

Centre de Formation des Experts
de la Coopération Technique Internationale

M
DOCUMENTATION

Séminaire sur le problème des zones arides
et le développement économique

L'ECONOMIE de l'EAU
ET
LE PROBLEME DES EAUX SALEES
PAR
P. DUBREUIL

MAITRE DE RECHERCHES A L'ORSTOM

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 33 355
Cote : B

ORSTOM
HYDROLOGIE
DOCUMENTATION

70962

9^e Session
Janvier-Avril 1962

L'ECONOMIE de l'EAU dans les ZONES ARIDES

Il serait superflu d'insister sur l'importance de l'eau dans le développement économique des Zones Arides. Depuis le début de ce séminaire, l'eau ou l'absence d'eau constitue la toile de fond de tous les exposés qui nous ont été faits. Aucune production, aucune mise en valeur n'est possible si l'on ne dispose d'eau. Ces Zones Arides sembleraient donc vouées au néant et à la stagnation puisque, par définition, elles n'ont pas ou presque pas d'eau. Et pourtant, ne serait-ce que par l'érosion, la présence et l'action de l'eau y sont manifestes. Devant ce paradoxe apparent, il importe de pénétrer dans le détail le cycle de l'eau dans les Zones Arides pour savoir si nous pouvons malgré tout compter trouver de l'eau, si cette eau sera utilisable, comment et quelles en seront les utilisations ?

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il serait judicieux de rappeler ici une notion évoquée précédemment par M. HENRY, celle de l'équilibre du milieu naturel. Appliquée à l'eau, cette notion signifie que toute modification d'importance relative des constituants du cycle hydrologique risque presque toujours d'entraîner des conséquences funestes, c'est-à-dire d'accroître l'aridité. Un bon exemple de déséquilibre causé par l'homme est fourni par les travaux entrepris dans la cuvette de MEXICO. Au siècle précédent, le lac de TEXCOCO, réceptacle naturel des eaux de ruissellement des montagnes voisines, causait par ses débordements des inondations préjudiciables tant à l'agriculture qu'à l'habitat, puisque MEXICO est construit sur un îlot de ce lac. Des travaux de drainage par conduits souterrains évacuèrent hors du bassin fermé les eaux excédentaires; ces drains jouèrent trop bien leur rôle puisqu'ils captèrent les cours d'eau alimentant le lac et les conséquences ne se firent pas attendre : assèchement du lac d'où arrêt des infiltrations abaissant le niveau des nappes. La végétation arbustive privée d'eau se dessécha. Le sous-sol desséché s'enfonça, causant de graves lézardes aux constructions. L'évaporation du lac n'ayant plus lieu, l'humidité de l'air diminua. Les sédiments lacustres secs furent repris par le vent; il s'agissait de salpêtre, ce qui endommagea les cultures. Bref, l'aridité gagna la cuvette de MEXICO. Ce processus de désertification, par capture de bassins fermés ici artificiellement, est parfois observé naturellement par abaissement du niveau de base et surrections locales. Le processus inverse de désertification par remblayage des bassins fermés, empatement et désorganisation des réseaux hydrographiques est cité en Algérie.

Avant d'aborder l'étude rapide du cycle de l'eau en Zones Arides, gardons présents à l'esprit les risques que comportent les modifications que l'on peut apporter à l'équilibre naturel qu'il constitue.

1 - LE CYCLE HYDROLOGIQUE ET SES PARTICULARITES DANS LES ZONES ARIDES

Faisons un tour d'horizon rapide qui nous permettra de mettre en évidence les éléments positifs, sources d'apports, et les éléments négatifs, générateurs de pertes dans ce cycle de l'eau, ce qui nous conduira naturellement à la suite de cet exposé :

- 1) les ressources en eau des Zones Arides
- 2) leurs utilisations et les moyens de pallier les pertes.

Nous dirons, à cette occasion, un mot sur les moyens de recherche d'eau dans les Zones Arides.

11 - La pluie - C'est l'élément positif du bilan de l'eau, l'élément primaire, si l'on se place sous l'angle de l'homme utilisateur. Rappelons brièvement sa variabilité dans le temps et dans l'espace dans les Zones Arides : les régions ne recevant jamais de pluie sont très rares; il pleut généralement partout mais l'on peut rester plusieurs années sans recevoir d'eau en un point du Sahara par exemple. S'il pleut, c'est par orages de courte durée qui se produisent de préférence pendant une courte période de 2 à 3 mois qui correspond à la "saison des pluies" de la zone semi-aride au Sud du Sahara, mais à n'importe quel moment de l'année au Nord de ce désert. Les pluies tombent de préférence sur le relief (Hoggar, Aïr, Tibesti pour ne parler que des montagnes sahariennes).

Que devient cette pluie ? Si elle est trop faible en hauteur (quelques mm) et en intensité, elle est reprise en totalité par l'évaporation. Si l'averse est violente, son intensité dépassant celle de l'infiltration, il y aura ruissellement. Enfin, si la saturation sur le sol se prolonge quelque temps, une partie des eaux pourra s'infiltrer de façon définitive.

