



BRGM

B. R. G. M.
20. OCT. 1988
BIBLIOTHÈQUE



ARIDIFICATION :
ÉTUDE DES DÉTERMINISMES
ET
DES CRITÈRES D'IDENTIFICATION
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Denis KANDEL

JUIN 1988
88 SGN 615 GEO

TABLE DES MATIERES

	Page
Avant Propos	1
Introduction	2
CHAPITRE I - DEFINITIONS	3
1 - La désertification	3
2 - Distinction entre les concepts d'aridité et de sécheresse	4
2.1 - L'aridité	4
2.2 - La sécheresse	4
3 - L'aridification : définition et problématique	6
CHAPITRE II - ANALYSE GEOGRAPHIQUE DE L'ARIDIFICATION	8
1 - Analyse des cartes des zones arides et de désertification dans le monde	8
2 - Analyse géographique de l'aridité	8
3 - La sensibilité à l'aridification	10
CHAPITRE III - LES DETERMINISMES DE L'ARIDIFICATION	12
1 - Causes et processus de la désertification et leur implication dans l'aridification	12
1.1 - La surexploitation des terres cultivées	12
1.2 - Le surpâturage	13
1.3 - L'éradication des espèces ligneuses	13
1.4 - La salinisation et l'alcalinisation des terres	14
2 - Indices et critères pour l'évaluation de l'aridification	14
2.1 à 2.3	14
3 - Modifications climatiques d'origine anthropique	15
3.1 - Mécanismes	15
3.2 - Controverses	17
4 - Fluctuations climatiques en tant que facteur d'aridification	17
CHAPITRE IV - ETUDE CLIMATOLOGIQUE DE L'ARIDITE	20
1 - Notion de variabilité temporelle du climat	20
2 - Notion de variabilité spatiale et temporelle de l'aridité	20
2.1 - La variabilité temporelle	20
2.2 - La variabilité spatiale	20
3 - Traits généraux du climat aride	21
3.1 - Principaux déterminismes climatiques de l'aridité	21
3.2 - Les facteurs de l'aridité	22
3.2.1 - Les facteurs atmosphériques	22
3.2.2 - Les facteurs géographiques	22
3.3.3 - Les facteurs cosmiques	22
4 - Indices et critères d'aridité climatique	23
5 - Hydrologie des zones arides	23
5.1 - Les précipitations	26

	Page
5.2 - La demande évaporative de l'atmosphère : ETP	26
5.2.1 - L'évaporation du sol	26
5.2.2 - L'évaporation du sol par les plantes	27
5.3 - Hydraulique du sol en zone aride	27
5.3.1 - Hydraulique superficielle des zones arides	27
5.3.1.1 - Les écoulements superficiels	27
5.3.1.2 - Le comportement hydrique des sols	28
5.3.2 - Hydraulique souterraine	29
CHAPITRE V - INDICES MORPHOGENIQUES D'UNE ARIDIFICATION	31
1 - Figures d'altération de la surface, liées à l'aridification	31
1.1 - Microtraits de l'altération pédologique	31
1.2 - Phénomènes d'huméctation - dessiccation	34
1.2.1 - Les gilgais	34
1.2.2 - Les fentes de dessiccation	34
1.2.3 - Les fentes de dessiccation géantes	37
1.2.4 - Les fissures annulaires	37
1.3 - Diminution de la fertilité des sols et salinisation	37
2 - Modes de transport et migration de matière en zones d'aridification	41
2.1 - L'érosion en ravins	41
2.2 - Ravinement d'anciennes dunes fixées	41
2.3 - Types de dépôts éoliens en contexte d'aridification	43
2.3.1 - Les saupoudrages	43
2.3.2 - Les drapages	43
2.3.3 - Les dunes vives	43
3 - Sensibilité et types d'érosion selon les principaux sols	45
4 - Dégradation de la végétation selon les types de substrat	45
Glossaire des termes vernaculaires utilisés	51
Conclusion	53
Annexe 1 : Le Sahel, un exemple de désertification - aridification	55
Annexe 2 : Evaluation des moyens de lutte contre l'aridification	61
Bibliographie	72

AVANT-PROPOS

Rédigée au cours du premier semestre 1988, cette synthèse bibliographique est le résultat d'un stage effectué par Denis KANDEL, étudiant à l'IGAL*.

Ce travail fait le point sur certains aspects de l'aridification. Il doit fournir des éléments de réflexion pour plusieurs projets internes du BRGM, ainsi qu'un argumentaire pour les appels d'offres de la CCE, concernant la gestion des sols en milieu tropical et sub-tropical.

Cette étude a été faite essentiellement à partir de documents écrits en français. Seuls quelques ouvrages en anglais ou allemand ont été consultés, ce qui limite bien évidemment la quantité de données disponibles.

Il s'agissait de rendre compte des principaux processus générateurs d'une aridification décrits par les auteurs, qu'ils soient d'origine climatique comme anthropique et leurs traductions propres sur le terrain, en tant qu'indices d'une dégradation du milieu.

Enfin, précisons que l'essentiel de la bibliographie consultée et des exemples utilisés sont tirés d'études concernant la zone sahélienne, bien étudiée et caractéristique du grave problème qu'est l'aridification, dans certaines régions arides ou semi-arides. La décennie 1963-73 s'est superposée à une forte pression humaine sur l'écosystème. La désertification a nourri et aggravé l'aridification.

* Institut de Géologie Albert de Lapparent
21 rue d'Assas - 75270 PARIS CEDEX 06

INTRODUCTION

La sécheresse catastrophique qui a sévi entre 1963 et 1975 au Sahel a éveillé l'attention de l'homme sur le sujet de l'aridification, considéré dès lors comme un problème pressant à résoudre. Devant l'urgence de la situation, ce phénomène est perçu comme irréversible et suggère l'idée d'un "désert en marche". Les régions semi-arides et plus particulièrement les bordures des déserts sont certes, des zones très sensibles aux moindres variations climatiques. Mais, ces régions souffrent déjà, le plus souvent de dégradations et modifications biotopiques et pédologiques dûes à une mauvaise gestion ou une inadéquation de l'exploitation des ressources naturelles par l'homme. Si l'aridification se superpose à une désertification anthropique, les processus de dégradation du milieu sont très rapides, de grande ampleur et irréversibles, à l'échelle humaine au moins. La zone concernée tend, par l'ensemble des processus morphogéniques d'aridification, vers un modèle désertique.

Nous tenterons de résumer les principales causes d'une aridification régionale, puis les différents processus physiques agissant sur l'environnement qui en résultent. Puis nous pourrons donner les indices marqueurs d'une aridification ainsi que les modelés qui résultent de ces deux mécanismes.

CHAPITRE I - DEFINITIONS

1 - LA DESERTIFICATION

La désertification résulte d'actions humaines qui rompent les équilibres naturels fragiles dans les régions en marge des déserts : déboisement, surexploitation des terres et surpâturage. Si la sécheresse contribue à accélérer ces processus, elle n'est pas le moteur d'une "avancée" du désert. Cette dégradation de l'écosystème en contexte climatique chaud est irréversible à l'échelle humaine et suppose une modification des processus d'érosion, de transport et de dépôt, donc du modelé.

En 1968, LE HOUEROU définissait la désertification "comme un ensemble d'actions qui se traduisent par une réduction plus ou moins irréversible du couvert végétal, aboutissant à l'extension de paysages désertiques nouveaux. Les paysages sont caractérisés par la présence de regs, de hammadas et d'ensembles dunaires".

Cette notion d'irréversibilité des processus caractérisant la désertification est importante à considérer. Il faut faire nettement la distinction entre **dégradation** et **désertification** : une partie des surfaces dégradées peuvent faire l'objet d'une régénération de la végétation et des sols, alors que les surfaces désertifiées le sont d'une façon irréversible. Sont arbitrairement considérées comme désertiques les zones situées au-dessous de l'isohyète moyen annuel 100 mm, peu influencés par l'homme et qui présentent un potentiel de production et de probabilité d'évolution très faible : ergs, regs, hammadas, chotts.

De même, il faut nuancer la notion de désertification. On peut considérer comme désertifiée pour le pâturage une zone défrichée où la végétation pérenne productive ne pourra se réinstaller d'elle-même. En revanche, le sol, à ce stade et avant l'érosion, n'a pas perdu son potentiel de production pour la culture. La désertification au niveau du sol se traduit avant tout par l'érosion et par la dégradation de ses propriétés physico-chimiques. Sous climat aride, le facteur limitant de production étant surtout l'eau, c'est la diminution de l'aptitude à emmagasiner l'eau utile à la production végétale qui peut être considérée comme le critère le plus important d'appréciation de la désertification.

Entre les notions de dégradation et de désertification intervient la notion temps.

En effet, à longue échéance, et en l'absence de pression humaine (mise en défens), tous les milieux de la zone concernée peuvent se régénérer, au moins partiellement, et voir leur productivité potentielle augmenter.

On considère donc classiquement comme définitivement désertifiées, pour une utilisation du sol donnée, les surfaces des écosystèmes qui resteraient vraisemblablement à leur niveau de productivité minimale actuelle malgré 25 ans (une génération humaine) d'aménagement ou de mise en défens.

Les progrès de la désertification peuvent prendre la forme de mouvement de sable et d'empiètements de dunes, de crues éclairs, d'un envasement et d'un ravinement des bassins hydrographiques dégradés, tous phénomènes qui se soldent par une perte de terres productives. En tant que problème humain, ils peuvent se traduire par une réduction de la charge utile en bétail, une diminution des récoltes, un affaiblissement progressif des revenus ou du bien-être social et une baisse de population dans la région concernée.

2 - DISTINCTION ENTRE LES CONCEPTS D'ARIDITE ET DE SECHERESSE

2.1 - ARIDITE

L'**aridité** est d'abord un fait **climatique** majeur actuel qui règne dans des zones du globe relativement stables à l'échelle humaine (séculaire à millénaire) : on sait qu'elle se caractérise par des précipitations annuelles faibles (moins de 150 à 200 mm en moyenne) à distribution très irrégulière dans le temps comme dans l'espace, et notablement inférieures à l'évaporation potentielle annuelle. En zone aride, il pourrait s'évaporer 10 à 20 fois plus d'eau qu'il n'en tombe chaque année, en moyenne.

La comparaison entre les précipitations et l'évaporation potentielle, exprimée par divers **indices d'aridité** (qui ne diffèrent que par les durées de référence considérées et les modes de calcul de l'évaporation potentielle, ou "capacité de l'atmosphère à faire évaporer l'eau du sol") permet de mesurer des **degrés d'aridité** variés - d'où les concepts de zones semi-aride, aride et hyper-aride... - et de cartographier leurs extensions respectives (cf. fig. 1).

On admet actuellement qu'il y a aridité dès que le tapis végétal cesse d'être saturé à la suite d'un déséquilibre dans le bilan hydrique, c'est-à-dire lorsque la quantité d'eau apportée par les précipitations est insuffisante pour assurer le développement normal de la végétation.

L'aridité est en fait le reflet presque immédiat d'un climat sec et chaud, essentiellement caractérisé par des précipitations faibles et irrégulières donc, mais également par des températures élevées et des vents desséchants. Le facteur évaporation (E), dû à cet état climatique, apparaît comme particulièrement aggravant, puisqu'il va neutraliser en grandes parties les précipitations (P) et, de plus, minimiser les eaux de ruissellement issues de ces précipitations ou de celles qui peuvent avoir une origine extra-désertique, comme les eaux du sous-écoulement des fleuves ou de nappes souterraines. Cette définition est sensiblement modifiée pour ce qui est des déserts littoraux où l'aridité résulte uniquement de l'absence de précipitations. L'atmosphère y accuse en effet une humidité relative élevée, et l'évaporation se trouve ainsi considérablement réduite. Dans ces régions, l'aridité est d'ailleurs très atténuée. De cette humidité atmosphérique résultent des condensations au sol qui semblent avoir un certain rôle dans le développement de la vie.

L'aridité d'une région se traduit donc par une indigence en eau, mesurée au sol et dans l'atmosphère. Cette indigence provient d'abord d'une variabilité temporelle des faibles précipitations qui se combine ensuite avec une grande variabilité spatiale du comportement hydrique des sols et de la transpiration du couvert végétal. Ce qui peut nous amener à compléter le concept d'**aridité climatique** par celui d'**aridité édaphique**, relié lui-même à celui des besoins en eau et d'alimentation du végétal. En effet, les sols ne présentent pas les mêmes réactions à l'aridité climatique et l'on parle alors de la notion d'**efficacité de la pluie**, ou des réserves potentielles en eau des sols. Enfin cette indigence ou absence d'écoulement superficiel (**arésisme**) est trahi par un réseau hydrographique dont l'activité est essentiellement souterrain et **endoréique**, dans les régions arides et hyper-arides.

2.2 - LA SECHERESSE

La sécheresse est un concept hydrométéorologique, qui se traduit avant tout par une situation **conjoncturelle**, plus ou moins momentanée ou prolongée, pouvant

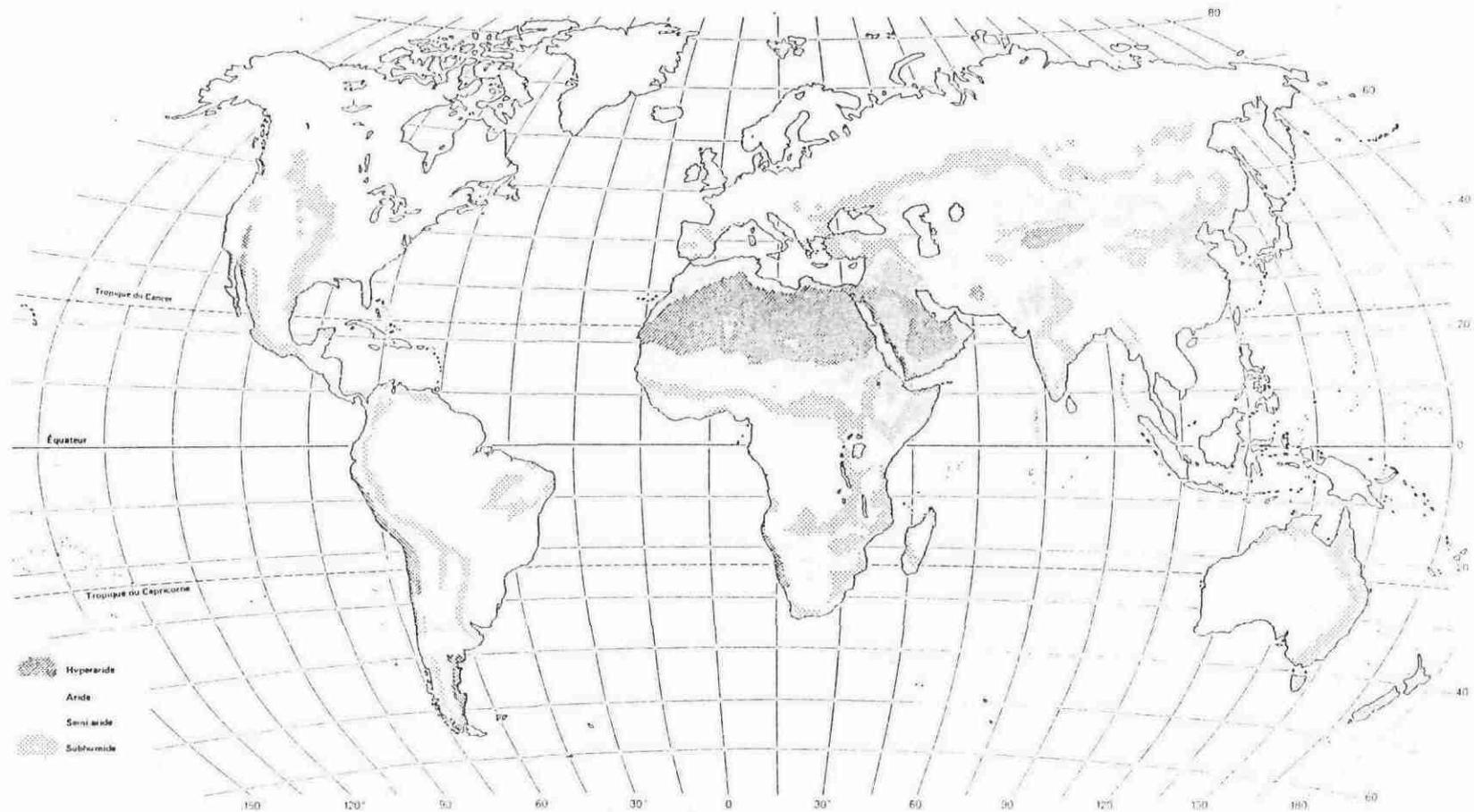


FIG. 4 — Répartition des régions arides dans le Monde. d'après *Nature et Ressources*, UNESCO, XX, 1, 1984.

FIG. 4 — Distribution of arid regions in the World.

(réf. 30)

survenir en toute zone climatique (humide aussi bien qu'aride) : il y a des zones arides et des périodes de sécheresse. La sécheresse qualifie une situation d'occurrence d'eau "déficitaires", caractérisée par des écarts négatifs accusés de diverses variables hydrologiques par rapport à leur état présumé moyen, dit parfois "normal" ou médian, pour une région ou une zone climatique donnée : apports d'eau météorique pendant une période définie, écoulements annuels ou en étiage, état d'humidité du sol ou de réserve d'eau souterraine... ; ce qui correspond à autant de variétés de sécheresses non indépendantes, mais distinctes : défaut de précipitation (faible pluviosité), faible hydraulité, étiage extrême, sécheresse du sol, tarissement de source et bas-niveau de nappe souterraine... la sécheresse peut encore, selon la période considérée, être saisonnière, annuelle, pluri-annuelle...

Dans tous les cas, la définition de la sécheresse, en termes d'intensité et de durée de l'écart à un état de référence, est conventionnelle (relative à cet état) et fréquentielle.

"La description des périodes de sécheresse, suivant la variable considérée et la convention adoptée, est donc d'abord l'objet de graphiques représentant les chroniques de ces variables et, accessoirement, de cartes de distribution spatiale d'écart entre des index caractéristiques de la situation et les valeurs moyennes de référence (hauteur de précipitations ou volume écoulé pendant la période visée exprimés en pourcentage de la "normale"...)" (MARGAT, BRGM).

Les caractères principaux de la sécheresse sont donc :

- une répartition aléatoire dans le temps ;
- une uniformité spatiale sur de vastes zones ;
- une persistance durant de nombreuses années ;
- une périodicité et une intensité telles qu'elle peut modifier un écosystème ;
- c'est un phénomène inéluctable à long terme, où l'homme ne joue aucun rôle.

Mais la sécheresse n'entraîne pas à elle seule, à court terme, une dégradation des ressources du type de celle que l'on constate aujourd'hui dans les régions subissent la désertification. Elle accélère souvent cette détérioration mais, en général, les écosystèmes naturels récupèrent. Ainsi, dans la zone soudano-sahélienne, une sécheresse prolongée s'est superposée à une surexploitation du milieu par l'homme, et a contribué à la désertification de ces régions. Ce déséquilibre provient essentiellement d'un accroissement de la population, d'une expansion des cultures extensives, d'une déforestation qui en résulte et d'une urbanisation rapide (concentration de la demande de bois de chauffe).

3 - L'ARIDIFICATION : DEFINITION ET PROBLEMATIQUE

C'est l'ensemble des processus traduisant une baisse du bilan hydrique du complexe air - surface - sol de la région concernée. Cette indigence d'eau provient soit d'une diminution des réserves potentielles en eau du sol, de la surface et de l'atmosphère par augmentation du pouvoir évaporatif ou par diminution des capacités de stockage du sol, soit par une diminution de l'efficacité des précipitations.

Mais que ce déficit hydrique soit d'origine anthropique à court et moyen terme, ou climatique à long terme, il se traduit toujours par une perte de productivité biologique et par l'individualisation de processus morphogéniques à tendances désertiques à la surface du sol.

En effet, ces processus anthropozoogènes de dégradation du milieu, d'autant plus intenses et rapides que l'aridité climatique est simultanément forte, traduisent un renforcement de l'aridité : bilan hydrique stationnel devenant de plus en plus défavorable, augmentation de l'albedo, baisse de la rugosité à la surface du sol, disparition d'un substrat meuble pour les végétaux.

Les manifestations de l'aridification sont souvent sournoises et difficiles à diagnostiquer car il s'agit de phénomènes précurseurs de l'extension des conditions désertiques au-delà des limites des déserts ou de leur intensification à l'intérieur de ces limites. Elles peuvent donc sévir en zone aride comme en zone sub-humide. Dans ce dernier cas, l'aridification se manifeste par taches de quelques hectares, par l'ablation de quelques millimètres de sol par an, ou des diminutions du couvert végétal, ou de sa production annuelle.

Il s'agit pour nous de décrire l'ensemble des phénomènes propre à une augmentation de l'aridité d'une région, qu'ils soient d'origine anthropique ou non et qu'ils aboutissent ou non à un contexte hyper-aride.

CHAPITRE II - ANALYSE GEOGRAPHIQUE DE L'ARIDIFICATION

Les régions touchées actuellement par le phénomène d'aridification correspondent déjà à presque toutes les zones arides chaudes du globe à la suite, comme nous l'avons vu, d'une sécheresse généralisée et d'une surexploitation du milieu par l'homme. Les régions s'étendent normalement le long des tropiques, sauf sur les façades orientales des continents. Elles constituent une bande large d'une vingtaine de degrés de latitude et s'étendent, en moyenne, entre les isohyètes 200 et 700 mm. Le régime des précipitations, lié à la dynamique de l'atmosphère et à l'intensité du rayonnement solaire au travers d'une atmosphère très sèche, détermine sur terre cette "ceinture désertique", largement développée dans l'hémisphère Nord, riche en masses continentales.

1 - ANALYSE DES CARTES

Le concept de désertification, d'origine anthropique et à connotation économique, traduit le plus souvent une aridification, pour les raisons climatiques et d'exploitation humaine, particulièrement sévères aujourd'hui. Ainsi, les risques les plus graves d'une aridification coïncident sensiblement aux régions dont le risque de désertification est le plus élevé (cf. fig. 2). L'aridification touche aussi bien des zones "aride" (ex. bordure N. saharienne) que "sub-humide" (ex. Nordeste, Brésil ; SE Espagne ; S du Sahel) (cf. fig. 1 et 2). Il existe donc des liens directs entre le degré d'aridité d'une zone et les risques d'aridification qui la menacent.

2 - ANALYSE GEOGRAPHIQUE DE L'ARIDITE

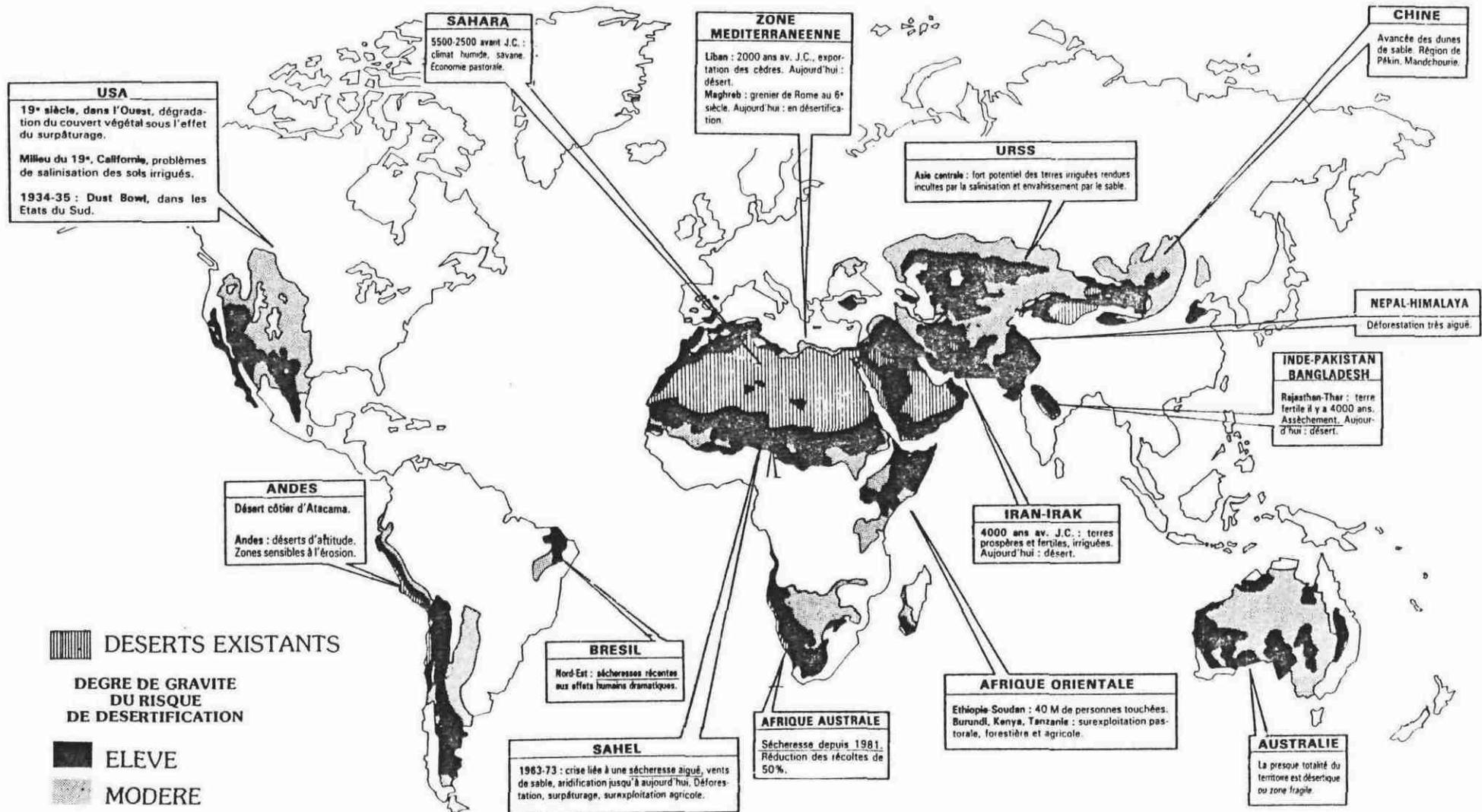
La diversité et l'inégale répartition des régions arides (s.l.) est frappante. Il y a des différences essentielles entre les centres et les marges et d'une zone à l'autre, en fonction des reliefs et des continents.

