

*Relations entre
la variabilité
des précipitations
et celle des productions
primaire et secondaire
en zone aride*

INTRODUCTION

Il est bien connu que les précipitations sont très variables en zone aride ; cette variabilité se manifeste à la fois dans le temps et dans l'espace ; elle est inversement liée aux hauteurs moyennes, autrement dit, elle croît avec l'aridité. Toutefois, le degré de variabilité ne dépend pas seulement des précipitations moyennes annuelles, mais aussi du type de climat considéré, c'est-à-dire du régime saisonnier des précipitations et des températures et aussi des conditions géographiques générales et locales.

Comme les productivités primaire et secondaire dépendent avant tout (mais pas seulement) des précipitations en zone aride, il était intéressant d'examiner les relations entre ces différents paramètres et leur variabilité, afin de déterminer si, par exemple, la variabilité de la production est atténuée ou, au contraire, accentuée par rapport à celle de la pluviosité.

Pour ce faire, nous avons comparé la variabilité de la pluviométrie annuelle sous différents climats (méditerranéen, subtropical, tropical, équatorial, tempéré, etc.) par tranches de moyennes annuelles identiques, généralement de 100 mm.

Ensuite, nous avons comparé la variabilité de la pluviosité annuelle à celle de la production primaire de la végétation naturelle et des cultures, puis à celle de la production secondaire par le biais de l'effectif des troupeaux. Cette comparaison a été effectuée sur un nombre de sites aussi élevé que possible, sous divers types de climats de la zone aride mondiale, à partir des données de la littérature. Ce dernier point ne laisse pas de soulever des problèmes, car si les moyennes pluviométriques publiées sont extrêmement nombreuses et généralement fiables, les paramètres statistiques qui les concernent ne sont généralement pas disponibles ; il faut donc recourir aux données brutes afin de calculer ces paramètres. Ces données brutes sont également difficiles à obtenir. Par ailleurs, les données précises et fiables relatives à la production primaire sont très rares et/ou souvent enfouies dans la littérature grise ; il s'en faut souvent que les données pluviométriques de ces sites accompagnent celles de la production. Les données relatives à la production secondaire sont encore beaucoup plus rares : il s'agit généralement d'ordres de grandeur estimés à partir d'effectifs évalués à l'échelle d'un pays ou d'une province ; ces estimations sont basées sur des enquêtes, sur les déclarations d'impôts, sur des campagnes de vaccinations, ou tout simplement sur des évaluations plus ou moins subjectives de la part des autorités administratives.

La collecte et le rassemblement des données donc constituent déjà en eux-mêmes un travail d'investigation. Cependant, à la suite de recherches bibliographiques approfondies menées grâce à de nombreuses contributions, nous avons pu réunir quelque 80 séries de données qui comprennent un millier de couples de mesures de la pluviosité annuelle et de la production primaire annuelle. En ce qui concerne la production secondaire, nous avons utilisé des données statistiques détaillées des effectifs des troupeaux sur une période de vingt-cinq ans dans le Sud tunisien (LE HOUÉROU, 1962).

MÉTHODOLOGIE

Un des problèmes méthodologiques majeurs réside dans le choix du critère de mesure de la variabilité. Si les possibilités sont nombreuses, aucune ne se révèle entièrement satisfaisante ; chaque méthode présente des avantages et des inconvénients (VARNEY, 1925 ; KATSNELSON, 1956 ; NEUMAN, 1956 ; KATSNELSON et KOTZ, 1957 ; WALLÈN, 1958 ; LE HOUÉROU, 1959 ; WALLÈN et BRICHAMBAUT, 1962 ; KATSNELSON, 1964 ; BROWN et COCHEMÉ, 1969 ; AUSTIN et NIX, 1978 ; LE HOUÉROU, 1984 ; 1986 ; 1988).

Plusieurs méthodes ont été testées : écart moyen à la moyenne, écart moyen séquentiel, indices percentiles, coefficient de variation, rapport des extrêmes, différence relative des extrêmes, etc. Nous avons constaté que l'utilisation de l'écart-type et du coefficient de variation présentait plus d'avantages et moins d'inconvénients que les autres méthodes, en dehors des régions proprement désertiques. En effet, le taux d'asymétrie demeure généralement modéré au-dessus de 100 mm de moyenne annuelle, la différence entre la moyenne et la médiane étant le plus souvent inférieure à 10 %. Dans 95 % des cas environ, cette différence est positive, c'est-à-dire que la moyenne est supérieure à la médiane ; mais la situation inverse se présente dans environ 5 % des cas. Il n'y a donc pas d'inconvénient sérieux à utiliser cette méthode lorsque le taux d'asymétrie est faible, car l'erreur ainsi commise est inférieure à l'erreur expérimentale sur les mesures (GLOVER et ROBINSON, 1953 ; GLOVER et HENDERSON, 1954 ; GRIFFITHS, 1958, 1961 ; GRIFFITHS et HEMMING, 1963 ; BROWN et COCHEMÉ, 1969 ; LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988).

Le tableau III montre d'ailleurs que, dans le cas d'un taux d'asymétrie de 10 % (sous une pluviosité moyenne de 220 mm), la différence entre la probabilité gaussienne et les déciles est très faible.

Dans les chiffres que nous avons traités, l'écart moyen à la moyenne (EMM) est systématiquement et significativement inférieur de 20 % à l'écart-type (ET) ou au coefficient de variation (CV) :

$$\text{EMM} = 0,80 \text{ ET } \pm 0,05$$

L'écart moyen séquentiel (EMS), au contraire, est systématiquement supérieur à l'écart-type de 25 % :

$$\text{EMS} = 1,25 \text{ ET } \pm 0,05$$

Mais ce rapport EMS/ET tend à augmenter légèrement avec la variabilité ; il est d'environ 1,2 sous 500 à 1 000 mm de pluviosité moyenne annuelle et de 1,3 sous 50 à 200 mm. Cependant, contrairement à l'EMM et à l'ET, l'EMS ne dépend pas du type de distribution et présente donc un avantage lorsque les distributions sont fortement asymétriques.

La méthode des déciles (d 0,9 - d 0,1 / d 0,5), utilisée par les climatologues australiens (AUSTIN et NIX, 1978), offre le même avantage de ne pas dépendre du type de distribution.

Nous avons aussi utilisé l'indice de fiabilité qui est, en quelque sorte, l'inverse du coefficient de variation, c'est-à-dire le rapport entre la fréquence de 80 % (ou de 75 %) et la moyenne (ou la médiane). Cet indice est souvent utilisé par les agroclimatologues (HARGREAVES, 1973, 1974 ; DANCETTE, 1977 ; DANCETTE et HALL, 1979 ; VIRMANI *et al.*, 1980 ; LE HOUÉROU, 1982-1984 ; LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988). Bien entendu, le taux de fiabilité décroît avec l'aridité ; en zone désertique, il peut descendre à 0,20 et il atteint généralement 0,70 à 0,80 en zones semi-aride et subhumide, lorsque la distribution s'approche de la normalité gaussienne. En d'autres termes, la pluviosité assurée 4 années sur 5 peut ne pas dépasser 20 % de la moyenne en zone désertique mais elle atteint 70 à 80 % de celle-ci en zone semi-aride et subhumide. Il y a naturellement des exceptions à cette règle, comme dans le Nordeste brésilien où on peut rencontrer des taux de fiabilité de 0,20 sous des pluviosités moyennes annuelles de 400 à 500 mm (LE HOUÉROU, 1986).

La variabilité spatiale est très mal connue (SLATYER et MABUTT, 1964 ; SHARON, 1972). Il est seulement admis que la proportion des pluies de convection, donc l'importance de la variabilité spatiale, dans le total annuel croît avec l'aridité ; elle est donc inversement proportionnelle à la pluviosité moyenne annuelle. Il existe cependant des cas particuliers, à vrai dire très mal connus, représentés par les «lignes de grains» préférentielles dans les tropiques arides et les «trajectoires d'orages» privilégiées en zone aride méditerranéenne. Tout comme les «couloirs de grêle», ces chemins semblent fortement influencés par le relief.

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE ET DISTRIBUTION CLIMATIQUE DE LA VARIABILITÉ PLUVIALE

Les tableaux I et II et les figures 1, 2 et 3 montrent les coefficients de variation de la pluviosité annuelle dans quelques zones géographiques, pour des tranches qui varient de 50 à 2 000 mm, sur un total de 1 100 stations d'Afrique, d'Amérique et d'Asie. À la lecture de ces tableaux on voit, de façon générale, que :

- la variabilité de la pluviosité est inversement liée à la moyenne annuelle quel que soit le type de climat. Cette règle souffre néanmoins une exception : le Nordeste brésilien où la variabilité paraît indépendante de la moyenne, avec des taux d'asymétrie énormes ; la médiane peut être inférieure à 30 % de la moyenne et les pluies assurées 4 années sur 5 inférieures à 20 % de cette moyenne dans certaines stations ; pour l'ensemble des stations de 400 à 800 mm, les pluies assurées 4 années sur 5 ne représentent que 60 à 65 % de la moyenne, alors que, en région méditerranéenne et au Sahel, elles correspondent à 70-75 %, sous les mêmes tranches (LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988 ; LE HOUÉROU, 1986) ;

- la variabilité en Afrique du Nord est systématiquement et significativement supérieure à celle du Proche-Orient, avec quelques exceptions telles que les montagnes du Zagros, au sud de l'Iran (WALLÉN et BRICHAMBAUT, 1962) ;

- contrairement à une croyance répandue, la variabilité en zone sahélienne et soudanienne est inférieure à celle de la plupart des zones arides mondiales, notamment de l'Afrique du Nord et de l'Afrique orientale, mais elle est légèrement supérieure à celle du Proche-Orient (fig. 1) ;

- la variabilité en zone aride d'Israël est inférieure à celle de Tunisie, tandis que l'inverse se produit en zone semi-aride et subhumide (LE HOUÉROU, 1988) ;

