



QUAND DEUX ECOSYSTEMES OPPOSES : HUMIDE ET SEC SE LIENT PAR LE PHENOMENE D'EROSION ? CAS DU DESERT DU SAHARA ET DE LA FORET AMAZONIENNE

WHEN TWO OPPOSING ECOSYSTEM WET AND DRY BIND BY EROSION PHENOMENON? CASE OF THE SAHARA DESERT AND THE AMAZON FOREST

REMINI BOUALEM

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

reminib@yahoo.fr

RESUME

Il existe une relation entre deux écosystèmes opposés ; l'un humide et l'autre sec. Le désert de Sahara et la forêt Amazonienne. La quantité en phosphore perdue par érosion hydrique est récupérée par érosion éolienne. Sur la base des images satellites, trois zones d'exportation de poussières ont été identifiées. L'aire de Bodélé (Tchad) ; une zone de forte érosion éolienne générée par le méga-venturi de Borkou. Les aires de cols formées sous l'effet du contournement de l'ensemble des méga-obstacles : Hoggar-Tassili-Messak (Algérie) par les flux éoliens en provenance de la Libye. Sous l'effet du massif de l'Aïr (Niger), deux aires de cols se forment de part et d'autre du méga-obstacle par la subdivision en deux branches des courants éoliens en provenance de la Libye. Le Sahara exporte le déficit en phosphore par des nuages de poussières qui survolent l'Atlantique pour atteindre la forêt Amazonienne.

Mots clés : Ecosystème – Forêt Amazonienne- Sahara- Erosion Eolienne – Erosion hydrique- Poussière – Méga-Venturi – Col.

ABSTRACT

There is a relationship between two opposing ecosystems: one wet and the other dry: the Sahara desert and the Amazonian forest. The amount of phosphorus lost by water erosion is recovered by wind erosion. Based on the satellite images, three dust export zones were identified. The area of Bodélé (Chad); an area of strong wind erosion generated by the great Venturi of Bourkou. The areas of collar formed by the bypass of mega-obstacles: Hoggar-Tassili (Algeria) by the aeolian flows coming from Libya. Under the effect of the Aïr (Niger) massif, two cervical areas form on either side of the mega-obstacle by the subdivision into two branches of the Aeolian currents coming from Libya. The Sahara exports the phosphorus deficit by clouds of dust flying over the Atlantic to reach the Amazonian forest.

Key words: Ecosystem - Amazonian forest - Sahara - Wind Erosion - Water erosion - Dust - Mega-Venturi - Col.

INTRODUCTION

Deux vastes régions complètement opposées ; l'une hyper aride et l'autre humide. Le désert du Sahara d'une superficie égale à 8,5 millions de km² est situé dans le nord du continent Africain. Il est connu par son climat hyper aride. L'autre région, la forêt équatoriale d'Amazonie d'une superficie égale à 5,5 millions de km² possède un climat humide est située dans le sud du continent Américain. Ces deux écosystèmes différents n'ont pas encore divulgués tous leurs secrets. Que ce soit la forêt d'Amazonie ou le désert du Sahara, plusieurs questions scientifiques n'ont pas encore trouvé de réponse. D'une superficie égale à 5,5 millions de km², la région verte (caractéristique de la couleur de l'arbre) est considérée comme la plus grande forêt équatoriale de la planète est une région bien arrosée ; la pluviométrie moyenne annuelle dépasse les 2000 mm/an. Contrairement à l'aire jaune (caractéristique de la couleur du sable) dont la pluviométrie annuelle n'excède pas les 100 mm/an qui représente la région la plus poussiéreuse de la planète. Cependant, la forêt Amazonienne enregistre annuellement un manque de 22000 tonnes de phosphore perdu par érosion hydrique ; un nutriment indispensable à son développement. Incroyable mais vrai, ce déficit en phosphore est compensé par un apport estimé à 0.08% de la quantité de poussière transportée depuis le Sahara vers le bassin d'Amazonie. Or il se trouve que cette quantité d'engrais existe bel et bien dans les 27.7 millions de tonnes de poussières qui survolent l'océan Atlantique

en partant du désert de Sahara vers la forêt Amazonienne (Aline, 2016 ; Grey, 2015). Le déficit annuel en phosphore est assuré par cette connexion entre les deux écosystèmes. Aujourd'hui, les scientifiques évaluent la quantité du fertilisant phosphore en provenance du Sahara centrale à 22000 tonnes/an (Aline, 2016 ; Grey, 2015 ; Souto, 2014 ; Barthélémy, 2015). Cependant, le mécanisme du transport des particules entre les deux continents reste encore méconnu. Certains auteurs affirment que plus de la moitié des poussières qui font le voyage proviennent de la région de Bodélé située dans le désert Tchadien. D'autres estiment que la dépression du Bodélé est le lieu qui produit le plus de poussières au monde. Il est intéressant à signaler qu'une petite région comme le Bodélé alimente une aussi grande surface comme celle de l'Amazonie en nutriment, soit 200 fois plus grande (Souto, 2014). La présente étude essaye d'apporter de nouveaux éléments sur les lieux et le mécanisme d'exportation de poussières du Sahara vers la forêt Amazonienne.

REGIONS D'ETUDES

Deux régions complètement opposées ; l'une hyper aride et l'autre humide sont séparées par l'océan Atlantique d'une distance de 4500 km, mais paradoxalement, elles sont liées par un fertilisant ; le phosphore. Située dans la région d'Amazonie dans le continent d'Amérique du sud, la forêt équatoriale Amazonienne ; une forêt très dense qui s'étend sur une superficie de 5,5 millions de km². Elle est considérée comme la plus grande forêt de la planète et s'étend sur 9 pays. Il s'agit du Brésil, le Pérou, la Colombie, l'Equateur, la Venezuela, la Suriname, le Guyana, la Bolivie et la Guyane (Département de la France) (fig. 1).

Considéré comme le plus beau et le plus vaste 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'Egypte et le Sahara Occidental. L'aire du Sahara est occupée par les ergs, les plateaux, les Regs, le Hamadas, les oueds, les massifs rocheux et les sebkhas (fig. 2).

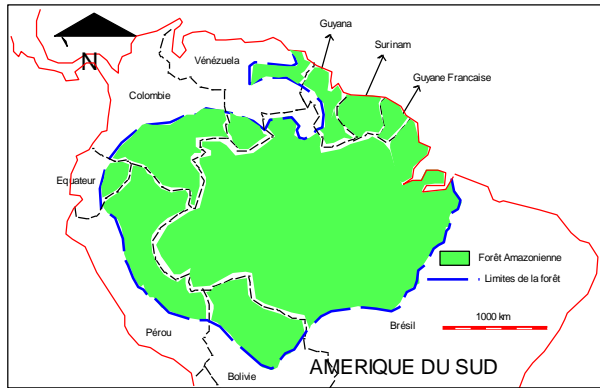


Figure 1 : Situation géographique de la forêt Amazonienne

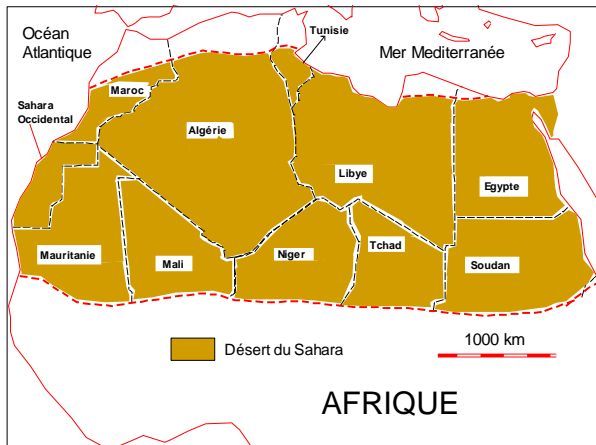


Figure 2 : Situation géographique du désert de Sahara

RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'érosion : la cause principale de la connexion Sahara –Forêt Amazonienne

Deux écosystèmes extrêmement opposés, l'un humide et l'autre hyper aride situés de part et d'autre de l'océan Atlantique (sur une distance de 4500 km) sont reliés par le fertilisant phosphore. C'est le phénomène d'érosion qui maintient et entretient cette relation. En effet, ce qui se perd par érosion hydrique se gagne par érosion éolienne. Dans la forêt équatoriale d'Amazonie

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

située dans le sud d'Amérique, une masse de phosphore est entraînée vers l'océan Atlantique par le ruissèlement intense. Les pluies diluviennes qui s'abattent sur la région provoquent une érosion des sols drainant ainsi des particules fines (dont une partie de phosphore) dans les rivières pour atteindre ensuite l'océan Atlantique. Cependant, la même quantité de phosphore est attirée sur le sol d'Amazonie en provenance du désert de Sahara située sur le nord de l'Afrique par des vents sous l'effet de l'érosion éolienne (fig. 3 et 4). Il se trouve que ces particules de phosphore érodées sont piégées au fond de l'océan Atlantique et celles qui viennent par érosion éolienne sont d'origine du fond d'une ancienne mer.

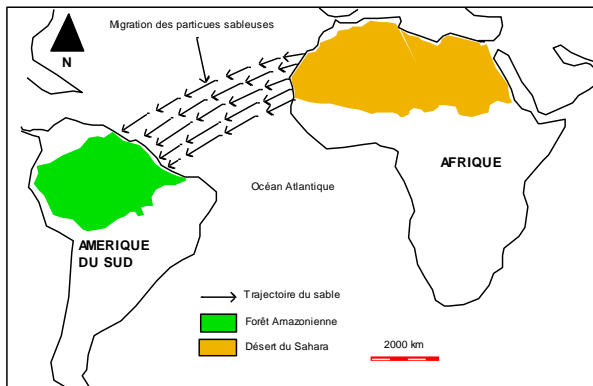


Figure 3 : Schéma probable de la trajectoire de la poussière Saharienne vers la forêt Amazonienne (Schéma Remini, 2017)

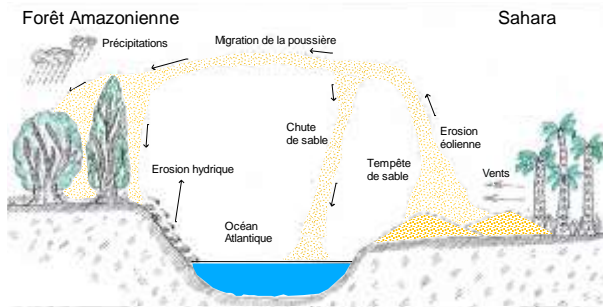


Figure 4 : Schéma synoptique de l'exportation de la poussière Saharienne vers la forêt Amazonienne (Schéma Remini, 2017).

