Recherche du mode de gestion optimale des ressources en eaux superficielles et souterraines de la vallée du Souss (Maroc)

Jean-Michel Daniel

Société Centrale pour l'Équipement du Territoire, Puteaux

Avant-propos

Le plan d'aménagement de la plaine du Souss au Maroc a été l'occasion de développer un certain nombre de réflexions sur les notions maintes fois utilisées par les aménageurs de *gestion "intégrée"* et de *gestion "optimale"* des ressources en eau.

Par gestion "intégrée" on entend généralement la prise en compte simultanée dans les programmes d'aménagement, des ressources en "eau souterraine" et des ressources en "eau de surface".

Par gestion "optimale" on entend souvent la mise en place d'un ensemble d'aménagements réalisant une performance économique élevée (coût actualisé minimum ou mieux bénéfice actualisé maximum) et une mobilisation maximale de la "ressource" en eau.

La démarche suivie pour la mise au point du plan d'aménagement de la plaine du Souss a permis de s'interroger aussi bien sur cette définition de "l'optimalité" que sur les notions de "ressources en eau" et "d'intégration".

Après une rapide description de cette démarche et des principaux résultats obtenus au cours du projet, nous essaierons de les utiliser pour discuter les définitions de ces concepts.

Le projet Souss

Constituant la région agricole la plus méridionale du Maroc, autour de la latitude 30°S, la plaine du Souss s'étend sur 4 150 km² de superficie.

Elle est située au Sud du Haut-Atlas qui lui fournit, par l'oued Souss et ses affluents, dont le principal l'oued Issen, des ressources en eau évaluées globalement en moyenne à 680 millions de m³/an dont 335 sont consommés annuellement, 430 s'écoulent à la mer dans les crues de l'oued et 85 sont prélevés sur les réserves souterraines.

Sur 170 000 hectares de *superficie agricole utile*, les *superficies ensemencées* varient d'une année à l'autre de 70 à 150 000 hectares.

La superficie irriguée est de 55 000 hectares dont 24 000 hectares d'irrigations modernes sur pompage et 31 000 d'irrigations traditionnelles sur dérivations d'eau gravitaire à partir de résurgences situées dans le lit de l'oued, principalement à l'amont de la plaine.

L'objectif du projet, entrepris par le gouvernement Marocain avec l'assistance du Fond Spécial des Nations Unies (PNUD) et la FAO, était d'établir un plan directeur de modernisation et d'extension des irrigations.

Cadre général

Le climat

Le climat de la plaine du Souss est dû à la combinaison d'une latitude saharienne, de l'influence océanique et du cadre montagneux des deux atlas. Il est de type aride à hiver chaud à Agadir et à hiver tempéré à Taroudant.

La pluviométrie moyenne varie (1940-1969) de 253 mm à Agadir à 246 à Taroudant et 363 à Aoulouz avec des écarts de 50 à 600 mm.

La température moyenne est de l'ordre de 18 à 20°C environ. Sur la zone aval, l'influence océanique se traduit par une modération des températures extrêmes et par un degré hygrométrique plus élevé. Le gel (phéno-

mène mal connu faute d'observations) est inconnu à Agadir.

Le système hydrologique

Il a été étudié et décrit en détail, par l'équipe d'hydrologues et d'hydrogéologues de la Direction des Ressources en eau du Maroc. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- les apports moyens par la pluie sur les 16 800 km² du bassin versant sont estimés à 5 milliards de mètres cubes ;
- les sommets du Haut Atlas sont régulièrement enneigés tous les hivers ce qui améliore la régularisation des débits des rivières ;
- le remplissage alluvionnaire entre le Haut Atlas et l'Anti Atlas a une épaisseur très importante (de l'ordre de 300 m). Il constitue un aquifère dont les volumes en eau sont estimés à 50 milliards de mètres cubes de réserves prouvées auxquels il faut ajouter 50 milliards supplémentaires de réserves probables.

Réseau hydrographique

L'oued Souss débouche à Aoulouz dans la plaine à 700 m d'altitude. Le bassin versant contrôlé à Aoulouz par une station hydrométrique est de 4 450 kilomètres carrés.

En aval d'Aoulouz, les eaux de l'oued s'infiltrant partiellement dans les alluvions, seules les crues transitent au-delà de Loulija (situé à 35 km à l'aval d'Aoulouz). Entre Loulija et Taroudant, (à 80 km à l'aval d'Aoulouz), l'oued présente des zones d'émergences séparées par des zones sèches où l'eau drainée à l'amont, se réinfiltre quand elle n'a pas été dérivée par les séguis. A l'aval des Ouled Bou R'Bia (120 km à l'aval d'Aoulouz) et jusqu'à l'Océan, l'Oued s'encaisse dans les alluvions anciennes et draine le réservoir souterrain constituant ainsi un cours permanent dérivé pour l'irrigation.

L'affluent le plus important du cours inférieur du Souss est l'oued Issen. Le bassin versant contrôlé à l'entrée de l'oued Issen dans la plaine est de 1 590 km².

Réservoirs souterrains de la plaine du Souss

Le bassin du Souss se compose d'une vaste structure synclinale dont le remplissage tertiaire et quaternaire contient la plupart des réservoirs perméables.

Cette structure se compose de deux gouttières parallèles d'importance inégale :

- le bassin subsident nord ;
- le bassin sud.

Ces deux sillons sont séparés par une remontée du substratum constitué de Crétacé (calcaires Turoniens perméables dans lesquels quelques forages exploitent des débits importants mais localisés). Un système de failles affecte le substratum et le remplissage. Toutefois au niveau de ce dernier cette tectonique se traduit par de simples flexures qui n'ont pas d'incidence directe sur l'écoulement général de l'eau souterraine.

Malgré son hétérogénéité, ce remplissage fonctionne globalement comme un réservoir unique.

Au niveau de l'exploitation, une campagne de prospection géophysique complétée au cours du projet, a

permis d'identifier deux horizons perméables principaux :

- un horizon profond situé entre 40 et 180 mètres suivant les zones ;
- et un horizon situé entre 0 et 80 mètres de profondeur.

