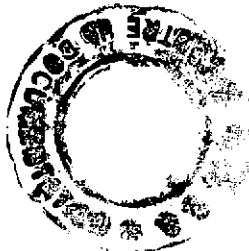


HAUT COMMISSARIAT de la REPUBLIQUE
EN
AFRIQUE OCCIDENTALE FRANCAISE

DIRECTION GENERALE des TRAVAUX PUBLICS

SERVICE de l'HYDRAULIQUE

NOTE SUR
LA CREATION OU L'ENRICHISSEMENT
DE NAPPES PHREATIQUES EN ZONES
SEMI-ARIDES OU EQUATORIALES.



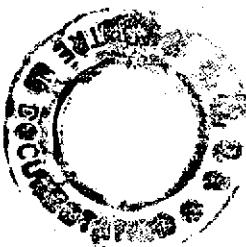
H. DUQUENNOIS
Ingénieur Conseil

ALGER, JUILLET 1957

I. - INTRODUCTION.

I.- 1)

Dans le Rapport Général qui résume les faits principaux constatés lors de notre mission A.O.F. (mission SOGREAH 1955-56) nous avons souligné l'importance de l'évapotranspiration et conclu qu'il suffirait, en bien des cas où aucune solution économiquement ou techniquement acceptable n'a pu être trouvée, de limiter l'évapotranspiration pour que des volumes importants d'eau deviennent facilement réalisables. Mais, lorsqu'on veut agir, des obstacles sont dressés et étayés par des affirmations telles que :



- " la forêt fait pleuvoir, Détruire la forêt c'est créer un désert".
- " La forêt alimente les sources".
- " En développant le reboisement, on augmente les ressources en eau".

Ces affirmations sont énoncées dans tous les pays du monde, sous toutes les latitudes. Elles sont peut-être partiellement exactes en certains cas très particuliers, de même qu'elles peuvent être totalement erronées dans d'autres cas.

Il est d'ailleurs remarquable de constater que ce sont les défenseurs les plus acharnés de la "forêt, pourvoyeur de sources" qui proposent de planter des arbres pour assainir un marais, drainer un talus de glissement, etc...

I.- 2)

Ce n'est pas pour soulever des polémiques que nous revenons sur le sujet. Il s'agit, en fait, d'accomplir un devoir, pour les raisons suivantes :

a) Venu en A.O.F. pour y projeter des barrages, en zones arides principalement nous avons conclu que de tels ouvrages étaient souvent inefficaces quand ils n'étaient pas dangereux pour l'économie hydraulique régionale. Force était de rechercher des solutions de remplacement lorsqu'un barrage ne convenait pas. C'est ainsi que nous avons repris une idée du Service de l'Elevage du SOUDAN en tentant d'améliorer la technique du surcreusement de mares, et, par ailleurs, envisagé de suralimenter les nappes phréatiques. La technique du surcreusement de mares est relancée, des projets ont été dressés, des réalisations déjà faites.

Mais, au cours des échanges de vues sur les risques d'échec, nous avons pu nous rendre compte que ces risques, de même que les réticences des Maîtres de l'Oeuvre, avaient pour cause principale l'évapotranspiration et ceci est très compréhensible car les mares d'A.Q.F. sont généralement abondamment ceinturées d'arbres. Quant à la suralimentation de nappes il est bien évident que ce serait vouloir remplir le tonneau des Danaïdes qu'augmenter des réserves sans limiter les pertes.

b) Un Conservateur des Eaux et Forêts nous a beaucoup aidé dans nos recherches documentaires sur la question. Il nous a notamment communiqué un ouvrage publié en 1908 (cinquante ans !) et dont nous ne nous étions pas soucié de prendre connaissance parce que nous avions complaisamment cru ce qu'on en disait généralement : "C'est un recueil de rêveries". Il s'agit de :

CONTRIBUTIONS A L'HYDROGENESE

par H. DESSOLIERS Ingénieur des Arts et Manufactures
Agriculteur à TÉNÉS (ALGERIE)

édité en 1908 par la librairie Polytechnique Ch. BERANGER.

L'homme était un érudit (plus de cinquante références bibliographiques dans l'ouvrage), doué d'un don rare d'observation et d'analyse, concevant et conduisant ses expériences avec une objectivité et une honnêteté scientifique indiscutables. Il a pu mettre ainsi en évidence des faits fondamentaux. Mais c'était aussi un véritable génie et ceci l'a beaucoup desservi, car son œuvre, très ordonnée et très compréhensible dans les parties analytiques et expérimentales, apparaît, pour un lecteur superficiel, comme utopique dans les chapitres d'application des idées fondamentales. On relève aussi quelques erreurs de détail dans les projets, que l'auteur aurait certainement corrigées par la suite si une aide lui avait été apportée pour poursuivre des expériences et réaliser certains essais.

Dans un domaine de l'hydraulique qui nous est familier - celui de la lutte contre la sédimentation des barrages réservoirs en zones arides - H. DESSOLIERS avait énoncé :

" Au lieu de laisser les vases s'accumuler, se tasser, se durcir, puis s'acharner à les extraire, ce qui sera d'autant plus coûteux que l'on aura attendu plus longtemps, il faut après chaque crue, pendant qu'elles sont encore semi-fluides, les recueillir dans un égout de fond et les évacuer immédiatement".

Si, dans l'énoncé, on supprime la partie "les recueillir dans un égout de fond" qui n'a trait qu'à une méthode, entre autres, d'évacuation rapide des vases, on obtient une vérité fondamentale, pure de toute adjonction technique, à laquelle, petit à petit, se rattachent les Ingénieurs qui prennent conscience de la nécessité d'entretenir les capacités des barrages réservoirs en pays arides au moyen de procédés pratiques et économiques.

H. DESSOLIERS a exploré tous les domaines qui intéressent l'hydrologie. La météorologie n'avait pas de secrets pour lui et il avait déjà énoncé les principes fondamentaux de production de pluie artificielle par enrichissement des sommets des cumulus par ascendance centrale, de génération de trombes, etc...

H. DESSOLIERS est mort ignoré et aigri. Ce sera rendre un hommage à sa mémoire que de montrer, en s'aidant de la documentation qu'il a recueillie, qu'en A.O.F. tout au moins, il peut être fait application de l'un de ses énoncés fondamentaux :

" Là où peut exister la forêt, il est possible de se procurer de l'eau par limitation de l'évaporation ou de l'évapotranspiration".

c) Les dépenses d'équipement de points d'eau pour les besoins humains et pastoraux représentent une charge élevée pour les budgets locaux et l'aide métropolitaine. La limitation de l'évapotranspiration, non seulement permettrait le captage de l'eau lorsque les techniques classiques sont impuissantes, mais constituerait le plus souvent, lorsque les autres techniques sont concurrentielles, la solution la plus sûre et la plus économique. Nous le montrerons par des exemples.

Notre plaidoyer n'est donc pas une curiosité de vulgarisation scientifique mais bien une manifestation du devoir de chacun "Faire mieux et davantage avec les mêmes crédits".

I.-3-a) Notre intention n'est pas de détruire le patrimoine forestier mais simplement de faire attribuer, dans le partage de l'eau, à l'homme et à ses troupeaux, la part à laquelle ils ont droit. Certes, cette part augmente tous les jours du fait de l'amélioration constante des conditions de vie, de l'évolution démographique et de l'extension de l'élevage mais un calcul très simple montrerait que, quel que soit l'accroissement des besoins, la part revendiquée resterait une infime partie de la quantité de pluie qui tombe sur les Territoires.

Or, le ruissellement est très faible en A.O.F., quelques pour cent en moyenne, l'évaporation et l'évapotranspiration se réservant plus de 95 % de la pluie tombée. L'homme et les animaux ont une part, qui, actuellement est de l'ordre de un dix-millième de la quantité qui s'évapore. En supposant que les besoins soient décuplés et que l'accroissement soit pris en totalité sur l'évaporation ou l'évapotranspiration c'est tout au plus un millième des surfaces boisées qu'il faudrait traiter.

I.-3-b) La technique de traitement des sols pour, d'une part, favoriser l'infiltration de l'eau et l'alimentation des nappes et, d'autre part, limiter les prélèvements des racines dans ces nappes suralimentées doit tenir compte du risque d'érosion des sols après déboisement, de celui d'augmentation des vitesses du vent au voisinage du sol. Il faudra donc laisser subsister, en densité suffisante, des îlots ou lignes d'arbres à l'intérieur des périmètres traités. Nous montrerons que les précautions à prendre ne constituent ni une gêne, ni une dépense notable et nous montrerons même que, ces précautions étant prises, les terrains traités peuvent être livrés aux cultures classiques d'hivernage sans affecter sensiblement les réserves des nappes lorsque la pluviométrie est suffisante. Des villages pourront être créés puisque nourriture et boisson seront garanties. De ceci découle que la forêt pourra être mieux exploitée grâce aux chemins d'accès aux villages et à la main d'œuvre disponible au cœur même de l'exploitation forestière.

Et l'on conçoit que, finalement, loin de porter atteinte au patrimoine forestier, la création de points d'eau par traitement des sols soit un élément d'exploitation rationnelle de la forêt en même temps qu'un moyen de résoudre les problèmes posés par l'évolution démographique.

