Les aérosols atmosphériques, qu'est-ce que c'est ?

Youva AOUN, MINES ParisTech, PSL - Research University, O.I.E. - Centre Observation, Impacts, Energie, CS 10207 rue Claude Daunesse 06904 Sophia Antipolis Cedex, France

1 Introduction

Dans le contexte actuel qui voit les conséquences du changement climatique s'intensifier, les aérosols sont des constituants atmosphériques encore mal connus et qui pourraient avoir une influence particulièrement importante sur le climat et le budget radiatif terrestre.

Cette communication se fait dans le cadre de la vulgarisation de ma thèse portant sur l'évaluation des capacités de l'instrument *Flexible Combined Imager(FCI)* à détecter et à caractériser les aérosols, leur type et leur concentration. L'instrument FCI doit être embarqué à bord du futur satellite Meteosat Troisième Génération.

Dans ce but, je vais définir ce que l'on appelle les aérosols atmosphériques et décrire leur impact sur notre vie quotidienne.

Je présente ensuite les moyens actuels dont nous disposons pour détecter et surveiller les aérosols, ainsi que les atouts et les limitations de ces moyens.

Enfin, je décris le projet Meteosat depuis ses débuts et les apports que représentera Meteosat Troisième Génération pour la détection, la caractérisation et la surveillance des aérosols atmosphériques.

2 Les aérosols

La définition du dictionnaire Larousse indique que les aérosols correspondent à une suspension dans l'air troposphérique (de la surface à une dizaine de kilomètre) ou stratosphérique (jusqu'à une cinquantaine de kilomètres) de très petites particules ou de gouttelettes.

Les origines des aérosols sont multiples et peuvent être :

- naturelle comme les poussières d'origine désertiques, les cendres volcaniques ou les pollens ;
- liées à l'activité humaine – ou anthropogènes – comme les particules fines, les résidus de combustion des moteurs thermiques, le carbone noir issu de la combustion de matières organiques.

Ces particules ont des impacts directs ou indirects sur le climat de la planète et la vie à sa surface.

2.1 Les aérosols dans notre vie de tous les jours

La santé humaine est par exemple fortement altérée par la présence de particules fines ou ultrafines généralement anthropogènes, comme l'amiante ou les particules émanant des moteurs diesel que nous sommes amenés à respirer dans les zones densément peuplées.

Certaines études montrent que dans l'état actuel des règlementations européennes visant à limiter la pollution atmosphérique due aux particules fines et ultrafines, une part importante de la population européenne perdrait jusqu'à 200 jours d'espérance de vie à cause de la forte concentration de ces particules dans les grandes agglomérations du continent. Une carte présentant ces résultats est visible dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. La diminution d'espérance de vie croît du bleu foncé (17 jours) au rouge foncé (200 jours). Les causes principales de cette émission sont les rejets faits par les industries, le chauffage ainsi que les modes de transport favorisant l'usage des moteurs thermiques.

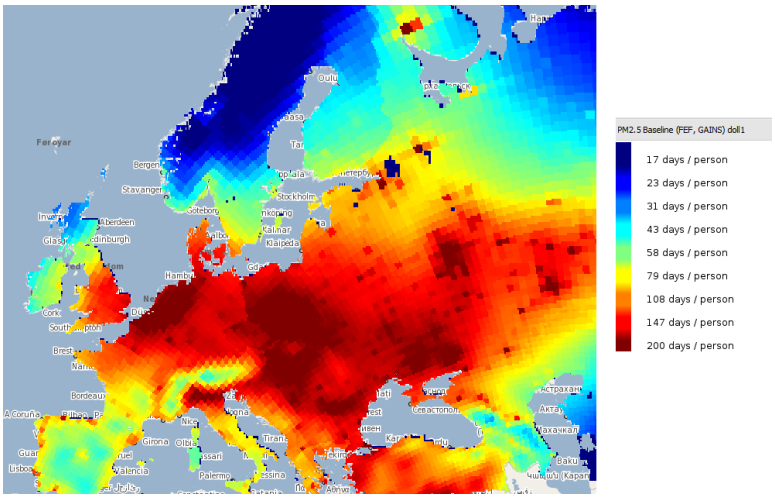


Figure 1 : Réduction de l'espérance de vie en jour en fonction de la concentration en particules fines si on conservait le modèle énergétique de 2005. Source : http://www.oie.mines-paristech.fr/Actualites/Actualite-partagee/Sante-humaine-et-pollution-atmospherique/973

2.2 L'impact climatique des aérosols

L'impact des aérosols sur le climat est potentiellement très important selon le rapport de 2007 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) sur le changement climatique. Mais cet impact est encore très mal compris et est caractérisé dans ce rapport par une très grande incertitude et un faible niveau de connaissance scientifique.

Nous allons voir quels pourraient être les impacts ambivalents des aérosols sur le climat.

2.2.1 Aérosol noyau de condensation

Les aérosols se comportent comme des noyaux de condensation pour la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère. Ils favorisent la formation de gouttelette autour d'eux, et donc contribuent à une augmentation de la couverture nuageuse.

De manière générale, les nuages réfléchissent la lumière du soleil vers l'espace plutôt que de la transmettre vers le sol. Il fait donc plus froid quand il y a des nuages. Donc, plus il y a d'aérosols dans l'atmosphère, plus il peut se créer de nuages et plus il fait froid au sol. L'influence des aérosols atmosphériques sur le climat serait donc refroidissante.

2.2.2 Incertitude sur le coefficient d'absorption

Cependant, d'autres études montrent que la connaissance des propriétés optiques des aérosols nécessite encore un approfondissement et que l'incertitude sur ces connaissances pourrait amener des considérations opposées quant à l'influence des aérosols atmosphériques sur le climat.

L'incertitude de leur influence sur le climat provient d'une méconnaissance du coefficient d'absorption de certains aérosols comme le carbone noir, issus de la combustion de matières organiques (par exemple lors de feux de forêt) ou de la teneur en composés ferreux des poussières désertiques qui peuvent être transportés sur de très longues distances.

Le rayonnement solaire est partiellement absorbé par ces aérosols qui dissipent cette énergie sous forme de chaleur. Cette chaleur réchauffe l'atmosphère et atténue la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes. La formation de nuage diminue.

Une réduction de la couverture nuageuse engendre une augmentation du réchauffement de la planète. Moins il y a de nuages, moins de rayonnement est réfléchi par ceux-ci. Une quantité plus importante de rayonnement solaire arrive donc au sol et réchauffe la planète.

Les aérosols empêchent aussi la dissipation nocturne par rayonnement thermique et contribuent à l'effet de serre. Par ailleurs, les aérosols peuvent aussi augmenter la couverture nuageuse et la durée de vie des trainées de condensation produites par les avions, en agissant comme des noyaux de condensation.

En résumé, l'incertitude est encore très importante vis-à-vis du rôle joué par les aérosols sur le changement climatique. Pour mieux comprendre leur comportement, il faudrait avoir une meilleure connaissance de leur émission, de leur transport et de la répartition de leur concentration dans l'espace et le temps.

2.3 Impact sur le rayonnement solaire

L'influence des aérosols sur le rayonnement solaire peut aussi être déterminante dans le choix de technologie de conversion du rayonnement solaire en énergie.

En effet, lorsque le rayonnement solaire arrive au sommet de l'atmosphère, il est exclusivement composé de rayonnement direct, i.e. venant de la direction angulaire du centre du soleil. L'espace interplanétaire situé entre la Terre et le soleil étant par définition vide, il ne diffuse pas la lumière.

Au cours du trajet descendant dans l'atmosphère du rayonnement solaire, il est absorbé et diffusé par les constituants atmosphériques comme la couche d'ozone qui absorbe une grande partie du rayonnement ultra-violet. Les particules et les molécules présentes dans l'atmosphère atténuent le rayonnement direct au profit du rayonnement diffus.

Cette constatation est d'importance pour les technologies de conversion du rayonnement solaire dites à concentration. Ces systèmes sont très efficaces et reposent sur des technologies de concentration de l'énergie incidente à l'aide de miroirs comme on peut le voir sur la Figure 2 ou de lentilles de Fresnel. Il s'agit du même genre de mécanisme que lorsqu'on concentre le rayonnement solaire avec une loupe pour enflammer une feuille de papier.



Figure 2 : installation de conversion thermique du rayonnement solaire sur le site de la CNIM à La Seyne sur Mer dans le Var (Credit : Roseline Adde-Wald)

Ces systèmes à concentration sont fortement dépendants de la composante directe du rayonnement solaire et nécessitent un suivi de la course solaire très précis. Leur rendement baisse très fortement au passage de nuage et aussi en fonction de la concentration d'aérosols dans l'atmosphère. Plus il y a d'aérosol, plus la diffusion augment, moins il y a de rayonnement direct pouvant être focalisé.

