APPORT DES IMAGES-SATELLITE DANS LE SUIVI DES NUAGES DE POUSSIERES EN ZONES SAHARIENNE ET SUB-SAHARIENNE

Zeineddine NOUACEUR

Université de Rouen, Laboratoired'étude du développement des zones arides (LEDRA)
1 rue Thomas Becket
76821 Mont Saint Aignan Cedex
Tél : 02 35 14 69 81 Fax : 02 35 14 62 00
Courriel : zineddine.nouaceur@univ-rouen.fr

Soumis le 2 avril 2007 ; révisé le 15 avril 2008 ; accepté le 7 mai 2008 - © *Revue Télédétection*, 2008, vol. 8, n° 1, p. 5-15

Résumé :

Les images du satellite Météosat constituent une base de données d'une extrême utilité pour les recherches scientifiques. La disponibilité quotidienne de telles sources d'information en fait un outil indispensable pour le suivi, l'analyse et la compréhension de tous les phénomènes météorologiques. Les lithométéores constituent un volet non négligeable de cette large discipline. C'est généralement dans les régions arides et semi-arides que de tels phénomènes, sont les plus fréquents. Dans ces régions, la densité des réseaux d'observation météorologique est des plus réduite. L'absence d'informations pertinentes trouve ainsi une juste réponse dans l'utilisation des images satellite et de la télédétection. Le suivi de la tempête de mars 2004 est une illustration d'une telle démarche. Cette analyse s'appuie sur une étude des conditions dynamiques ayant généré ce phénomène, elle est axée aussi sur un suivi temporel du nuage de poussière, ce qui a permis de préciser sa trajectoire, son extension spatiale, ainsi que l'allure de sa progression. Enfin, grâce à des données de surface enregistrées sur les quelques stations sahariennes et sahéliennes existantes, l'évolution des paramètres du temps a pu conforter les précisions apportées par les images satellite.

***Mots-clé** : climat, télédétection, vent de sable, lithométéore*

Abstract

The « Meteosat » satellite images are an essential part of any scientific research. Daily availability of such sources of information make them an indispensable tool for monitoring analysis and understanding of all meteorological phenomenon. Lithometeors are an important component of this vast subject. It is generally in arid and semi-arid regions that such phenomena mainly occur. It is in these regions, that meteorological observation is minimal. The absence of relevant information is compensated by the use of imagery satellite and remote sensing. The monitoring of the March 2004 storm is an example of such technology. This analysis is based on a study of the dynamics which led to this phenomenon and is based on the temporal monitoring of the dustcloud, which allowed the plotting of its trajectory, and estimation of its height and its speed. Finally, recorded surface data from the few Sahelian and Saharian weather monitoring stations confirmed exactness of the satellite imagery.

***Keywords**: climate, remote sensing, sandstorm, lithometeor*

1. INTRODUCTION

1. 1. Problématique

L'un des grands problèmes des climatologues qui travaillent sur le climat saharien et sahélien est sans nul doute la faible densité des réseaux météorologiques qui couvrent ces régions. Les travaux sur les vents de sable ont depuis longtemps insisté sur ce volet non négligeable de la recherche (Dubief, 1951). Aujourd'hui encore, d'immenses régions sahéliennes et sahariennes restent non couvertes, c'est une réalité pour une grande partie de l'Afrique de l'Ouest, qui englobe le sud – ouest algérien, le nord – est mauritanien et le nord du Mali (domaine qui se situe sur la trajectoire éolienne atlantique et qui est un terrain favorable à l'apparition des vents de sable pour cette partie de l'Afrique). L'outil scientifique que constitue l'image satellite représente un acquis indéniable et une opportunité unique pour suivre, com-

prendre et analyser en temps réel les manifestations lithométéoriques. En effet, l'étude de ces phénomènes à partir d'observations faites au sol (dans les stations météorologiques) peut être complètement tronquée par leur caractère très furtif. Le cas des murs de sable illustre très bien cette problématique (ce lithométéore ne dure que très peu de temps et il est ainsi très rarement mentionné sur le recueil des observations des stations météorologiques). La même chose peut être dite sur les tempêtes et les autres phénomènes qui se forment dans les régions non couvertes par les réseaux météorologiques et qui échappent ainsi à toutes observations.

Si par le passé, des études ont mis en évidence l'utilité des images satellite dans la détection des particules terrigènes (Deuze *et al*., 1988 ; Legrand *et al*., 1988) dans le suivi des tempêtes et des nuages de sables (Oliva *et al*., 1985) et dans les études des événements climatiques majeurs (ORSTOM, 1983), il n'en demeure pas moins que la fréquence des prises de vue et les conditions d'acquisition de cet outil ont été largement modifiées depuis cette date.

La présente étude est une analyse en temps réel d'une configuration aérologique qui a abouti à la naissance d'un phénomène spectaculaire (mur de sable, photo 1) rarement observé aux abords des stations météorologiques. L'utilisation de l'image satellite a permis de suivre heure par heure la genèse du phénomène et la progression du nuage de poussière qui l'accompagne jusque vers la porte de sortie des lithométéores sur le littoral sénégalo-mauritanien. Cette extraordinaire mobilisation de poussières éoliennes se produit le long du front froid des perturbations sahariennes ou des perturbations polaires. D'anciennes études, faites à partir d'observation au sol, donnaient à ce phénomène une dimension très réduite (Bérenger, s.d.). L'utilisation de l'image satellite a permis de révéler une étendue beaucoup plus ample, qui se chiffre pour cette épisode à plus de 3000 km (Knippertz *et al*., 2006, évalue cette limite à 5000 km).



Photo 1. Mur de sable (haboob) aux environs de Kiffa (Mauritanie) en mai 1994 (cliché de l'auteur)

1.2 Comment reconnaître un nuage de poussière sur une image satellite ?

S'il est facile sur une image satellite de distinguer les différents systèmes perturbés qui favorisent l'apparition des lithométores, il est par contre plus difficile de percevoir les particules terrigènes et les nuages de poussières qu'ils forment, lorsque la turbulence des masses d'air devient plus active et la vitesse des vents plus importante (Plana Fatori, 1994 ; Mokhnache, 2000 ; Legrand *et al*., 2001, Vergé-Dépré *et al*., 2006 ; Merchant *et al*., 2006).