I.-3-c) La limitation, en certains points et suivant des méthodes rationnelles, du couvert forestier devra s'accompagner de mesures de défense de ce couvert dans les zones de concentration des populations et troupeaux en zones arides où très généralement l'arbre est menacé de disparition. (voir III - 2 - c)

I.- 4) On n'arrivera à vaincre l'incrédulité qu'en fournissant des preuves incontestables. Il est donc nécessaire que les premières applications soient conçues et conduites de façon telle que l'on puisse établir, d'une part l'accroissement des quantités d'eau disponibles, d'autre part le prix de revient. Il faut, en effet, se rappeler que les efforts antérieurs n'ont pas convaincu faute de pouvoir établir le bilan de l'opération en raison d'une connaissance insuffisante des éléments au départ, avant tout aménagement. Il est en effet facile dans ces conditions de rétorquer que l'eau existait déjà et même d'affirmer qu'il y en avait davantage avant toute intervention.

Ce serait donc faire œuvre néfaste que de ne pas réunir une documentation suffisante avant tout début de travaux. Or il est difficile et coûteux et il faut du temps pour réunir une telle documentation. Les premières réalisations porteront donc sur des cas bien connus. Enfin, que l'on se garde bien, au début, de vouloir réaliser des tours de force en traitant des cas désespérés. Ce serait encore faire œuvre néfaste. Les limites d'application de la méthode ne seront déterminées que patiemment, par approximations successives.

I.- 5) Dans les exposés qui vont suivre il ne faut pas s'attendre à trouver les éléments d'un traité d'hydrologie ou de pédologie ni des développements d'une haute portée scientifique. La question embrasse trop de disciplines pour que l'on puisse épuiser le sujet dans une note qui n'a pour prétention que de mettre en évidence que l'on peut agir, quoi qu'on en ait dit. Nous nous attacherons donc à mettre en valeur les faits essentiels et à montrer comment conduire études et réalisations dans quelques cas typiques.

*

* *

.. / ..

II. - LES FAITS ESSENTIELS -

II.- I) Avant que d'aborder l'analyse des faits il est bon de préciser la terminologie :

- La quantité d'eau contenue dans un échantillon de terrain se détermine par perte de poids à l'étuve à 105°. L'échantillon, après traitement, constitue la matière sèche à partir de laquelle il est conventionnel de compter les quantités d'eau contenues en différents états d'humidification.

Si l'on place cet échantillon séché dans un tube vertical avec filtre de fond évitant l'entraînement des matériaux on constate qu'il faut verser une certaine quantité d'eau avant qu'une goutte n'apparaisse au bas. Il faut donc imbiber la terre avant qu'elle ne laisse percoler l'eau et l'eau ainsi retenue est dite "eau d'imbibition". D'où le nom de capacité de rétention ou imbibition, donné à la propriété qu'a la terre de retenir une certaine quantité d'eau par imbibition, tension capillaire etc...

Si, après l'apparition de la première goutte, on ferme le fond et que l'on rajoute de l'eau jusqu'à obtenir, à la surface supérieure de l'échantillon, un film permanent d'eau on a saturé la terre c'est-à-dire, pratiquement, rempli d'eau tous les vides. Si l'on ouvre le fond après cette opération, il s'écoule une quantité d'eau à peu près égale à celle rajoutée précédemment.

La différence entre capacité à saturation et capacité à imbibition représente la quantité d'eau maxima qu'il est possible à l'homme de retirer d'un certain saturé, par drain ou puits, et pour cette raison nous définirons comme mobilisable par l'homme la part d'eau excédant la capacité d'imbibition.

- Les végétaux peuvent mobiliser de l'eau bien en-deçà de la capacité d'imbibition, grâce aux facultés d'absorption des radicelles. Ils ne peuvent cependant mobiliser toute l'eau contenue dans la terre en raison des tensions de plus en plus considérables opposées par l'association des éléments très fins (argiles et colloïdes) au fur et à mesure que la terre s'assèche. Les pédélogues ont défini comme point de flétrissement l'état d'humidité au-dessous duquel les végétaux ne peuvent plus mobiliser d'eau et, en conséquence, nous définirons comme mobilisable au seul profit des plantes la quantité d'eau entre point de flétrissement et capacité d'imbibition.

Les renseignements numériques relatifs aux différentes facultés et définitions ci-dessus sont fournis habituellement soit en pourcentage du poids de matière sèche soit en pourcentage du volume de matière sèche. Pour l'hydrologue il est préférable de se servir des pourcentages en volume car ce qui l'intéresse c'est la quantité d'eau qu'il peut retirer d'un certain volume de terre. Nous allons même adopter un système plus pratique pour ce qui nous concerne, par analogie avec ce qui se fait en pluviométrie où l'on exprime en m.m. d'eau les quantités d'eau tombées, car, en définitive, ce que nous recherchons c'est bien de savoir combien de m.m. de pluie il nous sera possible de récupérer pour les besoins de l'homme. Nous conviendrons donc de définir quantitativement les états par un certain nombre de m.m. d'eau par mètre de hauteur de terrain, ce qui revient en somme à définir les rapports volumétriques en millièmes au lieu de centièmes, mais l'usage de ce système permet de se rendre compte rapidement des relations entre pluviométrie et états du sol.

Pour la même raison nous exprimerons en m.m. les pertes par évaporation (ce terme définissant les pertes d'un sol nu, en l'absence de toute végétation) ou par évapotranspiration (ce terme définissant la perte cumulée par le sol et par la transpiration des plantes).

L'eau de pluie tombe sur le sol ou les feuilles, s'évapore en partie, pénètre dans le sol, est reprise par l'homme et les plantes etc... Elle parcourt des trajets et il est nécessaire d'exprimer des vitesses c'est-à-dire de faire intervenir le facteur temps. Nous prendrons comme unité de temps la journée, unité commode en ce qui nous concerne puisque les pluies, l'évaporation des nappes d'eau libre, s'expriment en m.m. par jour.

Les vitesses de trajet de l'eau dans le sol varient considérablement avec la nature physique du sol dont l'élément comparatif de base est la granulométrie c'est-à-dire le classement en proportions des grains de différents diamètres. Pour raison d'homogénéité les granulométries seront exprimées en m.m. et les vitesses en m.m. par jour.

Nous aurons besoin, par la suite, de définir d'autres propriétés et de les exprimer numériquement. Ceci se fera sans alourdir le texte grâce à des exemples ou descriptions d'expériences.

II. - 2)

EXPERIENCES FONDAMENTALES DE DESSOLIERS

a) Permeabilité - Vitesse d'infiltration - Capillarité

Une partie de l'eau tombant sur le sol pénètre dans celui-ci, imbibe les premières couches, puis les satures, traverse ces premières couches saturées, pour imbibiber et saturer les couches inférieures et ainsi de suite. Lorsque la pluie s'arrête, le jeu des tensions capillaires a pour effet d'homogénéiser les teneurs aux environs de la capacité d'imbibition si, aux environs d'un espace saturé se trouvent des zones non encore complètement imbibées. Les vitesses d'échange, de même que les distributions finales, sont fonction de la perméabilité et de l'indice des vides, c'est-à-dire finalement de la granulométrie.

Sur un échantillon de terre séché à l'étuve, passé au tamis à mailles de 1,6 mm. et placé dans un tube de 90 m/m de diamètre et de 440 mm de hauteur, DESSOLIERS a versé une quantité d'eau équivalente à une pluie de 79 m/m.

Il a noté les vitesses suivantes de propagation de la zone humidifiée :			
sur les premiers 175 m/m	environ	4.000	mm/jour
de 175 à 215 m/m	"	1.000	" "
de 215 à 235 m/m	"	100	" "
de 235 à 270 m/m	"	35	" "
de 270 à 300 m/m	"	10	" "

La zone humidifiée a atteint 310 m/m après 12 jours et s'y est stabilisée.

Pendant l'expérience l'évaporation a enlevé 12 m/m environ ; 67 m/m d'eau avaient donc imbibé 310 m/m de terre, soit une capacité d'imbibition de 220 m/m par mètre de hauteur, alors qu'une expérience précédente avait montré que la capacité à saturation était de 370 m/m par mètre de hauteur,

Cette expérience montre qu'une pluie de 79 m/m ne pénètre guère à plus de 300 m/m si le sol argilo-siliceux a été complètement desséché. En réalité, dans la nature, le sol est moins desséché qu'en étuve ; il conserve en surface environ 20 m/m d'eau rapportée au mètre de hauteur, de sorte qu'on a un ordre de grandeur acceptable en estimant qu'une pluie de 70 m/m environ en début d'hivernage, ne pénètre guère à plus de 300 m/m dans les sols argilo-siliceux, qu'il en reste après évaporation de dix jours environ 50 m/m dont 40 environ sont mobilisables par les plantes, l'homme ne pouvant en aucune façon recueillir d'eau par drainage, les terres n'étant qu'imbibées et non encore saturées.

Dans un autre essai où la quantité d'eau versée était de 55 mm. mais où l'échantillon était placé au soleil, la profondeur atteinte n'a été que de 122 mm. Ces chiffres montrent que, dans les sols argilo-siliceux, les premières pluies d'hivernage ne peuvent alimenter les nappes phréatiques.

DESSOLIERS a ensuite examiné ce qu'il pouvait advenir de l'eau mise en réserve et étudié l'ascension par capillarité qui alimente l'évaporation superficielle entre deux pluies. Voici les résultats obtenus dans des tubes de 60 m/m de diamètre qui plongeaient dans un bac à eau, l'extrémité supérieure étant ouverte à l'air libre pour permettre à l'air occlus de s'évacuer.