Les aires de forte érosion éolienne

Dans un milieu aride et hyper aride, trois aires se dégagent : source (déflation et érosion), transport et d'accumulation de sable. Le vent est le principal agent transporteur de sable. C'est la valeur de sa vitesse qui définit le type d'aire. C'est ainsi que les obstacles, quelles que soient leur taille, leur forme et leurs natures (arbres, pentes, reliefs, massifs) introduisent une rugosité qui provoque une augmentation de la perte de charge et par conséquent une réduction de la vitesse du vent. Une aire qui se caractérise par une vitesse modérée du vent favorise le dépôt sableux et la formation des ergs ; c'est une aire d'accumulation. Une aire qui se caractérise par des vents violents est une aire de déflation et d'érosion.

Les aires d'érosion engendrées par l'effet d'obstacle sur l'écoulement d'un fluide

La présence d'un obstacle dans la direction d'un écoulement de fluide (aire ou eau) perturbe le sens et la vitesse de cet écoulement. L'effet de l'obstacle sur le fluide donne « naissance » à des convergences et à des divergences. Cinq secteurs peuvent être différenciés par le comportement dynamique du fluide (fig.5) :

- Au point A appelé point d'arrêt ; l'aire amont de l'obstacle, la pression est maximale et la vitesse est faible ou nulle. Pour le cas d'une circulation éolienne, cette aire est le siège d'un dépôt sableux.
- De A en B, selon le théorème de Bernoulli, sur le filet fluide de ABC, la pression décroît, la vitesse augmente et les filets du fluide se resserrent, c'est l'aire du col. C'est une aire d'érosion et de transport, où la corrosion éolienne peut être active.
- Au-delà du point B, la pression augmente de nouveau et il en résulte une brusque diminution de la vitesse, les filets du fluide s'écartent de l'obstacle; c'est l'aire de décollement.
- Le point D appelé point de décollement au-delà duquel, la vitesse le long de la paroi est en sens contraire de l'écoulement. Les points de décollements forment sur la surface de la paroi une ligne de décollement. A partir du point D, la couche limite se détache de la paroi en formant un sillage tourbillonnaire (E). Cette aire ne comporte pas un dépôt qu'à la limite externe de l'aire de sillage.
- A l'aval de l'aire du sillage, se situe le point de recollement (F) qui constitue l'amorce de l'aire de dépôt potentiellement maximum. L'aire

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

de recollement est riche en dépôt sableux, les vents de sable après avoir été déviés par les obstacles y retrouvent leur direction initiale.

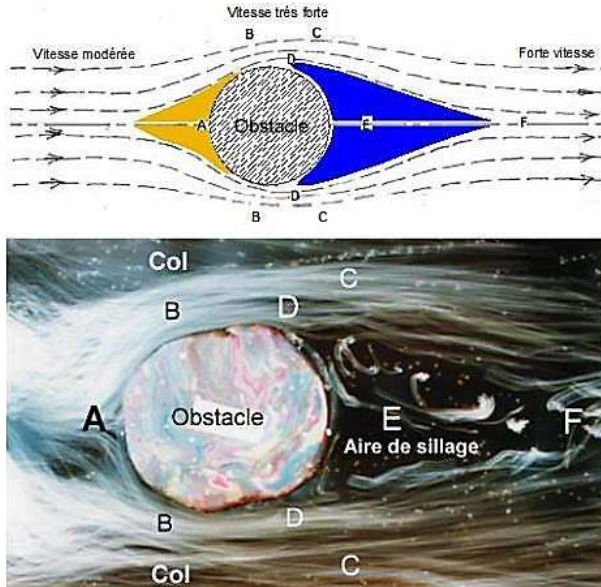


Figure 5 : Schéma d'un écoulement de fluide autour d'un obstacle (Photo. Remini, 2008)

Les aires d'érosion obtenues par l'effet Venturi sur l'écoulement d'un fluide

Pour obtenir un jet d'eau, on réduit la section de sortie du tuyau et la vitesse de l'écoulement d'eau augmente : c'est l'effet Venturi. Si la section d'un tube dans lequel s'écoule un fluide (liquide ou gaz) diminue, l'écoulement du fluide doit augmenter de vitesse pour garder le même débit. Dans ce cas, la pression diminue de sa valeur au niveau de la section contractée. Les filets fluide se resserrent au niveau de la petite section (section contractée) sous l'effet du convergent. Arrivée au niveau de la section contractée, les filets d'air se resserrent, la pression diminue et la vitesse du vent augmente. A la sortie de la dépression, le passage s'élargit, le flux se détend, la vitesse diminue et la pression augmente (fig. 6)

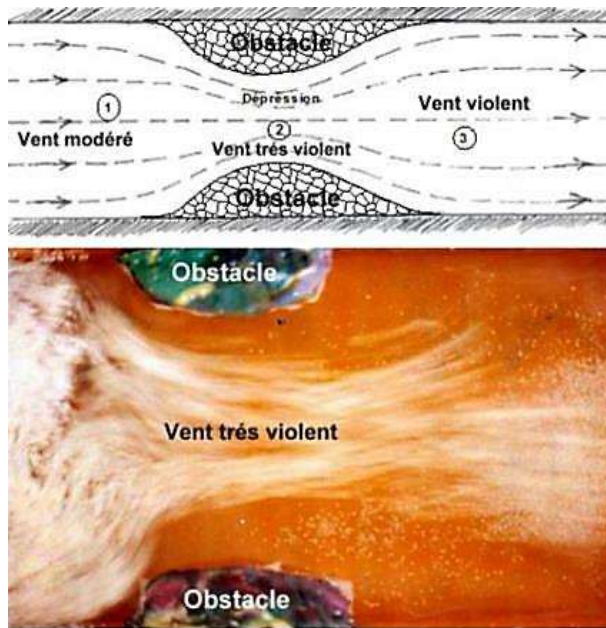


Figure 6 : Effet Venturi sur l'écoulement d'un fluide (Photo. Remini, 2008)

La particularité du désert de Sahara : Une aire de diffusion de poussière

Le Sahara est le plus grand désert chaud de la planète. Il règne une dynamique éolienne très particulière. En plus des vents violents, les ergs les plus remarquables du Sahara sont : Le Grand erg Occidental, le Grand erg Oriental, le Grand erg de Fachi Bilma, l'erg Essaouane, l'erg Iguidi, l'erg Echech, l'erg Erraoui, l'erg Rebiana, l'erg Bilma, la grande mer de sable, l'erg Eddahan Ubari, l'erg Mourzouk et l'erg Ouarane. Les ergs sont des endroits d'atterrissage et de ralentissement de sables et de poussières qui ont subi le long des grands courants éoliens des phénomènes de saltation ou de planation (Mainguet, 1975 ; Mainguet et al, 2004 ; Remini et al, 2004).

Parmi les grands reliefs topographiques les plus remarquables, on peut citer, Hoggar –Tassili Najjer, Tibesti, Ennedi, Eglab, Messak, le plateau d'Adrar, Adrar Ifogas, Ader Douchi, l'Aïr, Al Harruch Al Asswad et le plateau de Tadmaït (fig. 7).

La disposition et la localisation des méga-obstacles dans les quatre coins du Sahara est très favorable à la dynamique éolienne, au façonnement des ergs et au soulèvement des poussières et de sable. La circulation éolienne autour de

reliefs topographique génère des aires de dépôt de sable, des aires de transport, des aires sans sable (aires d'abri), des aires de forte érosion et de déflation. Les régions de forte érosion sont caractérisées par des vents violents. C'est au niveau des aires de cols et des Venturi qu'on enregistre des vitesses de vents les plus élevées. En effet, le départ des particules sableuses et le soulèvement de poussières se manifestent dans les aires des cols des massifs : les Eglab (Algérie), l'Air (Niger), le Hoggar –Tassili N'Ajjer (Algérie). La région de Bodélé (Tchad) reste la région la plus productrice de la poussière du Sahara à cause du méga-venturi situé à l'amont de l'aire de Bodélé qui produit des vents violents et érosifs.

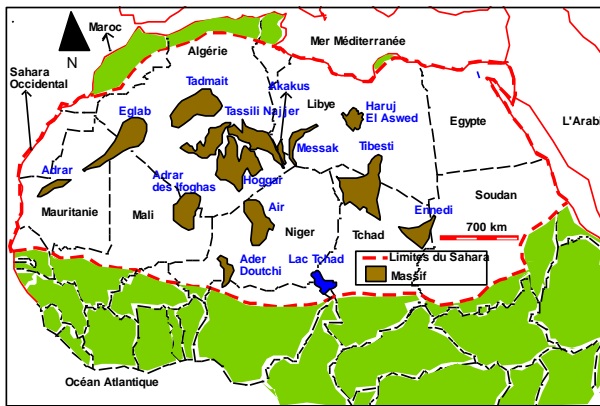


Figure 7 : Répartition des Méga-obstacles dans le Sahara (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

Le rôle de l'ensemble des obstacles topographiques majeurs : Hoggar-Tassili N'Ajjer-Messak sur la circulation éolienne et la genèse des tempêtes de poussière.

Mainguet M. (1983), a synthétisé les effets aérodynamiques sur l'ensemble Tassili-Hoggar, en utilisant l'image satellitaire prise par le satellite Landsat (mars 1973). Les effets de cols de l'obstacle sont illustrés par les traces au sol de la saltation qui s'expriment par des stries de déflation et de corrasion de direction ENE-OSO, entre le Tassili et le Tanezrouft et, au sud du Hoggar, d'abord E-O puis SE-NO ; le budget sédimentaire y est négatif. Le dépôt sableux à l'amont des massifs Tassili- Hoggar ainsi que les traces au sol de la saltation témoignant du contournement des courants éoliens par l'obstacle dans l'aire du col. Fort d'une superficie de 203 350km² et d'une altitude moyenne de 1800m (Mainguet et al, 1983), l'ensemble du massif Tassili-Hoggar est classé comme le plus grand obstacle topographique du Sahara (fig. 8). L'aire d'abri est d'une

superficie de 300000 km² est formée par le recollement des deux branches de courant éolien (Mainguet et al., 1983).



Figure 8 : Vue d'une partie du massif de Hoggar (photo. Remini B., 2006)

Cependant, les flux éoliens transporteurs de sable en provenance de la Libye suivant la direction NE-SO est divisée par le méga-obstacle en deux branches. Arrivés au niveau des aires de col, les filets d'air se resserrent, la pression diminue et la vitesse des vents augmente (fig. 9).