12 - Le ruissellement - Premier élément positif secondaire du bilan - son abondance découle du régime des pluies et du relief : il s'observe en montagne et constitue un fléau temporaire par sa violence et sa soudaineté. Les oueds (ou cours d'eau de Zones Arides) ont des caractéristiques bien établies : lits démesurés à sec; crues rares et violentes qui débordent bien souvent. Le ruissellement érode les montagnes dénudées; les oueds charrient de grosses quantités d'éléments solides.

A l'arrivée dans les plaines, la rupture de pente est fatale à la majorité des oueds; ils divaguent, leur vitesse diminue, ils déposent leurs matériaux, s'épandent. Cette conclusion endoréique est presque générale. L'eau est alors généralement reprise en quasi-totalité par l'évaporation, mais elle réussit parfois à s'infiltrer à des profondeurs suffisantes, quand les conditions de perméabilité de la zone d'épandage le permettent.

- 13 - L'infiltration est le second élément positif secondaire du bilan. Mais elle ne devient "positive" que si l'eau s'infiltré assez profondément pour échapper à la reprise quasi-immédiate par l'évaporation du sol humidifié après la pluie. Pour qu'il y ait infiltration profonde, il faut :
- a) que les terrains soient perméables
 - b) que la capacité normale de rétention des horizons superficiels du sol asséché soit rétablie, ce qui n'est que rarement possible sous le simple effet de la pluie et demande une concentration préalable par le ruissellement.
- 14 - L'évaporation - qui constitue l'élément négatif essentiel du bilan et agit, comme nous l'avons vu, à tous les stades du cycle hydrologique sur l'eau libre et sur le sol.

Il faut lui adjoindre un élément important qui est la transpiration des végétaux. Ces deux éléments rassemblés constituent l'évapotranspiration, cause principale des pertes d'eau en Zones Arides puisque des études sur lysimètres en Algérie ont montré que seulement 2 % des pluies atteignaient 1,20 m de profondeur, profondeur à laquelle ces eaux échappaient pratiquement à la reprise, et qu'en outre l'évapotranspiration potentielle reste quasi-continuellement supérieure aux apports pluviaux.

Nous avons donc deux sources définitives d'eau en Zones Arides : les eaux superficielles du ruissellement et les eaux souterraines provenant de l'infiltration. Nous allons brièvement esquisser leurs moyens d'analyse et en faire l'inventaire.

2 - INVENTAIRE DES RESSOURCES SUPERFICIELLES

21 - Moyens d'études

- Les réseaux hydrométriques de base (degré d'avancement d'Israël avec 4,5 stations/1 000 km² contre 0,1 et moins ailleurs).
- Les réseaux pluviométriques aussi dispersés et dont les rares appareils occupent des points singuliers (oasis, cuvette encaissée dans les montagnes ...)
- Les enquêtes spéciales sur le terrain que l'ORSTOM a développées tout particulièrement au Sud du Sahara en étudiant les ruissellements dans les massifs montagneux de MAURITANIE (AFFOLE), du NIGER (AIR) et du TCHAD (ENNEDI).

Ces enquêtes s'effectuent pendant les 2 mois de pluies sous forme d'expédition d'un ingénieur qui observe le plus d'oueds possible et d'un technicien qui, sur un bassin versant, rassemble les données d'analyse du bilan hydrologique.

- Les études d'avant-projets d'aménagements hydrauliques
- Les travaux universitaires et de laboratoires.

22 - Les cours d'eau dans les Zones Arides

- a) Les oueds ou cours d'eau originaires des Zones Arides déjà mentionnés, sur lesquels il est difficile de compter pour apporter de l'eau mais dont les crues soudaines constituent une ressource bien que difficilement exploitable, à laquelle s'ajoutent les réserves accumulées dans les lits.

A titre d'exemple, citons le versant Ouest du massif de l'AIR (Niger) qui, sur 30 000 km², voit ruisseler de 30 à 200 millions de m³ suivant l'abondance pluviométrique annuelle. Ce volume est faible et constitué à 90 % par les apports de 3 ou 4 crues de 24 heures.

- b) Les fleuves exogènes dont la nature a généreusement doté les Zones Arides et qui en sont presque l'unique richesse actuelle : Indus, Syr-Daria, Tigre et Euphrate, Nil, Colorado, Niger ... Les quantités d'eau écoulées sont sans commune mesure avec celle des oueds ; en année moyenne le NIL charrie 180 milliards de m³, le NIGER 45

3 - INVENTAIRE DES RESSOURCES SOUTERRAINES

31 - Moyens d'études

L'inventaire de ces ressources ne peut se faire avec exactitude qu'en envisageant l'étude hydrologique des grands ensembles géographiques de bassins régionaux au sein desquels les nappes constituent une certaine unité. Plus spécialement, on fera appel à la géologie et aux disciplines annexes pour préciser les ressources des nappes. Citons simplement les phases successives de la résolution du problème :

- cartographie, nivellement, catalogue des points d'eau existants,
- étude de niveaux hydrostatiques dans les puits pour évaluer le volume disponible,
- exécution de pompages-tests pour déterminer les caractéristiques du terrain aquifère et préciser les modalités d'écoulement des nappes, leurs capacités, leurs débits ...,
- appoint des méthodes de sondage électrique de la géophysique pour préciser les structures aquifères complexes,
- recherche des modalités d'alimentation et tentatives de bilan.