Ascension par capillarité -

Hauteurs atteintes après	Terre	Terreau de pin	Sable fin
1 jour	360 mm	120 mm	180 mm
2 jours	400 "	125 "	180 "
3 jours	460 "	145 "	185 "
4 jours	480 "	160 "	185 "
38 jours	720 "	448 "	210 "
70 jours	825 "	525 "	235 "
100 jours	860 "	580 "	240 "
150 jours	invisible	620 "	240 "

De ces expériences nous retirerons l'enseignement très simple que, même en l'absence de toute transpiration par les plantes, il ne peut y avoir de nappe pérenne si l'épaisseur de terre au-dessus du socle imperméable n'excède pas sensiblement un mètre. Par contre, dans les sables propres (très faible proportion d'argile) et toujours dans l'hypothèse d'aucune transpiration par les végétaux, une nappe peut subsister à quelques décimètres de la surface du sol.

D'autres expériences faites par DESSOLIERS ont montré que dans le gravier propre, l'ascension capillaire n'excède pas 50 m/m, et qu'il suffirait, toujours en l'absence de perte par transpiration, de quelques décimètres de gravier pour qu'une nappe soit totalement protégée contre l'évaporation.

II.-2-b)

Valeurs numériques de la saturation, de la rétention,
du point de flétrissement

Voici les valeurs obtenues par DESSOLIERS pour l'imbibition :

Hauteurs d'eau en m.m. retenues par une couche de 1 mètre de hauteur
drainée par le bas.

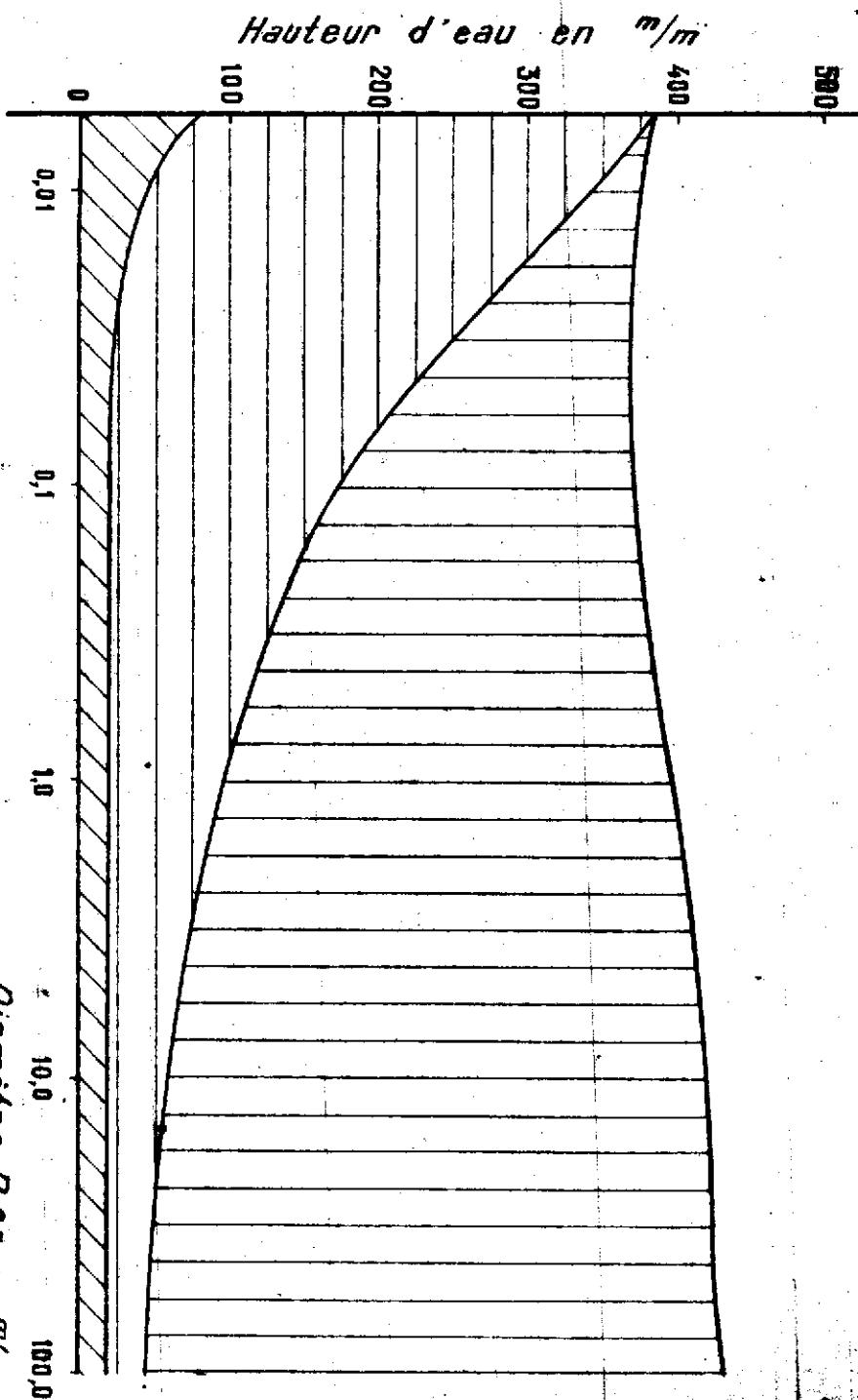
Nature du terrain	Hauteur en m.m.
Gravier de 10 à 28 m.m	49 mm.
Gravier de 2,8 à 10 m/m	65 "
Sable de 2,8 m/m	69 "
Sable fin calcaire	225 "
Terre argilo-sableuse criblée	370 "
Terreau de pin densité sèche 0.660	450 "

Ces résultats sont relatifs à des terrains sèchés à l'étuve. Ils sont donc supérieurs aux chiffres relatifs aux terrains tels qu'ils se présentent dans la nature, les corrections à faire étant à peu près nulles pour les graviers et sables grossiers, de 30 mm environ pour les sables fins, de 50 mm. pour les terres, corrections qui représentent des quantités voisines de celles que les terrains conservent au point de flétrissement.

Une autre correction serait à faire pour tenir compte de l'état de compactage du sol. Les essais de DESSOLIERS portaient sur des terrains sèchés à l'étuve et mis en place sans être compactés. Dans la nature, plus la granulométrie est fine et l'épaisseur grande, plus il y a tendance, en général, à diminution de l'indice des vides et, par suite, des capacités à saturation et imbibition, avec augmentation corrélative des capacités au point de flétrissement.

Nous n'avons besoin que d'ordres de grandeur et nous avons, pour la simplicité de la présentation, résumé en un graphique les valeurs les plus probables pour des terrains, dans la nature. Nous avons caractérisé ces terrains par le diamètre D85 à partir duquel 85 % d'éléments sont plus gros. C'est en effet les 15 % d'éléments les plus fins qui conditionnent les vides, la perméabilité, la capillarité, la rétention.

.../...



Eau utilisable par l'homme et par les plantes.



Eau utilisable par les plantes et non par l'homme.



Eau non utilisable par l'homme ou par les plantes.

(voir courbe page IO bis)

De cette représentation graphique on retire les éléments essentiels suivants :

- 1°/ - La quantité d'eau que l'homme peut mobiliser varie considérablement avec la granulométrie : nulle pour les terres très argileuses, elle peut atteindre 300 m/m d'eau par mètre de hauteur de terrain constitué de gros graviers.
- 2°/ - Les plantes, en terrain saturé, peuvent prélever environ 250 m/m d'eau par mètre d'épaisseur, quelle que soit la granulométrie.

II.2 - c)

Evaporation, évapotranspiration, infiltration, ruisseaulement.

DESSOLIERS a mis en évidence :

- 1°/ - qu'une terre nue saturée évapore davantage qu'une surface d'eau libre au soleil et légèrement moins à l'ombre.
- 2°/ - qu'au fur et à mesure que la teneur en eau de surface diminue, l'évaporation diminue.
- 3°/ - dans des conditions identiques de température et d'état hygrométrique de l'air, que les pertes totales sont d'autant plus grandes que la granulométrie est plus fine, ceci n'étant pas pour surprendre en raison de remontées capillaires plus faciles avec une granulométrie plus fine.

.../...

Pour analyser l'effet protecteur d'une couche plus ou moins épaisse de gravier sur des terres argilo-siliceuses il a disposé trois cylindres de même diamètre contenant la même hauteur (36 cm) de terre ; le cylindre I n'ayant pas de couche de protection, le cylindre 2 ayant reçu 2 cm de gravier le cylindre 3, 8 cm de gravier. Le fond du récipient était conique et garni de gravier faisant office de drain. Les trois cylindres ont été placés dans une caisse isolante, les surfaces réceptrices des cylindres traversant la surface supérieure de la caisse, et disposés à l'extérieur, après avoir été imbibés d'eau, du 4 Novembre 1905 au 18 Février 1906 (période pluvieuse en Algérie). La pluviométrie a été de 300 m/m. On a recueilli par les drains inférieurs :

dans le bocal I	78 m/m	soit	26 % de la pluie
" " 2	213 m/m	"	71 % "
" " " 3	243 m/m	"	81 % "

Cette expérience met en évidence qu'une très légère couche de gravier réduit les pertes par évaporation dans des proportions considérables.