On peut distinguer quatre types de localisation :

- les grandes masses homogènes désertiques, axées sur le tropique (ensemble saharo-arabe) ;
- les bandes arides allongées occupent les façades occidentales des continents (Kalahari) ;
- les enclaves semi-arides de très basses latitudes, proche de l'équateur, voire le long de celui-ci (Péninsule indienne, Somalie, zone soudano-sahélienne) ;
- enfin, on remarque l'allongement en latitude de certains déserts côtiers (Amérique du Sud et du Nord, côte ouest).

Les régions arides chaudes sont dûes essentiellement à l'existence de chapelets de cellules d'air continental, sec et subsident, correspondant à des hautes pressions subtropicales. Les anticyclones ne sont pas favorables au déclenchement de la pluie. Ils sont en effet le siège de phénomènes de subsidence, où l'air descend et tend à se tasser avant de diverger en surface. Dans ces conditions, l'air se réchauffe et s'éloigne de son point de condensation. Les anticyclones maintiennent en quelque sorte une protection contre les perturbations pluvieuses, telles qu'il en passe plus au nord ou plus au sud. Le rôle des anticyclones et leur aspect est différent selon la saison.

«DEPUIS DES MILLENAIRES, L'HOMME AVANCE, ET LA TERRE RECULE»



LE DESERT MENACE 20% DES TERRES EMERGEEES ET LA VIE DE VINGT MILLIONS DE PERSONNES

EXTRAIT DE « HALTE AU DESERT », OCT. 85
CRDP

Un second facteur atmosphérique se manifeste dans le parallélisme établi entre courants atmosphériques humides et reliefs montagneux ou côtiers. Une telle disposition interdit tout effet orographique, au point qu'une région maritime pourra être intégralement soustraite aux pluies si ces conditions se maintiennent toute l'année (cas de la partie la plus orientale des Somalies, où les moussons indiennes alternées demeurent parallèles à son front de mer).

3 - LA SENSIBILITE A L'ARIDIFICATION

La grande sécheresse qui a frappé la frange circumsaharienne entre 1968 et 1973 a servi de révélateur mettant en évidence la fragilité des écosystèmes prédésertiques et la perturbation profonde de leur équilibre écologique. En effet, même dans les zones qui ont connu un retour à une situation pluviométrique "normale", il ne semble pas que le rétablissement des équilibres écologiques antérieurs puisse être réalisé rapidement.

La destruction du couvert végétal pérenne, de la fragile structure des sols par surexploitation et une sécheresse prolongée contribuent à l'aridification de nombreuses régions du Monde.

Sécheresse et désertification sont donc responsables de profondes modifications de l'environnement des zones arides ou semi-arides chaudes, qui correspondent déjà à 37 % des terres émergées du globe, dont 45 % de la surface totale sont stériles (critères fondés sur la végétation, la nature et la composition des sols). Or, depuis 25 ans, 150 millions d'hectares ont été ajoutés à la superficie régulièrement cultivée de la planète, soit un rythme de 6 millions d'hectares par an, et à la destruction totale annuelle de 200.000 à 300.000 hectares de surface exploitée dans le Monde.

Déjà 650.000 km² ont été "grignotés" au Sud du Sahara, de l'Atlantique à la Mer Rouge en quelques décennies et à ce rythme, un tiers de la terre arable actuellement exploitée sera perdu d'ici 20 ans.

Les risques de stérilisation des terres menacent 25 % des terres d'Australie, 20 % de l'Afrique et de l'Asie, 10 % de l'Amérique du Sud. L'aridification sévit au Botswana, Kenya, Tanzanie, Ethiopie, Soudan (1958-1975, avancée du désert de plus de 100 km dans le NW, au rythme de 5-8 km/an soit près de 20 m par jour, en moyenne !), Mauritanie, Tunisie et de nombreuses régions d'Asie, ...

Mais l'aridification n'est pas un phénomène linéaire mais fragmentaire, ce qui explique d'ailleurs l'inégalité des contraintes en matière d'exploitation des terres et la différence, d'un endroit à l'autre, du degré de vulnérabilité des zones arides. La notion de sensibilité à l'aridification est d'autant plus difficile à saisir qu'elle dépend du degré d'aridité préexistant sur la région concernée et que tous les types de milieu ne présentent pas la même réponse aux diverses actions de l'homme et du climat. Les risques d'aridification sont fonction déjà des trois principales zones hydrométriques :

- près de la zone désertique (< 100 mm de précipitation par an), où la dynamique de reconstitution de la végétation et des sols est faible, les conséquences d'une sécheresse prolongée sont irréversibles ;
- dans la zone aride, où l'aridification est la plus accentuée et la plus rapide, surtout dans la zone des 100 à 200 mm de précipitations annuelles et où l'écosystème est en position de rupture ;

- dans la zone semi-aride (250 - 600 mm), les risques d'aridification sont caractéristiques d'une désertification, en raison de l'attrait économique et de la densité de population que représente cette zone. Pour une même zone climatique, la **sensibilité potentielle à l'aridification** dépend :
- pour la végétation : du type physiologique de la composition botanique, de la biologie et de l'adaptation des espèces, de l'état actuel du couvert végétal, de la vitesse de cicatrisation de la végétation (GODRON et POISSONET, 1972), etc. ;
- pour les sols : de l'épaisseur des horizons biologiquement actifs, de la texture, de la forme du terrain, de la pente, de la structure et des qualités physico-hydriques des sols...

Ces critères de sensibilité du milieu, modulée par l'attractivité pour les activités humaines et par les caractères géoclimatiques de la région, déterminent la **sensibilité globale** d'une unité de milieu à l'aridification.

Nous concluons en disant que les unités biogéographiques très sensibles à l'aridification sont essentiellement localisées dans les régions à forte densité de population rurale, et que les zones climatiques les plus touchées par ce processus correspondent à l'étage bioclimatique méditerranéen saharien, à méditerranéen aride inférieur.

CHAPITRE III - LES DETERMINISMES DE L'ARIDIFICATION

Deux facteurs interviennent de façon certaine dans le processus d'aridification : la sécheresse périodique des zones à climat aride et l'usage que fait l'homme des terres de ces régions. Il est indispensable de tenir soigneusement compte des deux, étant toutefois bien entendu qu'ils ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Cette interconnexion même complique singulièrement l'analyse des signes visibles. Il faut mentionner deux autres sources de difficultés. La première réside dans les lacunes que présentent les relevés climatiques des zones "arides", où les stations météorologiques sont encore très espacées et, parallèlement, l'absence de mesures systématiques d'évaluation de la couverture végétale. La seconde est que l'étendue des dégradations, causées par l'aridification, varie en fonction des périodes sèches et humides et d'un type de sol à un autre.

Ainsi, l'étude de l'aridification du point de vue de l'écosystème et de l'environnement est beaucoup plus complexe que celle du seul climat. L'aridification est, comme nous l'avons déjà dit, marquée soit par une diminution des capacités de rétention en eau du sol et de la surface, soit par une baisse de la pluviosité, soit bien sûr par les deux à la fois. L'homme peut modifier ces deux paramètres de façon plus ou moins directe, considérant que l'apparition de l'un de ces critères d'aridification entraîne à terme le second.

Ainsi, nous présentons dans un premier temps les causes de la dégradation du milieu d'origine anthropique (désertification), puis les modifications climatiques, qui découlent ou non de cette dégradation mais qui sont liées à l'activité humaine ; puis nous abordons les variations climatiques "naturelles" à l'origine d'une aridification.

1 - CAUSES ET PROCESSUS DE LA DESERTIFICATION ET LEUR IMPLICATION DANS L'ARIDIFICATION

1.1 - LA SUREXPLOITATION DES TERRES CULTIVEES

C'est l'une des causes majeures de la désertification. Elle est principalement liée à l'accroissement de la population et à l'abandon des pratiques culturelles traditionnelles au profit de l'extension agro-pastorale et de la mécanisation :

- extension anarchique de la céréaliculture et de l'arboriculture, le plus souvent au dépens des meilleurs pâturages ;
- généralisation de la céréaliculture dans les zones d'épandage des eaux de ruissellement (seguí), sans aménagements spéciaux, avec toutes les conséquences sur l'érosion ;
- abandon de la jachère traditionnelle ;
- exploitation des terres marginales ;
- généralisation de la mécanisation agricole (charrue polydisque tractée avec des tracteurs).

Ces mises en culture inconsidérées livrent les sols à l'érosion mécanique et détruisent la structure des horizons superficiels par effritement des agrégats en poussière. Les particules fines et meubles sont alors emportées par le vent ou par ruissellement. Sur les remblais sablo-argileux, aux sols en général profonds et bien évolués, la culture extensive accélère les ravinements.

La couche arable, le plus souvent très fine, est alors éolisée et il se constitue une couche durcie, impropre à la culture.

1.2 - LE SURPATURAGE

Si la mise en culture croissante a abouti à la diminution des surfaces laissées aux parcours, le cheptel n'a pas diminué, bien au contraire. Au Soudan, le bétail a été multiplié par six en vingt ans et est passé de 0,4 à 14,4 millions de têtes en dix ans alors que les surfaces disponibles pour l'élevage passaient de 15 à 11 millions d'hectares dans le même laps de temps. En plus de la raréfaction des espèces appétantes et du développement d'espèces inhalibles, le surpâturage entraîne la réduction du couvert végétal des espèces vivaces et de leur phytomasse et par la même ouvre la porte aux processus de la dégradation des sols. Le piétinement trop important est également un facteur défavorable. Ces phénomènes sont accentués par la raréfaction de la grande transhumance et la sédentarisation de la population autour des puits et des périmètres irrigués.

Le piétinement par le bétail est responsable du décapage de la couche superficielle des dunes fixées ; du compactage et de l'étanchéisation du sol qui en résultent, ainsi que de la désagrégation de l'horizon superficiel, susceptible alors d'être éolisé.

1.3 - L'ERADICATION DES ESPECES LIGNEUSES

Au début du 19ème siècle, l'hémisphère Sud totalisait 3,5 milliards d'hectares de forêts. Il n'en reste plus que 2,2 milliards d'hectares aujourd'hui. L'Afrique, avec 2,7 millions d'hectares de pertes annuelles est le continent le plus touché.

Les causes en sont multiples. En trente ans, les importations de bois durs et "rares" ont été multipliés par quatorze. De même, parce que le sol n'a plus sa fertilité d'antan et que l'intervalle entre deux récoltes se raccourcit, le défrichement est responsable de la disparition de 100.000 km²/an de forêt tropicale. Ce qui a pour conséquence la disparition de la couche d'humus (il faut 3000 ans pour obtenir 30 cm d'épaisseur d'humus sous ce climat) et donc la latérisation des sols.

Les feux de brousse, pratiqués en fin de saison sèche, détruisent une grande population arbustive, surtout jeune et freinent la capacité de renouvellement. Au cours des années sèches, et dans une moindre mesure en années "normales", le bétail, et en particulier les chèvres, consomment les feuilles et les jeunes pousses, aidé dans cette agression par la pratique de l'ébranchage : les hommes coupent des quantités considérables d'arbres pour s'en servir comme bois de feu et comme bois d'oeuvre. Il s'agit sans doute là de l'action la plus destructrice. Des agglomérations comme Niamey ou Ouagadougou devaient aller se ravitailler en bois à 60 km en 1975, après avoir tout consommé à l'intérieur de ce périmètre. Le rayon d'alimentation atteint environ 150 km aujourd'hui ! Il faut actuellement au Sahel 270 kg de bois par personne et par an, en zone rurale et près de 360 kg/pers./an en zone urbaine. L'approvisionnement se fait essentiellement sur la steppe et préférentiellement sur les espèces buissonnantes qui sont arrachées, ce qui nuit à la régénération ultérieure.

Les conséquences sont multiples : déstabilisation des sols qui, sur les versants, engendre le décapage des formations meubles et le creusement de ravins ; élévation de l'albedo de surface ; raréfaction des espèces pérennes ; destruction de l'horizon humifère des sols.

1.4 - LA SALINISATION ET L'ALCALINISATION DES TERRES

Le développement de l'irrigation, ainsi que la mauvaise utilisation des eaux (en général saumâtres), contribuent à l'augmentation des surfaces stérilisées par le sel et donc à une diminution de la productivité. Ce phénomène est le résultat de l'évaporation et de la remontée par capillarité des eaux chargées en sels dissous, faute d'un drainage approprié et continu. Le sol apparaît alors en surface et seul un drainage constant peut laver le sol des sels précipités.

L'homme, en de telles circonstances, a des réflexes de chasseur-cueilleur néolithique, et il n'est pas encore vraiment responsable d'un terroir. L'action la plus radicale d'origine humaine en vue d'une aridification du milieu est la dégradation de la végétation. Et l'évolution de la biomasse végétale aérienne totale permet de quantifier la dégradation ou la régénération de la végétation donc de l'écosystème.

Si pour une raison ou une autre, le couvert végétal est détruit, la partie supérieure du sol est soumise à l'érosion éolienne et hydrique, les particules sableuses enlevées par le vent s'accumulant alors en des endroits privilégiés sous la forme primaire de voiles sableux puis de dunes vives. Le processus de déflation de la surface du sol se stabilise lorsqu'une couche plus compacte du sol est atteinte ; il reste alors à la surface du sol des éléments très grossiers (cailloux et graviers) et la partie supérieure des couches du sol les plus dures. Il en résulte que la pénétration de l'eau dans le sol est considérablement réduite. Les espèces pérennes qui ont résisté à ce processus ont du mal à survivre, et d'une façon générale, annuelles et pérennes ont du mal à germer. Sur ces surfaces "glacées" l'eau ruisselle facilement provoquant le gonflement des oueds et l'apparition de processus d'érosion hydrique (formation de rigoles et ravines) : l'aridité s'accroît. Cette modification du paysage s'accompagne d'une baisse de la productivité du milieu : la matière organique du sol disparaît ainsi qu'une partie des éléments nutritifs ; diminution de l'aptitude des sols à emmagasiner l'eau utile à la production végétale ; diminution du dynamisme de la végétation spontanée.

2 - INDICES ET CRITERES POUR L'EVALUATION DE L'ARIDIFICATION

Divers phénomènes physiques ont été utilisés comme indicateurs de dégradation et de désertisation.

2.1 - Pour les sols, il s'agit de la diminution du taux de matière organique dans le sol, de la désorganisation de la structure des horizons supérieurs du sol, de l'ablation des couches superficielles, de l'augmentation des dépôts éoliens et du constat de l'accroissement potentiel de l'albedo.

2.2 - Le nombre de jours de vent de poussières et l'abondance de "ripple marks" sur les formations sableuses (NOVIKOFF, 1976) ont également été proposés.

2.3 - Pour la végétation, les critères retenus peuvent être la réduction du couvert végétal, la diminution du nombre d'espèces, leur déchaussement, la réduction de la capacité de charge.

Si le caractère essentiel de la désertisation d'une région est la régression de sa productivité biologique, le principal facteur limitant de la production végétale est la quantité d'eau mise à la disposition des végétaux. Et pour suivre la diminution de la capacité du stockage de l'eau dans le sol, nous proposons les indices suivants :

2.3.1 - La diminution de la réserve en eau maximum disponible pour la végétation, ou réserve utile de la tranche du sol exploitable par les racines.

2.3.2 - L'augmentation du coefficient de ruissellement primaire du sol en année à pluviosité importante. Cet indice, lié à la désorganisation de la structure du sol et à la régression du couvert végétal, rend compte pour chaque système de l'état de la surface élémentaire du sol.

2.3.3 - La diminution relative de la production végétale spontanée consommable par les animaux, en année pluvieuse ; en effet, la pluie n'étant plus dans ce cas le facteur limitant, la production végétale permet une juste appréciation de la dégradation du sol.

Ces trois indices, non indépendants, concernent tous le bilan de l'eau et ses effets jugés sur la végétation.

Pour conclure, nous dirons que l'action de l'homme aboutit à modifier la réponse du couvert végétal à une **oscillation climatique**, et toujours dans le sens d'une dégradation.

3 - MODIFICATIONS CLIMATIQUES D'ORIGINE ANTHROPIQUE

Il s'agit là de voir les conséquences de l'activité humaine sur les conditions climatiques des régions en voie d'aridification.

En effet, la dégradation des écosystèmes et des sols en zones arides a une influence néfaste sur le régime climatique de ces régions.

3.1 - Les mécanismes de cette rétroaction positive sont les suivants :

3.1.1 - Augmentation de la poussière et d'autres aérosols dans la haute atmosphère.

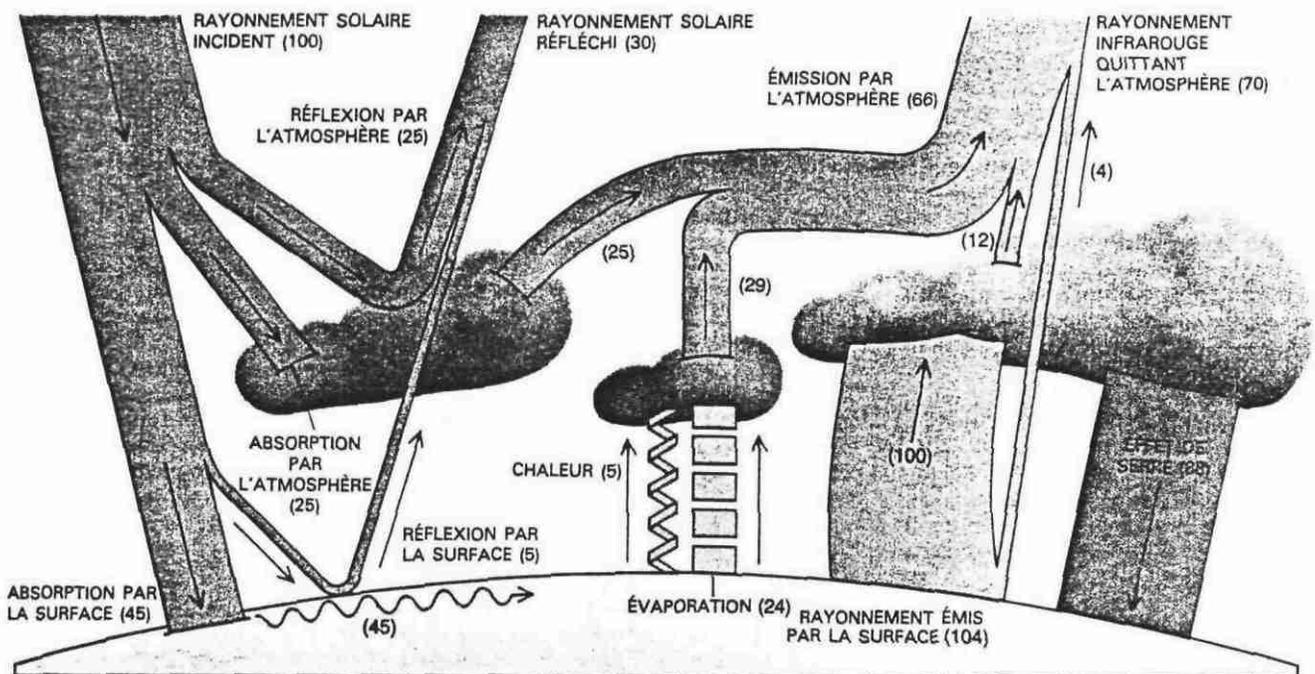
3.1.2 - Diminution, par suite de la réduction de la végétation, du nombre des **noyaux glaçogènes organiques** dans l'atmosphère, provoquant une baisse de la pluviosité.

3.1.3 - Elévation de l'albedo de la surface terrestre dans les régions très dégradées : les sols, plus clairs, réfléchissent une plus grande fraction de l'énergie solaire, ce qui provoque un bilan d'énergie déficitaire, compensé par une lente descente des masses d'airs. Comme l'air qui descend s'échauffe et s'assèche, la sécheresse se trouve renforcée. L'accroissement de l'albedo s'accompagne également d'une baisse de la température superficielle et donc d'une diminution de la convectivité, avec les pluies violentes dont elles s'accompagnent.

3.1.4 - Augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ provoquant une élévation générale de la température, du fait de l'absorption du rayonnement solaire infrarouge par le CO₂. C'est le fameux "effet de Serre" (cf. fig. 3).

3.1.5 - Diminution de l'évapotranspiration, par suite de la baisse de capacité de stockage des sols surexploités. Ce qui a pour conséquence de réduire la pluviosité, dans les zones continentales.

3.1.6 - Enfin, certains accusent le désoutage des pétroliers en pleine mer qui serait responsable d'un accroissement de l'albedo et d'une diminution de l'évaporation par l'existence d'une pellicule superficielle. Il y aurait alors



5. L'EFFET DE SERRE résulte de la rétention des infrarouges par l'atmosphère terrestre. Le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et certains autres gaz laissent passer la lumière visible (en bleu), qui constitue la plus grande partie de l'énergie solaire, mais ils absorbent

les rayons infrarouges (en rouge) émis par la Terre et en renvoient la plus grande partie vers la surface (en rouge foncé). L'accumulation dans l'atmosphère de gaz à effet de serre entraîne un échauffement de la surface de la planète.

Pour la Science. Juillet 1987

Fig. 3 (Réf. 39)

augmentation de la température de l'air et création d'une haute pression peut propice à la formation des nuages.

3.2 - CONTROVERSE

Le sens dans lequel agissent certains de ces facteurs, comme l'augmentation de la poussière dans la troposphère, demeure sujet à controverses ; certains facteurs, comme la poussière et le CO₂ peuvent s'annihiler mutuellement. La controverse la plus récente concerne le taux de CO₂ de l'atmosphère. Il y a aujourd'hui environ 25 % de CO₂ en plus qu'au siècle dernier, et selon Syukuro MANABE, Richard WETHERALD et Ronald STOUFFER (Lab. de géophys. et de dyna. des fluides (GFDL), Univ. de Princeton), 2 ou 4 fois plus de CO₂ impliquerait :

- des fortes sécheresses estivales dans les zones céréalières ;
- une augmentation de l'humidité du sol dans les zones à moussons.

Quant au professeur KIMBALL (départ de l'agriculture des USA - Phoenix, Arizona) :

- un doublement de la teneur en dioxyde de carbone serait responsable de l'augmentation de 33 % de la production agricole mondiale ;
- un taux de 36 % supérieur à l'actuel élèverait de 20 % la production actuelle de soja.

Selon lui, la photosynthèse des plantes vertes et du phytoplancton absorberait le CO₂.

Si, à ce stade, il est raisonnable d'admettre que certains de ces facteurs ont pu accentuer la rigueur du climat en zone aride ou sub-aride, il est tout à fait improbable qu'ils constituent la cause première des graves sécheresses survenues récemment. Il est aussi vraisemblable que les conséquences physiques plus directes de certaines des causes supposées - et notamment les effets de la dégradation de la surface sur le microclimat, le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation - ont été infiniment plus importantes que les modifications éventuelles du macroclimat.

Ce qui est sûr, également, c'est que nous modifions actuellement notre environnement plus vite que nous ne parvenons à comprendre les conséquences climatiques de nos actes.

4 - FLUCTUATIONS CLIMATIQUES EN TANT QUE FACTEUR D'ARIDIFICATION

Un certain nombre d'observations ont conduit à poser le problème de la responsabilité d'une éventuelle fluctuation climatique dans le processus d'aridification. En effet, depuis les années 1950-1970, des déplacements des ceintures de pressions zonales, associés à un refroidissement - notamment des eaux océaniques - dans les latitudes supérieures, ont quelque peu rapproché de l'équateur les anticyclones subtropicaux et rétrécis la bande de latitudes où se produit la convergence intertropicale, réduisant ainsi la pluviosité dans la zone de haute pression désertique, et notamment à sa bordure située du côté de l'équateur. Parmi ceux qui estiment qu'il s'agit d'un changement à long terme du régime climatique, certains s'appuient sur le fait que, dans le passé, la transition entre une période pluvieuse et une période non pluvieuse s'est étalée sur environ un siècle.

La mouvance des zones désertiques est fonction de l'axe de la terre et des périodes interglaciaires, qui reviennent selon un cycle de 100.000 ans environ. Cette descente en latitude du désert pourrait s'expliquer par le léger refroidissement (moins de 2°C) que l'on constate effectivement dans les régions arctiques depuis environ 4500 ans. Et la baisse de pluviosité au Sahel est un phénomène non pas circonscrit à une région du globe, mais à une nuance du climat de la planète.

Et il est sage de considérer que la sécheresse du Sahel, comme celle d'autres régions du globe, fait partie d'une fluctuation climatique ayant une période de l'ordre d'une à deux décennies - SCHNEIDER (1969), citant PIZARO et RIVAS (1965), souligne que "l'on ne saurait se référer à une tendance à long terme étant donné que certaines fluctuations pourraient très bien résulter de variations importantes du cycle climatique qui se superposent aux tendances à long terme s'étendant sur des périodes géologiques entières. Il est sans doute plus exact de parler d'un mouvement descendant des moyennes des précipitations".

De même, les climats de la zone qui borde le désert sont systématiquement caractérisés par une variabilité élevée, à laquelle les écosystèmes naturels et les systèmes de vie traditionnels sont bien adaptés. Mais il n'y a guère d'arguments décisifs en faveur d'une tendance persistante vers un climat de type différent. Il n'y a pas non plus de preuve convaincante de l'existence de quelques périodicités aussi courte.

Nous retiendrons les idées suivantes :

- l'aridification résulte plus de sécheresses ou de longues périodes de précipitations inférieures à la moyenne que d'une diminution progressive et générale du taux de précipitations au cours des siècles ;
- il n'est pas possible de mesurer l'importance décisive des variations climatiques en fonction de leur seule durée ou de leur seule amplitude physique ;
- la sécheresse coïncide avec une période de perturbations qui peut déboucher sur une diminution de la productivité des écosystèmes exploités par l'homme, et compte tenu des contraintes de l'exploitation des terres, ses conséquences peuvent se prolonger bien au delà de la période correspondant à l'évènement climatique en cause ;
- enfin, les indicateurs les plus fiables utilisés par les géologues pour reconstituer les données climatiques sont déréglés par les activités humaines, qui faussent de plus en plus les rapports entre le sol et l'atmosphère, donc la "stabilité" intrinsèque des moteurs du climat.