Les zones les plus ensoleillées de la planète, donc les plus intéressantes pour l'installation de grande ferme de panneaux solaires ou de centrale solaire à concentration, sont généralement des zones désertiques comme le Sahara. Or, le Sahara est la première source d'aérosol désertique du monde et ces aérosols désertiques diffusent la lumière comme on peut le voir dans la Figure 3. Sur cette figure, on observe une tempête de sable en provenance du Sahara passer de la côte ouest-africaine à l'Océan Atlantique. En haut de la photo, l'océan apparaît sombre car l'océan lui-même réfléchit peu la lumière reçue et l'atmosphère claire diffuse peu le rayonnement solaire vers l'instrument à bord du satellite. Le signal reçu par l'instrument est donc faible. Plus au Sud, le nuage de poussières désertiques rétrodiffuse les rayons solaires vers l'instrument qui reçoit donc un signal plus élevé qui se traduit par des teintes plus claires.

En résumé, les zones où nous pourrions installer des centrales solaires très efficaces sont régulièrement le théâtre de tempêtes de sable venant contre-indiquer l'installation ou la pérennité de ces centrales. Il en découle donc à nouveau la nécessité de mieux connaitre la présence d'aérosols dans l'atmosphère afin de mieux estimer la ressource solaire disponible. Une surveillance à grande échelle pourrait aussi permettre de prévoir les périodes où la production solaire ne pourrait plus être possible, typiquement pendant les épisodes de tempête de sable et d'adapter la production en conséquence.

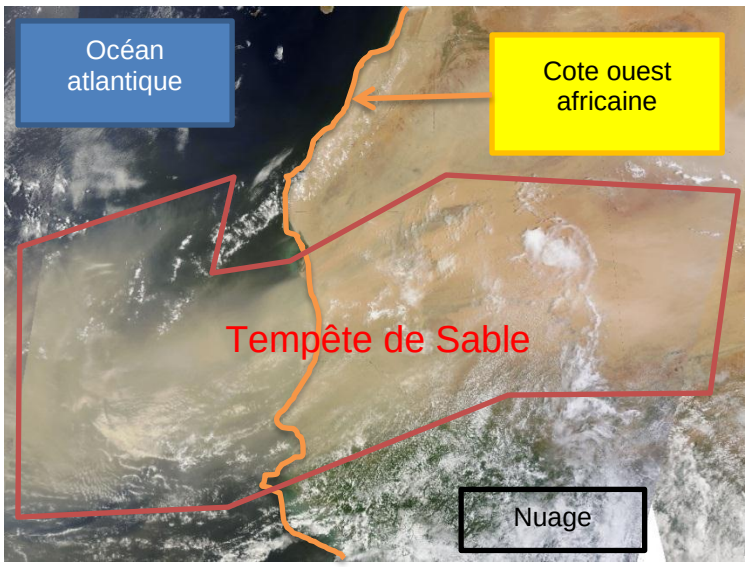


Figure 3 : tempête de sable au-dessus de la côte ouest africaine le 21 janvier 2011. (Source : NASA MODIS)

2.4 L'impact des aérosols sur l'économie

Un autre impact des aérosols est épisodiquement mis en évidence par les éruptions volcaniques. En effet, les cendres volcaniques sont des aérosols et sont notoirement connues pour endommager les systèmes avioniques et les moteurs des avions de ligne. Elles ont notamment causé l'annulation d'environ 16 000 vols commerciaux par jour dans toute l'Europe durant l'éruption de l'Eyjafjöll en avril 2010. On peut voir sur la Figure 4 les espaces aériens partiellement ou totalement fermés le 18 avril 2010. Les pertes ont été évaluées à 140 millions d'euros par jour et plus 1,5 milliard d'euros sur la totalité de l'éruption.

Ces aérosols sont particulièrement absorbants comme le montre la Figure 5 où on peut voir un panache de cendres très foncé, donc très absorbant, sortir du volcan. Les cendres volcaniques lors d'une éruption sont expulsées très haut dans l'atmosphère et atteignent la couche atmosphérique supérieure, la stratosphère (entre 8,5 et 20 km d'altitude) où leur durée de vie est grande, de l'ordre de l'année contre quelques semaines voire jours pour les autres types d'aérosols. Ces cendres volcaniques contribuent à la réduction du rayonnement solaire incident au sol, à l'effet de serre et peuvent être nocifs pour la santé humaine.

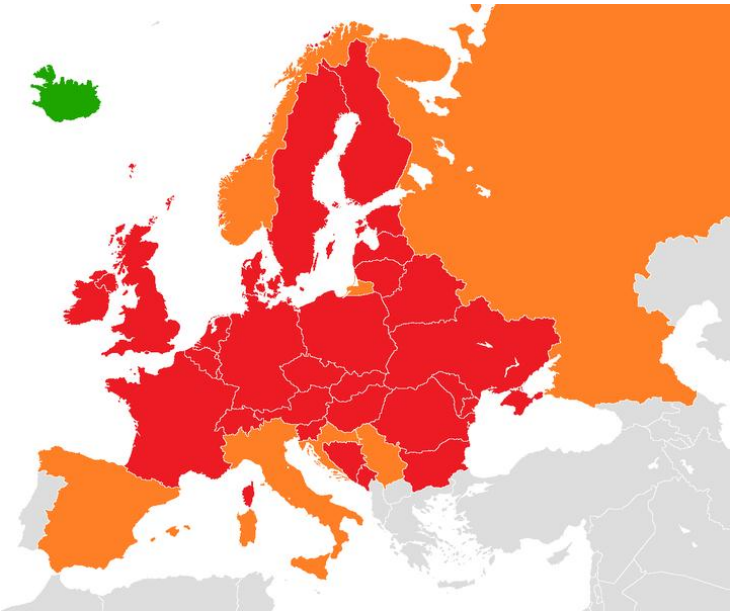


Figure 4 : Carte des espaces aériens partiellement (orange) et totalement fermés (rouge) le 18 avril 2010. L'Islande (vert) n'a pas eu à fermer son espace aérien en raison de vent soufflant vers l'Est.(Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9percussions_de_l%27%C3%A9ruption_de_l%27Eyjafj%C3%B6ll_en_2010_sur_le_trafic_a%C3%A9rien)



Figure 5 : Vue panoramique de l'Eyjafjallajökull avec le panache de cendre volcanique s'étirant vers le sud le 17 avril 2010. (Source : http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89ruption_de_l%27Eyjafj%C3%B6ll_en_2010)

Tous ces exemples montrent que la connaissance et la surveillance des aérosols relèvent d'une priorité pour la santé, pour l'estimation de la ressource solaire, des changements climatiques ou de la sécurité aérienne.

2.5 Comment observe-t-on les aérosols ?

Les particules présentent dans l'atmosphère interagissent avec la lumière par deux moyens, l'absorption et la diffusion. Ce sont ces deux interactions qui permettent d'observer des particules en suspension dans l'atmosphère, car elles perturbent la propagation de la lumière.

La diffusion est fortement dépendante de la taille des particules considérées, mais aussi de la longueur d'onde du rayonnement (voir Figure 8). Les molécules de dioxygène et de diazote sont de très petite taille. Elles diffusent plus fortement les rayonnements de plus petite longueur d'onde (le bleu). Cette diffusion homogène obéissant aux lois de Rayleigh va donner sa couleur bleue au ciel.



Figure 6 : Diffusion de la lumière dépendent de la longueur d'onde du rayonnement et de la taille de la particule diffusante. Plus la particule est grande devant la longueur d'onde plus la diffusion est directionnelle.

Les aérosols de plus grand diamètre diffusent suivant la théorie de Mie. Il s'agit d'une diffusion directionnelle. Il y a une plus grande proportion de l'énergie qui est diffusée dans la même direction que le sens de propagation de l'onde électromagnétique. Cette diffusion ne perturbe pas complètement le rayonnement solaire, mais diminue la composante directe au profit de la composante diffuse dans une région périphérique du soleil (cicumsolaire).

L'absorption, quant à elle, va s'exprimer par l'absorption d'une partie de l'énergie du rayonnement solaire. Cela se produit en modifiant les états d'énergie de la matière composant les aérosols.

L'absorption du rayonnement solaire est principalement causée par les molécules présentes dans l'atmosphère comme l'O2, le H2O ou l'O3. Les différentes raies d'absorption sont présentées dans la Figure 7. Par exemple, l'ozone absorbe en grande partie les UV, ce qui nous protège de ces rayonnements de haute énergie et prévient les cancers de la peau.

