J. 1976. A manual on species and provenance research with particular reference to the tropics. Commonwealth Forestry Institute, Oxford, U.K. Tropical Forestry Papers 10 et 10A, 233 p. et 64 p.
- Busby, R.J.N. 1979. An economic evaluation of the prospects for irrigated industrial plantations on the Mesopotamian Plain (rapport final). FAO, Baghdad, Iraq. FO : DP/IRQ/76/002, Field Document 3, 39 p.
- Carretero, R.V. 1972. Contribución al estudio del comportamiento y productividad de un cultivo de alamo bajo riego en el valle de Tunuyan, Provincia de Mendoza, Argentina. *In* Proceedings of the 7th World Forestry Congress. 1596-1604.
- Chardenon, J. 1969. La culture du peuplier en Turquie et son amélioration. *In* Institut du Peuplier de Turquie, Rapport technique volume II. FAO, Rome, Italie, FAO/SF, 41/TUR6, 165-217.
- Chaturvedi, A.N., Sharma, S.C., Srivastava, R. 1984. Water consumption and biomass production of some forest trees. *Commonwealth Forestry Review*, 63(3), 217-223.
- Clements, H.F. 1934. Significance of transpiration. *Plant Physiology*, 9, 165-172.
- Cointepas, J.P. 1968. Irrigation with salt water and drainage in Tunisia. *In* Boyko, H., éd., Saline irrigation for agriculture and forestry. Junk N.V., The Hague, The Netherlands. 187-194.
- Costin, A.B., Dooge, C.I. 1973. Balancing the effects of man's actions on the hydrological cycle. *In* Man's influence on the hydrological cycle. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 17, 19-51.
- Crandall, D.A., Luxmore, R.J. 1982. Simulated water budgets for an irrigated sycamore phyto-mass farm. *Forest Science*, 28(1), 17-30.
- CRDI (Centre de recherches pour le développement international). 1981. Irrigated plantations in Mali : Proposals for phase II. IDRC, Ottawa, Canada. Project summary 3-P-80-0184, 14 p.
- Dan, J. 1973. Arid zone soils. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA, 11-28.
- De Bell, D.S. 1975. Short-rotation culture of hardwoods in the Pacific North-West. *Iowa State Journal of Research*, 49(3), part 2, 345-352.
- De Bell, D.S., Brunette, A., Schweitzer, D.L. 1977. Expectations from intensive culture on industrial forest lands. *Journal of Forestry*, 75(1), 10-13.
- Delwaulle, J.-C. 1979. Plantations forestières en Afrique tropicale sèche : Troisième partie — Techniques à utiliser de la plantation à l'exploitation et aux rejets. *Revue des Bois et Forêts des Tropiques*, 186 (juillet-août), 32 p.
- Dickmann, D.I. 1975. Plant materials appropriate for intensive culture of woodfibre in the North Central Region. *Iowa State Journal of Research*, 49(3), part 2, 281-286.

- Doneen, I.D. 1972. Irrigation practice and water management. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 1, 84 p.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, Rome, Italy. Drainage and Irrigation Paper 24, 143 p.
- Durand, J.H. 1958. Les périmètres irrigables expérimentaux du Sahara Occidental. *Terres et Eaux*, 31, 10-33.
- Eccher, A., Lubrano, L. 1969. Prova di irrigazione estiva al P. radiata D. Don. *Cellulosa e Carta*, 20(4), 17-27.
- Eckholm, E.P.C. 1975. Losing ground : Environmental stress and world food prospects. Chapter 7 : The salting and silting of irrigation systems. W.W. Norton, New York, NY, USA. 114-135 et 213-214.
- Edgar, J.G., Stewart, H.T.L. 1979. Wastewater disposal and reclamation using *Eucalyptus* and other trees. Pergamon Press, Oxford, U.K. *Progress in Water Technology*, 11(4/5), 163-173.