Durée et origines des principaux cycles climatiques
(d'après LANDSBERG, 1976)

	Durée	Origines connues ou probables
révolution climatique	plus de 1 million d'années	activité géotectonique (dérive des continents, orogénie, changement dans la répartition des terres et des eaux) ; variations possibles de l'émission du soleil
changement climatique	10 000 à 1 million d'années	changements périodiques ou apériodiques des émissions solaires ; changements de l'insolation d'origine astronomique
fluctuation climatique	9 ans à 10 000 années	tout autre changement climatique naturel, avec des durées dépassant 10 ans : activité volcanique, rythme des taches solaires, cycle de déclinaison magnétique, courants lents et profonds des océans
itération climatique	moins de 9 ans	ce sont des variations climatiques naturelles très courtes ; par exemple, les cycles d'années sèches ou pluvieuses
altération climatique	de l'ordre de quelques années à quelques décennies	Origine anthropique ; les effets peuvent être localisés ou être très étendus : augmentation des concentrations de CO ₂ , ou augmentation de l'albedo par surpâturage, ou déforestation ; ou encore, modifications locales par irrigation, drainage, urbanisation, etc.

Fig. 4 (Rf. 20)

CHAPITRE IV - ETUDE CLIMATOLOGIQUE DE L'ARIDITE

1 - NOTION DE VARIABILITE TEMPORELLE DU CLIMAT

La plupart des éléments du climat, le cycle de l'eau et des événements terrestres qui en découlent et plus spécialement les précipitations sont des variables mais qui évoluent concurremment suivant plusieurs échelles de temps. Le mot général exprimant les modifications de ce genre est "**variation**".

- Une modification de climat est une variation qui se poursuit pendant quelques décennies au moins.
- Une variation qui persiste pendant plusieurs décennies et à l'issue de laquelle les éléments retrouvent ensuite leur valeur originelle est appelée "**fluctuation climatique**".
- Une **tendance** est une dérive vers le haut ou vers le bas d'un caractère central, par exemple la moyenne de valeurs successives. S'il n'existe aucune tendance, la série de ces valeurs au cours du temps est alors dite **stationnaire**.

Le climat est généralement défini à partir de moyennes établies sur 30 ans au cours des périodes standards. La meilleure définition de la variabilité d'un climat repose sur la configuration typique de la variation au cours de périodes standards de ce genre. Les quelques variations se déroulent à très court terme et sont en général sans valeur pour la prévision, en particulier pour ce qui concerne les précipitations.

Pour ce qui concerne les facteurs météoriques du régime des eaux terrestres - notamment des alternances d'"humidité" et de "sécheresse" -, à une échelle de temps donnée, "on pourra le plus souvent discerner des évolutions tendancielle - voire des stabilités - avec des "festons" conjoncturels brodés de part et d'autre ; à une échelle de rang inférieur (par exemple séculaire si la précédente est d'ordre pluri-millénaire) une portion de l'évolution conjoncturelle précédente deviendra tendancielle et pourra elle-même être "bruitée" par des variations conjoncturelles à un rang encore inférieur (annuel)" (MARGAT, BRGM).

La définition d'un climat (zonal, régional) doit à la fois se rapporter à une durée, à laquelle se réfèrent les moyennes (ou "normales") des variables physiques qui en sont les facteurs et inclure toute la variabilité des situations - les "aléas climatiques" - interne à cette durée.

2 - NOTION DE VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE DE L'ARIDITE

Le tableau de la figure 4 rappelle quelques définitions proposés par LANDSBERG (1976), pour caractériser à différentes échelles de temps et même de l'espace, les cycles et les variations climatiques du globe, ainsi que leurs origines connues ou supposées. Dans ce qui suit, la notion de variabilité n'est applicable qu'à l'échelle de quelques décennies (itération, altération), mais c'est elle qui nous intéresse pour l'étude de l'aridification.

2.1 - LA VARIABILITE TEMPORELLE

C'est l'une des caractéristiques essentielles des régions arides. On constate sur l'ensemble du globe (Nations Unies, 1977) que plus la variabilité interannuelle des hauteurs de pluies précipitées est élevée, plus les conditions d'aridité sont

sévères. Cette variation de l'aridité est liée aux itérations climatiques, dues aux cycles d'années sèches ou pluvieuses.

Mais à toutes les échelles du temps, une variation climatique dans le sens d'une aridification s'accompagne toujours d'un grand nombre de petites oscillations en sens inverse.

2.2 - LA VARIABILITE SPATIALE

Conjuguée avec la variabilité temporelle, la variabilité spatiale de l'aridité prend alors une importance considérable.

Elle est principalement liée à la variabilité spatiale des précipitations, elle-même liée aux aléas de la circulation locale des perturbations sur une région, mais aussi aux modifications plus ou moins régulières de l'état de la surface de la terre qui entraînent des modifications importantes, au bilan d'eau et au bilan d'énergie. Ces deux dernières origines de la variabilité spatiale de l'aridité sont dues, pour une partie importante, à l'impact des activités humaines.

3 - TRAITS GENERAUX DU CLIMAT ARIDE

Le domaine aride se définit à partir des critères climatiques. Dans cette perspective, l'aridité se caractérise par l'existence d'un bilan hydrique déficitaire. Ce déficit résulte, pour l'essentiel, de l'insuffisance des précipitations par rapport aux prélèvements massifs de l'évaporation dus aux températures élevées. En réalité, de nombreux autres facteurs interviennent, qui compliquent la notion d'aridité. Car il importe de tenir compte du régime des précipitations comme de ces rapports avec le régime thermique, de l'insolation et du vent.

Au total, l'aridité découle du jeu complexe de plusieurs facteurs climatiques, influencés à l'occasion dans un sens favorable par l'intervention d'autres facteurs géographiques, tel le relief, ou encore par l'homme, ce qui aboutit, comme nous l'avons vu, à la désertification et à l'aridification.

3.1 - PRINCIPAUX DETERMINISMES CLIMATIQUES DE L'ARIDITE

Depuis 15 ans les définitions de la zone aride sont nombreuses. Parmi celles-ci, citons celle de MEIGS (1952, in SLATYER et MABUTT, 1964) : "l'aire de la zone aride est celle où la pluviosité sur une parcelle de terrain donnée n'est pas capable de fournir une production régulière, et celle de la zone semi-aride est caractérisée par une pluviosité permettant des cultures régulières à l'occasion d'une courte saison, et où les annuelles sont une partie importante de la production végétale spontanée". En 1958, l'UNESCO caractérise la zone aride de la manière suivante : "l'eau commandant les possibilités agricoles, et celles-ci les possibilités de vie humaine, l'aridité se traduit finalement par une incapacité du milieu de faire vivre dans des conditions normales une population sédentaire".

Les définitions, pour partielles qu'elles soient, ont le mérite de ne pas désigner le manque de précipitations et la température comme seules causes de l'aridité. Il est clair cependant que l'aridité est déterminée essentiellement par les conditions climatiques. "Elle apparaît comme un aspect du climat mondial, et dépend de certaines particularités de la circulation atmosphérique générale (HARE, 1961 in UNESCO, 1965).

On peut reconnaître trois caractères essentiels à l'aridité :

- séparation de la région de l'influence humide des océans par la distance et le relief ;

- formation de masses d'air chaud et sec, stables, résistants aux courants convectifs ;
- caractère très violent des précipitations entraînant une forte perte d'eau pour ces régions par ruissellement.

Une chose est certaine, les zones, réputées arides aujourd'hui, ne l'ont pas toujours été. C'est ainsi que si l'on considère seulement le Quaternaire, soit depuis la fin du Villafranchien, COQUE (1962) reconnaît 5 pulsations humides du climat en Tunisie Présaharienne. Toute la région présaharienne septentrionale est soumise depuis la fin du Néolithique à une pulsation aride.

Actuellement, la dégradation anthropique du couvert végétal entraîne une augmentation des maximums des températures, et celle du sol a pour effet de diminuer les capacités de stockage de l'eau. Ces deux types de dégradation conjugent leurs effets pour renforcer l'aridité d'origine climatique et masquent quelque peu la part de responsabilité des variations climatiques dans le processus d'aridification.

3.2 - LES FACTEURS DE L'ARIDITE

3.2.1 - Les facteurs atmosphériques

Le plus important d'entre eux est fourni par les anticyclones. Ceux-ci imposent une stabilité atmosphérique qui interdit ou minimise la thermoconvection, et immunise contre la pénétration des perturbations pluvieuses. L'inhibition pluviométrique ainsi obtenue est remarquable au-dessus des déserts chauds. Un second facteur atmosphérique se manifeste dans le parallélisme établi entre courants atmosphériques humides et reliefs montagneux ou côtiers. Une telle disposition interdit tout effet orographique, au point qu'une région maritime pourra être intégralement soustraite aux pluies si ces conditions se maintiennent toute l'année (ex. E. des Somalies).

3.2.2 - Les facteurs géographiques

Le parallélisme des flux et des reliefs relève aussi de ces facteurs. Ceux-ci montrent, en outre, une gamme très étendue de dispositions : éloignement en regard des sources d'humidité maritime (effet de continentalité) ; présence de barrières montagneuses interposées entre l'océan et les régions arides ; absence de reliefs (maintien de la sécheresse saharienne autour du massif du Hoggar, où l'on relève une certaine humidité) ; présence de hauts sommets qui pénètrent jusqu'au coeur des couches atmosphériques sèches d'altitude (déserts andins) ; écoulement des courants marins froids. Occasionnant l'inhibition pluviométrique à peu près totale, tout en assurant à l'air une forte humidité relative, ces courants marins sont responsables des déserts côtiers des latitudes subtropicales.

3.3.3 - Les facteurs cosmiques

Ils s'expriment par la radiation solaire. Là où celle-ci est maximale du fait d'une basse latitude, qui assure l'intensité des rayons, et d'une suffisante limpidité de l'air, qui en garanti l'arrivée au sol, intervient une chaleur massive propice à l'évaporation. Celle-ci est activée par la sécheresse de l'air, liée elle-même aux hautes pressions caractéristiques de ces régions. Mais les régimes thermiques de surface, qui dépendent de la nature du sol et du type de milieu, influent eux-mêmes les caractères microclimatiques d'une région et surtout les précipitations.

Les surfaces à forte réflexion (albedo), comme les croûtes gypseuses, les croûtes de sol, les sables clairs... ont une température inférieure aux surfaces plus absorbantes, comme les labours, les limons sombres, la boue...

Donc si l'albedo est élevé, le complexe air-surface du sol est plus froid. La végétation limite la pénétration du rayonnement solaire et la déperdition diurne du rayonnement terrestre. Un sol à recouvrement végétal important (steppe) à une température plus élevée que la surface d'un sol dénudé (albedo plus faible et circulation de l'air plus lente).

4 - INDICES ET CRITERES D'ARIDITE CLIMATIQUE

La plupart de ces indices font référence aux hauteurs de pluies précipitées, aux températures souvent extrêmes, moyennes du mois le plus chaud, ou moyennes des minimums du mois le plus froid, et aussi très souvent à la demande évaporative (ETP). Les indices sont en général calculés annuellement, parfois mensuellement, mais jamais quotidiennement. Nous présentons ainsi les tentatives les plus citées au cours de ces trente dernières années (cf. fig. 5).

Il faut reconnaître que, sans être contradictoires dans leur ensemble, ces indices ne sont pas toujours très explicites.

- La formule la plus célèbre est celle de Thornthwaite, qui fait intervenir l'évapotranspiration potentielle (ETP) et qui est d'ailleurs fort complexe et discutée.
- La plus simple est celle de Köpper, qui fixe des seuils limitant les régions arides et semi-arides ; pour que ce seuil d'aridité ne soit pas atteint, les pluies doivent être d'autant plus abondantes qu'elles sont concentrées en été, où l'évaporation est forte (cf. fig. 6).
- L'indice xérothermique de H. GAUSSEN et F. BAGNOULS totalise ainsi le nombre de jours biologiquement secs dans une année, en partant d'une définition conventionnelle de mois sec basée, pour l'essentiel, sur une comparaison des valeurs des températures et des pressions.

ALCOFORADO M.J. et al. (1971) ont établi une différenciation thermique à l'intérieur des domaines climatiques et ont pu, à partir d'un compromis entre les indices de GAUSSEN et RAYNAL, distinguer des zones d'aridité au Portugal (cf. fig. 7).

L'analogie des résultats obtenus par les différents indices est remarquable. On remarquera que le domaine aride s'étend aussi bien aux latitudes tropicales qu'aux latitudes moyennes.

5 - HYDROLOGIE DES ZONES ARIDES

Les climats arides ont pour caractéristique essentielle le manque d'eau. Celui-ci apparaît quand, pour une station donnée et dans une période donnée, les pertes sont supérieures aux gains. Les apports sont dus essentiellement aux précipitations, les pertes immédiates résultent de l'évaporation et de la transpiration des plantes (ET). L'état de l'atmosphère (sa pression, sa teneur en eau, et surtout sa température) détermine la quantité d'eau qui peut être évaporée et transpirée, qu'on appelle l'"ETP"; on la mesure en millimètres, comme les précipitations. Une faible part des précipitations échappe à l'évaporation et s'écoule localement ou alimente les nappes souterraines. A surface de bassin égale, les volumes d'écoulement sont beaucoup plus faibles qu'en zone humide.

quelques « indices » et critères climatiques d'aridité

le principe

observations

	le principe	observations
	INDICES ET CRITÈRES À VALEUR GÉNÉRALE	
Répartition des pluies moyennes annuelles.	Le degré d'aridité est considéré comme une fonction de l'apport hydrique atmosphérique.	Néglige les pertes (évaporation). Ne tient pas compte de la température
Diagrammes ombrothermiques de Gaussen.	Ils combinent pluies et températures. Un mois est sec si ses précipitations (en mm) sont inférieures au double de sa température moyenne (en degrés Celsius) [mois sec: $P < 2T$]. La confrontation de ces deux valeurs selon cette corrélation permet d'établir les périodes humides et sèches de l'année sur une station.	
Indice de Köppen.	Il combine températures, pluies totales et régimes pluviométriques. À supposer que les pluies tombent en toutes saisons, l'aridité s'exprime par $P - T + 7$, où P précipitations moyennes annuelles en centimètres, et T température moyenne annuelle en degrés Celsius. Il y a semi-aridité si $(T + 7) < P < 2(T + 7)$.	
Indices d'aridité de Marlonne.	1 ^{re} manière : intégration des précipitations moyennes annuelles (en mm) et de la température moyenne annuelle en degrés Celsius: $I = \frac{P}{T + 10}$ 2 ^e manière : combinaison, à l'indice précédent, de l'indice du mois le plus sec. D'où : $I' = \frac{I + i}{2}, \text{ où } i = \frac{12p}{t + 10}$ p et t étant les précipitations et températures du mois indigent.	Indices établis en vue d'étudier les modalités de l'écoulement Exemple : $T < 5$ exprime l'aridité.
Classification de Thornthwaite.	C'est une comparaison des apports d'eau aux pertes, sous un climat donné. Les pertes (dues à l'évaporation au sol et à la transpiration des plantes) se mesurent en fournissant aux surfaces évaporantes (sol et végétation) de l'eau en quantité suffisante. La mesure fournit donc, pour chaque climat, l'évapotranspiration potentielle (ETP), et permet les classements climatiques. L'ETP est d'ailleurs calculable à partir de sa fonction, qui est la température.	
	INDICES ET CRITÈRES À OBJECTIFS PLUS LIMITÉS	
Indice xérothermique de Gaussen et Bagnouls.	Classification des pays xérotères (a été secs et chauds) : domaine méditerranéen. Le principe est de recenser les jours arides au cours des mois secs. Les jours arides sont sans pluies et/ou à humidité relative inférieure à 40 p. 100.	Les mois secs : 1 ^{re} définition : $P < 2T$ 2 ^e définition : moins de 10 mm de pluie et moins de 10 °C; moins de 25 mm de pluie et $10^\circ < t < 20^\circ$; moins de 50 mm de pluie et $20^\circ < t < 30^\circ$; moins de 75 mm de pluie et $30^\circ < t$. L'indice xérothermique est fondé sur la 2 ^e définition.
Indice de Birot.	Il intéresse les pays méditerranéens. Le but est de mettre en évidence les mois arides, avec $I = \frac{P \times j}{T}$ où P précipitations du mois (en mm), j nombre de jours de pluie du mois, T température moyenne Tout mois dont l'indice est inférieur à 10 est sec.	Un mois au moins où $I < 10$ exprime le climat méditerranéen.
Coefficient d'aridité de Dubief.	Applicable aux pays africains arides. $D = \frac{P_u}{E_j}$ où P_u = précipitations utiles (ce qui reste après ruissellement), et E_j = évaporation par jour.	Revient à calculer le nombre des jours nécessaires pour évaporer la partie utile d'une précipitation

Fig. 5 (R.L. 25)

	non aride	semi-aride	aride
pluies en toutes saisons	$P > 2(T + 7)$	$P < 2(T + 7)$ $P > (T + 7)$	$P < (T - 7)$
pluies d'été	$P > 2(T + 14)$	$P < 2(T + 14)$ $P > (T + 14)$	$P < (T + 14)$
pluies d'hiver	$P > 2T$	$P < 2T$ $P > T$	$P < T$

- Indice d'aridité selon Koppen
P représente les précipitations moyennées annuelles en centimètres, T représente les températures moyennées annuelles en degrés Celsius.

Fig. 6 (Réf. 19)

Limites climatiques basées sur l'Indice Xérothermique de Gausсен selon différents auteurs (1).

	DOMAINE CLIMATIQUE	H. GAUSSEN (1968-69)	R. RAYNAL (1980)
	ATLANTIQUE	0	0
	SUB-MEDITERRANÉEN	0-50	0-40
Meso-méditerranéen ou "Sub-Humide"	atténué	50-85	40-75
	accentué	85-100	75-100
Thermo-méditerranéen atténué ou Semi-Aride	atténué ou "sécheresse modérée"	100-125	100-130
	accentué ou "sécheresse accentuée"	125-150	130-200

(1) Entre guillemets les noms suggérés par R. RAYNAL (1980).

Fig. 7 (Réf. 1)

5.1 - LES PRECIPITATIONS

Les précipitations peuvent être faibles dans une région pour plusieurs raisons :

- les courants atmosphériques sont tels qu'ils ne peuvent transporter vers elle que des quantités d'eau réduites ;
- et/ou il n'existe pas de mécanisme capable de déclencher les ascendances d'air indispensables à la formation de la pluie ;
- les deux peuvent jouer soit aux basses latitudes (où il existe des climats arides sans hiver), soit aux moyennes latitudes (où une période froide marquée existe). Il faut donc distinguer deux types de climats arides.

Les tendances de la pluviosité des zones arides sont difficiles à mettre en relief. S'il existe de nombreux témoignages de dessèchements passés qui ont été à l'origine de la progression des surfaces désertiques et de l'extension de la zone aride, il n'existe aucun argument permettant de prévoir sinon d'affirmer une tendance à la baisse de la pluviosité. On observe plus une aridification de la surface qu'une diminution de la pluviosité.

En effet, les moyennes des précipitations, dans les zones septentrionales arides surtout, sont trompeuses et la pluviosité totale varie beaucoup d'une année sur l'autre. Les quantités brutes de pluie ne déterminent que partiellement la productivité végétative et donc le degré d'aridité. En plus de la fertilité et de la structure du sol, la répartition des précipitations dans le temps et l'espace est cruciale. Elle peut suffire, même si les précipitations sont inférieures à la moyenne, et inversement.

5.2 - LA DEMANDE EVAPORATIVE DE L'ATMOSPHERE : ETP

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est un concept théorique. Elle correspond à la quantité maximum d'eau que peut absorber l'atmosphère. Elle est fonction du rayonnement net qui suit les variations saisonnières du rayonnement solaire global. Dire que l'ETP pour un mois est de 75 mm signifie donc que le pouvoir évaporant de l'air est tel pendant cette période qu'une tranche d'eau de 75 mm peut être prélevée. Si la quantité d'eau disponible est supérieure à l'ETP, l'"ETR" (évapotranspiration réelle) est égale à celle-ci, et il restera de l'eau pour la mise en réserve dans le sol et l'écoulement ; si l'ETP est supérieure à la quantité précipitée, toute l'eau est évaporée. On peut donc définir comme aride toute période où l'ETP est supérieure aux précipitations. Un climat est d'autant plus aride que la période déficitaire est longue et que le déficit est accentué.

Cette ponction d'eau s'effectue directement sur l'humidité ambiante de l'air, par le relais des plantes (évapotranspiration : ET), directement sur le sol (l'eau remonte par capillarité), ou encore à partir d'étendue d'eau (lacs, réseau hydrographique, eau d'irrigation, puits...).

5.2.1 - L'évaporation du sol dépend :

- du déficit de saturation de l'air ;
- de la pression barométrique, c'est-à-dire de l'altitude ;
- de l'agitation de l'air (vent) ;

- de la couleur du sol (albedo) ;
- de la chaleur spécifique du sol ;
- de la capillarité du sol ;
- de la concentration de l'eau en sel soluble ;
- de la profondeur de l'eau ;
- de l'état de fissuration du sol.

La profondeur à laquelle peut se faire sentir cette évaporation est d'autant plus grande que les particules sont plus fines, l'eau remontant d'autant plus facilement par capillarité qu'il y a plus de sels dissous, ceux-ci facilitant l'ascension, que la température est plus élevée, que l'eau est proche de la surface. Mais cette évaporation n'intéresse que les premiers mètres dans les régions arides.

5.2.2 - L'évaporation du sol par les plantes

L'évapotranspiration est d'autant plus grande que le système racinaire des plantes est profond. Il faut savoir que la végétation naturelle est toujours à son maximum et que donc la densité de la population végétale est proportionnelle à la quantité d'eau qui peut être mise à sa disposition dans le sol. La rareté de la végétation et l'absence de sol qui en résulte permettent donc une diminution de la reprise par évaporation et, par conséquent, une augmentation du coefficient d'alimentation. Ceci explique, avec la présence de très larges structures tectoniques, l'existence de très belles sources et nappes souvent artésiennes aux abords de certaines régions désertiques.

5.3 - HYDRAULIQUE DU SOL EN ZONE ARIDE

Il s'agit là de l'hydraulique souterraine et de l'hydraulique superficielle, qui dépendent des deux principaux facteurs climatiques précédemment étudiés, la pluviométrie et l'évaporation.

Il importe de mettre l'accent sur l'efficacité des précipitations. En effet, la productivité des terres arides dépend de la croissance de la végétation et de l'équilibre entre les apports d'eau du sol et les pertes d'eau enregistrées au-dessus et au-dessous du niveau du sol. L'homme peut modifier cet équilibre de manière négative : en Tunisie, on a calculé que l'érosion accélérée du sol avait correspondu au niveau régional à une perte de 5 mm de capacité du "réservoir sol" pour l'eau.

5.3.1 - Hydraulique superficielle des zones arides

5.3.1.1 - Les écoulements superficiels sont très discontinus et irréguliers dans le temps (rareté des cours d'eau permanents). La densité du drainage par des cours d'eau fonctionnels - même temporaires ou épisodiques - est minime, allant en zone hyper-aride à aride, jusqu'à l'aréisme : inexistence de réseau hydrographique organisé. Les volumes d'eau superficielle écoulee ne sont pas fonction de l'étendue des bassins versants - à apports météoriques équivalents - du fait des déperditions des écoulements formés localement, sous l'effet de l'évaporation : l'écoulement par unité de surface diminue à mesure que l'étendue des bassins s'accroît, beaucoup plus qu'en zone humide.

Dans les régions semi-arides du Sahel d'Afrique de l'Ouest, les volumes d'eau écoulee par unité de surface, de fréquence médiane, dans les bassins de plus de

10.000 km² sont ainsi 2 à 3 fois plus faibles que ceux produits dans des bassins de 100 à 500 km² (RODIER, 1977). Du fait de ces déperditions, ces volumes d'eau écoulée peuvent même décroître en valeur absolue, d'amont en aval, parfois jusqu'à s'annihiler.

Les réseaux hydrographiques sont l'héritage de périodes anciennes (à l'échelle géologique du Quaternaire) à climat plus humide, et leur fonctionnement actuel est "dégradé". Un endoréisme fonctionnel autant que structural est très répandu. Une aridification peut être marquée sinon décelée par une dégénérescence accrue de l'écoulement superficielle. Car il y a évidemment correspondance entre les sécheresses météorologiques et les régimes d'écoulement. La persistance durant 15 ans d'un déficit des précipitations dans tout le Sahel est à l'origine d'un très grave déficit général de l'écoulement (surtout en 1968, sauf au Tchad).

En région aride, les pertes d'eau d'écoulement sont accentuées par le caractère accidenté de la topographie de la région et une exploitation intensive du tapis végétal. La prédominance des pentes escarpées, de sols à granulométrie moyenne à fine, les dégâts infligés au tapis végétal ont favorisé l'écoulement en surface, entraînant une forte érosion de la couche superficielle et un ravinement occasionnel. Puis, la minéralisation rapide des substances organiques, qui sont insuffisantes, et le tassement des sols par le piétinement des troupeaux ont contribué à détruire la structure des couches superficielles.

5.3.1.2 - Le comportement hydrique des sols

La réserve en eau, utile à la végétation, que le sol peut emmagasiner, est très variable.

- Dans des sables grossiers à très grossiers cette réserve est inférieure à 5 mm pour 10 cm d'épaisseur du profil.
- Sur les terres limono-argileuses des seguis elle peut dépasser 20 mm pour 10 cm.

Ainsi, si l'on considère les principaux types de sol exploitable par les racines, la réserve utile en eau (ou capacité de stockage de l'eau disponible à la végétation) est égale : à quelques dizaines de millimètres pour les formations squelettiques gypseuses ou calcaires ; à 80 à 150 mm pour les formations sableuses ; en général à plus de 200 mm pour les formations limoneuses.

Mais cette réserve est rarement complètement "remplie" :

- les sols squelettiques calcaires ou gypseux perdent beaucoup d'eau par ruissellement ;
- les limons ont du mal à s'humecter en raison de leur caractère battant ;
- les sols profonds d'origine alluviale, mixte ou éolienne, de texture sableuse à sablo-limoneuse présentent parfois un drainage excessif, mais s'humectant plus facilement que les sols précédents, malgré la présence éventuelle de pellicule de battance.

