



TIBESTI-ENNEDI-LAC TCHAD : LE TRIANGLE DE LA POUSSIÈRE IMPACT SUR LA FERTILISATION DE LA FORÊT AMAZONIENNE

TIBESTI-ENNEDI-CHAD LAKE: THE TRIANGLE OF DUST IMPACT ON THE FERTILIZATION OF THE AMAZONIAN FOREST

REMINI B.

Département des sciences de l'Eau et Environnement, Faculté de Technologie,
Université Blida 1, Blida 9000, Algérie

reminib@yahoo.fr

RESUME

Plus de la moitié du sable du Sahara exporté vers l'Atlantique provient de l'aire de Bodélé. Située au centre du triangle : Tibesti-Ennedi-Lac Tchad, Bodélé possède toutes les caractéristiques qui la considèrent comme la génératrice de la poussière. Le mécanisme du transfert de la poussière s'effectue selon deux phases : le soulèvement et la propulsion. La première phase qui se manifeste au centre du triangle est générée par les vents très violents en provenance du méga-venturi : Tibesti-Ennedi. La deuxième phase qui se déroule hors le triangle, le lac Tchad qui joue le rôle d'un obstacle donne un deuxième souffle au courant éolien qui propulse la poussière dans l'atmosphère.

Mots clés : Méga-Venturi, Lac Tchad, Triangle de la Poussière, Bodélé, Forêt Amazonienne.

ABSTRACT

More than half of the sand exported to the Atlantic comes from the Bodélé area. Located in the center of the triangle: Tibesti-Ennedi-Chad Lake, Bodélé has all the characteristics that classify it as the generator of dust. The mechanism of dust transfer has two phases: lifting and propulsion. The first phase in the center

of the triangle is generated by very strong winds from the mega-Venturi: Tibesti-Ennedi. The second phase, which takes place outside the triangle, Chad Lake acting as an obstacle gives a second breath to the wind power that propels the dust into the atmosphere.

Keywords: Mega-Venturi, Chad Lake, Dust Triangle, Bodele, Amazonian Forest.

INTRODUCTION

Aujourd'hui c'est confirmé, la poussière en provenance du désert chaud du Sahara voyage vers le nord du continent de l'Amérique du sud. Sur la base des données collectées par le satellite Calipso durant la période : 2007-2013, la NASA a quantifié le transfert du sable allant du Sahara vers la forêt Amazonienne en traversant l'océan Atlantique sur une distance de plus de 5000 km (Tambert, 2016 ; Chavetnoir, 2015). Environ 182 millions de tonnes de poussière participent à ce grand voyage transatlantique dont 27.7 millions de tonnes de poussières atterrissent sur toute la superficie de la forêt Amazonienne (Aline, 2016 ; Grey, 2015). Environ 43 millions de tonnes de poussière poursuivent leurs voyage jusqu'à la mer des Caraïbes (Grey, 2015). Le reste saupoudre l'océan Atlantique le long de son périple. Une quantité de phosphore en provenance de Sahara participe à ce voyage avec le sable. Le phosphore ; élément indispensable pour une plante puisqu'il favorise sa croissance et le développement de ces racines. Considéré comme un fertilisant qui améliore la qualité des produits végétaux et la croissance cellulaire, la masse de phosphore évaluée à 0.08% de la quantité de poussière qui tombe sur le bassin du fleuve Amazone (27.7 millions de tonnes), soit 22000 tonnes (Aline, 2016 ; Grey, 2015 ; Barthélémy, 2015). Un milieu sec fertilise un milieu humide ; quel miracle ! Mais devient cet engrais de phosphore. Depuis plus de 10000 ans, le Sahara était recouvert par une mer poissonneuse, mais suite aux changements climatiques, cette mer c'est rétrécie pour atteindre le lac Tchad actuel d'une surface ne dépassant pas les 1500 km² (Chauveau et Leconte, 2015). La cuvette de Bodélé située à l'amont du lac Tchad (dans l'axe des flux éoliens) est un ancien lit lacustre qui contient des dépôts de micro-organismes et des squelettes de poissons morts depuis des siècles et qui sont trop chargées en éléments de phosphore (Haug, 2015). En plus, cette région de Bodélé d'une surface égale à 22000 km² est connue comme la zone la plus poussiéreuse de la planète (Souto, 2014) et considérée comme la plus grande source de minéraux du monde (Washington, 2006). Ceci est dû au soufflement des vents très forts. Plus de la moitié de la poussière qui survole l'océan Atlantique provient de la dépression

de Bodélé (Chauveau et Leconte, 2015 ; Tremblay, 2008 ; Souto, 2014). Si aujourd'hui, le survol de l'Atlantique par la poussière en provenance du Sahara est confirmé par les données collectées par le satellite de la NASA sur la période : 2007-2013 (Timbert, 2016). Dans une première approche, les endroits de départs des particules dans le Sahara ont été définis (Remini, 2017), cependant, on maîtrise mal les causes et les mécanismes de soulèvement de la poussière dans l'atmosphère. Le présent article tente d'expliquer les mécanismes de l'érosion dans la dépression de Bodélé reconnue comme l'endroit qui dégage plus de la poussière sur la planète.

REGION D'ETUDE

Situation géographique de la dépression Bodélé

Situé au nord du continent Africain, le plus grand désert chaud de la planète, le Sahara couvre une superficie de plus de 8.5 millions de km². Il s'étend sur 9 pays : l'Algérie, le Mali, la Mauritanie, le Niger, la Tunisie, le Maroc, le Soudan, le Tchad, la Libye, l'Égypte et le Sahara Occidental. Elle est située au sud du Sahara et au nord du Tchad (fig. 1). La dépression géographique de Bodélé est le point le plus bas du Tchad et la partie la plus profonde de l'ancien méga-lac (Ndouné, 2014). La cuvette de Bodélé est située à 3500 km à vol d'oiseau du Littoral de la Mauritanie et à 8500 km du centre du bassin d'Amazonie dans le nord d'Amérique du Sud (fig. 1).

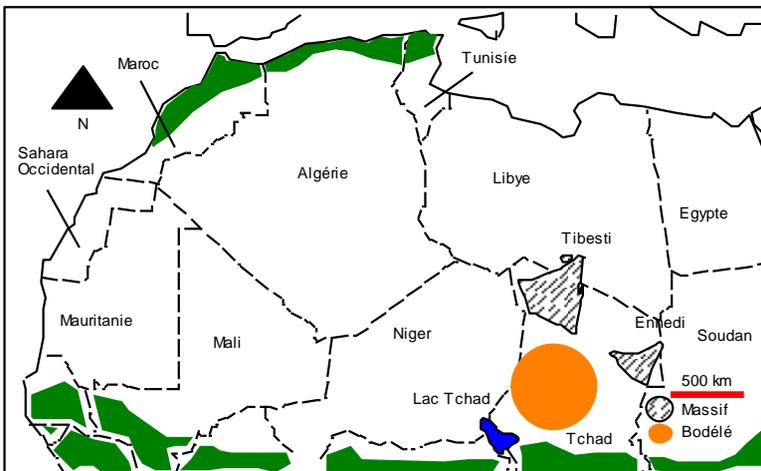


Figure 1 : Situation géographique de la dépression de Bodélé (Remini, 2018)

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Quelques notions de mécanique des fluides

Ecoulement autour d'un obstacle

Un obstacle immergé dans un courant fluide oppose une résistance à l'écoulement, lequel se divise en deux branches de part et d'autre de l'obstacle pour aboutir ensuite à cinq aires, chacune est caractérisée par son comportement dynamique du fluide (fig. 2 et 3) :

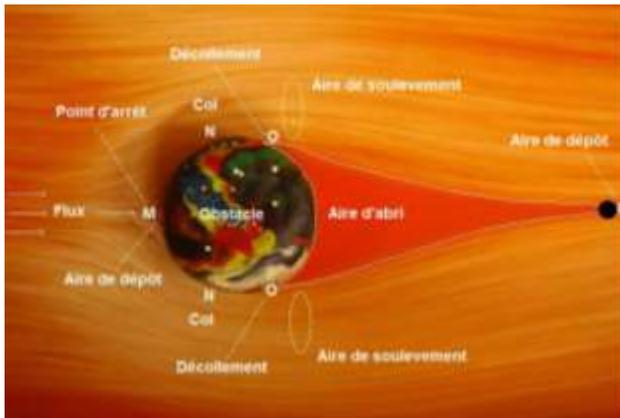


Figure 2 : L'effet d'un obstacle sur l'écoulement d'un fluide (Photo. Remini, 2018)

- Dans l'aire située à l'amont de l'obstacle, la pression est maximale et la vitesse de l'écoulement est nulle. Le point M est appelé point d'arrêt. Pour le cas d'une circulation éolienne, cette aire est le siège d'un dépôt sableux.
- Au point N, la pression décroît et la vitesse augmente. Les filets fluides se resserrent ; c'est l'aire du col. Dans le cas d'une érosion éolienne, cette aire est caractérisée par une accélération des vents et par conséquent on assiste à une forte érosion éolienne et de transport ou la corrosion éolienne peut être active.
- Au point O, la pression augmente de nouveau et il en résulte une brusque diminution de la vitesse, les filets du fluide se détachent de l'obstacle; c'est l'aire de décollement. Dans le cas d'une circulation éolienne, l'aire de décollement est une aire de soulèvement et du départ de la poussière.
- A l'aval de l'aire de sillage ou l'aire d'abri qui se forme suite au partage du flux fluide par l'obstacle en deux branches lesquelles vont se rencontrer au point de recollement (R). Dans une circulation éolienne,

l'aire de recollement est très riche en dépôt sableux, les vents de sable après avoir déviées l'obstacle y retrouvent leur direction initiale.