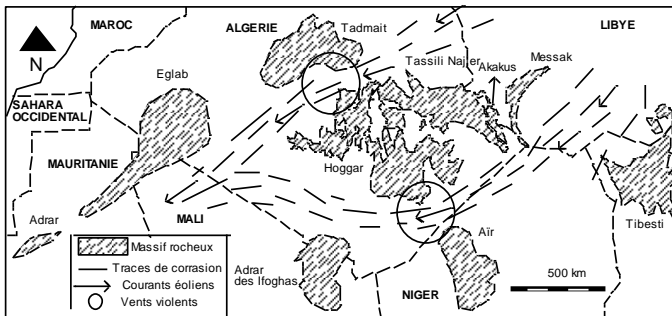


Figure 9 : Traces au sol de la saltation témoignant du contournement des courants éoliens par l'ensemble Hoggar- Tassili – Messak (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

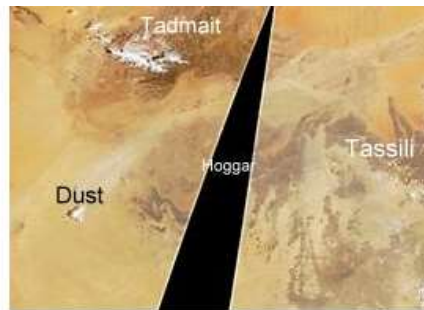
En plus de l'importance de la rugosité qui règne dans ces aires, créant ainsi une forte turbulence de l'air. Les deux paramètres : la puissance des vents et la turbulence favorisent le soulèvement des particules solides dans le ciel sous forme de nuages ou de tempête de poussières. La figure (fig. 10 (a, b, c, d, e, f, g, h, i et j)) montre l'apparition des tempêtes de sable au niveau des aires de cols. L'importance de la vitesse des vents et par conséquent le soulèvement de la poussière dans le nord et le sud de l'ensemble : Hoggar-Tassili N'Ajjer –

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

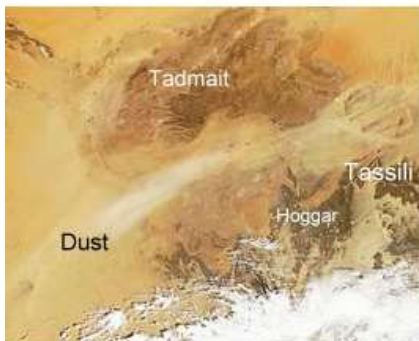
Messak n'est pas seulement le fruit de l'effet du col de l'obstacle. Les reliefs topographiques limitrophes ont un effet de venturi. C'est ainsi que la disposition des obstacles : Hoggar-Tassili et le plateau de Tadmait forme un venturi au nord du massif. La distance de rapprochement entre les deux obstacles avoisine les 150 km. Au sud, les reliefs topographiques du Hoggar et de l'Aïr forment un autre venturi d'une longueur contractée égale à 200 km. L'effet d'un obstacle sur la dynamique éolienne ne peut pas être traité comme un cas isolé, mais on doit tenir compte des autres obstacles limitrophes. Les tempêtes de poussières qui se forment dans les aires de col situés au nord et au sud du massif : Hoggar –Tassili sont pris en charge par les deux branches du flux éolien subdivisé par les reliefs topographiques des Eglab – Adrar (Guelb er Richat) pour atteindre la porte de l'océan Atlantique. Il est à constater que l'aire du col au nord des massif Hoggar-Tassili est la zone la plus active (fig. 10 (a, b, c, d, e, f, g, h, i et j)).



a) 7 Mars 2015



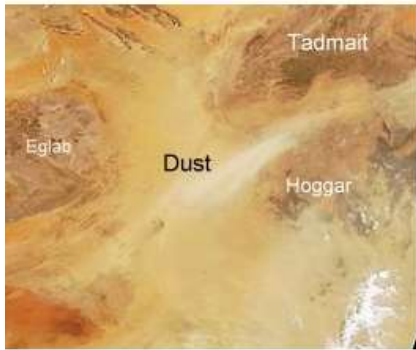
b) 9 Juin 2017



c) 10 Octobre 2011



d) 22 Septembre 2013



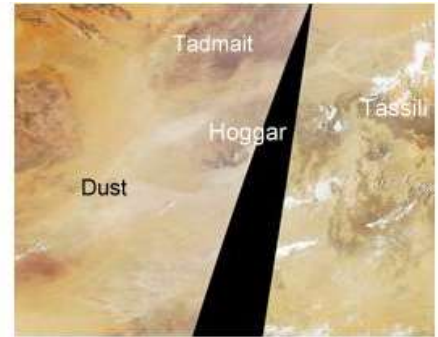
e) 27 Juin 2011



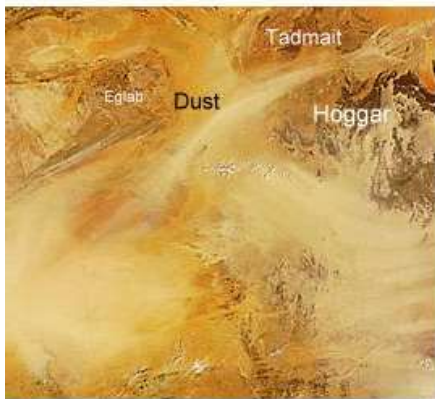
f) 27 Mai 2011



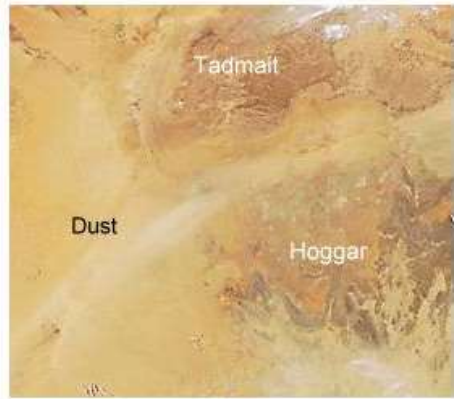
g) 2 Avril 2015



h) 2 Septembre 2013



i) 26 Avril 2008



j) 10 Juin 2017

Figure 10 : Quelques tempêtes de poussières obtenues sous l'effet des méga-obstacles : Hoggar-Tassili (source @ NASA Earth worldview)

Le relief topographique des Eglab offre un bon exemple de la circulation éolienne et ces conséquences. Il est considéré comme le plus beau méga-obstacle du Sahara. Avec un front au vent de 300 km (Mainguet, 1992), le massif des Eglab a une altitude moyenne de 600 m et une superficie de base égale à 110 000 km². Le relief prend la forme d'un obstacle allongé de longueur maximale égale à 750 km orienté dans la ligne des courants éoliens NE-SO. Environ 70% du massif se localise dans le territoire Algérien, le reste est situé à l'intérieur de la Mauritanie. La dynamique éolienne créée par le massif des Eglab a produit le Grand Erg Occidental ; aire de dépôt la plus amont à l'erg Erraoui. Les ergs Iguidi et Echech correspondant aux cols de contournement de l'obstacle par l'harmattan, sous le vent du relief topographique des Eglab ont un bilan sédimentaire négatif ; l'exportation en sable est supérieure à l'apport. Le sable des ergs Iguidi et Echech est transporté vers les ergs mauritaniens (aire de recollement) : Maqteir, Trarza et Oumrane-Aoukar (Mainguet et al, 1983 ; Mainguet et al, 1984 ; Remini, 2001 ; Remini et al, 2011). Ces résultats confirment ceux du Dubief (1953), puisqu'il a montré que l'erg Echech est en voie de disparition par enlèvement du sable par le vent qui le transporte en d'autres régions. Il est intéressant de rappeler que les travaux de Mainguet et al. (1984) qui ont fait appel à la mécanique des fluides et les images satellites ont bien expliqué la genèse et le bilan sédimentaire des ergs. Cependant, l'influence des autres obstacles limitrophes sur le massif lui-même n'a pas été soulevée. A titre d'exemple, le rôle du relief topographique des Eglab sur la circulation éolienne doit prendre en compte l'effet du plateau d'Adrar (Guelb er Richat) situé à 175 km du massif des Eglab. Dans ce qui précède, notre étude traite le rôle des massifs : Eglab – Adrar (Guelb er Richat) sur la circulation éolienne (fig. 11). Le plateau gréseux d'Adrar (Guelb er Richat) d'une forme aérodynamique de 300 km de longueur orientée dans la même direction que celui des Eglab, soit du NE- SO. Au centre de ce plateau, il existe le Guelb er Richat (le cœur de Richat) ; une structure rocheuse qui a la forme d'un cratère circulaire de 50 km environ de diamètre. Vu du ciel, cette magnifique structure géologique prend la forme d'un œil géant. D'ailleurs, on la surnomme l'œil du Sahara ou l'œil de l'Afrique. Ce fabuleux plateau d'Adrar (Guelb er Richat) marque ainsi la séparation entre l'erg dunaire de Makteir au nord et celui d'Ouarane au sud (fig. 12).

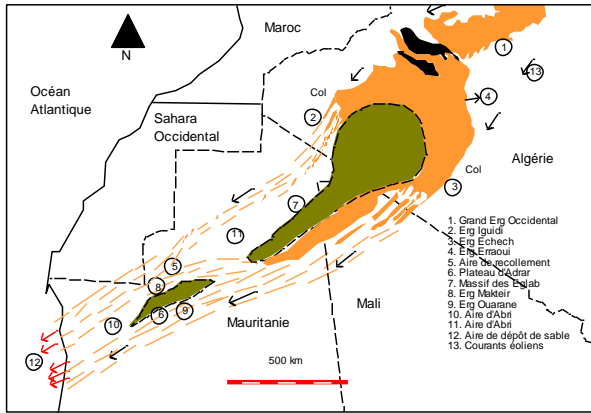


Figure 11 : Croquis montrant les courants éoliens autour des obstacles : Eglab-Adrar (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)



Figure 12 : Structure de Richat. L'œil du Sahara, une forme aérodynamique qui facilite les courants éoliens transporteurs de particules de sables d'atteindre les côtes Mauritanienne (source Google Earth).

Si on tient compte de l'effet du plateau d'Adrar (Guelb er Richat), nous obtenons une figure différente de celle présentée par Mainguet (1982). Grace au front au vent d'une longueur de 300 km, les courants éoliens transporteurs de sables façonnent les ergs de dépôts à l'amont du massif topographique successivement les ergs de dépôts Erraoui et le Grand Erg Occidental. Les Ergs Iguidi et Echech sont séparés par les Eglab sont situés dans les aires de col. Une aire sans sable sous le vent du massif ; l'aire d'abri d'une superficie égale à 60 000 km² et une longueur de 600 km. Elle est située au nord du massif Eglab sous l'effet de sa forme géométrique. La présence du plateau d'Adrar (Guelb er Richat) à l'aval du massif des Eglab perturbe l'aire de recollement. C'est ainsi que les vents transporteurs de sable contournent les Eglab en deux branches ;

l'une au nord et l'autre au sud des Eglab. Avec un front au vent pratiquement égal à zéro, le plateau d'Adrar (Guelb er Richat) d'une forme aérodynamique exceptionnelle, partage le flux éolien émanant du sud des Eglab en deux parties, l'une passe au nord et l'autre au sud du plateau. Les deux branches séparées par le massif d'Adrar (Guelb er Richat) s'accélèrent sous l'effet de col pour la deuxième fois pour atteindre la cote Mauritanienne qui se trouve à 400 km de l'extrémité du massif d'Adrar. Sans oublier que la branche du courant éolien en provenance du nord des Eglab et la partie qui se dirige vers le nord du plateau se convergent dans l'aire de recollement. Les particules sableuses en provenance des ergs Iguidi et Echech se déposent pour former les ergs Mauritiens. Mais en réalité, ce n'est pas une aire de recollement mais plutôt une aire de col engendré par le massif Adrar (Guelb er Richat). L'exportation est beaucoup plus importante que l'apport en sable. La circulation éolienne autour du massif Adrar (Guelb er Richat) engendre une aire d'abri sans sable sous le vent du massif d'une superficie égale à 25 000 km² et une longueur de 350 km. Cette unité dynamique s'achève à l'aval dans l'océan à quelques kilomètres de la coté par le dépôt sableux (fig. 13).