Une première difficulté est liée à l'échelle, puisque la résolution des images de Météosat première génération, oscille entre 2,5 km pour le visible et 5 km pour le domaine infrarouge moyen (WV) et infrarouge thermique (IR). Pour Météosat seconde génération (MSG) la résolution a été améliorée, elle passe à 3 km pour les 11 canaux de l'imagerie SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*), et à 1 km dans le domaine visible (canal panchromatique). Malgré cette avancée technique, la contrainte d'échelle limite toujours la reconnaissance, à des phénomènes d'extension spatiale assez vaste, compatible avec l'échelle de grandeur d'un pixel.

À côté de ce premier handicap, le gradient tonal constitue un autre obstacle à l'identification. Ce paramètre exprime la réponse de chaque objet en fonction de sa nature. Pour les images visibles, c'est la réflectance de la surface des objets qui est déterminante. Pour les images infrarouges, c'est la luminance des objets qui est essentielle.

Dans le canal visible, le nuage de poussière dont les composants sont d'origine terrigène, peut être difficilement repérable sur le continent, du fait de la réflectance élevée des surfaces. Celle-ci sera d'autant plus importante si la nature du sol est sableuse. Le contraste est plus évident lorsque le lithométéore est évacué sur l'Atlantique et qu'il est en opposition avec la réflectance de l'eau qui est plus absorbante.

Sur les images infrarouges, plus le gradient thermique entre le lithométéore et la surface du sol est élevé, plus le panache constitué par les particules sableuses et poussiéreuses est visible. La température radiométrique du lithométéore est essentielle. Si le phénomène se produit près du sol, il est peu probable qu'il soit identifiable (sauf aux heures les plus chaudes de la journée). Par contre, lorsque les phénomènes d'ascendance sont plus actifs (c'est le cas dans cet épisode de poussière), la convection entraîne les particules à des altitudes élevées favorisant ainsi une baisse sensible de leurs températures. La réponse radiométrique du nuage de poussière apparaîtra ainsi en opposition avec celle apportée par le sol (plus chaud), ce décalage sera d'autant plus marqué que la surface du sol sera réchauffée par le soleil (entre 12 h et 14 h, TU).

1. 3. Les conditions aérologiques de la mise en place du nuage de poussière de mars 2004

La dynamique observée lors du vent de sable de mars 2004, découle d'une descente d'air froid de nord active. Cette configuration aérologique a été largement exposée par (Knippertz *et al*., 2006). Elle se résume en un contact entre l'air froid polaire qui se dirige vers les latitudes méridionales selon une trajectoire (nord-est / sud-ouest) et l'air chaud tropical, qui prend une trajectoire inverse (sud-ouest / nord-est) par effet de compensation (figure 1).

La coulée froide d'altitude est orientée nord-est / sud-ouest, sur un axe allant de la Russie au littoral algérien (figure 2). Ce système a généré une onde cyclonique (visible sur les cartes dès le 2 mars à l'avant d'une dorsale anticyclonique et dirigée par une cellule positionnée sur les Iles Britanniques) qui progresse jusqu'au nord du Sahara algérien.

La trace au sol du front froid qui représente la limite entre les deux courants (chaud et froid) est le siège d'importants mouvements d'ascendances dynamiques. Cette poussée porte les poussières sahariennes à des altitudes élevées de l'ordre de 2 à 3 km. Ce front progresse rapidement vers les latitudes méridionales, matérialisé en surface par un imposant mur de sable. Cette structure épouse parfaitement la limite de la trace au sol du front froid et progresse rapidement en arc de cercle vers le sud-ouest de l'Afrique tropicale.

2. MÉTHODOLOGIE

Deux méthodes de travail ont été utilisées pour cette étude. Une première démarche est basée sur une étude des situations synoptiques ayant engendré cet épisode de poussière, à partir des cartes de surfaces et d'altitudes (500 et 850 hPa). Ces cartes sont publiées quotidiennement et archivées sur le site http://www.wetterzentrale.de. Les données climatiques horaires (vitesse et direction du vent, température et type de temps observés en surface) proviennent des stations localisées sur les aéroports nationaux et internationaux algériens et mauritaniens, elles ont été collectées sur le site http://www .weather.uwyo.

La deuxième démarche se résume en une lecture des évènements à partir de l'image satellite (analyse aérologique et identification du système nuageux ainsi qu'une mise en évidence du nuage de poussière et une évaluation de son extension spatiale). Deux types d'images récupérées sur le site http://www.sat.dundee.ac.uk ont été utilisées. La série horaire d'images Météosat IR (première génération) colorées correspondant au secteur D 2 (Afrique de l'Ouest et Maghreb), du 2 mars à 14 h TU au 3 mars à 22 h TU, et l'image Météosat visible (première génération) totale (Afrique) du 3 au 6 mars enregistrée à 12 h TU. Les deux types d'images ont subi un traitement sous Photoshop par accentuation ou parfois, une réduction des niveaux de gris. Cette manipulation permet de circonscrire la surface du nuage poussière et facilite ainsi sa reconnaissance sur l'image satellite.

3. SUIVI TEMPOREL DU NUAGE DE POUSSIERE SUR LES IMAGES SATELLITE

La disponibilité horaire des images satellite (00, 06, 08, 12, 16, 18 et 22 h TU) rend la lecture de l'événement climatique aisée. L'identification des nuages ne présente pas de difficulté majeure, une distinction est basée sur la forme et l'altitude de chaque système nuageux. La perception du panache de poussière est plus contraignante (difficultés déjà évoquées précédemment), elle impose donc une double lecture sur l'image visible et l'image infrarouge.

3. 1. Evolution du phénomène le 2 mars (montage photo 2)

A 14 h TU, l'expulsion froide vers l'équateur entraîne la formation d'une ondulation sur la partie méridionale du front froid. Ce système en forme de virgule est positionné au centre de l'Algérie, il présente une limite septentrionale très nette. Il est responsable d'une première manifestation de lithométéores qui est visible en gris foncé sur l'image IR de 14 h TU (cette zone présente le long du 30^{e} parallèle, contraste ainsi avec la surface du sol plus chaude à cette heure de la journée et qui apparaît en noir).