Les sols qui présentent le meilleur comportement hydrique sont donc ceux qui offrent une infiltration rapide, peuvent stocker l'eau à moyenne profondeur grâce à un horizon "réservoir" limité par un obstacle à l'infiltration (croûte gypseuse), et qui sont protégés de l'évaporation par une diminution de la porosité capillaire de surface (mulch) quand la sécheresse survient. C'est le cas des sierozems et des sols sablo-limoneux légèrement ensablés (absence de pellicule de battance).

Il convient de tenir compte de ces paramètres pédologiques dans le cadre d'une évaluation de l'aridification d'une région, ou de sa politique d'exploitation agro-pastorale.

5.3.2 - Hydraulique souterraine

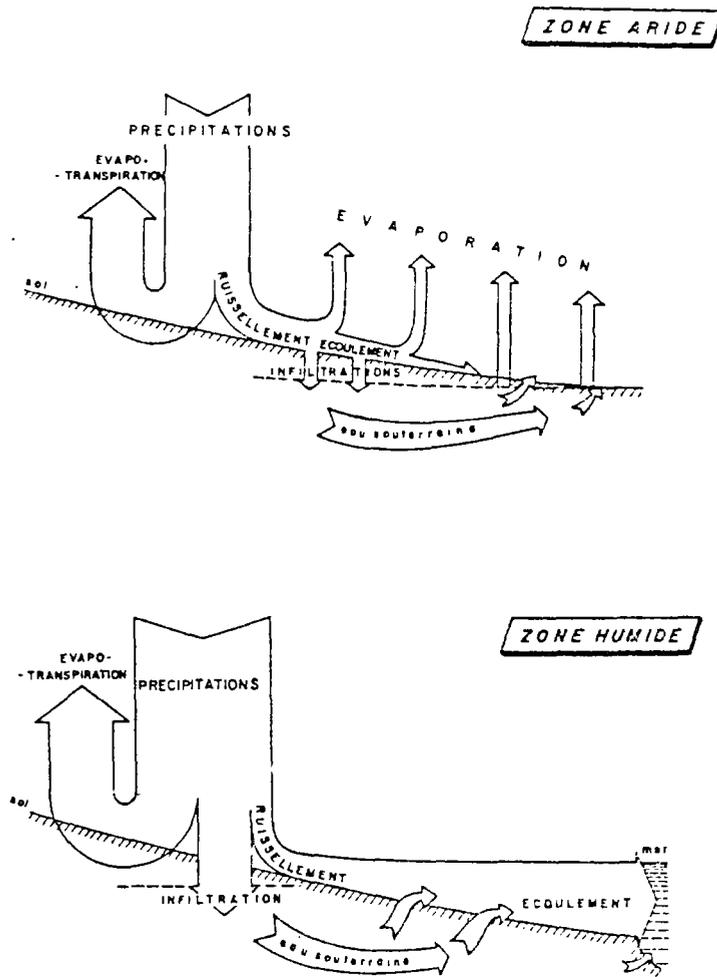
Les eaux souterraines sont la composante stable prédominante du cycle de l'eau terrestre. Elles sont alimentées par l'infiltration d'eau de ruissellement local et épisodique plus que par l'infiltration directe des eaux météoriques. Les nappes souterraines ne sont donc alimentées que par place et irrégulièrement (pas tous les ans) en zone aride. Les eaux des nappes phréatiques proches du sol sont exposées de manière extensive à l'évaporation, potentiellement supérieure aux apports.

La figure 8 du schéma général du cycle de l'eau en zone aride indique bien que celui-ci diffère de celui décrit classiquement en zone humide, tempérée ou tropicale.

La quantité d'eau tombée ne règle pas à elle seule l'alimentation des nappes. Si en effet les pluies ont lieu en saison chaude, l'eau est rapidement reprise par l'évaporation et une faible fraction de la pluie pénètre seulement dans le sous-sol et même le plus souvent n'y pénètre pas. Dans le cas contraire, comme en Afrique du Nord, le coefficient d'alimentation des nappes reste élevé.

La pluviométrie instantanée n'est pas non plus sous influence. En effet, ce qui caractérise entre autre les zones arides, c'est la soudaineté des pluies et la forte pluviométrie instantanée : il peut y avoir des chutes de plus de 100 mm à l'heure.

- C'est un facteur favorable à l'alimentation lorsqu'il s'agit de terrains perméables et en faible pente. Le ruissellement n'existant pas et l'évaporation ayant moins de prise puisque le contact avec le sol est moins long.
- C'est un facteur défavorable s'il s'agit de terrains peu perméables en ayant une certaine pente, car il y a alors un très grand ruissellement. C'est ce qui explique la soudaineté des crues des oueds.



- Schémas d'écoulement en zone aride et en zone humide, d'après Margat [1979].

Fig. 8 (Ref. 30)

CHAPITRE V - INDICES MORPHOGENIQUES D'UNE ARIDIFICATION

1 - FIGURES D'ALTERATION DE LA SURFACE, LIEES A L'ARIDIFICATION

Les liaisons biologiques sont assez ténues dans les écosystèmes arides surtout en période de sécheresse, de sorte qu'il se produit assez rapidement des transformations physiques : détérioration de la surface du sol, entraînant une diminution de l'infiltration et gênant la germination des végétaux (encroûtement ou scellement) ; érosion en nappe sous l'action de l'eau et du vent ayant pour effet d'arracher la couche superficielle du sol ; mouvements du sable ; envahissement par les dunes ; érosion par ravelines ; salinisation, pour aboutir finalement à une stérilisation et à un modelé de type désertique.

La cadence à laquelle se produisent ces transformations tend à être liée aux caractéristiques topo-édaphiques.

Les facteurs qui rendent les sols plus arides et plus vulnérables à la dégradation physique sont les suivants : absence de couverture morte qui puisse protéger la surface du sol contre l'encroûtement résultant de l'action conjointe de la pluie battante et d'un dessèchement excessif ; concentration de la matière organique et des substances nutritives dans les quelques centimètres superficiels du profil, toute érosion, même très superficielle, provoquant de ce fait un grave appauvrissement ; solonisation créant sous la couche superficielle mince et friable des horizons B massifs, à texture extrêmement contrastée qui facilite l'érosion en nappe et peut aboutir à mettre à nu l'horizon du sous-sol ; la surface de celui-ci étant pratiquement impossible à régénérer, cela ouvre la voie à une érosion progressive par ravelines ; concentration du calcaire à proximité de la surface, ce qui donne un sol friable, exposé à la déflation.

1.1 - MICROTRAITS DE L'ALTERATION PEDOLOGIQUE

Si, pour une raison ou pour une autre, le couvert végétal est détruit, la partie supérieure du sol est soumise à l'érosion éolienne et hydrique. La végétation est encore susceptible de se régénérer, à condition que les contraintes anthropiques et/ou climatiques (sécheresse) s'arrêtent avant le point de rupture de la stabilité physico-chimique du sol. Dans le cas contraire, il peut apparaître un certain nombre de caractères pédologiques qui traduisent une dégénérescence de la surface du sol qui traduit une aridification, le plus souvent irréversible (au moins à l'échelle humaine), voire une stérilisation du sol.

Les pellicules de battance

- Ce sont des formations de quelques millimètres d'épaisseur, se développant de façon continue ou discontinue à la surface du sol, de porosité plus faible, de rigidité plus grande que le substrat sur lequel elles reposent (1). Elles sont très développées en zone aride et sont très souvent corrélées à la raréfaction du couvert végétal, mais aussi à la disparition de l'action de l'homme et des animaux sur la steppe. Elles gênent le développement des végétaux et favorisent le ruissellement.
- Celles-ci présentent un certain enrichissement en éléments fins (argile et limons fins), en sel de calcium (sulfates et carbonates) et en matière organique, par rapport au substrat sous-jacent (cf. fig. 9).

(1) Ce substrat est soit un sol argileux ou limoneux donc à structure très instable en raison des faibles teneurs en matières humiques, soit souvent un sol sableux non éolisé.

TABLEAU II.1 Analyses sommaires de quelques pellicules de battance en Tunisie présaharienne (région de Gabès)

		Granulométrie					% CaCO ₃	% Ca SO ₄ , 2H ₂ O	% Matière organique
		Argile %	Limons fins 2.20 μ	Limons grossiers 20.50 μ	Sables fins 50.2000 μ	Sables grossiers >2000 μ			
Sierozem (Km 52)	Substrat 5-10 cm	3	2	6	78	11	10,0	0,7	0,72
	Pellicule de battance	4	6	7	74	9	12,5	2,0	1,14
Sierozem (Dissa)	Substrat 5-10 cm	9	7	10	68	6	15,6	1,2	0,43
	Pellicule de battance	10	9	11	65	5	16,2	2,8	0,93
Sol peu évolué <i>Segui</i> (Telman)	Substrat 5-10 cm	12	15	31	40	2	15,7	0,5	0,53
	Pellicule de battance	14	18	30	36	2	16,1	1,8	1,08
Sol peu évolué gypseux (BV.O.Gabès)	Substrat 5-10 cm	4	8	9	79	0	10,2	8,8	0,39
	Pellicule de battance	6	11	9	74	0	10,4	15,6	1,28
Sol régosolique sur limon à nodules calcai- res (Zougrata)	Substrat 5-10 cm	16	10	11	59	4	25,3	0,6	0,42
	Pellicule de battance	19	11	11	54	5	27,4	1,5	0,90

Fig. 9 (Rf.20)

- Elles se forment sur des sols peu éolisés. Tous les auteurs s'accordent sur le fait que ces pellicules se développent très rapidement. Des essais in vitro ont montré que le phénomène de battance apparaît en quelques dizaines de minutes de simulation d'averse et que les causes mécaniques, liées à l'énergie cinétique des pluies semblent donc déterminantes bien que d'autres phénomènes interviennent comme nous le signalons ci-après.

Les pellicules de battance sont liées essentiellement :

- à la pluie ;
- à la mise en défens d'une zone ;
- à la raréfaction du couvert végétal ;
- à la disparition de l'action de l'homme et des animaux sur la steppe ;
- elles apparaissent sur les labours ou les terrains de parcours dès les premières pluies ;
- à l'irrigation.

Dans ce dernier cas, elles peuvent être plus importantes et mieux développées, en raison des sédimentations répétées de matériaux transportés par l'eau d'irrigation.

Mc INTYRE (1958) donne les stades successifs de la formation des "croûtes" :

- (1) désorganisation des agrégats de la surface ;
- (2) mise en mouvement des fines particules dans les premiers centimètres du sol et dépôt dans les pores ;
- (3) compaction de la surface par formation d'une pellicule qui empêche l'entrée de l'eau ;
- (4) dépôt à la surface des fines particules en suspension avec réarrangement de celles-ci lors du dessèchement.

Nous noterons que cet auteur différencie "pellicule" (de l'ordre du mm) et "croûte" (de l'ordre du cm).

SKUJINS (1975) reconnaît, en fonction de leur origine, trois types de pellicules de battance des zones sableuses arides :

- a - pellicules d'origine physico-chimique, qui proviennent d'un tri, par le vent, des éléments de la texture, suivi d'une cimentation par les carbonates et les sulfates de calcium et les algues, à la faveur des cycles annuels ou diurnes de dessèchement et de réhumectation.
Exemple : zones d'irrigation, où leur structure litée résulte d'un réarrangement, ou réorganisation, des particules et de la porosité dans le plan horizontal.
- b - Pellicules d'origine mécanique : à l'occasion de cultures épisodiques, la charrue contribue à assurer une compaction du sol en profondeur (semelle) et à pulvériser l'horizon de labour qui est très vite enlevé par le vent, mettant ainsi à nu la semelle qui devient "crust" (ce qui correspondrait à

une érosion éolienne de 10 cm en un ou deux ans. Cette seconde hypothèse est encore très discutée).

c - Pellicules d'origine biologique. Elles sont principalement dues à l'activité des algues, des champignons et des hématites ; sur les sols sableux ces pellicules sont plutôt fragiles ; sur les sols argileux elles contiennent des lichens qui les rendent plus résistantes.

Exemple : sicrozem sableux non éolisé (à 90 % de sables dont 10 % sont grossiers) sur lequel se développe une pellicule de battance de 1 à 2 mm d'épaisseur, liée à la mise en défens d'une zone (S. Tunisie, Djebel Dissa).

De façon générale, il se développe sur ces pellicules de battance une microflore fongique distincte de celles des zones non "encroûtées" ; la germination y est contrariée car la graine ne peut s'enfouir ; elles donnent au sol un caractère hydrophobe et facilitent le ruissellement.

1.2 - PHENOMENES D'HUMECTATION - DESSICATION

1.2.1 - Gilgais

Le gilgai, mot aborigène australien, désigne certaines surfaces d'ondulations de petite et moyenne échelle. La plupart des gilgais apparaissent avec les expansions et contractions différentielles du sol lors de périodes d'humectation et de dessiccation successives. Ils sont en général associés à des sols alluviaux fins. Ils se caractérisent par un profil en buttes et dépressions, mais jamais il ne peut y coexister les différentes morphologies qu'ils engendrent.

La dimension des gilgais est extrêmement variable. L'intervalle vertical entre les creux et les chenaux varie de quelques centimètres à 3 mètres, environ. Le diamètre des figures positives ou négatives non linéaires peut atteindre 50 mètres ; les figures linéaires peuvent avoir de quelques mètres à 15 m de long.

La figure 10 présente la classification de ces morphologies selon les dépressions et les creux, et leur orientation.

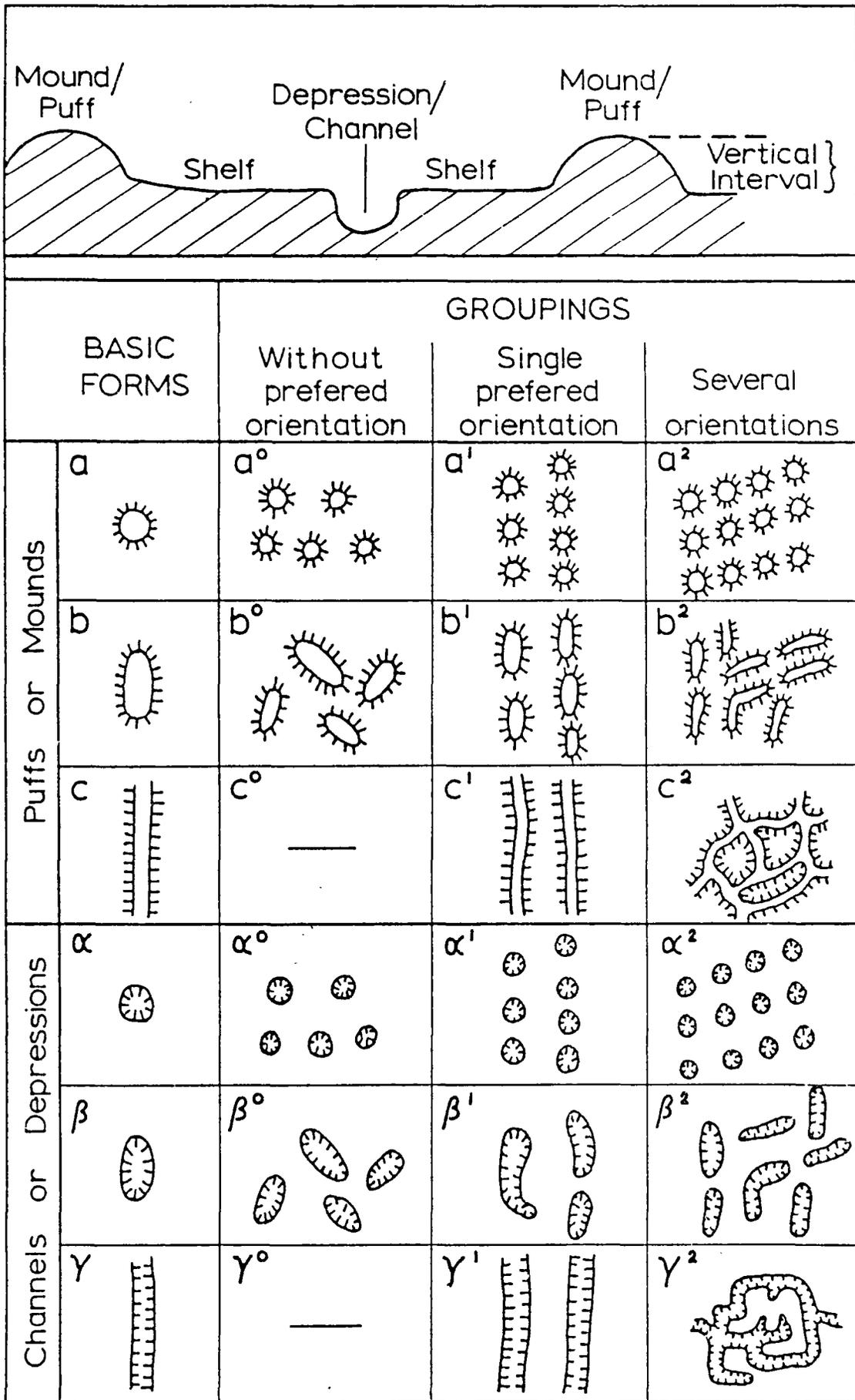
Les gilgais se forment préférentiellement avec des sols argileux (surtout dans les montmorillonites et argiles gonflantes).

Le processus de formation est simple : le sol de texture fine se fissure par dessiccation et des particules fines remplissent les fissures ainsi créées. Les fines, argileuses, gonflent par humectation lors des pluies et exercent alors des pressions multidirectionnelles dans les fentes (cf. fig. 11).

A plus grande échelle et dans un sol à texture fine à moyenne et à surface de galets, le phénomène engendre par "gonflement" de petits monticules de galets circulaires sur un sol plat, ou dissymétriques selon la pente et sur une surface inclinée. Ces deux types de gilgais (cf. fig. 12) supposent des quantités considérables d'argiles gonflantes.

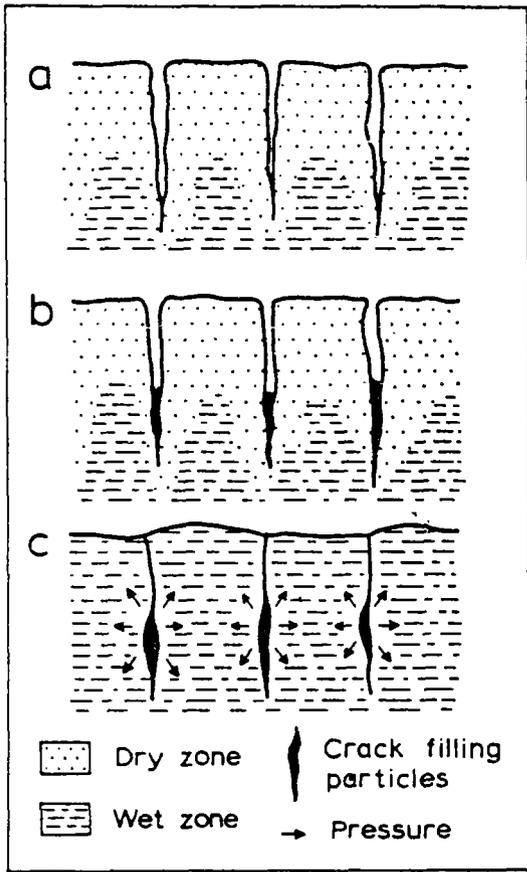
1.2.2 - Les fentes de dessiccation

Ce sont des fissures s'ouvrant dans un sol argileux ou argilo-limoneux qui se dessèche. Ces fentes dessinent le plus souvent un réseau grossièrement polygonal. Elles apparaissent à la suite d'une émergence d'une dépression d'eau fermée. La dessiccation emprunte le développement de fentes de retrait organisées en réseaux d'une grande régularité. Leurs dimensions et l'épaisseur du dépôt fissuré dépendent pour l'essentiel de la texture des éléments comme de la nature et des teneurs en sel



Terminology and classification of gilgai topography (after Harris, 1968; Verger, 1964 *et al.*).

Fig. 10 (Ref. 14)



0 1 m

The formation of gilgai by wetting and drying (after Verger, 1964).

Fig. 11 (Ref. 14)

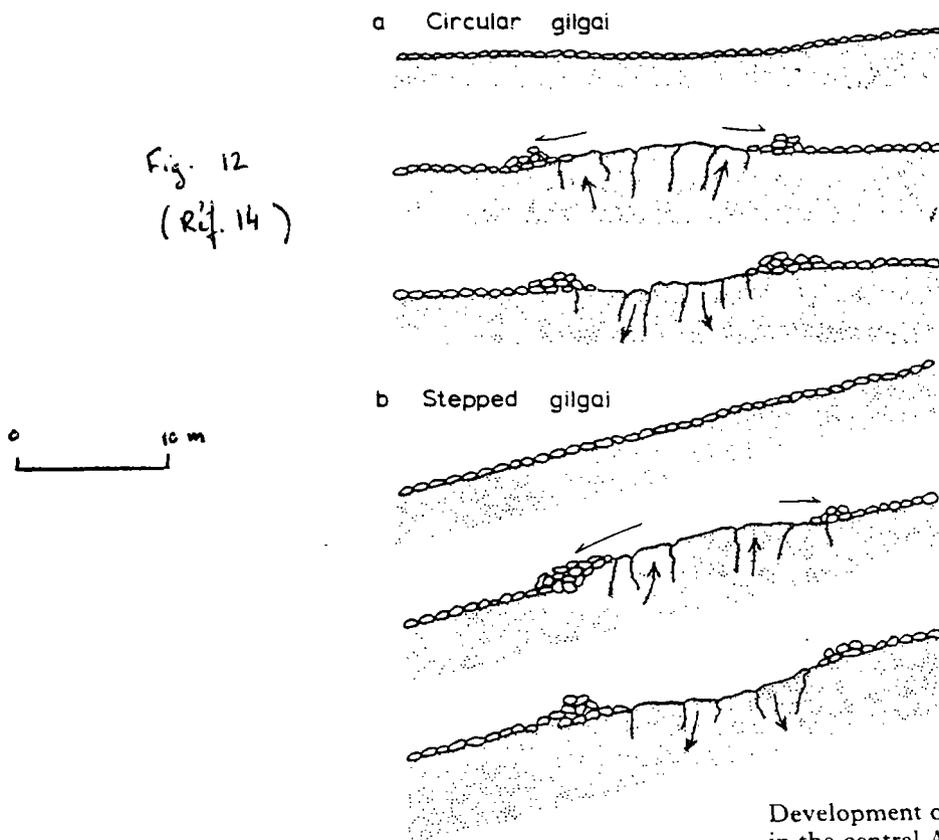


Fig. 12 (Ref. 14)

Development of circular and stepped gilgai in the central Australian Stony Desert (after Ollier, 1966).

résiduel. Par exemple, les argiles carbonatées forment une croûte durcie débitée en petits pavés. Dans tous les cas, ces revêtements ne souffrent guère d'une prise à la déflation en raison de leur compacité. On peut distinguer deux types de systèmes orthogonaux (cf. fig. 13) :

- les réseaux à orientation préférentielle ("oriented orthogonal" : d) ;
- les réseaux sans orientation préférentielle ("random orthogonal" : b et c).

Les systèmes non orthogonaux (a) se forment plutôt dans un sédiment très homogène et relativement peu plastique.

1.2.3 - Les fentes de dessiccation géantes (cf. fig. 14)

Elles ont surtout été décrites sur les plages de formation de lacs quaternaires dans l'ouest des Etats-Unis. Les fissures peuvent avoir un mètre de largeur, plus d'un mètre de profondeur et plusieurs dizaines de mètres de long. Elles sont isolées, de formes orthogonales, irrégulières, continues ou discontinues. Les cavités sous la surface et entre les creux suggérant que ces fissures se sont formées en profondeur.

Elles résulteraient de la contraction du matériel sableux par des forces de hautes magnitudes lors du battement brutal de la frange capillaire.

1.2.4 - Les fissures annulaires (cf. fig. 15)

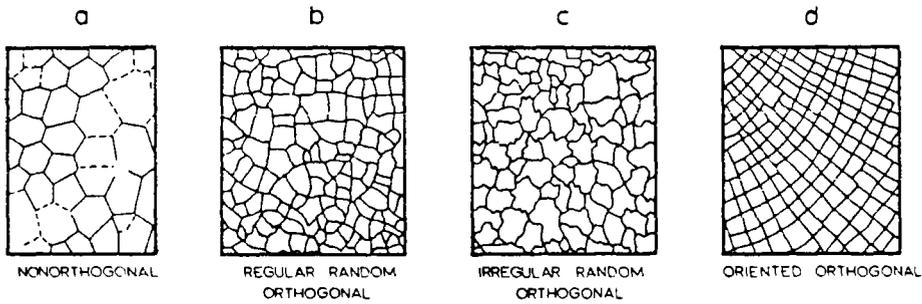
Elles sont produites autour des plantes phréatophytiques qui, lors d'une aridification, enfoncent leur système racinaire, corrélativement à l'abaissement de la frange d'eau capillaire, abaissement qu'elles accentuent ; ce qui provoque une contraction de compensation et une fissuration annulaire autour des plants.

1.3 - DIMINUTION DE LA FERTILITE DES SOLS ET SALINISATION

La diminution de la fertilité d'un sol tient à son taux de matière organique déficitaire et à une baisse de sa productivité biologique. En l'absence de repères capables de donner le degré de fertilité du sol d'un écosystème naturel et non altéré, comparé au sol d'une région contrôlée et exploitée intensivement par l'homme, on a dû rechercher et utiliser d'autres indices qui sont :

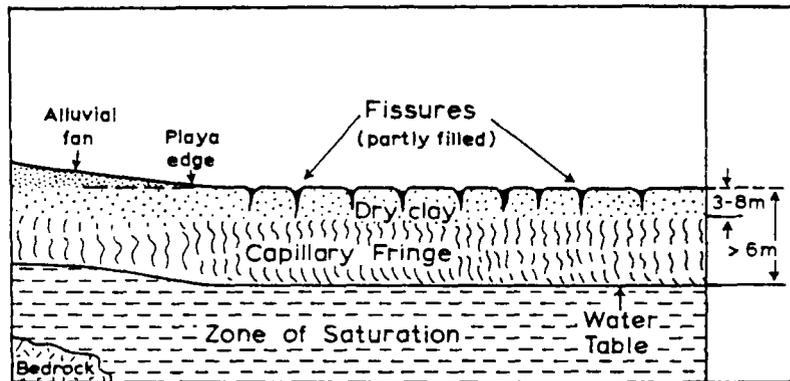
- la mesure du degré de fertilité comparée de sols soumis à divers processus de mouvement du sable dans des plaines de texture légère ; plates d'une part, et monticulaires d'autre part ;
- la mesure de la fertilité des dépôts le long des clôtures et de celle du champ lui-même ;
- la comparaison de la fertilité de sols que l'on sait avoir bénéficié de mesures de conservation et de sols traditionnellement exploités ;
- l'évaluation de ces différences de fertilité est faite exclusivement en fonction de la présence utile d'éléments nutritifs.

