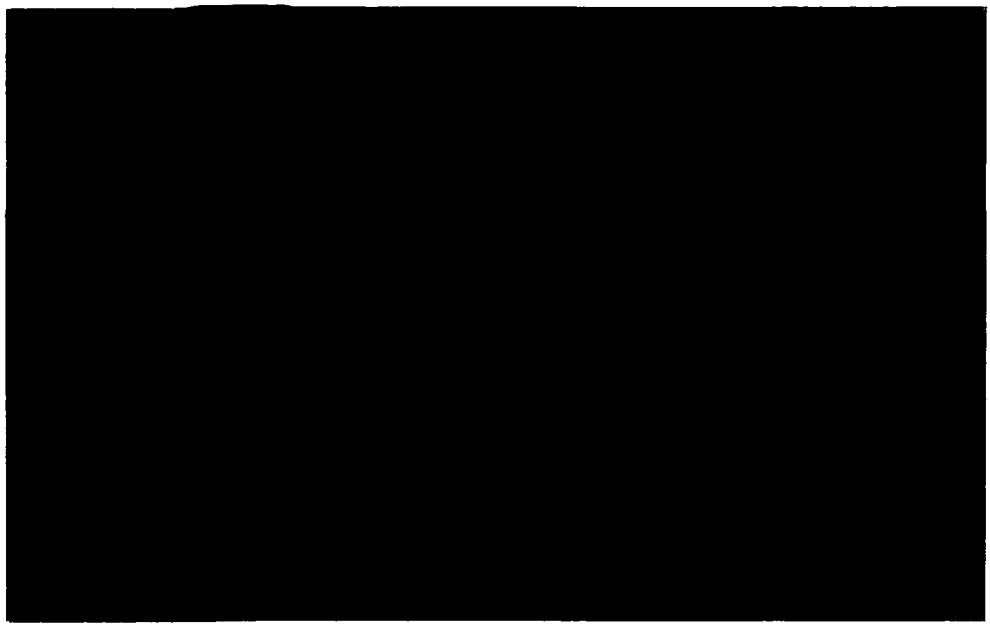

Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt
Rapports de travail de l'Institut Suisse de Météorologie
Rapporti di lavoro dell'Istituto Svizzero di Meteorologia
Working Reports of the Swiss Meteorological Institute

Zürich

52705

No 100

LA METEOROLOGIE SATELLITAIRE

un abrégé de sa nature, de ses possibilités de ses coûts et de ses avantages économiques

par

Alexandre Piaget, Dr sc.nat.

Septembre 1981

Satellites 551.507.362.2

Résumé

Cet abrégé décrit sommairement les caractéristiques de la météorologie spatiale et l'utilité de cette dernière tant dans l'analyse que dans la prévision météorologique. De plus, les principes de la télédétection, les satellites et leurs orbites sont brièvement traités. Il comprend également un aperçu des méthodes conduisant à extraire des données des paramètres météorologiques comme les vents et les températures. De même les coûts et les avantages économiques de la météorologie spatiale sont rapidement examinés. La bibliographie a été spécialement choisie pour que le lecteur intéressé puisse s'informer plus complétement sur les sujets considérés.

Zusammenfassung

Es wird eine Einführung in die Satellitenmeteorologie und deren Anwendung in der meteorologischen Analyse und Prognose gegeben. Ausserdem werden die physikalischen Grundlagen der Fernerkundung, der Satelliten und ihrer Umlaufbahnen kurz erörtert. Sodann wird ein Ueberblick über die Methoden gegeben, die zur Fernerkundung meteorologischer Parameter, wie Wind und Temperatur, führen. Im weiteren werden die Kosten sowie die wirtschaftlichen Vorteile der Satellitenmeteorologie kurz diskutiert. Das Literaturverzeichnis informiert den interessierten Leser vollständiger über die behandelten Themen der Satellitenmeteorologie.

Riassunto

Questa sintesi descrive sommariamente la caratteristiche della meteorologia spaziale e l'utilità di quest'ultima, sia per l'analisi, quanto per la previsione del tempo. Sono inoltre trattati brevemente i principi della teledetezione, i satelliti e le loro orbite. E' pure compreso un sommario dei metodi con i quali si giunge ad estrarre dei dati relativi ai parametri meteorologici, quali vento e temperatura. In seguito vengono analizzati brevemente i costi e i vantaggi economici della meteorologia spaziale. La bibliografia è stata scelta appositamente per far si che il lettore interessato possa informarsi in maniera più integrale sui soggetti considerati.

Summary

This note summarily describes the properties and the utility of the spatial meteorology for the analysis as well as for weather forecasting. Moreover, the fundements of the teledetection, the satellites and their orbits are briefly treated. A glance is taken at the methods used for the extraction of meteorological parameters as wind and temperature. The costs and the economical benefits of the satellite meteorology are rapidly examined. A carefully selected bibliography will enable the interested reader to find more information on theses topics.

Table des matières

	Page
Avant-propos	
1. Les principes de base de la télédétection	3
2. Les orbites	5
3. Les satellites	7
4. Les données	9
4.1. Les données numériques	10
4.1.1. Les vents	11
4.1.2. Les températures	12
4.1.3. Les températures à la surface terrestre	13
4.1.4. Les constituants mineurs de l'atmosphère	14
4.2. L'imagerie	16
5. Les applications	19
5.1. L'analyse météorologique	19
5.2. La prévision à très court terme	23
5.3. La prévision à court terme	25
5.4. La prévision à moyen terme	27
5.5. La climatologie	28
6. Les coûts et retombées économiques	30
6.1. Les coûts	30
6.2. Les retombées économiques	32
Bibliographie	34

Avant-propos

Bien que déjà plus de 20 années se soient écoulées depuis le lancement du premier satellite météorologique et que la première image émise directement aux utilisateurs date de mars 1966, les données satellitaires ne représentent toujours qu'un apport secondaire tout aussi bien dans l'analyse de la situation météorologique que dans sa prévision. Preuve en soit la réaction des météorologistes après la panne de METEOSAT 1, le 24 novembre 1979, après deux années de parfait fonctionnement. Ils n'eurent pas l'impression d'une perte irremplaçable. En août 1981, METEOSAT 2 a pris la relève. Bien des services météorologiques estiment que l'utilité des satellites ne justifie pas totalement les coûts très élevés qu'ils occasionnent ou se refusent encore à participer, même modestement, à un programme opérationnel.

Quelles sont les raisons justifiant ce conservatisme à une époque où la technique progresse si rapidement ? Premièrement, à ce que le développement scientifique ne suit pas, principalement du fait que la grande majorité des chercheurs est concentrée dans la recherche concernant cette autre branche moderne de la météorologie que représentent les modèles numériques qui intégrés par ordinateurs fournissent des cartes météorologiques en prévision de bonne valeur. Deuxièmement, à ce que l'imagerie satellitaire par ses ensembles nuageux fournit un aspect foncièrement différent de celui offert par les cartes synoptiques. Ceci conduit au paradoxe que le météorologiste s'efforce de déduire le temps à partir de ces cartes météorologiques, alors qu'il reste encore désorienté lorsque le temps lui est présenté tel qu'il est dans sa complexité par cette imagerie. Troisièmement, à ce que les modèles utilisés dans l'analyse de la situation météorologique ne peuvent encore exploiter que partiellement les données satellitaires, c'est-à-dire seulement lorsqu'elles peuvent être mises sous forme numérique.

Fitz Roy, en 1864, présentait une meilleure conception des mouvements tourbillonnaires (idées alors et malheureusement pour la science météorologique, encore trop en avance sur son temps) que Wexler dans les années 1950, s'appuyant sur le modèle norvégien. Encore aujourd'hui, un effort non négligeable tend à essayer de placer l'imagerie satellitaire dans le corset des modèles utilisés. Cette imagerie vient peut-être encore trop tôt.

Chaque nouveauté introduite en météorologie pose au chercheur un problème fondamental: doit-il porter son effort sur une meilleure compréhension de la circulation atmosphérique, recherche fondamentale, ou sur une amélioration des méthodes de prévision, recherche appliquée. Le météorologiste est, et il est à prévoir qu'il le restera à l'avenir, dans la position inconfortable de devoir émettre des prévisions alors qu'il ne connaît qu'imparfaitement le comportement de l'atmosphère. Le problème du potentiel de prédictabilité des méthodes de prévision utilisées n'est pas étudié de façon systématique. Preuve en soit la stagnation actuelle des prévisions à moyen terme, bien qu'elles donnent déjà des résultats satisfaisants pour la semaine.

En plus d'un tour d'horizon sur le sujet, cet abrégé a pour but de présenter brièvement les résultats acquis dans la météorologie satellitaire et l'aide qu'elle peut fournir dans l'analyse, voire la prévision de la situation météorologique. La bibliographie fut spécialement choisie afin que le lecteur puisse,s'il le désire,se renseigner de façon plus complète sur les sujets qui peuvent l'intéresser.