DESSOLIERS a alors examiné l'influence de ces couches protectrices dans le cas du ruissellement et il a expérimenté des "ruisselets" en bacs à section triangulaire inclinés sur l'horizontale à 21 %. Le remplissage était constitué de gravier drainant que surmontait une couche de terre. L'un des ruisselets a reçu une protection superficielle de 2 cm, en gravier. Les ruisselets ont été disposés à l'extérieur et l'on posait les quantités d'eau recueillies par ruissellement d'une part, par drainage d'autre part. Les opérations ont duré du 4 Septembre 1906 au 17 Février 1907.

Le total pluviométrique a été de 280 m/m.

Voici les résultats comparatifs :

	Ruisseau sans protection	Ruisseau avec 2 cm. de gravier
quantité de pluie reçue	280 m/m	280 m/m
quantité ruisselée	119 m/m	23 m/m
quantité drainée	53 m/m	178 m/m
perte par évaporation	108 m/m	79 m/m

.../..

Cette expérience met en évidence l'influence prépondérante de "l'état de surface" du sol non seulement sur l'évaporation mais aussi sur le ruissellement et l'infiltration.

II.-3- Autres renseignements -

Bien que les expériences de DESSOLIERS constituent une base suffisante pour l'analyse qualitative des phénomènes intéressant l'alimentation et les déperditions d'une nappe phréatique, il convient de compléter la documentation par des indications sur les pertes par évapotranspiration.

- a) A un instant donné la quantité d'eau prélevée par les racines est indépendante de la quantité totale qui se trouve dans le sol pourvu que celle-ci soit légèrement supérieure au point de flétrissement et inférieure à la quantité maxima à saturation sous peine d'asphyxie des racines.

- Le point de flétrissement n'est pas le même pour toutes les plantes; certaines assèchent davantage le sol que les autres, c'est-à-dire résistent mieux à des sécheresses prolongées.

- Des cultures de céréales n'aggravent pas considérablement les pertes par rapport à l'évaporation des sols nus, la perte supplémentaire due à la transpiration variant de 40 à 150 m/m pour des pluviométries de l'ordre de 600 mm, en Afrique du Nord. On a obtenu en cases lysimétriques drainantes les résultats suivants :

	Jachère	Blé	Terre nue	Blé
Pluie	577		648	
Drainage	264	164	242	201
Evaporation	313	411	406	447

En réalité, et les expériences de DESSOLIERS nous ont éclairés sur ce point, les pertes par évaporation d'une terre non cultivée dépendent essentiellement de l'état de surface. Il est probable que si l'on comparait les pertes par évaporation et les gains par drainage entre un sol cultivé en céréales, et un sol non cultivé pourvu d'une couche protectrice de quelques centimètres de gravier, le bilan serait tout autre. Malheureusement aucune documentation, à notre connaissance, n'existe à ce sujet et nous nous contenterons d'estimer que pour des pluviométries de l'ordre de 600 m/m le gain supplémentaire en drainage aurait été d'au moins 200 m/m dans le cas de sol non cultivé et pourvu de 2 cm. de gravier.

- b) Pour représenter l'état d'humidification du sol à différentes profondeurs les pédologues utilisent les profils hydriques qui mettent en évidence les actions des plantes et celles du temps. Malheureusement ces observations portent sur une couche de terrain n'excédant guère un mètre et nous savons déjà que l'eau qui nous intéresse doit se trouver au-delà de 1 mètre en terrains argilo-siliceux.
- c) Si l'on connaît assez bien les pertes par évaporation des sols nus ou couverts de cultures annuelles en différents climats, on connaît très mal celles par transpiration des arbres, faute le plus souvent de pouvoir mesurer les quantités d'eau qui tombent effectivement sur le sol. En effet les vergers, la forêt, ne laissent tomber sur le sol que partie de la pluie qu'enregistre un pluviomètre placé en terrain découvert. Cependant on connaît à peu près les quantités d'eau qu'il faut fournir par irrigation pour assurer une vie végétative convenable. Voici, pour l'Algérie et pour les régions à état hygrométrique relativement bas en saison sèche (plaines sub-littorales du Chéliff), les quantités moyennes d'eau d'irrigation qu'il faut fournir en saison sèche :

luzernières	1.500 m/m
vergers sans cultures intercalaires	700 m/m
vergers avec cultures intercalaires	1.200 m/m
cultures maraîchères	1.300 m/m
coton	800 m/m
maïs	800 m/m

A ces quantités, pour avoir un bilan exact, il faudrait ajouter les quantités d'eau de pluie infiltrées et déduire celles drainées, toutes choses assez mal connues.

Nous avons pour but d'étudier ce qui intéresse les nappes phréatiques d'A.O.F. et il nous faudra, pour les applications, adopter certaines données. Celles ci-dessus constituent des éléments auxquels nous apporterons des corrections à l'aide de la documentation spéciale à l'A.O.F. dans le domaine pluviométrie-écoulement.

*

* * *

.../...

III. - INDICATIONS ET DONNEES ESSENTIELLES POUR L'A.O.F.

III.-I Les observations sur l'écoulement des rivières en A.O.F., mettent en évidence les faits suivants :

- a) En terrains relativement plats ou faiblement ondulés ou boisés, le ruissellement est fonction uniquement des intensités de pluie et non de la pluviométrie annuelle totale, tout au moins pour des pluviométries annuelles jusqu'à 1.200 m/m.
- b) L'évapotranspiration des forêts de basse côte peut atteindre et dépasser 2.000 m/m si la pluviométrie dépasse 2.000 m/m.
- c) Dans les régions dépourvues de roches - magasins susceptibles d'alimenter des sources les débits d'étiage des rivières sont quasi nuls même lorsque la pluviométrie atteint et dépasse 2.000 m/m et ceci démontre clairement que la forêt n'alimente pas les sources, en AOF tout au moins.

III.-2 Les terrains superficiels des zones arides d'A.O.F. sont, soit une carapace plus ou moins latérisée, soit des sables le plus souvent très fins et peu argileux.

- a) Les terrains à carapace latérisée sont les seuls, pratiquement, à participer au ruissellement en raison de leur perméabilité très faible. Ce sont des zones d'évaporation et de ruissellement. Les faibles quantités d'eau qui s'infiltrent ne peuvent constituer de nappe car elles sont rapidement mobilisées par la maigre brousse des épineux et les fourrages naturels. Il ne peut y avoir constitution de nappe que dans les zones de concentration du ruissellement et sous réserve que les sédiments y aient une épaisseur suffisante. Or il est remarquable de constater que lorsque ces conditions sont remplies les zones de concentration du ruissellement sont occupées par des "forêts galeries" dont la vigueur contraste avec la chétivité de la brousse environnante.
- b) Les terrains dunaires ne participent au ruissellement que lors des orages de très forte intensité. En général l'eau s'évapore ou s'infiltre. L'eau infiltrée qui n'a pas atteint une profondeur d'au moins 300 m/m est reprise par l'évaporation entre deux pluies. L'infiltration profonde, susceptible d'alimenter des nappes, ne peut se produire que si la pluviométrie est suffisante et l'évapotranspiration inférieure à la pluviométrie pendant l'hivernage. Mais l'évapotranspiration, c'est-à-dire la couverture végétale, s'adapte à la pluviométrie, quoique générée ici par le manque d'éléments nutritifs et cette dernière raison explique que, pour

des pluviométries semblables, des nappes pérennes importantes puissent exister dans les dunes alors qu'on n'en trouve pas dans les zones de concentration de ruissellement des régions latérisées voisines (ces notamment de la nappe de la KORAMA au NIGER, visible en superficie dans le creux des sillons dunaires). Il est bien certain que si, sur les dunes de la KORAMA, existait une végétation arbustive comparative à celle du lit de la rivière IFOU à DAOUKRO (Côte d'Ivoire) au lieu des quelques rares rôniers et plamiers qu'on y rencontre, il n'y aurait pas de nappe pérenne. Or à DAOUKRO la pluviométrie est de 1.100 m/m, supérieure à celle de la KORAMA, et les sables et graviers du lit de la rivière sont suralimentés à chaque crue. Et cependant dès le mois de Février il devient impossible, pratiquement, de tirer de l'eau des puisards de DAOUKRO.

Il semble donc que les régions dunaires défendent mieux les nappes éventuelles en ne procurant pas à la végétation arbustive autant d'éléments nutritifs que les zones sédimentaires de concentration des ruissellements.

- c) Mr. GREIGERT, Géologue du Service des Mines de l'A.O.F. nous a signalé que la disparition de la végétation dans les zones de concentration du ruissellement des régions limitrophes entre Territoires du SOUDAN et du NIGER pourrait expliquer la présence de nappes phréatiques pérennes alors que, plus au Sud, dans des formations et circonstances analogues mais où la végétation arbustive est relativement abondante, les nappes phréatiques tarissaient vite, malgré une pluviométrie plus élevée.