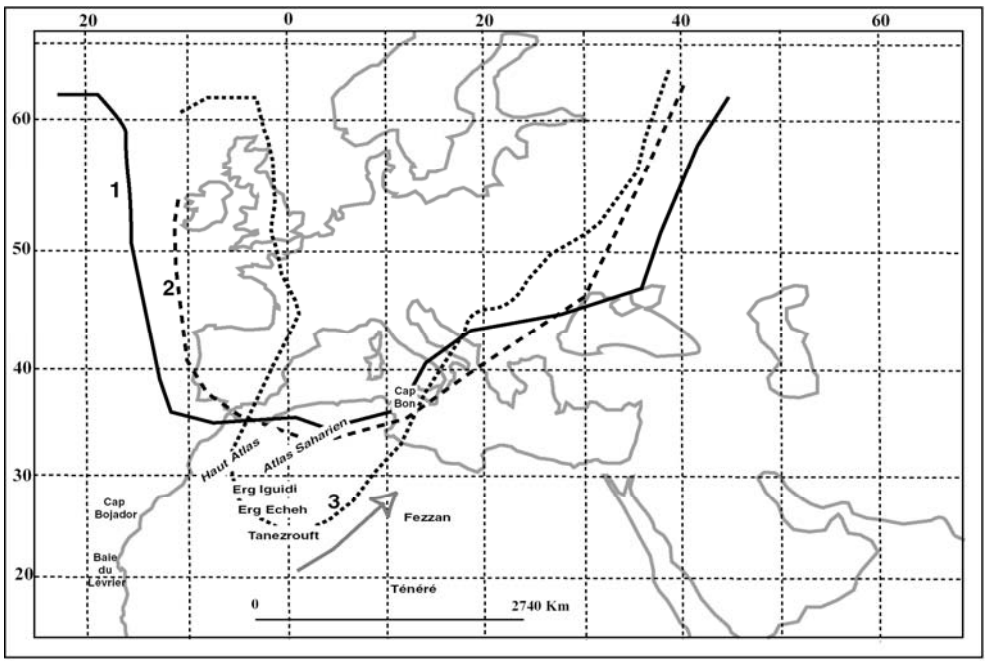


Figure 1. Évolution de l'isotherme[1] 0° C au niveau 850 hPa entre le 1er et le 3 mars 2004. Synthèse obtenue d'après les cartes de températures du niveau 850 hPa publiées sur le site : http://www.wetterzentrale.de

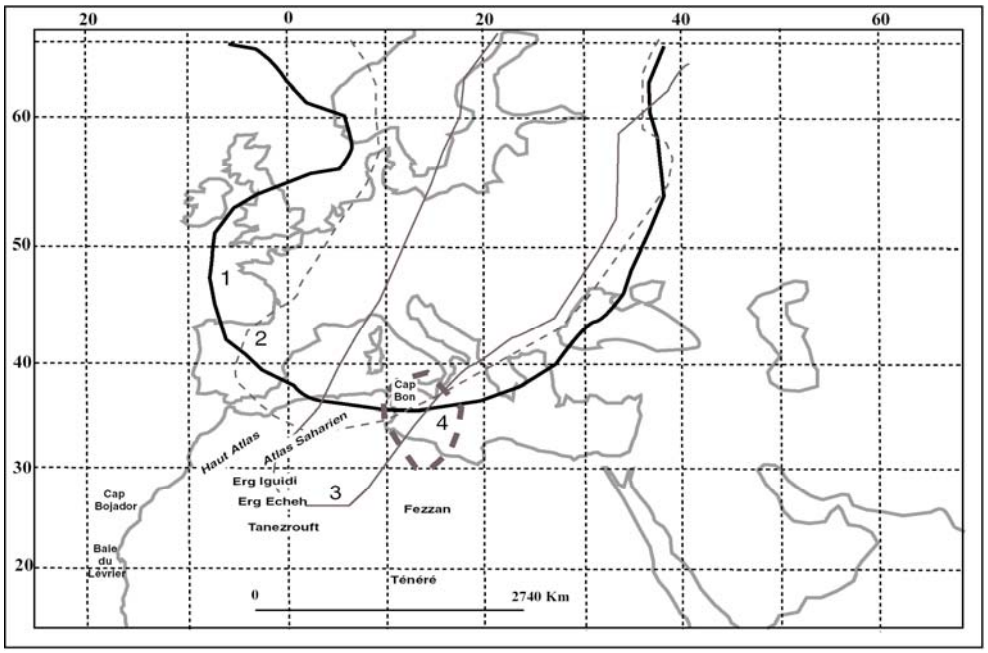


Figure 2. Évolution de l'isohypse 556 dam[2] entre le 1 et le 4 mars 2004. Synthèse obtenue d'après les cartes du géopotentiel à 500 hPa publiées sur le site : http://www.wetterzentrale.de

[1] L'isotherme est une courbe qui relie les points de même température. L'isotherme 0° au niveau 850 hpa, correspond à la courbe 0° dressée à environ 1450 m d'altitude.

[2] Pour réaliser les cartes en altitude les différents modèles utilisés par les services météorologiques font intervenir la notion de « l'altitude géopotentielle ». La hauteur du géopotentiel permet d'obtenir les niveaux de pression constante corrigés pour la variation locale de la gravité (Triplet *et al*., 1986). Les cartes d'altitude représentent ainsi des cartes où la pression est constante et la hauteur variable. Le géopotentiel « 500 hPa » correspond à l'altitude à laquelle on atteint la pression 500 hPa. Cette altitude est évaluée en dam (décamètre) et se situe généralement entre 480 et 600 dam, pour une hauteur moyenne de 556 dam. Pour décrire la topographie de cette surface isobarique, on utilise des lignes « isohypses » qui sont tracées de 4 en 4 dam. Ces lignes tout comme les courbes de niveau d'une carte topographique, représentent le relief de la surface isobarique. Au dessus de l'isohypse 556 dam, les conditions anticycloniques sont prépondérantes, la topographie est en forme de bosse. En dessous de ce seuil, les conditions sont dépressionnaires et la topographie exprime un creux.

La partie nuageuse de l'ondulation s'étend selon une courbure concave qui va de Béchar (au sud-ouest de l'Algérie), au Cap Bon (au nord-est de la Tunisie). Une grande partie du territoire tunisien et libyen sont concernés par des masses nuageuses constituées de bandes spiralées de cumulus, de cumulonimbus et de cirrus. A l'est de ce système, alignées selon une direction sud-ouest / nord-est, des nappes nuageuses cirriformes matérialisent le Jet Subtropical. Ces nuages sont parfois orientés dans un sens transversal à celui de l'alignement dominant du système nuageux.