Sur un échantillon de 31 forages existants (dont 10 réalisés au cours du projet) :

- 11 forages ont une profondeur inférieure ou égale à 50 mètres ;
- 18 forages ont une profondeur supérieure à 60 mètres, 12 d'entre eux ont une profondeur supérieure à 80 mètres.

Les débits spécifiques mesurés sur ces forages sont en général élevés et supérieurs à 2 l/s/m de rabattement (6 l/s/m en moyenne).

Répartition des perméabilités

La structure hydrogéologique de la plaine synthétisée et simplifiée pour les besoins du calcul d'exploitation sur le modèle analogique, présente ;

- une zone centrale de transmissivité $T > 510^{-3}$ m²/s ;
- une zone de bordure de transmissivité $T < 510^{-3}$ m²/s.

Dans toutes les zones de transmissivité supérieure à 510^{-3} m²/s, il existe au moins l'un des deux niveaux perméables entre 40 et 90 mètres de profondeur, ce qui permet d'envisager des rabattements importants notamment dans la partie amont de la plaine.

Localement et notamment dans la partie aval rive gauche, les transmissivités diminuent et contribuent à aggraver l'effet de la baisse des niveaux rendant impossible l'approfondissement des ouvrages de captage lorsque la couche perméable profonde n'existe pas (Ouled Teïma).

Synthèse hydrologique – Modèle de simulation – Bilan

Les études hydrogéologiques de la plaine du Souss ont débuté en 1940 et se sont poursuivies depuis sans interruption. De nombreux sondages d'exploration ou d'exploitation ont été réalisés ainsi que des campagnes de géophysique. La mise en place d'un réseau de contrôle piézométrique périodique (début en 1940) a permis des levés piézométriques complets de la nappe (notamment en 1952, 1962 et 1968). Des mesures périodiques des débits des drains, séguis et résurgences, le calcul par essais de pompage de 110 valeurs de transmissivités et 40 valeurs du coefficient d'emménagement ont amélioré la définition des conditions aux limites et l'évaluation des volumes exhaérés et des consommations d'eau. Les mesures hydrologiques permanentes sur l'Oued Souss et sur son principal affluent l'Issen ont fourni de longues séries de mesures des entrées et sorties du système par le réseau hydrographique.

Dans le cadre du Projet Souss, un modèle de simulation par analogie électrique a été construit. Il comprend 3 000 mailles carrées uniformes figurant 1,25 km de côté. Ce modèle a été calé en régime permanent sur une piézométrie de référence de 1940 (avant le développement des pompes). Le calage a été obtenu par itérations entre les évaluations des flux d'entrée et de sortie d'eau du système.

Au terme du calage, le modèle a permis d'établir le bilan annuel moyen de l'aquifère de la plaine du Souss (les apports moyens et l'exhaure par pompages étant ceux de 1969-1970).

Des graphes (en annexe) montrent comment une démarche logique a utilisé d'une part le modèle comme cadre de cohérence pour déterminer les relations entre les entrées et sorties du système souterrain, et d'autre part, un certain nombre d'hypothèses réalistes concernant en particulier l'efficacité de l'irrigation pour établir les relations entre les volumes écoulés entrant et sortant de la plaine avec les circuits souterrains.

Bilan hydrologique actuel

Les apports moyens en eau sur la plaine sont estimés à 680 millions de mètres cubes :

- l'oued Souss à Aoulouz fournit 270 Mm³ soit 40 % des apports ;
- l'oued Issen 120 Mm³ soit 18 % des apports.

65 % des apports proviennent des bassins versants du Haut Atlas avec des lames d'eau ruisselées moyennes variant d'Ouest en Est de 80 mm à 160 mm au Toubkal.

La consommation en eau établie à partir de la carte de l'occupation du sol établie par photo-interprétation en avril 1973, est de 330 Mm³ répartie de la manière suivante :

	Superficie (ha)	Volume consommé en Mm ³
Irrigation traditionnelle		
— irrigation pérenne	31 200	140
— épandage de crues	20 à 80 000	35
Irrigation moderne		
— agrumes	17 000	115
— polyculture	6 800	40
Total (en moyenne)	105 000	330

Le fonctionnement du système hydraulique a été analysé en deux sous-ensembles dont les bilans sont liés mais dont le fonctionnement est relativement indépendant : 140 Mm³ sont consommés dans la partie amont de la plaine et 190 Mm³ à l'aval.

Les bilans hydrologiques mettent en évidence deux faits importants :

- la surexploitation de l'aquifère dans la partie aval de la plaine ;
- la part considérable des apports perdus à la mer (430 Mm³).

Evolution prévisible :

La surexploitation actuelle de l'aquifère conduira à un tarissement progressif des émergences qui alimentent les périmètres irrigués traditionnels.

Les possibilités de récupérations sur les pertes à la mer, par la réalisation d'ouvrages, sont fonction du dimensionnement et de la gestion de ces derniers. Elles peuvent être comprises entre :

- 60 et 70 Mm³ pour un barrage sur l'Oued Issen ;
- 40 et 70 Mm³ pour un barrage à Aoulouz.

Si à long terme l'objectif est de récupérer le maximum sur les pertes à la mer, quel qu'en soit le prix, les ouvrages principaux peuvent fournir 135 Mm³ auxquels il faut ajouter les aménagements de tous les bassins intermédiaires (90 à 100 Mm³) et la diminution de la drainance aval ainsi qu'une meilleure régularisation de la nappe due à une vidange partielle du réservoir souterrain.

Au total, on peut donc espérer diminuer les pertes à la mer de plus de 250 Mm³. Le retour à l'équilibre après la phase de vidange de l'aquifère pourrait donc se situer aux environs d'une consommation de 500 Mm³ (l'équilibre actuel est à 230 Mm³) (cf bilan actuel et bilan futur en annexe).