- Elgabaly, M.M. 1971. Reclamation and management of salt affected soils. In Salinity seminar, Baghdad. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 7, 50-79.
- Evenari, M., Nessler, U., Roger, A., Schenk, O. 1975. Antike Technik in Dienste der Landwirtschaft in ariden Gebieten. *Der Tropenlandwirt. Zeitschrift für die Landwirtschaft in den Tropen und Subtropen*, 76(Jahrgang), 11-21.
- FAO (Organisation pour l'alimentation et l'agriculture). 1969. Final report : Forestry Research and Education Centre, the Sudan. FAO, Rome, Italy. FAO/SF, 70/SUD3, 170 p.
- _____. 1972. Planning methodology seminar, Bucharest. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 11, 128 p.
- _____. 1979a. *Eucalyptus* for planting. FAO, Rome, Italy. FAO Forestry Series, 11, 677 p.
- _____. 1979b. Poplars and willows in wood production and land use. FAO, Rome, Italy. FAO Forestry Series, 10, 328 p.
- Felker, P., Cannell, G.H., Osborn, J. 1983. Effects of irrigation on biomass production of 32 *Prosopis* (mesquite) accessions. *Experimental Agriculture*, 19(2), 187-198.
- Ferlin, G.R. 1977. Rôle du forestier sahélien. *Bois et Forêts Tropicales*, 171, 5-14.
- Ficco, N. 1968. Irrigation with saline water in Puglia. In Boyko, H., éd., Saline irrigation for agriculture and forestry. Junk N.V., The Hague, The Netherlands. 162-167.
- Firmin, R. 1968. Forestry trials with highly saline or sea-water in Kuwait. In Boyko, H., éd., Saline irrigation for agriculture and forestry. Junk N.V., The Hague, The Netherlands. 107-132.
- _____. 1971. Afforestation: Report to the Government of Kuwait. FAO, Rome, Italy. Report FAO/KU/TF 46, 29 p.
- Foggie, A. 1967. Report to the Government of the Sudan on forestry and forest policy in the Gezira area. FAO, Rome, Italy. Report TA 2411, 95 p.
- Fowler, W.B., Helvey, J.D. 1974. Effect of large scale irrigation on climate in the Columbia Basin. *Science*, 184(4133), 121-127.
- France. 1969. Les ouvrages d'un petit réseau d'irrigation. In Collections techniques rurales en Afrique. Secrétariat d'État aux Affaires Étrangères, Paris, France. 185 p.
- _____. 1977. Manuel de gestion des périmètres irrigués. In Collections techniques rurales en Afrique. Ministère de la Coopération, Paris, France. 24 p.
- _____. s/d [1977]. Irrigation gravitaire par canaux : Conception du périmètre, étude des canaux et leurs revêtements. In Collections techniques rurales en Afrique. Ministère de la Coopération, Paris, France. 296 p.
- Fuchs, M. 1973a. Climate and irrigation. In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 3-9.
- _____. 1973b. Water transfer from the soil and the vegetation to the atmosphere. In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 143-152.
- _____. 1973c. The estimation of evapotranspiration. In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 241-247.
- Gairon, S. 1973. Important soil characteristics relevant to irrigation. In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 227-240.
- Gairon, S., Hadas, A. 1973. Measurement of water status in soils. In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 215-226.
- Gindel, I. 1964. Seasonal fluctuations in soil moisture under the canopy of xerophytes and in open areas. *Commonwealth Forestry Review*, 43, 219-234.
- _____. 1971. Transpiration of three *Eucalyptus* species as a function of solar energy, soil moisture and leaf area. *Physiologia Plantarum*, 24, 143-149.
- _____. 1973. A new ecophysiological approach to forest-water relationships in arid climates. Junk N.V., The Hague, The Netherlands. 142 p.

- Gittinger, J.P. 1982. Economic analysis of agricultural projects. John Hopkins University Press, Baltimore, MD, USA. 505 p.