A 18 h TU, le mouvement spiralé est encore observable. L'ondulation s'élargit et sa partie nord devient très nette. La bande nuageuse frontale s'incurve encore plus vers l'est. Le panache formé par les particules minérales se distingue mieux, il forme un arc de cercle qui se situe légèrement au-delà de la pointe de l'ondulation et qui constitue sa limite méridionale.

3. 2. Evolution du phénomène le 3 mars (montage photo 2)

A 02 h TU, dans son déplacement vers l'ouest, la formation nuageuse s'enroule sur elle-même et forme maintenant la partie antérieure d'une spirale. Le nuage de poussière continue sa progression vers le sud tout en gardant toujours cette limite caractéristique en arc de cercle. L'image traitée sous Photoshop reflète bien cette évolution, malgré l'heure d'enregistrement (02 h TU) peu favorable aux contrastes thermiques.

A 08 h TU, la formation du vortex est presque terminée, la partie sud de la structure tourbillonnaire apparaît en bandes nuageuses, en forme d'arc de cercle. Le centre de ce système commence à grossir petit à petit sous l'afflux des masses nuageuses vers le milieu de la formation spiralée. Malgré l'heure peu favorable à l'observation de ce type de phénomène, le nuage est visible de l'Erg Iguidi dans le Sud Algérien au Fezzan Libyen.

Vers 16 h TU, le vortex est net et les formations nuageuses marquent une belle courbure cyclonique autour de l'axe central. A l'est de ce système, l'aspiration de l'air chaud est marquée par la large bande nuageuse qui visualise le Jet subtropical. La limite méridionale du nuage de poussière est nette, elle forme un immense arc de cercle qui va du Cap Bojador (au Sahara Occidental) jusqu'au désert du Ténéré.

Vers 22 h, le vortex se dissipe et la structure spiralée n'est plus visible. Seul un amas nuageux persiste. Sur cette image, le nuage de poussière poursuit sa progression vers le sud en gardant sa forme caractéristique en arc de cercle. La limite occidentale correspond maintenant à la baie du Lévrier (Mauritanie). On constate aussi qu'une large partie de ce pays est recouverte par ce lithométéore.

3. 3. Evolution du phénomène entre le 4 et le 6 mars (montage photo 3)

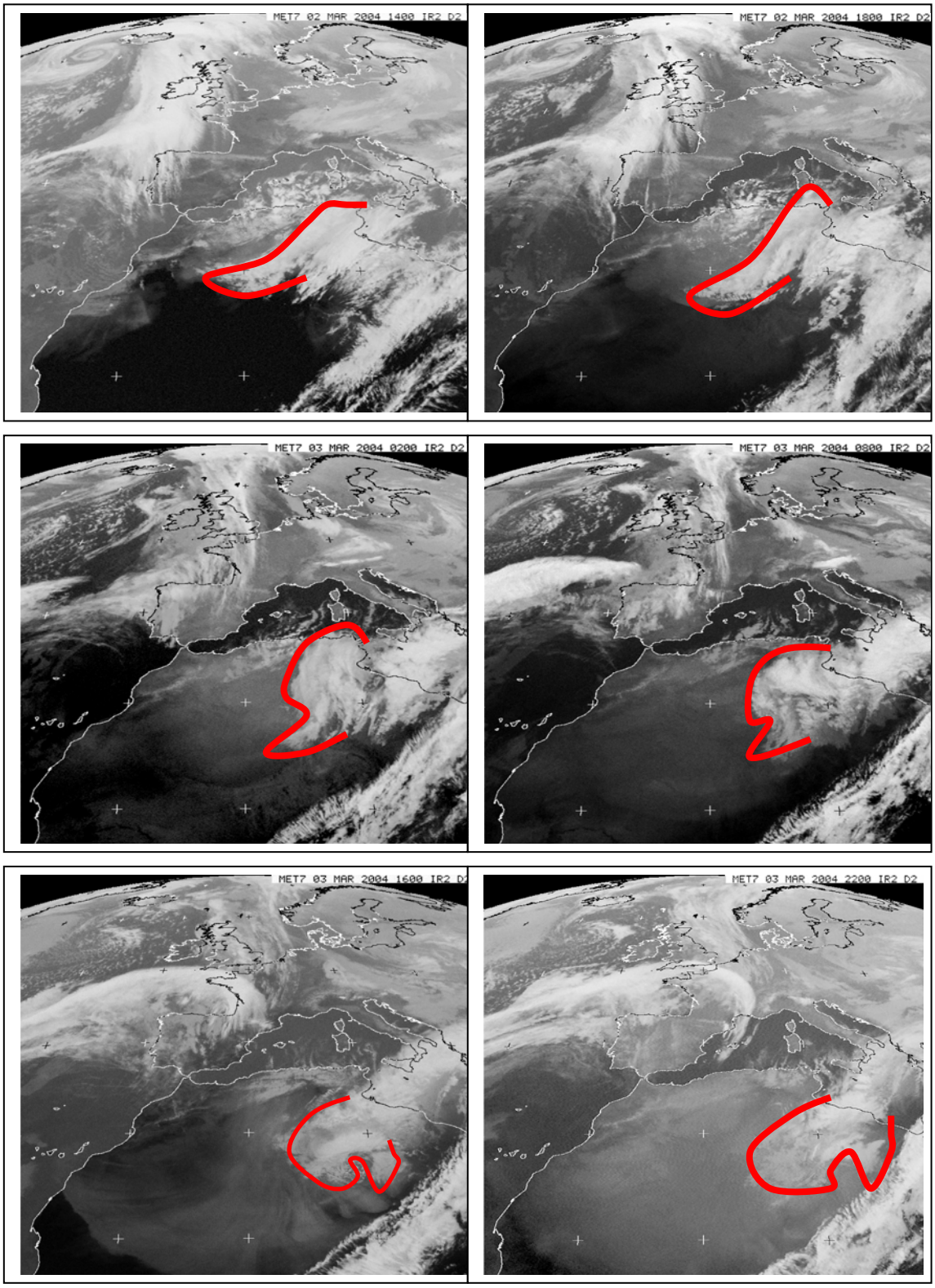
Le 4 mars à 12 h TU, l'image visible montre clairement l'arrivée du lithométéore sur le littoral sénégalo-mauritanien. Dans sa progression vers l'ouest, le nuage de poussière est pris dans le sillage d'une nouvelle coulée anticyclonique froide. Il est aspiré dans le couloir dépressionnaire, il s'incurve et le flux dévié vers le pôle, l'entraîne vers des latitudes plus septentrionales confirmant ainsi cette trajectoire (Constantino *et al*., 2003, Hernandez *et al*., 2005).