L'évolution en cours dans la plaine au début du projet

La structure et l'évolution de la population de la plaine sont synthétisés dans le tableau ci-après :

	Secteur géo- graph. Amont	Secteur géo- graph. Aval D	Secteur géo- graph. Aval G.	Total de la plaine
Population rurale de 1971 vivant dans des douars de moins de 5 000 habitants	80 620	50 920	126 610	258 150
Répartition de la popula- tion rurale en %	31	21	48	100
Nombre de foyers ruraux 1971	13 480	9 020	21 680	44 180
Nombre de personnes par foyer	6	5,6	5,8	5,8
Population urbaine de 1971 vivant dans des villes de plus de 5 000 habitants	22 270	95 390	5 990	123 650
Répartition de la popula- tion urbaine	18	77	5	100
Population totale de 1971	102 890	146 310	132 600	381 800
Répartition de la popula- tion totale	27	38	35	100
Taux annuel de croissance entre 1960 et 1971 en % :				
— population rurale	2,2	3,0	2,9	2,7
— population urbaine	2,4	10,4		8,7
— population totale	2,2	7,1	3,4	4,2
Densité au km ² en 1971				
— population rurale	52	61	72	62
— population totale	66	174	76	92
Taux d'urbanisation en 1971 en %	22	65	5	32

Les évolutions constatées : exode rural de la région amont de la plaine, concentration urbaine accélérée à Agadir, et de la population rurale dans la zone aval de la plaine, sont liées à deux phénomènes majeurs qui ont affecté la région :

- la reconstruction d'Agadir après le tremblement de terre ;
- la mise en valeur "explosive" qui a conduit à une accélération considérable des plantations de vergers d'agrumes et à la multiplication des pompages à l'aval de la plaine pour la production maraîchère de primeur (cf. courbe des plantations en annexe).

Au cours de la campagne 72-73, le Souss exportait 25 % des agrumes du Maroc et 46 % des tomates. Ces deux produits représentent en valeur 85 % des productions du secteur moderne, 95 % des exportations de la plaine.

Ces évolutions rapides basées sur des phénomènes spéculatifs non contrôlés sont à l'origine des évolutions constatées sur la nappe (baisse de niveau et tarissement progressif des émergences) ; elles sont aussi à l'origine des disparités profondes qui affectent le système dans son ensemble. Outre ceux qui affectent la répartition et la croissance de la population, les principaux déséquilibres sont ceux qui apparaissent au niveau :

- *de la répartition des ressources*
  - superficie irriguée/habitant, supérieure à l'amont du fait en partie de l'émigration vers l'aval.
- *de la valorisation des ressources*, inférieure à l'amont :
  - valorisation/m³ : Amont 0,36 Dh : traditionnel
Aval 0,47 Dh : moderne
  - valorisation/ha irrigué : Amont 1 900 Dh
Aval 3 500 Dh
- *de la répartition par secteur* :
  - le secteur moderne avec 20 % des superficies cultivées produit 48 % de la valeur ajoutée.
- en outre, l'afflux de population à l'aval se fait au détriment des revenus/habitant de la zone aval :
  - revenu moyen amont 646 Dh/habitant
  - revenu moyen aval 537 Dh/habitant
- et également au détriment des ressources naturelles (baisse rapide des niveaux de pompage à l'aval).

Les agriculteurs de l'amont disposent de ressources plus abondantes qu'ils valorisent mal. Ceci leur assure un revenu moyen comparable et même légèrement supérieur (en moyenne) à celui des agriculteurs de l'aval, mais au prix d'une émigration qui est un danger à terme pour l'équilibre de la plaine.

Il résulte de ces déséquilibres des évolutions préoccupantes à terme :

- *la concentration des investissements* : sur les secteurs de production et géographiquement dans des zones limitées (5 à 10 % des agriculteurs participent à ces investissements) ;
- *la stagnation des productions vivrières* (céréales, viande, lait) dont le déficit s'accroît, et dont pourtant la pratique dans des conditions modernes serait de nature à assurer une bonne valorisation des ressources ;
- *l'extension* pour tenter de combler ce déficit de la *céréaliculture en sec* au détriment des parcours et pour une production aléatoire de céréales la suppression de potentialités de production de viande ;
- *un danger de surproduction* à moyen terme donc de surinvestissement dans l'étape actuelle en puits, forages et plantations ;
- *des surexploitations localisées de ressources* en eau créant des dangers de ruine sur des zones en pleine production (Ouled Teima) ;
- *une mise en exploitation insuffisante des ressources* dans certaines zones dans lesquelles l'initiative privée ne s'est pas développée.

En définitive, un gaspillage de ressources : humaines, hydrauliques, financières.

Objectifs et déroulement du Projet Souss

Pour faire face à cette situation, le gouvernement Marocain a créé l'Office de Mise en Valeur du Souss-Massa et a mis en œuvre avec l'aide du P.N.U.D. et de la FAO un projet destiné à établir un plan directeur d'aménagement de la plaine.

Une première phase d'enquêtes et d'études de base s'est déroulée de Septembre 1968 à Avril 1971. La phase II, dont l'objectif était de réaliser le plan directeur et les études de factibilité d'une première tranche d'investissements s'est déroulée de juin 1972 à juin 1974.

L'équipe chargée du projet était mise en place par un contrat de sous-traitance entre la FAO et les sociétés S.C.E.T. INTERNATIONAL et G.E.R.S.A.R., associées pour le projet.

Un comité directeur rassemblant les principales administrations centrales Marocaines était l'instance supérieure de décision du projet.

Le Directeur de l'Office du Souss (ORMVASM) était le Directeur du projet.

Les travaux du projet ont été organisés autour d'un processus continu de concertation et de prise de décision. Pas moins de 12 réunions du Comité Directeur en 24 mois ont permis de mener à terme le projet dans les délais initialement prévus. La décision la plus importante du choix définitif entre le Barrage d'Aoulouz et le Barrage de l'oued Issen a été prise en dernière instance, par S.M. le Roi Hassan II (décision annoncée dans un discours public prononcé à Agadir en juin 1973).

Les principales phases du projet

Le graphe (fig. 1) montre les principales étapes d'élaboration du plan directeur. Compte tenu de la complexité du système et de la multiplicité des points de vue et des intérêts, souvent conflictuels, il n'était pas possible d'adopter une démarche linéaire conduisant par une méthode simple à une solution "optimale". Dès le départ, nous avons opté pour une démarche par approximations successives, ou démarche par boucles. A l'issue de chaque boucle, un ensemble de propositions cohérentes présentées sous forme d'alternatives claires, font l'objet d'une décision partielle dont les conséquences sont évaluées et énoncées, de la manière la plus précise possible.

A chaque boucle, la solution partielle adoptée sert de base pour l'établissement des propositions de la boucle suivante.