Ce que l'on sait, c'est que les régions soumises à une érosion violente, dans des sables épais et meubles, ont une teneur en éléments nutritifs bien moindre, particulièrement en carbone organique et en phosphore. Cela montre clairement que l'érosion éolienne et le déplacement des sables favorisés par l'activité humaine conduisent à une dégradation sensible.



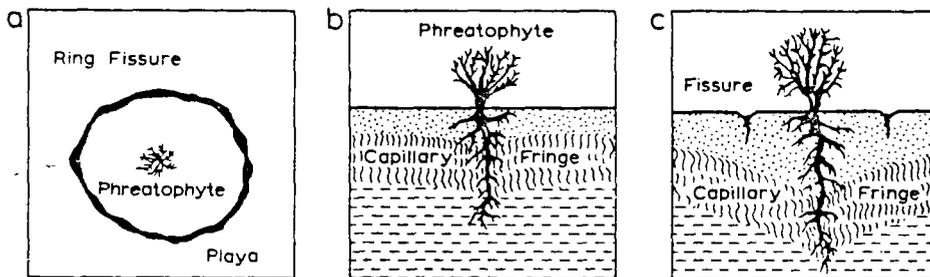
Common systems of desiccation cracks (after Lachenbruch, 1962, and Neal, 1965b).

Fig. 13 (Ref. 14)



Hypothetical cross-section of a giant-fissure environment showing the relative positions of the water-table, capillary fringe, and fissures (after Neal, 1965b).

Fig. 14 (Ref. 14)



Ring fissures. (a) Plan view; (b) before and (c) after a sequence leading to fissure formation showing the lowering of water levels with increased growth of the phreatophyte and associated drying of superficial sediment (after Neal, 1965b).

Fig. 15 (Ref. 14)

De même, le labourage continu conduit à une détérioration de la productivité du sol. Des techniques de cultures perfectionnées, avec utilisation pendant 20 ans de rideaux protecteurs et de paillis (\approx clôtures) ont conduit à améliorer la fertilité du sol et à accroître la proportion du sol en carbone organique, en potassium et en phosphates par apport éolien fixé.

Les régions arides sont généralement riches en sels solubles de sodium, souvent de calcium (CO_3 ; HCO_3), des chlorures et des sulfates qui imprègnent les sols. D'autres éléments tels que le potassium et le magnésium peuvent être relativement abondants localement.

Les eaux de ruissellement, qui jouent un si grand rôle dans la fertilisation des sols des zones arides, acquièrent souvent au cours de leur cheminement en surface ou dans la profondeur une certaine salinité. Il en résulte des accumulations parfois importantes de sels de différentes natures. Si la dynamique des bicarbonates de calcium ne semble pas être importante dans le contexte pédoclimatique aride, il n'en est pas de même des sulfates, qui peuvent lors d'un mauvais drainage ou d'une importante sécheresse contribuer à la formation ou à l'enrichissement d'horizons d'accumulation de gypse et de chlorure de sodium. De vastes étendues sont ainsi rendues stériles à toutes cultures ou élevages. Seules quelques plantes halophiles peuvent s'y développer.

Le sel peut se déposer en surface sous la forme les plus diverses, simples efflorescences pulvérulentes, boursouflures, couches compactes, voire dalles...

La genèse des dépôts diffère selon l'alimentation en eau de la zone concernée et/ou de sa position topographique mais traduit toujours une évaporation supérieure à l'alimentation hydrique donc une aridification tendancielle.

- La sécheresse prononcée de 1973 au Sahel a engendré une diminution du débit du fleuve Sénégal, ce qui a provoqué une remontée du biseau salé marin de plus de 200 km dans les terres. Il y a eu saturation des berges qui ont ainsi vu la cristallisation de sel sous formes d'efflorescences, et bien sûr les terres irriguées en furent affectées !
- Le contre-bas des reliefs et les cuvettes entretenues par une hydrographie endoréique sont le siège de sursalures. Ces cuvettes d'évaporation donnent à terme des sebkhas et leurs zones périphériques, les chotts. En raison d'un taux élevé d'évaporation, les sels, concentrés à la surface précipitent sur les bordures, pour finalement constituer des zones concentriques de concentration de sel. Les nappes des sebkhas, très salées, imprègnent en permanence les sédiments. Le régime hydrologique superficiel dépend du bilan momentané qui s'établit entre les arrivages souvent profonds et réguliers et les prélèvements de l'évaporation. Durant la saison chaude, ceux-ci l'emportent sur l'alimentation artésienne (cf. fig. 16).
- Une mauvaise irrigation peut voir son sol salsodique en quelques mois. En effet l'aval des systèmes de drainage a un taux élevé de chlorure de sodium et si l'alimentation n'est pas permanente celui-ci précipite aussitôt.

Lors d'une "phase" aride, le régime hydrique des sols présente des phénomènes "per ascensum" dominant les phénomènes "per descensum", et le gypse a tendance en général à s'accumuler vers la surface pour former croûtes et encroûtements. En revanche, dans les sols engorgés, il tend à se déposer dans les zones de battement des nappes phréatiques pour former des croûtes en profondeur. Il est possible de mesurer le taux de saturation en sels par la conductivité de l'extrait du sol.

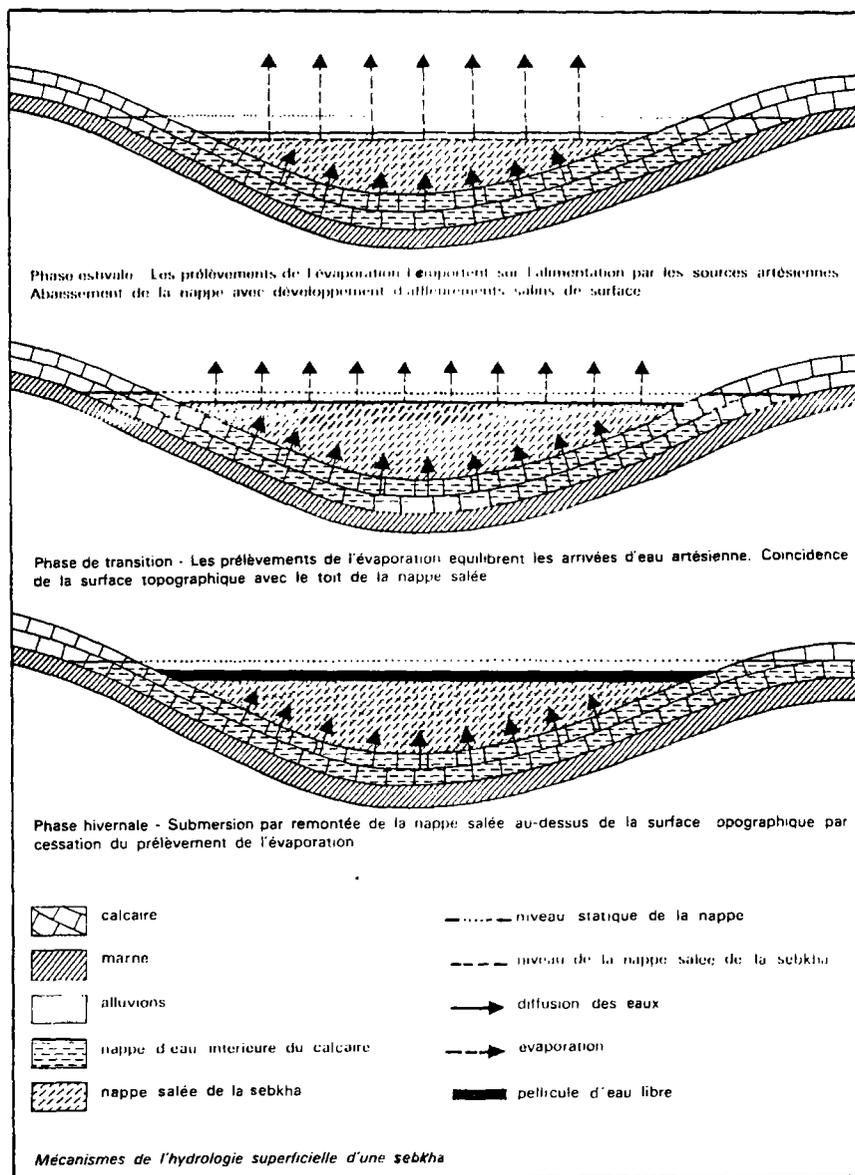


Fig. 16 (Rq. 25)

L'état de la surface du sol a d'importantes conséquences sur le bilan d'eau, l'érosion, la dynamique de la végétation et est un bon indice des qualités potentielles ou non d'un sol et de son état de dégradation par aridification, qui est la phase préparatoire de l'érosion.

L'altération des sols est liée à la dégradation de la végétation naturelle qui, si elle disparaît, conduit progressivement :

- à un appauvrissement en matière organique se traduisant, d'une part, par une désorganisation de la structure et des propriétés physico-chimiques du sol, et d'autre part, par un abaissement de la fertilité ;
- à la disparition du voile éolien, très mobile, mais qui, lors des fortes pluies, joue un rôle énorme en diminuant l'énergie cinétique des gouttes d'eau et en limitant les phénomènes de ruissellement primaire. En l'absence du voile éolien les sols "se glacent" très vite en surface (quelques pluies y suffisent en l'espace de 2 à 3 mois), et une pellicule de battance de quelques millimètres d'épaisseur se développe très rapidement.

La figure 17 montre un sol profondément dégradé où sont associés les dépôts de sel et de gypse à des fentes de dessiccation polygonales plurimétriques à remplissage de galets et de limons.

2 - MODES DE TRANSPORT ET MIGRATION DE MATIERE EN ZONES D'ARIDIFICATION

Il ne s'agit pas là de passer en revue l'ensemble des transferts de matière des zones arides ou sub-désertiques mais plutôt de voir s'il existe des processus de migration de matière qui puissent caractériser une aridification.

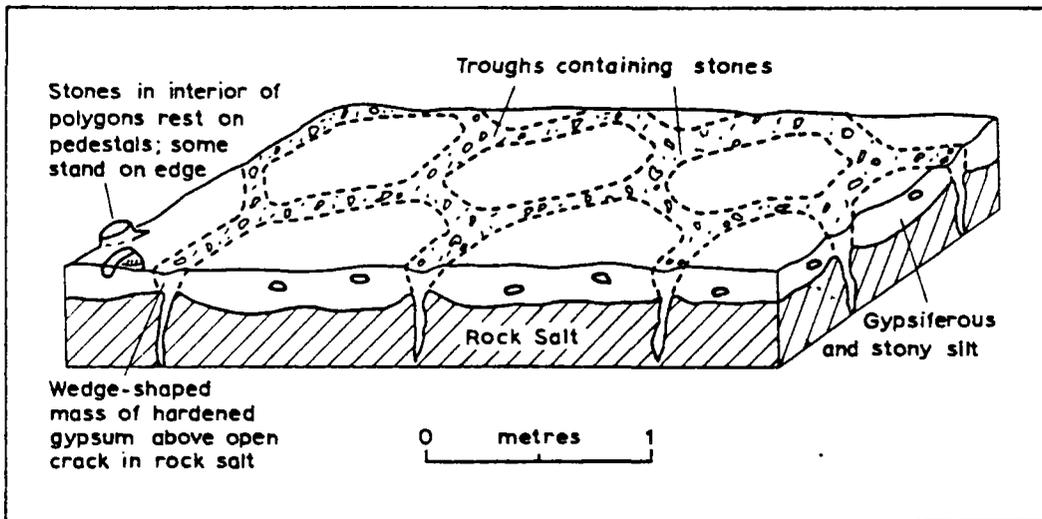
2.1 - L'EROSION EN RAVINS

Ce type d'érosion est caractéristique des terres qu'on trouve dans les régions semi-arides et leurs franges sub-humides. Il est principalement associé à l'extension des cultures pluviales sur les pentes, et notamment dans les zones de piedmont, ainsi qu'au défrichement des bassins hydrographiques de montagnes recouvertes de forêts et d'arbustes ; ces pratiques ont en effet pour conséquence d'accroître la soudaineté et la violence du ruissellement, d'ameublir le sol (labourage) et de créer des surfaces vulnérables (jachères).

Cette forme de dégradation est très caractéristique des zones semi-arides de montagne situées sur la frange méditerranéenne du Sahara.

2.2 - RAVINEMENT D'ANCIENNES DUNES FIXEES

L'ensemble du domaine sahélien comporte des vestiges de dunes ogoliennes, édifiées lors de la dernière grande période aride du Quaternaire (20.000 à 13.000 ans BP), rubéfiées et fixées lors de la phase humide du Tchadien (11.000 à 8.500 ans BP). Ces "dunes rouges" s'émeussent progressivement, leur sommet s'est abaissé et les interdunes se sont colmatés par des dépôts de sable argileux, à la suite d'actions de ruissellement diffus ou de glissement brut sur les flancs dunaires. Le vent trie le matériel par densité et amoncelle le sable grossier en une multitude de petites rides parallèles qui se déplacent. La steppe arbustive de ces massifs en a beaucoup souffert et la strate herbacée a pratiquement disparu depuis 1972, époque de la sécheresse.



Sorted stone polygons related to ridges and cracks in an underlying layer of rock salt, Death Valley (after Hunt and Washburn, 1960).

Fig. 17 (Ref. 14)

La genèse d'édifices mobiles et non consolidés que sont ces rides ainsi que le sapement fluvial accrue des édifices dunaires sont plus une marque de désertification, mais ils traduisent une aridification dans la mesure où ils participent à la dégradation du milieu tant de façon directe (sur la végétation) qu'indirect (éolisation des particules fines qui alimente les brumes sèches sahéliennes, comme à Nouakchott où la visibilité annuelle n'est plus que de 110 jours par an soit 3 fois moins qu'il y a 20 ans).

2.3 - TYPES DE DEPOTS EOLIENS EN CONTEXTE D'ARIDIFICATION

Ce sont les dépôts les plus importants, car les mieux développés et les plus significatifs d'une aridification. Il s'agit là d'une remobilisation de matériel fin par déflation ou saltation, sur les différents reliefs avoisinants.

Les facteurs contrôlant le processus et les types d'accumulation du sable sont variés : source et approvisionnement, direction et force du vent, nature de la surface recouverte, couverture végétale du sol ensevelie.

On peut distinguer 4 principaux types de formes sableuses d'origine éolienne :

- saupoudrage ;
- drapage ou sand sheet ;
- dunes ;
- steppes.

Il faut noter que les sables ne migrent que là où la pluviosité est inférieure à 100 - 150 mm/an.

Le vent est un agent ubiquiste et quasi permanent dont l'action morphogénétique est importante : ablation pouvant aller jusqu'au creusement de cuvettes fermées ; transport, par saltation (sables de 2 à 5 mm \varnothing), roulage (5 mm à 1 cm), flottation (fines de 60 μ à 2 mm).

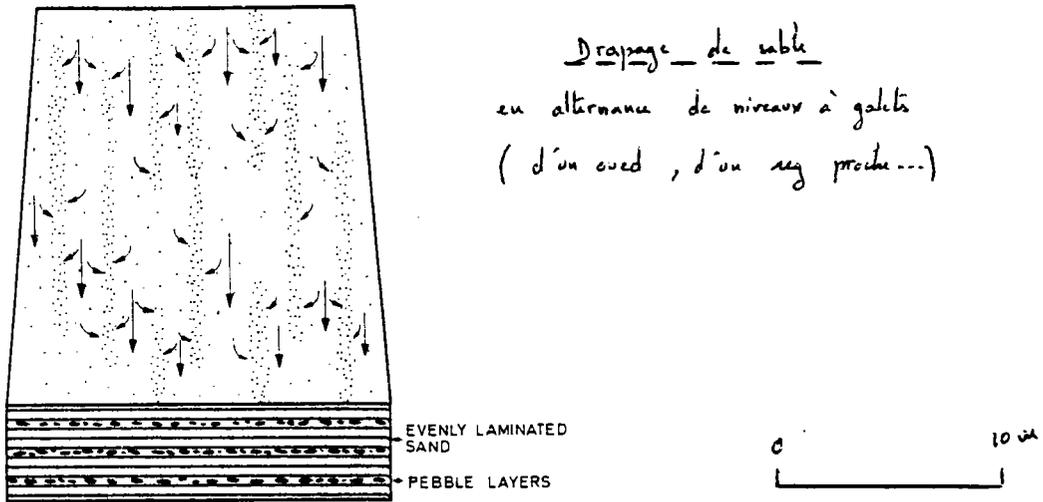
2.3.1 - Les saupoudrages

Léger voile ou accumulation linéaire dans le lit des oueds ou sur les steppes. Les formations sableuses facilement éolisables sont les plus communes des formations d'origine éolienne. Elles traduisent une dégradation d'un sol avoisinant et s'opposent à l'incidence du rayonnement solaire et aux précipitations lors du transport. A terre, et en transit, ces formations ennoient la végétation qui doit alors croître pour sa photosynthèse. Si ce même sol subit une forte déflation alors qu'il n'est toujours pas fixé, les mêmes plantes se déchaussent et, les racines à l'air, beaucoup en meurent. Alors commence la dégradation du sol.

2.3.2 - Les drapages peuvent avoir de 2 à 20 cm d'épaisseur et recouvrir plusieurs dizaines de kilomètres carrés. C'est une zone de "stockage" du sable qui se positionne préférentiellement sur d'anciennes plaines alluviales planes. Ces nappes de sable ont de petites crêtes sableuses à la surface, les hummocks, d'environ un mètre de hauteur, transversales ou longitudinales (cf. fig. 18).

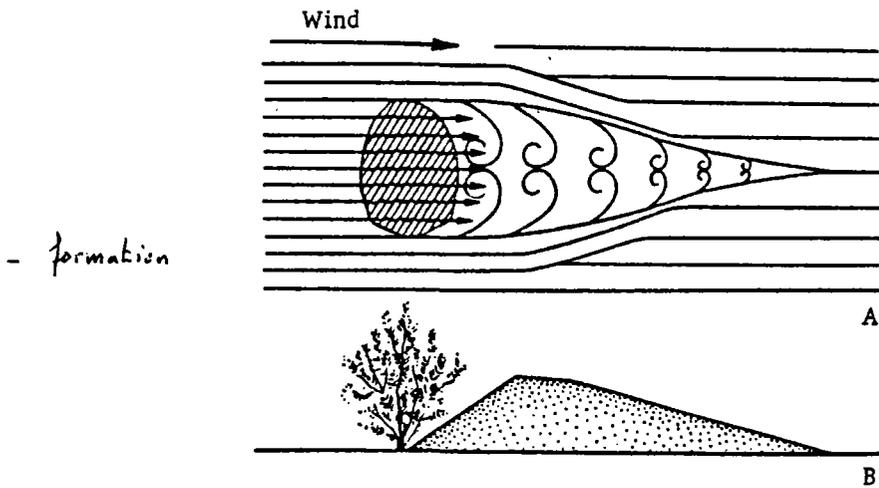
2.3.3 - Les dunes vives

Un autre aspect de la dégradation des sols est celui de la quasi-stérilisation par des apports éoliens massifs sous forme de dunes non fixées. L'introduction de la céréaliculture mécanisée a amplifié ce phénomène. Il consiste en une véritable



Scheme of sand strips on a surface of sand sheet, and the type of bedding in the sand-sheet deposition. Hypothetical wind circulation along the sand strips is also shown. (Based on BAGNOLD, 1954a)

Fig. 18 (Ref. 38)

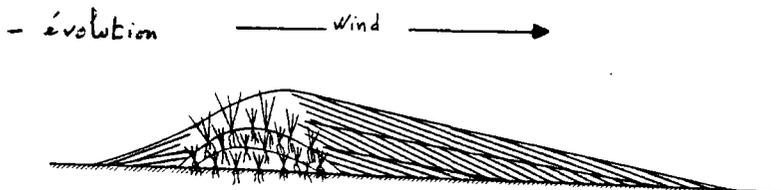


Nebkas

Scheme of distribution of eddies around shrub (A) and motticule-bar (B)

Fig. 19 (Ref. 14)

0 5m



Scheme showing cross-bedding developed in sand drift deposits

Fig. 20 (Ref. 38)

fossilisation de la steppe et du sol qui la porte par quelques décimètres, voire parfois un mètre ou deux, de sable d'apport éolien, au voisinage des surfaces emblavées. Dans certains cas, la végétation spontanée peut recoloniser ces formations, mais souvent elle en est incapable ; le résultat en est la formation de dunes vives qui, dans les zones présahariennes, conduisent rapidement à la formation d'un erg.

Certaines des formations sableuses d'origine éolienne peuvent être fixées par la végétation : micronebkas de quelques décimètres de hauteur et de un mètre de diamètre, fixées par de petits chaméphytes, et les touffes de graminées de la steppe. Les nebkas plus imposantes, dont certaines sont immobilisées par des arbustes épineux (*Ziziphus lotus* ou *Nitraria retusa*), peuvent atteindre plusieurs mètres de hauteur et de diamètre. La figure 19 illustre la formation de la flèche de sable provoquée par la déflation, derrière la végétation (A : en plan ; B : en coupe). La figure 20 (en coupe) montre l'évolution progressive du processus : sable fixé avec stratifications obliques et étapes successives de l'implantation végétale.

- Les figures 21 et 22 donnent des exemples de dualité et d'alternance de morphologies tantôt de climat aride, tantôt de climat plus humide.
- La figure 23 présente les différentes formes et reliefs éoliens, selon le régime des vents et les zones désertiques à sub-arides.

3 - SENSIBILITE ET TYPES D'EROSION SELON LES PRINCIPAUX SOLS

Dans l'aire de la zone aride, c'est le matériau originel, autochtone et même pédochtone, ainsi que ces formes et sa répartition dans le paysage, qui sont déterminants pour les propriétés des sols et la structure de la couverture pédologique. Une aridification régionale aura des incidences physiques et chimiques différenciées et plus ou moins marquées selon le type de sol concerné.

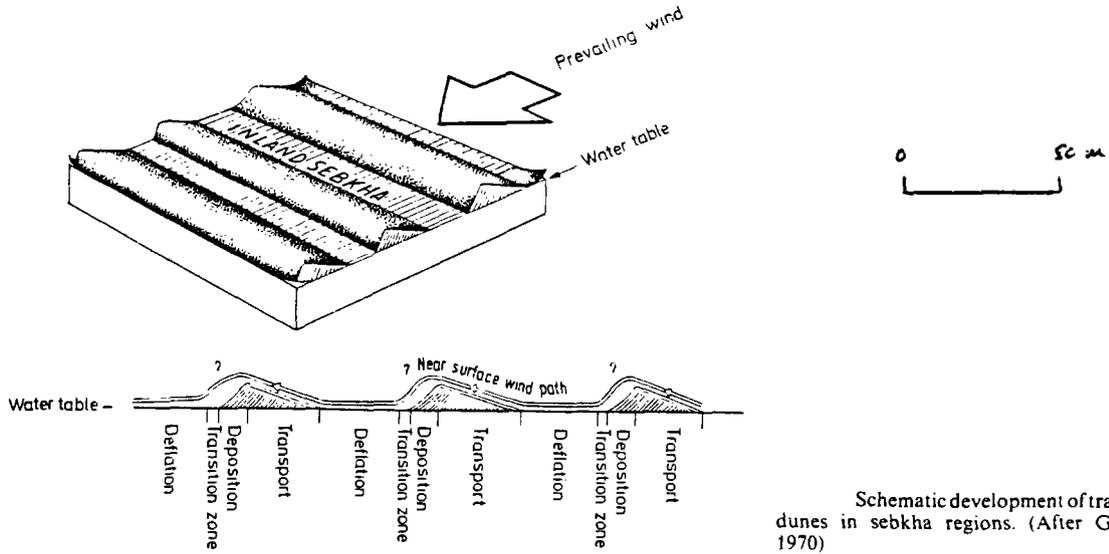
D'une façon générale, la sensibilité du sol dépend essentiellement de la texture, de la structure, de la pente, et de la teneur en matière organique des horizons de surface, et de sa position dans le paysage (pente). Par exemple, les sols à texture légère sont sensibles à l'érosion éolienne pour une utilisation en sec, et peu sensibles à une stérilisation par le sel en cas d'irrigation.

Par ailleurs, plus un sol se dégrade, plus il devient sensible : un sol qui voit son taux d'humus baisser par suite d'une surexploitation voit sa sensibilité à l'érosion augmenter (destruction) ainsi que sa sensibilité à la stérilisation par les sels en présence d'irrigation (plus fortes évaporations et remontées capillaires) s'accroître.