Écoulement dans un Venturi

L'écoulement d'un fluide dans un Venturi provoque un resserrement des filets fluides suite au rétrécissement de la section de l'écoulement au niveau du Col. Dans ce cas, l'écoulement augmente de la vitesse et la pression diminue (fig. 4). Dans une circulation éolienne, le vent transporteur de sable souffle très fort en provoquant une corrasion éolienne à la surface du sol. Pas loin du Col, se situe la section contractée qui est caractérisée dans le cas d'une circulation éolienne par des soulèvements de la poussière dans l'atmosphère



Figure 3 : Le Venturi : Resserrement des filets et augmentation de la vitesse de l'écoulement au niveau du Col (Photo. Remini, 2018)

Le Sahara : L'originalité d'un désert

Dans le Sahara, le vent est le principal agent transporteur de sable. Les obstacles, quel que soit leurs tailles, leurs formes et leurs natures (arbres, pentes, reliefs, massifs) introduisent une rugosité qui provoque une augmentation de la perte de charge et une réduction de la vitesse du vent, favorisant ainsi le dépôt sableux et la formation des dunes. Les méga-obstacles, par leurs configurations géométriques, et les dépressions topographiques (lacs, chotts et sebkhas) forment et façonnent les ergs. La répartition des massifs dans le Sahara crée des couloirs, des méga-convergentes et des méga -Venturi, obéissant au théorème de

Bernoulli. Cette disposition provoque une dynamique éolienne qui fait apparaître des aires d'érosion et des aires de dépôt, c'est à dire des ergs accumulateurs et des ergs exportateurs de sable. Les ergs qui se forment à l'amont de l'obstacle sont des aires à budget sédimentaire positif, tout comme ceux qui se forment à l'aval de l'obstacle, mais toujours derrière l'aire d'abri (aire de recollement) ; par contre, les ergs situés de part et d'autre de l'obstacle (« Col ») sont à budget sédimentaire négatif. En parallèle, l'écoulement autour d'un obstacle engendre des aires de ralentissement et d'accélération. A l'amont de l'obstacle, c'est plutôt l'aire de ralentissement et de freinage d'écoulement. Pour le cas d'une circulation éolienne, cette aire est le siège d'un dépôt sableux. De part et d'autre de l'obstacle, les filets du fluide se resserrent, c'est l'aire du Col ; c'est une aire d'érosion et de transport. A l'aval et juste après l'obstacle, la couche limite se détache de la paroi en formant l'aire de sillage. Pour le cas d'une circulation éolienne, on parle de l'aire d'abri qui ne comporte pas de dépôt. A l'aval de l'aire du sillage, se situe l'aire de recollement qui constitue l'amorce de l'aire de dépôt sableux (fig. 4). Partant de cette idée, nous pouvons dire qu'à l'échelle synoptique, le même phénomène se produit. Dans le Sahara, la dynamique éolienne est assurée à la fois par le vent, le sable et les méga-obstacles. Ces derniers participent à la formation et au façonnement des dunes et des Ergs. La disposition et la localisation des méga-obstacles dans le Sahara est très favorable à la dynamique éolienne, à la formation des Ergs et au soulèvement de la poussière dans l'atmosphère (fig. 5). Le Sahara est le siège de plusieurs cas de mécanique de fluides. On trouve la circulation éolienne autour des méga-obstacles et une dynamique éolienne provoquée par des méga-venturi. Le Sahara dispose de grands reliefs topographiques comme le Hoggar-Tassili Najjer (fig. 6), le Tibesti, l'Ennedi, l'Eglab, le Messak, le plateau d'Adrar, l'Adrar Ifogas, l'Ader Douchi, l'Aïr, Al Harruch Al Asswad et le plateau de Tadmaït. La disposition de ces méga-obstacles dans le Sahara engendre une dynamique éolienne très favorable au façonnement des Ergs et à la création des tempêtes de sable qui se manifestent plus particulièrement pendant la saison de printemps. Parmi les ergs les plus remarquables du Sahara, on peut citer le Grand Erg Occidental (fig. 7), le Grand Erg Oriental (fig. 8), le Grand Erg de Fachi Bilma, l'Erg Essaouane, l'Erg Iguidi, l'Erg Echech, l'Erg Erraoui, l'Erg Rebiana, l'erg Bilma, l'Erg Eddahan Ubari, l'Erg Mourzouk et l'Erg Ouarane.

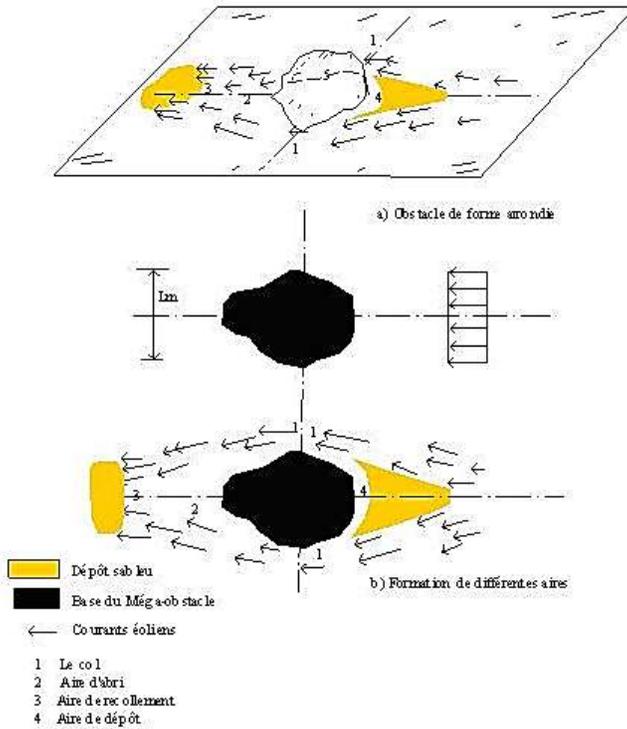


Figure 4 : Schéma sur les aires obtenues sous l'effet d'un méga-obstacle sur la circulation éolienne (Remini et al, 2011)

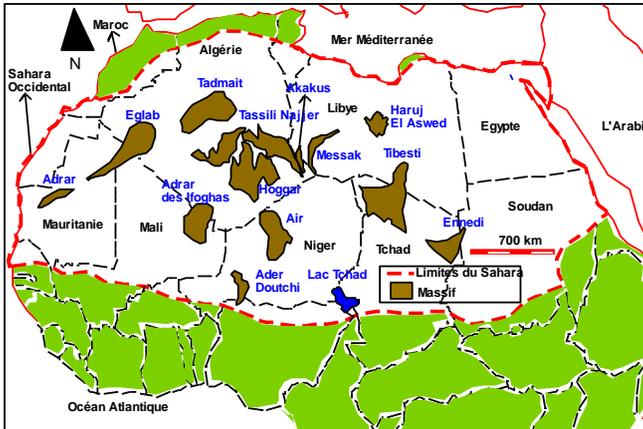


Figure 5 : La disposition des méga-obstacles dans le Sahara (Remini, 2018)



Figure 6 : Une vue sur une partie du massif Hoggar (Photo. Remini, 2006)



Figure 7 : Dunes de sable dans le Grand Erg Occidental (photo. Remini, 2006)



Figure 8 : Dunes de sable dans le Grand Erg Oriental (photo. Remini, 2014)



Figure 9 : Disposition triangulaire des méga-obstacles (@NASA Earth worldview)

Tibesti-Ennedi- Lac Tchad : le triangle de la poussière

La disposition triangulaire des massifs rocheux : Tibesti et Ennedi ainsi que le lac Tchad (Les centres circonscrits forment un triangle isocèle (ABC) est l'endroit dans lequel règne une dynamique éolienne la plus active de la planète (fig.9). Cette disposition particulière et originale engendre une aire au centre du triangle laquelle est soumise à une érosion éolienne très intense qui produit très fréquemment des tempêtes de poussières. L'aire est connue sous le nom de Bodélé dans laquelle se manifestent des vents transporteurs de sable très violents capables de sculpter le sol en crêtes-couloirs.

Cette forme géométrique naturelle que nous l'avons dénommé le triangle de la poussière est composé des deux reliefs topographiques : Tibesti et Ennedi et le lac Tchad pour constituer une seule unité (fig.10). Elle permet à la poussière d'être soulevée dans une première étape et dans une deuxième étape d'être propulsée vers les côtes de l'océan Atlantique. L'originalité de ce triangle réside dans sa base (AB) : un méga-venturi qui, grâce au rétrécissement de la section, le vent s'accélère et soulève la poussière dans l'aire de Bodélé. Une fois atteint le lac Tchad, le flux éolien transporteur de poussière se divise en deux branches qui contournent le lac, lequel joue le rôle d'un obstacle. Les deux courants éoliens déviés prennent un deuxième souffle pour atteindre l'océan Atlantique.

Le même résultat peut être observé pour un écoulement d'un liquide dans le couloir : venturi –obstacle à petite échelle (laboratoire) (fig. 11).

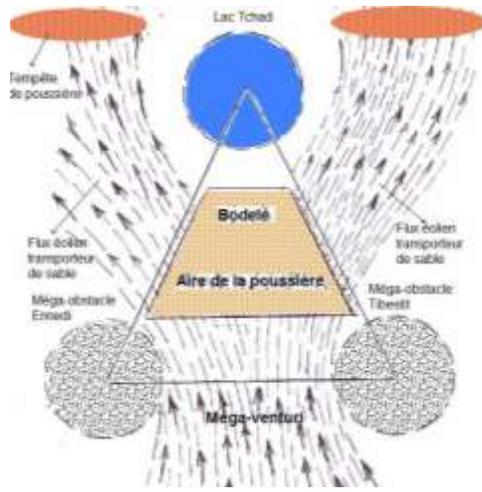


Figure 10 : Tibesti-Ennedi-Lac Tchad : Le triangle de la poussière (Schéma, Remini, 2018)

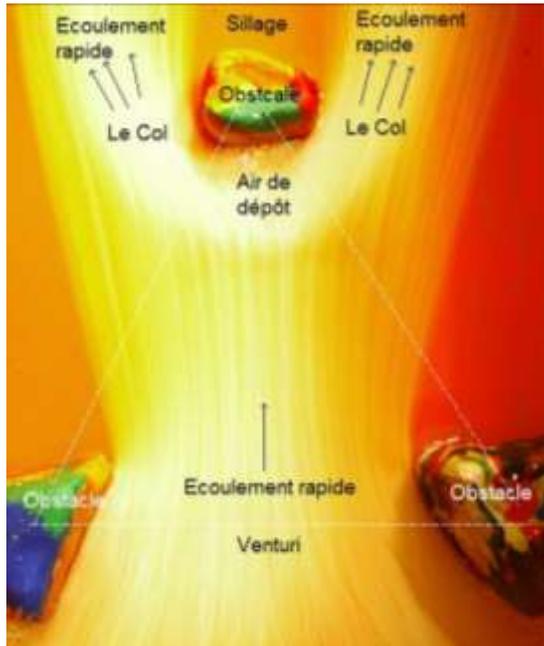


Figure 11 : Ecoulement d'un fluide autour des obstacles disposés en triangle (Photo. Remini, 2018)