Cette démarche insère totalement le travail technique d'élaboration du projet dans le processus de prise de décision et permet de tester en permanence la validité des propositions techniques par rapport aux objectifs que se fixe la collectivité.

Cette tentative de réconciliation du "technique" avec le "politique" est à nos yeux l'un des acquis les plus importants du projet en termes méthodologiques.

DEROULEMENT DU PROJET

Figure 1

Sous les contraintes globales institutionnelles, contraintes de marchés, contraintes de politique nationale, contraintes issues du dynamisme propre du système, trois phases de décision ont marqué le projet :

1) *Les premiers schémas* qui ont amené le comité directeur à accepter comme une étape du plan directeur le pompage dans le réservoir souterrain d'une partie des réserves accumulées.

2) *Le choix d'un schéma hydraulique* concernant la décision de construire un premier barrage dès 1978-80 et de l'édifier sur l'oued Issen.

3) *Le choix d'un système de mise en valeur* cherchant une utilisation des infrastructures hydrauliques qui satisfasse non seulement à des impératifs économiques mais également à des objectifs de correction des déséquilibres et disparités en cours d'aggravation rapide dans la plaine.

Premier calcul d'optimisation

Il n'avait pour objectif que de fixer en première approximation les limites de simulation d'exploitation sur le modèle analogique.

L'optimisation dans ce premier calcul est une optimisation purement économique. Les contraintes techniques sont la géométrie de l'aquifère et les lois des écoulements souterrains.

L'argumentation "politique" en faveur de l'utilisation des ressources accumulées s'appuie sur le fait que cette utilisation est déjà en cours et que mieux vaut la diriger

MODE DE GESTION AVEC
RETOUR A L'EQUILIBRE

Prélèvement total sur la réserve depuis l'origine du projet : θ

$$\bar{w} = \delta_1 t_1 + \delta_2 (T - t_2) \quad z = \frac{\theta}{\delta_1 t_1} - \frac{t_1}{2} \left(-\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)$$

$$\theta = \bar{w} \cdot \frac{T}{2} \quad T = \frac{\theta}{\delta_1} \cdot \frac{1}{2} \left(-\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)$$

Figure 2

et l'encadrer que de tenter de l'arrêter. Les mesures d'interdiction en vigueur sont en effet tout à fait inopérantes.

Pour répondre à l'objection concernant l'épuisement, on prévoit un mode de gestion qui remplace à terme les ressources en eau souterraine par des mobilisations par barrage.

Il s'agit de déterminer :

- la fraction totale de la réserve qu'il faut prélever pour atteindre l'objectif d'une maîtrise de l'eau par pompage,
- comment ce prélèvement doit s'échelonner dans le temps, pour que l'exploitation de la ressource reste bénéficiaire et que ses conséquences socio-économiques soient conformes aux objectifs fixés.

On trouvera en annexe la définition des variables entrant dans le calcul.

Le mode de gestion du réservoir souterrain est simplifié suivant le graphique (Fig. 2).

L'incidence du programme d'exploitation se décompose en :

- coûts de pompage supplémentaires sur une fraction croissante des exploitations gravitaires soit D_1 ;
- accroissement des coûts de pompage sur les exploitations existantes équipées de forages, soit D_2 ;
- apparition de valeur ajoutée additionnelle provenant des extensions, soit R_3 ;
- création d'investissements de remplacement des émergences gravitaires, essentiellement des puits et pompes destinés aux périmètres traditionnels de la vallée soit I_1 ;
- remplacement des forages taris, du secteur moderne agrumicole soit I_2 ;
- création de forages et périmètres pour les extensions, sur périmètres publics ou privés soit I_3 .

Le bilan actualisé de l'opération de surexploitation est :

$$\bar{B} = -I_1 - I_2 - I_3 - D_1 - D_2 + R_3$$

a) *Optimisation du programme d'exploitation des réserves souterraines*

La recherche du maximum de B conduit à la résolution d'un problème de *commande optimale* défini par :

$$\text{Max } B = \int L(\theta, \bar{\omega}, z, \sigma, t) dt$$

3 variables $\theta(t)$ $\theta(0) = 0$ (état du stock)

d'état $\bar{\omega}(t)$ $\bar{\omega}(0) = 0$ et $(T) = 0$

(état du patrimoine)

$z(t)$ $z(0) = 0$ (âge des plantations)

et 1 variable $\sigma(t)$ (rythme d'ouverture ou de

de décision

fermeture des plantations

soumises à des contraintes

telles que : $\sigma_2 < \sigma < \sigma_1$

ou même $\sigma = \begin{cases} \sigma_2 \\ 0 \\ \sigma_1 \end{cases}$ (gestion trapèze)

3 équations d'état reliant ces variables

$$\frac{d\theta}{dt} = \bar{\omega}(t)$$

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = \sigma(t)$$

$$\frac{dz}{dt} = \sigma(t) - \gamma z(t) \text{ si } \sigma > 0$$

$$\frac{dz}{dt} = -\gamma z(t) \text{ si } \sigma \leq 0$$

(γ) étant le rythme d'entrée en production d'un périmètre nouveau.

b) *Résultats obtenus*

Les résultats obtenus sont résumés par un tableau qui met en relation le paramètre valorisation du m^3 d'eau par l'agriculture et la quantité d'eau totale qu'il est possible de prélever sur les réserves pour le bénéfice maximal. Ce tableau est le suivant :

θ	0	1	2	3	4	5	(Milliards m^3)
P	0,07	0,14	0,27	0,32	0,45	0,60	(DH/ m^3)

— Dans la mesure où la valorisation des mètres cubes d'eau a été évaluée pour l'état futur entre 0,62 et 0,63 Dh/ m^3 , on constate que l'optimum d'exploitation des réserves accumulées se situe au-delà de 5 milliards de m^3 soit 10 % des réserves prouvées et 5 % des réserves probables.

— Le temps (t_1) optimal de mise en exploitation a été évalué à 8 ans.

Ce premier calcul d'optimisation approché a permis d'évaluer sur la base d'ordres de grandeur très globaux, des valeurs de certains paramètres et des éléments approchés d'une politique de gestion de l'aquifère voisine de l'optimum; en effet, en définissant θ et t_1 , la gestion trapézoïdale est définie à un facteur temps près, qui est la durée totale de la phase de vidange.