Le 5 mars à 12 h TU, le mouvement d'entraînement se poursuit, le ruban de poussière est parfaitement parallèle à un long filament de nuages cumuliformes représentant la zone convective (front froid) d'une perturbation positionnée au large de la péninsule ibérique.

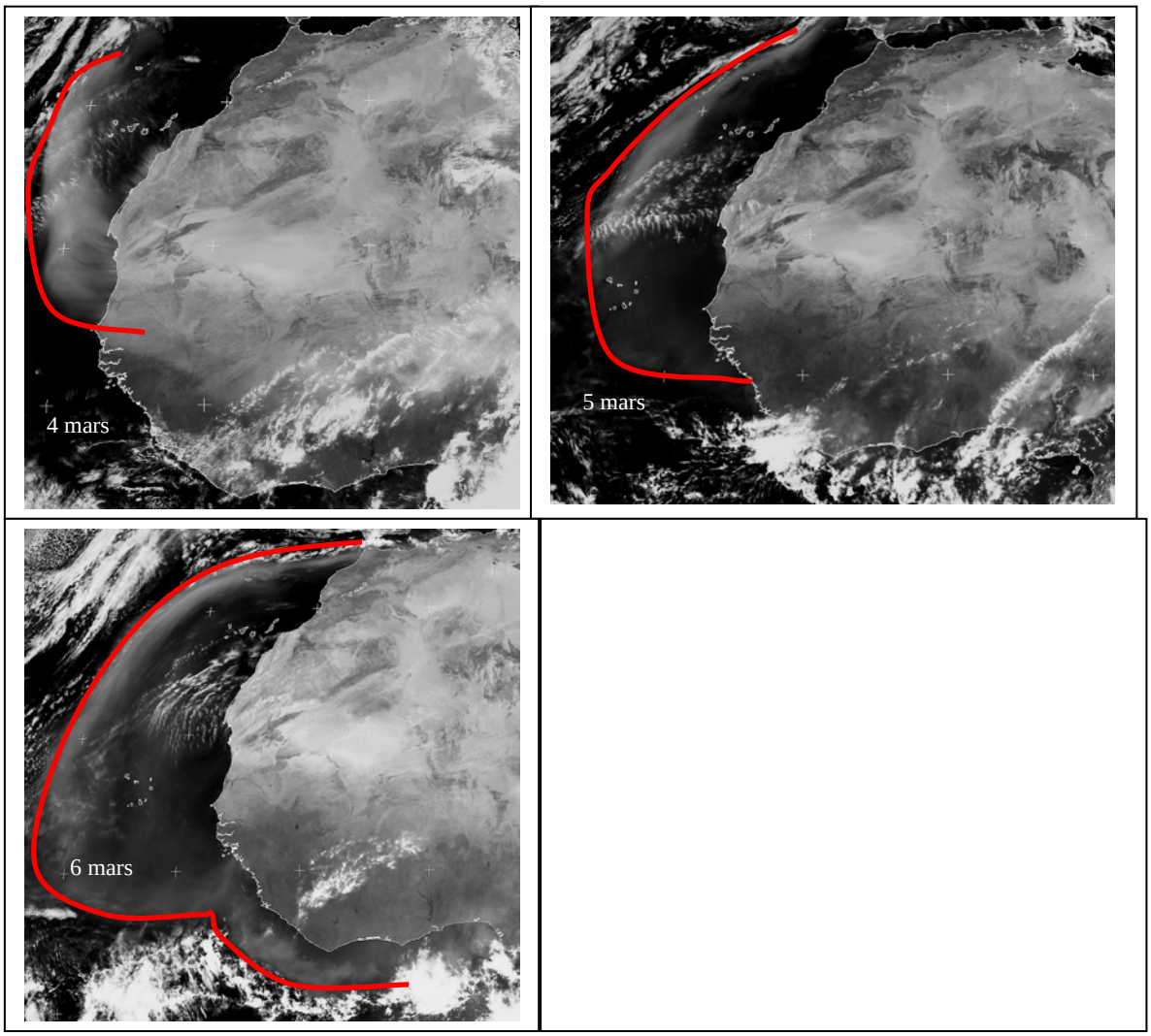
Le 6 mars à 12 h TU, une large zone est maintenant identifiable sur l'image visible au-dessus de l'océan, elle correspond à un afflux considérable de poussières terrigènes. Dans le même temps, une longue courbure qui s'allonge vers le nord, jusqu'à la pointe de Gibraltar, témoigne du retour des poussières vers le continent africain.

L'évolution du système nuageux du 2 au 3 mars montre d'une manière très nette la création d'une formation tourbillonnaire (figure 3). Ce phénomène prend généralement naissance à partir d'une ondulation (2 mars 12 h TU), sur la partie méridionale d'un front polaire, par suite d'une expulsion froide vers l'équateur (Météo-France, 1992). La synthèse obtenue à partir de six images montre le mouvement spiralé des masses nuageuses qui se déplacent lentement vers l'est et s'incurvent petit à petit pour s'enrouler autour de l'axe central le 3 mars à 16 h TU.

La figure 4 résume quant à elle, la progression du lithométéore entre le 2 et le 6 mars. Ce cheminement a été très rapide aux premières heures de sa formation (entre le 2 et le 3 mars). L'expulsion sur l'Atlantique s'est faite dès le 4 mars et se prolonge jusqu'au 6 mars.



Montage photo 2. Images satellite infrarouges (2 mars à 14 et 18 h TU, 3 mars à 02, 08, 16 et 22 h TU) traitées sous Adobe Photoshop. Source : http://www.sat.dundee.ac.uk/.