32 - Formation des nappes en Zones Arides

- a) Rôle presque négligeable de la condensation
- b) Seules les pluies d'hiver peuvent parfois provoquer une infiltration directe quand les conditions de terrain le permettent car l'évaporation est alors réduite
- c) Essentiellement par concentration des eaux de ruissellement dans les mares d'épandage des systèmes endoréïques ou par leur passage dans des zones perméables.

Les conditions sont rigoureuses. Heureusement comme pour les fleuves, les nappes exogènes sont la grande richesse des zones arides.

33 - Les systèmes aquifères connus

En Algérie, les grandes nappes dites de l'Albien et du Continental intercalaire sont exogènes et ont leur aire d'alimentation sur les montagnes semi-arides arrosées de l'Atlas. La disposition géographique conduit à des systèmes généralement captifs sinon artésiens.

Pour les Zones Arides, on arrive à des chiffres plus modestes évidemment, car les besoins collectifs sont bien inférieurs. On table sur 10 l/j par habitant, 5 l par tête de bétail et entre 1 et 3 l/s./ha pour l'irrigation.

42 - Le rendement

Un élément important de la consommation est celui de la part d'eau prélevée et non restituée, ce qui s'appelle le rendement physique ou rapport entre le minimum théoriquement nécessaire et la quantité effectivement prélevée.

On constate que si, dans les pays développés, ce rendement est bon et même supérieur à 1 quand on fait la somme de plusieurs utilisateurs (intervention du phénomène d'utilisation multiple de l'eau, de récupération des eaux usées représenté par le taux de recyclage), il n'en est pas de même dans les zones sous-développées et où, si elles sont arides, le problème des pertes devient dramatique.

Citons quelques exemples de pertes inadmissibles pour des Zones Arides :

- a) la consommation des irrigations du secteur irakien du bassin du TIGRE et de l'EUPHRATE dépasse 5 et 6 fois les besoins réels
- b) BAGDAD tire 34 millions de m³ chaque jour du TIGRE pour son alimentation en eau, et, faute d'égouts, rien n'est récupéré
- c) KARACHI fait de même au détriment de l'INDUS (95 millions de m³/jour).

De tels gaspillages sont monnaie courante au Proche-Orient. Il importe d'y pallier techniquement car les ressources ne sont pas illimitées et les dangers dus à ce déséquilibre s'accumulent comme nous le verrons plus loin.

Cette notion d'économie de l'eau, d'utilisation rationnelle et maximale des ressources de la Zone Aride doit prévaloir dans l'établissement de tous les aménagements hydrauliques que nous allons examiner maintenant.

5 - LES PROBLEMES DE L'UTILISATION DES EAUX SUPERFICIELLES

L'irrégularité extraordinaire des oueds, et même celle atténuée des cours d'eau exogènes, n'est pas faite pour faciliter l'emploi de leurs eaux. Quelle que soit la destination de celles-ci (eau d'alimentation des hommes, du bétail ou eau d'irrigation), il importe de stabiliser les régimes hydrologiques. Pour ce faire, la meilleure méthode est celle du barrage-réservoir.

51 - La régularisation par barrage réservoir

Ce n'est pas une panacée, car il y a des conditions et des obstacles souvent insurmontables :

- existence d'un site géologique correct dominant un périmètre irrigable ou à proximité d'une ville
- estimation des crues pour le dimensionnement du déversoir
- risques de sédimentation massive par les matériaux transportés qui peuvent réduire en quelques années la capacité du réservoir.

Jamais la stabilisation totale des cours d'eau n'est possible car l'augmentation de la capacité des réservoirs se heurte à celle de l'évaporation qui devient prohibitive.

Echappent à cette restriction quelques rares sites particulièrement encaissés et profonds (gueltas).

Facteur limitatif de l'utilisation des retenues, l'évaporation est un mal nécessaire que l'on essaie de diminuer. Citons les expériences américaines du Lac HEFNER (1956-58) qui ont montré :

- a) qu'il faut employer un film monomoléculaire comprimé par les rives du lac, ou à l'aide du vent et par renouvellement continu du produit retardateur.
- b) que le meilleur retardateur est l'hexadécanol non toxique et épandu en solution dans l'alcool éthylique.
- c) que l'emploi de ce film d'hexadécanol a réduit sur 1 000 ha en 3 mois d'expériences l'évaporation de 9 %, mais que les vents supérieurs à 30 km/h en rendent l'emploi sans intérêt et que la température élevée en diminue l'efficacité.
- d) enfin qu'il n'est conseillé d'appliquer le procédé qu'aux petits réservoirs-abreuvoirs de quelque 100 ha au maximum sur lesquels le gain serait de 20 à 50 %, donc appréciable (hypothèse optimiste).