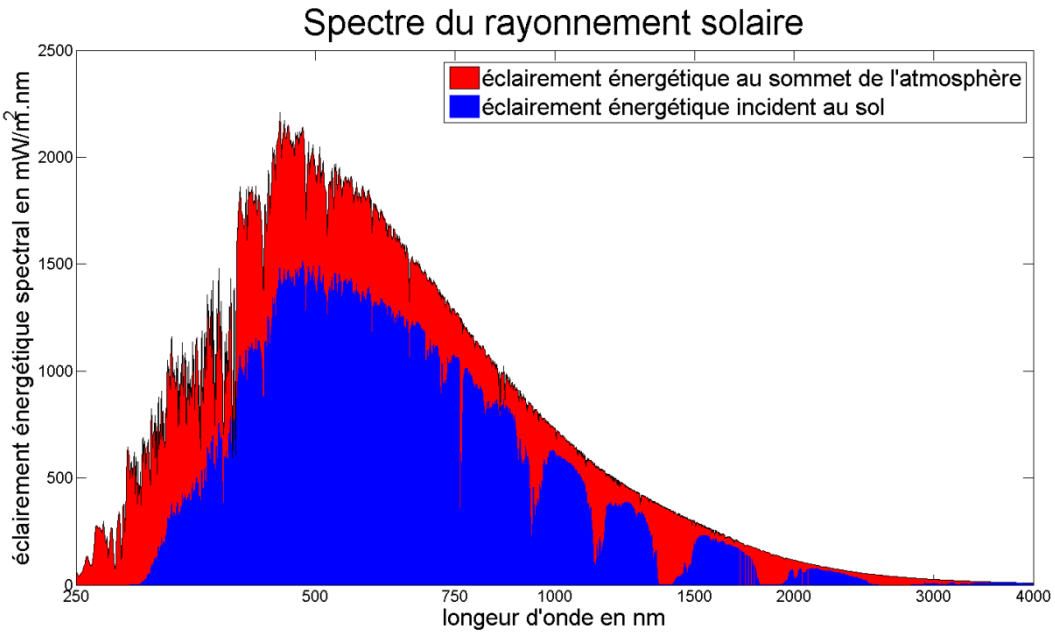


Figure 7 : Spectre du rayonnement solaire représentent l'absorption de celui-ci. En rouge le spectre au sommet de l'atmosphère, en bleu le spectre après traversée de l'atmosphère, soit au niveau de la mer.

Les aérosols n'absorbent pas ou peu le rayonnement électromagnétique. On observe des nuages blancs ou grisâtres au-dessus des villes polluées, car ils diffusent essentiellement la lumière sans l'absorber. Par contre, les aérosols contenus dans la fumée noire des feux de forêt ou les panaches volcaniques, très sombres, absorbent fortement la lumière. Ils réduisent donc le rayonnement qui atteint nos yeux et apparaissent noirs.

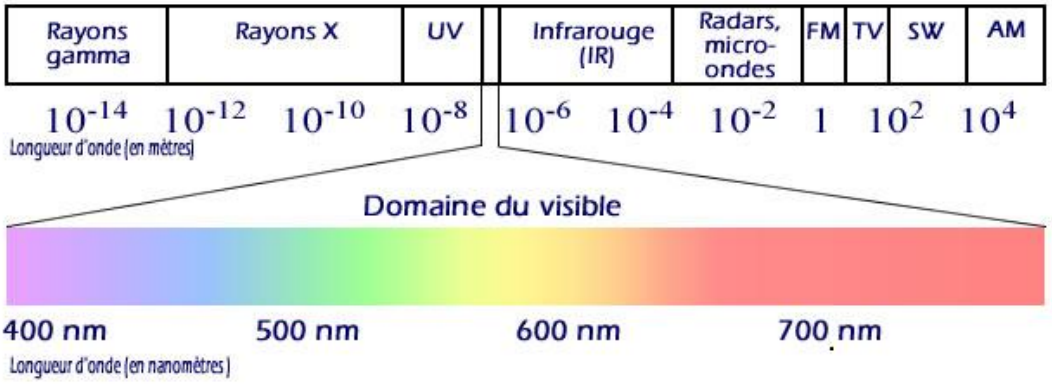


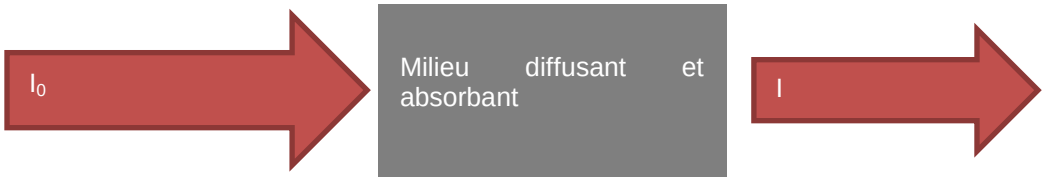
Figure 8 : La longueur d'onde du rayonnement électromagnétique, mis dans le contexte de la lumière visible

D'un point de vue pratique, on mesure l'épaisseur optique des aérosols, c'est-à-dire l'atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère et les composés qu'elle contient.

On applique la loi de Bouguer-Beer-Lambert :

$$I = I_o e^{-\tau m}$$

avec I_o l'intensité initiale, I l'intensité observée en sortie, m la longueur du trajet optique et τ l'épaisseur optique du milieu traversé. Plus τ est grand, plus le rayonnement sera atténué par le milieu diffusant dont l'épaisseur optique est τ, moins il y aura de rayonnement reçu après le rayonnement.



On fait une mesure de l'intensité reçue par un instrument et on la compare à l'intensité du rayonnement en entrée du milieu diffusant. Dans notre cas, le milieu diffusant et absorbant est l'atmosphère et le rayonnement en entrée correspond au rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère. L'épaisseur optique prend en compte l'absorption et la diffusion des constituants atmosphériques.

Nous allons maintenant voir que les moyens actuels de détection et de surveillance des aérosols exploitent ces interactions avec le rayonnement solaire pour fournir des cartographies de la présence et de la concentration en aérosols.

3 Moyens actuels de la surveillance des aérosols atmosphériques

Pour une surveillance globale et polyvalente des aérosols, il faut pouvoir connaitre les variations temporelles et spatiales des aérosols pour chacune des raisons citées précédemment. Pour cela, il existe plusieurs systèmes de mesures au sol et spatioportée, chacun ayant ses propres objectifs.

Ils ne sont pas toujours commensurables, c'est-à-dire que l'information provenant de systèmes de mesure différents n'est pas toujours facile à comparer. De plus, le fonctionnement de certains systèmes ne permet pas toujours d'obtenir une information exploitable auprès du grand public, comme, par exemple, pour un suivi de situation en temps réel.

3.1 Les réseaux de mesure au sol

Il existe tout d'abord des réseaux de mesure au sol comme le réseau AERONET opéré par le *Goddard Space Flight Center* (GSFC) de la NASA et le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de l'Université de Lille. Il s'agit d'un réseau de stations automatisées de mesure qui mesure plusieurs fois par jour l'épaisseur optique de l'atmosphère à différentes longueurs d'onde. Ces mesures ne sont possibles que par ciel clair, c'est-à-dire sans nuage pour n'avoir que la contribution des aérosols à la diffusion du rayonnement solaire mesurée. Le pyranomètre monté sur un bras robotisé vise le soleil régulièrement afin de faire ces mesures. Comme on peut le voir sur la Figure 9, un cache cylindrique disposé devant le détecteur permet de n'avoir que la composante directe du rayonnement incident et pouvoir en déduire l'épaisseur optique de l'atmosphère (voir Figure 10).