4 - DEGRADATION DE LA VEGETATION SELON LES TYPES DE SUBSTRAT

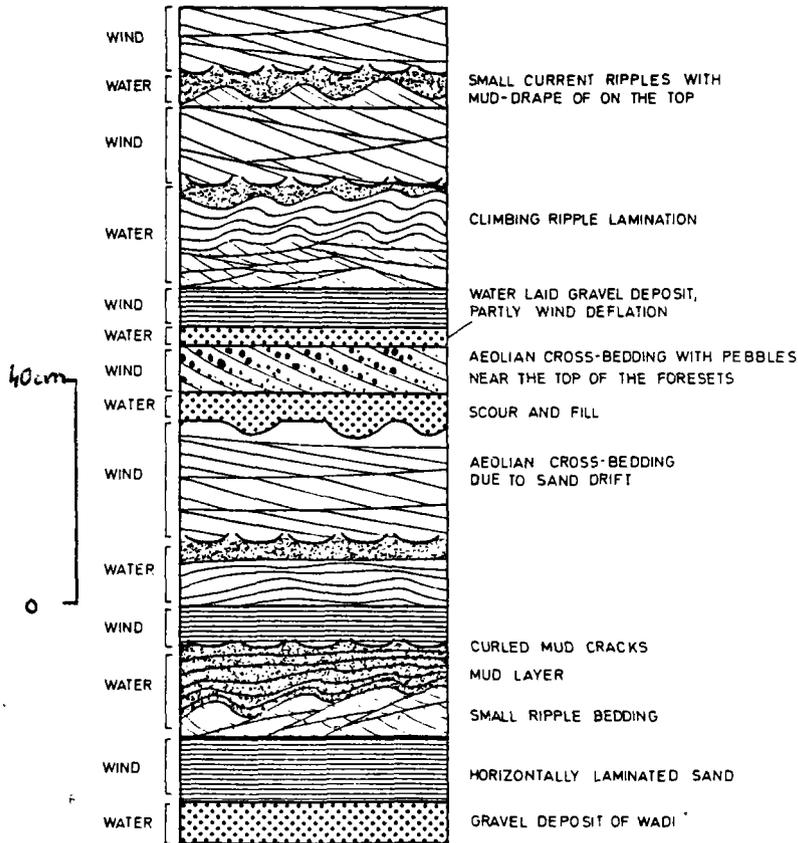
En considérant les phénomènes de dégradation en zone, il apparaît clairement que la dynamique régressive de la végétation est fortement liée à celle du substrat. Les causes de la dégradation de la biomasse végétale conduisent toutes à une raréfaction du couvert végétal, ce qui favorise l'érosion éolienne et hydrique (cf. fig. 24) ; les nouvelles conditions du milieu créées par l'érosion (diminution de la matière organique, de la réserve en eau du sol, etc.) entraînent alors des modifications dans le tapis végétal. Dégradation du couvert végétal signifie donc apparition de conditions d'aridité croissante.

La figure 25 donne des indications sur les modalités et l'intensité des phénomènes de passage d'un système écologique à un autre par dégradation ou régénération, pour les mêmes séquences de végétation ou le même secteur écologique.



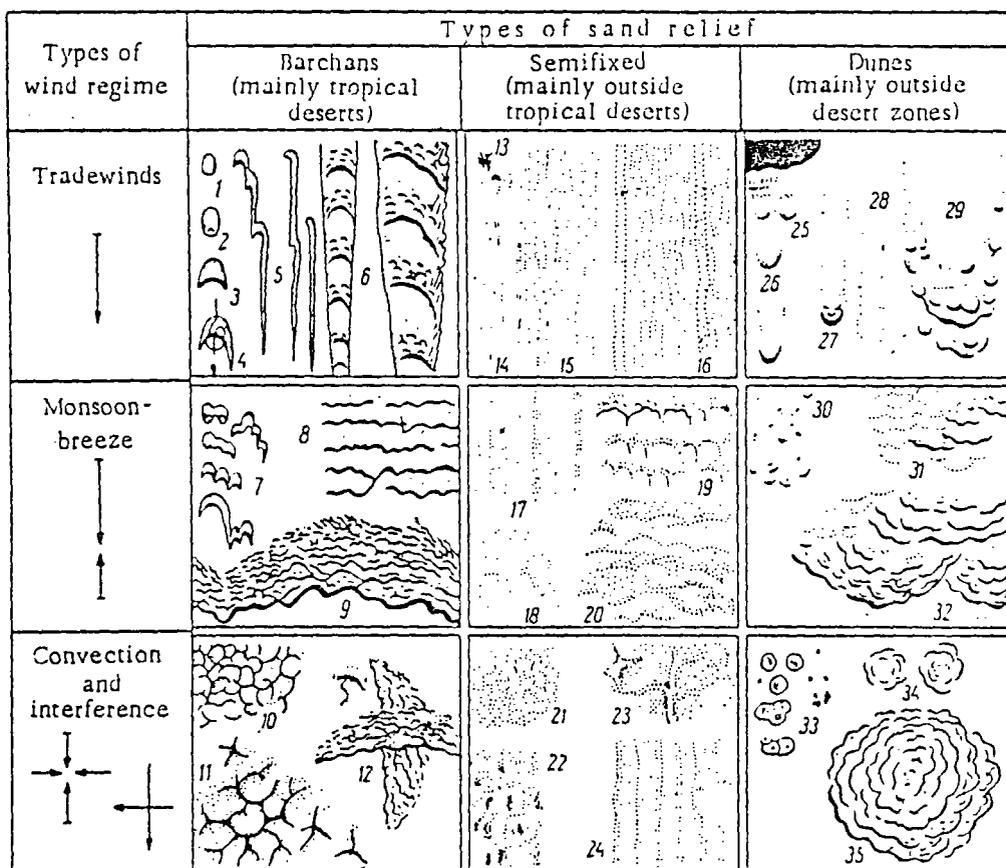
Schematic development of transverse dunes in sebkha regions. (After GLENNIE, 1970)

Fig. 21 (Ref. 38)



Schematic diagram showing a sequence of wadi deposits with alternating wind- and water-laid sediments. Based mainly on data of GLENNIE (1970)

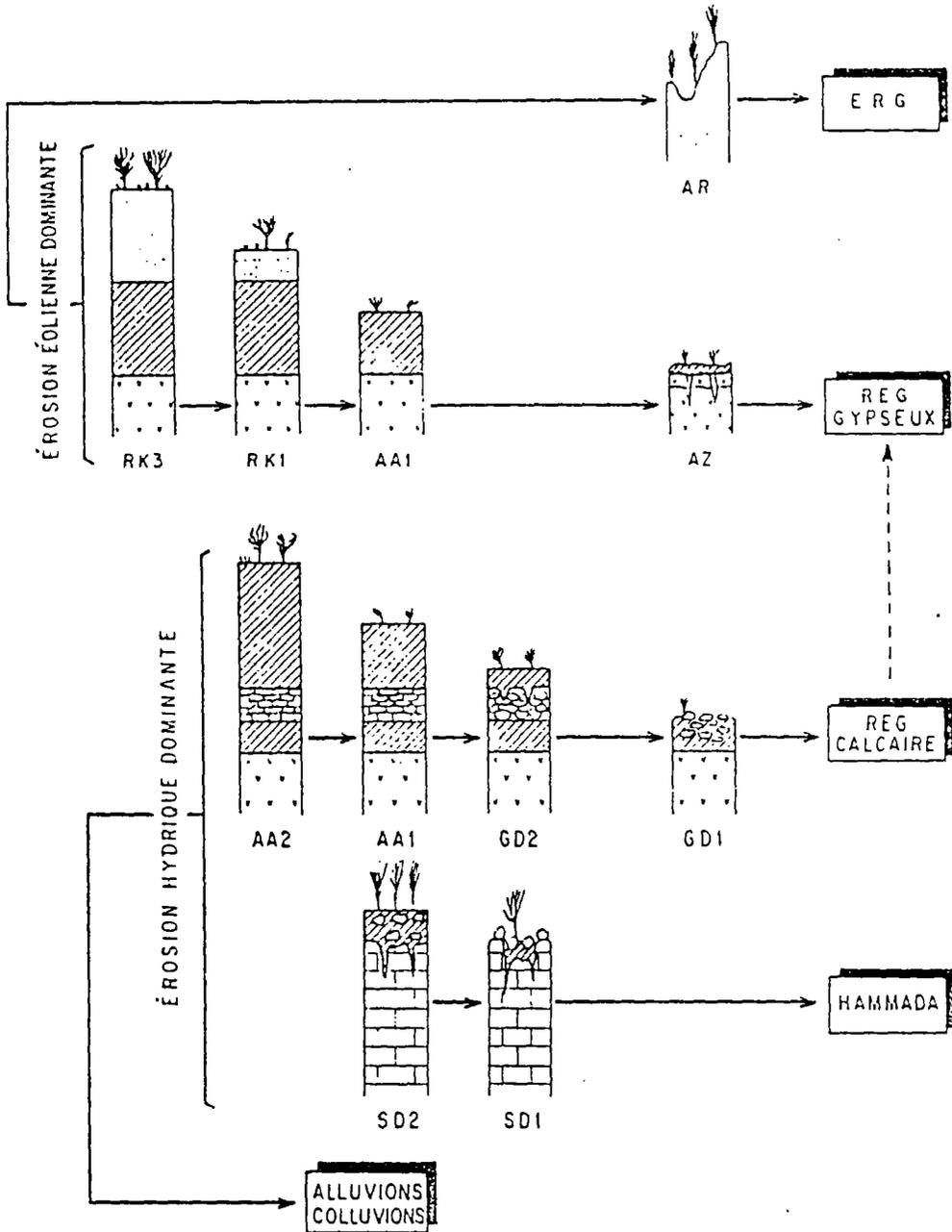
Fig. 22 (Ref. 38)



Basic forms of sand relief related to wind regimes and zonality (after Fedorovich, 1964):

Barchan desert sands. Tradewind type (with unidirectional winds or winds of almost the same direction): 1) sand sheet; 2) the same, cone (embryonic barchan); 3) crescent, symmetric barchan; 4) asymmetric barchan; 5) longitudinal barchan ridges; 6) complex longitudinal barchan ridges ("whalebacks"). Monsoon-breeze type (with winds in opposing directions): 7) barchan groups; 8) simple barchan chains; 9) complex barchans and barchan chains. Convection and interference types (with a system of equal winds or winds in transverse directions): 10) circular barchans; 11) the same, pyramidal; 12) the same, crossed complexes. **Semifixed desert sands.** Tradewind type: 13) coppice mounds; 14) small ridges; 15) sand ridges; 16) ridges and large ridges. Monsoon-breeze type: 17) ridge-crescent sands; 18) crescent sands; 19) rake-shaped transverse ridges; 20) transverse ridges. Convection and interference types: 21) honeycomb sands; 22) coarse honeycomb sands; 23) pyramidal sands; 24) network ridges. **Sand dunes outside desert zones.** Tradewind type: 25) offshore bars; 26) parabolic dunes; 27) prong-shaped dunes; 28) paired longitudinal dunes; 29) complex parabolic dunes. Monsoon-breeze type: 30) small semicircular dunes; 31) the same, large; 32) complex semicircular dunes. Convection and interference types: 33) small ringlike dunes; 34) the same, large; 35) complex circular dunes. Arrows indicate predominant wind directions.

Fig. 23 (Ref. 14)



L É G E N D E			
Végétation plus ou moins dense	Ψ Ψ	Sigle du système écologique	SD 2
Horizon sableux.....	[diagonal lines]	Croûte gypseuse.....	[wavy lines]
Horizon limono-sableux à nodules calcaires.....	[stippled]	Mio-pliocène gypseux.....	[wavy lines]
Croûte ou encroûtement calcaire.....	[brick pattern]	Calcaire dur du Crétacé.....	[brick pattern]

Dégradation de quelques systèmes écologiques en Tunisie présaharienne (d'après FLORET et al., 1977).

Fig. 24 (Ref. 20)

Fig. 25 (Rif. 20) - Légende

- RELATIONS ENTRE LES SYSTEMES ECOLOGIQUES
DANS LA REGION DE ZOUGRATA
(d'après FLORET et al., 1978)

LEGENDE

- (RK) Sigle de l'unité
Ap Horizon de labour
 Voile éolien
 Horizon sablo-limoneux
 Horizon sablo-limoneux à sablo-argileux à nodules calcaires
 Horizon sablo-argileux à limono-sableux souvent alluvial ou alluvio-colluvial (séguis et fonds d'oueds)
- | | | | |
|-----|---------------------------------|---|--|
| =V= | Encroûtement calcaro-gypseux | ≡ | Croûte calcaire démantelée (Villafranchien) |
| V | Encroûtement gypseux | Vmp | Matériau sablo-argileux gypseux du Miopliocène |
| ∞ | Encroûtement gypseux de nappe |  | Calcaire dur du Crétacé |
| x | Encroûtement nodulaire calcaire | -1/4- | Nappe phréatique - plan d'eau temporaire |
-  halomorphie

CAUSES DES PHÉNOMÈNES DE TRANSFORMATION DES UNITÉS

- | | | | |
|---|-------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | Surpâturage-éradication | 3 | Pâturage aménagé |
| 2 | Labour | 4 | Mise en défens-longue jachère |

NATURE DES PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT

- | | | | |
|----|------------------|----|----------------------------------|
| Ee | Erosion éolienne | He | Erosion hydrique |
| Eo | Apport éolien | Hq | Apport hydrique (alluvionnement) |

INTENSITÉ DES PHÉNOMÈNES DE TRANSFORMATION EN SURFACE DES UNITÉS

- | | |
|-------|---------|
| ————— | forte |
| ————— | moyenne |

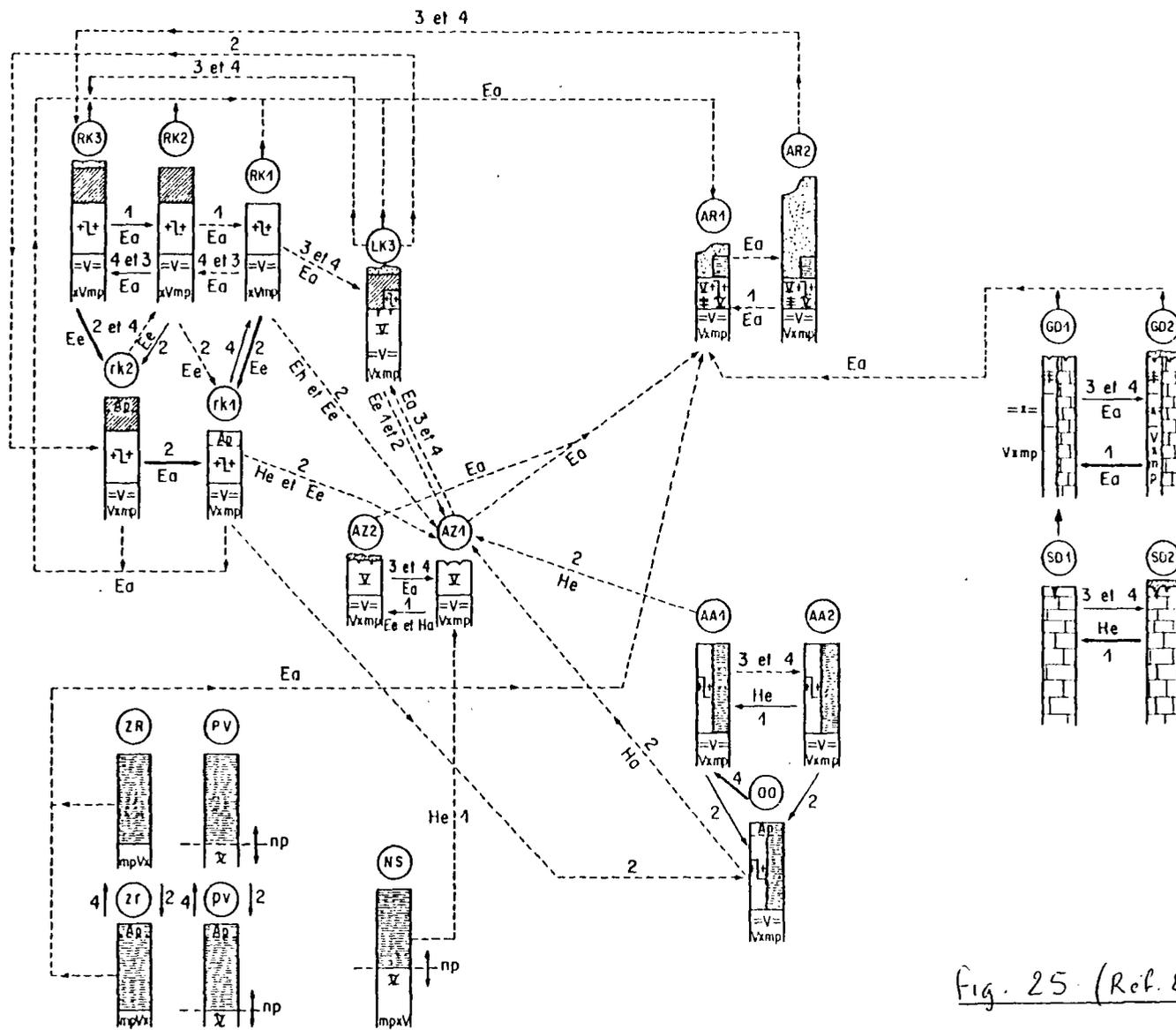


Fig. 25. (Ref. 20)

GLOSSAIRE DES TERMES VERNACULAIRES UTILISES

- Chott :** zone périphérique des sebkhas, à végétation halophile
- Cuirasse :** croûte superficielle, formant l'horizon supérieur du sol, due à l'accumulation d'oxydes de fer, d'aluminium, voire de manganèse sous un climat à alternance de saisons sèches et de saisons humides
- Djebel :** montagnes et collines
- Erg :** formation de sable non fixé, organisée en champs de dunes
- Garâa (pluriel garaet) :** zone inondée temporairement par des eaux douces ou peu salées
- Hammada :** plateau rocheux peu incliné dans les régions désertiques, sans couverture de sols ou de débris fins
- Harmattan :** alizé continental de l'hémisphère nord en Afrique, soufflant du nord-est au sud-ouest, des hautes pressions tropicales vers les basses pressions équatoriales, de novembre à mai
- Iessour :** zone comprenant un impuvium et un champ cultivé en amont d'une **tabia** (ex. système en **Jessours**)
- Nebka, micronebka :** accumulations et fixations de sable par des végétaux pérennes, qui s'exhaussent quand l'accumulation s'accroît
Les **nebkas** peuvent atteindre plusieurs mètres de hauteur et de 10 à 20 m de diamètre.
Les **micronebkas** dépassent rarement 1 m de hauteur et de diamètre
- Oued :** cours d'eau au débit épisodique
- Reg :** forme de relief relictuelle liée à la déflation éolienne, constitué des résidus grossiers (pierres, blocs et cailloux) ; fréquent en zone aride
- Sahel :** signifie, en arabe RIVAGE ; ici, correspond à la zone climatique qui s'étend entre les isohyètes 200 et 700 mm ; zone de transition entre un monde minéral, le Sahara, et un monde végétal, la savane ; dans les temps plus anciens, lieu de débordement et d'échanges entre les productions de Nord et les productions du Sahel méridional
- Sebkha (pluriel Sebket) :** dépression salée sans végétation spontanée et impropre à la culture
- Ségui :** zone à l'aval d'un versant bénéficiant d'un apport d'eau supplémentaire par ruissellement et d'un apport d'alluvions pouvant être retenus par aménagement de petite hydraulique. Une terre de **Ségui** est en général de texture limono-sableux à limono-argileux

- Sirocco :** vent chaud du Sud, caractérisé par un brusque abaissement de l'humidité relative de l'air et une forte montée de la température
- Tabia :** petite digue en terre et en pierres sèches barrant un thalweg, pouvant être aménagée de déversoirs, permettant la retenue des eaux de ruissellement et des produits de l'érosion hydrique

CONCLUSION

Le domaine aride (s.l.) se définit à partir de critères climatiques. Dans cette perspective, l'aridification d'une région se caractérise par la tendance déficitaire de son bilan hydrique. Elle débute par une dégradation des sols, liée directement à la destruction du couvert végétal pérenne que l'homme entretient et accélère. Or les sols se dégradent plus vite qu'il ne se régénèrent et la sensibilité d'ensemble augmente.

Cette aggravation de la désertification provoque ensuite à long terme une modification des paramètres physiques de l'environnement :

- modification de l'écosystème dans le sens d'une dégradation irréversible ;
- apparition de processus morphogénétiques et pédogénétiques d'origine essentiellement mécanique, qui tendent vers un modelé désertique, différent selon le contexte régional (substrat géologique, topographie et position géographique selon les conditions atmosphériques du continent). On peut citer la succession chronologique classique de ces évènements :
 - . généralisation des phénomènes qui conduisent à la formation de la pellicule de battance ;
 - . augmentation, due à l'érosion hydrique ou éolienne, des surfaces occupées par les sols squelettiques (croûtes calcaires, croûtes gypseuses, lithosols des djebels, etc.) ;
 - . augmentation des surfaces occupées par les sols bruts d'apport éolien, très sensibles ;
 - . accumulation d'alluvions qui, à l'aval des systèmes de drainage, se salent très rapidement ;
 - . stérilisation progressive par le sel des parties basses des périmètres irrigués ;
 - . chute de l'activité du drainage interne et externe du terrain (par augmentation du ruissellement, augmentation de l'évaporation et diminution de la réserve utile).

Les solutions pour endiguer ces mécanismes existent. Elles doivent être adaptées à la région concernée et au degré de détérioration atteint, afin de permettre la reconquête des sols par le couvert végétal, lui-même adapté au contexte hydrologique.

Même si, de manière générale, on peut distinguer les facteurs humains des facteurs naturels, ils ne peuvent être dissociés, car dans le cas de l'aridification il y a relation de causes à effet. Et c'est là un élément dont il convient de tenir compte lors de la conception de tout programme de lutte contre la désertification.

Une autre région que la zone soudano-sahélienne semble représentative du processus de désertification-aridification. Il s'agit de la zone de Verra Garrucha - Almeria - Masarrom, dans le SE de l'Espagne. La désertification a débuté au VIIIe siècle avant J.C. par la civilisation celte-ibérique qui prospectait le plomb, l'or et l'argent. La déforestation pour le bois de chauffe fut systématique jusqu'au XXe

siècle et l'aridification de cette région est telle que la région est stérile, et le modelé modifié.

Il pourrait être intéressant d'y installer un complexe d'expérimentation du processus d'aridification, d'autant plus que des phénomènes de néotectonique entretiendrait le contexte aride. Et les trois causes principales susceptibles d'une aridification sont ainsi réunies en Espagne : origines anthropiques, causes climatiques et entretien par les phénomènes sismiques.

DOSSIER I

"Le Sahel, un exemple de désertification - aridification"

Cinq planches

Fig. 26 : L'écosystème sahélien antérieur à la dégradation

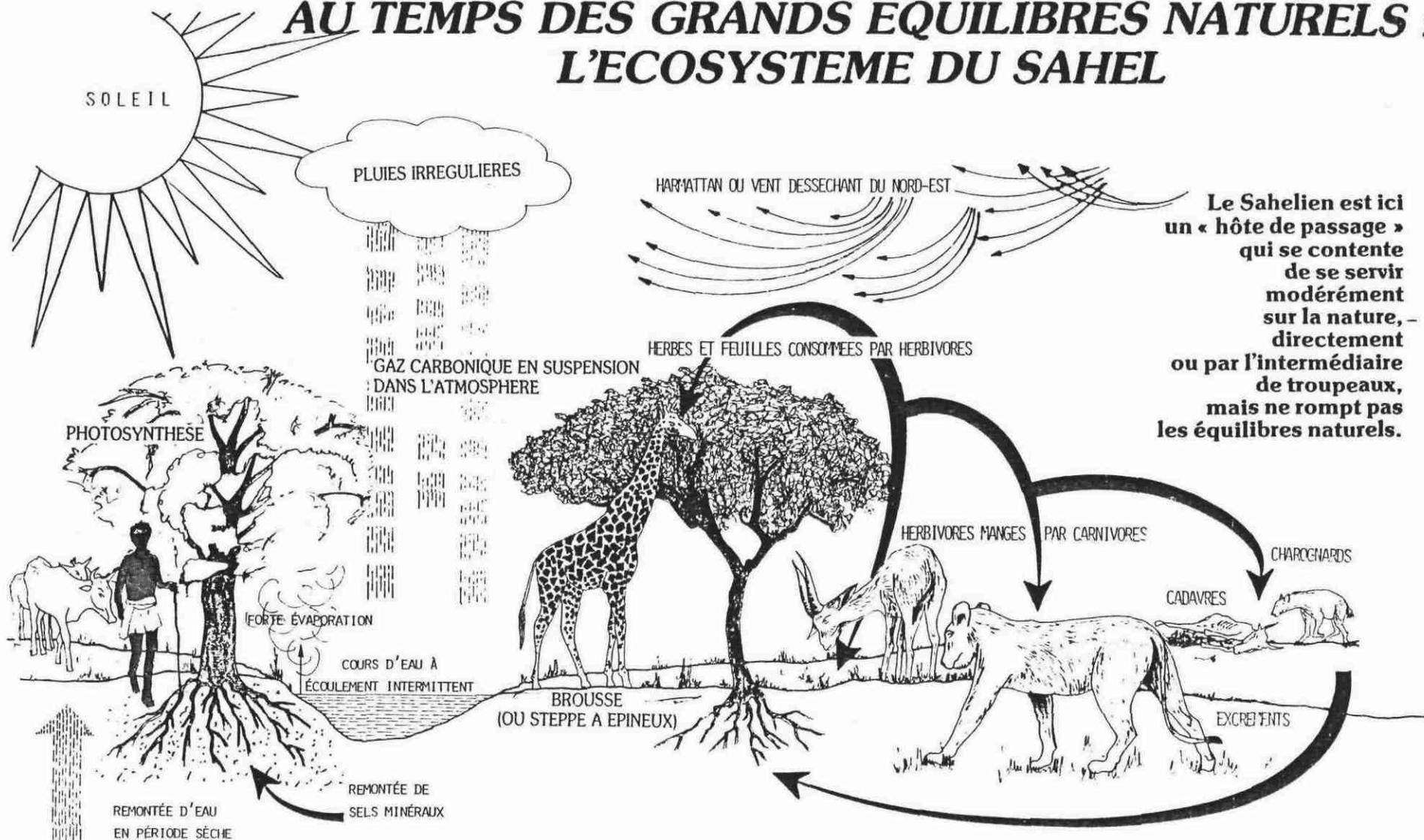
Fig. 27 : Zones de végétation en Afrique de l'Ouest/zones climatiques

Fig. 28 : Contexte climatique de la zone sahélienne

Fig. 29 : La sécheresse : diminution de la pluviosité/descente vers le Sud des isohyètes

Fig. 30 : Schéma synthétique du processus de désertification - aridification

AU TEMPS DES GRANDS EQUILIBRES NATURELS : L'ECOSYSTEME DU SAHEL



Le Sahélien est ici un « hôte de passage » qui se contente de se servir modérément sur la nature, — directement ou par l'intermédiaire de troupeaux, mais ne rompt pas les équilibres naturels.