- Giunchi, A.J. 1972. Los alamos y la salinidad de los suelos. *In* Proceedings of the 7th World Forestry Congress. 1811-1815.
- Glesinger, E. 1960. The Mediterranean project. *Scientific American*, 203(1), 86-105.
- Goor, A.Y., Barney, C.W. 1968. Forest tree planting in arid zones. Ronald Press, New York, NY, USA. 460 p.
- Gorrie, R.M. 1956. Prospects for irrigated forest plantations in Iraq. *Commonwealth Forestry Review*, 35(1), 72-76.
- Grossi, P. 1974. [Consideration and research on forest irrigation.] *Montie e Boschi* V, 25(4), 23-31.
- . 1976. [Consideration and research on forest irrigation : Contribution II.] *Montie e Boschi* V, 27(3), 9-15.
- Gupta, T. 1979. Some financial and natural resource management aspects of commercial cultivation of irrigated *Eucalyptus* in Gujarat, India. *Indian Journal of Forestry*, 2(2), 118-137.
- Hadas, A. 1973a. Water retention and flow in soils. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 89-109.
- . 1973b. Water transfer from soil to plant. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 111-122.
- Hagan, R.M., Houston, C.E., Allison, S.V. 1968. Successful irrigation. FAO, Rome, Italy. *Land and Water Development Series* 5, 53 p.
- Hakim, K.A. 1951. Critique of irrigated plantations in the Punjab. *Pakistan Journal of Forestry*, 2, 264-270.
- Hall, N. et al. 1972. The use of trees and shrubs in the dry country of Australia. Forestry and Timber Bureau, Canberra, Australia. 588 p.
- Hallsworth, E.G. 1981. The use of saline groundwater in arid areas. *Experimental Agriculture*, 17, 145-147.
- Hamel, O. 1985. Production ligneuse en irrigué dans les périmètres aménagés du Sahel nigérien et sénégalais. Centre technique forestier tropical, Nogent-sur-Marne, France, et Institut sénégalais de la recherche agricole, Dakar, Sénégal, 55 p.
- Hassan, M.N., Marei, S., Motagalli, M., El Abd, H., Arnaout, Z. 1979. Salinity hazard and waterlogging in the area west of Noubaria Canal. *In* advances in desert and arid land technology and development. Harwood-Academic Publishers, Chur, Switzerland. 85-95.
- Heller, J., Bresler, E. 1973. Trickle irrigation. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 339-351.
- Hiley, W.E. 1930. The economics of forestry. Clarendon Press, Oxford, U.K. 256 p.
- Holmes, J.W., Colville, J.S. 1970. Grassland hydrology in a karstic region of Southern Australia : II — Forest hydrology in a karstic region of Southern Australia, 10, 38-74. (Cité dans Edgar et Stewart 1979.)
- Hughes, J.D., Thirgood, J.V. 1982. Deforestation in ancient Greece and Rome : A cause of collapse. *The Ecologist*, 12(5), 196-207.
- Jackson, J.K. 1976. Irrigated plantations. *In* Savannah afforestation in Africa. FAO, Rome, Italy. TF-RAF-95(DEN), 168-172.
- James, A.R. 1973. Drought conditions in the pressure water zone of north-eastern Nigeria — Some provisional observations. *Savanna*, 2(2), 108-114.
- Johnson, L.A.S. 1980. Notes on Casuarinaceae. *Telopea*, 2(1), 83-84.
- . 1982. Notes on Casuarinaceae II. *Journal of the Adelaide Botanical Gardens*, 6(1), 73-87.
- Johnson, R.D., Hall, N. 1970. [Afforestation in arid zones of] Australia. *In* Kaul, R.N., éd., *Afforestation in arid zones*. Junk, N.V., The Hague, The Netherlands. 385-414.
- Jones, K.R., Berney, O., Carr, D.P., Barrett, E.C. 1981. Arid zone hydrology for agricultural development. FAO, Rome, Italy. *Irrigation and Drainage Paper* 37, 271 p.
