

CHAPITRE 1

CLIMATOLOGIE DU SAHARA ET DE SES MARGES

Pascal Sagna

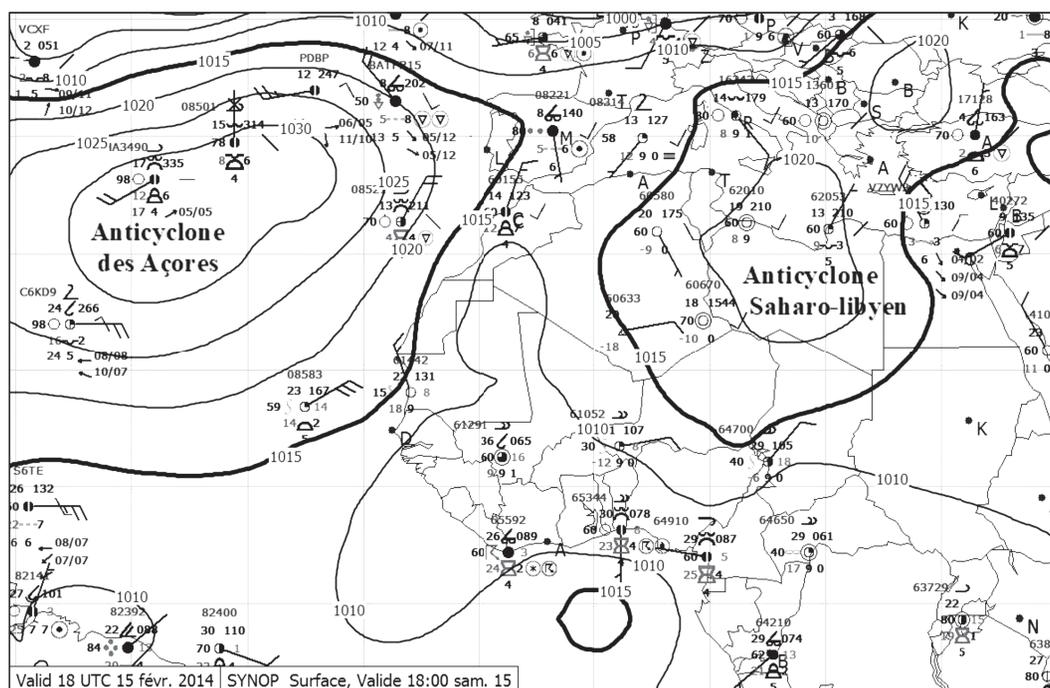
L'étude de la climatologie, c'est-à-dire des interrelations entre l'atmosphère et la surface terrestre, du **Sahara** et de **ses marges**, en vue d'en déterminer les caractéristiques climatiques, doit nous permettre de nous appesantir à la fois sur les aspects communs à cet espace géographique dont la zonalité, mais aussi de spécifier les particularités des parties septentrionales avec un régime de pluies de type méditerranéen et méridionales avec un régime de pluies de type tropical, lié à la présence de la mousson et aux perturbations qui s'y développent. Trois zones peuvent ainsi être retenues du nord au sud, soit la zone méditerranéenne, la zone saharienne et la zone sahélienne. « *Le Sahara est le plus grand désert chaud du monde. Occupant presque tout le nord de l'Afrique, il mesure environ 4 800 kilomètres d'est en ouest et entre 1 300 et 1 900 kilomètres du nord au sud, soit une superficie totale de près de 8 600 000 kilomètres carrés* » (Gritzner J. A. et al, 2017). Il concerne de l'océan Atlantique à la Mer Rouge les pays suivants : la Mauritanie, le Maroc, le Mali, l'Algérie, la Tunisie, le Niger le Tchad, la Libye, l'Égypte et le Soudan. À cela il faut ajouter, les îles septentrionales de la République du Cap-Vert. La marge nord est limitée à l'ouest par les massifs montagneux du Maghreb, à l'est par une étroite bande au sud de la Mer Méditerranée tandis que la marge sud est constituée par la zone sahélienne, qui est une bande s'étendant de la République du Cap-Vert jusqu'à Djibouti en passant par le Sénégal, la Mauritanie, le Mali, le Burkina Faso, le Niger, le Tchad, le Soudan du sud, l'Éthiopie et l'Érythrée. Il s'agit d'une zone de transition entre la zone désertique (Sahara) et la savane qui relève de la zone soudanienne et qui est limitée approximativement en latitude par les isohyètes 100 mm au nord et 500 mm au sud (Leroux M., 1983 et 2010 ; Leborgne J., 1988 et 1995).