La dépression de Bodélé : Un lieu d'exportation de la poussière

C'est confirmé, il y a de l'exportation de la poussière du Sahara vers le continent d'Amérique. Le problème qui reste posé est sans aucun doute celui du soulèvement de la poussière dans l'atmosphère pour atteindre ainsi l'Atlantique. Une telle opération exige une forte énergie qui peut être produite que par des vents très violents. Selon Chenil (1951), les poussières pour être soulevées exigent des vents plus rapides que les sables fins. La vitesse minimale dans un sol prise en charge est celle exigée par les sables fins de 100 micromètres. Le vent de sable qui se manifeste sur un sol argilo-sableux favorise le soulèvement des particules fines (Mainguet et Chemin, 1990). Il semble que l'aire de Bodélé située dans le nord de Tchad est le seul endroit au monde qui possède toutes les conditions pour générer des vents violents. La dépression de Bodélé d'une surface de 22000 km², soit 0.25% de la superficie du Sahara est considéré comme l'endroit le plus poussiéreux de la planète. La dépression de Bodélé est largement considérée comme la plus grande source de minéraux (Washington et al, 2006). L'aire de Bodélé était un ancien lit lacustre qui contient des dépôts d'anciens squelettes de poissons morts depuis plusieurs siècles et qui sont trop chargées en éléments de phosphore (Haug, 2015). En plus, la dépression de Bodélé est le lieu le plus poussiéreux de la planète. Il y a plus de 5000 ans, un méga-lac poissonneux qui ressemble à une mère fermée qui a occupé le Sahara centrale. Aujourd'hui, grâce aux changements climatiques qui ont un effet sur l'évaporation, le plan d'eau de ce grand lac s'est rétréci pour aboutir au lac Tchad actuel. Cette évolution ressemble bien à celle de la mer d'Aral. La dépression de Bodélé, une aire périphérique au lac Tchad, aujourd'hui asséchée est dénudée est devenue une aire hyper aride. Selon Washington et al (2006), la dépression de Bodélé est située dans un milieu dépourvue de toute végétation. Dans ce cas, l'absence d'une macro-rugosité diminue l'effet des frottements et par conséquent elle favorise l'accroissement de la vitesse des vents. La dépression de Bodélé est un endroit très venté dans lequel, des vents très violents soufflent fréquemment. Une situation pareille engendre des tempêtes de poussière assez fréquentes pouvant atteindre la rive de l'océan Atlantique située à 1800 km de la dépression de Bodélé. Comme nous l'avons soulevé au début de cette étude que les conditions pour amorcer des vents violents se trouvent réunis pour obtenir un soulèvement des particules fines. Il s'agit :

- l'existence à l'amont de l'aire de Bodélé, d'un méga-Venturi caractérisé par la disposition des massifs : Tibesti-Ennedi.
- L'existence d'une circulation éolienne autour des méga-obstacles Tibesti et Ennedi

Le tunnel Tibesti-Ennedi : le plus beau Venturi de la planète

Considérée comme le lieu le plus poussiéreux de la planète, la dépression de Bodélé est située dans un endroit propice à la dynamique éolienne et aux soulèvements de la poussière dans l'atmosphère. Ceci est dû à l'existence à l'amont de la dépression de Bodélé d'un méga-Venturi obtenu par la disposition naturelle des massifs volcaniques : Tibesti et Ennedi. Un venturi dans le Sahara ; il est situé dans le territoire du Tchad ; il est formé par la disposition des méga-obstacles : Tibesti et Ennedi. De forme trapézoïdale, le convergent d'une longueur moyenne de 300 km, d'une largeur à l'entrée égale à 700 km et d'une largeur à la sortie (Bombéché) égale à 300 km (fig. 12). Les courants éoliens en provenance du nord contournent le massif de Tibesti pour pénétrer dans le méga-Venturi. Les filets d'air se resserrent à la sortie du venturi en provoquant une dépression et un accroissement de la vitesse (fig. 13).

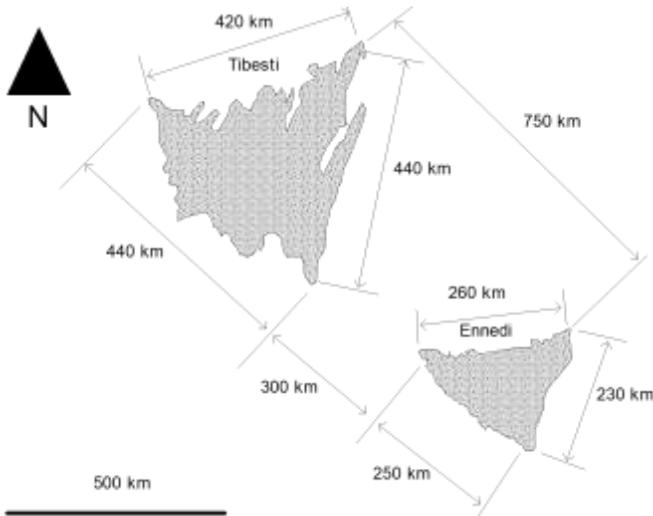


Figure 12 : Dimensions du Méga-Venturi de la planète (Remini, 2001 ; Mainguet et Remini, 2004)

Tibesti-Ennedi-lac Tchad : le triangle de la poussière impact sur la fertilisation de la forêt amazonienne

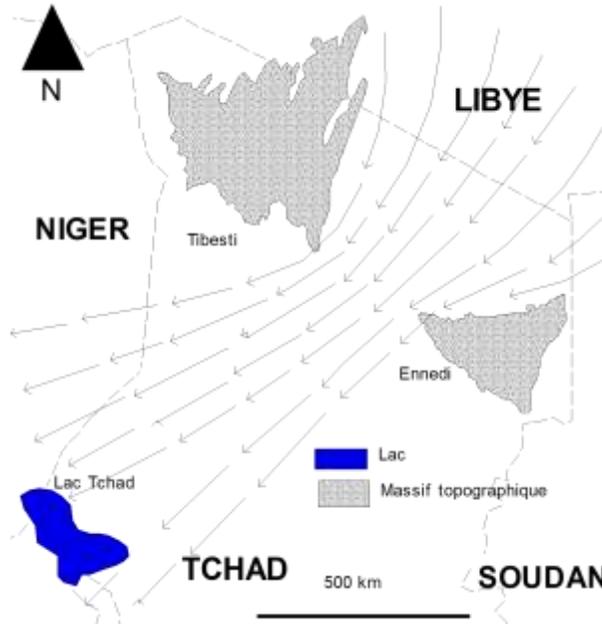


Figure 13 : Schéma du fonctionnement du Méga-Venturi (Remini, 2001 ; Mainguet et Remini, 2004)

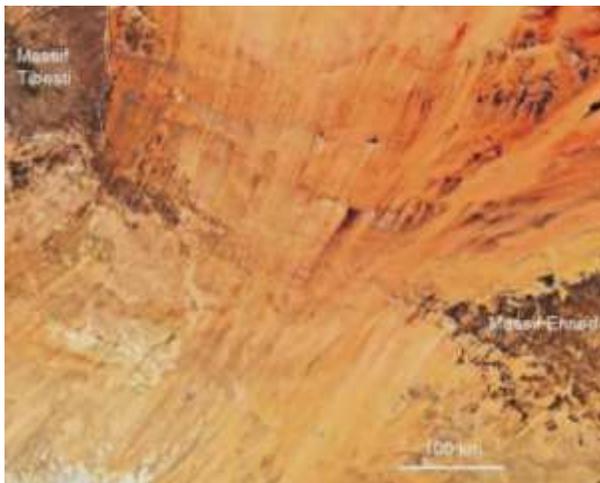


Figure 14 : Effets de la violence des vents transporteurs de sable sur la corrosion au sol (Google Earth)

L'énergie cinétique à la sortie du tunnel est assez importante de telle sorte qu'elle peut facilement provoquer une forte érosion éolienne et par conséquent elle génère des tempêtes de poussières et de soulèvement des particules juste à l'aval (aire de Bodélé). Ce méga-Venturi est situé dans la direction du flux éolien en provenance de la Libye. A la sortie du couloir : Tibesti-Ennedi (Bombéché), la vitesse du vent est très violente ; elle est égale au $\frac{7}{3}$ de la vitesse d'entrée. Des corrasions en crêtes couloirs ont été sculptées sur le sol au niveau des aires de Col par des vents de sable dont les filets d'air resserrés ont une plus grande efficacité érosive (fig. 14). Des mesures de vitesse de vents à la surface du sol à la sortie du Venturi ont donné des valeurs dépassant les 16 m/s (Washington and Todd, 2005).

Au fait, ce sont les deux branches des courants éoliens ; l'une en provenance de la Libye (et qui est déviée au sud du massif de Tibesti) et l'autre, en provenance de l'Egypte (et qui est déviée au nord du massif d'Ennedi) s'engouffrent dans le méga-Venturi : Tibesti-Ennedi. Le flux d'air total est animé d'une vitesse importante dans la région de Bombéché à la sortie du Méga-Venturi. Elle est la conséquence d'une part, de l'effet du Col au sud-est de Tibesti et à l'ouest d'Ennedi et de rétrécissement de la section du méga-Venturi : Tibesti-Ennedi. Les vents transporteurs de sable érodent, sculptent et laissent des corrasions au sol (figure 15).

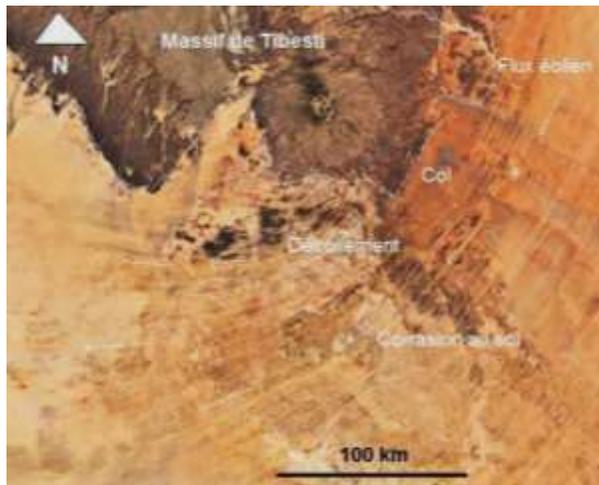


Figure 15 : Corrasion dans l'aire du col ; témoignage de l'agressivité des vents transporteur de sable (Google Earth)

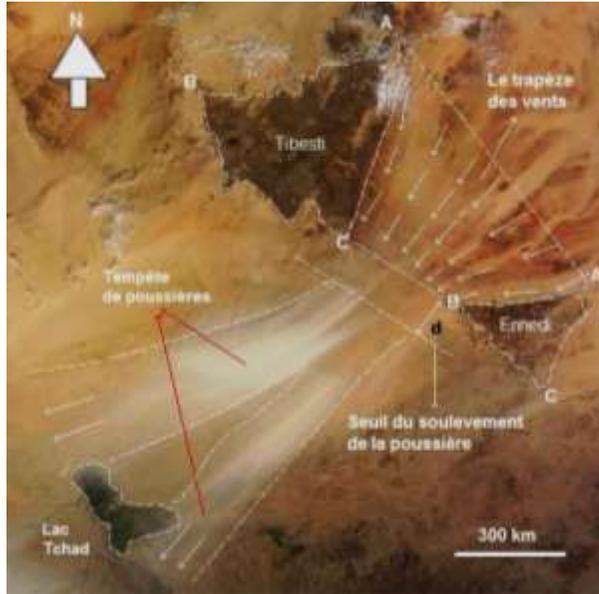


Figure 16 : Le seuil du soulèvement de la poussière dans le triangle de la poussière (@NASA Earth worldview)

A environ 100 km (Région de Largeau) de la sortie du Méga-Venturi (Bombéché), la section du fluide se dilate ; c'est l'aire de décollement et de desserrement des filets d'airs qui correspond au soulèvement de la poussière dans l'atmosphère (fig. 16). C'est le début de l'aire de Bodélé qui est caractérisée d'ailleurs par l'importance de la poussière. Un peu plus loin dans l'axe NE-SO au centre de la dépression de Bodélé à 500 km avant d'atteindre le lac Tchad, le courant éolien transporteur de poussières en provenance du méga-venturi se divise en deux faisceaux éoliens : l'un plus accentué et plus large prend la direction NE-O, l'autre de faible largeur prend la direction NE-S. Les deux branches sont séparées par le lac Tchad (fig. 16).