- Kadambi, K. 1946. The Induval irrigated Casuarina plantations. *Proceedings of the 7th Indian Silvicultural Conference*. 580-585.
- . 1951. Study of *Trichosporium* disease in the Induval irrigated Casuarina plantations, Mysore State. *In* Proceeding of the 8th Indian Silvicultural Conference. Part 2, 332-333.
- Kalkafi, H. 1973. Nutrient supply of irrigated crops. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 177-188.
- Kanshik, R.C. 1961. Problems of irrigated forest plantations. *In* Proceedings of the 10th Silvicultural Conference, Dehra Dun. Volume 1, 469-477.
- Karschon, R. 1970. The effect of irrigation upon the growth of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn : Report to 4th Session, Committee on Mediterranean Forest Research, Ankara. FAO, Rome, Italy. 4 p.
- Kaul, R.N. 1970. Afforestation in arid zones. Junk N.V., The Hague, The Netherlands. 435 p.

- Khan, A.H., Asgar, A.G., Rasul, G. 1956. Observations on the mortality of shisham (*Dalbergia sissoo*) and other trees in the Khanewal Plantation. *Pakistan Journal of Forestry*, 6(2,3,4), 109-126, 203-220, 289-301.
- Khan, A.H., Bokhari, A.S. 1970. Damage due to fungus diseases in Bhagat Reservoir Plantation, Lyallpur Forest Division. *Pakistan Journal of Forestry*, 20(3), 293-312.
- Khan, A.S. 1966. An appraisal of the existing water utilizations practices in irrigated plantations. *In Proceedings of the 2nd Pakistan Silvicultural Conference, Peshawar*. 149-158.
- Khan, M.A.W. 1966a. Results of differential irrigation in a plantain of *Eucalyptus microtheca* during the first year. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 3, 28 p.
- 1966b. Effective ridging patterns and standards for seasonally flooded mud flats on the White Nile. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 24, 16 p.
- 1966c. Vegetative propagation by culm cuttings in *Bambusa vulgaris* and *Oxytenanthera abyssinica*. Sudan Forest Department, Khartoum, Sudan et United Nations Development Programme, New York, NY, USA. Forest Research and Education Project Pamphlet 37, 14 p.
- 1966d. Growth of *Eucalyptus microtheca* in conjunction with agricultural and fodder crops. Sudan Forest Research and Education Project Pamphlet 35, 9 p.
- Khan, M.I.R. 1960a. Shisham (*Dalbergia sissoo* Rob.) natural sucker regeneration versus artificial stump planting in the Changa Manga Irrigated Forest Plantation. *Pakistan Journal of Forestry*, 10, 31-38.
- 1960b. Forestry in the Thal. *Pakistan Journal of Forestry*, 10, 200-208.
- 1961. Irrigated forest plantations of West Pakistan. *Pakistan Journal of Forestry*, 11, 154-161.
- Khan, S.M. Sheikh, M.I. 1983. To develop techniques for utilizing arid and semi-arid lands through planting under dry conditions. *In Annual Research Report for 1982*. Pakistan Forestry Institute, Peshawar, Pakistan, 84 p.
- Khatib, A.B. 1971. Present and potential salt affected and waterlogged areas in the countries of the Near East in relation to agriculture. *In Salinity seminar, Baghdad*. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 7, 13-38.
- Khattack, G.M. 1976. History of forest management in Pakistan, — III : Irrigated plantation and riverain forest. *Pakistan Journal of Forestry*, 26(4), 231-241.
- Kramer, P.J. 1949. Plant and soil water relationships. McGraw-Hill, New York, NY, USA. 347 p.
- Laurie, M.V. 1974. Tree planting practices in African savannas. FAO, Rome, Italy. Forestry Development Paper 19, 185 p.
- Lerche, C., Khan, A.S. 1967. Economic management of irrigated plantations in West Pakistan. Pakistan Forest Institute, Peshawar, Pakistan. 38 p.