Cette étude climatologique exige une approche dynamique et statistique tout en restant géographique. La première approche doit prendre en compte la circulation atmosphérique et les principales perturbations pluvieuses et non pluvieuses qui s'y manifestent et la seconde doit dégager les états moyens de l'atmosphère à travers les paramètres météorologiques essentiels tels que les précipitations et les températures. Pour cela, nous avons consulté les documents de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM 1967), de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal (ANACIM) et des services météorologiques de certains pays concernés par l'étude. Une telle analyse dégagera des nuances climatiques sur ces trois zones à travers l'apparition de domaines climatiques.

I – LA CIRCULATION SUR LE SAHARA ET SES MARGES

La circulation sur le Sahara et ses marges appartient à la circulation générale de l'atmosphère, mais elle est liée de manière plus spécifique à la manifestation en surface de trois cellules anticycloniques dont deux se trouvent dans l'hémisphère nord, avec d'une part l'anticyclone des Açores et, d'autre part, l'anticyclone Saharo-libyen (fig. 1) et la troisième dans l'hémisphère sud avec l'anticyclone de Sainte-Hélène. Les échanges méridiens, se réalisant depuis les zones polaires en direction de la zone tropicale à travers les zones tempérées, seront relayés par ces différentes cellules anticycloniques qui, en fonction de la puissance de leur champ de pression, vont alimenter la circulation tropicale. Celle-ci est tout d'abord constituée par l'alizé qui peut ensuite évoluer en mousson.

Fig. 1 – Situation météorologique en surface le (15 février 2014 à 18 00TU)



Source : Bureau Unité Prévisions Protections des Service d'Exploitation de la Météorologie, ASECNA, Dakar-Yoff, Sénégal

L'alizé est un vent issu d'une cellule anticyclonique tropicale, qui est parfois dénommée « *subtropicale* », et qui se dirige vers l'axe des Basses Pressions Intertropicales (BPIT), constitué par l'Équateur Météorologique, sans traverser l'équateur géographique. Il s'agit d'un flux qui demeure dans l'hémisphère qui l'a vu naître. Il est aussi connu sous les noms de « *trade-winds* », de « *easterlies* », etc. Il se caractérise par sa direction, sa trajectoire qui peut être continentale ou maritime, sa vitesse, sa température, son humidité, son épaisseur, sa stabilité ou son instabilité, etc. En fonction de ces éléments « *se distinguent ainsi : "l'alizé maritime" (Al.m.) à trajectoire océanique, donc généralement humide et aux écarts thermiques faibles, et "l'alizé continental" (Al.c.) marqué par la sécheresse et par des écarts diurnes importants ; entre ces deux catégories principales existent*

*des variétés intermédiaires telles que "l'alizé maritime continentalisé" (Al.m.c.) d'origine océanique et de trajectoire continentale, ou bien "l'alizé continental humidifié" (Al.c.h.), transformation d'un flux d'origine continentale qui acquiert une trajectoire océanique » (Leroux M., 1983). Ces différentes dénominations traduisent un changement de caractéristiques. L'alizé issu de l'anticyclone des Açores sera essentiellement de l'**alizé maritime** qui va balayer l'ouest du Sahara, c'est-à-dire les parties côtière et océanique tandis que celui qui va provenir de l'anticyclone Saharo-libyen sera de l'**alizé continental**, connu en Afrique sub-saharienne sous le nom d'harmattan et qui intéressera davantage la partie continentale. Le premier est connu comme un vent frais et humide tandis que le second est souvent qualifié de vent chaud et sec véhiculant parfois, pendant la saison sèche, des poussières à partir du Sahara et en direction du Sahel.*