1. Les principes de base de la télédétection

La télédétection peut être définie comme étant une technique d'acquisition d'informations sur un objet quelconque (ici la Terre et son atmosphère) sans qu'il y ait contact physique entre cet objet et le capteur. En météorologie satellitaire, cette technique n'utilise jusqu'à présent que le rayonnement électromagnétique comme porteur d'information. Les bases physiques de la télédétection seront donc la connaissance des interactions entre la Terre avec son atmosphère et le rayonnement, c'est-à-dire l'étude notamment de la réflexion, de l'absorption, de l'émission et de la diffusion de l'énergie électromagnétique. Ces paramètres dépendent de la longueur d'onde choisie, c'est-à-dire principalement de la nature de la source du rayonnement et des perturbations apportées par les milieux (ici l'atmosphère terrestre) traversés.

Jusqu'à présent, la météorologie spatiale n'a fait usage que de sources naturelles, c'est-à-dire n'a observé que le rayonnement électromagnétique émis par le Soleil ou la Terre. Le développement de la technique spatiale permet d'envisager également dans un proche avenir l'usage de sources artificielles (par ex. un radar à ouverture synthétique équipait le satellite océanographique des USA SEASAT lancé en 1978 et équipera le futur satellite européen de ressources terrestres).

Au début, les longueurs d'onde utilisées furent choisies dans les domaines où l'atmosphère terrestre est transparente, en schématisant:

- du proche ultraviolet au proche infrarouge (réflexion du rayonnement solaire)
- dans l'infrarouge moyen (10-12 µm, rayonnement terrestre)
- dans le domaine des micro-ondes (1 mm à 10 cm, rayonnement terrestre)

De façon expérimentale d'abord, de façon opérationnelle récemment, la télédétection de l'atmosphère utilise également certains domaines du spectre électromagnétique dans lesquels le rayonnement est absorbé plus ou moins fortement par un constituant atmosphérique, variable ou non. C'est ainsi par exemple, que METEOSAT 1 et 2 (et leurs successeurs) sont équipés d'un capteur

sensible aux longueurs d'onde 6-7 µm, domaine où le rayonnement est absorbé par la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère.

Rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit de notables modifications. Non seulement il se trouve partiellement diffracté par les molécules de gaz, les particules liquides ou solides présentes dans l'atmosphère, mais également atténué par absorption suite aux interactions du rayonnement avec la structure moléculaire de certains constituants atmosphériques. Mais, ce sont ces difficultés qui renforcent l'intérêt de la télédétection puisque en les résolvant, de précieuses informations sur la répartition spatiale et les variations temporelles de ces constituants sont obtenues.

La composition spatiale du rayonnement solaire reçu par le capteur à bord d'un satellite va donc dépendre de l'angle d'incidence et de réflexion de ce rayonnement. La façon dont les objets (terres, mers, nuages) renvoient la lumière incidente est extrêmement variable: la neige et le sable ont un grand albedo, tandis que celui-ci est faible pour les champs et surtout les forêts. C'est du reste cette diversité qui permet l'interprétation d'une image. Mais comme la réflexion n'est ni directionnelle, ni isotrope, la "brillance" d'une cible, c'est-à-dire son ton gris dans l'image variera selon sa position relative au soleil et au satellite. Il faudra en tenir compte dans la comparaison des mêmes cibles vues dans des images prises à des heures et d'endroits différents.

Rayonnement terrestre

La surface terrestre, l'atmosphère et ses météores ont également un rayonnement propre, dont l'intensité dépend de leur température. Prise dans son ensemble, la température moyenne de la Terre est voisine de $300^{o}K$ ce qui donne un maximum d'intensité du rayonnement vers 10 µm, c'est-à-dire proche, voire dans la fenêtre de la vapeur d'eau. Ainsi, l'analyse d'une région en infrarouge, en plus de ce qu'elle n'est pas

interrompue par la nuit, se trouve particulièrement riche en informations concernant les différences thermiques existantes à sa surface. Elle permet une bonne estimation de la température du corps émettant. Evidemment, ce rayonnement est également modifié en traversant le milieu atmosphérique.

L'observation de la Terre et de son atmosphère en hyperfréquences est particulièrement intéressante en tant que complément d'information à l'observation en infrarouge pour la détermination du champ tridimensionnel de température de l'atmosphère dans les régions recouvertes de nuages. Mais ce sera avant tout dans le domaine de la télédétection active que les micro-ondes trouveront toute leur signification.

Au cours d'une conférence donnée à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, M. Blassel, directeur d'Eurosat, résumait le problème en remarquant que:

"on peut dire que sous l'illumination d'un projecteur puissant (le soleil) vu à travers un filtre très particulier (l'atmosphère) les objets terrestres observés renvoient et émettent à leur tour vers l'appareil d'observation à travers à nouveau ce même filtre un rayonnement fort complexe, dont les caractéristiques spectrales contiennent certes des éléments caractéristiques de ces objets, mais dépendent également d'un grand nombre d'autres paramètres. C'est là que réside l'une des difficultés fondamentales de la télédétection, à savoir extraire l'information spécifique cherchée au milieu de ce rayonnement complexe".

2. Les orbites

Théoriquement, les lanceurs actuels permettent de placer un satellite sur pratiquement n'importe quelle orbite circulaire ou elliptique. Néanmoins, afin d'obtenir des conditions optimales non seulement d'énergie à bord et de surveillance de l'atmosphère terrestre, mais également financières, un choix s'impose.

Un programme mondial d'observation, tel que celui envisagé par l'Organisation météorologique mondiale pour sa Veille météorologique mondiale et qui, malheureusement ne fut complet que durant la Première expérience mondiale du GARP (PEMG 1979), devrait comprendre un système de satellites placés sur différentes orbites. Le choix s'est porté jusqu'à présent sur l'orbite géostationnaire et les orbites héliosynchrones.

L'orbite géostationnaire

L'orbite géostationnaire est l'orbite circulaire située dans le plan de l'équateur, à une distance voisine de 36'000 km au-dessus de la surface terrestre. La période de révolution d'un satellite sur cette orbite est de 24 heures (exactement 23 h 56 min. 4 sec.), c'est-à-dire égale au temps de révolution de la Terre autour de son axe. Si le satellite tourne autour de la Terre dans le même sens qu'elle, il paraîtra stationner au-dessus de l'horizon à un observateur au sol. De ce fait, le satellite surveillera continuellement la même partie du globe terrestre. Les pôles lui restent cachés. Si théoriquement 4 satellites géostationnaires suffiraient à une observation globale, un système de 5 satellites permet d'obtenir des données quantitatives de meilleure qualité aux régions de recouvrement.

Les orbites héliosynchrones

Du fait de l'aplatissement de la Terre aux pôles, le plan de l'orbite est animé d'un mouvement de précession. Ce dernier dépend de la hauteur à laquelle évolue le satellite et de l'inclinaison du plan de l'orbite par rapport à celui de l'équateur. Pour une hauteur donnée, l'orbite étant circulaire, l'inclinaison peut être choisie de telle façon que le mouvement de précession corresponde à une rotation du plan de l'orbite en une année. Ainsi, d'un point quelconque de l'orbite, le soleil sera toujours vu, jour après jour, sous le même angle. Le passage du satellite au travers du plan de l'équateur se fera toujours à la même heure locale, quelque soit la longitude. Pour une hauteur de 800 km (voisine

de celle à laquelle orbitent les satellites météorologiques opérationnels actuels de la série TIROS N des USA), l'inclinaison du plan de l'orbite est de 81° rétrograde (c'est-à-dire incliné vers l'ouest). Pour une hauteur de l'100 km, respectivement de l'400 km, l'inclinaison est de 80°, respectivement de 79°.Les périodes de révolution sont 101, 107 et 113 minutes.

Les images et les télémesures que ces satellites acquéreront seront chaque fois prises et faites à la même heure locale. La comparaison des images d'une journée à celles de la journée suivante en bénéficiera par le fait que les effets du réchauffement diurne ou du refroidissement nocturne et, de jour, les conditions d'illumination resteront les mêmes pour un endroit donné.

3. Les satellites

L'atmosphère étant un système global, il est essentiel que sa surveillance soit faite à l'échelle de la Terre. C'est à quoi tend le réseau actuel d'observations et de radiosondages. Mais ceux-ci ne sont que des échantillons ponctuels. L'état de l'atmosphère qui en est déduit dépendra du modèle d'analyse utilisé. La valeur de celui-ci est fonction à son tour de la densité du réseau et de la fréquence des observations. Ces dernières seront toujours faibles au-dessus des grandes étendues que représentent les océans, les déserts et les calottes polaires.