Il est probable qu'il faut rechercher l'influence de l'homme sur la limitation de l'extension en étendue et vigueur de la végétation en zones très arides ou désertiques, influence qui se manifeste d'autant plus, relativement, que la végétation est moins abondante. Ce qui est grave dans cette influence incontrôlée c'est que le couvert forestier est menacé de disparition : le peuplement n'est fait que d'arbres adultes, aucun rejet ou jeune sujet n'ayant une chance de se développer. Il conviendrait que cet aspect du problème soit examiné avec attention : la recherche de l'ombre par les troupeaux, aux heures très chaudes, traduit un besoin physiologique qui pour être moins impératif que la soif n'en est pas moins certain. La destruction totale des arbres aux alentours d'un point d'eau aurait une répercussion néfaste sur l'état des troupeaux. S'il faut limiter le couvert forestier pour disposer de l'eau nécessaire il ne faut pas atteindre la dénudation totale. L'excès, en tout, est nuisible.

d) Dans les régions semi-arides d'A.O.F. on a consacré et l'on consacrera encore beaucoup de crédits à forer des puits pour l'alimentation des hommes et des troupeaux. Nombre de puits atteignent le socle imperméable sans fournir d'eau, ou si peu qu'ils ne sont pas exploités. Certains sont au voisinage de zones de concentration du ruissellement accusées par une végétation arbustive plus vigoureuse. Ils ne donnent pas davantage d'eau que les autres. On a recherché quelquefois à faire intéresser par le puits des zones fissurées ou broyées du socle, oubliant souvent que, pour qu'il y ait de l'eau mobilisable en profondeur, il faut tout d'abord que les eaux percolées puissent atteindre ce socle.

III.-3 -

Il existe de nombreuses mares en A.O.F. Très peu sont pérennes en raison soit d'un creux trop faible, soit d'une alimentation insuffisante. Que les mares soient pérennes ou non leur aspect est le même : dans une partie centrale plus ou moins étendue il n'y a pas de végétation en raison d'une submersion prolongée en hivernage. Sur les pourtours de la mare une végétation arbustive vigoureuse tranche sur la brousse généralement très maigre de la région et occupe une surface en rapport avec l'étendue des sédiments et les quantités d'eau accumulées au cours de l'hivernage. Lorsque la mare est près de s'assécher et qu'il ne reste plus que quelques décimètres d'eau trop boueuse pour être consommée, les riverains ou passateurs creusent des puisards. Et l'on constate avec étonnement que le niveau piézométrique dans les puisards est plus bas que le niveau d'eau dans la mare. On pense expliquer la chose par l'imperméabilité quasi totale du fond de mare qui isolerait celle-ci d'un substratum plus ou moins perméable.

Au fur et à mesure qu'on avance dans la saison sèche les puisards sont approfondis pour suivre un niveau d'eau qui baisse plus ou moins rapidement. Les faibles quantités d'eau extraites par les hommes ne peuvent expliquer, même dans l'hypothèse de capacités de saturation très voisines des capacités d'imbibition, l'abaissement rapide généralement constaté. Et la pensée se précisera d'un substratum poreux alimentant des nappes profondes.

Et l'on commettrait une erreur, dans la généralité des cas, en imputant au sous-sol des pertes dont l'évapotranspiration est seule responsable.

Qu'il s'agisse de zones de concentration du ruissellement ou de mares les phénomènes sont semblables : l'absence de nappe (ou l'épuisement rapide de celle-ci) est le fait de l'évapotranspiration des arbres.

Nous pouvons, après cette analyse qualitative, entreprendre quelques calculs très simples.

IV - NAPPES PHREATIQUES D'A.O.F. -

- Conditions pour qu'il y ait possibilité d'alimentation.
- Cycle de l'eau
- Mesures élémentaires pour améliorer les conditions actuelles.

IV.-I -

Nous allons examiner, dans quelques cas typiques, ce qu'il advient de l'eau qui pénètre dans le sol, s'il est possible qu'à une certaine distance de la surface une nappe puisse être alimentée en hivernage et durer jusqu'en fin de saison sèche et, pour chaque exemple, nous examinerons si une amélioration peut être apportée à l'état de fait actuel et comment.

Il n'est pas possible d'envisager tous les cas en raison du nombre de paramètres (épaisseur au-dessus du socle, granulométrie, pluviométrie, évapotranspiration) et des variations de ceux-ci. Il faut donc se limiter à ceux les plus fréquents en A.O.F.

Nous traiterons d'abord le cas le plus commun : celui d'épaisseurs sédimentaires ou latérisées ayant un faible coefficient de perméabilité. Nous ferons varier épaisseur et pluviométrie.

Nous traiterons ensuite le cas des zones de concentration de ruissellement et enfin celui des bords des mares non pérennes.

IV.-2 -

Terrains peu perméables -

Nous allons faire les hypothèses suivantes qui correspondent à un cas moyen, fréquent en A.O.F.

- | | | |
|--|---------|--------------|
| - capacité à saturation | 300 m/m |) par mètre |
| - capacité à imbibition | 250 m/m |) de hauteur |
| - point de flétrissement | 40 m/m |) de terrain |
| - transpiration : variable avec la végétation. | | |

Terres nues -

L'évaporation pendant l'hivernage peut être de l'ordre de 200 m/m en raison de la chaleur emmagasinée par le sol. L'évaporation de saison sèche varie avec la quantité d'eau introduite.

Au total l'évaporation superficielle variera de 300 à 450 m/m pour des terres nues.

Les quantités d'eau de pluie supérieures à 300 m/m peuvent profiter aux nappes sous réserve évidemment que le coefficient de perméabilité permette une propagation suffisante de la saturation.

I^o) - Supposons une terre nue de 2 mètres d'épaisseur au-dessus du socle -

Nous allons partir d'un état de siccité voisin du point de flétrissement pour le mètre supérieur, en raison de la capillarité, d'un état voisin de l'imbibition pour le mètre inférieur. La réserve en eau est ainsi de : $40 + 250 = 290 \text{ m/m}$ sur ces deux mètres.

Avant que la nappe ne se crée il faut amener à imbibition le mètre supérieur et fournir par conséquent environ 210 m/m .

Ensuite on peut accumuler 50 m/m d'eau par mètre soit 100 m/m jusqu'à saturation totale à partir de laquelle toutes les eaux de pluies s'évaporent ou ruissellent.

Pour arriver au point de saturation il faut que la pluie dépasse le total :

- évaporation en hivernage	200 m/m
- remplissage à imbibition	210 m/m
- remplissage à saturation	<u>100 m/m</u>
	510 m/m

Dès le commencement de la saison sèche le premier mètre superficiel revient à l'état d'imbibition (évaporation des 50 m/m différenciels entre saturation et imbibition), les premiers décimètres tendant ensuite à se dessécher pour se rapprocher du point de flétrissement. La chaleur solaire qui se transmet à plusieurs mètres de profondeur augmente la tension de vapeur et la limite entre zone saturée et zone imbibée s'abaisse progressivement pour atteindre le socle bien avant la fin de la saison sèche. Ainsi, alors qu'on pouvait mobiliser au profit de l'homme 100 m/m en fin d'hivernage, on ne retirerait pas une goutte d'eau en fin de saison sèche même si l'on n'avait pas touché à la réserve. Le phénomène est analogue à l'évaporation des nappes d'eau libres.

Cet exemple montre que, pour des épaisseurs de terres d'environ deux mètres :

- a) Quelle que soit la pluviométrie et même en l'absence de toute végétation il ne peut y avoir mobilisation d'eau au profit de l'homme en fin de saison sèche.
- b) Il serait parfaitement inutile de supprimer la végétation existante si l'on ne prenait pas de mesures pour diminuer les pertes par évaporation, en cours de saison sèche, par exemple par traitement superficiel.

c) Il serait parfaitement inutile de suralimenter en eau d'infiltation, dans le cas de pluviométries inférieures à 500 m/m, des couvertures sédimentaires de faible épaisseur.

2°) - Supposons une terre nue de 10 mètres d'épaisseur -

Prenons pour les 2 mètres supérieurs le même état que dans le cas précédent en fin de saison sèche. Un raisonnement semblable montrerait que l'on peut mobiliser au profit de l'homme au cours de la saison sèche : $8 \times 50 = 400$ m/m d'eau. Il faudrait évidemment, par la suite, renouveler la nappe, le renouvellement étant fonction de la pluviométrie et de la perméabilité. C'est ainsi que pour une pluviométrie d'environ 1.000 m/m le réapprovisionnement serait possible en totalité.

Si la pluviométrie est très faible, on peut, dans une zone suralimentée par concentration du ruissellement, accumuler 400 m/m d'eau mobilisable par l'homme. Ceci représente par hectare : 4.000 mètres cubes. Il suffirait de quelques hectares (suralimentés en zones arides) pour qu'un village puisse disposer des ressources en eau qui lui sont nécessaires, au moyen de puits n'excédant pas dix mètres de profondeur.

Il est possible, dans certains cas, que la perméabilité des terres soit trop faible pour que l'approvisionnement de la nappe puisse être fait au cours de l'hivernage. Un remède très simple consisterait à creuser des tranchées convenablement espacées, de 2 mètres de profondeur et de 1 mètre de largeur que l'on remplirait de débris de cuirasse ou graviers latéritiques (ou d'enrochements). De même, si la carapace latéritique est généralement développée et continue à proximité de la surface du sol mais que les terrains au-dessous ne sont pas absolument imperméables, des tranchées traversant la croûte et remplies de débris de cuirasse pourraient assurer un approvisionnement soustrait à l'évaporation par le sol.

Nous allons montrer maintenant que de tels aménagements doivent atteindre une certaine échelle pour avoir une chance de succès. Supposons que l'on ait débarrassé de toute végétation une surface d'un hectare dans une région où la pluviométrie est de 1.000 m/m, les terres ayant une épaisseur de 10 mètres au-dessus du socle et une perméabilité convenable. En fin d'hivernage on a accumulé 4.000 m³ disponibles pour l'homme mais, ceinturant cette zone saturée, des terrains non saturés supportent une végétation qui crée un rabattement permanent de la nappe saturée vers les zones non saturées. On risque de ne pas faire la soudure en raison des pertes latérales.