Pour un prélèvement voisin de l'optimum (en fonction des premières hypothèses), c'est-à-dire $5.10^9 m^3$, prélevés, on a fait varier le temps total de 30 à 40 ans

et on a ainsi obtenu deux séries de simulations sur le modèle analogique.

Entre ces deux hypothèses, surexploitation à 179 Mm^3 /an ou 259 Mm^3 /an correspondant à environ 25 000 et 35 000 ha d'extensions, le choix de la solution adopté dépend :

- des autres contraintes techniques et notamment les disponibilités en sols ;
- de la réponse du modèle à ces hypothèses d'exploitation et des contraintes hydrogéologiques qui apparaissent localement suivant la géométrie des réservoirs ,
- des possibilités de mobilisation d'autres ressources par des barrages d'accumulation.

En fait les itérations suivantes ont conduit à réduire le rythme de surexploitation à 160 Mm^3 /an et les extensions de superficies irriguées à 20 000 hectares.

Deuxième approximation

Cette deuxième boucle a tenu compte des données pédologiques détaillées qui ont montré des limitations importantes des disponibilités en sols (les sols ne se situent pas là où l'eau est exploitable)

- des évaluations des coûts et des simulations de gestion des barrages possibles (Barrage d'Aoulouz-Barrage de l'oued Issen);
- de nombreuses combinaisons d'association de l'utilisation des pompes et des barrages ont été envisagées;
- dès cette étape quatre contraintes extérieures à la pure rationalité économique ont amené un infléchissement important des études:

1) La nécessité de sauvegarder, quel qu'en soit le coût, le verger de 2 000 hectares menacé de disparition à Ouled Teima par la baisse de la nappe.

2) La contrainte politique de la construction d'un barrage à court terme dans la vallée — ouvrage promis aux habitants du Souss par le Roi.

3) La nécessité de développer l'irrigation dans la zone amont pour s'opposer au déséquilibre croissant entre l'amont et l'aval.

4) La volonté de limiter l'exploitation des ressources souterraines.

— l'infléchissement par rapport à "l'optimum" économique peut se mesurer par le tableau suivant qui compare les résultats évalués en termes de bénéfice actualisé, de volumes pompés dans le réservoir et de superficie additionnelle mise en valeur :

Résultats comparés à l'horizon 2004 de plusieurs modes de mobilisation des ressources				
Hypothèses sur les barrages	Dates de construction	Volume pompé dans les réserves $10^9 m^3$	Superficie irriguée additionnelle (ha)	Bénéfice actualisé M. Dh
Sans barrage		$6,0 \cdot 10^9 m^3$	20 000	+ 30
Avec deux barrages construits à 10 ans d'intervalle	1985-1995	$5,0 \cdot 10^9 m^3$	20 000	+ 16
	1980-1990	$4,0 \cdot 10^9 m^3$	20 000	- 112
	1980-1990	$3,0 \cdot 10^9 m^3$	15 000	- 115

Figure 3

Après de longues discussions et le recours final à l'arbitrage politique le plus élevé, la solution adoptée comme base de l'élaboration du plan directeur est schématisée de la manière suivante :

Barrage de l'oued Issen	Réalisé en 1978	Volume pompé dans les réserves	Superficie irriguée addit.	Bénéfice actualisé M. Dh
		5,4 10 ⁹ m ³	20 000 ha	+ 2

Troisième optimisation

En matière de valorisation des volumes d'eau mobilisés les hypothèses adoptées dans les calculs précédents étaient basées sur des valeurs moyennes correspondant à des évaluations préliminaires. La troisième phase d'optimisation a utilisé un modèle de recherche opérationnelle qui simulait le système de mise en valeur suivant la méthode classique de la programmation linéaire.

Le modèle régionalisé en cinq zones a permis d'intégrer l'ensemble de la production agricole en sec et irriguée y compris l'élevage dont l'importance primordiale pour l'équilibre humique de l'ensemble de la plaine a constitué l'une des variables les plus importantes.

Les solutions contrastées ont été obtenues par la maximisation :

- de la valeur ajoutée nette,
- de la valeur ajoutée brute,

et par l'introduction de variantes pour les cultures industrielles :

- canne à sucre,
- betterave à sucre,
- pas de culture sucrière.

Les solutions de ces diverses hypothèses ont été classées à l'aide du graphe de pertinence fig. 3, qui identifie au niveau du système agricole de la plaine 17 objectifs correspondant aux buts et finalités de la politique agricole du Maroc. Ces objectifs ont été pondérés après consultation du Comité Directeur.

Chaque solution obtenue par l'algorithme de programmation linéaire était synthétisée par un ensemble de valeurs numériques ou d'objectifs non quantifiables classés dans des intervalles de définition qui constituaient les indicateurs de classement des solutions calculées.

Le choix réalisé en définitive consistait à rejeter la canne à sucre comme contraire aux objectifs de répartition des revenus, (consommation en eau trop élevée, culture trop concentrée, danger pour l'équilibre des pompages dans la nappe), mais a retenu une solution incluant la betterave sucrière (après expérimentation). Ce choix long et controversé a finalement été formulé grâce à la discussion organisée autour du graphe de pertinence et des pondérations adoptées pour les objectifs.

Principaux résultats

Le plan directeur établi sur la base des résultats des approximations successives décrites sommairement ci-dessus a permis de fixer en définitive les objectifs ci-

dessous à l'aménagement hydraulique de la plaine : 20 000 hectares d'extensions, dont 16 000 par le secteur public et 4 000 par le secteur privé doivent donner aux périmètres irrigués de la plaine une superficie totale de 75 000 hectares. Dans ce total, les 31 000 hectares du secteur traditionnel auront été modernisés par l'installation, rendue indispensable par le tarissement des émergences, de pompages individuels ou collectifs. Ces périmètres dont le statut foncier et l'organisation physique rendent toute intervention aléatoire dans l'état actuel, seront entraînés à la modernisation sous l'effet de démonstration des périmètres publics installés par l'ORMVASM (fig. 4).

- 7 000 hectares de périmètres sur pompage à l'amont ;
- 9 000 hectares alimentés par le barrage de Tamzaourt sur l'oued Issen à l'aval.