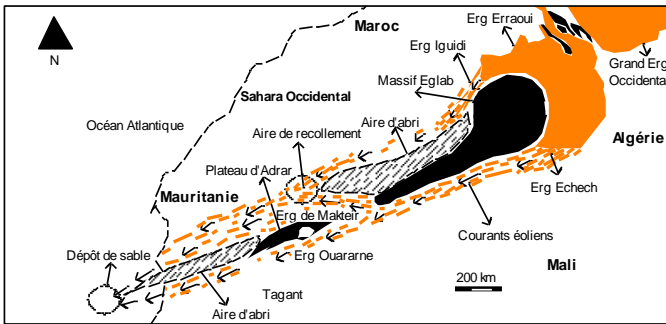


Figure 13 : Aires d'Abri et ergs formés sous l'effet des obstacles : Eglab et Adrar (Guelb er Richat) (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

La vitesse du vent : un élément indispensable au soulèvement des particules poussiéreuses ou pour enclencher une tempête de poussière ou de sable. Généralement, c'est dans les aires de col (engendrés par la présence d'un relief topographique dans la ligne du vent transporteur de sables) que les vents violents se manifestent. Après la subdivision par un obstacle, les lignes de courants éoliens de deux branches qui sont séparés par le massif, se resserrent et la vitesse du vent devient beaucoup plus importante que dans les autres aires. L'érosion éolienne est très active, ce qui favorise le départ et l'exportation des particules sableuses. Ainsi les particules très fines peuvent être emportées dans le ciel sous forme d'un nuage ou d'une tempête de poussière. Dans le Sahara, le

relief topographique les Eglab offre un exemple unique de l'exportation de la poussière vers l'Atlantique. Le départ des particules peut avoir lieu au niveau des aires de cols engendrés par la présence des Eglab dans la direction des courants éoliens transporteurs de sable NE-SO. Ces aires de cols sont caractérisées par les ergs d'Iguidi et Echech. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ces deux ergs sont des ergs d'exportation de sable. Les tempêtes de poussières qui se développent dans ces aires (ergs Iguidi et Echech) ou qui proviennent des aires de col du nord et du sud de l'obstacle Hoggar-Tassili parcourent plus de 1500 km pour atteindre l'océan Atlantique (fig.14). Cette dynamique éolienne est induite par l'effet des massifs topographiques : Eglab et Adrar (Guelb er Richat) sur la circulation éolienne. Les vents restent violents le long du trajet (1500 km) et les fines particules sont transportées en suspension. Arrivées à la cote Mauritanienne, les courants marins transportent ces nuages de poussières jusqu'à l'autre rive de l'Océan Atlantique. La figure 14 illustre bien l'arrivée de la tempête de poussière à la porte de l'Atlantique sur l'axe Eglab-Adrar (Guelb er Richat) le long de la direction N-E vers S-O.

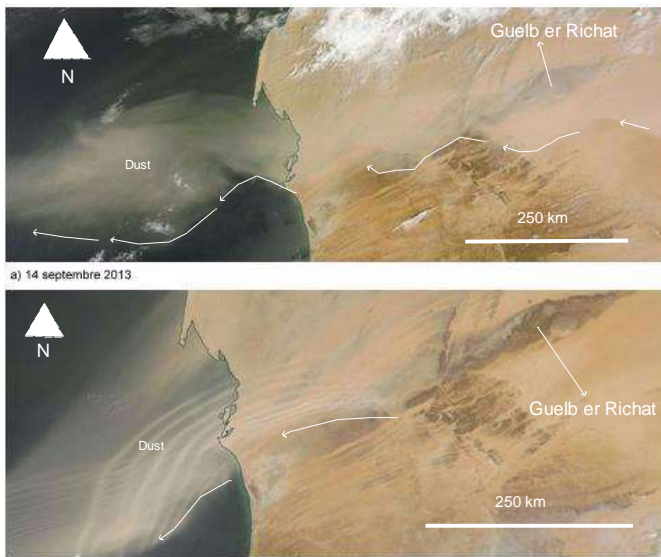


Figure 14 : Effet des obstacles : Eglab-Adrar sur l'exportation des particules poussiéreuses vers l'Atlantique @NASA Erath worldview

Le rôle du massif topographique Tibestii sur la circulation éolienne

Le relief topographique du Tibesti offre un des meilleurs exemples sahariens de l'effet d'un méga obstacle sur la circulation éolienne à l'interface sol -

atmosphère. Fort d'une superficie de 161700 km² (Mainguet, et al, 1983) et se trouve à une altitude moyenne de 1800 (Mainguet, et al, 1983), le méga obstacle Tibesti est la cause principale de la formation des ergs : Rebiana à l'amont du massif est un erg d'obstacle (Mainguet et al, 1984). Le Grand erg de Fachi Bilma se localise à l'aval du massif suite au recollement des deux branches de l'harmattan. Le phénomène le plus impressionnant pour ce massif reste le contournement de la branche de l'harmattan qui longe le Tibesti par l'Est et s'infléchit au Sud –Ouest en arc de cercle dans le Bembéché. D'une longueur de 600 km, cet arc de cercle possède un rayon de 300 à 450 km (Mainguet et Chemin, 1990). La figure 15 montre l'agressivité et la violence des vents transporteurs de sable sous les effets de l'aire du col (Est) du relief topographique de Tibesti et le Méga-venturi de Borkou. L'importance de la vitesse des vents se traduit par la sculpture des traces de corrasion sous forme de traînées ou de systèmes crêtes couloirs. Cependant l'aire d'abri est située à l'aval du massif est égale à 300000 km² (Mainguet, et al., 1983).

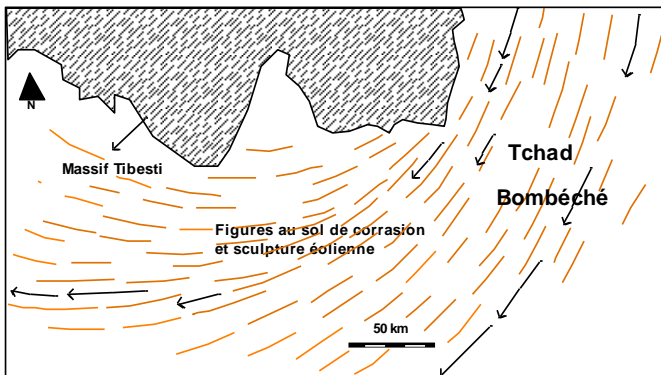


Figure 15 : Traces au sol de la saltation témoignant du contournement des courants éoliens par le relief topographique de Tibesti (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

Sur la base des couvertures photographiques aériennes, Durand de Corbiac (1958) a montré comment les sables venus de la Libye par le NE et le NO du massif se rencontrent au SO de celui-ci pour y former l'erg de Bilma. Les mêmes conclusions ont été obtenues par Vertappen et Van Zuidam (1970) en utilisant cette fois-ci les images prises par les satellites Appollo-Gémini confirment aussi la déflexion éolienne du vent autour du Tibesti. Mainguet et al, (1980) ont confirmé à partir des images de Météosat, comment le grand relief topographique Tibesti (Tchad) divise l'harmattan en deux branches : l'une contourne le massif par l'Est, puis le Sud ; l'autre par le Nord et l'Ouest.

Pour notre étude, ce sont les deux aires de col qui nous intéressent puisque, c'est au niveau de ces endroits que le vent s'accélère et que les particules sableuses et poussiéreuses sont entraînées par le vent. Des nuages et des tempêtes de poussières se forment (fig. 16 et 17). L'aire de recollement obtenue par la rencontre des deux branches de courants éoliens subdivisés par le massif Tibesti se confond avec l'aire d'obstacle à l'amont du massif Air pour former l'erg de Fachi Bilma.

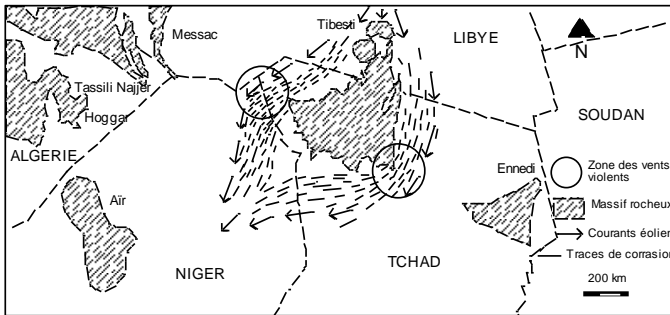


Figure 16 : Subdivision du flux éolien en provenance de la Libye en deux branches pour former deux aires de cols (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

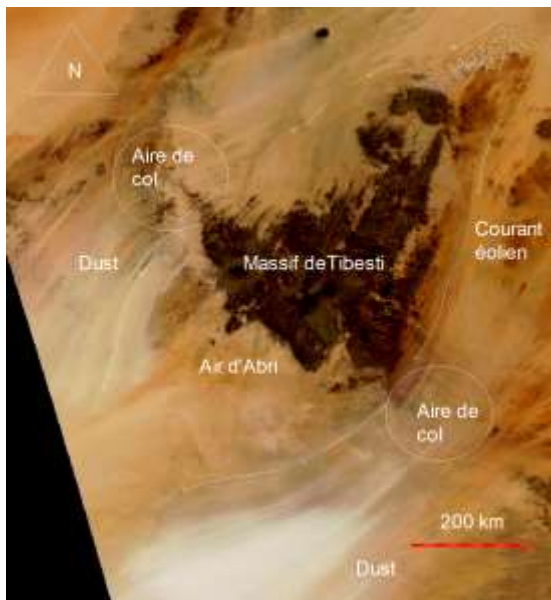
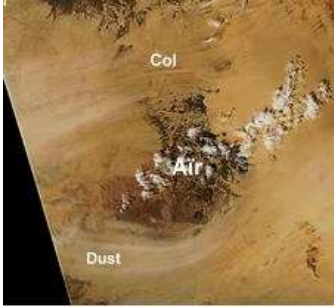