Montage Photo 3. Images satellite visibles traitées sous Adobe Photoshop du 4, 5 et 6 mars à 12 h TU.
Source : http://www.sat.dundee.ac.uk/

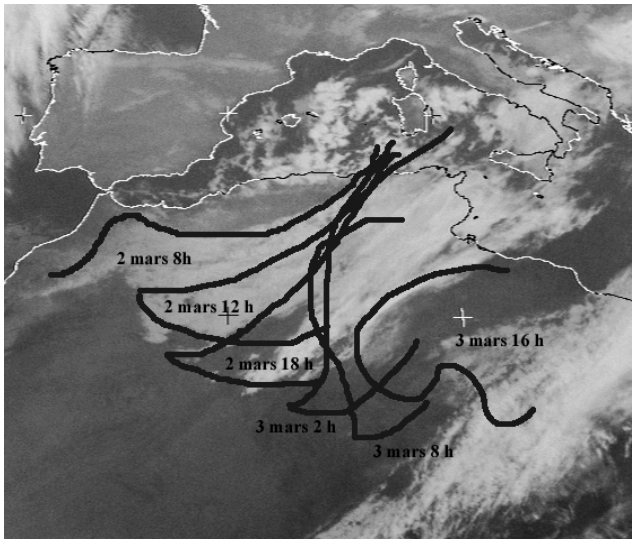


Figure 3. Naissance d'une formation tourbillonnaire associée à une descente froide vers les latitudes tropicales (ondulations du 2 mars 08 h, 12 h, 18 h TU et du 3 mars 02 h, 08 h, 16 h TU). L'image d'arrière-plan correspond à l'image infrarouge du 2 mars à 08 h TU.

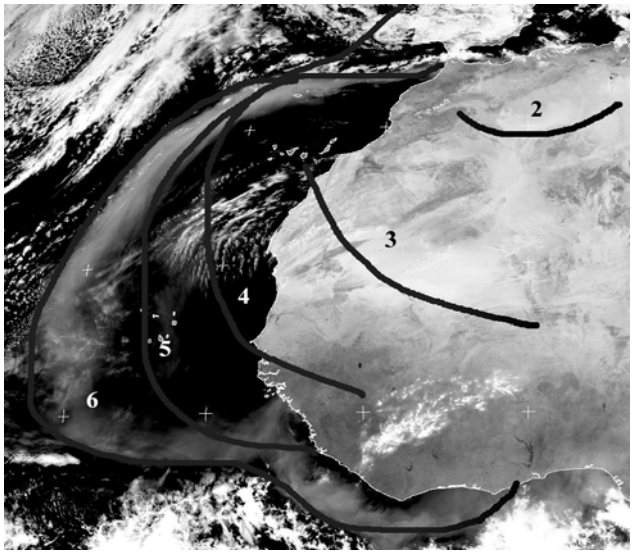


Figure 4. Limite de progression du lithométéore du 2 au 6 mars à 12 h TU
(l'arrière-plan de la figure correspond à l'image visible du 6 mars 2004 à 12 h TU).

5. ÉVOLUTION TEMPORELLE DU PHENOMENE ENTRE LE 2 ET LE 6 MARS 2004

Les observations au sol effectuées le 2 mars à 14 h TU sur le territoire algérien, révèlent des vitesses de vent supérieures à 35 km/h au-delà d'une limite méridionale matérialisée par le 30^{e} parallèle. En général, les directions affichent un antagonisme des flux avec un secteur sud-ouest dans le Sud algérien et nord à nord-est dans les régions septentrionales.

Les températures restent assez fraîches pour la saison dans la partie nord du Maghreb. Elles oscillent entre des valeurs inférieures à 5° C dans le nord-est et proches de 10° C sur le nord du Sahara. À Tébessa, le thermomètre affiche 1° C, on note même des chutes de neige sur ce secteur. Sur les hauts plateaux de l'Ouest algérien, les mêmes conditions sont observées (températures basses et chutes de neige à Tiaret). Ailleurs, le temps est nuageux et tourne même à l'orage sur le versant méridional de l'Atlas saharien (Biskra). Ces conditions témoignent ainsi d'une intense dynamique des masses d'air responsables des soulèvements de poussières et de sables observés (chasse-sable et poussière en suspension) dans toute la partie saharienne de l'Algérie.

La figure 5 rend compte de la progression rapide du phénomène ; le front qui est le siège d'affrontements entre les masses d'air se déplace rapidement vers le sud, entre 11 et 14 h TU, les vitesses du vent sont supérieures à 60 km/h à El Goléa (latitude : 30,56° ; longitude : 2,86°). À partir de 15 h TU et jusqu'à 17 h TU, on enregistre à Timimoun (latitude : 29,25°; longitude : 0,28°) des pointes de vent proches de 60 km/h. A Adrar (latitude : 27,88° ; longitude : - 0,28°), c'est entre 17 h TU et 18 h TU que les vitesses ont été les plus fortes avec un maximum de 74,1 km/h à 17 h TU. C'est d'ailleurs dans cette station que le lithométéore (chasse- sable) observé lors des périodes précédentes, se transforme en tempête de sable (observation de 17 et 18 h TU).

La situation météorologique et la nature du sol, sont des éléments essentiels dans la formation des lithométéores. Les vitesses du vent restent cependant un élément primordial qui conditionne la prise en charge du matériel fin. Si les vitesses sont supérieures à 22 km/h, le mouvement potentiel éolien est plus important, l'observation de tempête de sable devient très probable (Nouaceur, 1998). Les vitesses inférieures au seuil précédent déclenchent, quant à elles, des chasse-sable d'accélération. La brume de poussière est un phénomène souvent observé par temps relativement calme.

L'observation des différents types de lithométéores se décale ainsi en fonction de la latitude et de la progression du phénomène. La tempête de sable aborde le littoral sénégalo-mauritanien, le 4 mars (figure 6) en laissant derrière elle des types de temps de chasse-sable et de brume de poussière. Des différences de vitesses de vent sont constatées pour un même phénomène observé, entre les données enregistrées à Nouakchott et celles relevées dans les stations algériennes, (tempête de sable avec respectivement 41 km/h à Nouakchott et 74 km/h à Adrar) (figure 6). Ce décalage est expliqué par la proximité des stations algériennes de la formation tourbillonnaire, ce qui a favorisé la forte accélération des vents. Il découle aussi de l'existence d'un réel blocage aérologique sur cette partie de l'Afrique (subsidence anticyclonique et inversion de l'alizé maritime sur le littoral sénégalo-mauritanien (Nouaceur, 1994).