Les réservoirs sur les cours d'eau servent surtout à l'irrigation intensive des terres du périmètre dominé. Citons quelques exemples particulièrement représentatifs :

L'Algérie possède déjà des grands ensembles remarquables, totalisant 60 000 ha :

plaine de la MARNIA	grâce à la retenue de BENI-BAHDEL
plaine de RELIZANE-PERREGAUX	" de l'Oued FODDA
plaine de M'SILA	" de KSOB

La présence française au Maroc et en Tunisie y a permis l'édification d'ensembles comparables dont nous citerons les plus importants :

Pour le Maroc	(Le TADLA grâce à la retenue de BIN el OUIDANE	(150 000 ha)
		SIDI SLIMANE	" EL KANSERA
			(30 000 ha)

Pour la Tunisie, les 30 000 ha arrosés par l'Oued MELLEGUE.

On ne peut clore ce paragraphe sans parler de l'irrigation de la vallée du NIL où se pratiquait jusqu'ici l'irrigation pérenne grâce aux régularisations annuelles de la crue, système qui a fait suite dans l'Égypte moderne à celui de la submersion en bassins de 70 à 100 ha (contrôlée par des écluses régularisatrices) et dans lesquels le NIL venait déposer son limon. La submersion durait 40 à 60 jours et les fellahs pouvaient faire après le retrait des eaux une seule culture annuelle du type de décrue. On palliait la sécheresse estivale en remontant l'eau de la vallée par les antiques procédés des shadoufs ou des sakias.

Maintenant, la surface cultivée n'est plus soumise aux aléas des crues et l'irrigation permet plusieurs cultures annuelles.

Ouvrages régularisateurs existants	ASWAN	construit en 1902 surélevé en 1912 et 1934 contenant 5 Mds de m ³
	SENNAR sur le NIL BLEU	(1925 (800 M de m ³
	DJEBEL AULIA (KHARTOUM)	(1937 (3 M de m ³

Ces ouvrages ne suffisent plus; l'accroissement de la population égyptienne demande une extension des surfaces irriguées et une sécurité plus grande des apports d'eau d'où les grands projets de régularisation interannuels reposant sur les ouvrages suivants :

Lac VICTORIA	2 000 Mds de m ³
Lac KIOGA	
Lac ALBERT	
Lac TANA (ETHIOPIE)	
GRAND ASWAN	(8 Mds de m ³)

A côté de ce rôle primordial, ces projets permettront la protection contre les inondations des grands lacs et la production d'énergie électrique. Leur financement et les accords internationaux risquent d'en retarder encors longtemps l'exécution.

52 - L'épandage des crues des oueds non régularisables constitue un moyen non négligeable d'apporter une amélioration à certaines contrées pauvres. On a pu ainsi développer une culture des céréales qui vient en appoint de l'élevage sur les Hauts Plateaux de l'Algérie.

53 - Les lacs collinaires

Quand on ne dispose ni de riches fleuves exogènes ni d'oueds à crues brutales, on peut essayer de capter le ruissellement in situ, sur les pentes du relief avant sa disparition.

Ainsi se développa le processus des lacs collinaires venu d'Italie qui progresse en Algérie, mais qui ne peut s'employer qu'en zone semi-aride assez arrosée et dont le grand avantage est de lutter contre l'érosion.

Si l'eau de ruissellement est récupérée en bas des pentes, c'est le vieux système des mares de l'Afrique noire, des hafirs du SOUDAN, excavations tantôt naturelles fermées par une digue, tantôt artificielles creusées dans un sol imperméable.

L'excès de ce type de retenue dans certaines régions conduit à appauvrir l'aval en eau, à activer la dégradation du réseau hydrographique mal alimenté, et donc à désertifier.

54 - Comment accroître les ressources en eau de surface ?

En luttant contre l'évaporation sur les retenues à l'aide de film protecteur, nous l'avons vu. On peut aussi s'opposer au gaspillage de la végétation phréatophyte (aulne, saule, peuplier, tamaris, prosopis ...) dont seule la luzerne est utile. La destruction mécanique des arbres phréatophytes le long des cours d'eau et des mares et leur remplacement par un couvert herbacé sont recommandés.

Les graminées ont en outre l'avantage de freiner l'érosion et de favoriser l'infiltration par rapport au sol en améliorant sa structure.

Certains auteurs vont même jusqu'à recommander, pour accroître le ruissellement sur certaines pentes semi-arides couvertes de broussailles steppiques, de détruire cette végétation.

Notons que l'action de la végétation est complexe puisque d'un côté son évapotranspiration perd de l'eau immédiate mais assure le renouvellement en humidité des masses d'air, donc sera en quelque sorte une source de pluie différée. Par ailleurs, la végétation forestière protège le sol de l'érosion, favorise l'infiltration et condense les brumes et brouillards.

Il y a, dans ces divers procédés d'action sur le cycle hydrologique par le biais de la végétation, un rôle d'apprenti-sorcier difficile à juger.

55 - Un aperçu sur le prix de revient d'un aménagement pour l'irrigation

A partir d'un ouvrage régularisateur de crue, les grands ensembles irrigués constituent l'aménagement-type. Le prix de revient pour amener l'eau en tête de la parcelle d'irrigation est variable, mais de l'ordre de plusieurs milliers de nouveaux francs. Le chiffre de 5 000 NF/ha est admis pour les grands aménagements.