- la variabilité est plus élevée sous le climat équatorial (régime pluviométrique bimodal) de l'Afrique de l'Est que sous le climat tropical des zones sahélienne et soudanienne (régime pluviométrique monomodal). On retrouve d'ailleurs un phénomène

Tableau I - Variabilité de la pluviosité annuelle en Afrique du Nord et au Proche-Orient

TRANCHES PLUVIOMÉTRIQUES mm	ALGÉRIE		TUNISIE		LIBYE		MAROC		AFR. DU NORD		PR.-OR.		AFR. DU N. et PR.-Or.	
	nb. st.	CV	nb. st.	CV	nb. st.	CV	nb. st.	CV						
0- 50	13	0,90	1	0,73	12	1,30	3	0,85	26	1,08	2	1,10	28	1,08
50- 100	9	0,60	5	0,55	9	0,68	4	0,60	27	0,62	4	0,60	31	0,62
100- 200	15	0,49	11	0,50	30	0,56	6	0,51	62	0,53	16	0,44	78	0,51
200- 300	8	0,30	8	0,51	56	0,40	4	0,40	72	0,40	4	0,38	76	0,40
300- 400	18	0,29	10	0,40	26	0,37	6	0,30	54	0,29	10	0,30	64	0,29
400- 500	23	0,28	10	0,31	3	0,28	6	0,25	36	0,30	7	0,24	43	0,28
500- 600	15	0,25	5	0,27	2	0,28	5	0,22	22	0,26	3	0,26	25	0,26
600- 700	11	0,25	3	0,22	1	0,22	2	0,20	15	0,22	6	0,23	21	0,22
700- 800	9	0,22	3	0,22					12	0,22	3	0,23	15	0,22
800-1000	10	0,21	1	0,19			2	0,18	11	0,20			11	0,20
1000-2000	12	0,20	1	0,19					13	0,20	2	0,23	15	0,21
<i>Total stations</i>	143		58		139		38		378		57		435	

Tableau II - Variabilité des précipitations annuelles dans quelques zones écologiques du monde

TRANCHES PLUVIOMÉTRIQUES mm	AFR. DU NORD et PROCHE-ORIENT (1)	Z. SAHÉL. et SOUDAN. (2)	AFRIQUE orientale (3)	BASSE CALIF. N. (4)	SUD TEXAS (5)	ARIZONA (6)	NORDESTE BRÉSIL (7)	
Types de climats	Méditerr. CV	Tropical. CV	Équator. CV	Méditerr. CV	Subtrop. CV	Subtrop. CV	Équator. CV	
0- 050	1,08	0,96						
50- 100	0,62	0,57	0,95	0,82		0,60		
100- 200	0,51	0,43	0,50	0,68		0,45		
200- 300	0,40	0,37	0,40	0,52		0,35		
300- 400	0,29	0,32	0,35	0,52				
400- 500	0,28	0,30	0,30	0,50	0,38		0,39	
500- 600	0,26	0,27	0,29		0,35		0,34	
600- 700	0,22	0,27	0,28		0,33		0,34	
700- 800	0,22	0,21	0,26		0,30		0,30	
800- 900	0,20	0,19	0,24		0,28		0,37	
900-1000	0,20	0,18	0,22					
1000-2000	0,18	0,17	0,16					
2000-2500		0,16	0,15					
<i>Total stations</i>	407	228	300	51	30	17	67	1 100

(1) LE HOUÉROU, 1986, p. p. ; KATSNELSON, 1964, p. p. ; NAAMI, 1987, p. p. ; POPOV, 1987, p. p.

(2) LE HOUÉROU, 1986, p. p. ; NICHOLSON, 1979, p. p. ; SNEYERS, 1981, p. p. ; VIRMANI *et al.*, 1980, p. p.

(3) GRIFFITHS, 1958, p. p. ; GRIFFITHS et HEMMING, 1963, p. p. ; BROWN et COCHEMÉ, 1969, p. p.

(4) LE HOUÉROU, 1988 a

(5) LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988

(6) Mc MAHON et WAGNER, 1985

(7) LE HOUÉROU, 1986, p. p. ; HARGREAVES, 1973, 1974, p. p. ; De MIRANDA et OLIVEIRA, 1981, p. p.

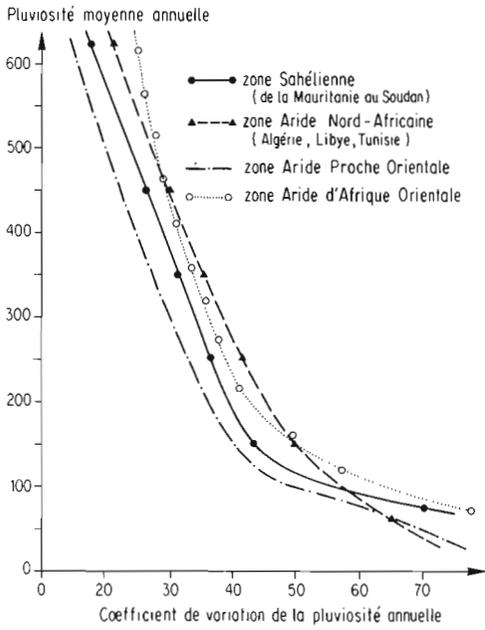


FIGURE 1 - Comparaison de la variabilité de la pluviosité annuelle en régions méditerranéenne et intertropicale.

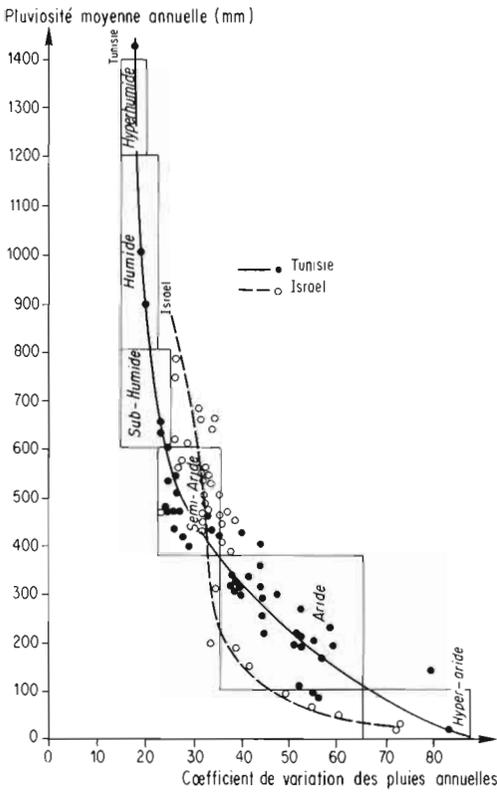


FIGURE 2 - Variations de la pluviosité moyenne annuelle et de son coefficient de variation en Tunisie (Afrique du Nord) et en Israël (Proche-Orient).

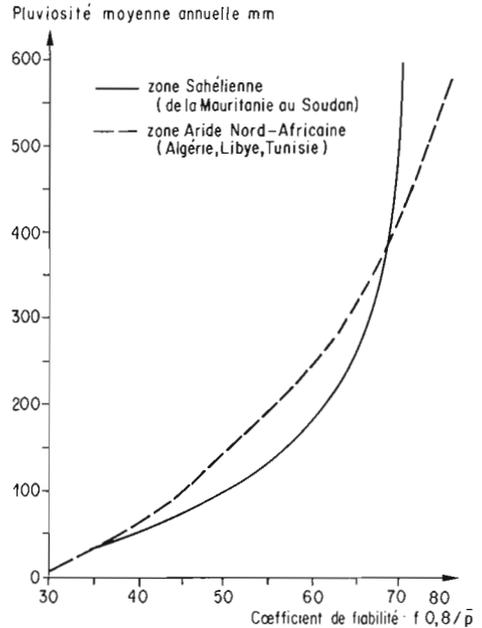


FIGURE 3 - Fiabilité des pluies en fonction des moyennes annuelles en zone sahélienne et en zone aride nord-africaine.

similaire en zone méditerranéenne, le régime bimodal de l'Afrique du Nord est plus variable que le régime monomodal du Proche-Orient ;

- corrélativement à ce qui a été dit plus haut, le taux de fiabilité est plus élevé en zone aride sahélienne qu'en Afrique du Nord, mais il est plus faible en zone semi-aride ;
- les différents pays d'Afrique du Nord présentent des variabilités à peu près identiques à l'intérieur de chaque tranche pluviométrique ;
- le tableau I montre que, dans les différentes zones géographiques et climatiques considérées, la variabilité décroît de la manière suivante :

- Basse-Californie du Nord,
- Nordeste du Brésil, Australie centrale orientale (subtropicale),
- Sud du Texas, Australie occidentale septentrionale (tropicale),
- Afrique du Nord, Australie méridionale méditerranéenne,
- Afrique orientale, Australie occidentale méridionale (méditerranéenne),
- Zones sahélienne et soudanienne,
- Arizona,
- Proche-Orient.

Il convient de noter que sous le climat méditerranéen de Basse-Californie du Nord, la variabilité, bien que légèrement plus élevée que dans le Nordeste brésilien, n'en présente pas le caractère aléatoire ; elle reste liée à la moyenne. La zone aride australienne présente des variabilités très différentes selon les régions : faible et comparable à celle du Proche-Orient en zone méditerranéenne de l'Australie de l'Ouest, elle est plus élevée et comparable à celle de l'Afrique du Nord en zone méditerranéenne de l'Australie du Sud. Il en résulte que la culture du blé peut se pratiquer jusque sous 280 à 300 mm en Australie de l'Ouest, comme au Proche-Orient ; mais il faut une moyenne de près de 400 mm en Australie du Sud, comme en Afrique du Nord. En revanche, la variabilité est très élevée en zone aride subtropicale à régime pluviométrique bimodal,

à la frontière des Nouvelles-Galles du Sud, de l'Australie du Sud et du Territoire du Nord, avec des coefficients de variation de 80 à 120 % sous 120 à 150 mm de moyenne (Oodnatta, Lac Eyre, Birdsville, Boulia). Elle est également très élevée en zone tropicale sèche de l'Australie de l'Ouest (Carnavon, Port Hedland) (WADHAM *et al.*, 1964).