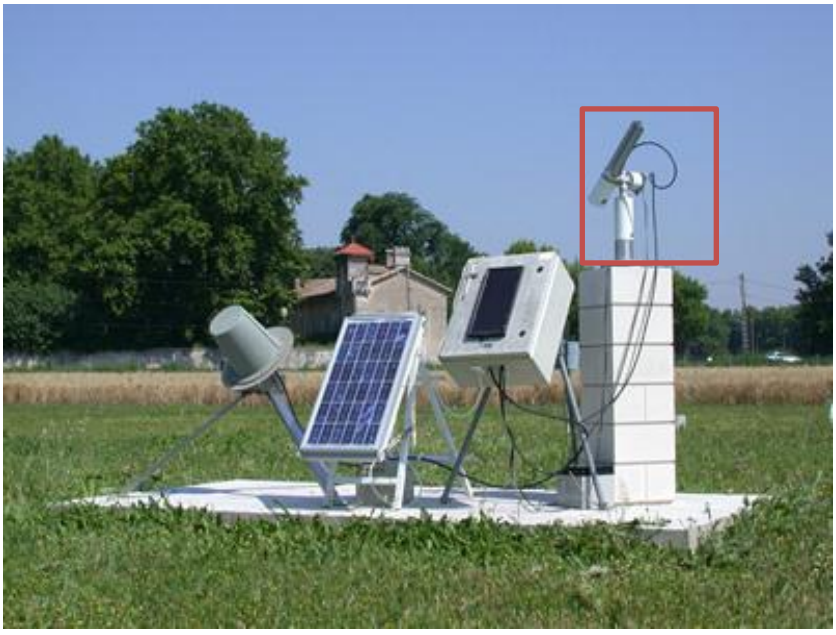


Figure 9 : Station de mesure AERONET, à droite (dans le rectangle rouge), le bras robotisé de mesure et ses équipements pour son apport en énergie et la transmission des données par satellites lorsque cela est possible. (Source : http://aeronet.gsfc.nasa.gov)

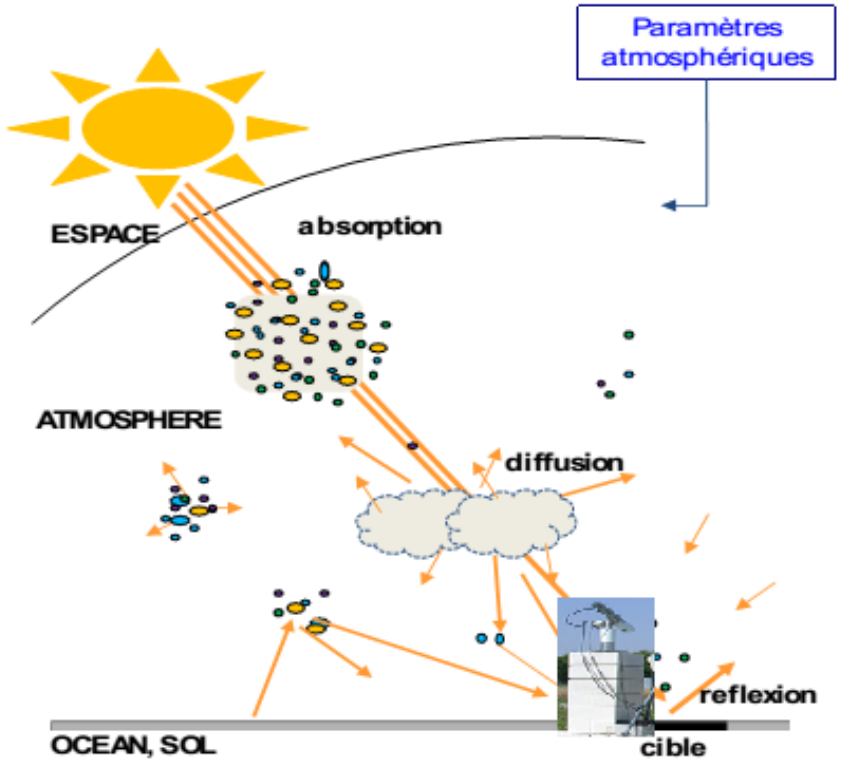


Figure 10 : pour faire la mesure de l'épaisseur optique, le bras robotisé vise régulièrement le soleil et mesure le rayonnement direct qu'il reçoit. On en déduit l'épaisseur optique en comparant la mesure au rayonnement arrivant au sommet de l'atmosphère

Ce réseau est aujourd'hui un des principaux en activité et est régulièrement utilisé à des fins scientifiques ou commerciales, comme pour la validation d'atlas solaire ou de méthodes d'estimation du rayonnement solaire incident au sol telle que Heliosat 4. Il est aussi régulièrement utilisé et cité comme une source de mesures fiables des aérosols. Les mesures sont faites selon une standardisation propre à tout le réseau et la fréquence des mesures donne une information temporelle sur la concentration et le transport des aérosols. Les stations de mesure sont réparties à travers toute la planète, mais leur densité est hétérogène, notamment dans les zones les plus désertiques comme le montre la Figure 11. Il existe peu de stations en activité dans le désert et leurs mesures ne sont pas toujours continues dans le temps. En raison de la forte variation spatiale de la concentration des aérosols comme le montre des travaux de thèse réalisé à l'école MINES ParisTech, il est très difficile d'extrapoler la répartition de ces aérosols à travers le monde.

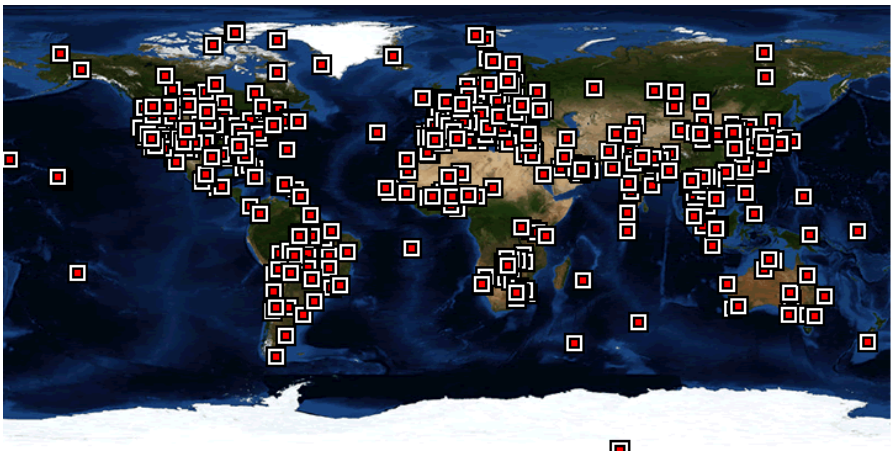


Figure 11 : Répartition des stations de mesure AERONET ayant contribué au réseau en 2013. (Source : http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/type_piece_of_map_opera_v2_new?long1=-180&long2=180&lat1=-90&lat2=90&multiplier=2&what_map=4&nachal=1&formatter=0&level=3&place_code=10&place_limit=0)

Or l'émission et le transport des aérosols se font à une échelle globale de la planète comme le montre cette image (Figure 15) extraite d'une vidéo de la NASA (lien). La photo montre en rouge l'émission de poussière désertique, en bleu les embruns marins, en vert les aérosols issus des matières organiques comme les pollens ou les carbones noirs et en blanc les composés de soufre.

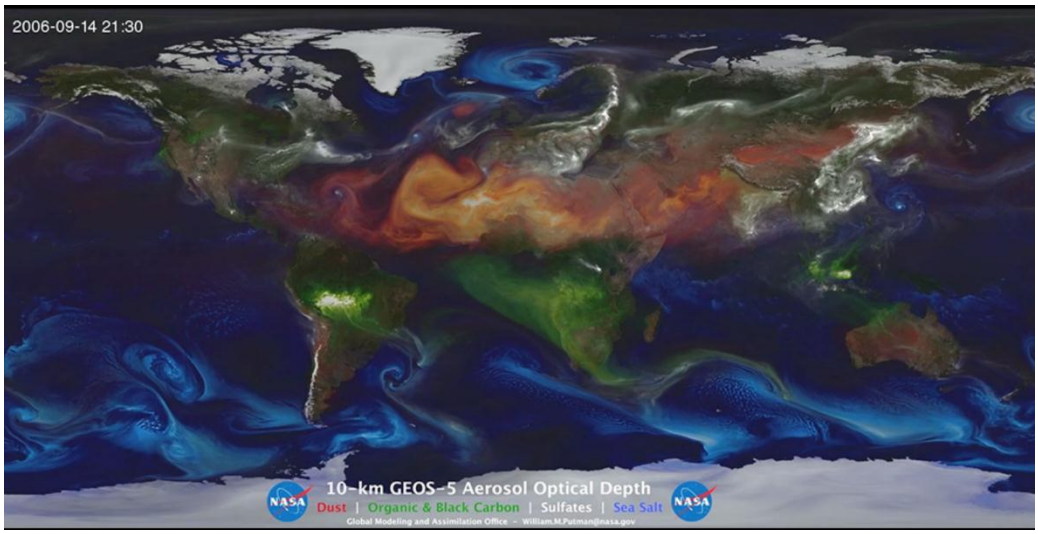


Figure 12 : Image extraite d'une video de simulation GEOS-5 faite par la NASA. Il s'agit de sorties numériques du modèle d'émission et de transport des aérosols GOCART ayant pour entrées des ré-analyses météorologiques et des mesures *in situ*. La résolution spatiale est de 10 km et il y a une image toutes les 30 minutes. En rouge les poussières désertiques, en bleu les embruns marins, en vert les aérosols issus des matières organiques et les carbones noirs et en blanc les composés de souffre.