Les satellites, par contre, ne connaissent pas ces restrictions. Chaque partie du globe terrestre sera régulièrement observée.

Ainsi qu'il fut précédemment remarqué, un système opérationnel d'observation par satellites nécessite plusieurs types de satellites météorologiques. Ces derniers ne se différencieront pas spécialement par l'instrumentation à bord, chacun pouvant effectuer les mêmes tâches, à des degrés de répétition différents, mais par leurs orbites ! Si un météorologiste aux latitudes élevées peut à la rigueur se passer d'un satellite géostationnaire car il peut suivre un plus grand nombre de passages successifs d'un satellite sur orbite héliosynchrone que ses collègues aux latitudes inférieures, ces derniers pourraient éventuellement se contenter d'un satellite géostationnaire.

Grâce aux optiques actuelles, la résolution spatiale n'est plus dépendante de la hauteur à laquelle évolue un satellite météorologique. Elle sera déterminée principalement par les besoins de l'utilisateur, par le volume de données à transmettre et par la qualité des installations de réception au sol. Néanmoins il faut relever que l'imagerie infrarouge reçue des satellites sur l'orbite géostationnaire est encore aujourd'hui limitée à quelques kilomètres. Le rayonnement terrestre dans les micro-ondes n'est pas encore capté par les satellites météorologiques géostationnaires. En plus de celle de la télédétection, deux missions importantes sont attribuées aux satellites météorologiques:

- celle de la collecte de données in situ provenant de capteurs à bord de plateformes terrestres (stations en lieux isolés, bateaux, bouées maritimes, ballons, aéronefs, notamment)

- celle de l'échange de données météorologiques de toute nature, brutes ou traitées.

L'utilité de la première est évidente. Par exemple, l'Arabie séoudite espère pouvoir collecter les données de ses stations météorologiques par l'intermédiaire du satellite météorologique géostationnaire européen METEOSAT. Durant la PEMG, quelques trente avions gros porteurs furent spécialement équipés pour pouvoir transmettre, sans intervention des équipages, aux stations gérant les satellites météorologiques géostationnaires dans le champ de vision desquels ils se trouvaient, via ces satellites, les données météorologiques déduites automatiquement des mesures et performances de ces aéronefs. Ces données étaient aussitôt introduites dans le réseau international de télécommunications météorologiques. Il est à prévoir, suite au succès de cette expérience qui continue de façon réduite, que ce système se généralisera prochainement à l'ensemble de l'aviation commerciale.

Et il en va de même de l'intérêt de la deuxième mission. Par exemple, METEOSAT 1 a disséminé régulièrement aux stations d'utilisateurs dans sa

zone d'écoute, un choix d'images captées par le satellite météorologique géostationnaire des USA situé par 75°W et durant la PEMG du satellite météorologique géostationnaire des USA (géré par la station centrale de METEOSAT 1) au-dessus de l'Océan indien. Lorsque le système d'observation par satellite de la VMM de l'OMM fonctionnera de façon opérationnelle, il serait possible que chaque service météorologique disposant d'une station de réception puisse recevoir plusieurs fois par jour une vue de la couverture nuageuse du globe entier. Aujourd'hui déjà, il est possible de Suisse, de fournir à un client intéressé une prévision journalière propre du temps au-dessus de l'Amérique du Sud en utilisant les observations météorologiques, l'imagerie satellitaire et les prévisions numériques établies par le Centre européen de prévision à moyen terme concernant ce continent.

Les données sont acquises par un balayage d'un horizon à l'autre, perpendiculaire au déplacement, le passage d'une ligne à l'autre étant assuré par l'avance du satellite lorsqu'il se meut sur orbite hélio-synchrone. Pour un satellite sur l'orbite géosynchrone, le radiomètre ou un miroir placé devant l'optique est basculé d'une ligne à chaque rotation du satellite ou si le satellite est stabilisé "3 axes", c'est-à-dire ayant sa face continuellement tournée vers la Terre, par balayage électronique.

4. Les données

Les diverses radiances mesurées par les capteurs à bord des satellites météorologiques peuvent être présentées aux utilisateurs sous différentes formes, la plus connue et la plus spectaculaire étant celle d'images.

Les signaux sont digitalisés à bord du satellite avant d'être transmis vers la Terre. Les signaux reçus sous forme analogique ont soit été créés à bord du satellite lui-même (émission APT = Automatic Picture Transmission des satellites météorologiques NOAA des USA), soit été générés par la station centrale.

Les utilisateurs ne reçoivent des satellites opérationnels sur orbites basses que des données brutes, car jusqu'à présent, ces satellites ne sont pas équipés de système de prétraitement de données. Par contre, celles

émises pour les utilisateurs par les satellites géostationnaires, reçues brutes à la station centrale gérant le satellite,ont subi un prétraitement. Celui-ci a le désavantage d'introduire un décalage entre le temps d'acquisition et celui de réémission, compensé par une qualité améliorée de l'information. Ce prétraitement est destiné à corriger certains défauts inhérents au système de prise de vue et à compléter les images par des annotations facilitant leur lecture. Ces corrections devront également, pour certaines applications, tenir compte des différences entre l'image reçue et l'image idéale, c'est à dire de la position réelle du satellite par rapport à sa position nominale.

4.1. Les données numériques

L'expression "données numériques" est employée ici pour désigner un produit dérivé du signal original. Le prétraitement mentionné ci-dessus devient ici impératif, car la mesure météorologique dérivée doit avoir la même précision que celle obtenue in situ.

Les plus gênants des défauts affectant l'information sont l'imprécision de synchronisation de ligne, le décalage relatif entre différents canaux. Les autres défauts ont en principe des effets moins gênants. Ce sont les variations de la vitesse de rotation du satellite, les irrégularités du déplacement pas à pas du miroir collecteur du téléscope, une nutation résiduelle du satellite.

Une autre catégorie de défauts doit être prise en considération lorsqu'il s'agit de comparer entre elles deux séries de données prises à des temps différents. Ce sont ceux attribués à une imperfection de la stabilité du satellite sur son orbite ou de la stationarité du satellite.

De plus les images doivent être traitées pour corriger les défauts géométriques. Tous les points de l'image doivent pouvoir être identifiés de telle façon que l'image totale coïncide au mieux avec l'image de référence.

4.1.1. Les vents

Les vents sont déterminés à partir du déplacement de nuages pouvant être identifiés dans au moins deux images mieux dans trois images consécutives (à ½ h d'intervalle pour les satellites géostationnaires actuels, stabilisés par rotation). La résolution spatiale, 5 km en infrarouge au nadir pour METEOSAT par ex., exclut d'utiliser un nuage individuel mais permet de suivre de fait des ensembles nuageux d'une superficie de plusieurs centaines de kilomètres carrés. Les études faites ont montré que ces ensembles se déplacent avec l'air en mouvement c'est-à-dire que leur vitesse et leur direction sont celles du vent soufflant au niveau où ils se trouvent. L'opérateur doit toujours rester conscient qu'il y a de notables exceptions, comme par exemple les nuages associés aux ondes orographiques, ce qui ne veut pas dire qu'il est impossible de déterminer le régime des vents par ce moyen dans les régions montagneuses.

La méthode d'extraction des vents se fait en plusieurs étapes. La première consiste (visuellement: par le météorologiste ou automatiquement: par l'ordinateur, procédé de sélection utilisé dans le programme METEOSAT) à choisir les traceurs et à déterminer leur déplacement. Si cette sélection n'offre pas de difficultés particulières à un opérateur entraîné, elle n'est pas opérationnelle car la détermination du champ de vent est trop longue. Le procédé automatique définit une petite fenêtre sur les données à l'heure H (32x32 éléments d'images pour le programme METEOSAT) et deux plus grandes (96x96) sur les données de l'heure H - ½ et H + ½. Pour toutes les petites fenêtres possibles à l'intérieur des grandes fenêtres un indicateur de ressemblance avec la petite fenêtre de l'image centrale est calculé. Les maxima de ressemblance correspondent à des déplacements possibles mais un certain nombre peut correspondre à des similarités dans l'image. Ces déterminations parasites sont éliminées en vérifiant qu'au maximum trouvé dans la comparaison entre les données H et H + ½ corresponde un maximum entre les données H et H - ½. La détermination de l'altitude du vent trouvé est l'objet de la seconde étape. Les valeurs de l'indicateur de ressemblance aux

positions correspondant à un maximum sont recalculées avec des échelles de gris modifiées pour supprimer l'information provenant de toutes les couches sauf une. La couche correspondante à l'échelle de gris qui obtient le meilleur indicateur de ressemblance se voit attribuer l'ensemble nuageux duquel la vitesse et la direction du vent qui l'entraîne, sont déterminés. Au cours de la troisième étape, le vecteur vent correspondant est obtenu par le déplacement qui aurait été observé dans une image idéale. Cette détermination est basée sur l'utilisation des matrices de déformation qui permettent de calculer pour chaque élément la vraie position qu'il occupe dans l'image idéale. Avant d'être distribués,ces vents sont contrôlés par un opérateur ce qui permet de supprimer les erreurs résiduelles. Par ce procédé, plus de 1500 vecteurs vents peuvent être obtenus pour chaque heure synoptique choisie dans un délai de 1h30. Sur la base des mêmes observations, un opérateur n'ayant pas la nécessité de tenir une échéance, pourrait en calculer plusieurs milliers.