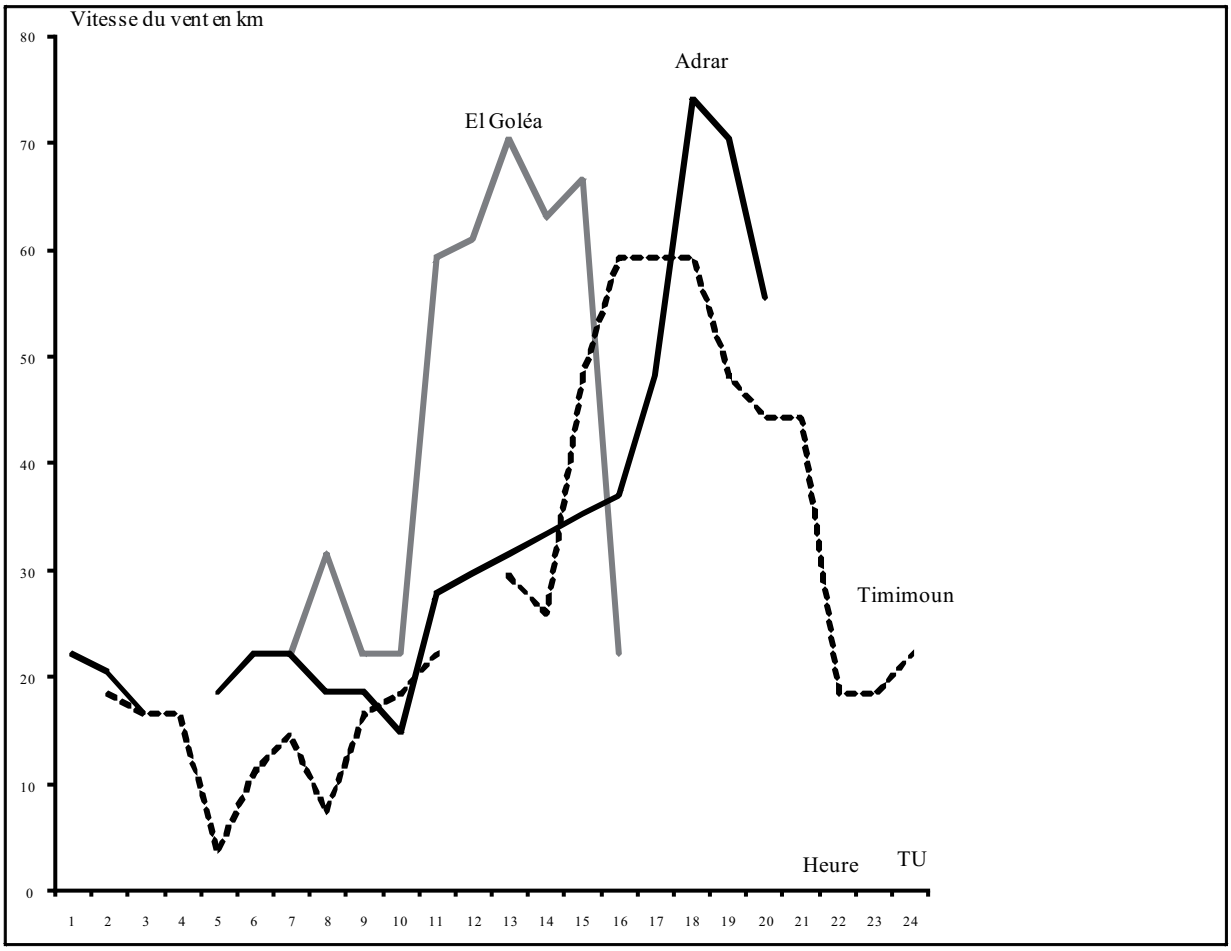


Figure 5. Évolution temporelle des vitesses du vent le 2 mars 2004 à El Goléa, Timimoun et Adrar (Algérie). D'après les données collectées sur le site http:// www .weather.uwy./

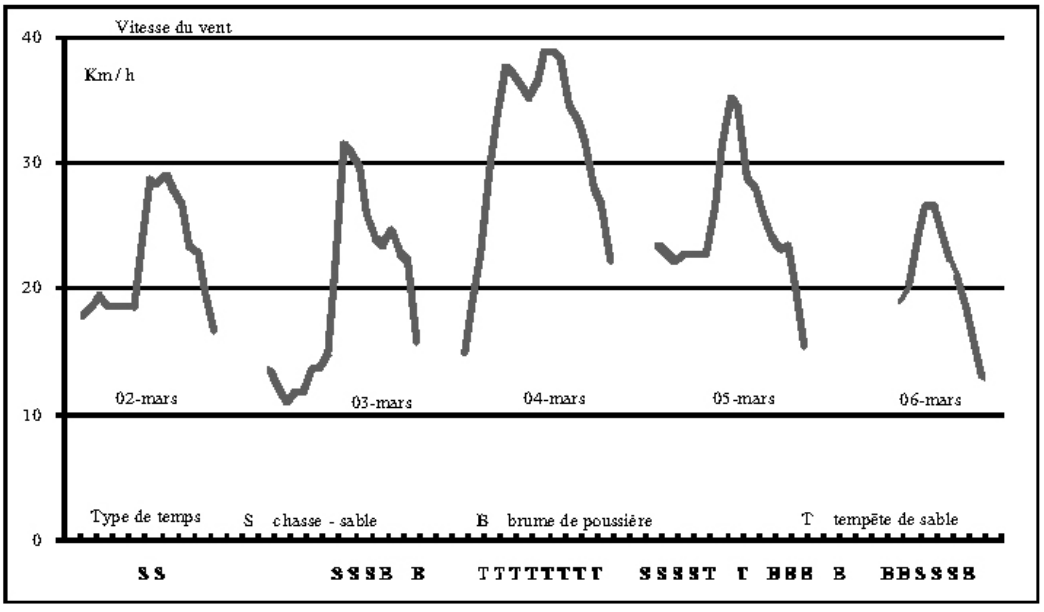


Figure 6. Évolution temporelle des vitesses du vent et des types de temps entre le 2 mars et le 6 mars 2004 à Nouakchott en Mauritanie (moyenne glissante tri-horaire). D'après les données collectées sur le site http: // www .weather.uwyo.

CONCLUSION

Les images-satellite Météosat représentent un outil remarquable de précision. Lors cet épisode de poussière, elles ont permis non seulement d'observer le début de la formation du lithométéore, mais aussi de suivre sa progression depuis le Sahara algérien, jusque vers le sud-ouest de l'Afrique occidentale. Les lithométéores représentent des types de temps spécifiques des régions arides et sem-arides. Ces phénomènes sont responsables d'une érosion considérable des régions sahariennes et sahéliennes. Les particules charriées chaque année au gré des directions de vent dominantes représentent la source la plus importante d'aérosols terrigènes à l'échelle mondiale (Javier *et al*., 2002).