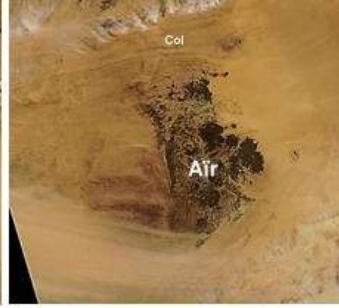
Figure 17 : Tempête de poussières créée par l'effet du massif de Tibesti sur la circulation éolienne @NASA Earth worldview

Le rôle du massif topographique l'Air sur l'érosion éolienne

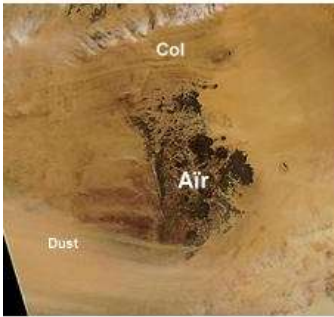
La présence du massif topographique l'Air dans le Sahara a beaucoup contribué à la dynamique éolienne et à la formation des ergs. D'une surface égale à 66 150 km² (Mainguet, et al, 1983) et d'une altitude moyenne égale à 1500 m (Mainguet, et al, 1983), le massif Air est allongé dans la direction Sud-Nord. La longueur d'allongement de 400 km se trouve donc perpendiculaire au sens des courants éoliens en provenance de la Libye suivant la direction Est-Ouest et qui représente aussi le front au vent. Une longueur aussi importante qui a un effet sur la grandeur de l'aire d'Abri ainsi que celle de l'aire à l'amont vent. Le Grand Erg de Fachi Bilma est le fruit de recollement de deux branches de courants éoliens subdivisées par le massif d'Air. Mais selon les images satellites que nous avons consultés, une partie de l'Erg de Fachi Bilma s'est formé à l'amont du massif d'Air suite au ralentissement des filets d'air sous l'effet de l'obstacle. Quant à l'aire d'Abri ; une aire sans sable s'est constituée à l'aval du massif, elle est évaluée par Mainguet, et al. (1983) à 94325 km². La présence du massif d'Adrar des Ifoghas à 550 km à l'aval de la montagne d'Air perturbe l'aire de recollement obtenu par la convergence des deux branches du flux éolien subdivisé par le massif. Dans ce cas nous obtenons une mauvaise estimation de l'aire d'Abri. Enfin, il devient indispensable de prendre en compte les obstacles limitrophes et d'éviter une étude d'un cas isolé. Le Sahara avec ces massifs topographiques représente une seule unité. Les effets de cols marqués par les traces de la saltation des particules sableuses témoignant du contournement des flux éoliens sur le relief topographique de l'Air. Au niveau de ces aires, les filets d'air des courants éoliens transporteurs de sable se resserrent, la pression diminue et les vents deviennent plus violents. La présence d'un sol rugueux, ces vents puissants créent une turbulence provoquant un soulèvement des particules fines dans l'atmosphère et la formation des tempêtes de poussière (fig. 18).



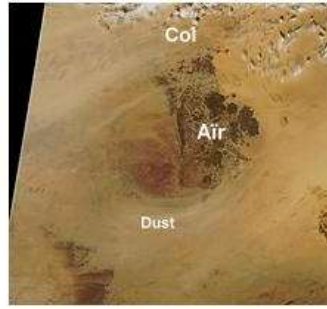
a) 31 Décembre 2011



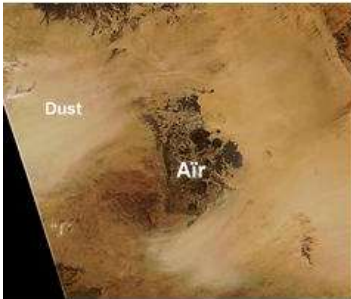
b) 8 Janvier 2015



c) 1 Décembre 2015



d) 24 Décembre 2016



e) 28 Décembre 2010



f) 5 Février 2013

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

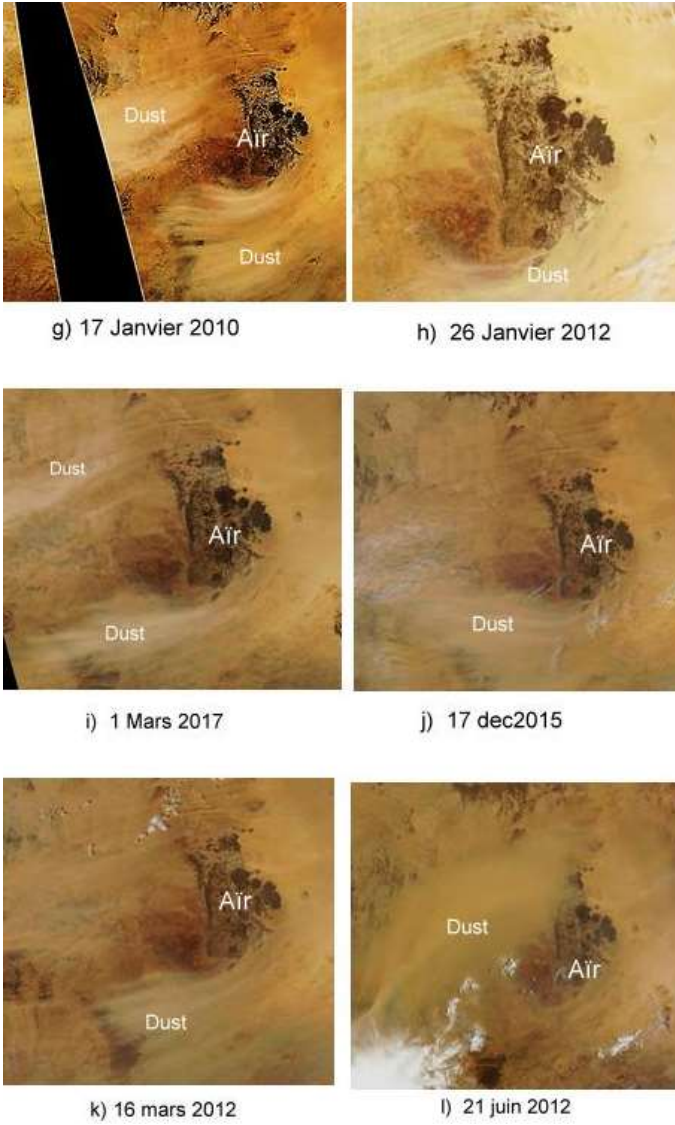


Figure 18 : Naissance des tempêtes de poussières dans les aires de cols engendrés par l'effet de la circulation éolienne sur le méga-obstacle d'Air. @NASA Erath worldview

Le rôle du massif topographique Ennedi autour du massif rocheux Ennedi

Les flux éoliens en provenance de la Libye et de Soudan sont divisés en deux faisceaux de courants éoliens par le relief topographique Ennedi. D'une forme triangulaire dont l'un des sommets est en face direct avec les courants éoliens. La division du flux éolien en deux branches s'effectue avec moins de pertes de charge. Seulement, l'effet des cols oblige les filets d'air à se resserrer. Dans ces aires, la déflation est grande suite à la violence des vents. L'exportation des particules sableuses est beaucoup plus importante que l'apport. Cependant, au niveau de l'aire du col du côté ouest, la vitesse du vent est beaucoup plus importante suite à l'effet du col d'Ennedi et l'effet de la section contractée du Venturi. Dans ce cas c'est au niveau de ces aires (cols) que les tempêtes de poussières se déclenchent (fig. 19). Contrairement aux trois sources d'exportation de poussières citées précédemment, les tempêtes de poussières se manifestent peu dans l'aire de col du sud du relief d'Ennedi.

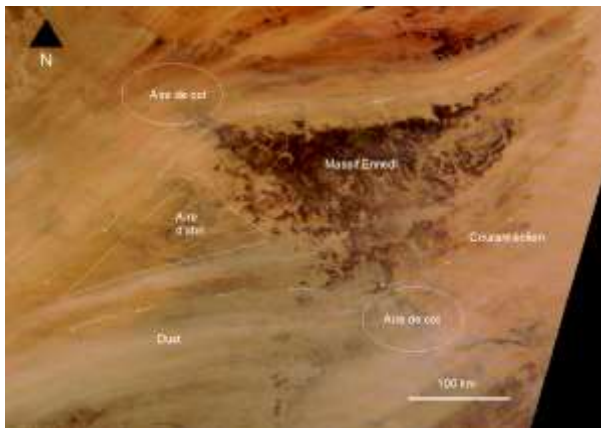


Figure 19 : Naissance d'une tempête de poussière du 2 février 2017 au niveau du col Est d'Ennedi @NASA Earth worldview

Le rôle du Venturi de Borkou sur la circulation éolienne dans l'aire de Bodélé

Un venturi dans le Sahara. Il est situé dans le territoire du Tchad. Formé par la disposition des méga-obstacles : le Tibesti et l'Ennedi. De forme trapézoïdale, le convergent de Borkou d'une longueur de 100 km de la section d'entrée à la section de sortie (contractée) (fig. 20). Les courants éoliens en provenance du nord contournent le massif de Tibesti pour pénétrer dans le tunnel de Borkou. Les filets de fluide se resserrent à la sortie de la section contractée en

provoquant une dépression et un accroissement de la vitesse (fig. 21). L'énergie cinétique à la sortie du tunnel est assez importante de telle sorte qu'elle peut facilement provoquer une intense érosion éolienne et par conséquent, elle génère des tempêtes de poussière juste à l'aval (fig. 22). Il s'agit de l'aire de Bodélé qui est devenue le siège de soulèvement des particules sableuses et poussiéreuses. La figure 23 illustre bien quelques tempêtes de poussières qui se sont manifesté dans l'aire de Bodélé du grâce à la violence du vent provoqué par le méga -venturi de Borkou.