CONSÉQUENCES DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR LA VÉGÉTATION NATURELLE

Des zones soumises à des moyennes pluviométriques identiques sont d'autant plus arides que la variabilité est élevée et la fiabilité plus faible, toutes choses étant égales par ailleurs. Une variabilité élevée est donc un facteur supplémentaire et aggravant de l'aridité induite par de faibles moyennes et par une répartition saisonnière défavorable. Il en résulte que, sous des moyennes et des régimes saisonniers identiques, une forte variabilité induit une adaptation plus spécialisée de la végétation à la xéricité en termes de xéromorphie, de phénologie, d'écophysologie des espèces, en termes de structure et de composition floristique des groupements, ainsi qu'en termes de biomasse et de productivité primaire.

Les faits ne sont toutefois pas aisés à mettre en évidence car d'autres paramètres plus ou moins liés à la variabilité des précipitations interfèrent et peuvent masquer son effet. Ces faits ont été bien étudiés, particulièrement en agroclimatologie (HARGREAVES, 1974 ; DANCETTE, 1977 ; MATTEI, 1979 ; FLORET et PONTANIER, 1982). Les paramètres d'interférence les plus usuels sont liés au substrat : topographie, géomorphologie, exposition, sol, ainsi qu'à tous les facteurs qui influent sur l'équilibre et le bilan hydrique plante/sol/atmosphère, ainsi que l'impact des actions humaines, dont, bien entendu, les méthodes d'exploitation et de gestion. 3 études de cas peuvent illustrer ce propos :

- la limite entre végétations forestières et matorrals/chaparrals qui en dérivent d'une part, et végétation steppique d'autre part, correspond sensiblement à l'isohyète annuelle de 400 mm, tant en Afrique du Nord qu'au Proche-Orient (LE HOUÉROU, 1969 ; DANIN et PLITMANN, 1987). En Afrique du Nord, cette limite correspond sensiblement à un accident tectonique majeur : la limite sud des chaînes atlasiques (Haut et Moyen Atlas du Maroc, Atlas tellien d'Algérie, Dorsale tunisienne). Le long de cet interface, le coefficient de variation de la pluviosité annuelle saute brusquement de 30-35 %, sous 400-450 mm, à 40-45 %, sous 350-400 mm, sans changement du régime saisonnier ni variation systématique du substrat. La discontinuité majeure et quasi linéaire observée dans la végétation peut seulement être attribuée à un accroissement brutal de la variabilité des précipitations. Cette solution de continuité dans la variabilité correspond ainsi à une limite contrastée des étages de végétation et au passage presque sans transition de l'étage semi-aride forestier à l'étage aride steppique. La diminution de 50 mm de la pluviosité moyenne annuelle ne saurait expliquer à elle seule cette discontinuité, non plus que d'éventuelles modifications mineures du régime saisonnier.

De fait, cette brusque élévation de la variabilité constitue également une limite agrométéorologique majeure (CAEES, 1961 ; LE HOUÉROU, 1969 ; LE HOUÉROU *et al.*, 1977 ; LE HOUÉROU, 1982, 1982-1984, 1986). L'isohyète de 400 mm constitue en effet la limite bioclimatique supérieure des steppes, la limite inférieure des chênes verts et des chênes kermès ; mais c'est aussi la limite inférieure de la culture commerciale des céréales, avec une récolte assurée 4 années sur 5, ainsi que des cultures fourragères et des pâturages semés. Les agriculteurs européens qui, en Afrique du Nord, ont tenté la culture céréalière au-dessous de l'isohyète de 400 mm ont tous dû rapidement renoncer pour se consacrer à l'élevage ou à l'arboriculture fruitière là où le sol était suffisamment sableux ;

- on retrouve des faits analogues dans d'autres régions à climat méditerranéen. En Australie du Sud, par exemple, la *Goyder's line*, ou limite sèche de la céréaliculture, correspond à l'isohyète annuelle de 375 mm, ce qui coïncide, ici aussi, à un accident du relief : la partie méridionale des *Flinders Range*, et à une variabilité des précipitations annuelles voisine de celle de l'Afrique du Nord.

En Australie de l'Ouest, lorsque le coefficient de variation de la pluviosité annuelle est de l'ordre de 25 %, la culture des céréales est pratiquée jusque sous 280 à 300 mm de moyenne (médiane = 240 à 270 mm) (Merredin, *Southern Cross*), mais là où la variabilité est plus élevée (CV de 30 à 35 %), la céréaliculture ne descend pas au-dessous de 400 à 450 mm.

Au Proche-Orient, où la variabilité est inférieure à celle de l'Afrique du Nord (fig. 2), la culture régulière des céréales se pratique jusque sous 275 à 300 mm, sauf dans les zones à variabilité plus élevée où il faut environ 400 mm (WALLÈN et BRICHAMBAUT, 1962). Il semble donc qu'un accroissement de 10 points de pourcentage dans le coefficient de variation de la pluviosité annuelle (25 à 35 %) corresponde à une demande supplémentaire de pluviométrie moyenne annuelle d'environ 100 mm pour la culture assurée des céréales en climat méditerranéen.

Mais la variabilité de la pluviosité n'est pas seule en cause ; au Proche-Orient, le régime saisonnier est différent de celui de l'Afrique du Nord (monomodal centré sur l'hiver au lieu de bimodal étendu sur cinq à sept mois).

Des faits comparables se manifestent lorsque l'on compare les cultures céréalières (mil et sorgho) en Afrique de l'Ouest et en Afrique de l'Est. En Afrique occidentale, sous régime pluviométrique monomodal, la variabilité est plus faible qu'en Afrique orientale soumise à un régime bimodal (fig. 1). Corrélativement, les cultures de mil et de sorgho nécessitent une pluviosité moyenne de 650 à 700 mm en Afrique de l'Est (BROWN et COCHEMÉ, 1969), tandis que 400 à 500 mm suffisent pour obtenir des résultats comparables en Afrique de l'Ouest (DANCETTE, 1977 ; LE HOUÉROU et POPOV, 1981) ;

- la variabilité élevée de la pluviosité dans les zones arides chaudes tend à favoriser les végétaux crassulescents ou succulents à voie de carboxylation CAM, particulièrement lorsque l'humidité atmosphérique est relativement élevée. Des exemples de ce fait sont la végétation des déserts littoraux de Basse-Californie, de Namibie, de Mauritanie et du Sud marocain, la brousse à didiéracées du Sud-Ouest de Madagascar, la caatinga du Nordeste brésilien et la végétation macaronésienne des archipels insulo-atlantiques (Canaries, Cap-Vert).

Le climat méditerranéen de la Basse-Californie du Nord contraste ainsi avec celui de l'Afrique du Nord et du Proche-Orient par la variabilité beaucoup plus élevée de sa pluviosité (tabl. II) (LE HOUÉROU, 1988), partiellement corrigée, il est vrai, par de fréquents brouillards côtiers ; corrélativement, les végétaux pachycaules, pachyphylles et à ligno-tubers y abondent et sont même dominants dans les zones où la pluviosité est la plus variable, comme dans le désert de Vizcaïno (cactacées, agaves, yuccas, crassulacées, asclepiadacées, etc.). La caatinga, dont la végétation présente un caractère de xéromorphie très accentué, avec de nombreuses espèces pachycaules et caducifoliées, contraste en cela avec des régions tropicales comparables mais à faible variabilité pluviométrique telles que les zones sud-sahélienne, soudanienne et le Miombo, où dominent des espèces mésophylles plus ou moins malacophylles, comme les légumineuses et les combrétacées. Ainsi que nous l'avons évoqué (*cf. supra*), ce caractère extrêmement xéromorphe de la végétation de la caatinga correspond à une variabilité très élevée des précipitations puisque des périodes sans pluies de dix-huit à vingt mois peuvent survenir sous des isohyètes annuelles de 300 à 600 mm. Tandis que sous les climats arides de l'Ancien Monde des périodes de douze mois ou plus sans précipitations ne se rencontrent qu'au-dessous de l'isohyète de 100 mm ou légèrement plus dans les archipels insulo-atlantiques (LE HOUÉROU, 1969, 1980).

CONSÉQUENCES DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR LA PRODUCTION PRIMAIRE

Les figures 4, 5 et 6 et les tableaux III et IV montrent quelques exemples des relations générales qui régissent les rapports - de variabilité de la production à celle de la pluie (RVPP) dans la végétation naturelle des terres de parcours, ainsi que le coefficient d'efficacité pluviale (CEP) - entre la production primaire et la variabilité pluviométrique :

- le CEP (quotient de la production primaire, kg MS.ha⁻¹.an⁻¹, en kilogrammes, par la pluviosité annuelle, en millimètres) tend à être inversement lié à la pluviosité moyenne, toutes choses étant égales par ailleurs (LE HOUÉROU, 1984 ; FLORET *et al.*, 1987). Mais cette liaison peut être masquée par l'impact anthropozoïque ou l'édaphisme (topographie, ruissellement, sols). A l'échelle mondiale, le CEP est en moyenne de 4,0 ± 0,3 kg MS.ha⁻¹.an⁻¹.mm⁻¹ (fig. 4, 5 et 6, tableaux III, IV et V) (LE HOUÉROU, 1984 ; LE HOUÉROU *et al.*, 1988) ;

- le RVPP est en moyenne de 1,5 ± 0,07 pour l'ensemble des zones arides et semi-arides du monde ; en d'autres termes, la variabilité de la production primaire est supérieure de 50 % en moyenne à celle des précipitations (LE HOUÉROU *et al.*, 1988) ;