	Objectifs	Amont	Aval	Total
Ressources	Volumes d'eau additionnels mobilisés/an/Mm ³	70	90	160
	Volume total utilisé an/Mm ³	210	280	490
	A.E.P. Agadir-Mm ³		20	510
	Superficie irriguée additionnelle — Ha	10 000	10 000	20 000
	Total irrigué	37 800	37 200	75 000

Le coût de ces projets ainsi que tous les efforts de modernisation de l'agriculture du Souss qui seront entrepris entre 1974 et 2004 ont été estimés en 1974 à :

- 530 millions de Dh : investissements hydrauliques
- 660 millions de Dh : investissements de mise en valeur.

Les tableaux en annexe montrent l'évolution prévue de la valeur ajoutée de l'agriculture du Souss qui devrait passer en 30 ans de 150 à 300 M.Dh/an.

Discussion

La notion de ressource en eau

Une définition qui ne peut être purement physique

Pour les agriculteurs du Souss, avant la mise en œuvre de la technologie du pompage, la ressource en eau est celle qui se dérive au fil de l'eau ;

- soit au moment des crues,
- soit au droit des résurgences, à débit plus ou moins variable, du système souterrain.

Figure 4

Les volumes d'eau qui s'écoulent à la mer inutilisés, ne deviennent des ressources qu'à partir d'un niveau technologique qui permet de les dériver en les régularisant plus ou moins (barrages, seuils).

De même, les volumes d'eau accumulés dans les réservoirs souterrains ne deviennent des ressources qu'à partir de l'intervention du pompage qui permet seul leur récupération.

Dans ces deux cas, la ressource exploitable est produite par une intervention humaine sur l'une des composantes du cycle hydrologique ou poste du bilan (stock et flux d'entrée et de sortie).

Cette intervention définit la ressource en eau disponible à partir d'éléments étrangers au cycle hydrologique :

- niveau technologique,
- coût des interventions,
- capacité de valorisation de la ressource rendue disponible.

On constate ainsi que la ressource en eau se définit complètement par rapport aux autres ressources du système économique qui entrent en jeu dans la mise en œuvre de la technologie (ressources en capital, devises étrangères disponibles, ressources en main-d'œuvre qualifiée, marchés, technologie, etc.). La configuration du système hydraulique exploité n'est déterminante que pour la définition des contraintes physiques de l'exploitation, pas pour l'évaluation de la "ressource exploitable".

Dans cette optique, la notion de "surexploitation" qui s'applique au pompage dans le réservoir souterrain

de quantités d'eau supérieures au renouvellement annuel mesuré dans l'état actuel du système hydraulique perd tout son sens. Elle ne peut être jugée qu'en fonction des moyens qui lui sont consacrés et des résultats qu'elle permet d'obtenir par rapport aux objectifs à long terme que se fixe la communauté qui la met en œuvre.

Il n'y a pas de surexploitation sans pompage mécanique.

Il n'y a pas d'accroissement des ressources régularisées sans barrages.

Mais les barrages s'ensavent et les ressources qu'ils régularisent diminuent dans le temps sous l'effet de l'ensablement. On n'a jamais pour autant renoncé à construire des barrages. Les stocks d'eau souterraine s'épuisent progressivement sous l'effet du pompage et on renoncerait au nom d'un "équilibre" mal défini et évolutif à utiliser des ressources rendues disponibles par la technologie ? Il faudrait à ce compte fermer toutes les mines et tous les puits de pétrole.

Nécessité d'une conception plus globale du cycle hydrologique

L'étude du système hydraulique du Souss nous a amenés à remettre en question un certain nombre de concepts, fixés par l'usage mais stérilisants, dès lors qu'il s'agit de rechercher face à un système complexe la stratégie d'action la plus satisfaisante dans un contexte économique déterminé. Les concepts simples en première analyse de ressources en eaux souterraines, ressources en eaux de surface, ressources renouvelables, ressources non renouvelables, nous sont apparus dépassés dès lors

que, grâce au modèle de simulation, nous avons pu rendre compte du tarissement progressif des "eaux de surface" dérivées par le système traditionnel à partir de l'oued et que, par la simulation de gestion du barrage amont, nous avons pu établir une relation entre les dimensions du barrage et sa capacité à augmenter l'infiltration des crues dans le réservoir souterrain.

L'alimentation du réservoir souterrain est apparue à travers l'évaluation du bilan comme originaire pour une part importante des pratiques d'épandage de crues des agriculteurs et donc menacée de modifications dans la mesure où ces pratiques ne correspondraient plus dans le futur avec des activités suffisamment rentables.

Enfin, bien qu'il n'ait pas été possible de l'estimer faute d'observations appropriés, il est indéniable que la régularisation des ressources par le réservoir souterrain ne pourra que s'améliorer sous l'effet d'une vidange partielle de celui-ci. En effet, la partie amont du système drainant de la vallée se déplace de plusieurs kilomètres suivant les séquences pluviométriques, ce qui correspond à des fluctuations pluriannuelles du niveau des eaux souterraines. Il est à peu près certain que les volumes drainés lors des séquences d'apports excédentaires au réservoir souterrain seront stockés lorsque le niveau des eaux souterraines sera abaissé.

La modification du stock, généralement considéré comme une "surexploitation" pure, apparaît donc dans ce cas comme une contribution à l'amélioration de la régularisation d'ensemble du système. Ces considérations nous paraissent renforcer l'idée de la nécessité d'une perspective globale dans les évaluations des programmes d'équipement hydraulique, la nécessité de concevoir le cycle hydrologique comme un système dynamique qui se déforme sous l'effet des interventions humaines.

La notion d'intégration

On parle abondamment dans les études de développement de plans intégrés, d'intégration des ressources en eau de surface et en eaux souterraines. Nous pensons avoir montré à travers l'étude du Projet Souss que si intégration il y a, elle doit se situer à deux niveaux :

- au niveau physique ;
- au niveau économique.