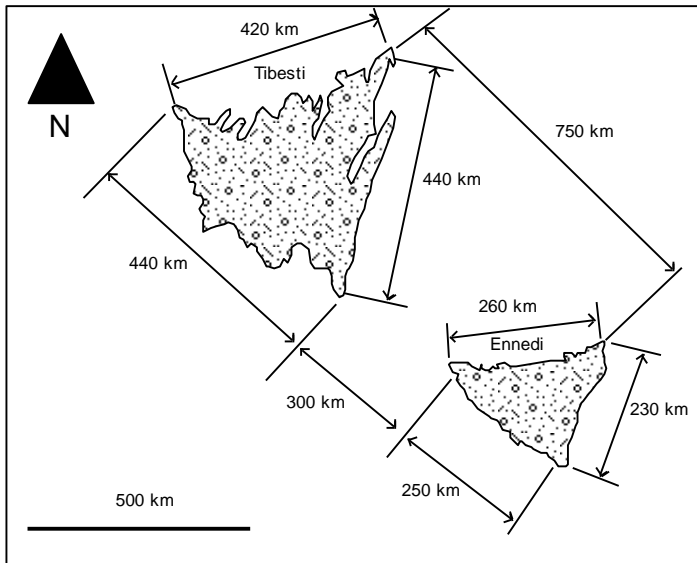


Figure 20 : Dimensions des reliefs topographiques de Tibesti et d'Ennedi (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

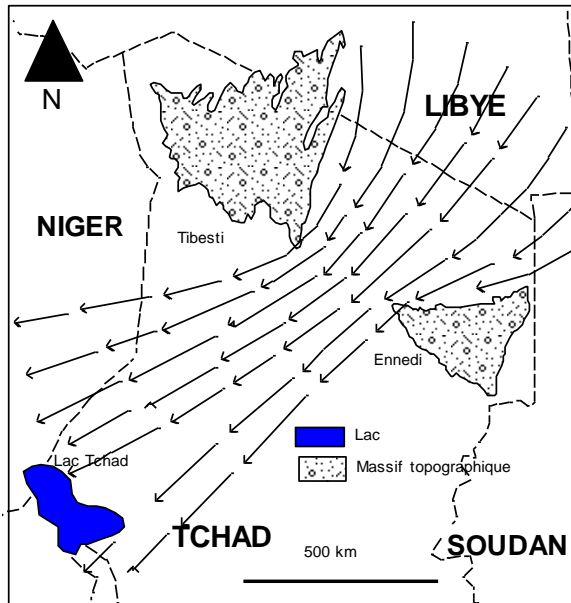


Figure 21 : Resserrement des courants éoliens dans Le Venturi. (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

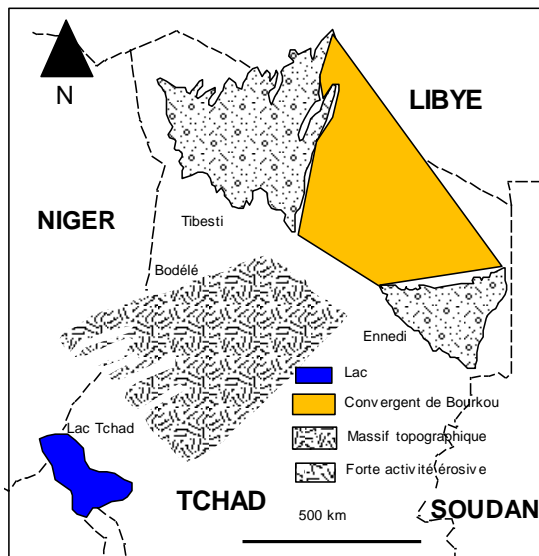


Figure 22 : L'aire de forte activité érosive produite La Méga- Venturi de Borkou (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*



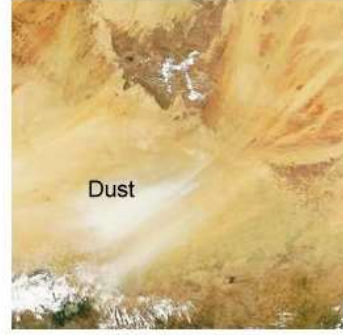
a) 1 Décembre 2015



b) 20 Février 2009



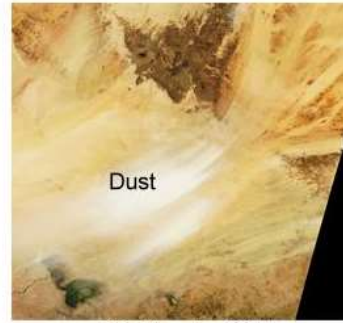
c) 24 Décembre 2016



d) 12 Octobre 2011



e) 4 Janvier 2015



f) 9 Décembre 2011

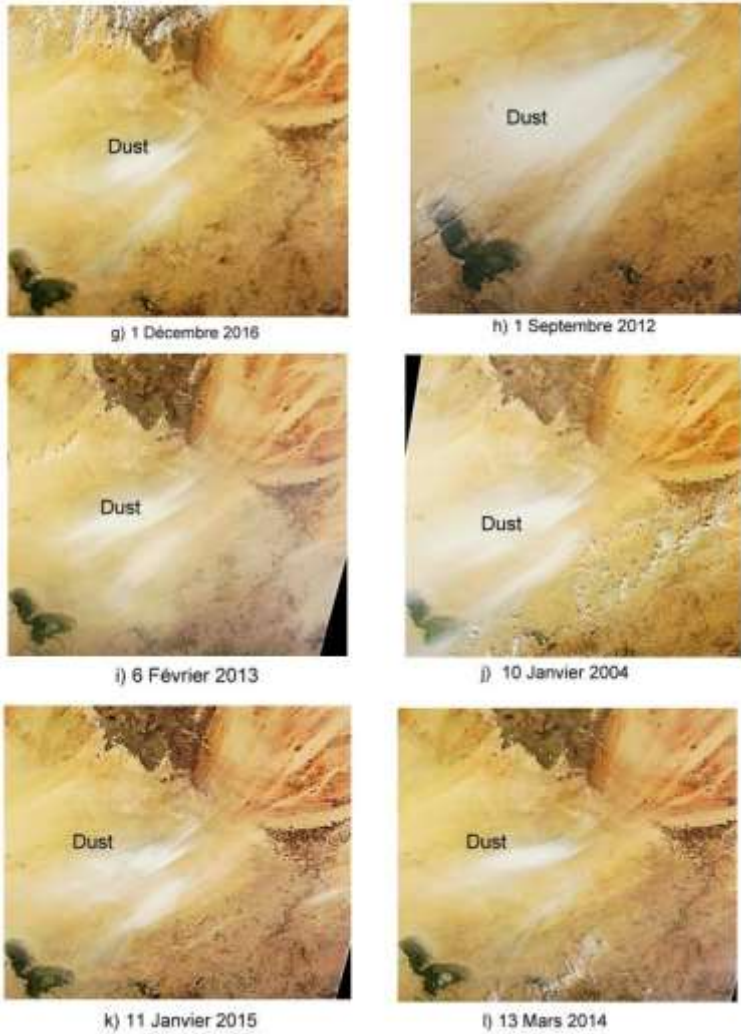


Figure 23 : Tempête de poussière du 1^{er} décembre 2015 dans la région de Bodélé provoquée le maga venturi @NASA Erath worldview

Mécanismes du transfert des particules sableuses du Sahara vers l'Amazonie

Comme nous l'avons mentionné au début de cette étude sur les différentes aires qui se constituent sous l'effet des obstacles sur la circulation éolienne, nous avons analysé une série d'images satellites sur le Sahara pour localiser les aires de forte érosion et d'exportation de particules sableuses. Ces types d'aires se situent juste à l'aval des aires de cols et de venturis engendrés par l'effet d'obstacles sur la circulation éolienne. Trois aires d'exportation les plus actives du Sahara se dégagent :

- Aire à l'aval du Méga Venturi (Aire de Bodélé)
- Aires des cols engendrés par les massifs Hoggar-Tassili
- Aires de cols formés par le massif Aïr

La première source d'exportation de la poussière vers l'Atlantique est l'aire de Bodélé. Ces tempêtes de poussières se forment sous l'effet du Méga Venturi de Borkou (Tchad). En effet, les courants éoliens transporteurs de sable quittent le venturi avec des vitesses extrêmement élevées capable de soulever la poussière (fig. 24).

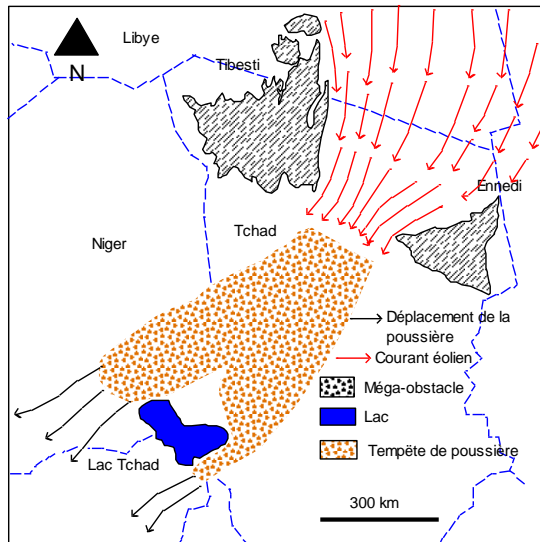
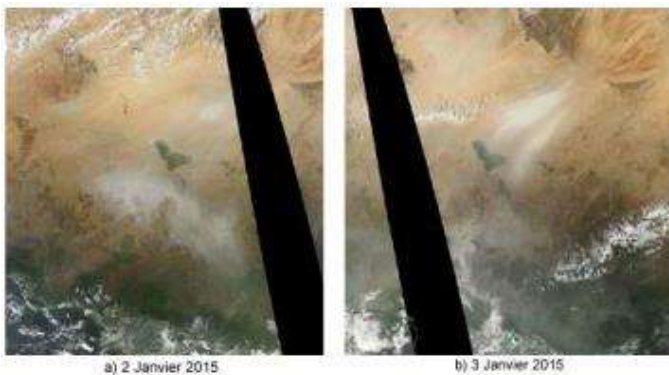


Figure 24 : Trilogie : Tibesti –Ennedi – Lac Tchad : un modèle de la production et d'exportation de la poussière vers l'Atlantique (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

Très concentré en particules fines au début, les tempêtes de poussières une fois formée peuvent se déplacer jusqu'à la cote Mauritanienne. Le lac Tchad situé à 700 km à l'aval de la dépression de Bodélé, joue le rôle d'un relief topographique. En effet, les courants éoliens transporteurs de sable et de poussière en provenance de la région de Bodélé se divisent en deux branches pour contourner le lac Tchad. Cette nouvelle situation provoque une accélération des courants éoliens et permet ainsi aux grains de sable et les particules poussiéreuses de se maintenir le plus longtemps possible dans l'atmosphère pour atteindre la cote de l'océan Atlantique. Soit une distance moyenne de 2000 km à partir de l'aire de Bodélé. A partir de là, les particules sableuses (en fonction de la granulométrie), sont transportées par des courants marins jusqu'à l'autre rive de l'Atlantique. La figure 25 illustre bien la propagation des nuages de poussières de la tempête de sable du 2 au 5 janvier 2015 en partant de l'aire de Bodélé jusqu'à la porte de l'Atlantique (fig. 26). Plus de 53 % de tempêtes de sable qui se manifeste dans le désert Sahara sont d'origine de la région de Bodélé (Tchad). Même les tempêtes de grande envergure qui dégagent des tempêtes de sable très dense proviennent de l'aire de Bodélé. Cette situation est la conséquence des vents très puissants qui soufflent à partir du Méga-Venturi de Borkou. D'ailleurs, les travaux d'Abouchami et al. (2013) considère que la dépression de Bodélé (Tchad) est la plus grande source de poussière saharienne atteignant le bassin amazonien par le transport transatlantique.