Il serait beaucoup trop coûteux de construire une enceinte étanche. La seule solution économique consiste à minimiser les pertes par rapport au volume mis en réserve en augmentant l'importance de ce volume : Supposons en effet que le périmètre aménagé ait une forme circulaire de rayon R . Le volume mis en réserve est proportionnel à R^2 , la surface de pertes latérale est proportionnelle à R , le gradient moyen décroissant avec R . Le rapport des pertes au volume de la réserve décroît donc quand R augmente.

Si les terrains très perméables sont intéressants par les possibilités qu'ils offrent d'accumuler rapidement des volumes d'eau importants, ils ont, par contre, le grave inconvénient de se vider rapidement même sous faible gradient.

Il résulte des observations ci-dessus que :

- a) Les nappes des vallées filiformes sont beaucoup plus sensibles aux pertes latérales que les zones étendues de concentration des ruissements (mares) en raison d'un rayon hydraulique beaucoup plus faible.
- b) Les pertes latérales des remplissages alluvionnaires en sables et graviers sont plus importantes que celles des remplissages silteux des mares.
- c) On n'obtiendra de résultat tangible, sur les vallées filiformes, que si la longueur traitée est suffisante. Il serait inutile de tenter une démonstration en coupant les arbres des rives sur quelques dizaines de mètres (voire quelques centaines).
- d) D'une façon générale la zone aménagée doit être d'autant plus étendue que les terrains sont plus perméables et la végétation arbustive plus développée.

IV - 3

Influence des cultures et des arbres -

On sait par avance que les conditions sont aggravées par rapport à celles des terres nues que nous venons d'analyser. Il est inutile d'examiner le cas des faibles épaisseurs de terrain au-dessus du socle imperméable ; nous traiterons donc immédiatement le cas d'une épaisseur de dix mètres.

Rappelons que dans le cas de terres nues la perte annuelle par évaporation était d'environ 510 m/m et qu'il fallait une pluie d'environ 1,000 m/m pour assurer un renouvellement de nappe dans le cas d'un prélevement par l'homme de 400 m/m.

La perte annuelle par évaporation, de 510 m/m, était déterminée comme suit :

.../...

Evaporation en hivernage	200 m/m
remplissage à imbibition du premier mètre	210
remplissage à saturation des deux mètres	100
	<hr/>
Total	510 m/m

a) Cas des cultures seulement.

Les cultures (ou les fourrages naturels) ont peu d'influence sur l'évaporation en début d'hivernage et changent très peu les quantités d'eau tombant sur le sol ou s'en évaporent. Par contre elles augmentent les pertes en fin d'hivernage et début de saison sèche par prélèvement sur l'eau d'imbibition des deux premiers mètres. On peut admettre, par analogie avec les chiffres donnés en II - 3-a), que la perte supplémentaire correspondante est de 200 m/m.

Dans les régions pluvieuses d'A.O.F. (plus de 1.200 m/m) les cultures ou fourrages ne changeraient pas sensiblement les conditions d'alimentation des nappes. Leur action deviendrait de plus en plus sensible au fur et à mesure que l'on se rapprocherait d'une pluviométrie de 700 m/m à partir de laquelle il pourraient y avoir alimentation de nappes, alors que la limite était d'environ 500 m/m dans le cas de terres nues.

b) Cas des forêts ..

Nous allons aborder immédiatement le cas des belles forêts des zones littorales et sub-littorales où la pluviométrie est suffisante pour que la forêt soit de très belle venue, avec sous-bois.

Les pluies n'atteignent le sol qu'au-delà d'une certaine quantité journalière. La surface évaporatoire, par rapport au sol nu, des feuilles, branches, troncs, du sous-bois est considérable. Toutefois, du fait de la protection contre le vent, le degré hygrométrique de l'air est plus élevé au sol que dans le cas des terres nues et l'air moins agité. On n'a pas de données exactes sur la résultante de ces différentes actions. On a estimé (DESSOLIERS) à 50 % la diminution de la quantité d'eau tombant sur le sol, pour les forêts de pins d'Algérie (pluviométrie de 5 à 700 m/m). D'autres auteurs prétendent que la condensation des brouillards compense la diminution de la pluie. Aussi limiterons-nous la correction, portant sur la diminution de la pluie et l'évaporation par le couvert au cours des pluies, à 200 m/m.

La couverture végétale diminue, par l'effet d'ombre et de tamisage du vent, l'évaporation du sol en saison sèche. Nous supposerons que cette action bénéfique compense la perte précédente de telle façon que nous retrouvons la quantité de 500 m/m pour les pertes par évaporation. A cette perte il faut ajouter celles par transpiration, c'est-à-dire celles des prélevements de la végétation dans le sol.

Les corrélations pluviométrie-écoulement montrent que, en terrains sensiblement plats, lorsque le ruissellement ne peut intervenir qu'après saturation des terres, la transpiration peut-être, au total, de 1.500 m/m, dont 1.300 m/m au moins en saison sèche. Si nous reprenons les mêmes chiffres pour les caractéristiques des terres, savoir :

capacité à saturation	300 m/m
capacité à imbibition	250 m/m
point de flétrissement	40 m/m

on a, disponible par mètre de hauteur, pour les plantes : $300 - 40 = 260 \text{ m/m}$.

Si l'on part d'une saturation totale en fin d'hivernage (2.600 m/m disponibles pour les plantes sur 10 mètres de hauteur) les besoins de la végétation (1.300 m/m) sont largement satisfaits pendant la saison sèche et il reste dans le sol, par mètre de hauteur, environ 170 m/m d'eau. Cette quantité est sensiblement inférieure à la capacité d'imbibition ce qui montrerait que, bien avant la fin de la saison sèche, il ne serait plus possible de puiser ou de drainer de l'eau alors que la quantité mobilisable par l'homme en fin d'hivernage était de 500 m/m. Pour que l'homme puisse drainer comme dans le cas des terres nues, 400 m/m, il faudrait n'atteindre le point d'imbibition qu'en fin de saison sèche. Ceci suppose que le prélevement de $1.300 + 400 = 1.700 \text{ m/m}$ doive intéresser 34 mètres de terrain (à raison de 50 m/m par mètre de terrain).

Tout ceci est théorique et il n'existe probablement pas, pour les nappes d'une certaine étendue, de puits qui indiquent une saturation totale en fin d'hivernage (niveau à ras du sol) et dont le niveau baisserait d'une trentaine de mètres ensuite. Ce que l'on observe c'est une remontée de quelques mètres, à partir d'une dizaine ou une vingtaine de mètres et non une remontée jusqu'au sol, et ceci peut s'expliquer aisément : les arbres, quoique développant leurs racines profondément pour augmenter l'espace nutritif, limitent l'extension vers le bas en fonction des oscillations de la nappe. Sauf pour quelques espèces, il n'y a pas de racines constamment noyées ou trop longtemps noyées de sorte que la distribution de l'humidité n'est pas uniforme, comme nous l'avons supposé

.../...

ci-dessus, mais discontinue ; il existe, en fin de saison sèche, dans le bas, une zone saturée et vers le haut une zone où l'humidité est nettement inférieure à I_{70} m/m. L'arbre, sans souffrir aucunement, pourra faire ses prélèvements alors que l'humidité n'est que légèrement supérieure au point de flétrissement. Supposons que la limite soit 50 % plus élevée que le point de flétrissement conventionnel soit 60 m/m.

Si l'on est parti de la saturation totale en fin d'hivernage (300 m/m sur l'épaisseur de 34 mètres) l'arbre peut ne prélever les I_{300} m/m qui lui sont nécessaires que sur une hauteur de : $I_{300} = \frac{240}{5,4}$ mètres. Compte tenu de l'ascension capillaire, de l'appauvrissement par évaporation des deux mètres superficiels et de ce que le chiffre ci-dessus constitue une limite inférieure, on pourra avoir, à partir d'une dizaine de mètres de profondeur, une zone saturée dans laquelle l'homme fera ses prélèvements. Les oscillations de la nappe, compte tenu de son approvisionnement et dès prélèvements (supposés de 400 m/m) seraient d'environ 8 à 10 mètres.

Examinons, dans cette distribution des humidités, le cheminement de l'eau, vers le bas, pour la réalimentation de la nappe en hivernage.

Sur 10 mètres de hauteur à partir du sol l'humidité moyenne est telle qu'il faut que les pluies soient de : $I_{300} + 500$ m/m avant d'atteindre la saturation qui permettra le cheminement, vers le bas, des eaux destinées à compenser les prélèvements (400 m/m) faits par l'homme dans la nappe.

Il ne peut y avoir réalimentation de la nappe si la pluviométrie n'excède pas sensiblement I_{800} m/m. Si elle est inférieure à ce chiffre il peut y avoir saturation au niveau du sol et sur quelques mètres de profondeur avec zone intermédiaire au voisinage de l'imbibition, puis à nouveau zone saturée dans la nappe.

Il y a un " décrochement " entre zone saturée proche de la surface et zone saturée du fond. C'est dans cet espace que l'arbre va développer ses racines car il constitue pour lui un milieu idéal, rarement saturé, régulièrement aéré à chaque saison sèche.

Si une année est sèche, c'est-à-dire si le renouvellement de l'approvisionnement supérieur se fait mal, l'arbre pousse davantage ses racines dans la zone de capillarité entre nappe inférieure et zone de décrochement. Au cours d'un cycle où la moyenne pluviométrique est faible il peut ainsi atteindre le socle imperméable et faire disparaître la nappe. Celle-ci n'aurait de chance de se renouveler que si, au cours d'un cycle suivant, la moyenne pluviométrique excédaient sensiblement 1.000 m/m.