4.1.2. Les températures

La radiance reçue dans une certaine longueur d'onde par un capteur à bord d'un satellite est dépendante du profil vertical de température et des propriétés optiques de l'atmosphère. L'équilibre thermodynamique local existant, les lois classiques sont applicables. Le principe de la télémesure des températures repose sur l'absorption sélective des radiations par les différents constituants atmosphériques gazeux. Aux longueurs d'onde auxquelles un constituant est transparent, les radiations atteignant le satellite proviennent de la surface terrestre. La contribution des couches atmosphériques, qui radient également à ces longueurs d'onde, diminue rapidement avec l'altitude puisque d'une part l'énergie radiée est fonction de la température diminuant dans la troposphère avec l'altitude et d'autre part par la raréfaction de l'air aux couches supérieures. Aux longueur d'onde auxquelles le constituant est absorbant, les radiances atteignant le satellite proviennent des couches supérieures de l'atmosphère. Un stade intermédiaire caractérise l'émission pour les longueurs d'ondes auxquelles le constituant est semi-transparent (ou semi-opaque). Dans les équations exprimant l'énergie émise en fonction des paramètres atmosphériques intervient la fonction de pondération. Celle-ci donne la relation d'apport de chaque couche et du sol au total. Sa connaissance empirique se complique

du fait qu'aucune fenêtre atmosphérique n'est parfaitement transparente, ni aucun "mur" parfaitement opaque. Pour un constituant réparti de façon homogène dans toute l'atmosphère, ces fonctions de pondération sont valables partout. En dessous de 50 km, deux constituants atmosphériques jouissent de ces propriétés, ce sont l'oxygène moléculaire et en première approximation le dioxyde de carbone (le gaz carbonique). Les radiances mesurées pour le premier se situent dans les micro-ondes, pour le second dans l'infrarouge au voisinage de 15 mμ.

Connaissant l'énergie radiée, il est possible d'en déduire le profil vertical de température. Plusieurs méthodes ont été développées. Actuellement cette technique est suffisamment avancée. Les températures moyennes déduites pour les couches considérées sont de la même précision que les températures correspondantes déduites de radiosondages. Par contre, la résolution verticale n'atteint pas la finesse de celle des radiosondages. Néanmoins les grandes inversions de température sont décelées.

Pour déterminer les hauteurs correspondant aux niveaux où ces températures ont été trouvées, il est nécessaire de connaître la pression à un niveau de référence. Celui-ci est généralement la surface terrestre, où la pression est estimée à partir des mesures disponibles. Les valeurs mesurées par les aéronefs peuvent être également utilisées.

4.1.3. Les températures à la surface terrestre

La détermination de la température de la surface terrestre se fait en mesurant la radiance dans une longueur d'onde où l'atmosphère est transparente. Mais, ainsi qu'il le fut remarqué précédemment, l'atmosphère n'est parfaite à aucune longueur d'onde et émet elle-même dans cette longueur d'onde. De plus, il faut tenir compte de l'émissivité de la surface, c'est-à-dire connaître sa déviation par rapport à un corps noir parfait.

Le facteur atmosphérique le plus gênant est la vapeur d'eau, répartie de façon inhomogène dans la troposphère, quasi absente au-dessus. En disposant de valeurs du rayonnement dans différentes parties du spectre électro-

magnétique pour lesquelles la vapeur d'eau est plus ou moins transparente, il est possible d'estimer de façon suffisamment précise le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère pour effectuer les corrections voulues. En ne disposant que d'une seule mesure, comme c'est encore le cas avec la plupart des satellites opérationnels, le contenu en vapeur d'eau est estimé soit en partant de valeurs climatologiques, soit en utilisant une autre longueur d'onde (par exemple la radiance mesurée dans le canal d'absorption de la vapeur d'eau pour METEOSAT). La valeur des corrections va de dizièmes de degré centigrade pour une atmosphère froide et sèche à quelque dix degrés centigrades pour une atmosphère chaude et humide.

Seule jusqu'à présent, la détermination de la température de l'eau à la surface est devenue opérationnelle. Le champ de température obtenu présenté sous forme d'image permet de suivre les méandres des courants marins de surface et des tourbillons les accompagnant.

La panne de METEOSAT 1 a retardé l'introduction opérationnelle de la température au sommet des nuages, c'est-à-dire de la répartition tridimensionelle des masses nuageuses. Elle sera opérationnelle dès 1982, suite au succès de METEOSAT 2.

La détermination de la température de la surface des sols est moins avancée, mais elle est déjà utilisée de façon régulière en Floride, pour la détermination des gels. De façon qualitative, l'imagerie infrarouge permet au-dessus des continents de différencier les régions envahies par l'air polaire des régions avoisinantes.

4.1.4. Les constituants mineurs de l'atmosphère

L'intérêt justifié que porte aujourd'hui le public aux problèmes de la pollution anthropogène de l'atmosphère rend impératif un jugement objectif, basé sur des connaissances scientifiques fondées, des effets que cette pollution pourrait avoir sur l'équilibre atmosphérique. Si la pollution de la basse atmosphère peut être contrôlée in situ, il n'en va pas de même de celle de la haute atmosphère. L'utilisation de satellites est

nécessaire et indispensable, puisqu'il s'agit d'assurer la surveillance globale permanente, surveillance dont la réalisation in situ est aujourd'hui en dehors des possibilités techniques et financières, demain économiquement moins avantageuse. Par exemple, ceci est particulièrement valable pour le cycle de l'ozone dans la stratosphère, dans lequel les fréons libérés par l'activité humaine interviennent d'une façon encore débattue par les scientifiques, suite aux lacunes dans la connaissance de leur répartition, de leur concentration et également des processus photo-chimiques auxquels ils participent.
Chacun des constituants mineurs, la vapeur d'eau, l'ozone, les fréons, les gaz azoteux, l'ammoniac, le méthane pour ne mentionner que quelques uns des plus importants, absorbe et émet le rayonnement de façon propre. La technique de télémesure est en principe la même que celle utilisée pour la détermination du champ tridimensionnel de température de l'atmosphère. En choisissant de façon appropriée les longueurs d'onde pour lesquelles la radiation reçue par le radiomètre à bord sera mesurée, il est possible d'en obtenir la répartition spatiale et la concentration du constituant recherché. Cette méthode utilise de préférence le balayage vertical du limbe terrestre ou l'occultation du soleil par l'atmosphère, c'est-à-dire en mesurant les radiations tangentes à la surface terrestre et non celles venant "du bas". Les mesures obtenues sont plus précises pour les couches supérieures de l'atmosphère, c'est-à-dire celles au-dessus de la troposphère. Par contre, suite aux longs parcours atmosphériques du rayonnement, s'effectuant dans la partie la plus dense de l'atmosphère, et aux effets d'écran dus à la présence de nuages, cette technique n'est pas utilisable en dessous de 12-15 km, c'est-à-dire n'est pas applicable à la troposphère. Le profil tangentiel de température est également déduit des radiances mesurées dans la bande d'absorption du gaz carbonique vers 14-15 µm.

Cette surveillance de la stratosphère n'est pas encore opérationnelle. Seuls les satellites expérimentaux sont équipés (Nimbus des USA, METEOR russes ou les stations spatiales habitées). Mais déjà, la dernière génération de satellites météorologiques opérationnels des USA, les TIROS N (dès NOAA 6), assure une observation régulière de certains paramètres déduits de radiances émises dans certaines longueurs d'onde spécifiques.

4.2. L'imagerie

Les données reçues des satellites météorologiques peuvent être présentées à l'utilisateur sous forme d'images puisqu'elles sont acquises par balayage, la seconde dimension étant donnée par l'avance du satellite sur son orbite ou la rotation d'un miroir devant le radiomètre ou de ce dernier à chaque ligne, ainsi qu'il le fut déjà remarqué. Les données transmises de façon analogique sont visualisées sous forme d'images photographiques ou éventuellement enregistrées sur bande video pour apparaître ensuite sur un écran de télévision. Les données numériques peuvent être également visualisées sous forme d'images, mais le sont presque exclusivement sur un moniteur TV, ces derniers étant le plus souvent interactifs, c'est-à-dire permettant un dialogue "interrogation utilisateur - réponse machine". Dans ce cas, l'utilisateur peut choisir ou combiner les présentations désirées soient en tons gris, soient en couleurs, une couleur étant attribuée à chaque niveau radiométrique. Pour autant que la même scène ait été observée simultanément dans trois longueurs d'onde différentes, une présentation dite "fausses couleurs" (puisque généralement ces longueurs d'onde ne sont pas sensibles à l'oeil) peut être créée.