- CEP et RVPP dépendent aussi, dans une large mesure, de la dynamique des écosystèmes considérés et des conditions de la surface du sol, en particulier de la texture, de la structure, de la teneur en matière organique, de la perméabilité, de la présence ou non de litière organique, etc., ainsi qu'au degré de recouvrement du sol par la végétation. Une savane soudanienne peu exploitée pendant quelques années présente des CEP de l'ordre de 5 à 8 kg MS.ha⁻¹.an⁻¹.mm⁻¹, alors que ces savanes présentent un CEP de l'ordre de 3 dans les conditions habituelles d'exploitation (ACHARD, 1988 ; LE HOUÉROU, 1989 ; ACHARD, cet ouvrage : 297-310) (tabl. VI). Toutes choses étant égales par ailleurs, des végétations dégradées avec un faible recouvrement tendent à réduire le CEP et à accroître le RVPP ;

- les relations entre le CEP et la pluviosité ne sont pas linéaires (LE HOUÉROU, 1986-1989) ; nous avons donc développé une formule mathématique empirique qui combine CEP, RVPP et les fréquences pluviométriques. Cette formule permet de prévoir la production primaire pour diverses probabilités (ou fréquences) d'occurrence annuelle, en connaissant la fréquence ou les paramètres statistiques de distribution des pluies annuelles, le CEP et le RVPP (tabl. V et fig. 5) (LE HOUÉROU *et al.*, 1984). Cette formule, qui permet de prévoir la production annuelle avec une bonne approximation, rend ainsi possible la planification de l'utilisation des ressources pastorales de façon rationnelle et la prise de décisions de gestion basées sur une approche probabiliste. Cette approche constitue une amélioration par rapport à la méthode habituelle basée sur l'intuition et l'expérience qui résultent d'approximations successives elles-mêmes fondées sur des séries de succès et d'échecs. Cette équation prédictive s'écrit :

$$P = \left[\frac{(b \cdot r)}{R} + (1 - b) \right]$$

où :

P = production annuelle sous la probabilité

r = pluviosité annuelle sous la probabilité

R = pluviosité moyenne annuelle

b = RVPP (CVPr/CVPI) = quotient des coefficients de variation de la production et de la pluie

CEP = coefficient d'efficacité pluviale (quotient de la production en kg.ha⁻¹.an⁻¹ par la pluviométrie en mm.an⁻¹).

Tableau III - Calcul de la production primaire théorique et de la capacité de charge, basé sur les probabilités pluviométriques annuelles, utilisant la moyenne (223 mm) et l'écart-type (80 mm), dans l'hypothèse d'une distribution normale, sur 60 ans. Azizia, Libye

Probabilités pluviométriques	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	a
Quotient prob. pluviom. à la moyenne	121	156	181	203	223	243	265	290	325	ra
	0,54	0,70	0,81	0,91	1,0	1,09	1,19	1,30	1,46	ra/r̄
Parcours type 1 (CEP ₁ = 4,0 b ₁ = 1,15)	0,4710 228 7,5	0,6550 409 4,9	0,7815 566 3,5	0,9865 728 2,7	1,0 892 2,2	1,1035 1 073 1,9	1,2185 1 292 1,6	1,3450 1 560 1,3	1,5290 1 988 1,0	Paramètre 1 (1) Production 1 (2) Cap. charge 1 (3)
Parcours type 2 (CEP ₂ = 3,0 b ₂ = 1,55)	0,2870 104 19,2	0,5350 250 8,0	0,7055 383 5,2	0,8605 524 3,8	1,0 669 3,0	1,1395 830 2,4	1,2945 1 029 1,9	1,4650 1 254 1,6	1,7130 1 670 1,2	Paramètre 2 Production 2 Cap. charge
Parcours type 3 (CEP ₃ = 2,0 b ₃ = 1,33)	0,38882 94 21,3	0,6010 188 10,6	0,7473 271 7,4	0,8803 357 5,6	1,0 446 4,5	1,1197 544 3,7	1,2527 664 3,0	1,3990 811 2,5	1,6118 1 048 1,9	Paramètre 3 Production 3 Cap. charge 3
Parcours type 4 (CEP ₄ = 5 b ₄ = 0,90)	0,5860 355 5,6	0,7300 569 3,5	0,8290 777 2,6	0,919 933 2,1	1,0 1 115 1,8	1,0810 1 313 1,5	1,1710 1 552 1,3	1,2700 1 842 1,1	1,4140 2 298 0,9	Paramètre 4 Production 4 Cap. charge 4
Prod. moyenne	195	354	497	636	780	940	1134	1372	1751	Kg MS.ha ⁻¹ .an ⁻¹
CEP moyen	1,61	2,27	2,75	3,13	3,34	3,87	4,28	4,73	5,39	Kg MS.ha ⁻¹ .an ⁻¹ .mm ⁻¹
Prod. % moy.	25	45	64	82	100	121	145	176	224	
Pluviom. % moy.	54	70	81	91	100	109	119	130	146	

(1) Paramètre 1 = (b₁ ra/r) + 1 - b₁ ; Paramètre 2 = (b₂ ra/r) + (1 - b₂) ; etc. ; r̄ = Pluv. moy. ann.

(2) Production 1 = (Param.1)ra₁.CEP₁ ; Production 2 = (Param.2) ra₁. CEP₂ ; etc.

(3) Capacité de charge en hectares par unité ovine (1,5 tête) par an, supposant un taux d'utilisation de 50 % et une ingestion journalière de 2,75 kg MS/UO

Tableau IV - Calcul de la production primaire théorique et de la capacité de charge, basé sur les fréquences déciles et la médiane pluviométrique, sur 60 ans. Azizia, Libye

Déciles pluviom. pluviométrie obs.	0,10 129	0,20 150	0,30 170	0,40 196	0,50 210	0,60 236	0,70 264	0,80 288	0,90 323	1-a ra
Quotient déciles à la médiane	0,61	0,71	0,81	0,93	1,0	1,12	1,26	1,37	1,54	ra/rmd
Parcours type 1 (CEP ₁ = 4,0 b ₁ = 1,15)	0,5515 285 13,0	0,6550 393 5,1	0,7815 531 3,8	0,9195 721 2,8	1,0 840 2,4	1,1380 1 074 1,9	1,2990 1 372 1,5	1,4255 1 642 1,2	1,6210 2 094 1,0	Paramètre 1 (1) Production 1 (2) Cap. charge 1 (3)
Parcours type 2 (CEP ₂ = 3,0 b ₂ = 1,55)	0,3955 153 13,0	0,5505 248 8,1	0,7055 360 5,6	0,8915 524 3,8	1,0 630 3,2	1,1860 840 2,4	1,4030 1 111 1,8	1,5730 1 359 1,5	1,8370 1 780 1,1	Paramètre 2 Production 2 Cap. charge
Parcours type 3 (CEP ₃ = 2,0 b ₃ = 1,33)	0,4813 124 16,0	0,6141 184 11,0	0,7473 254 7,0	0,9069 356 5,6	1,0 420 4,8	1,1596 547 3,6	1,3458 711 2,8	1,4921 859 2,3	1,7182 1 110 1,8	Paramètre 3 Production 3 Cap. charge 3
Parcours type 4 (CEP ₄ = 5,0 b ₄ = 0,90)	0,6490 419 4,8	0,7390 554 3,6	0,8290 705 2,8	0,9390 918 2,2	1,0 1 050 1,9	1,080 1 307 1,5	1,2340 1 629 1,2	1,3330 1 920 1,0	1,4860 2 400 0,8	Paramètre 4 Production 4 Cap. charge 4
Prod. moyenne	245	345	463	630	735	942	1 205	1 445	1 846	Kg MS.ha ⁻¹ .an ⁻¹
CEP moyen	1,90	2,30	2,72	3,21	3,50	3,99	4,57	4,02	5,72	Kg MS.ha ⁻¹ .an ⁻¹ mm. ⁻¹
Prod. % médiane	33	47	63	86	100	128	164	197	251	
Pluviom. % médiane	61	71	81	93	100	112	126	137	154	

(1) Paramètre 1 = (b₁.ra/rmd) + (1-b₁) ; Paramètre 2 = (b₂.ra/rmd) + (1-b₂) ; etc. rmd = Pluv. médiane

(2) Production 1 = (Param.1) ra.CEP₂ ; Production 2 = (Param.2) ra.CEP₂ ; etc.

(3) Capacité de charge en Hectares par Unité ovine (1,5 tête) par an, supposant un taux d'utilisation de 50 % et une ingestion de 2,75 kg MS/UO.an⁻¹.

Tableau V - Relations entre la pluviiosité, les conditions de sol et la production de l'olivier en Tunisie centrale. (LE HOUÉROU, 1958,1959)

TYPES DE SOLS	PLUVIOSITÉ			PRODUCTION MOYENNE			CEP kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹	RVPP
	MOY.	ANN.,	mm	OLIVES,	kg /	ARBRE		
	X	ET	CV	X	ET	CV		
1 - Sables grossiers profonds ; sites								
A	201	79	0,39	46,3	50,3	1,10	4,6	2,80
B	200	127	0,63	47,0	34,0	0,72	4,7	1,14
C	200	100	0,50	44,3	32,6	0,74	4,4	1,48
D	250	125	0,50	61,0	25,0	0,41	4,9	0,82
2 - Sables grossiers moyens à fins ; sites								
A	201	79	0,39	32,0	38,0	1,20	3,1	3,3
B	176	51	0,29	33,4	40,0	1,20	3,8	4,1
C	256	49	0,19	45,4	49,7	1,10	3,6	5,6
D	200	100	0,50	25,0	21,0	0,83	2,5	1,7
E	250	100	0,52	30,0	28,0	0,95	2,4	1,8
3 - Limono-sableux gypseux A								
A	200	100	0,50	04,0	06,0	1,50	0,4	3,0

N.B. : le nombre de couples «pluie annuelle/rendement annuel» est de 25 à 30 dans chaque série de données. La superficie des champs échantillonnés était de 10 à 20 hectares. La distance entre chaque champ échantillonné et le pluviomètre le plus proche était inférieure à 10 km.

La topographie était plane à faiblement vallonnée et l'altitude comprise entre 50 et 400 m.