On peut faire beaucoup moins cher dans le domaine de la petite hydraulique. En HAUTE-VOLTA, par exemple, le Service du Génie Rural a entrepris un programme systématique de construction de petits barrages en terre qui, sur des bassins de 20 à 2 000 km², permettent d'accumuler 1 à 10 Millions de m³ et d'irriguer en aval dans la vallée 100 à 500 ha. Le coût moyen de cet aménagement modeste est de 20 à 25 Millions de francs CFA, soit environ 500 NF/ha.

C'est dans cette fourchette de 500 à 5 000 NF que s'inscrivent la plupart des aménagements suivant leur importance et leur degré de technicité.

6 - LES PROBLEMES D'UTILISATION DES EAUX SOUTERRAINES

61 - Les nappes alluviales de rivières

Ces problèmes sont généralement étroitement liés à ceux des eaux superficielles, tant en ce qui concerne les études et les recherches que les utilisations. En effet, la première source d'eau souterraine nous la trouvons dans le lit des rivières constituant

- l'écoulement d'infero-flux
- la nappe alluviale

Ces écoulements ne sont pas négligeables et sont connus depuis l'antiquité puisque les systèmes de foggaras du Hoggar ne sont pas autre chose que des drains extrayant l'eau des alluvions de lits de torrents et par une pente moindre l'amenant sur des périmètres d'irrigation dans les oasis.

L'avantage du système est la disparition quasi-totale de l'hypothèque évaporation.

La technique moderne s'est efforcée de capter ces eaux en réalisant des barrages souterrains qui sont peu coûteux, sans risque de destruction, mais difficiles à projeter et qui nécessitent une énergie pour extraire l'eau.

Un bon exemple est celui de la vallée du M'ZI à TADJEMONT près de LAGHOUAT où l'on dispose de 500 l/s. Ce procédé est couramment employé dans les oueds sableux de l'ARIZONA où les retenues souterraines s'appellent des "tapoons". En Sud-Ouest Africain, on va plus loin en construisant des barrages qui, une fois remplis par le sable apporté par les crues, constitueront des retenues "souterraines".

Disons cependant que les lits de cours d'eau se prêtent rarement à ce type de captage.

Les fleuves exogènes coulent souvent dans de grandes vallées alluvionnaires qu'ils ont peu à peu modelées au cours de leur histoire. On y trouve d'excellentes nappes alluviales alimentées par le fleuve en crue et qui lui fournissent un appoint en étiage non négligeable.

Il faut citer celle du NIL dont on extrait environ 1 800 M. de m³ par an par pompage pour l'irrigation. Un projet pour limiter les pertes à la mer de cette nappe consiste à fermer son exutoire par un barrage.

Terminons en indiquant que l'équilibre nappe alluviale-fleuve est très précaire et que le pompage excessif dans une telle nappe conduit toujours à la diminution de l'écoulement du fleuve qu'il soit alimenté ou alimentaire.

62 - Les sources et les puits

Les sources constituent le retour à la surface d'eaux souterraines. Leur emploi est intéressant puisque l'on n'a pas à rechercher la nappe mais il est assujéti généralement à l'interaction de son captage sur les puits éventuels dans la même nappe.

En plaine, on conseille d'extraire l'eau par pompages à partir de puits ou forages; c'est d'ailleurs le mode le plus répandu car les affleurements sont rares et souvent salés en Zones Arides. On admet généralement que lorsque des sources existent, leur captage prioritaire sur l'extraction par pompage n'est recommandé que dans les régions d'altitude et près des zones d'alimentation de la nappe.

Le problème principal pour utiliser les eaux d'une certaine nappe est de pouvoir déterminer le débit assuré, c'est-à-dire celui qui n'épuise pas la nappe et qui correspond à une valeur approchée par défaut le plus près possible du débit d'alimentation. Sa détermination précise est généralement impossible car l'évaluation du volume infiltré à l'origine de la nappe est sujet à erreur : les tests de pompages et l'observation des niveaux hydrostatiques de nombreuses années après la mise en exploitation permettent une approche correcte.

Un excellent exemple d'une utilisation rationnelle de nappe est fourni par celle de BREDEAH qui sert à l'irrigation des cultures maraichères de la ceinture verte oranaise et alimente en eau la ville d'ORAN. L'étude expérimentale d'un petit bassin versant voisin avait permis de préciser les composantes du bilan hydrologique; on les appliqua à la nappe de calcaire karstique de BREDEAH, pour 175 km² de bassin alimenté à 13 % par 500 mm de pluie annuelle, et on calcule a priori 11 400 000 m³ de volume d'apports annuels.

Les pertes par la source de BREDEAH atteignaient 2,4 M m³/an (75 l/s). Les 9 millions de m³ restant devaient s'évaporer à la surface d'une sebkha voisine. La mise en exploitation confirma ces espoirs puisqu'aujourd'hui on tire 11 milliards de m³ de cette nappe sans en détruire l'équilibre.

Mais la connaissance des possibilités des nappes n'est pas toujours aussi facile, étant donné leur complexité. Il est certain qu'à première vue, si une nappe possède des affleurements non captables parce que saumâtres (sources ou chotts dont nous reparlerons) l'augmentation du pompage diminuera ces pertes par évaporation, donc enrichira la dite nappe. A quoi certains auteurs rétorquent que la baisse de l'évapotranspiration diminue les ressources en eau des nuages, donc des futures pluies.