L'imagerie photographique, la visualisation la plus usuelle parce qu'étant simple et économique, est le plus couramment utilisée par les Services météorologiques opérationnels. Mais ceux-ci seront de plus en plus équipés de systèmes interactifs. Ces derniers étant non seulement plus puissants, mais également plus souples, permettent de faire sans délai les corrections nécessaires et réduisent les manutentions. Il faut tout de même souligner qu'il est possible d'effectuer un prétraitement limité des données analogiques avant de les présenter sous forme d'imagerie, comme par exemple en augmentant le contraste entre certains niveaux radiométriques.

Dans une photographie prise au voisinage d'une plage, les nuages et le sable apparaissent plus ou moins blancs, l'eau est foncée, le sol recouvert de végétation et les forêts éventuellement présentes plus ou moins sombres. L'imagerie prise dans la lumière solaire sera visualisée de cette façon, un haut albedo apparaissant blanc. Dans l'imagerie infrarouge, dite également

thermique puisque elle fait ressortir les contrastes de température, les faibles radiances des sources froides, tels que les nuages, seront visualisées en tons plus ou moins blancs, les hautes radiances, tels que les sables surchauffés du désert durant la journée en tons noirs, les surfaces recouvertes par la végétation par des gris intermédiaires. Ces exemples illustrent l'avantage d'une analyse multispectrale: permettre une différenciation univoque des aires observées, ici par exemple les nuages apparaissant clairs dans les deux imageries, par contre le sable est clair dans l'une, mais foncé dans l'autre. Plusieurs facteurs compliquent cette interprétation. Par exemple, dans la moitié hivernale de l'année, par situation anticyclonique, les hauteurs du Jura, des Vosges et de la Forêt Noire apparaîtront plus foncées dans l'imagerie infrarouge, parce que plus chaudes que les basses régions comme le Plateau suisse et la Plaine du Rhin sous l'air froid.

Le détail visualisé est dépendant de la résolution spatiale du radiomètre, c'est-à-dire grossièrement de la grandeur minimum que deux cibles doivent avoir pour être identifiées individuellement. Meilleure est la résolution, plus volumineux est le flot d'informations à transmettre, plus élaborée la station de réception et le système interactif. Le degré de résolution spatiale dépend de l'utilisation faite de l'imagerie. Un détail dans un nuage ne persiste guère au-delà d'une minute. Intéressant pour le physicien des nuages, il n'est d'aucune utilité au prévisioniste. Un cumulus a une durée de vie inférieure à l'heure, voire à la demi-heure. Une cellule orageuse s'est entièrement transformée en moins d'une heure, mais le complexe dans lequel elle se trouva persistera plusieurs heures. Le météorologiste doit pouvoir reconnaître l'ensemble dans l'imagerie, le suivre dans son développement, mais il n'a pas besoin d'identifier chaque cellule puisque celle-ci aura changé entre le temps que met le météorologiste à la reconnaître et celui où son avis de tempête parvient à l'intéressé. Les complexes orageux recouvrant à leur début une aire de quelques dizaines de kilomètres carrés et vers la fin souvent plusieurs milliers, une résolution spatiale de l'ordre de 1 à 2 km est suffisante, voire de 2-6 km pour une cadence d'images d'une chaque demi-heure.

Les grandes masses nuageuses liées aux perturbations de la circulation atmosphérique évoluent plus lentement que les précédentes, mais leur durée de vie excède rarement deux jours. Ici, une résolution spatiale inférieure ou égale à 10 km est suffisante.

Un facteur encore peu utilisé dans la prévision à moyen terme est celui de la répétition de séquences similaires de temps dans la circulation atmosphérique à grande échelle. Cette répétition est masquée par le "bruit journalier" des perturbations. Elle se remarque par une succession d'évolution du même type s'étendant sur une période de quelques jours, comme par exemple une suite de passages nuageux, pluvieux, ensoleillé. Elle peut être décelée dans le développement des associations nuageuses vu dans un film en temps accéléré acquis au moyen de l'imagerie des satellites météorologiques géostationnaires. Ici, une résolution de 20 à 25 km serait suffisante, obtenue par compression des données satellitaires.

Les satellites météorologiques opérationnels actuels tiennent déjà compte de façon optimale de ces besoins. Lorsque le système de satellites prévu par la Veille météorologique mondiale (OMM) sera mis en place, la météorologie disposera d'un puissant complément d'informations des données in situ. Sa retombée sur la qualité des prévisions, immédiate pour les données quantitatives en ce sens que les conditions initiales seront mieux connues, nécessitera une recherche de base intensive. Celle-ci est à l'heure actuelle à peine commencée, l'effort étant encore porté sur l'amélioration des données quantitatives directement utilisables par les modèles numériques.

Deux effets importants expliquent partiellement la différence apparente existant entre la circulation atmosphérique révélée par l'imagerie satellitaire et celle visible dans les cartes météorologiques. Les masses nuageuses sont étroitement associées aux masses d'air en mouvement. Par exemple, les nuages en bandes se trouvent être étroitement liés à la zone de transition entre deux masses d'air, dans celle potentiellement plus chaude.

Mais ces masses d'air sont elles-mêmes en dérive. Le vent mesuré par le déplacement d'une radiosonde ou d'un nuage traceur sera la résultante du mouvement le long de la zone de transition et de la dérive. Ainsi, les associations nuageuses se différencient du flux momentané indiqué par les vents des cartes météorologiques. De plus, ces déplacements ne sont pas horizontaux, mais ont une composante verticale faible, mais persistante sur de longues distances. Les différences d'altitude sont de l'ordre de quelques kilomètres. De ce fait, les masses nuageuses ne paraissent pas liées étroitement au champ de température des cartes météorologiques.

Cette analyse passionnante se renouvelle chaque jour ce qui a fait dire à un météorologiste que le prévisioniste est un scientifique dont la recherche est continuellement interrompue: l'analyse d'une nouvelle série d'informations et la nécessité d'émettre une prévision sur une base qu'il n'a qu'esquissée.

5. Les applications

5.1. L'analyse météorologique

Dans son analyse de la situation météorologique, le météorologiste prend comme guide l'évolution précédant cette situation. Cette dernière l'aide à surmonter les difficultés dues aux déficiences du réseau d'observations conventionnelles. C'est dans cette étape qu'intervient l'analyse de l'imagerie satellitaire. Sa prévision découlera de ce travail, notamment en l'aidant à interpréter les prévisions numériques reçues pour "y sortir le temps qu'il fera".

Ces prévisions numériques se basent uniquement sur la situation à un instant donné. Elles ne tiennent, tout au moins jusqu'à ce jour, aucun compte de l'évolution ayant finalement conduit à cette situation. L'analyse se fait de façon automatique, dite objective, par interpolation entre les valeurs ponctuelles disponibles en se basant sur la dernière prévision. Plus l'échantillonage est dense, meilleure est l'analyse. Les données quantitatives obtenues des radiances, ponctuelles également, complètent le manque de données dans les régions peu peuplées, c'est-à-dire améliorent la connaissance des conditions initiales.

Ici, l'utilité et le bénéfice à retirer des satellites météorologiques sont immédiats. Par exemple, il y a peu de chance qu'une dépression atlantique qui finira par affecter le temps en Europe, passe inaperçue. L'information satellitaire est dans ce cas réduite à un complément. Elle n'apporte, ni ne conduit à une amélioration directe de la compréhension de la circulation atmosphérique. Les équations à intégrer restent les mêmes.

L'apport satellitaire dans l'analyse de l'évolution ayant conduit à la situation météorologique présente est non seulement essentiel à l'analyse de cette situation elle-même, mais également nécessaire à l'établissement de la prévision ou à l'interprétation des prévisions numériques.

S'il ne fut fait mention jusqu'à présent que de l'utilité de l'imagerie satellitaire dans l'analyse de la situation météorologique, base de toute prévision et avant d'entrer dans les grandes lignes de cette analyse, il convient de souligner que le champ d'application est plus vaste et touche à tous les domaines de la météorologie prise dans son sens le plus large, c'est-à-dire l'étude de tous les phénomènes atmosphériques. Cette extension reste encore réservée aux universités, bien que leur importance potentielle touche déjà la vie de tous les jours, comme par exemple dans le cas de l'ozone. En fournissant la répartition spatiale de cet élément, les données satellitaires permettront non seulement une meilleure connaissance de la dynamique de la haute atmosphère encore mal connue, mais encore d'y estimer son transport, un des facteurs essentiels de son cycle atmosphérique.