X = Moyenne ; ET = Écart-type ; CV = Coefficient de variation ;

CEP = Coefficient d'efficacité pluviale (kg.ha⁻¹.an⁻¹.mm⁻¹) ;

RVPP = Rapports de variabilité production - pluie (CVPr/CVPl).

FIGURE 4.1 - Répartition des coefficients d'efficacité pluviale (CEP) dans 80 séries d'observations de diverses zones arides du globe (LE HOUÉROU, 1984).

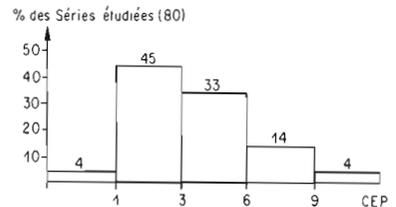
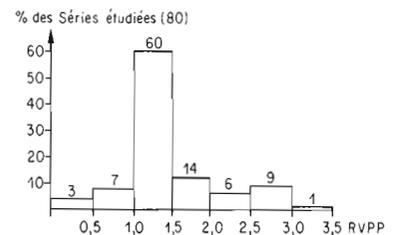


FIGURE 4.2 - Répartition du rapport de variabilité production/pluie (RVPP) dans 80 séries de données de diverses zones arides mondiales (LE HOUÉROU et al., 1988).



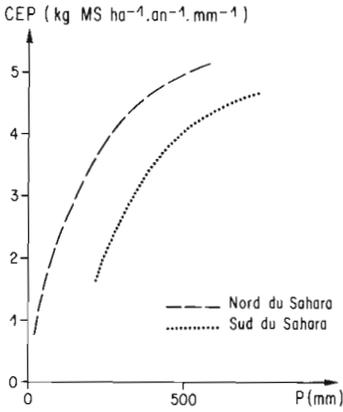


FIGURE 5 - Comparaison de l'efficacité pluviale pour la production (CEP) entre le Nord et le Sud du Sahara et sa variation en fonction des hauteurs annuelles moyennes (production pastorale) (FIORET et al., 1987).

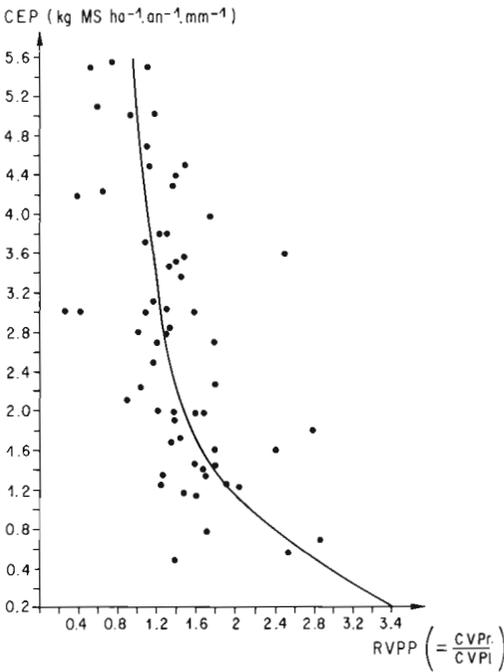


FIGURE 6 - Relations entre CEP et RVPP dans différentes zones arides mondiales (75 séries, 1 000 paires de données) (LE HOUÉROU, 1987-88).

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$P = (1 + b \cdot r \cdot R / r) \cdot CEP$$

où :

- P = production une année donnée
- R = pluviosité moyenne annuelle
- r = pluviométrie une année donnée.

Un cas concret d'utilisation de cette formule pour la détermination de la charge de bétail est fourni à titre d'exemple dans les tableaux III et IV. Le tableau III est basé sur

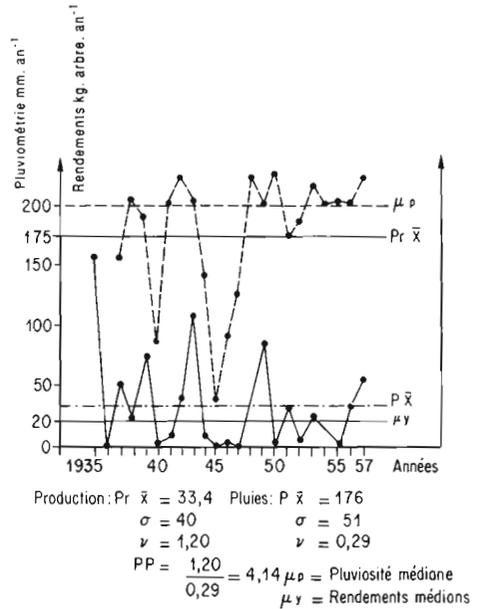


FIGURE 7 - Relations pluviométrie-rendements de l'olivier en Tunisie centrale, sur sol de sable moyen à fin ; site 2.B (tabl. VI) (L. HOUÉROU, 1958).

\bar{x} = Moyennes ν = Coefficients de variation
 σ = Écart-types $RVPP = \frac{CV Pr}{CV Pl.}$

les probabilités gaussiennes, tandis que le tableau IV est construit à partir des fréquences (déciles). On voit que, même si les différences entre probabilités et percentiles pluviométriques sont faibles, les différences en termes de production sont importantes. Les productions apparaissent plus faibles en année déficitaire lorsqu'on utilise les fréquences, et plus fortes en années favorables lorsqu'on utilise les probabilités, en raison de l'asymétrie positive de la courbe de distribution des pluies.

CONSÉQUENCES DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR LES CULTURES

Le tableau V et les figures 8, 9 et 10 montrent quelques relations entre la variabilité de la pluviosité et celle de la production d'olives en culture sèche en Tunisie centrale (LE HOUÉROU, 1958, 1959). Des faits similaires ont été mis en évidence par FLORET et PONTANIER (1982) pour la végétation naturelle et les terres de parcours. Ces données montrent l'extrême importance des conditions de sol, non seulement sur la productivité mais surtout sur la variabilité de la production d'olives. On pourrait fournir des exemples identiques pour la production de céréales. D'une manière générale, on peut dire que la variabilité de la production en zone aride est proportionnelle à la finesse de la texture du sol, en particulier à celle des horizons de surface. Autrement dit, la variabilité de la production est inversement proportionnelle au diamètre des particules élémentaires du sol, toutes choses égales par ailleurs, notamment les paramètres pluviométriques et les techniques de gestion. Cette règle vaut aussi bien pour la végétation naturelle que pour les cultures. Malgré des techniques culturales destinées à réduire l'évaporation du sol, à augmenter son taux d'infiltration, à éliminer la compétition des mauvaises herbes et à réduire la transpiration de l'arbre par des tailles sévères en année sèche (qui sont toutes des techniques utilisées dans le cadre d'une stratégie des-

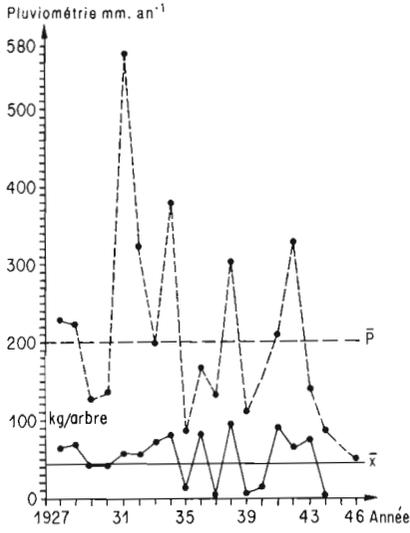


FIGURE 8 - Relations pluviosité-rendements de l'olivier en Tunisie centrale sur sol sableux grossier ; site 1.C (tabl. v) (LE HOUÉROU, 1958).

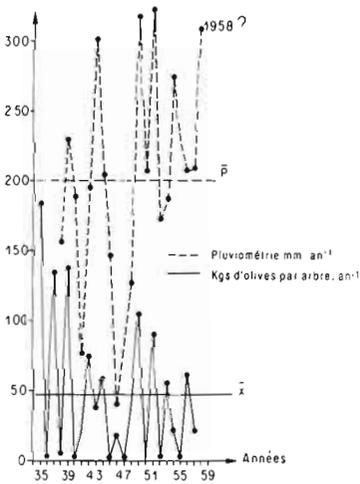


FIGURE 9 - Relations pluviosité-rendements de l'olivier en Tunisie centrale sur sol sableux grossier ; site 1.B (tabl. v) (LE HOUÉROU, 1958).

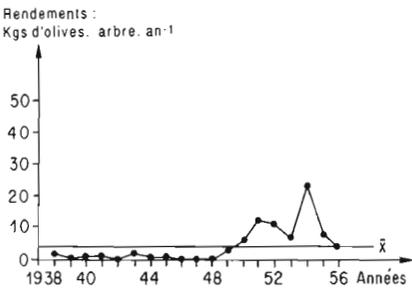


FIGURE 10 - Relations pluviosité-rendements de l'olivier en Tunisie centrale ; sol limoneux à sablo-limoneux ; site 3.A (tabl. v) (LE HOUÉROU, 1958).

tinée à limiter l'impact de la variabilité pluviométrique, c'est-à-dire de la sécheresse), la variabilité de la production d'olives est beaucoup plus élevée que celle de la pluviométrie, sauf sur les sables grossiers profonds. Sur les sables grossiers profonds, le rapport CVPr/CVPl est de 0,82 à 1,14 (sites 1 D et 1 B, du tableau V), tandis que sur les sables moyens et fins le RVPP est de 1,5 à 3,0 (sites 1 A, 1 C, 2 D, 2 E, tabl. V). Dans les autres cas : sols sablo-limoneux, limono-sableux, limoneux, gypseux, le RVPP varie de 3,0 à 6,0, et beaucoup plus, sur les sols argileux, où la production n'est même pas mesurable sous 200 à 300 mm de pluviosité moyenne annuelle. Les sols argileux et squelettiques sont impropres à la culture. Ces faits résultent de la dynamique pluie-sol-plante :

- les sols sableux ont un taux d'infiltration très élevé, donc pratiquement pas de ruissellement, contrairement aux sols à texture plus fine en surface ; presque toute l'eau de pluie est infiltrée (pluies utiles = pluies infiltrées = $\geq 90\%$ des chutes) ;

- les sols de sables grossiers évaporent peu d'eau en raison de leur faible pouvoir capillaire, encore réduit par le « mulching » de façons culturales répétées ; en revanche, la remontée capillaire, donc l'évaporation, est beaucoup plus importante sur sols limoneux ou argileux, même soumis aux techniques mentionnés ci-dessus. Ces sols sont, de surcroît, soumis à un processus de « glaçage » de leur surface qui réduit considérablement l'infiltration lorsqu'ils ne sont pas fréquemment labourés ;

- en raison du faible taux d'absorption du sable grossier pour l'eau (4 à 5 % en poids à - 1,5 MPa [= - 15 bars = pF 4,2]), la plus grande partie (95%) des rares pluies qui tombent est disponible pour l'absorption racinaire. Dans un sol à texture plus fine, un limon par exemple, le taux d'adsorption de l'eau par le sol est plus élevé ($A > 20\%$ en poids à - 1,5 MPa, c'est-à-dire au point de flétrissement) ; il en résulte qu'une grande proportion des pluies infiltrées ($> 20\%$) reste liée aux particules de sol avec une énergie supérieure à celle de la capacité d'adsorption des racines et n'est donc pas utilisable par les plantes.