Sur les images satellites de la NASA dans le secteur de Bodélé prises durant la période : 2001-2017 que nous avons consulté, il s'avère qu'à chaque tempête de poussière qui se manifeste dans le triangle de la poussière, le courant éolien est divisé par le lac Tchad en deux branches de part et d'autre du lac. Il existe un déséquilibre de taille entre les deux branches. La branche NE-O qui provient initialement du flux éolien qui a dévié le massif Tibesti dans la partie sud. A la sortie du Méga-Venturi dans la région de Bambéché, et qui est une aire de Col, située au niveau du contournement autour du relief de Tibesti par le flux NE. La branche des filets d'air NE-SO prend une forme plus large ; sa largeur est

environ égale au $\frac{2}{3}$ de la largeur de la section de sortie dans l'aire de Bombéché (fig. 17). Le courant éolien en provenance du Soudan et de l'Égypte, une fois arrivé à l'extrémité (A) du relief d'Ennedi est partagé en deux branches de part et d'autre du relief topographique d'Ennedi. Une branche est contournée par le massif d'Ennedi en prenant la direction N-O et s'engouffre dans le méga-Venturi. A la sortie de la section (CB) et sous l'effet du Col, le flux éolien prend la direction SO. L'autre branche est déviée par le massif d'Ennedi en prenant la direction NE-SO et contourne le massif au niveau de l'extrémité (C) sous l'effet du Col pour prendre la direction E-O. Cependant, aux alentours de la région sud du massif Ennedi est un substrat saharien plus rugueux à cause de sa couverture végétale qui favorise le dépôt de sable.

Dans ce cas, la tempête de poussière est moins visible dans cette branche. Par contre, la branche des flets d'air empruntant la direction E-O, est assez faible. D'ailleurs sa largeur dans le secteur de Bombeché ne dépasse pas le $\frac{1}{3}$ de la largeur de la sortie (fig. 17). Même la tempête de poussière engendrée par cette branche dans la dépression de Bodélé est moins importante que celle produite dans le côté droit de l'axe Bombeché-Lac Tchad.

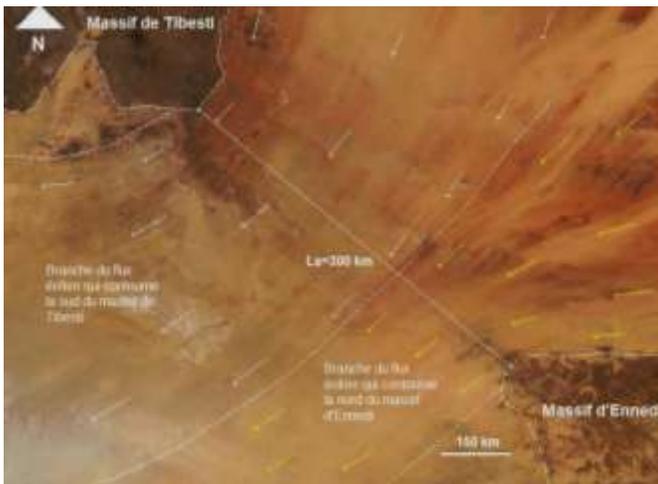


Figure 17 : Les flux contournés par le rétrécissement de la section de la sortie et l'effet des cols des massifs de Tibesti et d'Ennedi (Source : Google Earth)

L'originalité du Méga-Venturi réside dans la violence des vents qui se manifestent à la sortie du convergent. Des vitesses des courants éoliens transporteurs de sable qui laissent des empreintes d'abrasion au sol. Cette violence des vents est le résultat de :

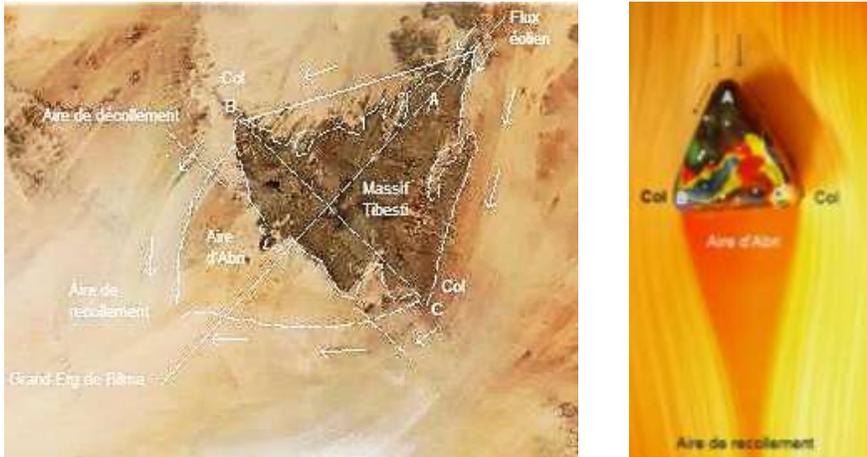
- L'effet du Col engendré par le méga-obstacle de Tibesti
- L'effet du Col engendré par le méga-obstacle d'Ennedi
- L'effet de rétrécissement de section de sortie du Venturi (Bombéché).

Ces trois phénomènes qui agissent simultanément sur le courant éolien en provenance de la Libye et de l'Égypte provoquent le resserrement des filets d'air au niveau du secteur de Bombéché qui se traduit par une chute de pression et un accroissement élevé de la vitesse des vents. Juste après la section de sortie à une distance de 100 km dans la région de Largeau, le décollement et la dilatation des filets d'air provoquent un soulèvement de la poussière dans l'atmosphère. Ces particules solides sont pris en charge par la force des courants éoliens qui vont les transporter jusqu'au lac Tchad sur une distance de plus de 500 km. Ce flux est divisé en deux branches de courants éoliens de part et d'autre du lac Tchad qui joue le rôle d'un relief topographique.

C'est ainsi que cette nouvelle situation donne un nouveau souffle à cette tempête de poussière pour continuer son voyage jusqu'à la côte de l'océan Atlantique sur une distance de 1300 km environ.

Effet du méga-obstacle de Tibesti sur la circulation éolienne et le soulèvement de la poussière

Un autre phénomène qui participe à l'accélération des courants éoliens transporteurs de sables. La forme et la localisation du Tibesti (par rapport à la direction des vents) offre un des meilleurs exemples de la circulation éolienne autour d'un méga-obstacle sur la planète et plus particulièrement dans le Sahara. De par sa forme géométrique triangulaire (équilatérale) d'une superficie de 90 000 km² et sa disposition par rapport aux courants éoliens en provenance de la Libye. En effet, le méga obstacle Tibesti subdivise l'Harmattan en deux branches de part et d'autre de l'obstacle avec le resserrement des filets d'air dans les secteurs de col, ce qui provoque des vents très violents en sculptant des dessins de corrasion en crêtes couloirs. C'est au niveau des aires de décollement que le soulèvement de la poussière se produit. La figure 18 (a et b) montrent bien le soulèvement de la poussière qui se manifeste au niveau des aires de décollement.



a) Effet du massif sur la circulation éolienne autour du Massif Tibesti. Formation des aires de : Col, Abri, Recollement et amont du Massif (@NASA Erath worldview)

b) Ecoulement autour d'un obstacle (photo Remini, 2018)

Figure 18 : Effet d'un écoulement d'un fluide (air et eau) autour d'un obstacle

Les courants éoliens venus de Libye par le NE et le NO du massif se rencontrent au sud-ouest de celui-ci dans l'aire de recollement pour y former l'Erg de Bilma. Durand de Corbiac H. (1958), en utilisant les couvertures photographiques aériennes était le premier a montré le contournement des deux flux éoliens autour du Tibesti (fig. 19).