Les deux niveaux ne sont pas indépendants et toute tentative d'optimisation doit jouer sur les deux de manière coordonnée. Compte tenu des incertitudes qui pèsent généralement sur la connaissance des liaisons physiques entre les différents éléments du cycle hydrologique, l'intégration la plus accessible et la plus immé-

diatement utile est l'intégration économique. Celle-ci doit conduire à :

- la recherche systématique et une meilleure adaptation des programmes d'équipement aux conditions naturelles ;
- l'inventaire de toutes les possibilités d'échelonner au mieux les investissements lourds (barrages, têtes mortes, etc.).

La mise en service d'un barrage sur un périmètre déjà démarré par des pompes, dans un réservoir souterrain, l'économie d'un système de drainage coûteux par la mise en place d'un périmètre mixte alimenté par barrage et pompage, etc., autant d'exemples que l'approche globale des systèmes d'aménagement hydraulique peut conduire à une plus grande efficacité, c'est-à-dire à une économie globale de ressources : naturelles et économiques.

La notion d'optimalité

Nous avons essayé de montrer rapidement que la notion d'optimalité n'est pas une notion qui peut s'établir à partir d'une démarche "technique".

Si les techniciens avaient été libres de décider de la solution qui leur apparaissait la plus satisfaisante du point de vue de l'économie générale des moyens et des ressources, ils auraient sans doute abouti à une solution tout-à-fait différente.

Le Projet Souss, tel qu'il a été établi, est devenu pleinement opérationnel. Il a reçu dans sa forme actuelle l'appui et même la publicité que lui a donné l'appui formel et explicite de la plus haute autorité du pays. De ce fait, il se réalise à un rythme soutenu et en conformité avec le plan établi. La Banque Mondiale a financé une part importante des travaux.

Entre un projet qui aurait formellement obéi à la rationalité de modèles d'optimisation mais qui n'aurait pas pu recueillir l'appui d'un consensus national de cette ampleur, et le projet tel qu'il est mis en application, nous pensons que le second est plus proche d'une "optimalité" réelle.

Nous serions ainsi tentés de définir le consensus obtenu par négociation continue comme le véritable critère complexe d'optimalité. La principale difficulté d'un tel critère est bien évidemment qu'il n'est pas définissable simplement. Ceci n'est pas une raison pour ne pas tout mettre en œuvre pour le rechercher dans chaque projet.

Annexes

Tableau I

BILAN HYDROLOGIQUE DE L'AMONT
(Millions de m³/an)

BILAN HYDROLOGIQUE DE L'AVAL
(Millions de m³/an)

Tableau II

TABLEAU DES PRINCIPAUX PARAMETRES ET VARIABLES
ENTRANT DANS LE CALCUL D'OPTIMISATION GLOBALE

Tableau III

	Expression	Dimension	D é f i n i t i o n
j		1/an	Taux d'actualisation
W		10^9 m ³ /an	Débit régularisé annuel
		sans	Fraction du débit régularisé disponible en gravitaire $t = 0$
V	$(1 - \beta) W$	10^9 m ³ /an	débit actuellement pompé
θ (t)		10^9 m ³	Volume total prélevé sur les réserves depuis $t = 0$
θ		10^9 m ³	Volume total à prélever sur les réserves avant retour à l'équilibre
θ_1		10^9 m ³	Paramètre de la formule de variation du débit des sources $S = \beta W (1 - \frac{\theta}{\theta_1})$
θ_2		10^9 m ³	Paramètre de la formule de variation du débit des forages actuels $F = V (1 - \frac{\theta}{\theta_2})$
ω	$\frac{d\theta}{dt}$	10^9 m ³ /an	Débit annuel prélevé sur les réserves à l'instant t
σ	$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$	10^9 m ³ /an ²	Accroissement annuel de débit prélevé > 0 ou < 0
σ_1		10^9 m ³ /an ²	Limite supérieure de σ correspondant au rythme de mise en valeur
σ_2	$-\sigma_2 < \sigma < \sigma_1$	10^9 m ³ /an ²	Limite inférieure < 0 de σ correspondant au rythme de régression
α	$\frac{\beta W}{\theta_1}$	1/an	
λ		DH/m ³ /an	Investissement par unité de débit supplémentaire mobilisé (forages, périmètres, puits, y compris renouvellement)
μ		DH/m ³ /an	Investissement par unité de débit de remplacement des sources ou forages existants
ε	$\frac{\mu}{\lambda} \alpha + \frac{V}{\theta_1}$	1/an	
f	$f_0 + a \theta + b \theta^2$	DH/m ³	Frais de pompage (fonctionnement et entretien) fonction de σ
P		DH/m ³	Valorisation (brute des dépenses d'eau) du m ³ d'eau en régime de croisière sur périmètre moderne
γ		1/an	Rythme d'entrée en production d'un périmètre nouveau
y	$y = p (1 - e^{-\gamma t})$	DH/m ³	Valorisation par m ³ à t d'un périmètre ouvert à $t = 0$

Volumes d'eau prélevés dans l'aquifère.

Tableau IV

Tableau V

BILAN OBJECTIF

Tableau VI

BILAN ACTUEL

J.M. DANIEL

VALEUR AJOUTEE DE L'AGRICULTURE

Tableau VII

ETAT ACTUEL (1973)

Valeur ajoutée nette 10 ⁶ Dh.	AMONT	AVAL	TOTAL	%
Orge en sec	2,9	7,4	10,3	7
Traditionnel	23,6	6,0	29,6	20
Moderne	9,6	61,4	71,0	48
Forêt	1,6	3,3	4,9	3,5
Elevage	14,4	17,3	31,7	21,5
TOTAL	52,1	95,4	147,5	100
%	36,2	63,8	100	
Nbre de m3 consommés	140	190	330	
Valeur ajoutée m3 consommé Dh.	0,36	0,47	0,45	
Valeur ajoutée Ha - Dh irrigué	1 874	3 500	2 680	
Valeur ajoutée/habitant Population rurale (1973)	620	507	542	

VALEUR AJOUTEE DE L'AGRICULTURE

Tableau VIII

ETAT FINAL (2004)