Peut-être la raison profonde pour laquelle, l'imagerie satellitaire reste encore isolée est que cette imagerie donne un aspect "lagrangien" de la situation météorologique, alors que les cartes météorologiques en fournissent un aspect "eulérien". L'approche "lagrangienne" d'un phénomène atmosphérique est toujours plus difficile, car il faut pouvoir déterminer les trajectoires suivies par les particules, que l'approche "eulérienne" qui se marque par la cristallisation à un moment donné de l'état des vitesses.Mais cette dernière fournit une représentation moins directe

et moins physique que celle des trajectoires des particules. Du reste, une partie des fautes de prévision provient d'une interprétation erronée des cartes météorologiques, le temps étant finalement "lagrangien".

Les régions polaires sont chacune recouvertes d'une calotte d'air froid. Celle-ci n'est pas répartie régulièrement autour du pôle, mais présente des asymétries variables sous forme de quelques "boursoufflures". L'extension de ces dernières vers les latitudes inférieures diffère continuellement, mais l'évolution reste lente. Le long de leur flanc occidental, de l'air polaire s'écoule par poussées successives d'intensité fluctuante, avec une fréquence moyenne de l'ordre du jour. Ce rythme relativement rapide des poussées d'air polaire vis-à-vis de l'évolution nettement plus lente des "boursoufflures" conduit à une répétition du même type de temps au-dessus des régions où elles évoluent et à une persistence du temps au-dessus des autres régions (généralement région anticyclonique). L'avantage des films en temps accéléré obtenus à partir de la succession dans le temps des images reçues des satellites météorologiques géostationnaires sera dans la saisie de ces boursoufflures, saisie difficilement obtenable des cartes météorologiques, masquée par le bruit causé par ces poussées. Ceci explique également partiellement le plus grand succès des prévisions en régime anticyclonique, la persistance du même temps y étant plus grande.

Dès le début, la partie orientale de ces poussées entre en interaction avec l'air polaire ancien au sein duquel elles pénètrent. Cette amorce est clairement révélée dans l'imagerie soit par les directions différentes des rues de nuages dans les deux masses d'air en conflit, soit par la présence d'une courte bande de cirrus en forme d'arc. A un stade plus avancé, une masse nuageuse en forme de virgule s'observe souvent ou alors une courbure anticyclonique au milieu de la masse frontale de la poussée précédente.

Le développement de la cyclogénèse (eulérien), c'est-à-dire du tourbillon (lagrangien) qui s'avance, dépendra de l'énergie potentielle disponible.

Celle-ci peut être estimée par l'ampleur de l'air froid actif dans l'imagerie satellitaire. A ce stade, dans les cartes synoptiques une baisse de pression s'observe dans l'air froid à l'avant de la poussée qui autrement n'y est pas décelable. Le mouvement tourbillonnaire ainsi créé se déplace en bordure de ces extensions méridionales de la calotte polaire. Se déplaçant en bordure, ce tourbillon est animé également d'un mouvement de translation. Le vent mesuré in situ ou déduit à partir du déplacement d'un nuage traceur, sera la composante du mouvement propre au tourbillon et de la dérive. De ce fait, le centre du tourbillon nuageux ne coïncidera pas avec le centre de la dépression associée. Sur leur bordure, la circulation de l'air chaud, aux latitudes tempérées généralement un air polaire modifié, aux régions subtropicales l'air tropical, se marque par la présence de cirrus. Ces masses nuageuses sont plus développées sur le flanc oriental de ces tourbillons ou des boursoufflures car l'air y a une composante verticale de l'ordre du décimètre à la seconde. Plus cette avance de l'air froid est active, plus importante sera la composante verticale, plus dessinée la bande de cirrus. L'air chaud s'écoule ensuite (courbure anticyclonique aux latitudes septentrionales) sur le flanc est de la poussée voisine. Les nuages s'effilochent le mouvement ayant une composante verticale subsidente également de l'ordre du décimètre à la seconde, prenant une organisation de "queue de cheval". La direction de la dérive du tourbillon et une estimation de sa vitesse peuvent être directement déduites de l'angle entre la direction des "crins" et celle du vent à l'altitude où ils se trouvent. Le mouvement continu peut être suivi par la répartition de la vapeur d'eau dans l'imagerie obtenue à la longueur d'onde de la bande d'absorption de la vapeur d'eau (METEOSAT).

Ce tourbillon par renforcements successifs, induits par de nouvelles poussées d'air froid peut passer d'une boursoufflure à la suivante (évolution au-dessus de l'Atlantique par exemple, surveillée par l'imagerie METEOSAT et GOES E). Finalement, il se dissout progressivement à l'intérieur de la calotte polaire. La structure nuageuse associée montre des signes de "vieillissement" et la forme spirale s'estompe. La partie méridionale des fortes pénétrations d'air polaire finit généralement par être isolée

en dehors de la calotte polaire suite à une coupure de l'alimentation en air froid due aux nouvelles évolutions. Cette coupure et cette formation en goutte d'air froid sont facilement suivies dans l'imagerie satellitaire. La goutte d'air froid peut y être localisée sans difficultés, tandis qu'elle est mal saisie dans les cartes synoptiques, se formant généralement au-dessus de régions vides de population. Lorsqu'elle se trouve au-dessus de l'Europe, c'est le marais barométrique. Elle se comporte passivement. L'activité subséquente finira par sa réintégration dans la calotte polaire.

La partie occidentale de ces grandes poussées s'étale. Cet étalement se poursuit souvent, ainsi que le montre l'imagerie, jusque dans la zone intertropicale de convergence. C'est l'alizé. Les films en temps accéléré montrent que ces avances de l'air froid trouvent leur correspondance dans la recrudescence de l'activité convective dans cette zone intertropicale de convergence, sur les bords de ces étalements. L'advection de l'air tropical vers les latitudes supérieures se trouve renforcée. Celle-ci peut être suivie aisément dans l'imagerie obtenue dans la bande d'absorption de la vapeur d'eau.

5.2. La prévision à très court terme

Cette prévision a pour objet de prédire l'évolution de phénomènes de petite à moyenne échelle. Ceux-ci sont généralement influencés par la nature du terrain au-dessus duquel ils évoluent. Cette prévision demande une connaissance détaillée du temps présent et de son évolution antérieure. Parmi ces phénomènes se rangent l'orage, aux latitudes moyennes le phénomène le plus violent, parfois dévastateur, et le brouillard. Une autre catégorie est représentée par les effets de la chaîne alpine sur le temps.

Du fait de leur faible extension, de leur présence au-dessus d'une région peuplée, il semblerait que ces phénomènes soient facilement reconnus. Tel n'est pas le cas avec les moyens conventionnels. Ni la fréquence

des observations, ni la densité du réseau suffisent. Les radars météorologiques et la récente mise en place du réseau de stations automatiques d'observation ont grandement amélioré la situation. Néanmoins, un réseau adéquat demanderait de quintupler le réseau actuel ce qui serait dispendieux. L'imagerie satellitaire comble cette lacune puisqu'elle fournit au prévisioniste une vue d'ensemble du champ nuageux. Sa faiblesse réside dans le fait que si la résolution spatiale est suffisante, comme pour l'imagerie reçue des satellites météorologiques sur orbites héliosynchrones, la cadence d'observation reste insuffisante et vice-versa, si cette dernière est adéquate, comme dans le cas des satellites géostationnaires du type METEOSAT, la résolution spatiale reste encore, sauf pour la série GOES des USA, insuffisante.

Grâce à la qualité de cette imagerie, une combinaison de celle fournie des deux sources permet de localiser de façon suffisamment précise le phénomène surveillé et de le suivre de façon convenable en s'aidant des observations in situ, c'est-à-dire des détails révélés par l'imagerie des NOAA pouvant être localisés dans l'imagerie de METEOSAT correspondante, suivis dans la suite des images en s'aidant des données radars et des stations automatiques.

La formation et la dissolution du brouillard, l'évolution d'un complexe orageux suivent certaines règles qui ont pu être déduites de leur étude basée sur l'ensemble des données conventionnelles et satellitaires. Par exemple, le complexe orageux a une phase de croissance rapide précédant le paroxysme, ce dernier étant atteint en moins de deux heures. Cette phase est suivie d'une extension progressive, d'une durée de plusieurs heures, correspondant a une lente diminution d'activité. Connaissant ces règles, le prévisioniste aura la possibilité d'extrapoler l'évolution de l'événement jusqu'au terme choisi.