On voit dans cette image que l'émission et le transport des aérosols se font à l'échelle de toute la planète, cela sous-entend la nécessité de devoir surveiller des zones très larges. Et donc d'étendre notre champ de vue.

3.2 Observations des aérosols par satellite

Pour étendre le champ de vue, on a à notre disposition des instruments avec un très large champ de vue monté à bord de satellites et qui orbite autour de la planète, permettant de voir la quasi-totalité de la surface terrestre de manière fractionnée cependant. Il y a plusieurs types de satellites d'observation, comme on peut le voir dans la Figure 14 leurs orbites différentes permet de discriminer deux catégories.

3.2.1 Les satellites en orbite basse

Les instruments **MODIS** (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) à bord des satellites TERRA et AQUA) ou **VIIRS** (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) à bord de Suomi NPP) survolent la surface terrestre dans une orbite dite basse à environ 800 km d'altitude. Leur vue synoptique permet de représenter spatialement la mesure des aérosols et donc d'avoir une cartographie de leur présence et de leur concentration.

Ces instruments offrent un champ de vision de plusieurs centaines de kilomètres tout au long de l'orbite. La résolution d'un pixel de cet instrument est de 250 m dans le visible (10 km pour les produits de détection d'aérosols) dans le meilleur des cas (directement en dessous de satellite).

Cependant, comme le montre la Figure 13, ces satellites passent au-dessus du même point que deux ou trois fois par jour, limitant de ce fait la fréquence d'observation qui est faible surtout au regard de l'échelle temporelle d'évolution d'épisode de forte concentration d'aérosols dans l'atmosphère comme les tempêtes de sable. En effet, l'échelle de temps de ces évènements peut être très courte.

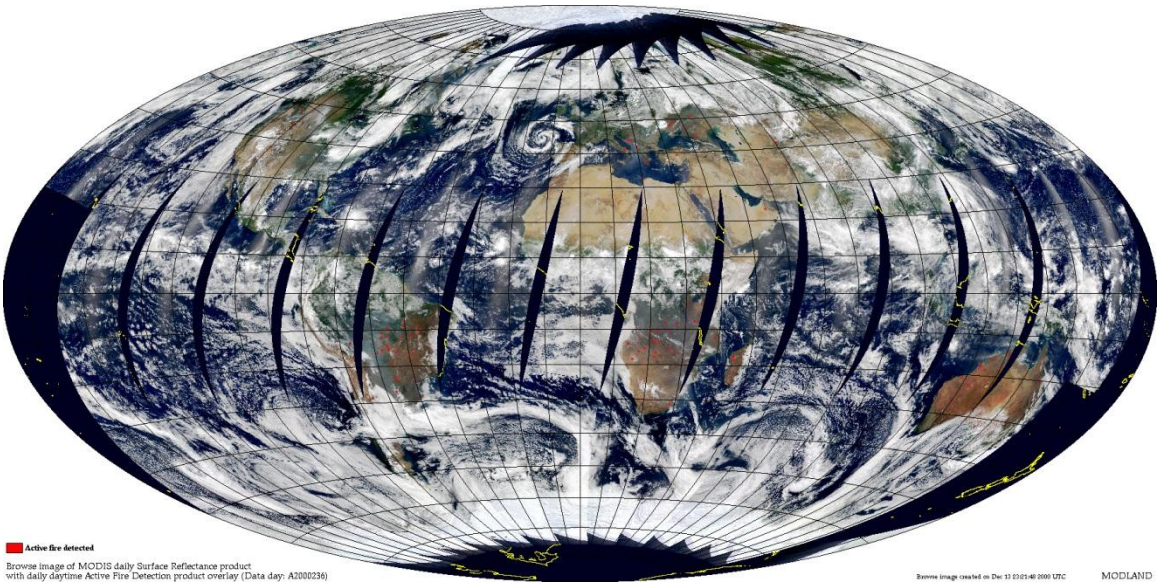


Figure 13 : Recomposition de la surface terrestre vue par TERRA/MODIS, les points rouges représentent les feux détectés par celui-ci. Les bandes noires verticales proches de l'équateur sont les zones non couvertes par MODIS à cause de la courbure de la Terre. (Source http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=1048)

En effet, une tempête de sable peut se déclencher en quelques minutes, durer quelques heures et s'estomper aussi soudainement (voir par exemple l'épisode de tempête de sable du 29 mars 2014 dans le désert du Sahara observé par le produit DUST RGB de *Meteosat Second Generation* (MSG), à voir sur la galerie d'image du site EUMETSAT). Une ou deux observations par jour ne permettent pas forcément d'observer ces évènements. Si l'observation se fait avant ou après l'évènement, on ne mesure pas la variation de la quantité d'aérosols et on ne peut pas étudier son évolution.

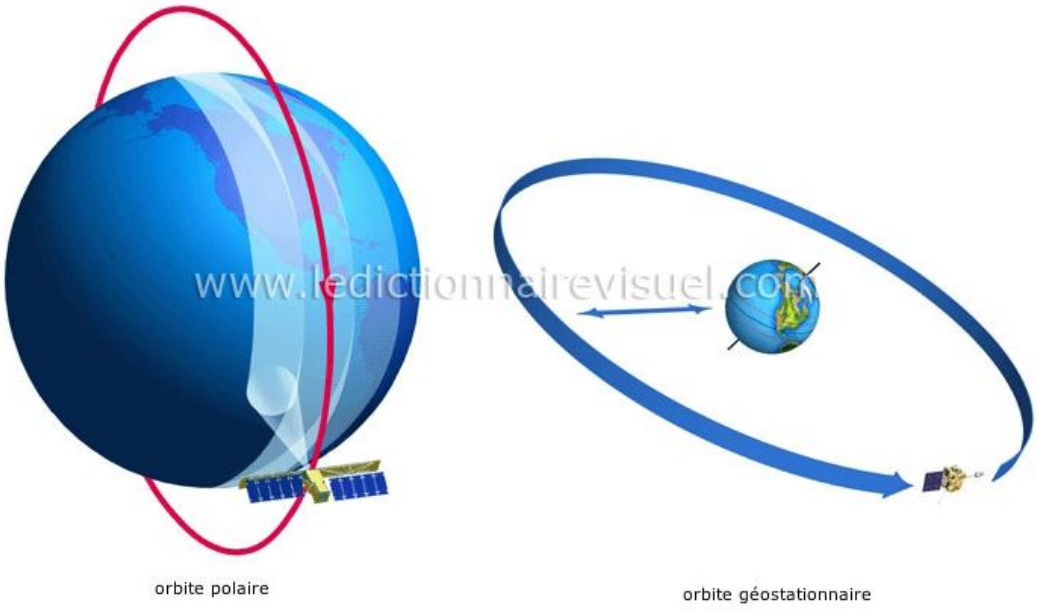


Figure 14: à gauche l'orbite polaire sur laquelle sont présents les satellites en orbite basse comme Terra, Aqua ou Suomi NPP. À droite, l'orbite géostationnaire où se trouvent les satellites météorologiques, de télécommunication de géolocalisation. (Source : http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/terre/meteorologie/satellites-meteorologiques/orbite-des-satellites.php)

En résumé, la représentation spatiale fournie par ces mesures par satellite est très étendue, les mesures des aérosols sont exploitables pour le calcul de moyenne mensuelle ou annuelle, mais l'absence de répétition fréquente de la mesure réduit les possibilités de surveillance en temps réel.

Il faut donc, pour pallier cette limitation, augmenter la fréquence d'observation. Or celle-ci est limitée par l'orbite des satellites. On pourrait augmenter le nombre de satellites pour avoir des mesures plus rapprochées, mais leurs points de vue ne seraient pas exactement le même et le coût de telles missions serait prohibitif.

On pourrait aussi exploiter une autre catégorie de satellites, dont la fréquence de répétitions des observations est très importante, liée à la nature même de leurs missions.

3.2.2 Les satellites en orbite géostationnaire

L'orbite géostationnaire se situe à près de 36 000 km d'altitude. Les observations faites par les satellites météorologiques, comme ceux appartenant au programme européen Meteosat, proposent à la fois une vue synoptique (un champ de vision très large, une vue d'ensemble) et une mesure répétée toutes les 15 min.

Pour les besoins de suivi d'évènements météorologiques et leur prévision, les satellites météorologiques ont une grande fréquence de prise de vue. Pour les satellites *Meteosat Second Generation* (MSG), actuellement en opération, cette fréquence est d'une image toutes les 15 minutes. Ces satellites observent toujours la même zone, la même partie du globe terrestre grâce à leur orbite géostationnaire. Le « disque » terrestre, c'est dire la partie du globe visible par le satellite correspondant à environ 1/3 de la surface terrestre totale, est balayé toutes les 15 minutes.