- Louppe, D. 1979. Les plantations irriguées de Karma : Cinq années d'observations. Institut national de recherches agronomiques du Niger, Niamey, Niger, 21 p.
- Lustig, L.K. 1968. Geomorphology and surface hydrology of desert environments. *In McGinnies, W.G., Goldman, B.J., Paylore, P., éd., Deserts of the World*. University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA. 91-285.
- Mace, A.C., Gregersen, H.M. 1975. Evaluation of irrigation as an intensive cultural practice for forest crops. *Iowa State Journal of Research*, 49(3), part 2, 305-312.
- Mandel, S. 1973. Hydrology of arid zones. *In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New-York, NY, USA. 39-49.
- Masson, J.L., Osman, S. 1963. The Gezira irrigated plantations. FAO, Rome, Italy. FAO/SACAFTECH-Field 3, 11 p.
- Mather, T.H., Trin Ton That. 1984. Environmental management for vector control in rice fields. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 41, 152 p.
- Mathur, C.M. 1961. Irrigated plantations in Rajasthan. *In Proceedings of the 10th Silvicultural Conference, Dehra Dun*. Volume 1, 477-480.
- McGinnies, W.G. 1968. Appraisal of research on vegetation of desert environments. *In McGinnies, W.G., Goldman, B.J., Paylore, P., éd., Deserts of the World*. University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA. 381-474.
- McGinnies, W.G., Goldman, B.J., Paylore, P., éd. 1968. Deserts of the World. University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA. 788 p.
- Mehdizadeh, P., Kowsar, A., Vaziri, E., Boersma, L. 1978. Water harvesting for afforestation : I — Efficiency and life span of asphalt cover. *Journal of Soil Science Society of America*, 42(4), 644-649.
- Meiggs, R. 1982. Trees and timber in the ancient Mediterranean World. Clarendon Press, Oxford, U.K. 403 p.

- Meigs, P. 1953. World distribution of arid and semi-arid homoclimates. *In* Reviews of research on arid zone hydrology. Unesco, Paris, France. Arid Zone Programme 1, 203-210.
- Meiri, A., Levy, R. 1973. Evaluation of salinity in soils and plants. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 289-299.
- Meiri, A., Shalvet, J. 1973. Crop growth under saline conditions. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 277-290.
- Mendizabal, M., Verdejo, G. 1968. A new way to decrease salinity. *In* Boyko, H., éd., Saline irrigation for agriculture and forestry. Junk N.V., The Hague, The Netherlands, 195-197.
- NAS (National Academy of Science). 1974. More water for arid lands : Promising technologies and research opportunities. NAS, Washington, DC, USA. 137 p.
- Nichols, J.W.P. 1971. The effect of environmental factors on wood characteristics. I — The influence of irrigation on *Pinus radiata* from South Australia. *Silvae Genetica*, 20, 26-33.
- Nichols, J.W.P., Waring, H.D. 1977. The effect of environmental factors on wood characteristics. *Silvae Genetica*, 26(2-3), 107-111.
- Nigeria. 1957. Forest research in Nigeria, 1954/55. Lagos, Nigeria, p. 12.
- Nishat, H.A. 1978. Reclamation of salt-affected soils. *In* Proceedings of the Workshop/Seminar on membrane biophysics and salt tolerance in plants. University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan, 104-110.
- ONU (Organisation des Nations unies). 1978. The management of irrigation water in Egypt (résumé). *In* Proceedings of the United Nations Water Conference, Mar del Plata, Argentina, 1977. Pergamon Press, New York, NY, USA. Volume 1, Part 4, E/Conf. 70/Abs. 19/1788.
- Openshaw, K. 1980. Cost and financial accounting in forestry. Pergamon Press, Oxford, U.K. 188 p.
- Ovrut, B.A., Ovrut, S. 1977. Sahara : The growing giant. *Science Digest*, 1977 (février), 28-32.