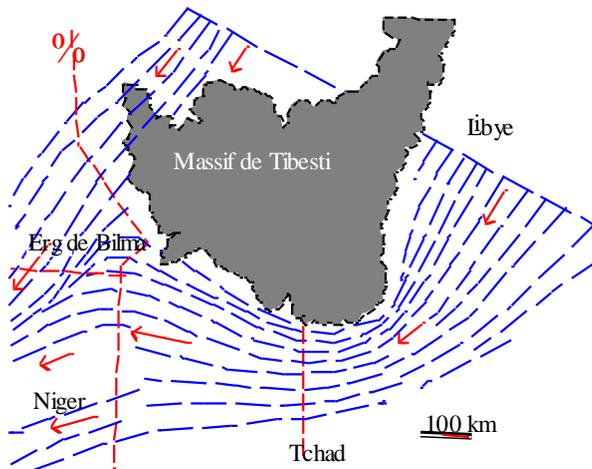
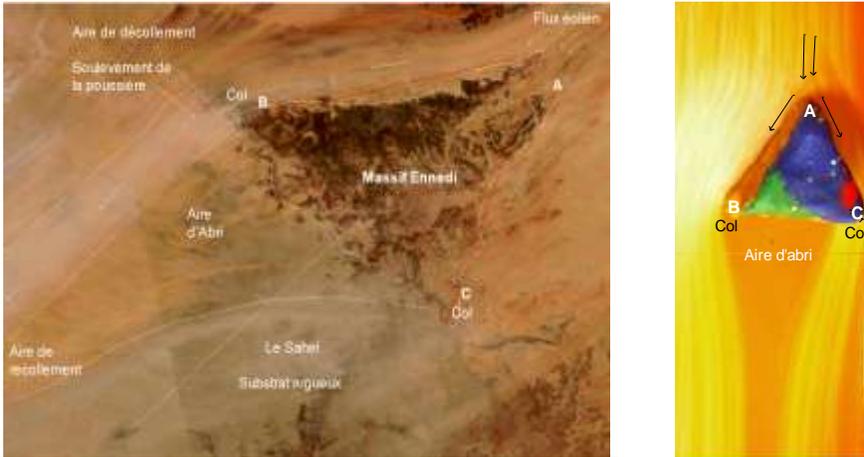


Figure 19 : Croquis d'ensemble du système péri –Tibestien (Durand de Corbiac, 1958)

En 1970, Verstappen et Van Zuidam confirment la déflexion éolienne du vent autour du Tibesti. Mainguet (1972) a apporté des faits nouveaux. Les faisceaux de lignes tracées d'après les axes des barkhanes et les phénomènes de corrasion subissent deux coudes remarquables : l'un, au nord, ou les directions ENE-OSO deviennent presque NS après le contournement de la crête NO du Tibesti, l'autre à l'est, lorsque le vent EO venu de la dépression de Mourdi rencontre celui qui circule autour du massif en direction NE-SO. Ces accidents ne figurent ni sur la carte de Durand De Corbianc (1958) ni sur celle de Verstappen et Van Zuidam (1970).

Effet du méga-obstacle d'Ennedi sur la circulation éolienne et le soulèvement de la poussière

La présence du massif d'Ennedi d'une superficie égale 35000 km² de forme triangulaire (équilatéral), se situe sur un axe des vents transporteur de sable en provenance du nord de Soudan suivant la direction NE-SO, le massif d'Ennedi partage le flux éoliens en deux branches ; une, contourne au nord (AB) du massif d'Ennedi. L'autre est dévié du côté Est du relief topographique (AC). Cette dernière rencontre au niveau de l'aire de décollement (l'endroit de soulèvement des particules) un substrat (le Sahel) plus rugueux à cause de sa couverture végétale steppique qui favorise le dépôt sableux. Une aire très rugueuse réduit plus la vitesse des vents. Donc on assiste à moins de soulèvements des particules et des tempêtes de poussière au sud d'Ennedi. Les tempêtes de sable se manifestent peu dans les aires de décollement du massif d'Ennedi contrairement à celui du massif Tibesti. Le massif de Tibesti est situé dans la ligne du courant éolien NE-SO dont l'extrémité A est en face directe du vent : son aire d'abri est symétrique. Le massif Ennedi se trouve désorientée vers le nord, ce qui engendre une aire d'abri non symétrique. La branche qui emprunte la face nord du massif devient beaucoup plus accentuée ; le soulèvement de la poussière est beaucoup plus net que celle provoquée par la branche sud (fig. 20). L'aire de Col au point (B) est caractérisée par une érosion éolienne beaucoup plus accentuée qui se traduit par des corrasions au sol en crêtes couloirs (fig. 21).



a) Effet du massif Ennedi sur la circulation éolienne. Formation des aires de : Col, Abri, Recollement et amont du Massif (@NASA Earth worldview)

b) Ecoulement autour d'un obstacle (photo Remini, 2018)

Figure 20 : Ecoulement d'un fluide (air et eau) autour d'un obstacle désaxé (Photo. Remini, 2018)

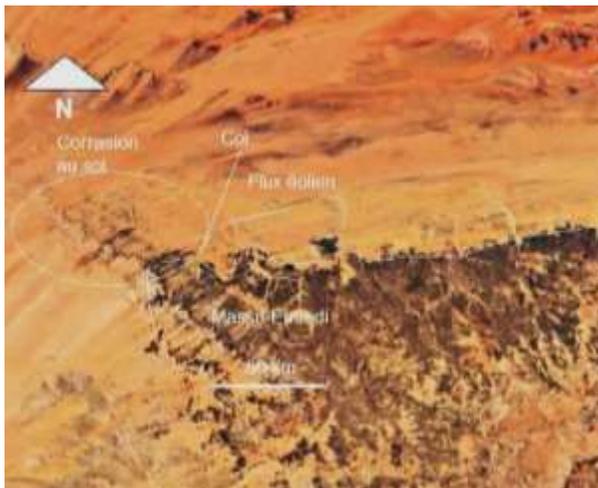


Figure 21 : Corrosion dans l'aire du col (B) du massif Ennedi qui témoigne de l'agressivité des vents transporteur de sable (Google Earth)



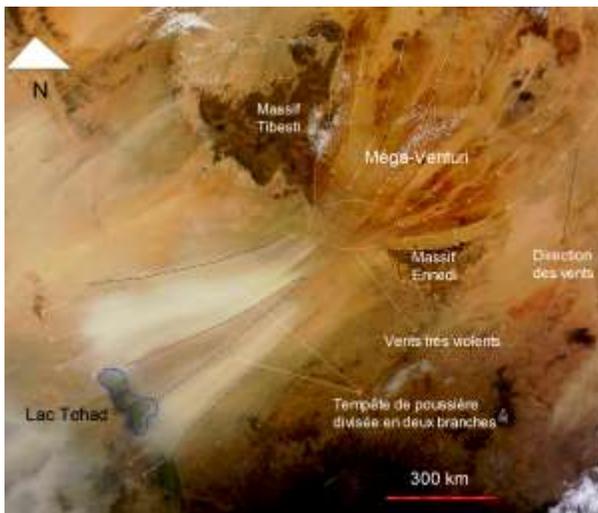
Figure 22 : Une vue aérienne du lac Tchad (Source: Google Earth)

L'effet du lac Tchad sur l'écoulement du flux éolien

D'une superficie ne dépassant pas la valeur de 25000 km² durant les deux derniers siècles (Bader et al. 2011), malgré qu'elle était égale à 340000 km² il y a 6000 ans (Leblanc et al, 2006) ; c'était le méga-lac Tchad qui occupait tout le Sahara central. Aujourd'hui, le lac Tchad est dans une situation préoccupante, puisque sa profondeur moyenne ne dépasse pas les 2m (Bader et al. 2011) et risque encore de diminuer dans les années à venir à cause de la régression des apports et l'évolution de l'évaporation (fig. 22).

L'originalité réside dans le lac qui joue le même rôle qu'un obstacle topographique. C'est-à-dire, l'obstacle creux dans un courant éolien oppose une résistance à l'écoulement, lequel se divise en deux branches de part et d'autre de la dépression. En effet, selon Mainguet et al (1990), le lac Tchad joue le rôle d'obstacle vis-à-vis du vent. Les obstacles en creux agissent ainsi que les obstacles en relief comme des créateurs de rugosité et de turbulence. En plus, Mainguet et al (1990) confirment leur hypothèse que dans la couverture sableuse s'amorce un modèle de chaînes transverses qui expriment l'influence du lac Tchad sur la circulation éolienne. Mainguet et al. (1990) s'interrogent sur l'existence d'une relation entre les directions éoliennes par la canalisation du vent dans l'axe Tibesti-Ennedi et le lac Tchad qui permettrait de définir ce lac comme hydro éolien ? Sur la base des images satellites de la NASA prises dans le secteur de Bodélé durant la période : 2001-2017 que nous avons étudié, environ 100 jours de tempêtes/année en moyenne sont enregistrés dans l'aire de

Bodélé. Le flux éolien une fois atteint l'aire de Bodélé, sera divisé en deux branches bien distinctes ; celle qui prend la droite est beaucoup plus accentuée que celle qui prend la direction gauche (fig. 23(a à c)). Ceci peut être expliqué par l'humidité créée par l'évaporation du plan d'eau du lac qui joue le rôle d'un écran. Ce partage du courant éolien transporteur de poussières est synonyme d'un accroissement de la vitesse du vent au niveau des cols. C'est un deuxième souffle qui a permis au vent de soulever le sable encore plus loin dans l'atmosphère sous forme de tempêtes de poussière afin d'atteindre l'océan Atlantique. Une fois arrivée au littoral ouest du continent Africain, la poussière sera prise en charge par les courants marins.

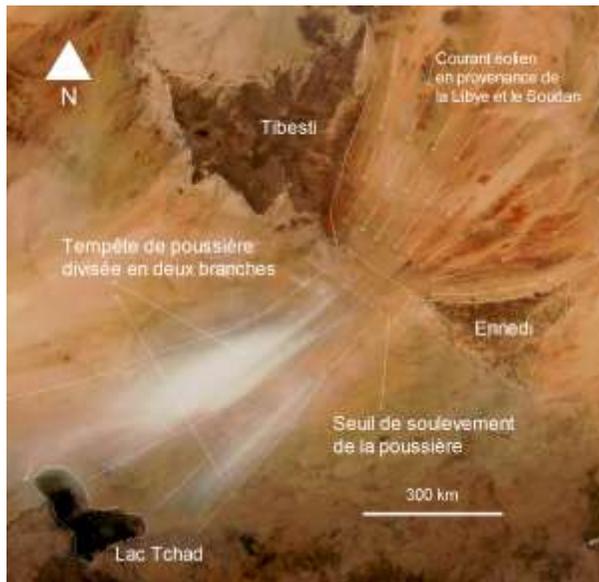


a) 1^{er} Décembre 2015 (@NASA Earth worldview)

Tibesti-Ennedi-lac Tchad : le triangle de la poussière impact sur la fertilisation de la forêt amazonienne



b) 24 décembre 2016 (@NASA Erath worldview)



c) 30 décembre 2017 (@NASA Erath worldview)

Figure 23 : La Tempête de poussière dans la région de Bodélé provoquée le maga venturi (@NASA Erath worldview)

La vitesse d'évaporation (mm/j) est fonction des facteurs de température de l'air, l'insolation, la vitesse et la turbulence du vent (Emsalem, 1970; Remenieras, 1986; Mamou., 1990; Godard et Tabeaud, 1993). Les lacs d'eau (sebkhas et chotts) situés dans des zones arides présentent une forte évaporation puisque l'ensemble des facteurs se trouvent réunis; une température de l'air souvent élevée pendant les saisons sèches, une forte insolation presque continue durant toute l'année et une présence considérable des vents secs (grande vitesse) surtout durant l'automne et le printemps. Selon Bouchrdeau, l'évaporation moyenne annuelle au lac Tchad est 2260 mm (in Remenieras G, 1986). Elle est de 2 à 2,4 m/an selon Touchedeuf de Lussigny (in Fontes -Chi. et al, 1970). Cette forte évaporation crée une humidité au-dessus de la surface d'eau, provoque une baisse de température et donne ainsi une couche d'air humide. La variation de température provoquée par le contact du courant éolien sec (de température élevée) avec la masse d'air frais au-dessus du lac entraîne une variation de densité et par conséquent la formation d'un courant de densité qui sera dévié par cet obstacle fictif (Remini, 2001). Selon Mainguet (1992), le lac Aral possède en été, saison des vents les plus puissants, des températures inférieures à celles des terres environnantes : il est donc surmonté par un coussin de hautes pressions relatives qui constitue l'obstacle responsable de la subdivision des vents en deux branches, obstacle autour duquel les vent subit des changements de vitesse qui sont fonction des changements de pression répondant au théorème de Bernoulli. Mainguet (1992) décrit bien le rôle du lac Aral sur la circulation éolienne. Dans une première approche nous pouvons dire que les tempêtes de sable sont considérées comme des courants de densité, quoique le facteur de pression ($\Delta\rho/\rho_m$) dû à la présence du matériau en suspension puisse n'être qu'un facteur de la force motrice totale. Les aspects physiques présentés par les courants de poussières et les courants de densité dans les réservoirs de barrages se ressemblent (Robert et Knapp, 1951). Pour les tempêtes dues au vent, la turbulence est une fonction de la topographie et de la vitesse et aussi de la stabilité de l'atmosphère.