La **mousson**, qui a servi à désigner dans le passé, une saison, une masse d'air, un renversement saisonnier de vent (« *mousson d'été et mousson d'hiver* ») ou un balancement saisonnier de la circulation planétaire (circulation de mousson), est considérée actuellement comme le prolongement de l'alizé lorsque celui-ci franchit l'équateur géographique. Ce faisant, il s'intègre dans la circulation de l'autre hémisphère géographique, tout en restant dans le même hémisphère météorologique. De ce fait, il subit une déviation plus ou moins importante de sa trajectoire en fonction de la distance qui sépare les deux équateurs et du fait de la force de Coriolis. Pour que la déviation soit nette, il est nécessaire que l'Équateur Météorologique soit suffisamment éloigné de l'équateur géographique, ce qui suppose pour le Sahara l'existence d'une part d'un centre émetteur (anticyclone de Sainte-Hélène) et, d'autre part, d'un centre récepteur (dépression du Tanezrouft). La mousson hérite ses caractères, notamment thermiques et hygrométriques, de l'alizé et ceux-ci vont se modifier selon que le parcours est océanique ou continental. Elle est un vecteur de vapeur d'eau, c'est-à-dire qu'elle transporte un potentiel précipitable plus ou moins important qui sera mis en œuvre par les facteurs locaux ou les perturbations tropicales pour aboutir à des précipitations. En se dirigeant vers le Sahara, à travers le Sahel, la mousson Atlantique se réchauffe, s'assèche ; autrement dit elle se continentalise et devient de plus en plus inapte à fournir suffisamment d'eau précipitable. Cela se traduit par une pluviosité moins importante et une tendance à l'aridité plus accrue.

La circulation, de manière globale, sur le Sahara et ses marges nous permet de mettre en évidence quatre espaces géographiques :

- une partie septentrionale avec une prédominance des vents d'ouest mais ayant une grande variabilité spatiale et saisonnière ;
- une partie centrale avec une prédominance de l'alizé continental compte tenu du rôle primordial de l'anticyclone Saharo-libyen dans la circulation de cet espace géographique ;
- une partie méridionale avec une alternance entre la circulation d'alizé continental issu de l'anticyclone Saharo-libyen et celle de la mousson provenant de l'anticyclone de Sainte Hélène ; cette double circulation se réalisant, d'une part, pendant la saison sèche (hiver boréal) et, d'autre part, pendant la saison des pluies (été boréal) ;
- une partie côtière et océanique avec une prédominance d'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores qui imprime sa marque même au cœur de l'hivernage de Nouadhibou à Dakar.

■ II – LES PERTURBATIONS PLUVIEUSES

Selon l'espace géographique, les perturbations pluvieuses se différencient en fonction de leur processus de formation. Sur les marges septentrionales du Sahara, comme en Europe et en Méditerranée, les perturbations sont essentiellement liées au front polaire, c'est-à-dire au déplacement des masses d'air dans les moyennes latitudes, et celles-ci se déplacent généralement de l'ouest vers l'est. Elles sont plus actives pendant l'hiver boréal et cela se traduit par des précipitations plus abondantes. À cela, il faut ajouter les facteurs locaux tels que le relief et la convection thermique qui peuvent aussi expliquer certaines manifestations pluvieuses. En effet, des orages parfois violents sont enregistrés sur les reliefs montagneux du Maroc à la Tunisie en passant par l'Algérie. L'efficacité pluviométrique de ces perturbations diminue globalement du nord vers le sud, c'est-à-dire au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'espace saharien marqué par un caractère essentiellement anticyclonique en hiver et dépressionnaire en été.

Le cœur du Sahara est une zone où les précipitations sont exceptionnelles. Elles peuvent être rattachées, lorsqu'elles se manifestent, soit aux perturbations des moyennes latitudes pendant l'hiver boréal soit à perturbations tropicales lors des remontées importantes de l'Équateur Météorologique, qui sont souvent consécutives à l'existence de couloirs dépressionnaires à travers l'Afrique du nord.