- Palmberg, C. 1981. A vital genepool is in danger. *Unasyva*, 33, 22-30.
- Pillsbury, A.F. 1968. Sprinkler irrigation. FAO, Rome, Italy. Agricultural Development Paper 88, 179 p.
- 1981. The salinity of rivers. *Scientific American*, 1981 (juillet), 55-65.
- Plaut, Z., Moreshet, S. 1973. Transport of water in plant — atmosphere system. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 123-141.
- Prevosto, M. 1971. [First results of the effects of irrigation on production and revenue from one rotation of poplar in the Po Valley.] Communication présentée à la 14^e séance, International Poplar Commission, Roumanie. FO : CIP/71/59, 13 p.
- Pryor, L.D. 1953. *Eucalyptus* in Iraq — Present and future. FAO, Rome, Italy. Report 169, TA 204/5/6, Project IRQ/10, 28 p.
- 1970. Present performance and prospects for future development of plantations of *Eucalyptus*. FAO, Rome, Italy. UNDP Project FOR : SF/NIR16, Technical Report 2, 10 p.
- Quraishi, M.A.A., Khan, G.S. 1979. Farm forestry in Pakistan. Agricultural University, Faisalabad, Pakistan. Bulletin of Department of Forestry, Range Management and Wildlife, 153 p.
- Raeder-Riotzsch, J.E. 1965. Report to the Government of Iraq on forestry research. FAO, Rome, Italy. Report 2031, 12 p.
- Raeder-Riotzsch, J.E., Masrur, A. 1968. Water consumption of tree seedlings. Pakistan Forest Institute, Peshawar, Pakistan. 7 p.
- Rawitz, E. 1973a. Sprinkler irrigation. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 304-322.
- 1973b. Gravity irrigation. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 323-337.
- 1973c. Special irrigation methods and accessory devices. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 353-355.
- Rawitz, E., Karschon, R., Mitrani, D. 1966. Growth and consumptive use of two poplar clones under different irrigation regimes. *In* Irrigation of field and orchard crops under semi-arid conditions. *Israel Journal of Agricultural Research*, 16, 77-78.
- Reitan, C.H., Grenn, C.R. 1968. Appraisal of research on weather and climate of desert environments. *In* McGinnies, W.G., Goldman, B.J., Paylore, P., éd., Deserts of the World. University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA. 21-92.
- Sagardoy, J.A., Bottrall, A., Uitenbogaard, G.O. 1982. Organization, operation and maintenance of irrigation schemes. FAO, Rome, Italy. Irrigation and Drainage Paper 16, 166 p.
- Saleem, A.A. 1973. A study of shelterbelt experiences in semi-arid areas with particular reference to application in the Sudan. University of Edinburgh, Edinburgh, UK. 124 p.
- 1975. The significance and importance of shelterbelts in the Sudan. *Sudan Sylva*, 20(111), 4-6.
- Salih, A.A. 1967. Meteorological report on windbreak experiment. Gezira Research Station, Wad Medani, Sudan. 4 p.

- Satchell, J.E. 1978. Ecology and environment in the United Arab Emirates. *Journal of Arid Environments*, 1, 201–226.
- Schechter, J. 1977. The Negev life-style. *Geographical Magazine*, L(2), 101–102.
- SETI (Société d'exploitation de l'irrigation). s/d [1975]. L'irrigation localisée par rampes perforées. Compagnie nationale pour l'aménagement de la région du Bas-Rhône et du Languedoc, Nîmes, France. 19 p.
- Shah, Mohammad, 1978. Salt affected soils in Pakistan. *In Proceedings of the Workshop/Seminar on membrane biophysics and salt tolerance in plants*. University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan, 47–64.
- Shainberg, I. 1973. Ion exchange properties of irrigated soils. *In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 155–164.
- Shalhevet, J. 1973. Irrigation with saline water. *In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 263–276.