Fig. 26 (Réf. 22)

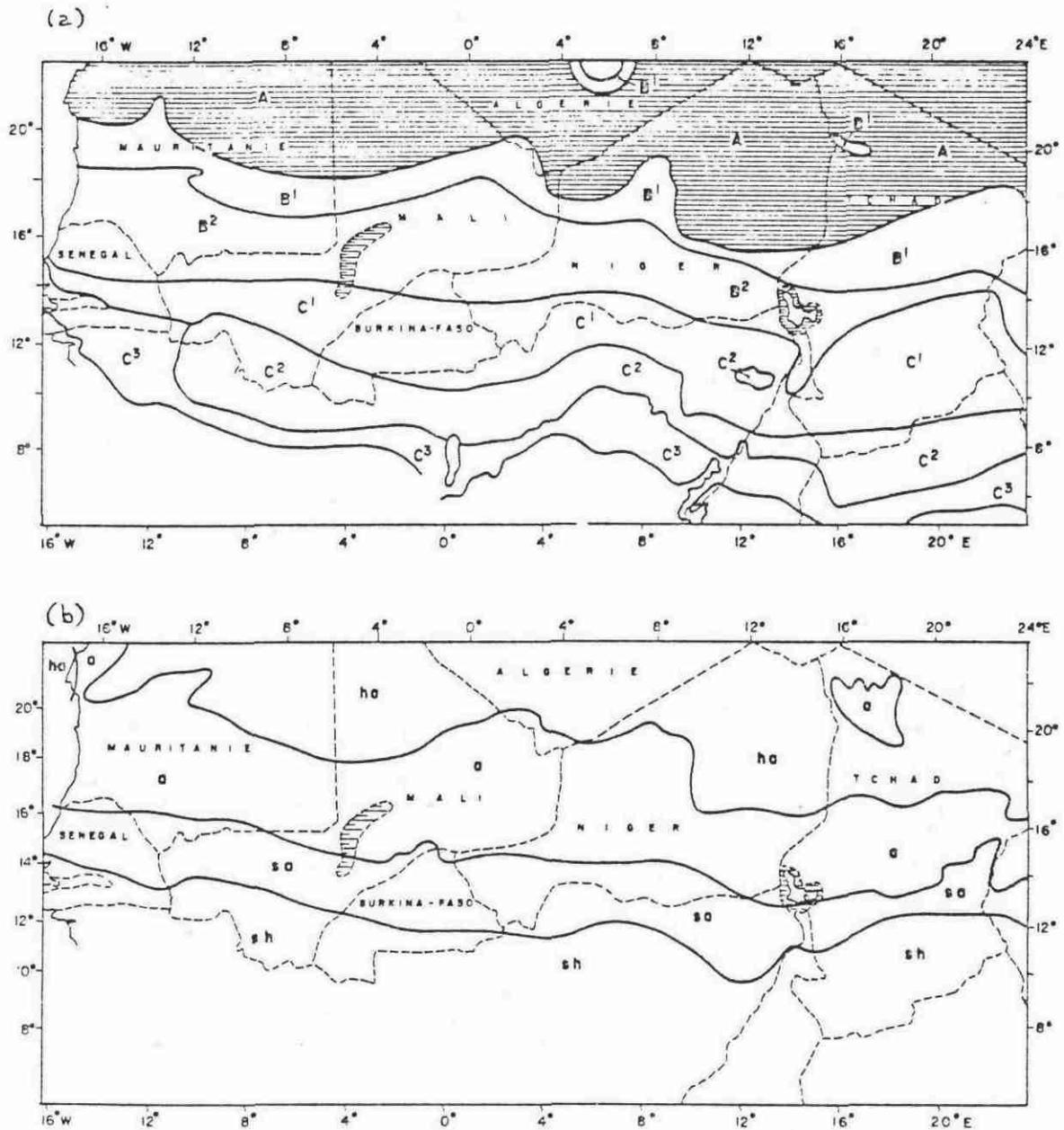


FIG. 4. — a) Zones de végétation en Afrique de l'Ouest : A : désert ; B1 : steppe franche (subdésertique) ; B2 : steppe boisée ; C1 : savane non différenciée (type sec) ; C2 : savane à base d'*Isoperlinia doka* et *I. dalzielii* ; C3 : savane non différenciée (relativement humide).
 b) Zones climatiques en Afrique de l'Ouest : ha : hyper-aride ; a : aride ; sa : semi-aride ; sh : sub-humide.
 D'après : a) O.M.M. Rap. sp. Environnement, 9, 459, [1977] ; b) UNESCO/Répartition mondiale des zones arides, MAB.N.T.7, CERCG/CNRS [1977].

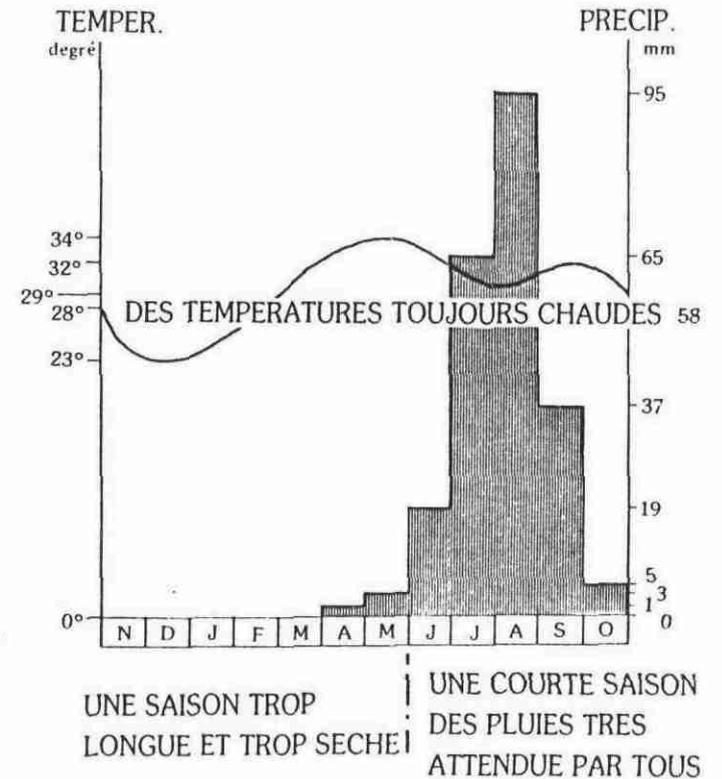
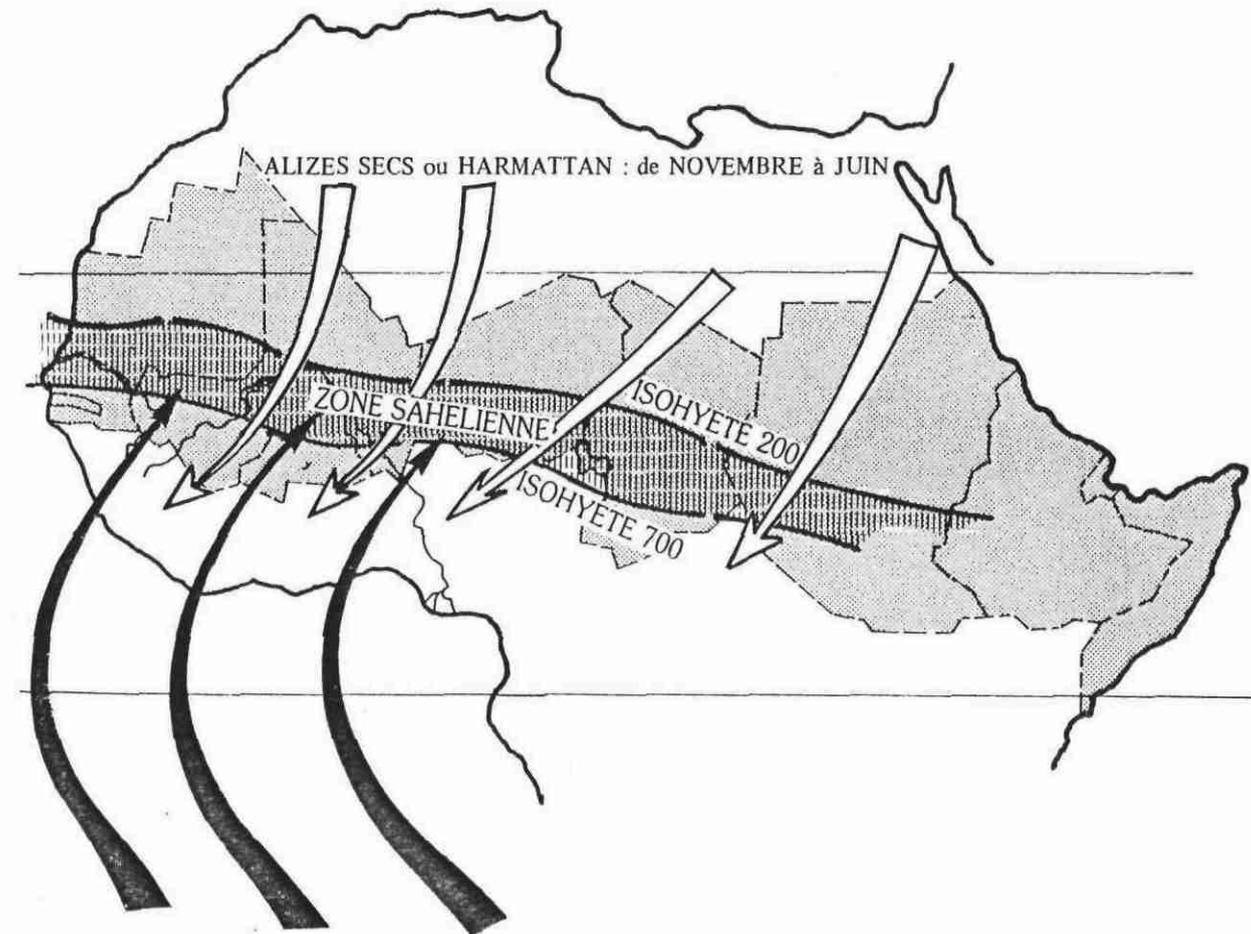
FIG. 4. — a) Vegetation zones in West Africa : A : desert ; B1 : semi-desert steppe ; C1 : undifferentiated [dry] savanna ; C2 : *Isoperlinia doka* and *I. dalzielii* savanna ; C3 : undifferentiated relatively moist savanna.

b) Climate zones in West Africa : ha : hyper-arid ; a : arid ; sa : semi-arid ; sh : sub-humid.

Fig. 27 (Rf. 30)

UN RYTHME CLIMATIQUE DÛ AUX VENTS

Fig. 29 (Réf. 22)



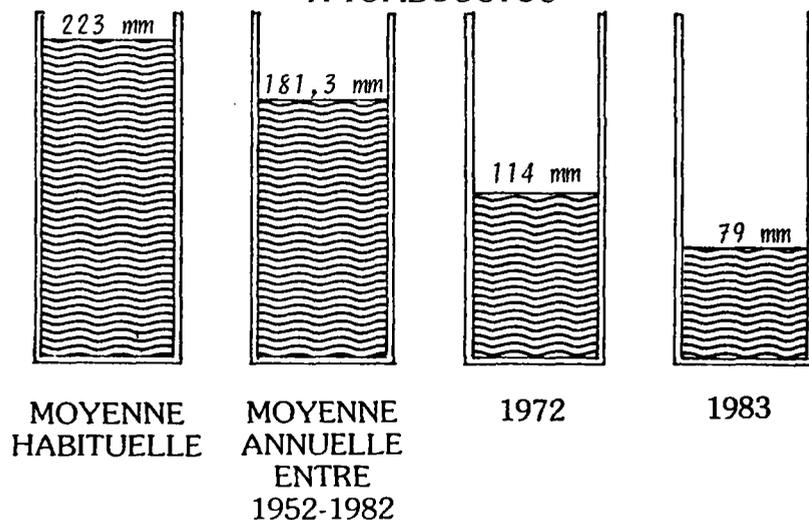
UN CLIMAT A DEUX TEMPS

(Données climatiques relevées à Tombouctou)

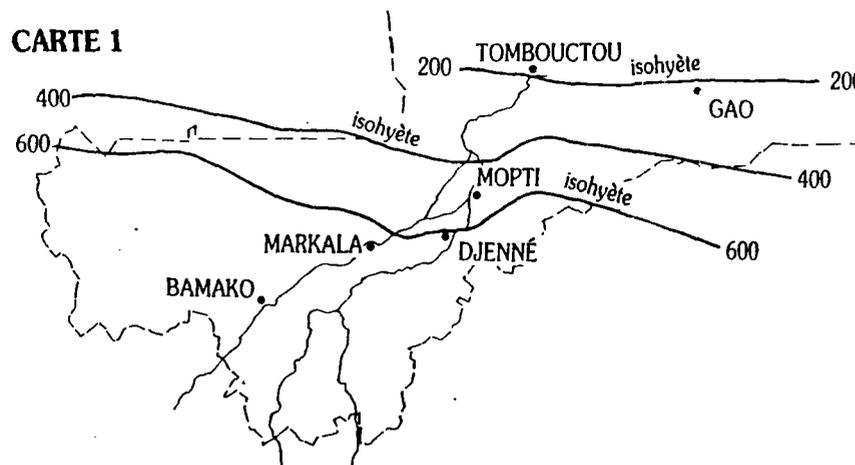
UNE DECENNIE DE SECHERESSE PERSISTANTE

Fig. 29 (Réf. 22)

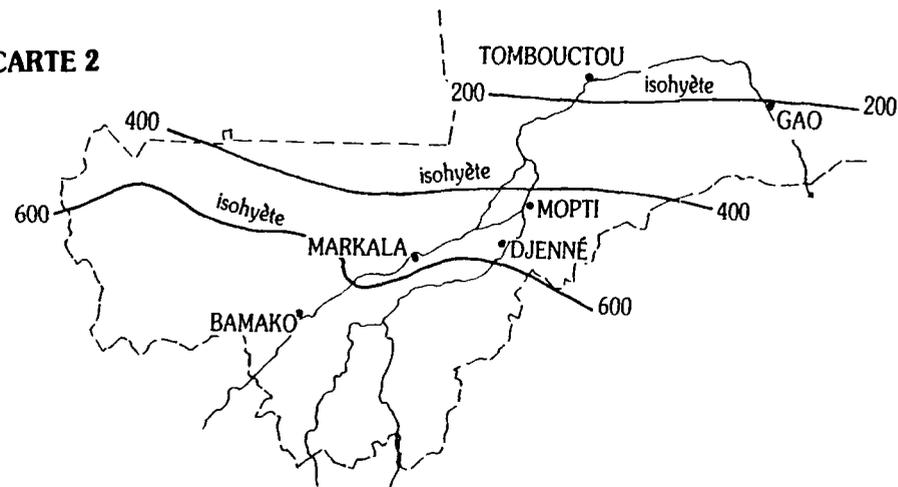
D'ANNEE EN ANNEE LES COLONNES D'EAU
A TOMBOUCTOU



CARTE 1



CARTE 2

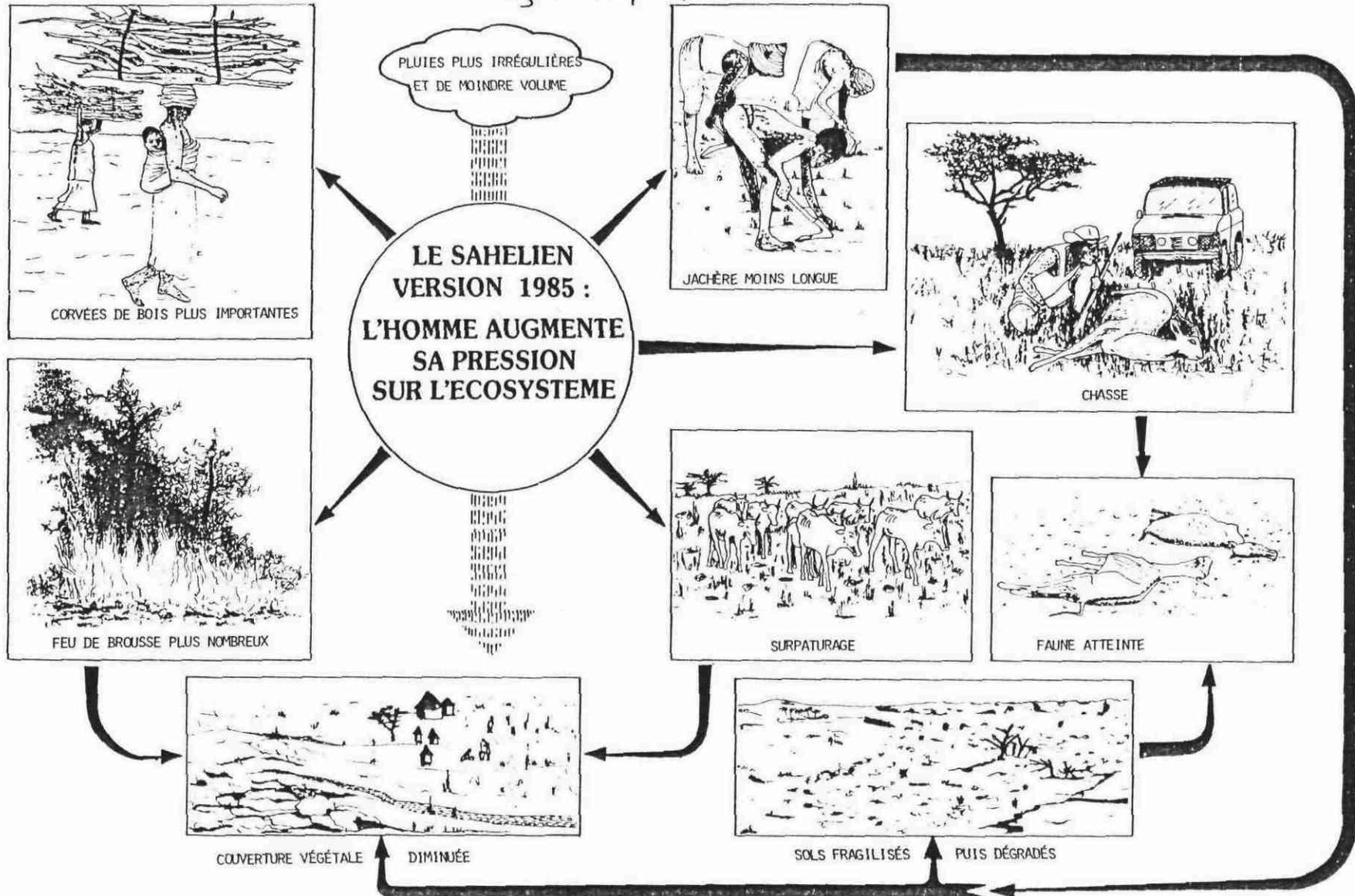


- Sur la carte 1, qui présente la partie sahélienne du Mali, les isohyètes sont tracées selon la moyenne des précipitations 1940-69.
- Sur la carte 2, selon celle des années 68 à 82 : dans ce laps de temps :
 - l'isohyète 200 mn est descendu de 75 km vers le Sud, dans la boucle du Niger.
 - l'isohyète 400 mn est descendu, vers l'Ouest, de 100 km.
 - l'isohyète 600 mn est descendu de la même distance vers Bandiagara.

*Ces éléments ont été relevés dans l'article de M.A. Gondolo « L'évolution au Mali de 1940 à 82 ». Etudes Sahéliennes 1984 - Institut de Géographie - Université de Haute-Normandie.

LA DESERTIFICATION EN MARCHÉ A PARTIR DES ANNEES 60 : L'HOMME EST DEVENU UN PREDATEUR

Fig. 30 (Réf. 22)



DOSSIER II

Evaluation des moyens de lutte contre l'aridification :

- mesures correctives des dégradations du sol et
- valorisation des ressources disponibles

La lutte contre l'aridification suppose :

1 - Une modification des activités humaines amenant à une dégradation directe du sol :

- a) destruction de la biomasse végétale existante ;
- b) méthodes d'exploitation inadéquates de la terre (surexploitation, salinisation par une mauvaise irrigation ; utilisation de machines agricoles non adaptés...);
- c) mauvaise gestion des élevages (valorisation quantitative plutôt que qualitative : surpâturage, non régénération de la flore annuelle puis destruction du couvert végétal pérenne).

2) Arrêter les processus déjà engendrés par ces activités humaines :

- a) dégénérescence des sols ;
- b) altération éolienne et hydrique accrue ;
- c) stérilisation chimique ;
- d) ablation de la couche superficielle du sol ; voile éolien ou pellicule de battance...

Nous présentons d'abord quelques mesures correctives qui limitent la dégradation des sols, puis nous décrirons l'utilisation de stratégies et ressources disponibles, parfois nouvelles (végétales, hydrologiques, techniques) qui permettent de rééquilibrer les contraintes de l'homme avec son environnement fragile.

I - REGENERATION DE LA STRATE LIGNEUSE ET HERBACEE

1 - Mise en défens des zones agro-pastorales trop appauvries

Arrêt total à court terme de toute forme de pression humaine et animale afin d'accroître le couvert végétal et de modifier les conditions d'aridité du milieu : fixation de sable en mouvement, diminution de l'albedo, diversification des espèces, diminution de l'érosion. La remontée biologique des écosystèmes pastoraux n'est pas assurée pour autant et elle suppose plusieurs années de mise en défens.

2 - Zone à vocation pastorale dominante

Favoriser la régénération naturelle de la strate ligneuse, choisir des espèces fourragères fortement appétantes et à croissance rapide. Diminuer la charge animale en fonction de la production réellement consommable. Pâturages en rotation. Interdire le pacage et la divagation des animaux.

3 - Zone à vocation agricole dominante

- Instauration de programmes d'agroforesterie pour assurer une meilleure intégration de l'arbre dans le système de production de façon à favoriser la protection des sols et à améliorer leur fertilité par la présence d'espèces fixatrices d'azote, telles que les acacias, notamment.
- Défricher au minimum et de façon sélective de manière à conserver les espèces les plus intéressantes sur le plan agricole comme pastoral.

- Réduire les cultures extensives, notamment des espèces allochtones (blé, soja, orge), inadaptés et qui épuisent les sols. Localiser ce type de culture aux zones où la végétation naturelle a déjà disparu et à peu de chance de se réinstaller (ex. glacis limoneux).
- Céréaliculture à proscrire des zones sableuses, fragiles, où la végétation a, en général, un bon potentiel de régénération pour le parcours.

La régénération de la végétation, compte tenu d'une faible productivité, ne peut se faire que si le sol lui-même est stable et apte à cette évolution. Inversement, le sol est d'autant plus stable et fertile qu'il est conquis par la végétation. Revaloriser la structure du sol et ses capacités chimiques et physiques revient donc à faciliter la reconquête de la surface pour les plantes.

II - STABILISATION DES SOLS

Les conditions générales de déstabilisation des sols - notamment les formes dunaires anciennes - et de mouvances sableuses, sont amplifiées et exacerbées par les actions anthropiques massives.

1) Les mouvements de sable constituent une nuisance locale dans les terres pastorales et sont très répandues dans les périmètres cultivés. Des microdunes appelées nebkas se forment parfois autour des arbustes et envahissent les terres cultivées (par exemple, le Ziziphus dans le Maghreb). Elles sont alimentées par les sols sableux pulvérisés par les labours et laissés en jachère, sans protection. Des terres fertiles peuvent ainsi être perdues pour la culture.

Ces pellicules sableuses d'apports éoliens peuvent être contrôlées par :

- l'édification de brise-vents autour des parcelles cultivées, végétatifs ou artificiels ;
- la stabilisation des formes dunaires avoisinantes.

2) La stabilisation des dunes de sable ne consiste en :

2.1 - une protection des dunes mouvantes contre les interférences biotiques ;

2.2 - une installation de coupe-vents sur la face des dunes exposée au vent ;

2.3 - l'implantation de semis d'herbe et la transplantation d'arbres et arbustes adaptés, élevés du côté abrité du coupe-vent. Cette dernière méthode aura une influence quasi-durable sur la matière organique ainsi constituée dans le sol. Fixation par des matériaux.

2.1 - Définir les périmètres protégés contre le piétinement et la circulation motorisée ; interdire le pacage et la divagation des animaux ; interdire le prélèvement d'éléments végétaux ; sensibiliser la population et limiter les feux de brousse ;

2.2 - palissades plastiques et arbustes en cordons parallèles de 5 mètres d'écart ou en échiquiers de 5 mètres de côté ;

2.3 - la fixation des dunes mobiles peut se faire soit par phytostabilisation soit par scellement artificiel à partir de divers matériaux. Dans tous les cas, il ne pourra s'agir que d'un champ de freinage global des formes dunaires

particulièrement dynamiques et menaçantes pour l'homme. De même, avant de contrôler ou de stopper l'avance des dunes, il s'agit d'abord d'avoir la meilleure connaissance possible du sens et des modalités de déplacement du sable. Les formations mobiles sont essentiellement des formations de remaniement d'anciennes dunes déstabilisées.

Certaines expériences récentes sont ambitieuses, comme l'édification d'un "barrage vert", ou l'implantation superficielle d'une couche synthétique sous le sable, susceptible de retenir l'eau.

Enfouis sous un mètre de sable, cette couche est constituée d'un mince niveau cotonneux dont la base est imperméable. Les eaux pluviales ainsi retenues peuvent faciliter le développement de la végétation et donc la fixation des dunes.

2.3.1 - La phytostabilisation par :

- Prosopis, mais il consomme beaucoup d'eau à l'âge adulte ;
- Euphorbes ;
- Tamaris nain et salicornes (comme *Arthrocnémum glauceum*) pour les sables grossiers ;
- *Zygophyllum waterlotii*, particulièrement pour les dunes de sable vives et récentes. Il assure un freinage important du vent et facilite l'implantation de
- *Euphorbia basalmica* ;
- *Cressia crética* ;
- *Suaeda ridusa* ;
- *Callotropis procéra*, plante à grands rameaux et larges feuilles, à croissance rapide et nécessitant peu d'eau. Elle facilite l'implantation des autres espèces et à un fort pouvoir protecteur éolien ;
- *Jojoba (Simmondsia chinensis)* aux multiples avantages et dont nous parlons par la suite de même que le
- *Leucaena*, arbre pérenne à croissance rapide.

Afin d'assurer la croissance de ces plantes, il convient de savoir si elles sont compatibles entre elles. On peut utiliser des briques de terre crue, creusent, dans lesquelles la végétation sera protégée. Ses besoins nutritifs peuvent exiger l'emploi d'engrais et la plantation associée de légumineuses, dans certains cas.