A l'occasion de l'inventaire des ressources souterraines, nous avons donné les débits généralement extraits des nappes suivant la composition géologique du terrain aquifère.

Nous ne reviendrons pas ici sur les grands systèmes de nappes captives ou artésiennes des Zones Arides dont celle de l'Albien saharien est le brillant représentant.

Mentionnons seulement que leur exploitation systématique ne fait que commencer et que si l'une des différences essentielles entre ces nappes et les ressources superficielles est la faiblesse de leurs débits, elles peuvent cependant apporter leur contribution à la mise en valeur des Zones Arides.

Et cela même dans le domaine de l'irrigation intensive qui semble l'apanage des eaux de surface. En effet, avec 100 l/s dans le Sud Algérien, on donne la vie à une oasis en y permettant 120 ha de palmeraie (14 000 palmiers, 7 000 quintaux de dattes et 500 000 NF de revenu annuel), auxquels s'ajoutent les cultures maraîchères non négligeables qui fructifieront à l'ombre des arbres.

Les nappes souterraines restent cependant la ressource de choix pour l'alimentation en eau potable des centres d'habitat et du bétail. L'éolienne, emblème du groupe de pompage du désert, fleurit de plus en plus; et sachant qu'un mouton ne consomme pas plus de 3 l/jour, on voit les riches possibilités de ce système d'abreuvoir dont les unités judicieusement réparties sur les parcours de transhumance et près des pâturages assurent la sécurité des éleveurs.

Le prix de revient d'une installation standard d'hydraulique pastorale en Algérie est de 100 000 NF comprenant le puits, l'éolienne et le groupe de pompage; un réservoir de 50 à 100 m³ et un abreuvoir à niveau constant. Un tel ensemble couvre 10 000 ha de pâturage.

Remarquons qu'avec sensiblement la même infrastructure on peut alimenter la palmeraie citée précédemment dont l'hectare irrigué reviendrait à 1 000 NF environ, chiffre comparable à ceux des aménagements par eau superficielle.

63 - Recharge des nappes

Les faibles débits que l'on extrait des nappes souterraines, ne peut-on les accroître artificiellement ?

Plusieurs procédés ont été utilisés avec succès :

- L'épandage des eaux de crue, en plus de son action bénéfique sur les cultures, permet en maintenant une charge d'eau sur un sol perméable une infiltration substantielle. Il est fortement conseillé de faire décanter les eaux boueuses des oueds avant de les diriger sur le périmètre de recharge afin d'éviter le colmatage de ce dernier. La filtration sur sables s'emploie parfois; ailleurs, on acidifie ces eaux pour accroître l'infiltration.

On choisit comme périmètre soit une prairie, soit un cône de déjection doté d'éléments grossiers - souvent un petit barrage est nécessaire pour ralentir le ruissellement et favoriser cette infiltration - . On recommande d'ailleurs de placer puits et forages près de ces périmètres de recharge quand il s'agit de nappes phréatiques d'extension restreinte.

- Un autre procédé de recharge plus délicat consiste à faire pénétrer l'eau dans l'aquifère à l'aide de puits verticaux qui traversent par exemple les couches imperméables sus-jacentes. L'emploi d'une eau très pure est nécessaire.

Concluons ce tour d'horizon en attirant l'attention sur le fait que l'une des plus grandes difficultés rencontrées dans l'emploi des eaux souterraines est la présence de sel car elle est bien souvent prohibitrice.

Ceci nous amène tout naturellement à la 2ème partie de cet exposé.

LE PROBLEME DES EAUX SALEES

Nous avons vu que l'utilisation des ressources en eau des Zones Arides entraîne rapidement un déséquilibre hydrologique, lequel se manifestera en dehors du tarissement par une salure des eaux ou des terrains. On ne peut pas, semble-t-il pour les Zones Arides, empêcher ce déséquilibre et cette salure. Pourquoi ?

1 - QUELLES SONT LES CAUSES DE LA FORMATION DES EAUX SALEES ?

Énumérons-les rapidement :

- L'aridité du climat qui donne lieu à un déficit continu chronique de l'évapotranspiration potentielle, laquelle intervient au 1er chef dans le mécanisme de la concentration des sels.
- L'irrégularité des régimes hydrologiques à écoulements discontinus et avec des étiages très faibles dont les eaux sont relativement salées.
- L'endoréisme structurel ou conditionné par l'aridité conduit les eaux des oueds à s'évaporer dans des bas-fonds où apparaîtront des dépôts de sels.
- La mer, par les marais dans les estuaires et par le sel emporté par le vent, joue un rôle non négligeable.
- La prédominance de couches géologiques déjà salifères comme celles du Trias.
- L'action de l'homme enfin :
 - a) par ses irrigations incontrôlées qui désorganisent l'équilibre des nappes phréatiques,
 - b) par ses épandages de crue qui s'évaporeront,
 - c) par le surpompage des nappes proches de la mer.

2 - PAR QUELS PROCESSUS SE CONCENTRENT LES SELS ?

21 - Par évaporation

Et ce, à divers stades de l'évolution des eaux souterraines.

Tout d'abord, au moment même de l'infiltration quand la majeure partie des eaux est reprise par l'évaporation, celles qui s'infiltrèrent se sont déjà concentrées en sels dissous. L'évaporation d'une nappe d'épandage s'achève bien souvent par la formation de croûtes salines.