*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

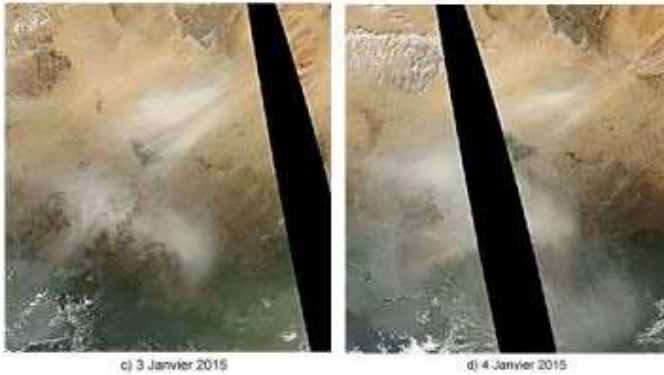


Figure 25 : Propagation du nuage de poussière en provenance de l'aire de Bodélé vers la porte de l'Atlantique @NASA Erath worldview

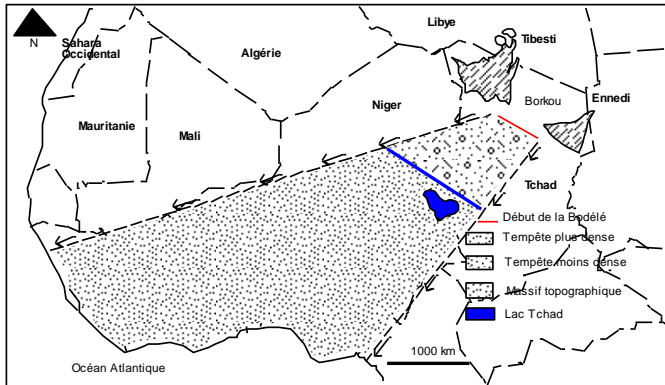


Figure 26 : Schéma probable du passage des tempêtes de poussières en partant de l'aire de Bodelé (Tchad) jusqu'à l'Atlantique (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

La deuxième source d'exportation de la poussière provient de l'effet de l'ensemble des massifs : Hoggar-Tassili Najjer-Messak regroupé en une seule unité placée dans la ligne des courants éoliens transporteurs de sable en provenance de la Libye. La subdivision du flux éolien en deux branches ; l'une passe par le nord du massif. L'autre passe par le sud du massif pour se rencontrer à l'aval de ce dernier pour former l'aire de recollement. Les aires de cols déduites de la circulation éolienne autour de cet ensemble de massifs qui sont aussi des aires de tunnels formés par la montagne de Hoggar et le plateau de Tadmaït dans le nord. Dans cette aire, l'érosion éolienne est très active et par conséquent le soulèvement de la poussière est très fréquent. Dans le sud, les filets des courants éoliens s'engouffrent et se resserrent dans le couloir formé

par les massifs de Hoggar et de l’Aïr. A la sortie, les vents accélérés sous l’effet du col, contournent le méga-obstacle du Hoggar et décrivent un arc de cercle sous l’effet du massif d’Adrar des Ifoghas pour atteindre ensuite le relief topographique des Eglab. La tempête est prise en charge par les vents qui contournent et épousent bien la forme du massif des Eglab (fig. 27 et 28). Le flux éolien qui souffle de la direction NE-SO suivant le tunnel engendré par les reliefs Tadmait et l’ensemble Hoggar-Tassili bute contre la tête du massif des Eglab (allongée sur une longueur de 700 km sur la ligne NE-SO sur la ligne de l’harmattan) et se divise en deux branches. L’une traverse l’erg Echech et l’autre passe par l’erg Iguidi dont les filets d’aires se resserrent et la vitesse augmente afin d’atteindre le plateau d’Adrar. Dans ce cas, le courant éolien transporteur de sable est divisé en deux branches qui s’accélèrent sous l’effet des aires de col pour atteindre l’océan Atlantique. A ce stade les tempêtes de poussières sont prises en charge et transportées par les courants marins jusqu’à la forêt Amazonienne. Au total, la tempête de poussière parcourt une distance de 2000 km (fig. 29). Il est à signaler que plus de 30% de nombre total de tempêtes de sable qui apparaissent dans le Sahara, sont produites dans les aires de cols de l’unité : Hoggar-Tassili-Messak.

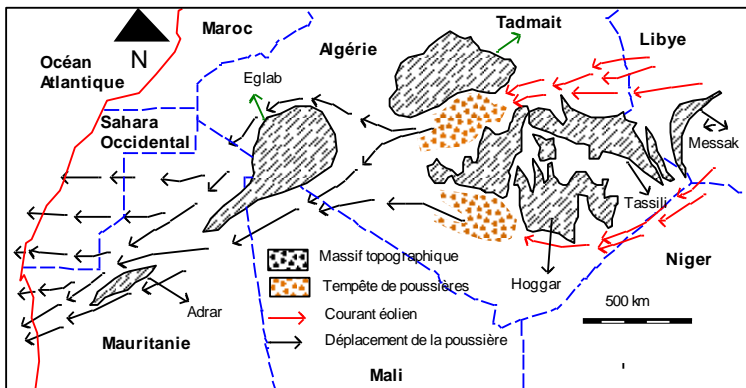


Figure 27 : Trajectoires des tempêtes de poussières à partir des sources d’exportation (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

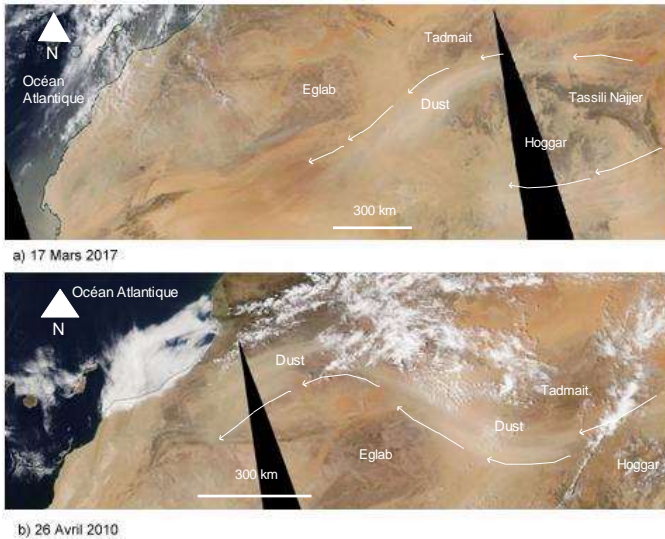


Figure 28 : Naissance des tempêtes de poussières (17 mars 2017 et 26 Avril 2010) sous l'effet du massif Hoggar sur la circulation éolienne qui contourne le relief topographique des Eglab pour atteindre le cote Mauritanienne @NASA Erath worldview

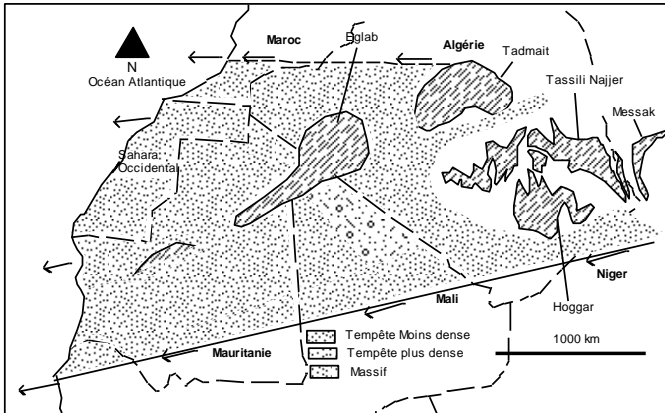


Figure 29 : Schéma du passage probable des tempêtes de sable en partant de l'ensemble des massifs Hoggar-Tassili jusqu'à l'océan Atlantique (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

La troisième source d'exportation de la poussière vers l'Atlantique se situe dans le désert du Niger qui se localise au niveau des aires de cols du relief topographique de l'Aïr. Sous l'effet de l'importance de la vitesse des deux branches de courants éoliens qui contourne le massif, des soulèvements des

poussières se manifestent au nord et au sud du massif. Lors de la tempête de poussières du 17 au 19 janvier 2010, les nuages de poussières se dirigeaient directement vers les côtes Mauritanienne et Sénégalaise, soit une distance moyenne de 2500 km (fig. 30). La figure 31 indique le champ qui peut être occupée par une tempête de poussières qui a pris naissance dans les aires de col du massif de l’Air. Certaines tempêtes de poussières se manifestent dans l’aire du col ouest du relief topographique de Tibesti. Puis, ces tempêtes de poussières sont emportées par les courants éoliens qui sont divisées en deux branches par le massif de l’Air qui se trouve sur la direction Est-Ouest. L’une se dirige par le nord et l’autre par le sud du relief de l’Air (fig. 32 et 33). Une autre trajectoire venant de l’erg Mourzouk est dévié vers le nord de l’Air. Par contre Mainguet (1982), a montré que le flux éolien en provenance de l’erg de Mourzouk vers le nord et infléchit le courant éolien qui a traversé l’erg de Fachi Bilma. Dans les aires de cols de contournement du relief topographique de l’Air par l’harmattan, les filets d’air se resserrent et la vitesse du vent augmente. Les nuages de poussières sous l’impulsion d’une forte énergie atteignent facilement l’océan Atlantique. Il s’avère que plus de 15% du nombre total des tempêtes qui sévissent dans le Sahara, sont originaire du Niger et plus exactement dans les aires de col du massif Air.