Enfin, cette pratique ne peut s'appliquer aux dunes de "crêtes en dents de scie", dont la dynamique est telle qu'aucun freinage végétal ne semble pouvoir y être exercé.

2.3.2 - Le scellement artificiel par :

- la technique des plaques de fibro-ciment pour faciliter la reprise de l'espace par la végétation. Ce procédé est surtout efficace sur les dunes mobiles (barkhanes, crêtes sigmoïdes ou en "dents de scie"), dont la morphologie est la progression se modifie selon la hauteur des plaques et

leur espacement respectif ;

- la technique des rideaux de palmes sèches, en bordure des palmeraies par exemple ;
- treillis plastique, à divers calibres de mailles et palissades déplaçables.

3 - Enfin, la conservation des sols passe par la lutte contre l'érosion, hydrique ou éolienne, et donc d'abord par l'abandon de l'utilisation des engins agricoles modernes qui effritent trop le sol ; du piétinement... Quelques solutions limitent l'altération superficielle :

3.1 - Etablissement de murets isohypses et cultures en terrasses ou en espaliers (rangée d'arbres fruitiers appuyés contre un mur ou contre un treillage), qui limitent le ruissellement et donc l'érosion.

3.2 - Introduction de façons culturales favorisant l'infiltration et la conservation des eaux dans les sols, de façon à augmenter le rendement superficielle des récoltes et accroître les possibilités de jachère. Par exemple, le creusement de rigoles suivant les courbes de niveaux ; l'épandage de gypse sur les surfaces scellées.

3.3 - Ley farming (cf. après), qui améliore les structures du sol et permet un meilleur contrôle de l'érosion.

3.4 - Le reboisement en acacias, contre le sealing, ou glaçage asphyxiant du sol résultant, par suite d'une dénudation végétale, d'une mobilisation de la partie superficielle du sol qui entraîne la dénudation du terrain, où les espèces annuelles ne parviennent plus à s'implanter.

III - STRATEGIES AGRO-PASTORALES

1 - Améliorations pastorales

En ce qui concerne l'élevage, les tendances actuelles montrent qu'on s'orientera de plus en plus vers des systèmes de production semi-intensif où les pâturages naturels qu'une partie de plus en plus faible de l'alimentation ; le reste étant fourni par les résidus des cultures, les arbustes fourragers et par les aliments provenant soit de périmètres irrigués voisins, soit du marché des aliments du bétail. Les mesures à prendre pour lutter contre la désertification dès que les pâturages commencent à se détériorer sont les suivantes :

1.1 - détermination des taux de charge appropriés (exemple : pâturages à *Atriplex vesicaria* ne peuvent supporter une charge supérieure à 1 ovin/6 ha.) ;

1.2 - étude de la phénologie des associations des pâturages désertiques, afin de déterminer les conditions dans lesquelles il convient d'assurer le repos des pâturages en périodes critiques, c'est-à-dire pendant la germination des plantes vivaces ;

1.3 - détermination des habitudes de pacage de bétail considéré ;

1.4 - création de réserves pour les périodes de sécheresse ou pour les reproducteurs, éventuellement associée à la constitution de réserves d'eau, surtout dans les systèmes de pâturage libre ;

1.5 - multiplier les points d'eau ;

1.6 - accroître la mobilité et la dispersion du bétail ;

1.7 - contrôler l'effectif global du cheptel afin de ne pas condamner les pâturages à la stérilisation et considérant qu'ils sont, plus que les reproducteurs ou le nombre de tête, la ressource de base des déserts et la réelle richesse du nomade ;

1.8 - encourager la plantation d'arbustes fourragers (Atriplex, Opuntia), adaptés aux conditions des zones arides ;

1.9 - sélectionner les meilleures bêtes ou de nouvelles espèces, plus productives et plus résistantes.

2 - Stratégies agronomiques

2.1 - En ce qui concerne l'extension de la céréaliculture et de l'arboriculture en sec, il est recommandé de :

2.1.1 - décourager les labours dans les zones à vocation pastorale et proscrire les outils inadaptés ;

2.1.2 - encourager la culture dans les zones d'épandage des crues et le long des talwegs, après les aménagements adéquats (banquettes, petits barrages à déversoirs) ;

2.1.3 - encourager la reconversion en parcours des friches à céréales, chaque fois que le sol et la végétation sont à un stade de dégradation qui n'est pas encore techniquement irréversible.

2.2 - Développement des herbages et conservation des sols

Nous avons déjà vu de quelle façon la couverture végétale influence la conservation des sols. Il est possible d'accroître notablement la production fourragère quand les pâturages eux sont limités :

2.2.1 - le simple système des enclos peut doubler en trois ans le rendement en fourrage ;

2.2.2 - les clôtures, associées à un traitement des broussailles aux herbicides et à l'utilisation d'engrais appropriés (20 kg N/ha), accroît encore le rendement de 20 à 70 % ;

2.2.3 - dans les sols peu profonds en topographie ondulée, le labourage suivant les courbes de niveau peut également augmenter le rendement ;

2.2.4 - enfin, l'alternance de cultures et de jachères sur des sols à texture légère, menacés par l'activité aratoire et donc la déflation, diminue l'érosion et améliore les conditions pédologiques.

2.3 - Amélioration et développement culturaux

Si l'on prend comme hypothèse climatique l'aridification, il n'est sans doute plus possible de compter, dans l'avenir, sur les eaux de pluie pour se maintenir dans les régions les plus gravement touchées. Ceci veut dire l'abandon d'un certain type de cultures, les cultures "sous pluies" d'hivernage. Il devient nécessaire de

s'orienter vers d'autres techniques plus proches de celles des milieux désertiques que des milieux arides, c'est-à-dire les cultures étagées d'oasis. Les cultures du "contre-saison", même irriguées, n'apportent qu'un apport en légumes aux cultures céréalières par ailleurs pratiquées : elles ne sont qu'un palliatif.

Toute solution doit faire appel à l'évaluation des potentialités génétiques des biotypes végétaux, bien adaptés au régime des précipitations, à la pauvreté des sols et à un cycle végétatif court. De même, il sera fait état des potentialités en eau du sol et du contexte géographique local. Voici quelques types de culture pouvant faire face à l'aridification :

2.3.1 - pratique de cultures vivrières et maraîchères sous ombrage (sous acacia albida, sous oasis) ;

2.3.2 - cultures temporaires pendant la saison des pluies, entre les isohyètes 400 et 800 ;

2.3.3 - plantations de palmeraie dans des dépressions dunaires stabilisées et entretenues par l'homme. Outre la production contre les vents, elles permettent une utilisation plus efficace de la nappe phréatique (exemple du Souf, Algérie) ;

2.3.4 - sites naturels de rétention des eaux de pluie, dans les dépressions sableuses ou à proximité du socle déprimé, proche de la nappe phréatique. Egalement dans les bas-fonds topographiques à mare permanente, ou "site de décrue". Les récoltes dominantes y sont les légumes et le blé ;

2.3.5 - systèmes pérennes, sur les rives des fleuves et sur les anciennes bourgoutières, jadis lieu de rassemblement des troupeaux en saison sèche. L'exemple d'un campement sur les rives du Niger s'est fait à partir de quatre manoeuvres : maîtrise de la crue et rétention des eaux de décrue pour la culture du riz flottant ; création d'un vaste périmètre irrigué pour des opérations de maraîchages ; maintien d'un certain élevage et développement de la pisciculture ; reconstitution partielle de la flore par reboisement.

2.3.6 - Oasis

Une oasis est un paysage rural parfaitement adapté à des climats connaissant à la fois faible pluviosité et forte évaporation. La végétation y est étagée et la culture sous ombrage facilement applicable (légumineuses). L'arbre-clef est le palmier qui sait puiser l'eau en profondeur et limite l'évaporation sous-jacente par ses palmes luisantes et larges.

2.3.7 - Le hey farming

Développé en Australie dans les années 30, ce procédé consiste à réaliser des rotations entre les céréales et les légumineuses fourragères annuelles. Il est nettement supérieur à la rotation classique céréales-jachères.

Ses avantages sont nombreux :

- amélioration de la structure et de la fertilité du sol grâce à l'apport d'azote ;
- accroissement des ressources fourragères et stabilité des revenus de l'élevage ;

- meilleur contrôle des phénomènes d'érosion, particulièrement quand le système est combiné à des banquettes dans les zones sensibles à l'érosion pluviale ;
- amélioration du contrôle des mauvaises herbes quand le système est bien géré.

2.4 - Propositions de cultures adaptées à l'aridification

2.4.1 - Le Medicago

C'est une légumineuse fourragère qui entre dans le plan du "ley farming". Le rendement est élevé : 2000 unités fourragères (UF)/an/ha. Bien que l'installation et l'entretien des plants soit coûteux la première année (2500 F/ha), le pied a une longévité de 5 ans, ce qui ramène l'UF à 0,30 F.

2.4.2 - L'Atriplex nummularia

Après sélection de plusieurs espèces d'Atriplex, il se révèle être le mieux adapté aux conditions climatiques et podologiques des parcours des hautes plaines désertiques. Le taux de réussite en pépinière atteint 95 %. L'UF est de 0,40 F et la production est de 550 UF/an/ha. Cette plante a pour objectif principal la production de fourrage et de bois de chauffe. Provenant d'Australie, elle subsiste dans des climats où la pluviométrie ne dépasse pas 100 à 150 mm/an.

2.4.3 - Le Jojoba

Origine : Mexique

Le Jojoba (prononcer ho-ho-ba) a pour nom vrai *Simmondsia chinensis*.

2.4.3.1 - Qualité physique

- fruit : graine marron très protéinée ;
- supporte les températures extrêmes du désert : ne nécessite que 100 mm d'eau par an lors de sa croissance, soit en hiver et au printemps. Résiste un an sans aucune pluie ;
- prédilection pour les terrains sablonneux ;
- parfaitement résistant au sol ;
- longévité : 100 ans ; taille adulte : 2 à 3 mètres de haut ;
- productif au bout de la cinquième année et rendement maximum la septième ou huitième année ;
- ne concurrence pas les cultures vivrières traditionnelles des zones arides ;
- il n'est pas toujours possible de différencier les plantes mâles (étamines) des plantes femelles (pistiles).

2.4.3.2 - Qualité économique

L'expérience de la culture du jojoba a été menée au Soudan. Elle s'est révélée particulièrement intéressante, tant sur le plan agronomique qu'économique. La graine s'est vendue 20 \$ la livre en 1981. Or, la production s'est élevée à 6000 livres/ha, soit une recette brute de 120.000 \$/ha : 3,5 fois plus que le café !

Ces graines contiennent 50 % de cire liquide, composée d'acides gras et d'alcool, semblables aux spermacetis ou "blanc de baleine" (huile provenant d'une poche cérébrale du cachalot), qui se vend très cher sur le marché mondial au point que les USA en ont constitué des stocks. L'huile de jojoba est donc un substitut très intéressant du "blanc de baleine" car il a la même résistance à des pressions extrêmes et la même viscosité, que n'altèrent en rien les chauffes répétées à hautes températures. Elle a également la même incapacité à rancir (n'absorbent pas l'oxygène de l'air et ne peut donc former d'aldéhydes). Selon le professeur Demetrios Yermanos (Université de Californie), l'huile de jojoba est utilisable pour :

- la fabrication de nombreux produits pharmaceutiques, cosmétiques de luxe ;
- la consommation humaine ;
- des aliments de choix pour le bétail (contient 35 % de protéines) ;
- la composition de linoléums et de détergents ;
- la fabrication de cires lustrantes, de papiers carbonés... etc.

2.4.3.3 - Application aux zones arides

Toutes zones arides ou hyper-arides. Plantation même en pleine dune car ne nécessite aucune irrigation. Le sable est fixé autour de l'arbuste et le sol, profondément aéré, est stabilisé. En effet, le jojoba a un système racinaire profond d'environ 30 m et ce, dès les premiers mois après la plantation. Il constitue une excellente barrière au vent et peut permettre la culture de légumineuses sous semi-ombrage. Notons enfin que sa croissance fut plus rapide et sa production plus importante au Soudan qu'au Mexique.

2.4.4 - Le Leucaena

A la suite du projet "50.000 plants pour le Niger", projeté à 260 km de Niamey afin de créer une ceinture de verdure pour lutter contre l'ensablement d'un petit village de 3.500 habitants, un ingénieur en agronomie tropicale, Leuwers, expérimenta cet arbre. Il s'agissait d'étudier les conditions d'adaptabilité d'une plante aux variations d'ensoleillement, de pluviosité, de température et de salinité qui lui réserve la zone sahélienne.

Le leucaena (mimosacée de la famille des légumineuses) se présente comme un arbre pérenne à croissance ultra-rapide (7 m/an au début) ayant une fréquence de coupe d'environ quatre fois par an. Il peut atteindre 9 m de haut et se taille facilement (taille proche du sol pour faire venir des pousses plus fortes) et à tout âge.

Ces qualités économiques sont multiples : combustible, bois d'oeuvre, pâte à papier, compost organique après broyage, comestible pour l'homme (graines) et pour le petit ou gros bétail (fourrage, avec une productivité de 40 à 90 tonnes/an/ha,

soit 12 à 30 tonnes de matières sèches/an/ha).

Très productif (30 à 100 stères/ha), il s'applique très bien aux zones arides pour ces conditions d'adaptabilité précédemment citées, mais aussi car le leucaena fait office de brise-vent, pare-feux, contribue à enrichir le sol et s'impose dans les sols les plus pauvres, les plus rocailleux, chahutés ou en pente.

IV - MISE EN VALEUR DES RESSOURCES HYDROLOGIQUES

1 - Valorisation des nappes phréatiques

Elles constituent pratiquement la seule ressource hydrique utilisable dans les régions arides au nord de l'isohyète 400, où l'écoulement des cours d'eau est trop intermittent et aléatoire. Le taux d'évaporation y est trop élevé pour des aménagements permanents avec retenues d'eau. Toute valorisation des nappes phréatiques doit être précédée d'une étude hydrogéologique exhaustive afin d'évaluer la vitesse de renouvellement du niveau aquifère et de déterminer l'origine de l'alimentation, en cas de pompage.

L'utilisation des nappes d'eau souterraine pour l'irrigation se pratique depuis des siècles. Il est à envisager de reprendre le système des foggaras, galeries souterraines conduisant l'eau de la nappe vers la surface à irriguer.

2 - Aquifères profonds

Ils ne sont accessibles que par les techniques industrielles de forage. Ils sont aujourd'hui assez bien identifiés et classés d'après la situation, l'âge et la nature de la roche-réservoir. Les quantités d'eau emmagasinées ont fait l'objet d'évaluations diverses pour un Sahara qu'on a pu qualifier de "pays sec riche en eau" (Klitzsch, 1971); eau profonde, salée et fossile. Ainsi, l'aquifère du Continental intercalaire du Sud algérien contient environ 24 milliards de m³ ! Mais ces nappes s'épuisent sans pouvoir se renouveler, et, quand les plans de mise en valeur sont basés uniquement sur le forage de puits, l'exploitation ne peut être envisagée que pour une courte durée.

3 - Autres ressources en eau

- "charger" les nuages (quand ils existent) de particules hygroscopiques. Les particules absorbant les gouttelettes minuscules en suspension dans le nuage finissent par donner des gouttes assez grosses pour se transformer en pluie ;
- dessaler l'eau de mer est un projet ambitieux et toujours pas économiquement rentable. Mais beaucoup de zones arides sont littorales. Des expériences menées en Israël ont montré qu'il était possible d'utiliser des eaux salées, ou saumâtres (de 10 à 13 grammes NaCl/litre) pour l'irrigation de certaines cultures. Ne s'y prêtent, toutefois, que des sols sableux, dont la texture, à l'inverse de celle des sols argileux, s'oppose à la fixation des sels dissous et permet leur lessivage rapide ;
- enfin, bien sûr, le réseau hydrographique, qui, comme aux Etats-Unis a pu permettre l'irrigation par le détournement du Colorado dans l'Imperial Valley, du désert de Sonora.

4 - Aménagements hydrauliques

- irrigation ; c'est une tâche délicate car il faut prévoir les crues et le

drainage des eaux en aval, sinon c'est la stérilisation par salinisation. De même, l'irrigation doit être continue mais limitée en surface. Dans certains cas, l'installation de barrages peut être complémentaire des moyens traditionnels, par exemple en amont de l'oued ;

- étalement des eaux de crues ;
- équipement des petits bassins : aménagements hydrauliques agricoles modestes, intéressant des superficies cultivables (de 10 à 100 ha). Sont considérées comme aménageables toutes les zones de dépression où, par suite de venues d'eau externe, il est possible de pallier les déficits hydriques pluviométriques. Ces zones topographiquement aménageables constituent un élément important des grandes surfaces d'altitude modeste et de relief peu contrasté (exemple des terrains précambriens sahéliens) dans la zone des cultures (sud de l'isohyète 400) :
 - plaines en amont du réseau hydrographique, dominées par des bassins peu importants ;
 - seuil d'aval de certaines plaines avec création de retenues temporaires par surélévation (irrigation par pompage ou cultures de décrue).

Conclusion

Les années 70 ont amené avec elles toute une série de conférences importantes convoquées par les Nations Unies sur les grands problèmes mondiaux que suppose la désertification. Il existe actuellement une organisation de soutien efficace, à savoir le Programme Régional pour les Zones Arides (PNUD, Banque Mondiale, Israël), mais il ne faut pas s'arrêter là. Aux 80 % de la consommation totale, l'agriculture est le plus gros demandeur d'eau des régions arides, alors qu'elle suffit à peine à l'alimentation humaine. Il est urgent de créer un système de contrôle et de gestion de l'eau, capable de maintenir et d'améliorer la production agricole, qui est le véritable support des économies des pays concernés par l'aridification.

Les nouvelles techniques doivent être développées : télédétection, nouvelles irrigations, forages, nouveaux systèmes agronomiques, mais sans pour autant dédaigner les façons culturales traditionnelles ou l'information et l'implication des paysans du Tiers Monde.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - ALCOFORADO M.J. et al. - Les indices de Gaussen et d'Emberger appliqués au Portugal. 1983. Recherches géographiques de Strasbourg, n° spécial 23, p. 1 à 13, tome 2.
- 2 - AFRIQUE - AGRICULTURE n°149 (1988) - Amélioration pastorale au Maroc... ou l'image d'un désert fertile.
- 3 - AFRIQUE AGRICULTURE n°150 (1988) - Sombre constat à Dakar.
- 4 - AFZALI H. (1988 - janv.) - La désertification : les causes et les solutions. BRGM : rapport interne.
- 5 - AFZALI H. (1988 - fév.) - La déforestation, une des causes principales de la désertification. La reforestation est un moyen pour l'endiguer. BRGM : rapport interne.
- 6 - AGARWEL A. (1979 - janv.) - Why the world's desert are still spreading? Nature Vol. : 277, p. 167-168.
- 7 - BARRERE P. (1984) - La dynamique des sables dunaires aux environs de Nouakchott (Mauritanie). Trav. Lab. géogr. phys. appl. n°8, p. 23 à 57.
- 8 - BERGER A. (1986) - Désertification dans les régions à climats fluctuants. Exemple de la région Méditerranéenne. Desertification in Europe. Information symposium, p. 15-34.
- 9 - BISWAS and BISWAS (1980) - Desertification. Environmental sciences and applications, Vol. 12, Edit. : Pergamon, Press.
- 10 - BISWAS A.K. (1988) - Arroser le désert. Forum du développement, p. 9.
- 11 - CESTA (1985) - Pour une politique scientifique internationale de l'environnement, 225 p., édit.
- 12 - CHADWICK M.J. (1979) - Desert ecosystems. Nature, Vol. 280, p. 522.
- 13 - COMBAZ A. - Le désert. Revue de la CFP.
- 14 - COOKE R. and WARREN A. (1973) - Geomorphologie in Desert - B.T. Batsford. London, 364 p.
- 15 - COUREL M.F. et al. (1984) - Surface Albedo and the Sahel drought. Nature Vol. 307, p. 528 à 531.
- 16 - COUREL M.F. (1985) - Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse Paris I. 447 p.
- 17 - COURTY M.A. (1984) - Caractérisation de la désertification par les microtraits pédologiques et sédimentaires. Exemple au Nord-Ouest de l'Inde. 10ème R. Ann. Sciences de la terre. Bordeaux, p. 155.

- 18 - DESERTIFICATION - AFRIQUE (1988) - Sahel : des colloques contre la désertification. AFP : Sciences n°596.
- 19 - ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS - Aride (domaines), p. 370.
ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS - Déserts (vie dans les), p. 471.
- 20 - FLORET Ch. et PONTANIER R. (1982) - L'aridité en Tunisie Présaharienne. Travaux et documents de l'O.R.S.T.O.M., n°150.
- 21 - GIRARDON J. (1984) - Déserts : la grande menace. Sciences et Avenir n°445.
- 22 - GUINAMARD M. - Comité Français pour l'UNICEF - Sahel : histoire d'une désertification/Centre Régional de Documentation Pédologique de Lyon : CRDP, 1985, 90 p. ISBN 2-86625-053-2.
- 22 bis - HAMZA A. (1983) - Contribution à l'étude de la morphogenèse historique en Tunisie centrale : le cas du bassin versant de l'Oued H'Jel. Recherche géographique de Strasbourg, n° spécial 23, p. 55 à 68.
- 23 - JOLY F. et DEWOLF Y. (1983) - Les marges sahariennes du Maghreb comme champ de recherches en géographie physique. Recherches géographiques de Strasbourg. N° spécial 23, p. 79-85, Tome 2.
- 24 - La désertification dans les zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest : 1985. USA Washington World Bank, 71 p.
- 25 - La grande Encyclopédie LAROUSSE - Aride (domaine), p. 994.
- 26 - La grande Encyclopédie LAROUSSE - Désert, p. 3780.
- 27 - LAOUINA A. (1983) - L'évolution du relief dans le Maroc Nord-Oriental à travers l'étude du couloir de Taourirt-El Aïoun. Recherches géographiques de Strasbourg, n° spécial 23, p. 87 à 95, tome 2.
- 28 - MABBUTT J.A. (1977) - Aspects climatiques et écologiques de la désertification. Nature et ressources, Vol. XIII, n°2, p. 3 à 10.
- 29 - MABBUTT J.A. et FLORET C. (1983) - Etudes de cas sur la désertification. Natural resources Research, n°18, 291 p.
- 30 - MARGAT J. (1985) - Hydrologie et ressources en eau des zones arides. Bull. Soc. géol. Fr. (8), t. I, n°7, p. 1009 à 1020.
- 31 - MINGUET M. et CHEMIN M.C. (1982) - Utilisation des images Landsat pour la cartographie de la dynamique éolienne et la définition en milieu sahélien. 4ème colloque international du G.D.T.A., p. 135-149.
- 32 - MINGUET M., CHEMIN M.C. et MOZET M.D. (1983) - Analyse des causes de la désertification due au vent dans les oasis du Sud marocain. Recherches géographiques de Strasbourg, n° spécial 23, tome 2, p. 111 à 120.
- 33 - MENSCHING H.G. (1983) - Etude comparative de la morphodynamique actuelle dans la bordure méditerranéenne du Sahara et dans sa bordure tropicale (Sahel). Recherches géographiques de Strasbourg, n° spécial 23, tome 2, p. 121 à 129.

- 34 - MICHEL P. (1985) - Sécheresse et transformation de la morphodynamique dans la vallée et le delta du Sénégal. Rev. de Géomorphol. dyn. Vol. 34, n°4, p. 113-130.
- 35 - NATURE ET RESSOURCES (1984) - Climat, sécheresse et désertification. Vol. 20, n°1, p. 2 à 9.
- 36 - NOTES ET DOCUMENTS (1975) - La sécheresse en zone sahélienne : causes, conséquences, études des mesures à prendre, n°4216, 4217, p. 1 à 75.
- 37 - PETROV M.P. (1976) - DESERTS OF THE WORLD - Israël programs for scientific translations WII 447 pages. Edition : HALSTED PRESS BOOK.
- 38 - REINECK He., SINGH Ib. et al. (1973) - Depositional sedimentary environment ed. Springer - Verlag. Part II : Desert environment, p. 183-212, fig. 274-379.
- 38 bis - ROGNON P. (1983) - Essai de définition et typologie des crises climatiques. Actes coll. AGSO Bordeaux, Mai 1983. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine - Bordeaux N°34 et CNRS Cahiers du Quatenaire n° spécial. 1983, p. 151-164, 4 fig.
- 39 - SCHEIDER S. (1987) - La modélisation du climat. "Pour la Science", juill. 1987.
- 40 - SCIENCES ET VIE
- 1979 (Déc.) - La bataille contre la faim est peut-être perdue ? n°747, p. 26 à 32.
- 1981 (Août) - Sahel : un barrage contre la faim, n°767, p. 76 à 82.
- 1983 (Janv.) - Jojoba, n°784, p. 96-97.
- 1983 (Juin) - Effets bénéfiques de l'augmentation potentielle de CO₂ pour l'agriculture, n°789, p. 48-50.
- Hors série n°131 - Les déserts en marche, p. 122-129.
- 41 - SCHOELLER H. (Prof. fac. sciences Bordeaux, 1955) - Hydrogéol. Vol. 1 et 2, IFP - ENSPM.
- 42 - SIBOT P.L. (1988) - L'irrigation bien comprise. Afrique - Agriculture n°150.
- 43 - STOPPING THE DESERT'S MARCH (1979) - Nature, Vol. 279, p. 336.
- 44 - TIHAY J.P. (1983) - Implications géomorphologiques de la néotectonique dans la vallée de l'oued Sahel Soumman (Algérie) - Recherches géographiques de Strasbourg, n° spécial 23, p. 157-163, tome 2.
- 45 - TRICART J. et MICHEL P. - Morphogenèse et pédogenèse. II - Application à l'Ouest Africain - Extrait des sciences du sol, 2, 1965 - pp. 149-171.
- 46 - WEISROCK A. (1983) - Les galets calcaires de l'oued TIDZI (Sud-Ouest du Maroc). Existe-t-il un façonnement "semi-aride" ? Recherches géographiques de Strasbourg, n° spécial 23, Tome 2, p. 165-178.

réalisation
service
reprographie
du BRGM