Les masses nuageuses sont représentées souvent dans l'imagerie par un ton uniforme, car avec les visualisateurs actuels, il n'est pas possible, même sur papier photographique, de différencier tous les tons gris. Pour une analyse optimale, il sera

nécessaire d'utiliser au mieux la résolution radiométrique, c'est-à-dire le prévisioniste devra finalement se servir d'un système interactif de traitement des données. Il est nécessaire de souligner que l'amélioration des techniques spatiales doit être accompagnée d'une amélioration des techniques d'analyse pour justifier scientifiquement et économiquement les coûts élevés d'un système d'observation par satellite. Cette modernisation des moyens d'analyse étant en retard, il y a danger que la conclusion soit tirée que l'information satellitaire est secondaire n'étant pas utilisable de façon optimale.

5.3. La prévision à court terme

Cette prévision, la plus courante, a pour effet de prédire les grandes lignes de l'évolution du temps pour les 24 à 48 heures suivantes, lignes dans lesquelles s'insèrent les différents phénomènes dont il fut question au précédent chapitre. Elle s'attachera, en se référant à la description sommaire de la circulation atmosphérique présentée au chapitre 5.1., à estimer l'évolution des tourbillons, c'est-à-dire à reconnaître les modifications et déplacements de ceux susceptibles de toucher les régions couvertes par la prévision durant l'intervalle de temps considéré. Le prévisioniste jugera de l'état présent et passé de ceux-ci, des nouveaux développements en cours, comme par exemple de la vigueur des nouvelles poussées d'air froid. L'extrapolation dans le futur est grandement facilitée par les prévisions numériques, celles-ci ayant atteint un remarquable niveau. Seulement, il ne faut pas perdre de vue que le taux actuel de réussite stagne depuis un certain temps vers 80-85%.

L'utilité des données satellitaires portera en premier lieu sur les études permettant non pas d'améliorer le taux de réussite, mais de réduire les fautes de prévisions dues aux changements imprévus de temps, le point le plus faible de toutes les prévisions actuelles et peut-être économiquement le plus important. Cette faiblesse évidente de la méthode "eulérienne" pourrait être partiellement compensée en développant plus systématiquement l'approche "lagrangienne", c'est-à-dire par une étude plus poussée des conditions réglant le déplacement des masses d'air.

Les développements conduisant aux changements brusques de temps sont indiqués par des "signes nuageux" avant-coureurs. Les bases nécessaires sont encore à établir. Le premier pas pourrait consister en une refonte du modèle norvégien.

L'imagerie satellitaire montre que les notions nouvelles de fronts froid ou chaud, de masses d'air ne sont plus valables à la lettre. Elle indique la stratification prononcée de l'atmosphère, le fait que les déplacements verticaux à grande échelle sont restreints à quelques kilomètres d'extension, mais ne s'étendent pas au travers de toute la troposphère, même par étapes successives. Le courant vertical s'étendant du sol à la tropopause est limité à la zone intertropicale de convergence et de façon plus restreinte partiellement à l'activité convective à l'intérieur de l'air froid et aux zones de transition entre les airs froids et chauds aux latitudes moyennes. L'imagerie prise dans le canal d'absorption de la vapeur d'eau semble déceler que les descentes d'air stratosphérique dans la troposphère forment la contre-partie à ces ascendances et qu'elles s'étendraient elles aussi au travers de toute la troposphère.

Cette analyse de l'évolution des tourbillons atmosphériques à grande échelle est indispensable à ce type de prévision, car la durée de vie de ces tourbillons est du même ordre de grandeur que l'intervalle de temps couvert par la prévision. De plus, indirectement, elle conduira à une amélioration du taux de réussite, légère peut-être, en permettant au prévisioniste de mieux déduire le temps à partir des prévisions numériques.

La possibilité de disposer de films en temps accéléré aidera le prévisioniste de mieux discerner le mouvement (sensivité de l'oeil au mouvement) que la comparaison laborieuse d'une série d'images. Quelques vents placés en fin de séquence, par exemple, faciliteront la pensée.

5.4. La prévision à moyen terme

Cette prévision a pour objet de prédire l'évolution du temps sur une période de l'ordre de la semaine, aujourd'hui encore, la limite de validité des prévisions numériques. Sur la base des méthodes scientifiques sur lesquelles elles s'appuient, il est guère probable que ces dernières puissent êtres étendues au-delà de dix jours, si même cette limite peut être atteinte. Le facteur limitatif n'est pas une suite unique des simplifications ou paramétrisations pour rendre résolubles les équations thermodynamiques, mais provient certainement aussi de la nature variable de la circulation atmosphérique. Les avances apparemment parfois incontrôlées de l'air froid partant des régions polaires ou les recrudescences d'activité à l'intérieur de la zone intertropicale de convergence lui donnent un comportement (réel ou apparent ?) aléatoire et restent encore inexpliquées. Ces fluctuations vont des variations journalières du temps aux changements de climats.

Dans le cadre de la circulation générale esquissée au chapitre 5.1., le prévisioniste devra rechercher et localiser les inégalités dans la répartition de l'air froid au-dessus des régions polaires, en bordure desquelles se forme le "bruit météorologique", c'est-à-dire là où naissent, se développent, évoluent et s'estompent les tourbillons atmosphériques à grande échelle. L'évolution lente de ces inégalités, de par leur durée irrégulière, restreint l'utilisation pour les prévisions à moyen terme, de cartes météorologiques moyennes. Par suite, la connaissance de l'évolution antérieure est essentielle à l'interprétation des prévisions numériques à moyen terme, principalement pour en estimer leur degré de confiance en fin de période. Ici, à nouveau, il apparaît qu'une séquence d'images d'une certaine durée, présentée sous forme de film en temps accéléré, soit nécessaire au prévisioniste pour lui permettre d'obtenir une idée valable de la distribution de ces inégalités dans la répartition de l'air polaire et d'en saisir leur variabilité. Sur cette base, il lui sera possible de mieux juger

du déplacement des tourbillons, c'est-à-dire des dépressions des cartes météorologiques.

Une fois de plus, l'utilité de l'imagerie satellitaire se présente, non pas comme un remplacement, mais comme un complément essentiel de l'instrumentation dont dispose déjà le prévisioniste. Dans le futur, mais tout l'effort reste encore à faire,il sera certainement possible, de cette imagerie quantifiée d'en déduire des prévisions numériques, tout comme il le fut possible à partir des données ponctuelles. Il n'en reste pas moins que la qualité des prévisions à moyen terme ne s'améliorera sensiblement que lorsque le "facteur aléatoire" sera mieux connu.

5.5. La climatologie

Si la série des applications de l'imagerie satellitaire aux prévisions s'arrêtent aux prévisions à moyen terme et qu'elle ne traite pas celle à long terme (mois, par exemple), c'est qu'il y a une liaison entre ces dernières et la climatologie. Toutes les deux tiennent compte d'une persistance à long terme en plus d'un changement saisonnier. L'évolution générale des derniers mois n'a pas tendance à changer brusquement. Les déplacements des inégalités de la répartition de l'air polaire, leurs modifications peuvent être suivies. Selon leurs positions par rapport à une région, leur passage peut causer un changement allant par exemple d'une période sèche et chaude à une période humide et fraîche avec une courte zone de transition. Cette façon de procéder exige un traitement global ou pour le moins hémisphérique, c'est-à-dire qu'il est en dehors de portée du service météorologique national d'un petit pays. Les données nécessaires devront être élaborées à un centre supranational ou à un Centre mondial de l'OMM. La construction de cartes de nébulosité moyenne, plus justement de radiances moyennes, nécessite de disposer de l'imagerie satellitaire globale. Cette dernière doit pouvoir être échangée, par exemple par le truchement des satellites géostationnaires tel que le représente la mission assurée par le Centre de météorologie spatiale (Lannion, F) relayant via METEOSAT un

choix d'images du satellite météorologique géostationnaire GOES E ($75^{o}W$) des USA ou alors être stockée à bord du satellite météorologique sur orbite héliosynchrone pour être reçue à la station le gérant. Tout comme pour les autres prévisions, dans le cas de la prévision à long terme, la connaissance du passsé est indispensable à l'interprétation de l'avenir. Cette connaissance du passé use des méthodes de la climatologie. Elle rencontre donc les mêmes problèmes: acquisition, stockage, traitement et présentation d'un volume considérable de données.

La climatologie a pour objet l'étude des climats, c'est-à-dire de l'ensemble des circonstances atmosphériques propres à une région du globe. La période considérée déterminera la spécialisation, allant d'une durée de quelques dizaines d'années aux périodes géologiques. Son approche en est variable:dynamique ou statistique.