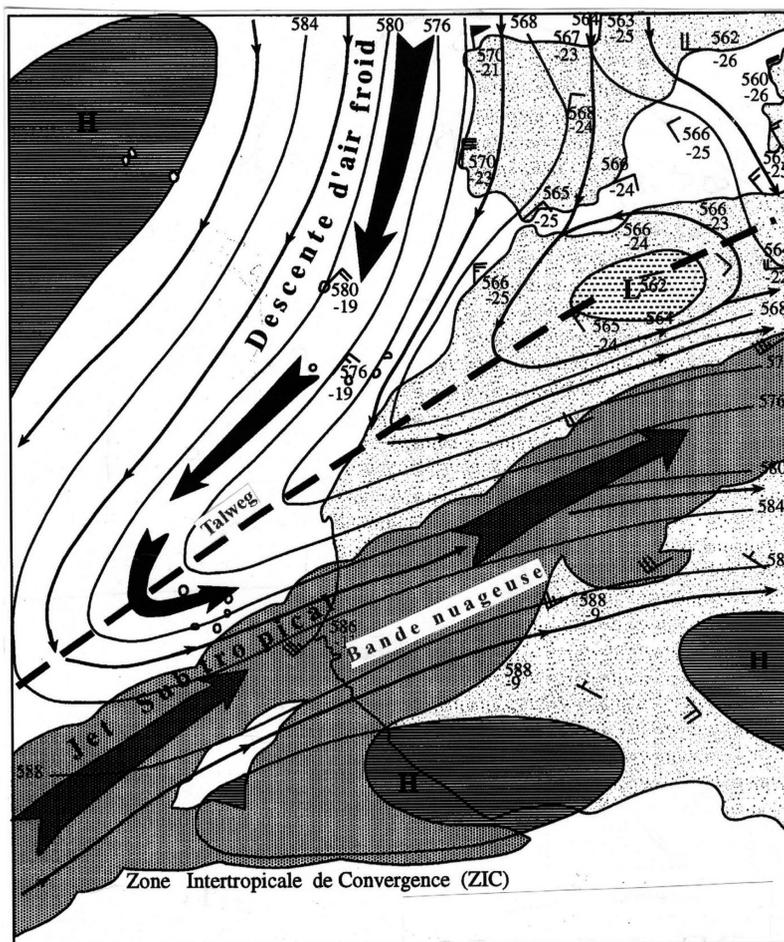
Sur les marges méridionales du Sahara, les perturbations pluvieuses se manifestent aussi bien pendant la période hivernale (saison sèche) que pendant la période estivale (hivernage ou encore saison pluvieuse). Les processus de formation de ces perturbations ne sont pas les mêmes.

Pendant la période hivernale, les perturbations pluvieuses sont liées aux **invasions polaires** qui sont des interférences des moyennes latitudes sur la circulation tropicale. De telles situations se traduisent par des descentes d'air froid des moyennes latitudes vers les basses latitudes sur la partie occidentale du talweg et par des remontées d'air chaud et humide, véhiculé par le Jet Subtropical sur la partie orientale du talweg (fig. 2). La rencontre entre les descentes d'air froid et les remontées d'air chaud se traduit par des formations nuageuses abondantes au niveau de l'étage moyen. Il s'agit essentiellement d'altostratus et d'altocumulus qui peuvent être à l'origine de précipitations. La vapeur d'eau, utilisée dans la formation des nuages, provient en grande partie de la Zone Intertropicale de Convergence et elle est transportée par les vents d'ouest d'altitude. Les pluies, qui en résultent, sont connues sous diverses appellations : « *heug* » en Ouolof (langue nationale du Sénégal) ou « *pluies de mangues* ». Elles donnent un cachet particulier à la période hivernale, surtout caractérisée par l'absence de précipitations et par des manifestations de poussières provenant du Sahara ou de ses abords immédiats. Les précipitations hivernales, du fait de leur processus de formation et de leur évolution globale de l'ouest vers l'est, diminuent globalement du Cap-Vert vers l'intérieur du Sahara et du Sahel vers le nord de l'Afrique.