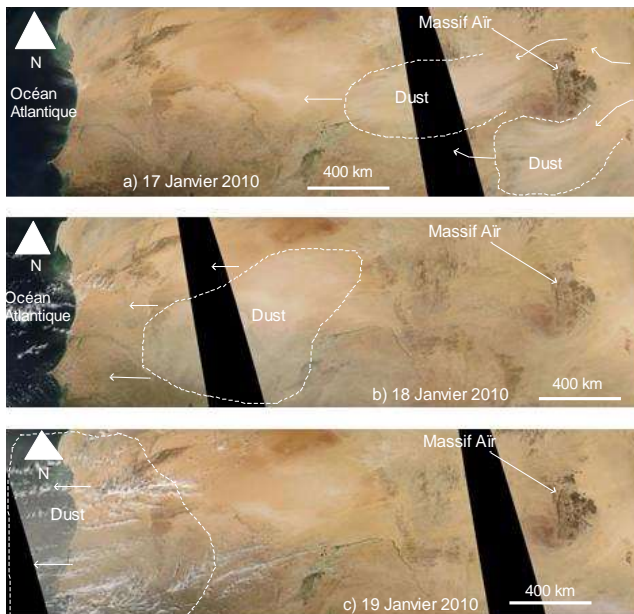


Figure 30 : Parcours de la tempête de poussières du 17/18 et 19 janvier 2010 en partant du massif de l’Air jusqu’à l’océan Atlantique @NASA Erath worldview

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

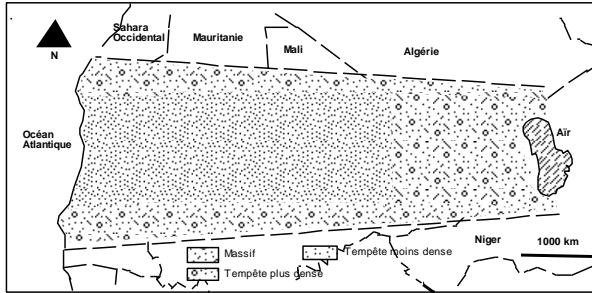


Figure 31 : Schéma du passage probable des tempêtes de sable en partant de du massif de l'Air jusqu'à l'océan Atlantique (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

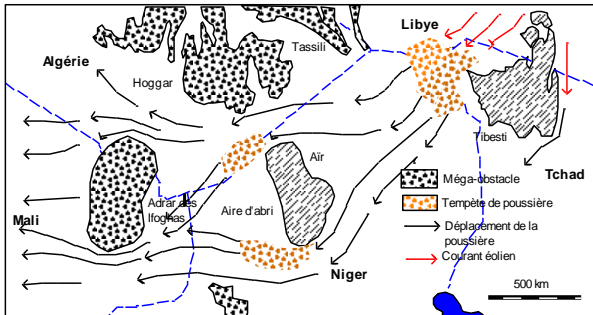
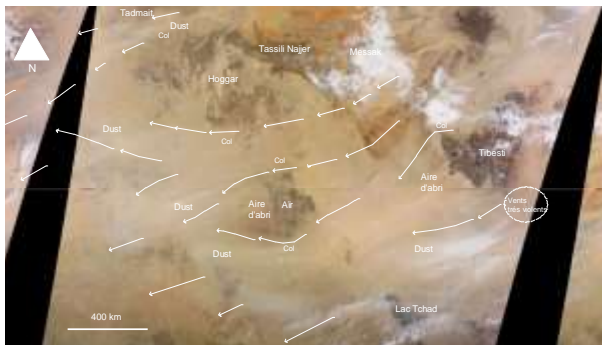


Figure 32 : Naissance des tempêtes de poussières dans les aires de col des reliefs topographiques de Tibesti et l'Air (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)



Figure 33 : Trajectoires des tempêtes de poussières lors de la tempête de sable du 10 octobre 2010. (@ NASA Earth worldview)

Tout dépend de l'ampleur du vent qui souffle dans ce vaste désert de Sahara, la quantité de poussières exportée vers l'Atlantique varie selon le déclenchement des tempêtes de sable dans les trois régions et la durée (nombre de jours) de la tempête. On peut assister à des tempêtes de poussières formées dans un, deux ou les trois endroits au même moment. A titre d'exemple, lors des tempêtes de sable du 12 décembre 2013 et le 1 décembre 2015, un impressionnant nuage de poussière s'élevait sur les trois régions (Tchad, Algérie et Niger), se dirige vers l'Atlantique en traversant la frontière de l'Afrique de l'ouest, d'une longueur de 6000 km (fig. 34 (a et b) et 35). Le ciel d'une vingtaine de pays a été envahi par des particules poussiéreuses. Il s'agit de : l'Algérie, le Sud Marocains, la Libye, le Niger, le Mali, la Mauritanie, le Sénégal, le Tchad, le Mali, l'Egypte, la Gambie, la Guinée Bissau, la Guinée, la Guinée, Sierra Leone, Cote D'ivoire, le Libéria, Ghana, Togo, Benin, Bourjkina Fasso, Nigeria et le Sahara Occidental..



a) Tempête du 12 décembre 2013 @NASA Erath worldview



b) Tempête du 1 décembre 2015 @NASA Erath worldview

Figure 34 : Tempêtes de sable dans le Sahara centrale

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

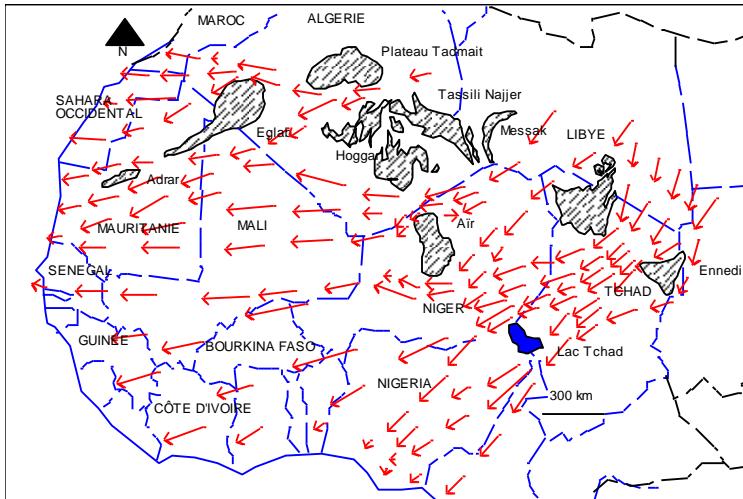


Figure 35 : Schéma du cheminement de la poussière vers l'Océan Atlantique (Remini, 2017) (schéma tiré des images satellites NASA Earth worldview)

CONCLUSION

Comme nous l'avons mentionné au début de cette étude que le phénomène d'érosion est le responsable du départ et d'arriver du phosphore de la forêt Amazonienne. Grace au ruissèlement qui provoque une intense érosion hydrique dans le bassin Amazonien, une quantité de 22000 tonnes de nutriment de phosphore se perd annuellement dans l'océan Atlantique. En contrepartie, la même quantité de phosphore provienne du Sahara. C'est grâce à l'érosion éolienne, la poussière une fois soulevée dans le ciel, survole l'océan Atlantique pour attirer dans la forêt équatoriale.

Trois aires d'exportations se distinguent dans le Sahara. L'aire de Bodélé (Tchad) est l'aire la plus exportatrice du sable vers le bassin Amazonien. C'est le méga-venturi de Borkou qui accélère les vents et provoque une érosion éolienne intense capable de soulever la poussière. Plus de la moitié de la poussière du Sahara provienne de l'aire de Bodélé. Sur le période : 2009-2017, plus de 53% des tempêtes de sable se manifestent dans cette région.

Les aires de cols générées par la circulation éolienne autour de l'ensemble de massifs : Hoggar-Tassili-Messak qui sont aussi des aires de tunnels formés par cet ensemble et le plateau de Tadmait dans le nord. Dans cette aire, le soulèvement des poussières est très fréquent. Au sud de ce relief topographique, les filets des courants éoliens s'engouffrent et se resserrent dans le couloir

formé par les massifs : Hoggar-Tassili-Messak et celui de l'Air de Hoggar et de l'Air. Plus de 30% de nombre total de tempêtes de sable formées dans le Sahara, se manifestent dans les aires de cols de l'ensemble : Hoggar-Tassili-Messak.

Les aires de cols obtenues sous l'effet du relief topographique de l'Air sur la circulation éolienne constituent la troisième source d'exportation de poussières vers le bassin Amazonien. Plus de 15% du nombre total des tempêtes qui apparaissent dans le Sahara, sont originaire des aires de col du massif Air. En fin, la quantité totale de poussières qui est estimée par les chercheurs à 27.7 millions de tonnes (dont 0.08% représente la quantité de phosphore) est exportée annuellement du Sahara vers la forêt Amazonienne par les trois aires les plus érosives du Sahara. Ce que nous pouvons dire sur cette relation entre deux écosystèmes totalement opposés : « Ce qui se perd par érosion hydrique est récupéré par érosion éolienne ».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALINE T., 2016. Le Sahara africain nourrit la végétation amazonienne, information de la NASA. Actua Latino. <http://www.actulatio.com>, publié le 30mars 2016.
- ANDREA H., 2015. Comment le sable du Sahara fertilise la forêt Amazonienne. Futura planète. www.futura-sciences.com, publié le 27/02/2015.
- ABOUCAMI W., NATHE K., KUMAR A., ANDREA L., 2013. Geochemical and isotopic characterization of the Bodélé Depression dust source and implications for transatlantic dust transport to the Amazon Basin. *Earth and Planetary Science Letters* 380. Octobre, pp. 112-123. DOI: 10.1016/j.epsl.2013.08.028
- BARTHÉLÉMY P., 2015. L'Amazonie fertilisée par le sable du Sahara. Passeur de sciences. <http://passeurdesciences.blog.lemonde.fr>. Publié le 1er Mars 2015.
- DUBIEF J., 1953. Les vents de sable au Sahara. *Proceeding colloques internationaux du centre national de la recherche scientifique. « Actions éoliennes - Phénomènes d'évaporation et d'hydrologie superficielle dans les régions arides », Alger, 27-31 mars. Editions du centre national de la recherche scientifique (Paris), pp. 45-70.*
- 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.*
- GREY E.2015. NASA : le sable du Sahara fertilise la forêt Amazonienne. *Ecologie. Ma.* <https://ecologie.ma>, publié le 28 février 2015

*Quand deux écosystèmes opposés : humide et sec se lient par le phénomène d'érosion ?
Cas du désert du Sahara et de la forêt amazonienne*

- MAINGUET M., 1975. Etude comparée des ergs à l'échelle continentale (Sahara et déserts d'Australie). Bulletin de l'Association des géographes français, n° 424-425, Mars-Avril, Vol. 52, pp. 135-140.
- MAINGUET M., COSSUS L., ET CHAPELLE A.M., 1980. Utilisation des images météosat pour préciser les trajectoires éoliennes au sol au Sahara et sur les marges sahéliennes. Société de photogrammétrie et de télédétection. Bulletin n° 78, février, pp. 1-15
- MAINGUET M., BORDE J.M., CHEMIN M.CH., 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. ET 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.
- MAINGUET M., CHEMIN M.CH. ET 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 III, pp. 11-19.
- MAINGUET M., 1992. A Global open wind action system: the Sahara and the Sahel. Geology of the Arab world, Cairo University, pp. 33-42.
- MAINGUET M. ET REMINI B., 2004. Le rôle des mega-obstacles dans la formation et le façonnement des ergs : Quelques exemples du Sahara. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 03, Juin 2004, pp.13-23.
- REMINI B., MAINGUET M., 2004. Les paramètres morphologiques des méga – obstacles. Le journal de l'eau et de l'environnement (Algérie), n°4, juin, pp. 49-58.
- REMINI B., MAINGUET M. ET DUMAY F., 2011. Impact of the parameters of a morphological and morphometric of meg-obstacle on the field shelter. Geographia Technica, n° 1, pp. 57 - 71
- 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, Reims, France.
- SOUTO. E., 2014. Sable et poussières : le Sahara nourrit l'Amazonie. ConsoGlobe. www.consoglobe. Publié le 24 novembre 2014.
- VERSTAPPEN H. TH. ET VAN ZUIDAM R.A., 1970. Orbital photography and the geosciences. A Geomorphological Exemple from the central Sahara, Geoforum n°2, pp.33-47.