Une nappe souterraine dont le cheminement des eaux se rapproche de la surface est soumise à l'évaporation. Le facteur décisif est la température. On a pu caractériser pour celle-ci des zones neutres journalières et annuelles en dessous desquelles l'action de la température de l'air n'intervenait plus. Ces zones se situent entre 0,90 m (calcaires) et 2 m (granites) pour la journalière et entre 18 m (alluvions) et 39 m (granites) en ce qui concerne l'annuelle.

On considère que la concentration par évaporation atteint les nappes de (sols non capillaires jusqu'à 2 m

(calcaires	"	10 ou 12 m
(sables	"	15 à 18 m
(alluvions	"	20 à 22 m

De nombreuses nappes des Zones Arides, surtout les nappes complexes captées ou artésiennes, ont un exutoire fermé où leur eaux remontent par ascendance, s'évaporent et déposent leurs sels. Ces exutoires forment des dépôts salés plus ou moins importants. Les plus grandioses sont les Chott Algériens. Il y a là, dans ces machines évaporatoires monstrueuses, l'une des plus grandes sources de pertes d'eau en Zones Arides. Citons l'exemple bien étudié du Chott Chergui (Saïda, Sud-Oranais). Son bassin alimentaire couvre 40 000 km² et reçoit 250 mm de pluie annuelle, soit 10 Milliards de m³. En admettant un coefficient d'infiltration pessimiste de 5 %, on trouve 500 millions de m³ d'apports à la nappe; or, il n'existe que 30 millions de m³ de résurgences. Le solde ressort par le Chott dont la surface de 2 000 km² reste humide toute l'année et évapore ainsi quelque 200 mm de lame d'eau.

22 - Par dissolution

Le contact des eaux infiltrées avec les différents sols et terrains géologiques traversés se traduit par des modifications chimiques réciproques très complexes dont nous donnerons un bref

aperçu. La présence de CO₂ dans l'eau de pluie ou dans les horizons superficiels du sol déclenchent le processus d'attaque des terrains. Cette dissolution est favorisée par la température et par la lenteur de l'écoulement souterrain.

D'amont en aval, des échanges chimiques modifient la composition des eaux : les sulfates cèdent la place aux chlorures, le calcium au sodium ...

Le premier élément qui atteint la sursaturation et précipite est le carbonate de chaux, ce qui donne les tufs calcaires des Zones semi-Arides. Avec l'aridité croissante, le processus s'intensifie et on voit apparaître les croûtes gypseuses (SO₄Ca) puis salines (ClNa).

Plus une nappe est loin de son secteur d'alimentation, plus elle est salée; la sursaturation étant la caractéristique de la résurgence terminale d'évaporation (Chott).

3 - COMMENT UTILISER LES EAUX ET LES TERRAINS SALES ?

31 - Eaux superficielles

Elles peuvent jouer un rôle néfaste, nous l'avons vu, et surtout quand l'irrigation incontrôlée ou des canaux d'aménageurs de fuites entraînent une remontée excessive de la nappe phréatique. La zone d'oscillation de la nappe, qui est celle où se déposent les sels se rapproche de la surface et peut produire une destruction totale des cultures.

Un seul remède : le lessivage des terrains afin d'entraîner ces sels, lessivage évidemment associé à un drainage intense qui, pour bien faire, devrait toujours précéder l'irrigation dans les aménagements hydro-agricoles des Zones Arides. Le contrôle rigoureux de la nappe demande le rabais de son plan supérieur en dessous de 1,50 m et même de 3 m suivant les sols et la teneur en sels.

Quand le drainage souterrain n'est pas possible, on recommande d'essayer d'extraire l'excès d'eau en plantant des plantes phréatophytes le long des canaux.

La qualité des eaux d'irrigation a fait aussi l'objet de nombreuses études et des seuils critiques de salinité ont été proposés par certains auteurs au-dessus desquels la culture est impossible : quantité de sels totaux, pourcentage de Na par rapport aux autres cations : teneur en bore etc...

Il est bien certain que la composition du sol intervient et que le complexe climat-sol-eau présente tellement d'aspects différents qu'il n'y a pas de solution globale et que les spécialistes en discutent encore.

La mise en valeur de sols salés fait appel à diverses techniques variables selon la cation excédentaire et la structure de ces sols. En plus du drainage et du lessivage précités, on peut déplacer le sodium échangeable par le calcium (engrais soluble ou en acidifiant le sol s'il est calcaire). Le lessivage exige, quand des sols sont très salés, des quantités énormes d'eau (1 m à 1,50 m par an) pour être rendus cultivables. L'adjonction de gypse aux eaux d'irrigation agit efficacement sur le taux du sodium.

Quand l'horizon salé n'est pas en surface, on peut employer des charrues spéciales labourant à certaines profondeurs.

L'adjonction de sable, d'humus est bonne ; celle d'engrais déconseillée.

Enfin, le procédé déjà connu de l'épandage des eaux de crue peut être, outre ses qualités d'irrigation, de recharge de nappe, un excellent moyen de dessalage des sols salés.