Les images des satellites Meteosat, par leur répétitivité et leur champ de vue synoptique, apportent une représentation à la fois spatialement répartie des aérosols et une répétitivité des mesures. C'est une opportunité intéressante pour la détection et la surveillance à grande échelle des aérosols.

Je vais maintenant présenter le programme européen Meteosat dont l'étude de la future génération est l'objet de ma thèse.

4 Les satellites météorologiques géostationnaires Meteosat

4.1 Introduction

Le système satellitaire Meteosat, réalisé par l'agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre du système mondial d'observation de l'atmosphère terrestre mis en place par l'organisation météorologique mondiale (World Meteorological Organization - WMO) au milieu des années 1970. Il est opéré par l'agence Eumetsat depuis 1995 et fournit des images météorologiques qui permettent de mettre en alerte notamment les populations locales d'évènements météo potentiellement dangereux tels que les ouragans, les tempêtes tropicales ou de fortes précipitations pouvant causer des inondations.

Les satellites Meteosat sont positionnés sur une orbite géostationnaire à 36 000 km d'altitude, dans le plan équatorial. Il y a déjà eu deux générations de satellites opérationnels *Meteosat First Generation* (MFG) et *Meteosat Second Generation* (MSG).

Le champ de vue très large de ces satellites n'est cependant pas global et est limité à un tiers du globe. Leur résolution spatiale est inférieure à celle des satellites en orbite basse comme Suomi SNPP. La résolution spatiale est variable à cause de la courbure terrestre. Elle est proportionnelle à l'éloignement du point observé par rapport au nadir (la verticale du satellite).

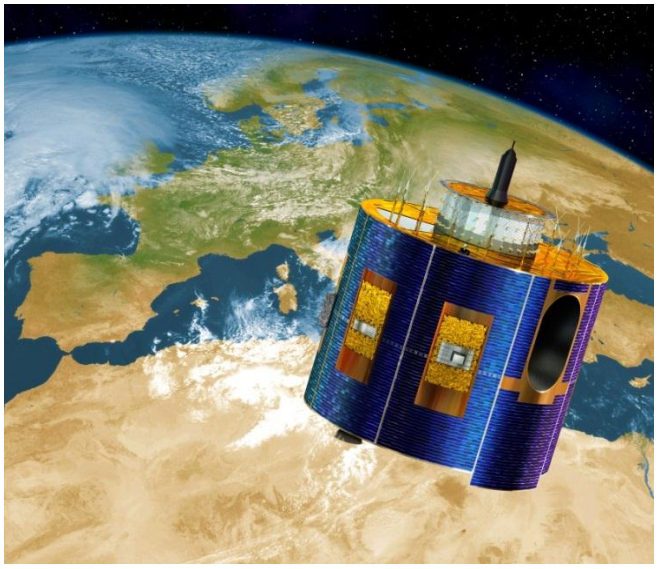


Figure 15 : vue d'artiste de Meteosat Seconde Génération. crédits : CNES/D.Ducros

4.2 Meteosat Première Génération (MFG)

Le 23 novembre 1977 était lancé le premier satellite Meteosat dont l'objectif était de permettre une étude approfondie des phénomènes météorologiques, la prévision de ceux-ci n'étant a priori pas l'objectif principal.

Meteosat First Generation (MFG) tire profit de la technologie des systèmes gyro-stabilisés. En effet, ce système tourne sur lui-même à 100 tours par minutes autour de son axe principal. Cela permet une stabilisation du satellite par effet gyroscopique et aussi de simplifier l'imageur, MVIRI (Meteosat Visible & IR Imager) en réduisant le nombre de pixels d'acquisition. Pendant sa phase d'acquisition, le satellite voit la Terre sous un angle de 18°, c'est-à-dire environ 1/20ème de sa rotation. Pendant le reste de la rotation, le miroir principal se décale d'une ligne et reprend la phase d'acquisition pour la zone adjacente supérieure. À chaque rotation le satellite enregistre une ligne-image de 3 pixels de large. Afin de couvrir la totalité du disque terrestre visible, il lui faut acquérir 2500 lignes-image. Chaque image prend donc 25 min d'acquisition ainsi que 5 min de traitement et d'envoi au sol. Ainsi, MFG fournissait 1 image toutes les 30 min et 48 images par jour.

Le nadir, c'est-à-dire, la zone à la verticale du satellite, se trouve dans le Golfe de Guinée. Pour des raisons géométriques, la meilleure résolution spatiale se situe autour de ce point comme le montre

Figure 17, elle décroit à mesure de l'éloignement de ce point à cause de la courbure de la surface terrestre.

MFG est en fait toujours en service au-dessus de l'océan Indien et cela jusqu'en 2016. En effet, ce créneau spatial laissé vacant par la Russie est très utile pour la surveillance des ouragans et des évènements météorologiques majeurs dans cette région du globe ou de nombreuses routes commerciales sont présentes pour les échanges entre Europe, Afrique et Asie.

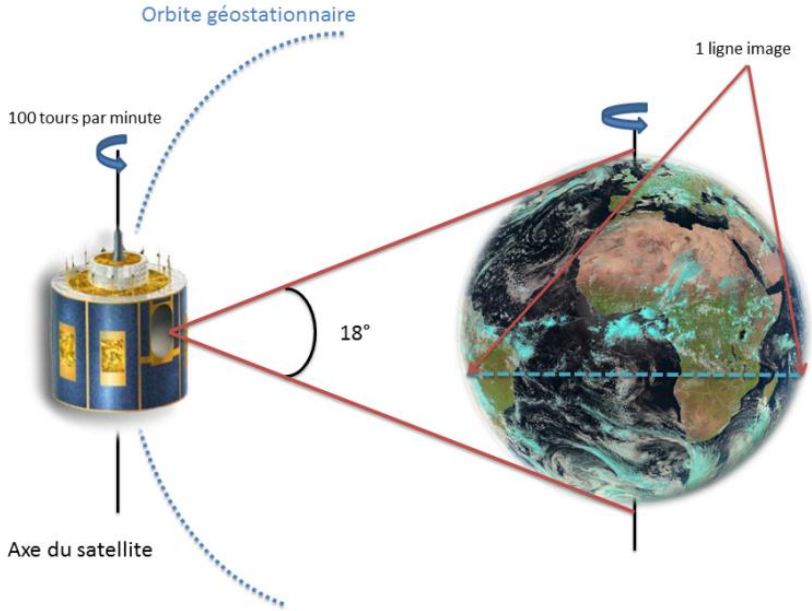


Figure 16 : principe de la mesure de MFG et MSG

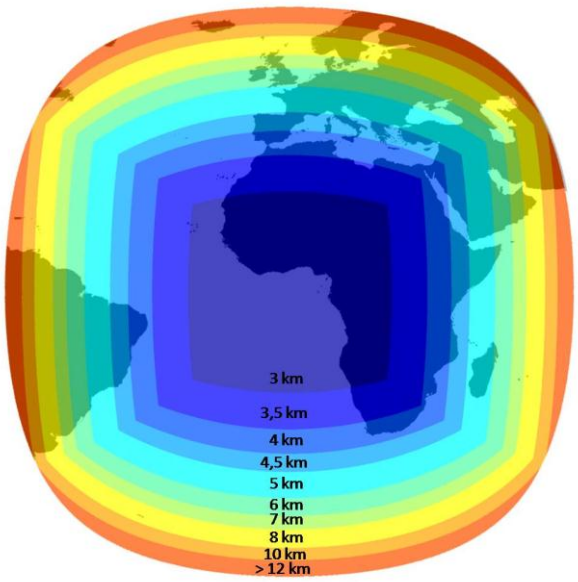


Figure 17 : résolution spatiale des mesures MSG en fonction de l'éloignement du nadir

4.3 Meteosat Second Generation (MSG)

Afin de garantir la pérennité et la continuité des mesures météorologiques, l'organisme de gestion du projet Meteosat a commissionné et décidé l'envoi d'une nouvelle génération de satellites météorologiques appelés *Meteosat Second Génération* (représenté dans la Figure 15). Dotés d'un nouveau capteur plus puissant et à même d'acquérir plus de lignes d'image à chaque rotation et donc d'augmenter la fréquence d'obtention des images tout en gardant le même principe d'opération gyro-stabilisée, ces nouveaux systèmes ont de plus une durée de vie supérieure à la génération précédente.

4.3.1 MSG/SEVIRI

Les satellites MSG sont équipés de l'imageur SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*). Cet instrument permet deux modes opérationnels. Un mode standard où le satellite balaie la totalité de la surface visible avec une résolution de 3 km au nadir et un mode de meilleure résolution utilisant un capteur secondaire inclus dans SEVIRI, le HRV (*High Resolution Visible*). Ce mode spécifique fonctionne dans une gamme spectrale unique entre 0,4 et 1,1 µm plutôt que par canaux spectraux séparés.