On conçoit que, pour des pluviométries de 1.000 à 1.400 m/m en moyenne, il ne puisse y avoir de nappe généralisée sous les belles forêts, quelle que soit l'épaisseur des terres.

Fort heureusement il y a des discontinuités qui permettent à l'eau d'atteindre le socle sans avoir à réalimenter des zones au voisinage du point de flétrissement mais ces discontinuités ne permettent évidemment pas des prélèvements, par l'homme, de l'ordre de 400 m/m, sauf dans les synclinaux très marqués.

Ainsi, alors que sur des terrains dénudés l'approvisionnement des nappes peut se faire à partir de 5 à 600 m/m de pluie, les sols forestiers exigent des quantités triples. On conçoit, dans ces conditions, que la quasi généralité des sols forestiers de l'A.O.F ne puissent recéler de nappe permanente. On conçoit aussi qu'il suffise de supprimer la couverture forestière en certains périmètres pour créer des nappes abondantes.

IV.- 4 -

Zones de concentration des ruissellements -

- a) Les zones de concentration des ruissellements constituent, dans les régions arides, des espaces privilégiés sur lesquels la quantité d'eau à l'unité de surface représente une pluviométrie fictive de plusieurs mètres. Cette pluviométrie fictive n'est efficace que si les temps de submersion sont en rapport avec la perméabilité des terrains. Par ailleurs, on sait déjà qu'il ne peut y avoir nappe durable, quelle que soit la pluviométrie réelle ou fictive, si l'épaisseur du terrain au-dessus du substratum imperméable n'excède pas sensiblement deux mètres. Quand les conditions indispensables sont remplies, c'est-à-dire lorsqu'il y a une épaisseur de terres (ou d'alluvions avec sables et argiles) de l'ordre d'une dizaine de mètres avec temps de submersion suffisant, on est pratiquement ramené aux conditions étudiées précédemment pour les régions à forte pluviométrie. Et l'arbre, dont l'instinct de détection de l'eau est bien supérieur à la technique de recherche de l'homme, s'installe évidemment et exploite ces zones suralimentées en régions arides, comme il exploite les sols des

.../..

régions abondamment arrosées ; des sujets magnifiques se développent et forment des forêts plus ou moins longiformes, épousant les limites de la suralimentation.

La suppression des forêts-galerie, par tronçons (il ne faut pas inutilement détruire les arbres) correspondant aux villages riverains serait une mesure radicale et simple. Il n'y a pas de crainte à avoir concernant les pertes latérales car la maigre brousse, au-delà de la forêt-galerie, ne sera pas une cause de déperdition importante. Il peut en être autrement dans le sens longitudinal surtout si les alluvions du lit sont très perméables, et la longueur des tronçons déboisés devra varier comme le coefficient de perméabilité des alluvions.

Ici on n'a pas à craindre que la suppression de la forêt entraîne l'érosion des sols et la dépense se limitera donc à l'abattage des arbres ou à l'incendie si les produits d'abattage ne sont pas utiles aux populations riveraines ou d'une valeur commerciale justifiant l'abattage, le débitage et le transport.

Lorsqu'il n'existe pas de belle forêt plus ou moins longiforme dans les zones de concentration des ruissellements mais seulement une densité plus forte ou une vigueur plus grande de sujets identiques à ceux de la brousse, c'est qu'une des deux conditions impératives - ou les deux - ne sont pas remplies.

- b) Si c'est le temps de submersion qui est insuffisant, en regard de la perméabilité, un aménagement par petits barrages successifs augmentant les temps de submersion suralimentera les terres. Ceci a été abondamment pratiqué par les Romains en Afrique du Nord : il y a de bonnes traditions qui se perdent. Le nombre de leurs réalisations de cette nature est la meilleure preuve qu'on puisse apporter de leur efficacité. Si les premières expériences avaient été désastreuses en n'aurait pas multiplié, pendant des siècles, des ouvrages de ce genre. DESSOLIERS, reprenant la technique, a créé une source à sa ferme, près de TENES.
- c) Si c'est l'épaisseur de terres ou d'alluvions perméables qui est insuffisante (minimum deux mètres) le problème est plus délicat. En général d'ailleurs, pour des raisons relevant de l'hydraulique superficielle, il y aura aussi insuffisance des temps de submersion.

.../...

Supposons que la solution d'un barrage de 3 mètres de hauteur créant une retenue d'eau ait été jugée inopérante, en raison d'une insuffisance des apports liquides relativement à la capacité créée, ou dangereuse pour l'approvisionnement d'aval. Il faut alors édifier, à l'aval de la zone d'épaisseur maximum d'alluvions, un barrage de 1 mètre à 1 m.50 de hauteur, légèrement perméable, créant une sédimentation d'éléments non argileux et augmentant les temps de submersion.

Dans tous les cas, évidemment, il faudra déboiser et veiller à entretenir ce déboisement. Il n'est pas inutile de rappeler le cas de KIDAL (Territoire du SOUDAN, Cercle de GAO) où un barrage d'inféro-flux a été construit mais où la végétation arbustive, en deux années, a doublé de vigueur, mobilisant à son profit le surplus d'eau que l'homme avait cru pouvoir se réservier.

IV - 5 -

Mares non pérennes -

Les mares sur réseaux hydrographiques sont la conséquence de seuils édifiés par des accumulations de sédiments transportés par des affluents ou par les vents, que le cours d'eau ne peut éroder en raison d'une puissance de transport solide trop faible en regard de la granulométrie et du volume des apports. Les seuils s'exhaussent plus ou moins rapidement ; de même les mares se comblent plus ou moins rapidement. Certaines, peu nombreuses en zones semi-arides, ont une profondeur et une alimentation suffisantes pour être pérennes ; d'autres, la grande majorité, ne conservent d'eau que jusqu'en Décembre-Janvier. Les riverains et pasteurs creusent alors des puisards et, généralement, le niveau d'eau baisse très rapidement d'une dizaine de mètres, profondeur à laquelle il devient difficile de poursuivre les puisards.

Que le seuil ait été édifié par l'homme (voir ci-dessus) ou par la nature les conséquences sont identiques : augmentation des temps de submersion, enrichissement ou création de nappe ; de même sont identiques les mesures à prendre pour protéger les réserves.

*

* *

.../..

V. - E X E M P L E S -

V.- I

ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE CONAKRY

AUGMENTATION DES DEBITS ETAGE DES SOURCES CAPTEES
EQUIPEMENT D'ECONOMIE MIXTE

Dans l'introduction nous avons dit qu'il était possible, dans les régions à forte pluviométrie, non seulement de créer des sources ou d'améliorer le régime de celles existantes, mais aussi de permettre la création de zones de cultures et une meilleure exploitation des forêts au sein desquelles les périmètres de suralimentation des nappes auraient été aménagés.

Nous avons montré (IV 2a 2°) que le problème des pertes latérales d'une zone suralimentée en eau d'infiltration était d'autant plus facilement résolu que le périmètre traité était plus vaste.

Dans l'introduction nous avons aussi insisté sur la nécessité absolue de bien connaître les conditions au départ, au moins pour les premières réalisations, afin de pouvoir déterminer très objectivement les améliorations obtenues et à quel prix. Nous y avons enfin recommandé de ne pas traiter des cas désespérés.

Nous avons donc recherché, parmi les problèmes étudiés au cours de notre mission 1955-56, ceux pour lesquels les conditions au départ étaient bien connues et, parmi ceux-ci, s'il en était permettant une réalisation à une certaine échelle, rentable immédiatement et susceptible d'évoluer vers un équipement d'économie mixte comme il est dit ci-dessus. Une telle situation se présente dans les ~~impluviums~~ des sources et forages alimentant CONAKRY et nous avons, en conséquence, dressé un schéma de ce qui pourrait y être entrepris ; nous disons bien schéma et non projet car il serait prétentieux de vouloir préciser des détails avec la seule documentation dont nous disposons.

a) L'alimentation en eau de CONAKRY. Evolution des besoins et moyens d'y faire face -

La consommation en eau potable de CONAKRY était d'environ 8.000 m³ par jour en Mars 1956. L'examen des consommations des années précédentes traduisait un accroissement d'environ 25 % par an. En tenant compte d'un certain amortissement de l'accroissement, la consommation atteindra 16.000 m³ jour en 1960 et environ 30.000 m³-jour en 1965.

.../...

Les besoins ont été satisfaits, en premier lieu, par la dérivation des petits cours d'eau de la partie septentrionale Est de la presqu'île du KALOUM, puis par des forages exploitant par pompage des nappes à proximité de CONAKRY dont on poursuit l'extension pour satisfaire à l'accroissement de la demande. Jusqu'à ce jour on n'a pas eu à imposer de restrictions, grâce au développement et au succès des forages. Il est bien certain qu'on arrivera à une limite d'exploitation des nappes. Il est difficile de préciser quelle est cette limite et dans combien de temps elle sera atteinte mais, en raison du taux d'accroissement rapide, les services responsables se préoccupent de recenser les ressources éventuellement mobilisables. L'étude de l'adduction des eaux à partir du barrage des Grands Chutes a montré que la dépense (environ un milliard de francs) ne pourrait être envisagée que lorsque la consommation atteindrait des chiffres beaucoup plus élevés que ceux actuels. On a donc recherché des moyens qui ne comporteraient pas des charges financières trop lourdes et notamment examiné si des barrages réservoirs modestes pourraient contribuer à l'augmentation progressive des ressources. On a tout d'abord étudié les sites dans les vallées à proximité et au-dessus de la conduite d'alimentation de la ville. Aucun site n'a pu être retenu à cause des problèmes techniques délicats que posait la nature des terrains. On a alors recherché des emplacements de barrages réservoirs à proximité de CONAKRY en admettant *a priori* qu'il faudrait pomper dans les réserves superficielles comme on le fait dans les nappes.