Le rôle du triangle de la poussière sur la fertilisation de la forêt Amazonienne

Pour atteindre la côte Ouest du continent Africain, il faut avoir une énergie capable de soulever la poussière dans l'atmosphère et de la propulser ensuite avec des vents très violents dans la direction ouest. La vitesse critique de soulèvement est provoquée par le méga-venturi : Tibesti-Ennedi. A la sortie dans l'aire de Bombéché, la vitesse des vents atteint son optimum et avoisine la valeur de 7/3 de la vitesse d'entrée dans le Venturi. Ceci confirme l'hypothèse de Mainguet et Chemin (1990) que selon eux, la vitesse du vent est accrue juste

après avoir franchi le couloir entre Tibesti et Ennedi. C'est dans la section contractée (Région de Largeau) située à environ 100 km de Bombeché que les filets d'air se desserrent et les particules poussiéreuses se décollent (fig. 24.). Située entre Largeau et l'erg Kanem sur une longueur de 450 km, la dépression de Bodélé occupe une superficie de de 22000 km². C'est dans ce secteur que les tempêtes de poussières prennent naissance et le flux éolien se divise en deux branches (fig. 25).

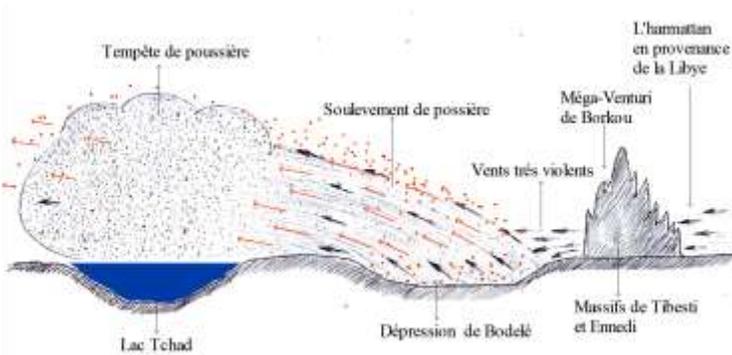


Figure 24 : Schéma synoptique du soulèvement de la poussière dans la dépression de Bodélé (Remini, 2018)

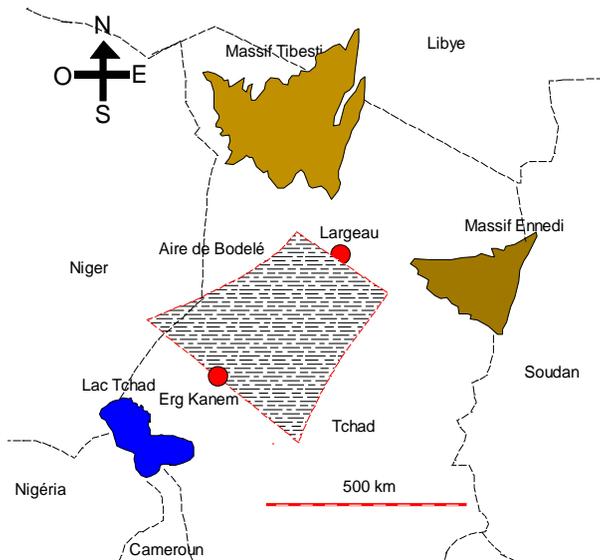


Figure 25 : Limites probables de la dépression de Bodélé (Remini, 2018)

Selon Mainguet et Chemin (1990), la dépression de Bodélé se trouve précisément dans cette aire de divergence. Les deux faisceaux d'air, une fois arrivés aux environs du lac Tchad, contournent la dépression pour amorcer un nouveau souffle afin de permettre ensuite à la tempête de poussière de poursuivre son cheminement jusqu'à la cote ouest de l'Afrique. Mainguet et Chemin (1990) affirment qu'une fois le flux éolien se rapproche du lac Tchad, des paramètres différents apparaissent. C'est un environnement nouveau qui donne au courant éolien une nouvelle dynamique qui se caractérise par des courants transporteurs de poussières capable d'atteindre l'océan Atlantique. Donc les massifs : Tibesti et l'Ennedi et le lac Tchad disposés en forme d'un triangle, sont bien liés entre eux pour former une seule fonction ; l'exportation de la poussière vers et au-delà de l'Océan Atlantique. Dans cette disposition triangulaire, trois phénomènes de mécanique des fluides se trouvent regroupés qui ont des conséquences directes sur la production de la poussière dans l'aire de Bodélé. Il s'agit de :

- l'effet du méga-obstacle de Tibesti sur la circulation éolienne
- l'effet du méga-venturi formé par les massifs : Tibesti et Ennedi sur l'accélération du vent ;
- l'effet du lac Tchad qui joue le rôle d'un obstacle et qui divise le flux éolien en deux branches

L'exportation de la poussière du Sahara vers la forêt Amazonienne a été mise en évidence par la NASA qui a exploité les données collectées par le satellite Calipso pendant la période : 2007-2013. Cependant, Mainguet et Chemin (1990) ont signalés que des vents de poussières appelés « Harmattan Dust » qui démarrent du bassin du Lac Tchad sont repérés sur les images NOAA et traversent d'Est en Ouest l'Afrique de l'Ouest et s'échappent du Sahara vers l'Atlantique jusqu'aux Bermudes et au Brésil. En plus de la poussière qui règne dans l'aire de Bodélé, son sol est très riche en phosphore en provenance des ossements de poissons qui datent de millions d'années. Les vents à la sortie du méga-Venturi soufflent très violemment et sont capable d'éroder le fond de l'aire de Bodélé. Arrachés au sol, les particules phosphoriques sont exportées vers la forêt Amazonienne par les courants éoliens transporteurs de poussières (fig. 26).

A raison de 100 jours de tempêtes de poussière en moyenne par année qui se manifestent dans une région aussi petite que celle de Bodélé d'une superficie égale à 0,2% de la superficie du Sahara, diffuse plus de la moitié de la poussière mondiale au bassin d'Amazone. D'ailleurs, Bodélé est largement considérée comme la plus grande source de minéraux de la planète (Washington et al, 2006) : un transfert annuel de 22000 tonnes de phosphore vers la forêt Amazonienne. La poussière du Bodélé est un fertilisant très chargé en

phosphore, potassium, Calcium et le Magnésium (Chavetnoir, 2015). Avec ce rythme d'exportation de poussière, le fond de la dépression de Bodélé s'érode provoquant ainsi avec le temps un creusement profond au centre de l'aire de Bodélé. La figure 27 (a et b) qui illustre l'axe du couloir Tibesti-Ennedi au lac Tchad montre clairement les effets de l'érosion éolienne sur le sol.

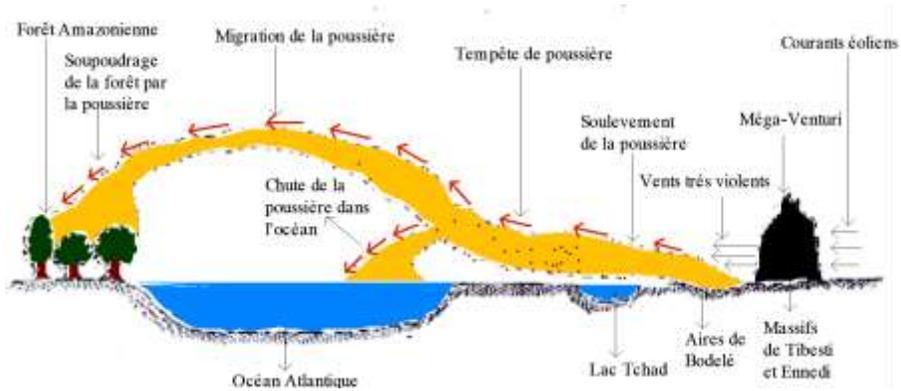
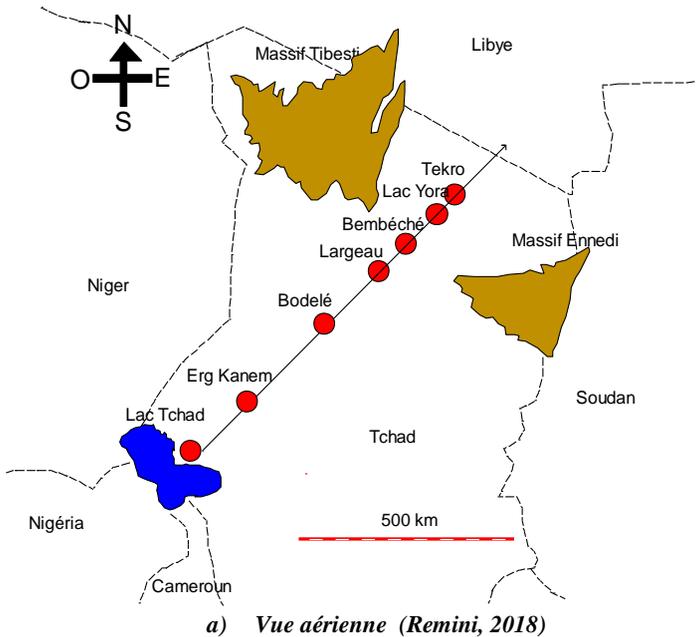
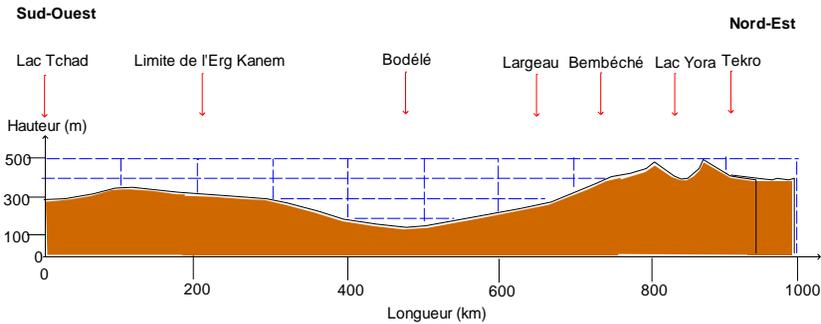