Le suivi des lithométéores sur les images-satellite permet de pallier la faible densité des réseaux de mesure africains. Durant l'épisode de mars 2004, l'utilisation de cet outil a permis d'apprécier la magnifique courbure du nuage de poussière, qui épouse parfaitement la trace au sol du front froid. Grâce aux images, il a été aussi facile de préciser les trajectoires éoliennes. De même qu'il a été aisé de montrer le rôle des couloirs dépressionnaires situés à l'avant des coulées anticycloniques, dans l'aspiration des panaches de poussières et leur intégration dans la circulation zonale. Si ce phénomène climatique a pu être étudié et observé sur plusieurs jours sur les images- satellite, c'est grâce d'une part, à l'importance de son extension spatiale et, d'autre part, à l'intensité des phénomènes convectifs ayant généré des mouvements de masses importants. Malheureusement, ces paramètres ne sont pas toujours réunis et tous les phénomènes lithométéoriques ne possèdent pas de telles caractéristiques. Il est ainsi très difficile de les appréhender sur des images Météosat dont la résolution oscille pour la première génération entre 2,5 km dans le domaine visible et 5 km dans l'infrarouge, et une résolution plus fine pour les images de seconde génération (1 km pour le canal panchromatique visible et 3 km pour les autres canaux). Il n'en demeure pas moins que la disponibilité, l'importance des archives et la gratuité d'utilisation des images Météosat en font un outil scientifique extrêmement convoité et utilisé par les chercheurs qui travaillent sur l'Afrique.

Remerciements :

L'auteur tient à remercier, les différents services qui ont mis à sa disposition les cartes, les données météorologiques et les images du satellite Météosat :

Données météorologiques des stations africaines : *University of Wyoming, College of Engineering, Depertment of Atmospheric Science* [http://www .weather.uwyo]

Données météorologiques (Carte de surface et d'altitude) : *Wetterzentrale. Organisme météorologique Allemand* : [http://www.wetterzentrale.de]

Images Météosat. *University of Dundee* (UK) [http://www.sat.dundee.ac.uk]

Bibliographie

Béranger, M. (s.d.) . Contribution à l'étude des lithométéores. Notice d'Information Technique. Direction de la Météorologie Nationale, 35 p.

Constantinon, C., Pedro, D. (2003) An unusual "blood rain" over the Canary Islands "Spain". The storm of January 1999. Journal of Arid Environments, 55, p 765-783.

Deuze, J. L., Devaux, C., Herman, R., Santer, R., Tanre, D. (1988) Saharan aerosols over the south of France : characterization derived from satellite data and ground based measurements. Journal of Applied Meteorology, V 27, p 680-686.

Dubief J. (1951) Les vents de sable au Sahara français, Actions éoliennes Phénomènes d'Evaporation et d'Hydrologie Superficielle dans les Régions Arides, Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS XXXV, p 47-57.

Hernandez, F., Alonso-Perez, S., Hernandez-Armas, J. (2005) Influence of major African dust intrusions on the Cs-137 and K-40 activities in the lower atmosphere at the Island of Tenerife. Atmospheric Environment, 39 (22): p 4111-4118.

Javier, P. M., Octavio, L. Leire, M. Ma, J. Andrès, C. (2002) Saharan dust storm over the Canary Island during winter 1998 as depicted from advanced very high-resolution radiometer. Deep Sea Research II, n° 49, p 3465-3479.

Knippertz, P., Fink, A.H. (2006) Synoptic and dynamic aspects of an extreme springtime Saharan dust outbreak. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 132 (617): p 1153-1177, Part B.

Legrand, M., Desbois, M., Vovor, K. (1988) Satellite detection of Saharan dust : optimized imaging during nighttime. Journal of climate, vol.1, p 256-264.

Legrand, M., Plana Fattori, A., Rosin, J., (2001). Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat: 1. Infrared difference index. Journal of Geophysical Research, vol.106, p 251-274.

Météo – France., (1992) Photographies météorologiques satellitaires, interpretation, utilisation, Connaissance de la Météorologie n° *2*, Paris, Direction de la Météorologie Nationale, Fascicule 1, 43 p, Fascicule 2, 152 p.

Mokhnache, A. (2000) Détermination de l'épaisseur optique des aérosols par ciel clair pour estimer le coefficient de réflectance bidirectionnel à partir d'images du canal visible de VISSR de Météosat. Télédétection, vol. 2, n° 1, p 39-46.

Merchant, C. J., Embury, O., Le Borgne, P., Bellec, B. (2006) Saharan dust in nighttime thermal imagery : detection and reduction of related biases in retrieved sea surface temperature. Remote Sensing of Environment, 104, p 15-30.

Nouaceur, Z. (1994) Les variations spatio-temporelles et les causes de mauvaise visibilité en Mauritanie. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, Association Internationale de Climatologie, Thessalonik, vol. 7, p 477-484.

Nouaceur, Z. (1998) Sécheresse climatique érodibilité des sols et dynamique éolienne : essai de synthèse cartographique du risque éolien. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, Association Internationale de Climatologie, Thessaloniki, vol. 11, p 200-207.

Oliva, P., Coude, G. Delannoy, H. Dorize, L. Rognon, P. Tabeaud, M. (1985) Etude de la dynamique de quelques lithométéores saharien par télédétection spatiale. Méditerranée, n° spécial Télédétection III, Tome 54, 1, 2, p. 21-52

ORSTOM (1983), La surveillance des grands évènements climatiques à partir d'observations satellitaires, Initiation-Documentations techniques n° 61, Télédetection 9, 18 p, Paris.

Plana Fattori, A., (1994), Simulation de l'impact de l'aérosol désertique sur les températures de surface du sol et sur les luminances émergentes de la planète dans la région spectral 10,5-12,5 microns. Application à l'interprétation de l'imagerie METEOSAT-IR . Université de Lille 1, 362 p.

Triplet J.P., Roche G., 1986, *Météorologie générale*, Météo France, 317 p.

Vergé-Dépré, G., Legrand, M., Moulin, C., Alias, A., François, P., (2006) Improvement of the detection of the desert dust over the Sahel using METEOSAT IR imagery. Annales Geophysicae, 24, p 2065-2073

Sites Internet

http://www.sat.dundee.ac.uk (2008)
http://www.wetterzentrale.de (2008)
http://www .weather.uwyo (2008)