- Sharma, R.C. 1973. Quality of groundwater in Saraswati Plantation, District Karnal (Haryana). *Indian Forester*, 99(2), 76–81.
- Sheikh, M.I. 1974a. Optimum water requirement of shisham (*Dalbergia sissoo*) — Second assessment. *Pakistan Journal of Forestry*, 24(1), 1–9.
- 1974b. Afforestation in waterlogged and saline areas. *Pakistan Journal of Forestry*, 24(2), 186–174.
- 1978. Performance of poplar clones under irrigated conditions in the Punjab. *Pakistan Journal of Forestry*, 28(2), 120–122.
- 1980. Trees and agriculture go together. *Pakistan Agriculture*, 1980 (juin-juillet), 30–35.
- 1981. Heavy pruning is injurious to poplars. *Pakistan Forest Institute, Peshawar, Pakistan. Forest research Technical Note 30*, 1 p.
- 1982. Exotic poplars in Pakistan Forest Institute, Peshawar, Pakistan. 56 p.
- Sheikh, M.I., Masrur, A. 1972. Drip irrigation : A new method of irrigation developed at Pakistan Forest Institute, Peshawar. *Pakistan Journal of Forestry*, 22(4), 446–462.
- Sheikh, M.I., Raza-ul-Haq. 1982a. Effect of spacing on the growth of *Dalbergia sissoo* (shisham). *Pakistan Journal of Forestry*, 32(2), 73–74.
- 1982b. Performance of poplars and other species in conjunction with agricultural crops. *Pakistan Journal of Forestry*, 32(2), 72.
- Shiva, V., Shandra, S., Bandyopadhyay, J. 1982. Social forestry — No solution without the market. *The Ecologist*, 12(14), 158–168.
- Shmueli, E. 1973. Efficient utilization of water in irrigation. *In Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 411–423.
- Simpson, E.S. 1968. Ground water hydrology of desert environments. *In McGinnies, W.G., Goldman, B.J., Paylore, P., éd., Deserts of the World*. University of Arizona Press, Tucson, AZ, USA. 21–92.
- Singh, B. 1963. The first irrigated plantation of Rajasthan. *Indian Forester*, 89, 690–700.
- Singh, J. 1960. Raising of irrigated plantations in the plains of Patiala and East Punjab States Unican. *Proceedings of the 9th Silvicultural Conference, Dehra Dun, 1956. Part 1*, 280–285.
- Shaminathan, M.S. 1980. Indian forestry at the crossroads. *International Tree Crops Journal*, 1, 61–67.
- Thirgood J.V. 1981. *Man and the Mediterranean forest : A history of resource depletion*. Academic Press, Toronto, Canada. 194 p.
- Thomas, J.G., Starkey, D.A., Aslin, R.G. 1981. Drip irrigation for windbreak plantings. Cooperative and Extension Service, Kansas State University, Manhattan, KS, USA. 6 p.
- Thornthwaite, C.W., Hare, F.K. 1955. Climatic classification in forestry. *Unasylva*, 9, 51–59.
- Tomar, O.S., Yadav, J.S.P. 1980. Effect of saline irrigation water of varying EC, SAR and RSC levels on germination and seedling growth of some forest species. *Indian Journal of Forestry*, 3(4), 306–314.
- Troup, R.S. 1921. *The silviculture of Indian trees*. Clarendon Press, Oxford, U.K.
- Trout, T.J. 1979. Factors affecting losses from Indus Basin irrigation channels. U.S. Agency for International Development, Washington, DC, USA. *Research and Development Abstracts*, 8(1), 17.
- Unesco (Organisation des Nations unies pour l'éducation, les sciences et la culture). 1974. Influence of man on the hydrological cycle : Guidelines to policies for the safe development of land and water resources. *In Status and trends in research in hydrology, 1965–74 : Working group report*. Unesco, Paris, France. 30–70.
- Urie, D.H. 1975. Nutrient and water control in intensive silviculture on sewage renovation areas. *Iowa State Journal Research*, 49(3), part 2, 313–317.