Le tableau V montre que la production d'olives est proportionnelle au diamètre des particules du sol, pour la fraction inférieure à 2 mm, mais que la variabilité de cette production est inversement proportionnelle à ce diamètre.

RELATIONS ENTRE LA PLUVIOMÉTRIE ET LES EFFECTIFS DES TROUPEAUX DANS LE SUD TUNISIEN

Les figures 11 et 12 montrent les variations simultanées des effectifs de petits ruminants et de la pluviométrie dans le Sud tunisien sur une période de vingt-cinq ans. Les données pluviométriques proviennent de 10 stations climatiques synoptiques, fiables, équitablement réparties sur le territoire étudié. Ces effectifs de chèvres et de moutons ont été obtenus à partir des statistiques officielles établies à l'échelon des communes (*cheikats*) sur la même période de vingt-cinq ans. Cette période a vu 2 phases sèches (dont une extrême en 1946, 1947 et 1948) et 2 phases et demie à pluviométrie supérieure à la moyenne. Les conclusions qui émergent de cette étude du point de vue qui nous intéresse ici, peuvent être formulées comme suit :

- la pluviosité annuelle maximale observée pendant la période de référence est égale à 5 fois le minimum, à l'échelle régionale, et à 12 fois, à l'échelle de la station ;

- la population maximale de petits ruminants adultes est égale à 5 fois la population minimale à l'échelle régionale ;

- la population maximale de jeunes (âge inférieur à douze mois) égale 12 fois le minimum à l'échelle régionale. L'impact de la variabilité des précipitations se fait ainsi sentir d'abord sur les effectifs de jeunes. Les paramètres statistiques du tableau VII concernent la distribution des pluies et des petits ruminants adultes et jeunes ;

Tableau VI - Exemples de relations entre la pluviosité annuelle et la production primaire

ZONE ARIDE MÉDITERRANÉENNE (AÏDOUD, 1987)										
Steppe à <i>Artemisia inculta</i> (= <i>A. herba alba</i>)										
Situation : Borj el May, hautes plaines steppiques de l'Algérie occidentale.										
Années	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Production										
Kg MS.ha ⁻¹ .an ⁻¹	512	861	556	276	826	644	374	337	127	254
Pluviométrie										
mm	204	291	201	175	245	311	191	173	120	147
CEP, Kg MS										
ha ⁻¹ .an ⁻¹ .mm ⁻¹	2,51	2,96	2,77	1,58	3,37	2,07	1,96	1,95	1,06	1,73
Moyennes : Production : 477 KgMS.ha ⁻¹ .an ⁻¹ ; Pluviométrie : 206 mm.an ⁻¹ ; CEP : 477/206 = 2,31 Kg MS.ha ⁻¹ .an ⁻¹ .mm ⁻¹ .										
CV Production : 0,52 ; CV Pluviométrie : 0,29 ;										
RVPP = 0,52/0,29 = 1,79 ;										
Corrélation : Production = 0,019 pluie ^{1.886} ;										
r ² = 0,86 ; p < 0,001.										
La variabilité de la production annuelle égale 1,79 fois celle de la pluviométrie.										
Pluviométrie moy. ann. = 206 mm ; ET = 61 ; CV = 0,29 ; ES = 19,3										
Production moy. ann. = 447 Kg ; ET = 247 ; CV = 0,52 ; ES = 78,0										

ZONE TROPICALE SOUDANIENNE (ACHARD, 1988)								
Situation : stat. expérim. de Gampela (Ouagadougou, Burkina Faso)								
Savanes herbeuses à : A : <i>Loudetia togoensis</i> et <i>Andropogon pseudapricus</i> (annuelles)								
B : <i>Andropogon gayanus</i> et <i>Cymbopogon shoenanthus</i> (pérennes)								
Années	1984	1985	1986	1987	Moy.	ET	CV	ES
Production								
Kg MS.ha ⁻¹ .an ⁻¹								
A	2 272	3 522	4 232	2 945	3 242	833	0,26	416
B	3 272	4 818	6 714	6 954	5 214	1 514	0,29	757
Pluviométrie	495	620	709	658	620	91	0,15	46
A - CEP = 5,23 ; RCPP = 1,73 ; Y = 636,72 ⁵⁸ x ; r ² = 0,79 (Y = 7,92 x - 1672 ; r ² = 0,75)								
B - CEP = 8,40 ; RVPP = 1,93 ; Y = 16,33 x - 420 ; r ² = 0,97								

Tableau VII - Variabilité régionale de la pluviosité et des effectifs de petits ruminants en Tunisie méridionale de 1936 à 1960 (LE HOUÉROU, 1962)

PLUIE	MOUTONS		CHÈVRES	
	Adultes	Jeunes	Adultes	Jeunes
X = 163	249	100	266	102
ET = 88	79	46	90	48
CV = 0,540,32	0,45	0,34	0,47	

NB : X = moyenne

ET = écart type

CV = coefficient de variation

FIGURE 11 - Relations entre la pluviométrie annuelle et les effectifs des petits ruminants domestiques adultes en Tunisie méridionale (LE HOUÉROU, 1962).

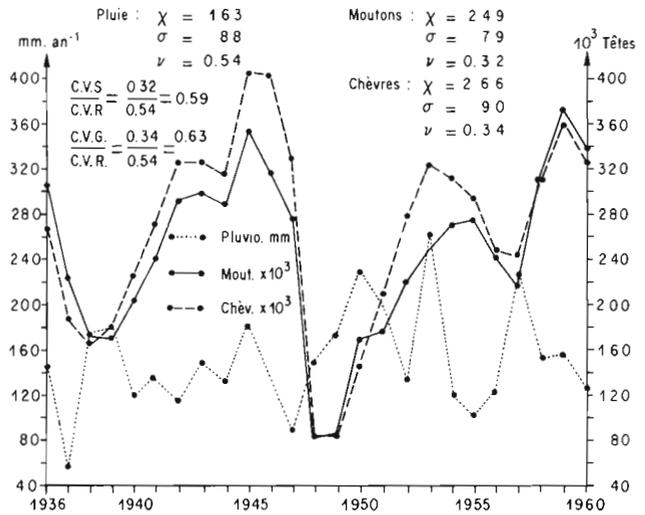
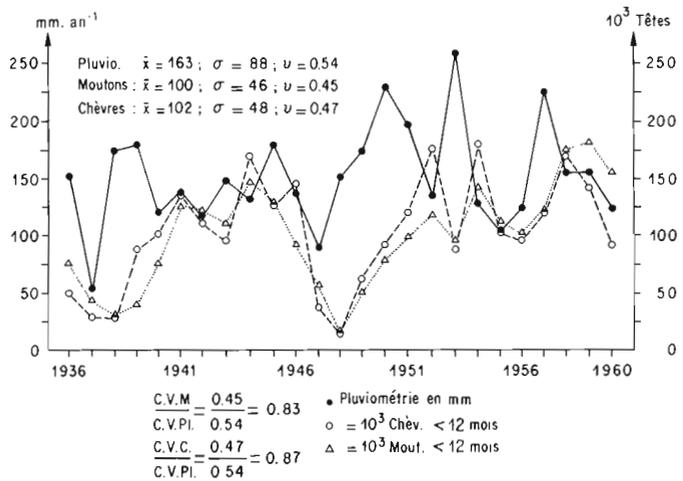


FIGURE 12 - Relations entre la pluviométrie annuelle et les effectifs des petits ruminants jeunes (âge < 12 mois) en Tunisie méridionale (LE HOUÉROU, 1962).