Figure 26 : Schéma synoptique du transfert de la poussière de l'aire de Bodélé à la forêt Amazonienne (Remini, 2018)



a) Vue aérienne (Remini, 2018)



b) Coupe topographique (Mainguet et Chemin, 1990)
Figure 27 : Couloir Tibesti-Ennedi au lac Tchad

En examinant les images satellites de la NASA prises sur le secteur de Bodélé durant la période : 2001-2017, les tempêtes de poussière se manifestent pendant 100 jours/an en moyenne. Le soulèvement de la poussière s'effectue dans l'aire de Largeau à 100 km de Bombéché. Les résultats obtenus par Mainguet et Chemin (1990) confirment bien cette hypothèse. Ce processus d'érosion s'il continue sur la même allure risque d'approfondir encore le creusement de la zone de Bodélé et par conséquent il y'aura même risque d'éroder complètement les squelettes et les ossements des poissons. Avec cette allure, l'extinction du gisement du phosphore aura lieu dans le futur. Dans ce cas, quelle sera les conséquences du manque de fertilisant phosphore pour la croissance de la forêt Amazonienne ? Un autre problème risque d'être posé qui concerne la possibilité de l'assèchement du lac Tchad à court et à moyen terme. Dans une telle situation les tempêtes de sable en provenance de la zone de Bodélé risquent de ne pas atteindre l'océan Atlantique.

Le sable du Sahara fertilise la forêt Amazonienne

Le processus du transfert de la poussière riche en phosphore du Sahara à la forêt Amazonienne est détaillé par la figure 28. La perte par érosion hydrique d'une quantité de 22000 tonnes de phosphore dans le bassin du fleuve d'Amazone est compensée par la poussière riche en phosphore en provenance de l'aire de Bodélé. En effet, la découverte a été faite par la NASA grâce au satellite Calipso qui a suivi le voyage de la poussière du Sahara vers le bassin d'Amazone. Plus de 5000 km, la distance survolée par le sable. Une quantité de sable évaluée à 27.7tonnes chutent dans la forêt Amazonienne sur 182 millions de tonnes de sable qui quittent le Sahara. Une masse de phosphore évaluée à 22000t/an atterrisse sur le bassin de l'Amazone. Une quantité indispensable pour le développement de la forêt Amazonienne.

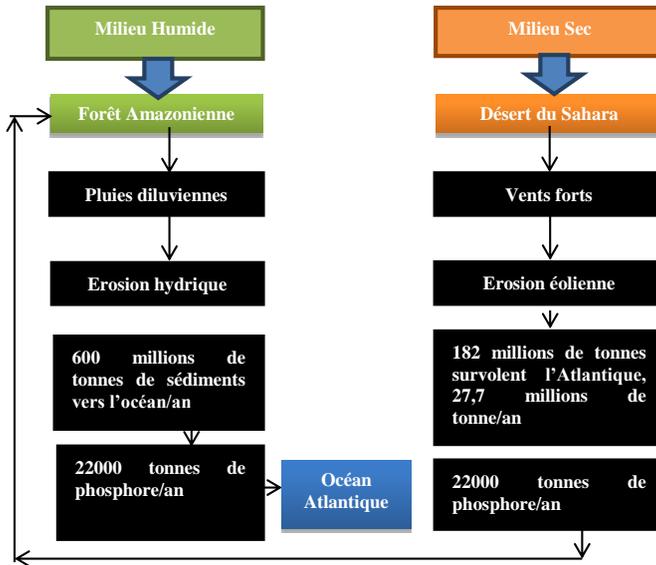
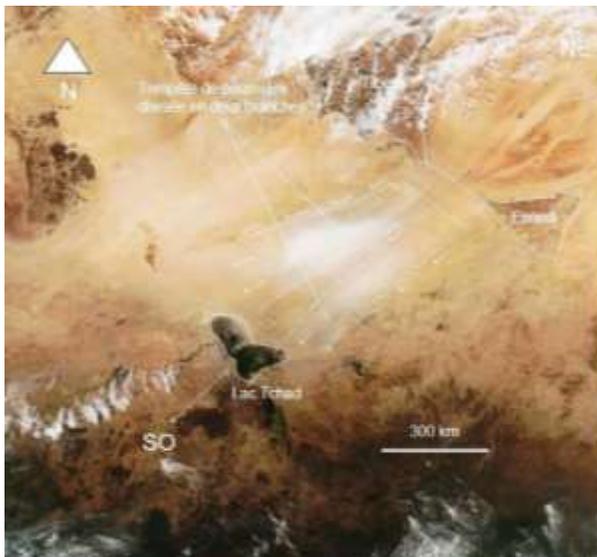


Figure 28 : Processus du transfert du phosphore du Sahara vers la forêt Amazonienne (Remini, 2018)

Trois endroits de diffusion de la poussière dans le Sahara ont été identifiés (Remini, 2017). L'aire de Bodélé est l'endroit qui exporte le plus vers l'Atlantique. Plus de 53% des jours de tempêtes se manifestent dans le triangle de la poussière (Remini, 2017). En examinant les images satellites de la NASA prises sur l'aire de Bodélé durant la période : 2001-2017, on s'aperçoit que les tempêtes de poussière se manifestent dans le triangle de la poussière à raison de 100 jours en moyenne par année. Les mois les plus poussiéreux enregistrés dans l'aire de Bodélé sont les mois d'Octobre, Novembre et Décembre. Par contre, on enregistre une accalmie durant les mois de Juin, Juillet et Aout. Des tempêtes de sable de longue durée dépassant une semaine sans arrêt ont été enregistrées. De telle tempête génèrent des masses de poussières importantes. C'est lors de ces tempêtes que la probabilité d'atteindre le bassin d'Amazone par la poussière est assez élevée. Ces tempêtes exceptionnelles apparaissent durant la saison humide (Octobre, Novembre et Décembre), mais les précipitations risquent d'anéantir ce long voyage de sable. En contrepartie, des tempêtes de sable de faible intensité d'une durée de 24 heures s'amorcent dans l'aire de Bodélé. La poussière soulevée et propulsée dans l'atmosphère, mais au vu de sa concentration, la poussière risque de ne pas atteindre sa destination (la forêt Amazonienne). La poussière se disperse dans l'atmosphère et saupoudre l'océan

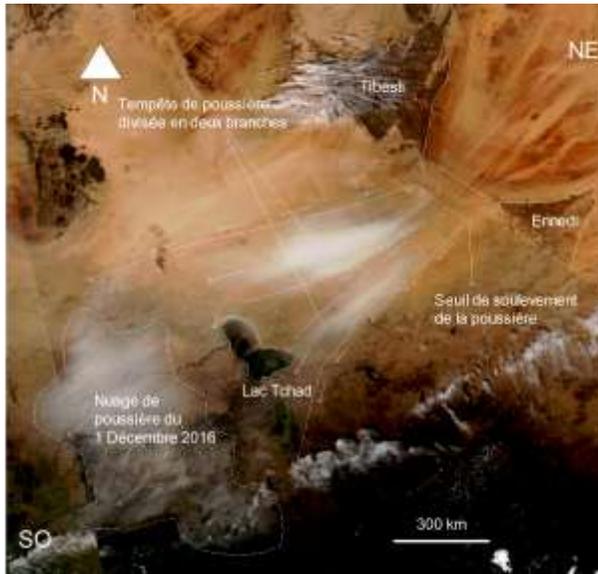
Atlantique. D'autres tempêtes de sable de forte intensité mais de courte durée se manifestent dans l'aire de Bodélé.

Selon plusieurs auteurs, le sable est soulevé sous l'emprise de tempêtes de sable jusque dans la haute atmosphère, puis il est acheminé en Amazonie grâce aux courants éoliens (Hug, 2015). Cette hypothèse confirme bien ce que nous avons mentionné précédemment. Nous avons noté qu'il existe deux phases bien distinctes. La première phase qui correspond au soulèvement de la poussière et se déroule dans le triangle de la poussière. Dans la deuxième phase qui se déroule en dehors du triangle, la poussière, une fois les deux branches contournent le lac Tchad est propulsée dans l'atmosphère sous forme de nuages de poussière pour continuer son cheminement jusqu'à la forêt Amazonienne. Nous avons choisi deux tempêtes de poussière qui se sont déroulé dans le triangle de poussière ((fig. 29(a, b et c.)) et 30(a,b,c et d). Nous constatons que les deux phases de l'évolution de la tempête sont bien visibles sur les images satellites. Au centre du triangle, la poussière est dense est prise des vents très violents. La branche qui se dirige vers l'ouest est beaucoup plus accentué que celle de la direction SO. En se rapprochant du lac Tchad les deux branches s'éloignent l'une de l'autre. Dans la deuxième phase, la poussière des deux branches est propulsée dans la haute atmosphère pour prendre la forme d'un seul nuage de poussière moins dense mais bien éparpillé dans l'espace. La poussière se propage moins vite vers la côte ouest de l'Afrique.