Ces recherches ont abouti à la conclusion qu'un seul barrage pouvant être envisagé, sur le KAPORO. Les études sont en cours. Les ressources complémentaires permettront de satisfaire l'accroissement des besoins pendant quelques années, puis le problème se reposera. Il est bien évident que toute solution qui aurait pour effet d'augmenter notablement les débits des sources et nappes contribuant actuellement à l'alimentation serait préférable à l'adduction depuis les grandes Chutes.

Cette considération aboutit naturellement à la recherche de mesures limitant l'évapotranspiration. Mais, en raison de l'importance de la pluviométrie à CONAKRY (4.300 m/mén) il ne peut être question de déboiser considérablement. En contrepartie, l'abondance de la pluviométrie permet d'espérer que les périmètres traités et convenablement protégés contre l'érosion puissent être livrés à la culture,

.../..

- 1°) Si les pentes sont fortes, l'action du gradient sur la rapidité du drainage est probablement plus importante que celles des pertes par évapotranspiration. Le rendement serait donc faible, en même temps que les dépenses seraient élevées pour protéger le sol déboisé contre l'érosion. On classera donc automatiquement les terrains à forte pente (plus de 10 %) dans les zones à boisement protégé.
- 2°) Les terrains à faible pente à proximité des cours d'eau et les lits majeurs de ceux-ci seront déboisés systématiquement. On pourra vérifier que ce sont les zones où les sujets sont les plus vigoureux.
- 3°) Il serait inutile de traiter des mamelons même à forme très adoucie qui porteraient des sujets chétifs, indices d'une perméabilité élevée et d'une nappe éloignée en saison sèche. Il sera bon de vérifier, cependant, que la faible taille n'est pas le résultat d'un déboisement (ou d'un incendie) relativement récent.

La technique du traitement sera simple : après déboisement et dessouchage, organiser le sol comme en matière de restauration des sols pour faciliter l'infiltration par des banquettes épousant les lignes de niveau et exécutées aux engins de terrassement (bull ou angle dozer). Pour que l'amélioration puisse être mesurée par différence des débits d'étiage il faut évidemment que la surface traitée représente une certaine proportion minima (30 % environ) du bassin versant.

c) Extension aux bassins d'alimentation des nappes exploitées par forages -

La technique s'applique à la suralimentation des nappes exploitées par les forages bien qu'on ne puisse exactement délimiter les bassins d'alimentation. On pourra, moins facilement que dans le cas précédent, déterminer l'effet des mesures prises. Nous pensons toutefois que les possibilités de la nappe du KAKINBON sont maintenant suffisamment connues pour qu'on puisse y percevoir une amélioration sensible.

d) Valeur économique du traitement des sols -

On peut estimer que tout moyen qui permet le report d'un mètre cube d'eau de l'hivernage vers la saison sèche, pour parer au déficit des sources, à une valeur, en capital, voisine de 100 francs.

Les dépenses de traitement des sols seront fonction essentiellement de la technique du déboisement. Nous supposerons que si l'on impose de ne pas incendier la forêt, c'est que les bois auront une valeur commerciale justifiant un supplément de dépense par rapport à l'incendie contrôlé par des tranchées pare-feu préalablement exécutées. Les dépenses de création de banquettes varieront de 20 à 40.000 Fr l'ha. Si l'on admet comme limite supérieure de la dépense totale 100.000 Fr/ha cette dépense est justifiée si elle permet le report vers la saison sèche de 1.000 m³/ha soit 100 m/m de hauteur d'eau. Cette hauteur d'eau représente la dixième partie de l'évapotranspiration de la forêt en saison sèche. On dispose donc d'une grande marge de sécurité concernant le rendement économique de l'opération. Ce rendement sera d'autant meilleur que les parcelles d'un seul tenant seront de plus grande superficie (moindre coût des tranchées pare-feu, moindre dépense en accès, moindre coût du traitement des sols, superficie suffisante pour l'exploitation agricole ultérieure).

Ajoutons enfin qu'on mettrait à la disposition des agriculteurs des terrains déboisés et nivelés en banquettes et il est probable que l'augmentation du revenu (différence entre revenu agricole et revenu forestier) justifierait à elle seule les dépenses, d'autant plus qu'en GUINÉE les problèmes de l'évolution démographique imposent, entre autre choses, une augmentation des productions alimentaires.

V.- 2 -

AUTRES EXEMPLES -

Pour mettre en évidence le caractère général des méthodes d'enrichissement ou de protection des nappes phréatiques le mieux est encore de reprendre toutes les études faites lors de notre mission 1955-56 (mission SOGREAH) et d'examiner pour chacune d'elles l'incidence de mesures qui auraient pour effet de diminuer l'évapotranspiration.

Pour IN TILLIT (Rapport N° 1)

On a envisagé tout d'abord de construire un barrage puis ensuite, de surcreuser la mare. Il est certain qu'aucun ouvrage de génie civil ne serait indispensable si la végétation arbustive abondante entre la mare et l'ancien barrage était détruite. En tout cas, si l'on surcreusait la mare et que l'on adjoigne ou non une digue aval, il faudrait supprimer la végétation parasite pour pouvoir garantir un minimum d'eau en année très sèche.

.../...

Des conclusions de même nature seraient tirées pour :

- KIDAL (rapport N° 3)
- TABALAK (rapport N° 5)
- THEM (rapport N° 8)
- SONDO-TONKA (rapport N° 9)
- NIKKI (rapport N° 10)
- DJOUGOU (rapport N° 11)
- DAOUKRO-KPEGBE (rapport N° 14)

Si, des études faites, on excepte celles où un barrage était justifié pour atteindre des buts autres que la seule alimentation en eau et qui sont :

- N° 4 YALOGO barrage-gué
- N° 6 GOUBI-MARADI équipement d'hydraulique agricole
- N° 7 KEITA-ADOUNA " " " surtout
- N° 15 Lacs de BAM et DJIBO équipement d'économie mixte
- N° 16 LIGUIDI MALGUEM Barrage-gué
- N° 17 KOYA équipement économie mixte

Les solutions "génie civil" c'est-à-dire barrage ou puits sans complément de limitation de l'évapotranspiration resteraient applicables à :

- N° 2 IN ALLATA
- N° 12 TANGUIETA
- N° 13 DASSA ZOUME
- N° 18 KAPORO

A IN ALLATA la brousse est chétive dans la future retenue mais, en raison de la nature dunaire des sols et des alluvions qui se déposeront, la végétation se développera sur le pourtour de la retenue et IN ALLATA ne sera pas une exception, dans l'avenir.

A TANGUIETA où les solutions " barrages de retenue " apparaissent inopérantes et où les sols sont quasi nus les études sont orientées vers la création de nappes par submersion des terres au moyen de petits barrages. Si la lutte contre l'évapotranspiration n'est pas applicable c'est qu'il n'y a pas encore de végétation.

A DASSA-ZOUME le cas est vraiment particulier pour les recherches d'eau en profondeur dans les failles , mais dans le cas du barrage étudié en premier lieu il aurait fallu, nécessairement, limiter l'évapotranspiration.

Au KAPORO le barrage doit avoir au moins 15 mètres de haut et la retenue sera pleine certainement tous les ans. La limitation de l'évapotranspiration ne se pose pas pour la réserve proprement dite mais nous avons vu, dans le paragraphe précédent, qu'elle se posait pour les débits d'étiage.

L'analyse qui précède, les observations et études faites en d'autres cas, postérieurement à la mission de 1955-56, permettent de tirer les conclusions suivantes :

1°) - Lorsque le but principal à atteindre est l'alimentation en eau de l'homme et des troupeaux la solution par limitation de l'évapotranspiration suffit à procurer les ressources recherchées, dans la grande majorité des cas. Comme c'est incontestablement la solution la plus simple et la plus économique son emploi doit être généralisé et son domaine d'application n'être limité que par des considérations sur l'érosion des sols ou la conservation des couverts.

2°) - Même dans les cas d'équipements d'économie mixte la limitation de l'évapotranspiration inutile est un complément nécessaire en prévision des années très sèches. Ce n'est que dans le cas de réserves profondes ou très étendues que l'effet en serait insensible.

VI. -

- CONCLUSIONS -

Cette note a eu surtout pour but de mettre en évidence l'importance de l'évapotranspiration et d'attirer l'attention des Ingénieurs sur l'intérêt de l'observation des phénomènes qui affectent les nappes phréatiques en A.O.F. et de l'extension à ces nappes des études systématiques déjà entreprises sur l'hydrologie superficielle. Mais, répétons-le, il faudra au cours des études, en exécution et en exploitation, recueillir un minima de documentation pour pouvoir établir le bilan des opérations effectuées ; il faudra aussi, au début, éviter de s'attaquer aux cas limites tels que faible pluviométrie ou submersion de courte durée sur des couches-magasins peu épaisses et de faible perméabilité.

JUILLET 1957

H. DUQUENNOIS