L'activité pluviométrique des invasions polaires au Sénégal, bien que faible globalement, est plus fréquente en décembre, mois pendant lequel on enregistre 45 % des pluies maximales, puis suivent novembre avec 24 %, février avec 14 %, janvier avec 10 % et mars avec 7 %. Ces perturbations dépassent rarement 4 à 5 manifestations significatives pendant la saison sèche. Il existe des années pendant lesquelles, elles ne se manifestent pratiquement pas. C'est cela qui leur confère le caractère de rare par rapport aux précipitations d'hivernage qui sont plus régulières. Ces précipitations connaissent une grande variabilité spatio-temporelle et interannuelle. Ainsi, entre le 8 et le 10 janvier 2002, de fortes pluies, par rapport à la saison, ont

été enregistrées sur le nord du Sénégal avec, notamment, 67,9 mm à Saint-Louis, 77 mm à Louga, 115,8 mm à Podor, 100,9 mm à Guédé-Chantier, 30,5 mm à Matam et 56 mm à Thiès. Ce phénomène météorologique rare, et qualifié d'extrême par son intensité, a été globalement attribué au changement climatique avec la recrudescence de manifestations extrêmes. Le bilan du sinistre, issu du communiqué du 22 octobre 2002 du comité de gestion de la catastrophe, créé par le Gouvernement du Sénégal, a fait état de « 28 cas de personnes décédées, 13 993 maisons détruites, 13 561 bovins morts, 91 823 petits ruminants morts et 100 000 personnes sinistrées », soit environ 1 % de la population du pays. Ces chiffres sont suffisamment éloquents pour montrer les graves conséquences qui peuvent être liées à ces pluies et la vigilance que nous devons avoir pour mieux les prévoir et atténuer, le plus possible, leurs impacts.

Fig. 2 – Situation d'invasion polaire le 14 janvier 1990 à 500 hPa à 12 00 TU



Source Sagna P., 2005.

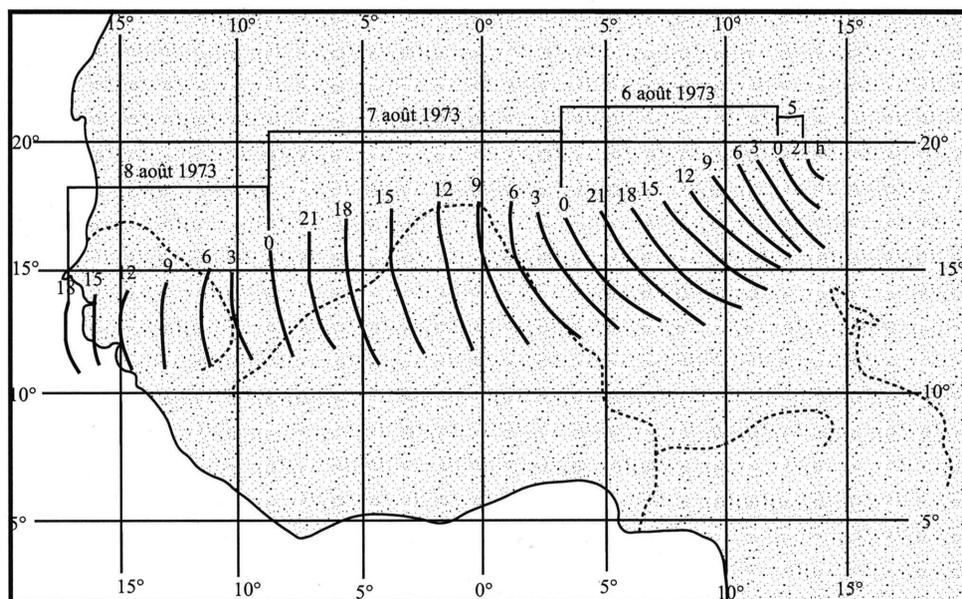
Pendant l'hivernage, les précipitations sur la bande sahélienne sont liées à plusieurs facteurs et cela justifie la multitude d'études et de publications sur cet espace géographique.