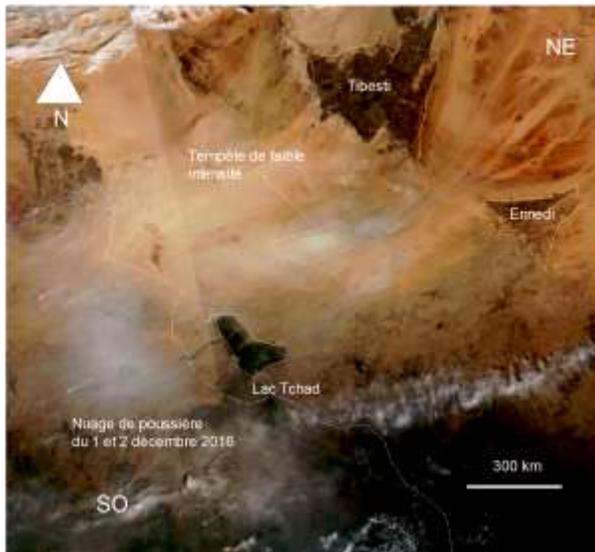


a) 1 Décembre 2016 (@NASA Erath worldview)

Tibesti-Ennedi-lac Tchad : le triangle de la poussière impact sur la fertilisation de la forêt amazonienne



b) 2 Décembre 2016 (@NASA Erath worldview)

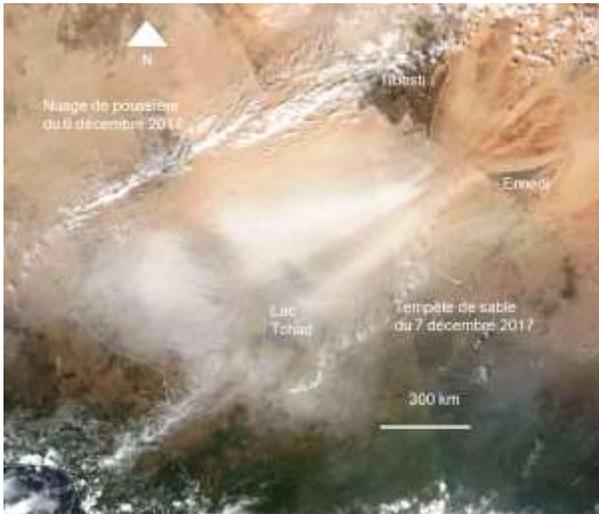


c) 3 Décembre 2016 (@NASA Erath worldview)

Figure 29 : Tempête de poussière du 1 décembre au 3 décembre 2016

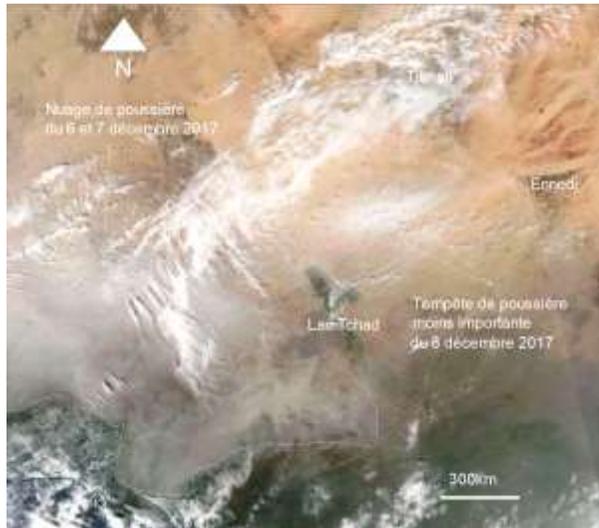


a) 6 Décembre 2017 (@NASA Erath worldview)



b) 7 Décembre 2017 (@NASA Erath worldview)

Tibesti-Ennedi-lac Tchad : le triangle de la poussière impact sur la fertilisation de la forêt amazonienne



c) 08 Décembre 2017 (@NASA Earth worldview)



d) 9 Décembre 2017 (@NASA Earth worldview)

Figure 30 : Tempête de poussière survenue dans l'aire de Bodélé du 6 au 9 décembre 2017

CONCLUSION

Quel miracle, le sable du Sahara après un survol de l'océan Atlantique d'une distance de plus de 5000 km saupoudre la forêt Amazonienne. Mais où et comment s'effectue le soulèvement de la poussière dans l'atmosphère. Une aire aussi petite que celle de Bodélé située dans le nord du Tchad d'une superficie égale à 0,2% de la superficie du Sahara exporte plus de 50% de la poussière du Sahara vers le continent d'Amérique du sud. Située au centre du triangle : Tibesti-Ennedi-Lac Tchad, l'aire de Bodélé est considérée comme l'endroit le plus poussiéreux de la planète. Les conditions naturelles se trouvent réunies pour déclencher l'érosion éolienne et le soulèvement de la poussière. La vitesse critique des vents est obtenue à la sortie du maga-Venturi dans la région de Bombéché. La convergence des filets d'air en provenance de la Libye et du Soudan au niveau de la section de sortie (Bombéché), provoque le resserrement des filets d'air qui se traduit par une chute de pression et une augmentation de la vitesse. Un soulèvement de la poussière dans l'atmosphère qui se trouve entraîné par des courants éoliens puis déviés aux alentours du lac Tchad qui se situe à 700 km de Bombéché. Grâce à ces conditions nouvelles, les vents transporteurs de poussière s'accroissent pour atteindre les côtes Mauritanienues. Les courants marins transportent ensuite ces particules poussiéreuses sur une distance de 5000 km pour atteindre la forêt Amazonienne.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALINE T. (2016). Le Sahara africain nourrit la végétation amazonienne, information de la NASA. Actua Latino. <http://www.actulatio.com>, publié le 30 mars.
- BADER J.C., LEMOALLE J., LEBLANC M. (2011). Modèle hydrologique du Lac Tchad, Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 56, n° 3, pp. 411-425.
- BARTHÉLÉMY P. (2015). L'Amazonie fertilisée par le sable du Sahara. Passeur de sciences. <http://passeurdesciences.blog.lemonde.fr>. Publié le 1er Mars.
- CHAVETNOIR A. (2015). Comment le Sahara fertilise continuellement l'Amazonie. Futura-Sciences, mis en ligne 5 mars, <http://www.maxisciences.com/sahara>
- CHEPIL W.A. (1951). Properties of soil which influence wind erosion. Soil Science, n°72, pp. 387-401.
- CHEVREAU L., LECOMTE E. (2015). Comment le Sahara nourrit l'Amazonie. Sciences et Avenir. Mis à jour le 2 Mars. [www. Sciences et Avenir.fr/nature-environnement](http://www.Sciences-et-Avenir.fr/nature-environnement).

- DURAND DE CORBIAC H. (1958). «Autant en emporte le vent » ou l'érosion et l'accumulation éolienne aux alentours du Tibesti. Bulletin d'information de l'association des Ingénieurs géographes, n°11, juillet, pp. 147-155.
- EMSALEM R. (1970). Climatologie générale, tome I, Fondements des équilibres atmosphériques, Editions SNED Alger, 215 p.
- FONTES J.Ch., MAGLIONE G., ROCHE M.A. (1970). Eléments d'hydrologie isotopique dans le bassin du lac Tchad. International atomic energy, Vienna, Proceeding, pp. 209-219.
- GODARD A., TABEAUD M. (1993). Les climats- mécanismes et répartition. Editions Armond Colin-Paris, 168 p.
- GREY E. (2015). NASA : le sable du Sahara fertilise la forêt Amazonienne. Ecologie. Ma. <https://ecologie.ma>, publié le 28 février.
- HAUG A. (2015). Comment le sable du Sahara fertilise la forêt Amazonienne. Publié le 27 février. www.futura-sciences.com
- KOREN I, KAUFMAN YJ., WASHINGTON R., TODD MC, RUDICH Y., VANDERLEI M., ROSENFELD D. (2006). The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest. Environmental research letters, doi:10.1088/1748-9326/1/1/014005
- LEBLANC M., FAVREAU G., MALEY J. (2006). Reconstruction of Megalake Chad using february 2000 shuttle radar topographic mission data. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 23, n° 9, pp.16-27.
- MAINGUET M., REMINI B. (2004). Le rôle des méga-obstacles dans la formation et le façonnement des ergs : Quelques exemples du Sahara. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 03, Juin, pp.13-23.
- MAINGUET M., CHEMIN M. CH., BORDE J.M. (1983). Etude du rôle des obstacles topographiques dans la circulation éolienne d'après les images satellites et les photographies aériennes, de l'échelle continentale à celle de la butte témoin. Méditerranée Télédétection, n°3, pp. 11-19.
- MAINGUET M. (1984). Sédimentation éolienne au Sahara et sur ses marges. Travaux de l'institut de Géographie de Reims, n°59-60, pp. 15-27.
- MAINGUET M. (1992). Un échange du drame de l'Aral. Revue Sécheresse. Vol. 3, n° 3, Septembre, pp. 141-143.
- MAINGUET M., CHEMIN M. Ch. (1990). Le massif du Tibesti dans le système éolien du Sahara. Réflexion sur la genèse du lac Tchad. Berliner Geographische Studien, n° 30, pp. 261-276.
- MAMOU A. (1990). Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du sud Tunisien. Thèse de doctorat d'état es sciences, université de Paris -sud, centre d'Orsay, juin, 426 p.

- NDOUNÉ, (2014). Tchad : La dépression de Bodélé dans le BET, joue dans l'équilibre de l'écosystème mondial. Le site Ndouné. Toute l'actualité en temps réel. Publié le 9 Mars, <http://ndjamena-matin.over-blog.com>
- REMINI B. (2001). Méga-obstacles; leur influence sur la dynamique éolienne et l'ensablement des espaces oasiens. Thèse de Doctorat en Géographie. Université de Reims Champagne – Ardenne, 188 p.
- REMINI B. (2017). Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ? Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°31, Sept, pp. 259-295.
- REMINI B., MAINGUET M., DUMAY F. (2011). Impact of the parameters of a morphological and morphometric of mega-obstacle on the field shelter. *Geographia Technica*, n° 1, pp. 48- 56.
- REMENIERAS G. (1986). L'hydrologie de l'ingénieur. Editions Eyrolles, 451 p.
- SOUTO. E. (2014). Sable et poussières : le Sahara nourrit l'Amazonie. ConsoGlobe. [www.consoglobe](http://www.consoglobe.com). Publié le 24 novembre.
- WASHINGTON R., TODD M.C (2005). Atmospheric controls on mineral dust emission from the Bodélé depression Chad: the role of the low level jet. *Geophysical Research letters*, vol. 32, L17701, doi :101029/2005 GL 023597
- WASHINGTON R., TODD M.C., ENGRSTAEDTER S., MABAINAGEL S., MITCHELL F. (2006). Dust and the low-level circulation over the Bodélé depression, Chad: observations from BoDEx. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, D03201, doi: 101029/2005JD006502.
- TIMBERT A. (2016). Le Sahara Africain nourrit la végétation Amazonienne, information de la NASA. *Actu Latino*, mis à jour le 30 Mars. www.actulatio.com.
- TREMBLAY M. (2008). La dépression de Bodélé. *Hors des lieux communs*. Publié le 7 mars. https://ptaff.ca/blogue/2008/03/07la-depression_de_Bodl/.
- VERSTAPPEN H. Th., VAN ZUIDAM R.A., (1970). Orbital photography and the geosciences. A Geomorphological Example from the central Sahara, *Geoforum* n°2, pp.33-47.