On peut aussi agir sur le végétal cultivé en renforçant la vigueur des graines par bain salé avant les semences, ou en employant des plantes tolérantes (coton, palmier-dattier).

Remarquons que l'importance de la culture du riz sur les sols salés n'est pas due à sa tolérance au sel, mais au fait que fructifiant sous l'inondation, cette culture supporte le traitement par lessivage.

32 - Eaux souterraines

Ces conditions de concentration des sels dans les nappes montrent clairement les zones préférentielles d'extraction : celles d'alimentation où la concentration est encore faible, et en profondeur loin de l'action de l'évaporation, pour une nappe dont le cheminement n'est pas trop superficiel. En fait, plus on s'éloigne des zones d'impluvium, plus les risques croissent.

En règle générale, les calcaires, grès, sables et alluvions grossiers à forte perméabilité et écoulement rapide donnent les eaux les moins salées, ce qui n'est pas le cas des argiles, marnes, schistes et autres roches éruptives.

Généralement l'eau douce ($d = 1$) repose sur l'eau salée ($d = 1,026$), ce qui est le cas classique des nappes phréatiques des bords de mer. Le phénomène Ghyben - Herzberg montre que des eaux douces sur une hauteur h repoussent sur une hauteur $H = 40 h$ les eaux salées, mais que l'équilibre entre la colonne $H + h$ d'eau douce et la colonne H d'eau salée est rompu par pompage intensif et que l'eau salée s'immisce dans la nappe d'eau douce selon un cône inversé. Si un excès a été commis, il est souvent irréparable, aussi faut-il suivre les niveaux hydrostatiques avec précaution et recharger la nappe en eau douce si la topographie s'y prête en injectant près de la frontière salée un mur protecteur d'eau douce.

L'eau douce ne recouvre pas toujours l'eau salée; par exemple, la superposition inverse peut s'observer avec des nappes captives, si le cheminement souterrain depuis la zone d'impluvium est assez complexe : la nappe douce de l'albien est en-dessous d'eaux plus superficielles et salées.

4 - LA DEMINERALISATION DES EAUX SALEES

Etant donné son coût actuel, elle ne peut être envisagée que pour l'alimentation urbaine. Je ne m'étendrai pas sur les procédés employés ou en cours d'expérimentation qui sont :

- a) soit thermiques et mécaniques, lesquels consomment une énergie indépendante de la salinité de l'eau, donc sont les plus favorables pour traiter l'eau de mer.

On range dans ce groupe :

- les distillations à effets multiples
- " à vaporisation instantanée à étages
- " solaires
- " par compression de vapeur
- la séparation par congélation

- b) soit électriques et chimiques, sensibles à la salinité de l'eau et par conséquent recommandés pour les eaux saumâtres

Citons ici : l'électrolyse
 l'électrodialyse
 l'échange d'ions

Dans le monde en 1960, les installations en service totalisaient une capacité de traitement d'environ $55\ 000\ m^3/jour$; les usines classiques produisent de 75 à $1\ 000\ m^3/jour$. La plus grosse unité installée à KOWEIT en 1959 traite $4\ 500\ m^3/jour$; deux unités comparables sont en projet en Californie et au Texas. Elles utilisent le procédé par distillation à vaporisation instantanée.

Le coût de production est difficile à évaluer pour des usines neuves. On parle de 250 francs le m³. On espère que l'amélioration des techniques permettra de descendre à 50 Fr pour l'eau de ville et 16 Fr pour l'eau d'irrigation qui sont aux U.S.A. les prix maximaux actuellement payés.

Les essais réalisés en Algérie concluent à l'emploi des méthodes par distillation solaire ou résines échangeuses d'ions pour les petits groupements humains, l'électrodialyse étant apparue la plus intéressante formule de dessalement de forts volumes d'eaux saumâtres.

- CONCLUSION -

Il y a donc de l'eau dans les Zones Arides grâce aux faibles pluies et surtout aux apports exogènes superficiels et souterrains. Mais ces eaux sont en faible quantité en regard des besoins, et nous avons déjà fait allusion à certains gaspillages inadmissibles.

C'est sur ce point que nous viendrons conclure en insistant sur le fait qu'à côté des correctifs techniques presque toujours possibles, le grand obstacle est humain. Une lourde tradition du passé fige la législation de l'eau des pays arides (oasis sahariens, propriété de l'eau distincte de celle du sol).

Écoutons Capot-Rey : "il n'y a pas de mise en valeur du désert sans une réforme qui prolonge dans les institutions et qui traduise dans les niveaux de vie la révolution que nous y avons opérée dans le domaine des transports".

Il est certes plus facile de construire un grand réservoir ou une conduite d'adduction longue de 150 km que de convaincre 50 000 agriculteurs très attachés à leurs habitudes de réduire leur consommation inutile de 20 % et pour un Gouvernement de modifier les droits sur l'eau.

Extrayons le mot de la fin du rapport de Gilbert White au colloque de Paris (avril 1960) "Les ressources en eau sont limitées, mais cette limitation ne constitue pas en elle-même un obstacle au progrès dans les Zones Arides. L'obstacle véritable réside bien plutôt dans le cadre rigide de la coutume, des croyances religieuses et du mode d'organisation de la région intéressée".