Parmi les principaux résultats, il y a les caractéristiques aérologiques estivales qui permettent de bien distinguer en surface, dans les basses couches et en altitude :

- la trace au sol de l'Équateur Météorologique dont la position la plus septentrionale peut avoisiner 25-26° de latitude nord dans le sud-ouest algérien ;
- la zone balayée en permanence par les alizés (alizé maritime et alizé continental ou harmattan) qui se situe au nord de cette trace de l'Équateur Météorologique ;
- la zone couverte par la mousson qui occupe tout l'espace compris entre l'équateur géographique et l'Équateur Météorologique (Sagna, 2005) ;
- l'épaisseur de la mousson et l'importance du potentiel précipitable advecté sur le Sahel ;
- les principales discontinuités africaines, plus particulièrement sahéliennes, et leur importance dans l'explication dans le processus des précipitations (Leroux, 1974) ;
- la manifestation des ondes d'est en altitude et leurs caractéristiques à travers notamment les études de Dhonneur G. en 1974, Viltard A. et al en 1984, Diédhiou A. en 1998, etc. ;
- les processus de formation des principales perturbations pluvieuses et leur évolution, etc.

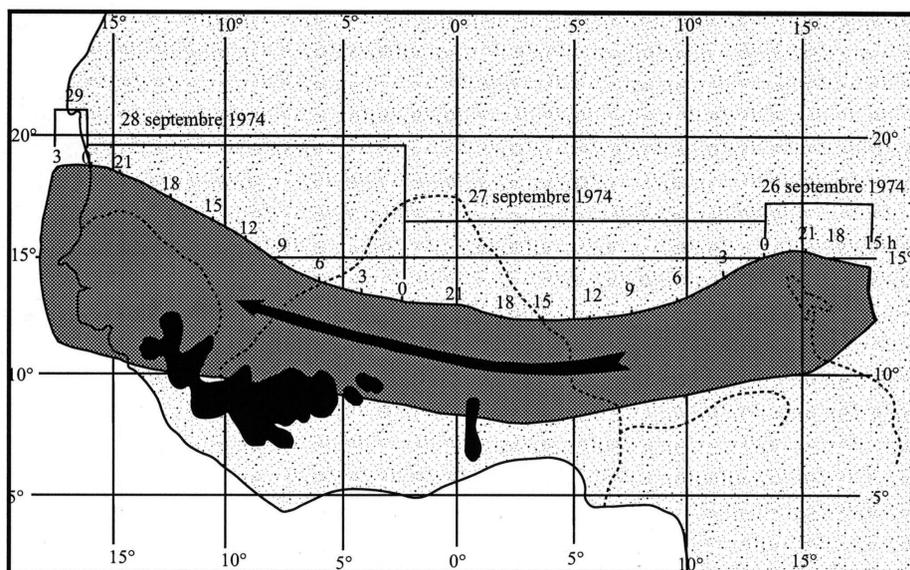
Ainsi, les précipitations de l'hivernage sur le Sahel peuvent être liées au facteur thermique, au facteur orographique, aux lignes de grains (fig. 3 et 4), aux remontées de la Zone Intertropicale de Convergence et aux perturbations cycloniques plus particulièrement sur la partie ouest.

Fig. 3 – Déplacement tri-horaire d'une ligne de grains en 1973 du 5 août à 21h au 8 août à 18h



Source Sagna P., 2005.

Fig. 4 – Évolution de la surface balayée par une ligne de grains du 26 au 29 septembre 1974



Source Sagna P., 2005.

Il faut, toutefois, souligner le rôle prépondérant des lignes de grains dans l'importance des totaux pluviométriques enregistrés dans la bande sahélienne. L'analyse des différents apports pluviométriques à Saint-Louis, au Sénégal, nous apporte quelques éclairages (tableau 1). On constate tout d'abord la faiblesse des précipitations hivernales par rapport à celles de l'hivernage. Ensuite, le nombre de lignes de grains varie d'une année à l'autre avec parfois des écarts considérables (9 en 1983 et 19 en 1985). Enfin, l'importance de leur apport pluviométrique, qui dépend en partie de la fréquence de leur passage, est un facteur déterminant de la qualité de la saison pluvieuse puisque ces perturbations apportent généralement plus de 80 % des précipitations à Saint-Louis sur les cinq années retenues. L'année 1983, qui est relativement sèche avec 95 mm pendant l'hivernage, a le plus faible nombre de lignes de grains. Ce résultat est confirmé par une étude plus exhaustive sur l'ensemble du Sénégal de 1980 à 1999 (Sagna P., 2005) et par une étude comparative des hivernages 2008 et 2009 au Sénégal avec la recherche de relations entre les migrations de l'Équateur Météorologique, la présence de la mousson et les précipitations (Sagna P., 2012).