Le mode opératoire de MSG/SEVIRI est sensiblement le même que celui de la génération précédente c'est à dire en rotation rapide autour de l'axe principal du satellite pour la formation d'une image par ligne images. Les caractéristiques techniques ont été cependant grandement améliorées, grâce à l'évolution faite sur la technologie des imageurs. Le nombre de lignes d'image acquises à chaque tour est supérieur à celui de MFG. Il est maintenant ainsi possible d'avoir un balayage complet toutes les 15 min.

Le détecteur possède 8 canaux infrarouge, 3 canaux visible et proche infrarouge et le capteur large spectre, le HRV (*High Resolution Visible*). Le satellite de secours est utilisé pour ce mode opérationnel. L'image capturée étant de plus haute résolution spatiale, la quantité de données à traiter est plus importante et une limitation de la taille de l'image observée s'impose. Actuellement le HRV observe 1/3 du disque centré sur l'Europe et une partie de l'Afrique.

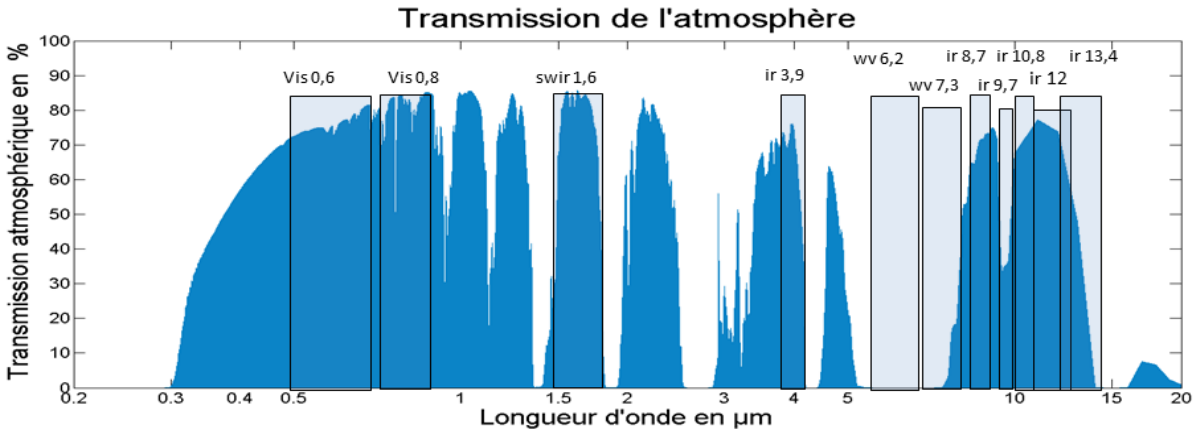


Figure 18 : en bleu transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde du rayonnement, les rectangles représentent les canaux de mesure de MSG/SEVIRI, les canaux couvrent plusieurs fenêtres spectrales de l'atmosphère.

4.3.2 Détection et surveillance des aérosols avec MSG/SEVIRI

Il existe actuellement un produit disponible sur le site d'Eumetsat (http://oiswww.eumetsat.org/IPPS/html/MSG/RGB/DUST/) pour la détection et la surveillance des tempêtes de sable dans la péninsule arabique et l'Afrique. Cette méthode exploite les canaux spectraux de l'infrarouge thermique à 8,7, 10,8, 12,0 µm. On compare le signal issu de ces trois pour créer une image rouge-vert-bleu (RVB) en utilisant les 3 canaux pour chacune des 3 couleurs. Ce produit permet détecter les tempêtes de sable dans la péninsule arabique, et le Sahara. Cela permet d'observer des évènements que lorsque la quantité d'aérosols dans l'atmosphère est très importante, elle ne donne pas d'informations quant à la concentration exacte en aérosols en temps réel. De plus, ce produit ne permet pas de voir des concentrations plus faibles, il ne donne pas accès à des données quantifiables notamment pour l'estimation de la ressource solaire ou pour la prévention de la pollution atmosphérique aux particules fines.

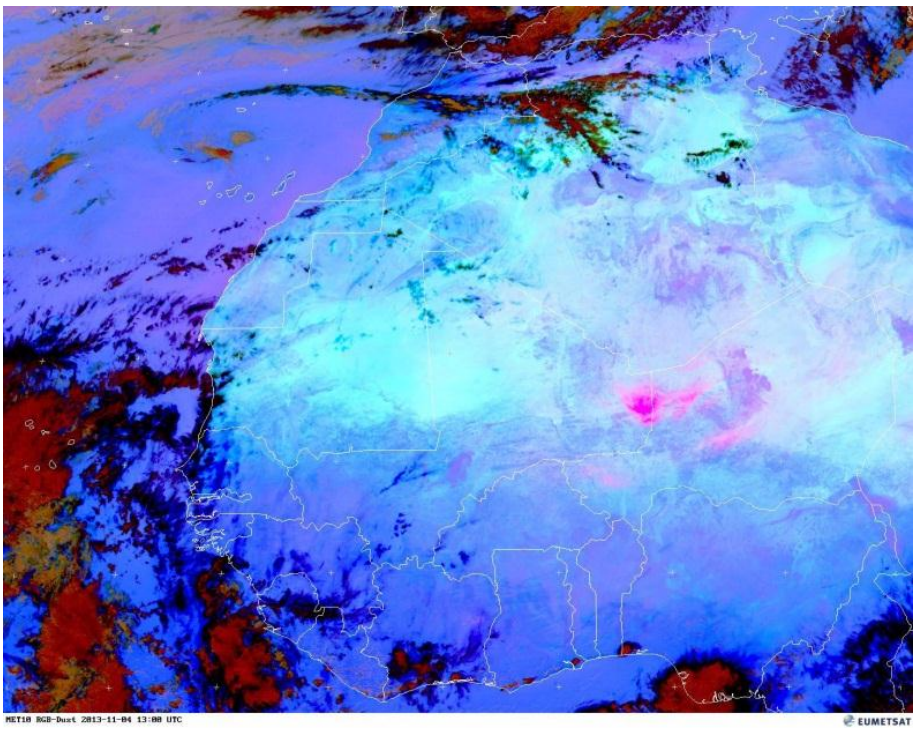


Figure 19 : Image en fausse couleur RGB issue de la détection des poussières désertiques (en rose) de MSG SEVIRI du 04/11/2013 à 13h00 UTC Afrique de l'Ouest. Source

Plusieurs recherches montrent la possibilité de discriminer plusieurs types de concentration en aérosols pour des pixels sans nuage. Ces travaux se basent sur la comparaison des mêmes canaux spectraux et imposent des seuils afin de discriminer les différentes concentrations ou charges en aérosols. Ces seuils sont déterminés de manière empirique en exploitant d'autres systèmes permettant la caractérisation des aérosols tels que le système satellitaire en orbite basse MODIS ou le réseau de mesures in-situ AERONET.

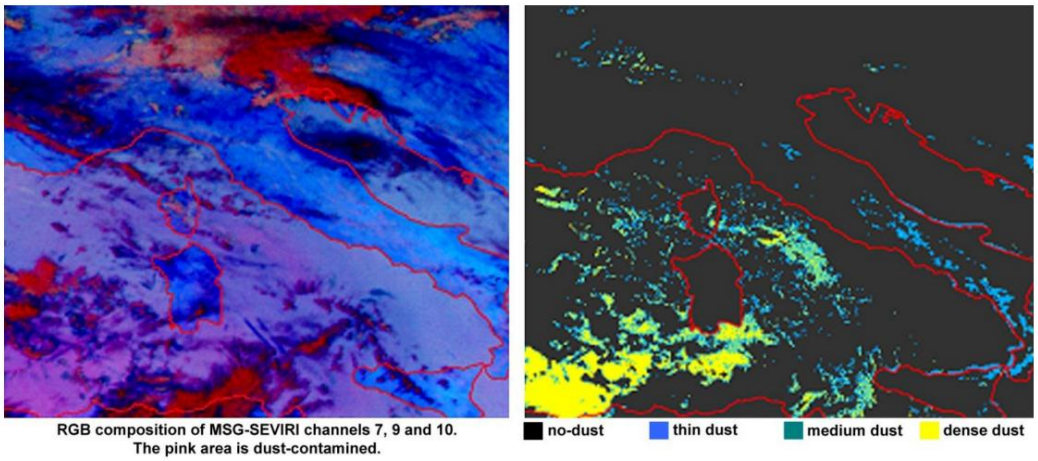


Figure 20 : à gauche, une tempête de sable au-dessus de la Méditerranée issue du même outil que précédemment. À droite une discrimination entre différentes charges en aérosols désertiques, en noir pas d'aérosol, en bleu une faible concentration, en vert une concentration moyenne et en jaune une forte concentration. Source

4.3.3 Meteosat Troisième Génération (MTG)

La future génération des satellites Meteosat dont le lancement est prévu dans le courant de l'année 2018 sera complètement différente des précédentes versions (MFG et MSG).