- USDAFS (United States Department of Agriculture, Forest Service). 1980. Forestry activities and deforestation problems in developing countries. Forest Products Laboratory, USDAFS, Madison, WI, USA. Report PASAAG/TAB, 1080-1087.
- Van der Zel, D.W., Wicht, C.L. 1974. Allocation of water to forestry and other users in the catchment of the Eerste River. *Forestry in South Africa*, 15, 47-56.
- Van Hoorn, J.W., Ollat, C., Combremont, R., Novikoff, G. 1968. Irrigation with salty water in Tunisia. *In* Boyko, H., éd., *Saline irrigation for agriculture and forestry*. Junk N.V., The Hague, The Netherlands. 168-186.
- Veltcamp, J.J. s/d. A tentative comparison of the economics of agricultural crops and plantations of fast grown tree species (poplars) under irrigation in the Jordan Valley. FAO, Rome Italy. Project Interim Report, 13 p.
- Vermeiren, J., Jobling, G.A. 1980. Localized irrigation — Design, installation, operation, evaluation. FAO, Rome, Italy. *Irrigation and Drainage Paper* 36, 198 p.
- Walker, P. 1979a. Report on the Upper Volta Micro-catchment Scheme : Draft report. Department of Agriculture and Forestry, Oxford University, Oxford, U.K. 45 p.
- 1979b. Micro-catchments in Upper Volta : File note. Unit of Tropical Silviculture, Commonwealth Forestry Institute, Oxford, U.K. 11 p.
- Walter, H., Leith, H. 1967. *Klimiadiagram — Weltatlas*. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, DDR. 86 p.
- Wood, P.J. 1977. Report on forestry at Shendi, Sudan : Report to the Overseas Development Agency. Unit of Tropical Silviculture, Commonwealth Forestry Institute, Oxford, U.K. 7 p.
- Wood, P.J., Burley, J., Grainger, A. 1982. Technologies and technology systems for reforestation of degraded tropical lands : Office of Technology Assessment commissioned report. (Cité dans *Technologies to sustain tropical forest resources*. Office of Technology Assessment, U.S. Congress, Washington, DC, USA. F.214, March 1984, 344 p.)
- Wood, P.J., Synott, T.J. 1978. Utilization of treated sewage effluent in agriculture : Report of treated sewage effluent in agriculture : Report for Government of Kuwait, Ministry of Public Works. J. Taylor and Sons, Consulting Engineers, London, U.K. 61 p.
- Wood, P.J., Willens, A.F., Willens, G.A. 1975. An irrigated plantation project in Abu Dhabi. *Commonwealth Forestry Review*, 54(2), 139-146.
- Woodman, J.N. 1971. Is there a future for irrigation in the management of forests ? Communication présentée à l'assemblée annuelle de l'American Society of Agricultural Engineers, Washington State University, 27-30 juin 1971.
- 1973. The effect of thinning, fertilization and irrigation on intraseasonal diameter growth of Douglas fir. Communication présentée à la Northwest Scientific Association, Forestry Section, 30 mars 1973.
- Yadav, J.S.P. 1980. Salt affected soils and their afforestation. *Indian Forester*, 106(4), 259-272.
- Yaron, B. 1973. Water suitability for irrigation. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 71-85.
- Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd. 1973. *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 434 p.
- Yaron, B., Shainberg, I. 1973. Electrolytes and soil hydraulic conductivity. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 155-164.
- Yaron, B., Vink, A.P.A. 1973. Soil survey for irrigation. *In* Yaron, B., Danfors, E., Vaadia, Y., éd., *Arid zone irrigation*. Springer-Verlag, New York, NY, USA. 203-213.



Crédits photographiques : *Les photos de la page 176 sont de Jean Gorse (Banque mondiale, Washington, DC, É.-U.) et toutes les autres, du personnel du CRDI.*