- il y a un décalage d'une année entre les variations importantes de la pluviométrie et la réponse des troupeaux. Des faits identiques ont été observés au Sahel (BERNUS, 1981) et en Australie (MAWSON *et al.*, 1974) ; mais, dans ce dernier cas, le temps de latence avant la réponse des troupeaux est de deux à quatre ans en raison de la nature différente des systèmes de production (laine ou bovin à viande sous le système de ranching). Il semble que ce phénomène constitue une règle générale (LE HOUÉROU, 1985). Il en résulte qu'une sécheresse d'une durée de un an ne constitue pas une catastrophe ; elle semble bien absorbée par les systèmes de production (LE HOUÉROU et NORWINE, 1985-1988). Mais la situation de l'élevage devient très sérieuse lorsque 2 ou plusieurs années sèches se suivent comme ce fut le cas en Afrique du Nord en 1946-1948, et au Sahel en 1970-1973, puis en 1983-1985 ;

- les coefficients de variation des effectifs régionaux de petits ruminants et de la pluviosité ont été les suivants :

- adultes :

- CV moutons/CV pluie = $0,32/0,54 = 0,59$,

- CV chèvres/CV pluie = $0,34 / 0,54 = 0,63$,

- jeunes :

- CV agneaux/CV pluie = $0,45 / 0,54 = 0,83$,

- CV chevreaux/CV pluie = $0,47 / 0,54 = 0,87$;

le coefficient de variation des effectifs adultes est ainsi inférieur de 40 % à celui de la pluviométrie sur une base annuelle régionale. Mais le coefficient de variation des effectifs jeunes est seulement inférieur de 15 % à celui des pluies (17 %, pour les agneaux, et 13 %, pour les chevreaux) ;

- il semble assez surprenant de constater que la population caprine est plus sensible aux fluctuations pluviométriques que celle des ovins ; mais la différence de RVPP de 4 points de pourcentage à la fois chez les adultes et chez les jeunes ne représente qu'une tendance de signification marginale ;

- les raisons de la plus faible variabilité des effectifs, donc de la production secondaire, par rapport à la production primaire, tiennent à la stratégie d'adaptation des animaux et à celle de gestion des troupeaux. Dans cette stratégie, on peut individualiser un certain nombre de faits :

- sélection multiséculaire des races rustiques locales sur le seul critère d'aptitude à la survie, au détriment de la productivité (cf. cet ouvrage, LE HOUÉROU : 369-385),

- accumulation de réserves adipeuses,

- complémentarité des types de parcours,

- utilisation optimale de la distribution localisée des précipitations dans l'espace par des migrations saisonnières,

- alimentation d'appoint.

CONCLUSIONS

La variabilité des pluies est un paramètre bioclimatique très important quoique généralement sous-estimé dans les zones arides. Elle est élevée et inversement reliée aux hauteurs moyennes des précipitations. Il y a cependant de substantielles différences de variabilité d'une zone écologique à une autre parfois même à l'intérieur d'un même type de climat général. De telle sorte qu'une pluviosité donnée ne peut s'interpréter de façon réaliste sans connaître sa variabilité, ou, ce qui revient au même, la proportion de pluies fiables (assurées 4 années sur 5). Il en résulte que les cartes climatiques devraient indiquer les hauteurs annuelles des pluies fiables et la médiane plutôt que la moyenne.

La végétation naturelle est affectée par la variabilité pluviométrique dans sa composition floristique et dans sa structure, dans l'adaptation morphologique et écophysio-logique des espèces qui la composent. Il en est évidemment de même des cultures, s'agissant du choix des espèces et des cultivars en fonction de la variabilité probable du régime pluviométrique. Les plantes à cycle court permettent de mieux faire face à cette variabilité. Ainsi, il a été montré que le raccourcissement de quinze jours du cycle de développement du mil permettrait d'augmenter considérablement les superficies soumises de façon fiable à cette culture au Sénégal (DANCETTE, 1978). S'agissant des cultures, la variabilité peut être atténuée par un choix adéquat des sols et par des techniques culturales appropriées.

On peut également influencer sur la variabilité de la production primaire de la végétation naturelle (forêts, parcours) par des techniques de gestion appropriées. Nous avons montré que le RVPP dépendait dans une large mesure de l'état dynamique des écosystèmes. Il est théoriquement facile de modifier cet équilibre par une gestion qui favorise le couvert végétal pérenne, donc l'état de surface du sol, sa structure et sa perméabilité, donc ses réserves hydriques.

La variabilité de la production primaire est en moyenne 50 % plus élevée que celle des précipitations ; toutefois, dans environ 10 % des cas étudiés, elle est inférieure. Ces cas correspondent à des situations où la production ne dépend pas directement de la pluviosité de l'année (dépressions inondables, lignes de drainage, zones à nappe phréatique à la portée des racines, etc.).

Le coefficient d'efficacité pluviale (CEP) et le rapport de variabilité entre la production et la pluie (RVPP) dépendent également de la pluviosité moyenne ainsi que de l'état de l'écosystème.

La production secondaire du bétail est moins variable que la pluviométrie en raison de diverses stratégies d'adaptation des animaux, des troupeaux et de leur gestion par les éleveurs (réserves alimentaires, rotation des parcours, alimentation de complément, transhumance, nomadisme et toutes les techniques de gestion des troupeaux et des parcours).

Les petits ruminants sont moins sensibles que les bovins aux fluctuations pluviométriques mais plus que les dromadaires et les ânes.

H.-N. LE HOUÉROU : *écologue*,
Cefe/CNRS, BP 5051, 34033 Montpellier cedex 01

BIBLIOGRAPHIE

- ACHARD (F.), 1988. - Contribution à l'étude des pâturages des savanes Nord-Soudaniennes de la région de Ouagadougou. 65 p. *multigr.*, stat. expérim. de Gampéla, Instit. de dével. rural, univ. de Ouagadougou, Burkina Faso.
- AÏDOUD, (A.), 1987. - Les écosystèmes à Armoise Blanche (*Artemisia herba alba* Asso). II : Phytomasse et productivité primaire. *Biocénose*, 4 : 1-2.
- AUSTIN (M. P.) et NIX (H. A.), 1978. - Classification of climate and its relation to Australia rangelands. In K.M.W. Howses, edit. : *Studies of the Australian arid zone, III Water in rangelands : 9-17* Div. of Land Resources, CSIRO, Melbourne.
- BERNUS (E.), 1981. - Touaregs nigériens : unité culturelle et diversité régionale d'un peuple pasteur. 508 p. *Mém. ORSTOM*, n° 94, Paris.
- BROWN (L. H.) et COCHEMÉ (J.), 1969. - A study of the agroclimatology of the highlands of East Africa. 330 p. FAO/Unesco/WMO Interagency Agroclimatology Project, Rome, Paris and Geneva.
- CAEES (Caisse algérienne d'expansion économique et sociale), 1961. - Perspectives d'amélioration des productions fourragères et animales. vol. 1, 165 p., 4 fig., 4 cartes. Min. de l'Agric. Alger, Algérie.
- COCHEMÉ (J.) et FRANQUIN (P.), 1967. - A study of agroclimatology of the semi-arid areas south of the Sahara in West Africa. 325 p., Techn., FAO/Unesco/WMO interagency project on Agroclimatol. Rome, Paris et Geneva.
- DANCETTE (C.), 1977. - Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. 41 p. *multigr.*, Inst. sénég. de rech. agron., Bambey, Sénégal. et *L'Agronom. trop.*, xxxix 4 : 331-335, 1979.

- DANCETTE (C.), 1978. - Besoins en eau et adaptation du mil la saison des pluies au Sénégal. 17 p. *multigr.*, Inst. sénég. de rech. agron., Bambey, Sénégal.
- DANCETTE (C.) et HALL (A. E. L.), 1979. - Agroclimatology applied to water management in the sudanian and sahelian zones of West Africa. In A.E. Hall, G.H. Cannell et H.W. Lawton, edits : Agriculture in semi-arid environments : 98-118, *Ecological Studies*, vol. n° 34, Springer Verlag, Heidelberg, W. Germany.
- DANIN (A.) et PLITMANN (U.), 1987. - Revision of the plant geographical, territories of Israel and Sinaï. *Pl. Syst. Evol.*, 156 : 43-53.
- DAVY (E. G.), MATTEI (F.) et SOLOMON (S. I.), 1976. - An evaluation of climate and water resources for the development of agriculture in the Sudano-Sahelian zone of West Africa. 289 p., *Special Report n° 9*, WMO, Geneva.
- DE MIRANDA (E. E.) et OLIVEIRA (C. A.), 1981. - Um metodo simples para estimar as precipitaçoes anuais em calides sem pluviometro no tropico semi- arido do Brasil. 36 p., Doc. n° 9, Centr. de Pesq. Agropec. do tropico semi-arido, Embrapa, Petrolina, Brasil.
- DUBIEF (J.), 1968. - Le climat du sahara. vol. II, 275 p., 107 cartes, 234 phot.. Mem. H. S., Inst. météorol. et phys. du Globe, univ. d'Alger, Algérie.
- FLORET (C.) et PONTANIER (R.), 1982. - L'aridité en Tunisie présaharienne. *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 150, Paris, 544 p.
- FLORET (C.), LE HOUÉROU (H.-N.) et PONTANIER (R.), 1987. - Climatic hazard and management : a comparison of the arid zones north and south of the Sahara. 35 p., Proceed. Internat. Conf. Medecos V, Springer Verlag, in Press.
- FRÈRE (M.), POPOV (G. F.), CRABBÉ (M.) et GOMMES (R.), 1984. - Agroclimological data : Africa. 2 vol., *Plant production and protection series*, n° 22, FAO, Rome.
- GLOVER (J.) et HENDERSON (J. P.), 1954. - Provisional maps of reliability of rainfall in East Africa. *Oug. J. Met. Soc.*, 80 : 602.
- GLOVER (J.) et ROBINSON (P.), 1953. - A simple method of calculating the reliability of rainfall. *East Afr. Agric. J.* : vol. XIX, 1.
- GLOVER (J.) et TAYLOR (J.), 1955. - Assessing the reliability of rainfall if monthly falls are not independant. *J. Agric. Sc.*, vol. 46, 4 : 387.
- GOLFARI (L.) et CASER (R. L.), 1977. - Zoneamento ecologico da regioa nordeste para eperimentação florestal. 116 p., Centr. de Pesq. Florest. da Regiao do Cerrado, Belo Horizonte, Brasil.
- GRIFFITHS (J. F.), 1958. - Climatic zones of East Africa. *E. Afr. Agr. J.*, XXIII, 3.
- GRIFFITHS (J. F.), 1958. - An initial investigation of the annual rainfall in East Africa. *E. Afr. Met. Dept. Mem.*, vol. III : 5.
- GRIFFITHS (J. F.), 1961. - Some rainfall relationships in East Africa. Inter-Afric. Conf. on Hydrology, CCTA, Nairobi.
- GRIFFITHS (J. F.) et HEMMING (C. F.), 1963. - A rainfall map of eastern Africa and Southern Arabia. 42 p., 9 fig., 1 map. *E. Afr. Met. Dept. Mem.*, vol. II : 10.
- HARGREAVES (G. H.), 1973. - Monthly precipitation probabilities for the states of Maranhã, Ceara and Piauí in North-East Brazil. 154 p., Dept. of Agric. et Irrigation Engineering, Utah State Univ., Logan, Ut., USA.
- HARGREAVES (G. H.), 1974a. - Precipitation dependability and protential production in North-East Brazil. 123 p., Embrapa, Petrolina, Brazil et Utah State Univ. Logan, Ut., USA.
- HARGREAVES (G. H.), 1974b. - Climate zoning for agriculturaol production in North-East Brazil. 6 p., 1 map. Utah State Univ. Logan, Ut., USA.
- KATSNELSON (J.), 1956. - The variability of rainfall in Palestine and the statistical methods of its measurment. *Met. Dept. Notes, sér. E*, n° 4.