Tableau 1 – Différents apports pluviométriques à Saint-Louis (station sahélienne du Sénégal)

Années	Précipitations hivernales	Précipitations d'hivernage	Total annuel	Nombre de lignes de grains	Apports des lignes de grains	% par rapport à l'hivernage
1981	7,5	328,3	335,8	15	296,8	90,4
1983	4,7	95,0	99,7	9	95	100
1985	2,4	258,9	261,3	19	258,9	100
1987	0	342,7	342,7	14	295,2	86,1
1989	0	239,5	239,5	24	211,9	88,5

■ III – LES PERTURBATIONS NON PLUVIEUSES

Dans ce genre de perturbations, le matériel utilisé est essentiellement le sable. C'est pourquoi on les appelle « *vent de sable* », ce qui correspond à une manifestation de lithométéores à partir de régions dépourvues de végétation de manière temporaire ou permanente, comme le Sahara ou le Sahel. Généralement, les vents de sable accompagnent l'accélération du flux d'alizé qui résulte de l'importance des échanges méridiens et détermine, en partie, la capacité du flux à soulever les particules sableuses. Le soulèvement de ces particules exige des mouvements horizontaux pour la phase de l'arrachage et des mouvements verticaux pour leur transport en altitude. Les poussières peuvent se manifester sous forme de brume sèche, de poussière en suspension, de chasse sable, de tempête de sable, de mur de sable, de tourbillon de poussière ou de sable, etc. Elles sont responsables d'une modification importante du temps.

Ainsi, dans le processus de formation des lithométéores nous retrouvons, malgré la conjonction de plusieurs facteurs, trois aspects principaux :

- l'**arrachage** de la surface terrestre et le **soulèvement** des particules terrigènes qui dépendent notamment de la vitesse du vent mais aussi de la cohésion des éléments du substratum ;
- le **transport** de ces particules, sur des distances plus ou moins longues, qui dépend de leur taille et de l'instabilité atmosphérique qui favorise leur ascension et leur maintien dans un type de circulation précis ;
- le **dépôt** des particules qui intervient lorsque l'équilibre est rompu entre leur poids et la résistance de l'air. Les zones de dépôts sont plus étendues que les zones sources. C'est ainsi que des éléments soulevés au Sahara et au Sahel peuvent se retrouver jusqu'en Amérique à la faveur des vents d'alizé ou du flux d'est supérieur ou jusqu'en Europe lorsqu'ils sont repris par le flux d'ouest qui correspond à la circulation des moyennes latitudes. Des exemples de dépôts de particules provenant du Sahara et de ses abords sont régulièrement mentionnés dans les travaux des scientifiques de l'Afrique du nord et de l'Europe.

Du point de vue de la répartition spatiale des principaux phénomènes sur le nuage de poussière sur les marges méridionales du Sahara :

- la chasse sable, la tempête de sable et le mur de sable se situent généralement sur la partie septentrionale, là où sont enregistrées les vitesses les plus considérables ;
- les poussières en suspension se localisent *grosso modo* sur la partie centrale avec des vitesses au sol plus réduites ;
- et les brumes sèches se retrouvent sur la partie méridionale au niveau des zones pourvues de végétation et qui enregistrent globalement les vents les plus faibles.

Les vents de sable s'accompagnent aussi de la baisse de la visibilité qui est dépendante de la densité des poussières en suspension, de la baisse ou de la hausse des températures moyennes qui sont dues à la conjonction de plusieurs éléments dont l'arrivée d'air plus frais ou plus chaud, selon les situations météorologiques et les espaces géographiques, et de la modification de l'évolution journalière des températures et de l'humidité relative.

Avec la sécheresse sahélienne, qui s'inscrit dans la mouvance des modifications climatiques actuelles, on note une recrudescence dans la manifestation des lithométéores sur le Sahara et ses marges. Les poussières apparaissent toute l'année avec des variations mensuelles, saisonnières et annuelles parfois considérables. Celles-ci sont aussi en fonction de l'espace géographique