	Avec Betterave à sucre				Sans Betterave à sucre			
	Amont	Aval	Total	%	Amont	Aval	Total	%
Culture en sec	16,77	7,54	24,31	7,8	16,68	7,41	24,09	7,9
Traditionnel irrigué	32,89	9,61	42,50	13,7	29,69	8,24	37,93	12,5
Moderne	34,94	110,50	145,44	46,7	36,12	110,48	146,60	48,4
Forêt	1,39	3,31	4,70	1,5	1,39	3,31	4,70	1,6
Elevage	40,68	53,43	94,11	30,3	40,68	48,94	89,62	29,6
Total en 10 ⁶ Dh	126,67	184,39	311,06	100	124,56	178,38	302,94	100
%	40,7	59,3	100		41,1	58,9	100	
Nombre de m3 consommés 10 ⁶	210	280	490		210	280	490	
Valeur ajoutée/ m3 Dh	0,60	0,66	0,63		0,59	0,64	0,62	
Valeur ajoutée/ ha irrigué Dh	3.400	5.020	4.200		3.240	4.740	4.000	
Valeur ajoutée/ ruraux Dh	790	660	710		780	640	690	

Discussion

Président : M. C. GEMAEHLING

M. le Président remercie M. DANIEL de son exposé qui met en lumière la complexité du problème de l'utilisation des eaux du Souss sur les plans technique, économique et peut être politique. Il ouvre ensuite la discussion.

Quelle est la minéralisation des eaux de la nappe du Souss, demande M. SOURISSEAU (C.P.G.F., Rueil) ? Peut-on craindre au cours de la surexploitation de la nappe une évolution de la concentration ? et du biseau salé ?

Ce sont, en général, des eaux de très bonne qualité (résidu sec : 0,100 à 0,300 mmg par litre), répond M. DANIEL. Le Souss tire ses ressources en eaux du sommet de l'Atlas (altitude : 4 000 m) qui est enneigé et apporte une très bonne régularisation du régime.

Du fait que les périmètres irrigués assureront un retour à la nappe très important (on a prévu l'irrigation par aspersion dans les nouveaux périmètres), nous pensons que la surexploitation – qui ne porte que sur 10 % des ressources accumulées – ne devrait pas entraîner une salinisation très importante.

Cela peut être néanmoins le cas dans la partie aval de la plaine où il faudra éventuellement tenir compte aussi de l'intrusion de l'eau salée dans la région côtière. Mais là un autre problème économique se pose : le périmètre du Massa qui est en exploitation à côté du Souss attirera une grande partie des cultures maraîchères qui sont à l'aval ; de ce fait, on assistera certainement à un abandon des pompages dans la zone où l'eau risque de se saler.

Que feront les générations à venir lorsque les 3 milliards de m³ d'eau de la tranche supérieure de la nappe auront été épuisés ? demande M. SBIHI. Exploitera-t-on la tranche suivante du gisement ? Abandonnera-t-on le périmètre initialement irrigué ? Construera-t-on des barrages-réservoirs pour mieux utiliser les eaux superficielles ?

Il y a un point que j'ai omis de mentionner dans mon exposé, répond M. DANIEL. La baisse du niveau de la nappe a été prise en compte au droit des périmètres traditionnels qui dérivent leurs eaux du Souss, et qui verront progressivement se tarir leurs émergences d'eaux souterraines. Dans la mesure où ils se trouvent situés sur la gouttière centrale du Souss, il sera possible de remplacer les émergences par des pompages à faible profondeur. Les usagers établis sur la partie centrale du Souss seront toujours les mieux placés pour avoir de l'eau à bon marché. Cette politique de remplacement des eaux de source par des pompages a été prise en compte dans les calculs économiques et fait partie du projet.

D'autre part, nous avons prévu la réalisation de barrages-réservoirs. C'est ainsi que la réalisation du barrage d'Aoulouz a

été programmée à une certaine date, à déterminer en fonction de l'effet réel des pompages sur la nappe. Nous avons calculé une date optimale pour l'intervention de ce barrage de façon à maintenir le niveau des eaux souterraines à 25 m sous leur niveau actuel. Ce barrage peut intervenir plus tôt dans la mesure où l'on verrait, sous l'effet de l'exploitation réelle, que cette baisse de niveau a été plus rapide.

Il y a, dans la conception de la mise en valeur des eaux souterraines, un aspect inhabituel pour les ingénieurs voués à la gestion des stocks constitués dans les vallées derrière des barrages. En fait, la réserve d'une nappe n'est parfaitement connue que lorsqu'elle a été entièrement exploitée. Dans le cas des eaux souterraines, la notion de "programmation glissante" est particulièrement bien adaptée ; en mettant en place des systèmes de contrôle et de mesure, on peut se prémunir contre des baisses trop rapides du niveau piézométrique et faire intervenir des barrages-réservoirs alimentés par les eaux de surface à une date plus rapprochée qu'il n'était initialement prévu.

Les ressources provenant des barrages-réservoirs, envisagées actuellement, sont trop chères pour être mises en valeur ; mais, il se peut que dans 30 ans leur coût soit acceptable. On se reposera alors la question de savoir si l'on exploite une tranche du gisement d'eau souterraine supplémentaire ou si l'on fait intervenir des barrages-réservoirs ; la comparaison à faire alors sera de même nature que celle que nous avons faite en 1974.

M. DINIA (Direction de l'Hydraulique du Maroc, Rabat) apporte un complément d'information :

Depuis la fin des études exposées par M. DANIEL, dit-il, est survenu un fait nouveau. Il avait été estimé possible de prélever sur la nappe 20 millions de m³ par an pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Agadir.

A la suite de forages exécutés depuis dans la zone de la forêt d'Admine et dans celle d'Ammar Boudar il a été reconnu que l'on ne pouvait prélever sur la nappe que 10 millions de m³ par an pour l'adduction d'eau d'Agadir ; le complément de 10 millions de m³/an, nécessaire, sera pris sur le barrage-réservoir d'Issem, projeté initialement pour les seuls besoins de l'irrigation et dont le débit annuel régularisé est ramené de 85 à 75 millions de m³ environ.

Les appels d'offres pour la construction du barrage d'Issem ont été lancés ; les marchés pour la construction de l'ouvrage vont être signés ; le barrage sera terminé en 1979, date qui avait été choisie par l'étude faisant l'objet de l'exposé de M. DANIEL pour sa mise en service en vue de sauvegarder les 2000 hectares irrigués dans la région de Ouled Teima dont la nappe risquait, à ce moment, d'être surexploitée.