En effet, MTG sera stabilisé sur ses 3 axes et non plus gyro-stabilisé. Il ne tournera donc plus sur lui-même comme expliqué pour les versions précédentes. Il profite notamment des avancées technologiques notables des imageurs, on peut maintenant produire et utiliser une grande matrice de

pixels. Par un système de miroir qui change le point observé, on peut prendre par prises de vue successives avec des recouvrements, tout le disque terrestre.

De plus le système d'observation sera divisé en 2 missions distinctes :

- MTG-I (pour *imager*) : système imageur proche de ce que fait actuellement MSG ;.
- MTG-S (pour sondeur) : système d'observation dédié au sondage atmosphérique dans l'infrarouge et l'ultra-violet

D'autres instruments comme le Lightning Imager (LI) ou un transpondeur GÉOSAR pour le relais de signaux de détresse seront aussi présents sur MTG.

MTGI-I sera équipé du *Flexible Combined Imager* (FCI). D'un point de vue opérationnel, il sera capable de faire un balayage complet du disque visible toutes les 10 min et des balayages partiels, d'un quart du disque en 2,5 min. Il sera aussi possible d'alterner ces deux types de fonctionnements, pour ne pas avoir à attendre la mise en orbite d'un second satellite pour profiter des fréquences d'observation plus élevées pour les balayages partiels.

Le nombre de canaux spectraux du FCI sera supérieur à celui de MSG. Il y aura seize canaux dont, notamment, un nouveau canal dans l'UV-bleu centré sur la longueur d'onde 444 nm pouvant nous donner des informations très pertinentes sur la présence d'aérosols désertiques par exemple.

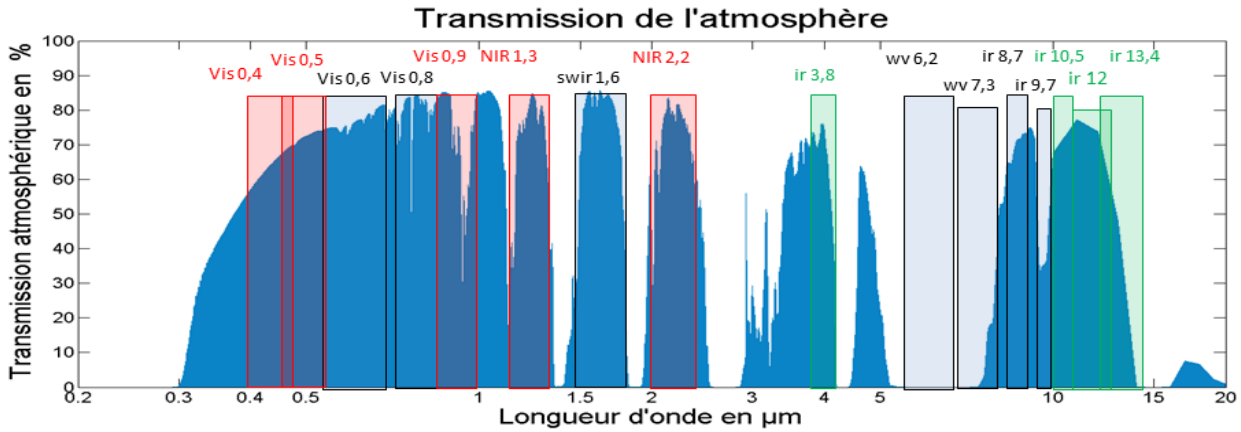


Figure 21 : en bleu transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde du rayonnement, les rectangles représentent les canaux de mesure de MTG/FCI, les rectangles rouges correspondent aux canaux ajoutés sur cette version, les rectangles verts aux canaux déjà présents sur MSG et modifiés.

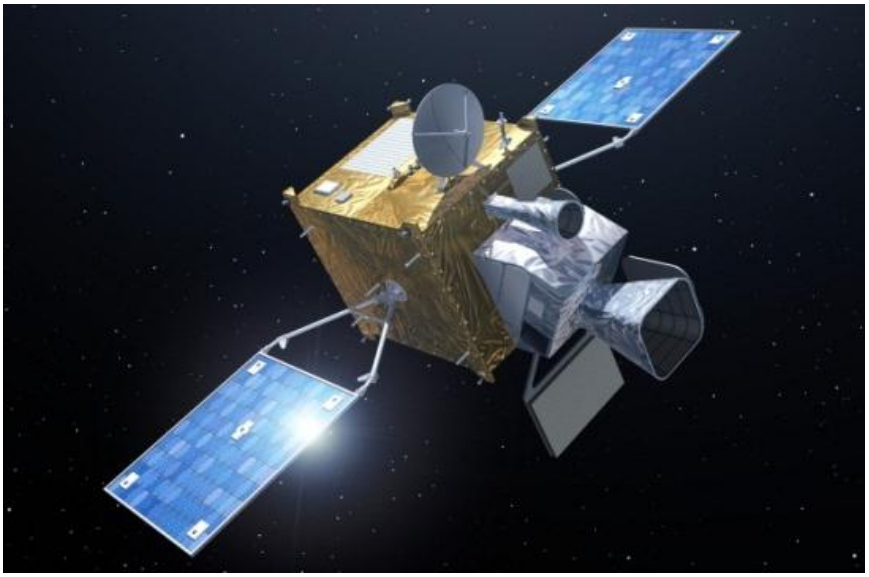


Figure 22 : vue d'artiste du futur Meteosat Troisième Génération. Contrairement aux générations précédentes, il s'agit d'un satellite stabilisé sur ses trois axes. Source

5 Conclusion

J'ai présenté les aérosols atmosphériques, les problèmes qu'ils soulèvent et les moyens actuels de détection.

On s'est aperçu que pour garantir un bon suivi en temps réel des concentrations d'aérosols à l'échelle de la planète, il faut avoir une vision qui soit la plus large possible et une fréquence d'observation importante.

Le programme Meteosat propose déjà à l'heure actuelle des outils de surveillance, mais qui semblent incomplets notamment au regard de la quantification de la concentration de ces aérosols.

La future génération de satellites Meteosat, Meteosat Third Generation, attendu pour 2017 pourrait apporter des outils supplémentaires dans ce but.

L'objet de ma thèse consiste à répondre aux questions suivantes :

Est-ce que les instruments prévus pour l'observation météorologique pourraient permettre de détecter et de surveiller les aérosols ? Les propriétés optoélectroniques du *Flexible Combined Imager* à bord du futur MTG permettent-elles la détection et la surveillance des aérosols ? Quelles sont les variables atmosphériques les plus importantes quant à la détection des aérosols ?

6 Pour aller plus loin

Aérosols atmosphériques, propriétés et impacts climatiques, **Olivier Boucher**, Springer, collection « Collection: Ingénierie et développement durable », Paris, 2012, 250 p.

7 Qui suis-je ?

J'ai toujours été passionné par la science et plus particulièrement par la physique. Depuis toujours je rêve d'espace et de sabre LASER. J'ai donc choisi une formation en physique fondamentale et je me suis spécialisé en optique et optoélectronique pour pouvoir créer ces sabres LASER et travaillé dans l'aérospatiale.

Après avoir obtenu ma maitrise en Physique fondamentale et nanoscience de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, je me suis spécialisé par le biais d'un Master en optique et optoélectronique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (Grenoble INP, PHELMA) en cotutelle avec l'Université Joseph Fourier (UJF).

Je suis actuellement Doctorant à Mines ParisTech au sein du centre Observation Impacts Energies sur l'Evaluation des capacités du nouveau satellite Meteosat Troisième Génération (MTG) à estimer la concentration en aérosols et leurs propriétés.

Dans le cadre d'une thèse cofinancée par la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et Thales Alenia Space, je travaille ainsi sur l'impact des aérosols atmosphérique sur le rayonnement solaire et leur détectabilité par le futur satellite météorologique géostationnaire *Meteosat Third Generation*. Grace aux équations du transfert radiatif et aux informations transmises par Thales Alenia Space, je simule ce que « verra » le futur satellite. Les résultats de ces simulations pourront alors nous permettre de formuler des recommandations pour des algorithmes de détection et de caractérisation des aérosols et pour des spécifications pour d'éventuels futurs capteurs.