- KATSNELSON (J.), 1964. - The variability of annual precipitation in Palestine. *Arch. Meteor. Geoph. Bioklimat.* sér. B, 13,2 : 163-172.
- KATSNELSON (J.) et KOTZ (S.), 1957. - On the upper limits of some measures of variability. *Arch. Meteor., Geoph. Bioklimat* B 8, 103.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1958. - Contribution à l'étude écologique de l'olivier en Tunisie. 89 p. *multigr.*, Cartes : 7 feuilles au 1/200 000. Délég. Génér. à la productivité, Paris et Tunis.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1959a. - Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. vol I, 281 p., 33 tabl. h.-t., 4 cartes h.-t., Mém. H.S. Inst. rech. sahar. Univ. d'Alger.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1959b. - Écologie, phytosociologie et productivité de l'olivier en Tunisie méridionale. *Bull. Cartes Phytogeogr.*, sér. B, IV : 7-72, CNRS, Paris.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1962. - Les pâturages naturels de la Tunisie aride et désertique. 106 p., XII pl., 4 cartes h.-t., Inst. sces écon. appl., Paris et Tunis.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1969. - La végétation de la Tunisie steppique. *Ann. Inst. nat. rech. agron.*, 42, 5 : 1-624, 40 fig. 40 phot. 1 carte coul. 1/500 000 (128 000 km²), XXII tabl. h.-t.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1980. - Rapport de mission aux îles du Cap Vert. 25 p., div. des Ress. forest., FAO, Rome.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1982. - The arid bioclimates in the mediterranean isoclimatic zone. *Oecol. Mediterr.*, VIII, 1-2 : 103-114.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1982-1984. - An outline of the bioclimatology of Libya. *Act. Bot. Soc. Bot. de Fr.* (2/3/4) : 213-247.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1984. - Rain-Use Efficiency : a unifying concept in arid land ecology. *J. Ar. Envir.*, 7 : 1-35.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1985. - The impact of climate on pastoralism. In R. W. Kates, J. H. Ausubel et M. Berberian, édits : Climate Impact Assessment. CH. 7 : 155-186. Scope Study n° 27, J. Wiley et Sons, N.-Y., USA.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1986-1989. - La variabilité de la pluviosité annuelle dans quelques régions arides du monde : ses conséquences écologiques : B. Bret, ed., 1989 : Les hommes face aux sécheresses ; Nordeste brésilien et Sahel africain : 127-137. *Collection Travaux et Mémoires*, n° 42, Inst. htes études de l'Amér. latine, Paris.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1988a. - Recherches bioclimatiques sur la Basse Californie du Nord (Mexique) : rapport préliminaire. 15 p. ; Cepe, CNRS. Montpellier, France.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1988b. - Le climat, la végétation naturelle, les forêts, les pâturages, l'occupation des terres et l'érosion. Conséquences écologiques de la mise en eau du barrage de la kompienga (Burkina Faso). Développement agricole, aménagement et gestion de l'espace rural. 70 p., In : Schéma directeur de l'aménagement du bassin versant de la Kompienga (Burkina Faso). Agrotechnik. Frankfurt/Main, Allemagne de l'Ouest et min. de l'Hydraul. Ouagadougou, Burkina Faso.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1988c. - International variability of rainfall and its ecological and managerial consequences on natural vegetation, crops and livestock. *Proc. 5th Int. Conf. on Mediterranean Ecosystems «Time Scales and Water Stress»* (di Castri, Floret, Rambal, Roy eds.) IUBS, 32-346.
- LE HOUÉROU (H.-N.), 1989. - The grazing lands ecosystems of the african Sahel : 282 p., 50 tab., 152 fig., *ecological Studies*. n° 75 Springer Verlag, Heidelberg, West Germany.
- LE HOUÉROU (H.-N.), BINGHAM (R. E.) et SKERBEK (W.), 1984.- Towards a probabilistic approach to rangeland development planning. 35 p., 2 nd Intern. Ranglds Congr., Adelaïde, S. Australia.
- LE HOUÉROU (H.-N.), BINGHAM (R. E.) et SKERBEK (W.), 1988. - Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitation in world arid lands. *J. Ar. Envir.*, 15 : 1-18.

- LE HOUÉROU (H.-N.), CLAUDIN (J.) et POUGET (M.), 1977. - Étude bioclimatique des steppes algériennes. *Bull. Soc. hist. nat. Afr. du Nord*, 3-4 : 33-74, 3 cartes h.-t. 1/1 000 000.
- LE HOUÉROU (H.-N.), DUMANCIC (D.) et ESKILEH (M.), 1983. - Energy intake and liveweight change in dry fat-tail barbary ewes. 72 p. *multigr.*, 11 fig. Techn. Doc. n° 48, FAO/UTFN Lib 018 et Agric Res. Centre, Tripoli, Libya.
- LE HOUÉROU (H.-N.) et NORWINE (J. R.), 1985-1988. - The ecoclimatology of South Texas. In : E. E. Whitehead, C. F. Hutchinson, B. N. Timmermann et R. G. Varady, eds : *Arid Lands Today and Tomorrow. Proceed. Internat. Res. et Develop. Confer.*, Oct. 20-25, 1985, Tucson, Arizona : 417-443, Westview Press Boulder, Col., USA.
- LE HOUÉROU (H.-N.) et POPOV (G. F.), 1981. - An ecoclimatic classification of intertropical Africa. 40 p. 3 cartes. *Plant Prod. Paper* n° 31, AGP, FAO, Rome, Italy.
- MC MAHON (J. A.) et WAGNER (F. H.), 1985c - The Mojave, Sonoran and Chihuahuan deserts of North America. In : M. Evenari, I. Noy-Meir and D. W. Goodall : *Hot deserts and arid shrublands*, vol. A, ch. 5 : 105-202. *Ecosystems of the world*, vol. 12A, Elsevier publ., Amsterdam, The Netherlands.
- MATTEI (F.), 1979. - Climatic variability in agriculture in the semi-arid tropics. *Proceed. World Climate Conf.* : 475-509, WMO, Geneva.
- MAWSON (W. F. Y.), HUNTER (H. C. D.), ROBINSON (I. B.) et DAWSON (N. H.), 1974. - Current land-use in western arid region. Land-use study, part - I. *Techn. Bull.* n°12, Div. of Land Utilization, Queensland Dept of Primary Industries, Brisbane, Qsld., Australia.
- NAAMI (M. S.), 1987. - Statistiques pluviométriques en Tunisie. Doc non publié., Serv. météor. min. Trav. Publ., Tunis, Tunisie.
- NEUMAN (J.), 1956. - On the incidence of dry and wet years. *Israel Expl. J.*, 6,1 : 58-63.
- NICHOLSON (S. E.), 1979. - The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa. *Month. Weath. Rev.*, 108,4 : 473-487.
- NICHOLSON (S. E.), JEEYOUNG (K.) et HOOPINGARNER (J.), 1988. - Atlas of african rainfall and its interannual variability. 237p, Dept of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida.
- POPOV (G.-F.), GOMMES (R.) et CRABBÉ (M.), 1987. - Agroclimatological data : Asia., 2 vol. FAO, Rome, *Plant production and protection series*, n° 25.
- SELTZER (P.), 1946. - Le climat de l'Algérie. 219 p., *Trav. Inst. Météor. et Phys. du Globe*, univ. Alger, Algérie.
- SHARON (D.), 1972. - The spottiness of rainfall in a desert area. *J. of Hydrol.* 17 : 161-175.
- SLATYER (R. O.) et MABUTT (J. A.), 1964. - Hydrology of arid and semi-arid regions in V.T. Chow, edit. : *Handbook of applied hydrology* : 24-29.
- SNEYERS (R.), 1981. - La pluviométrie des pays du Sahel : Mauritanie, Sénégal, Mali et Haute Volta. La sécheresse des années 1971, 1972 et 1973. 107 p. OMM, Genève et Office royal de météorologie de Belgique, Bruxelles, Belgique.
- VARNEY (B. M.), 1925. - Seasonal precipitation in California and its variability. *Month. Weath. Rev.*, 53 : 4-5.
- VIRMANI (S. M.), REDDY (S. J.) et BOSE (M. N. S.), 1980. - A handbook on the rainfall and climatology of West Africa : data for selected locations. 54 p., Icrisat, Pantacheru, India.
- WADHAM (S. M.), WILSON (R. K.) et WOOD (J.), 1964. - Land Utilization in Australia. 295 p., Melbourne Univ. Press., Melbourne, Vict. Australia.
- WALLÉN (C. C.), 1958. - Variability of precipitation in Sweden. *Arch. Met. Geoph. Bioklimat.*, B 9, 113.
- WALLÉN (C. C.) et BRICHAMBAUT (G. Perrin De), 1962. - A study of agroclimatology in semi-arid and arid zones of the Near East. 335 p. 6, maps, FAO/Unesco/WMO Interagency Project on Agroclimatology, Rome, Paris et Geneva.