Jusqu'à présent, l'économie générale n'utilise pas de façon optimale les facteurs météorologiques et climatologiques, voire les ignore,peut-être rebutée par leur présentation. De plus en plus, la Société devient consciente des dangers potentiels de modification des climats que représentent les divers aspects de l'activité humaine. Ce réveil progressif, souvent encore subjectif, a conduit la communauté scientifique à définir les problèmes à résoudre. L'OMM vient de mettre au point un programme climatologique mondial. Certains problèmes doivent être étudiés sur un plan supranational, comme par exemple, la sécheresse du Sahel. L'implantation d'industries polluantes, la planification du territoire nécessitent une connaissance des facteurs climatologiques au niveau national, voire local.
Chacune de ces branches traitera d'une façon propre les données disponibles, satellitaires notamment. Le volume des informations à traiter ne variera pas sensiblement selon l'étendue géographique considérée. Plus la région est petite, plus le détail est important, plus élevées

les résolutions spatiale et radiométrique. A l'échelle mondiale, les résolutions spatiale et radiométrique sont moins fines. Ici également, les données satellitaires ont l'avantage de leur "globalité".

L'image satellitaire sera un complément nécessaire aux données conventionnelles, dans la présentation aux ingénieurs, architectes ou planificateurs des informations climatologiques. Etant ponctuelles, c'est-à-dire faites à un endroit ayant une propre exposition, les observations conventionnelles sont difficilement interpolables lorsque l'orographie du pays est compliquée, comme c'est le cas de la Suisse. L'imagerie satellitaire à haute résolution favorisera et guidera cette interpolation. Par exemple, celle du satellite HCMM (Heat Capacity Mapping Mission) des USA, avec sa résolution spatiale de 500 mètres, permet notamment une délimitation des lacs d'air froid nocturnes et une estimation des effets de pente dus à l'inégale insolation.

L'ampleur du sujet en exclut un traitement complet. Les considérations précédentes se sont limitées à quelques exemples illustrant l'utilisation et le bénéfice à retirer des données satellitaires.

6. Les coûts et les retombées économiques

6.1. Les coûts

Comme tout autre programme important (Bateaux météorologiques de l'Atlantique Nord, Centre européen de prévision à moyen terme, par exemple), un programme de satellites météorologiques est coûteux. La Veille météorologique mondiale de l'OMM (adoptée par le Congrès) prévoit un système d'observation par satellites. Celui-ci devrait comprendre cinq satellites météorologiques géostationnaires, en ceinture autour de l'équateur, et deux satellites sur orbites héliosynchrones. L'OMM n'aura aucune influence ni sur le financement, ni sur la mise en place ou la gestion de ces satellites, ceux-ci restant propriété intégrante de l'Etat ou du groupe d'Etats les ayant financés. Ces Etats se sont organisés en un Groupe de coordination, sans personnalité juridique, pour assurer une exploitation optimale des satellites géostationnaires.

Les USA se sont engagés à fournir deux satellites géostationnaires et un satellite sur orbite héliosynchrone, l'URSS s'est engagée à gérer un satellite sur orbite héliosynchrone et prévoit de mettre à disposition un satellite géostationnaire. Le Japon et l'Europe espère chacun assurer la fourniture d'un satellite géostationnaire sur une base opérationnelle faisant suite à ceux qu'ils opèrent actuellement sur une base expérimentale préopérationnelle. Ce système de satellites a fonctionné parfaitement durant la Première expérience mondiale du GARP, un troisième satellite géostationnaire des USA ayant pris la place du satellite russe manquant.

Il ne sera tenu compte ici que des coûts se rapportant au projet de programme européen de satellites météorologiques géostationnaires opérationnels. La phase préopérationnelle de ce programme est financée uniquement par les Services météorologiques allemand, anglais, belge, danois, français, italien et suisse; la Suède ayant seulement participé à la phase de développement du satellite et à la construction de deux unités de vol. Depuis le début de cette année (1981), la plupart des Services météorologiques de l'Europe de l'ouest ont pris l'initiative, avec l'assistance de l'Agence spatiale européenne, d'essayer de mettre sur pied un programme opérationnel de satellites météorologiques géostationnaires. Ils ont reçu une offre du consortium ayant construit les satellites METEOSAT actuels, offre qui est à la base des estimations présentées ici.

Les coûts se rapportant au programme préopérationnel se divisent en deux, l'un se rapportant au segment spatial, l'autre au segment sol. Les coûts totaux, au prix de 1980, se seraient élevés à 680 Mfrs, dont 330 Mfrs pour le segment spatial, 40 Mfrs pour les lancements et 310 Mfrs pour le segment sol. Ils comprennent pour le segment spatial la construction de trois unités de vol, les modèles nécessaires, les essais, les campagnes de lancement (METEOSAT 1 a été lancé le 23 novembre 1977 et METEOSAT 2 le 19 juin 1981, la 3^{e} unité est tenue en réserve), pour le segment sol la construction d'un bâtiment abritant la station centrale, les équipements électroniques nécessaires à la gestion allant de l'antenne aux ordinateurs et consoles interactives, ainsi que le développement du logiciel d'exploitation technique et météorologique.

Le programme opérationnel qui devrait s'étendre jusque vers 1994, utilisera le même type de satellite. Le prix d'une unité de vol, pour une série de quatre, revient à environ 70 Mfrs et comprend en plus du satellite lui-même (env. 38 Mfrs) le moteur d'apogée, les accessoires nécessaires, les développements indispensables pour améliorer et remplacer certains composants, les tests et la campagne de lancement. Le coût d'un lanceur varie selon la fabrication et la charge utile. Les lanceurs seront vraisemblablement des fusées Ariane. Celles-ci étant capables de mettre sur orbite deux satellites, le coût d'un lancement dépendra de l'occupation du lanceur. Si le satellite météorologique est seul, les coûts s'éléveront à 95 Mfrs; pour un lancement double ils diminuent de moitié environ. Dans ces prix est compris une assurance (10% du prix du lancement) en cas d'échec (orbite non géostationnaire ou perte de la mission prise d'image après la mise en orbite). L'entretien, la modernisation du segment sol reviendra à environ 50 Mfrs répartis au cours de l'exercice, avec une pointe au début. La gestion du satellite s'élévera à 16 Mfrs par année.

Le développement du satellite de la seconde génération peut être estimé à quelques 200-250 Mfrs, bien que grâce à l'avance de la technique spatiale, les performances à attendre soient meilleures. La durée de vie utile d'un satellite est estimée à quatre ans au début, à plus de cinq ans pour ceux de la seconde génération qui prendront la relève vers le milieu de la prochaine décade.

6.2. Les retombées économiques

Plusieurs études ont été faites sur les bénéfices apportés par les données satellitaires à l'économie en général ou à certaines branches de l'économie. Une des plus intéressantes, parce que complète et la plus représentative puisqu'elle concerne directement l'Europe est celle de l'Agence spatiale européenne. Elle avait pour objet d'estimer les avantages apportés par le programme METEOSAT à attendre au cours de la décade actuelle vis-à-vis des coûts de ce programme. L'enquête a été faite en collaboration étroite avec les Services météorologiques, de façon détaillée pour huit pays européens. L'agriculture, la construction et le transport ont été particulièrement considérés.Cette étude est arrivée à la conclusion, confirmée

par d'autres études, que les satellites météorologiques "rapportent" à l'économie plusieurs fois leur coût. Par suite des conditions climatologiques, les avantages sont plus élevés plus méridionale est la région considérée. Il est même possible de conclure que les satellites météorologiques sont indispensables pour les pays en zone semi-aride.

Il en va des satellites comme de toute autre infrastructure, comme sont les routes, les chemins de fer, c'est l'état qui finance la mise en place et l'exploitation, la société en étant bénéficiaire. Seulement pour la météorologie spatiale, il n'est pas possible de recevoir des émoluments directs.

Bibliographie

Chapitre 1.

P. Meylan, C. Aubry et A. Musy, 1977 — Bases physiques de la télédétection. EPFL-Institut de Génie rural, I.G.R. No 132

E. Schanda, Ed, 1976 — Remote Sensing for Environmental Sciences, in Ecological Studies, No 18. Springer Verlag, Berlin

Chapitre 2.

ASE-CNES, 1979 — First Test Flight of the European Ariane Launcher

P.R. Escobal, 1965 — Methods of Orbit Determination. J. Wiley, New-York

F. Grandchamp, 1963 — Réception de satellites météorologiques. Manuscrit; Radio Suisse SA, Berne

H.G. Walter, 1964 — Grundlagen der Bahnbestimmung künstlicher Satelliten. ESOC/Darmstadt (8 pages)

Chapitre 3.

ESA/ESOC/MDMD, 1978 — Introduction to the METEOSAT System

ESA Bulletin, 1977 — METEOSAT: Europa's first meteorological satellite. ESA Bulletin No 11, Paris

W.J. Hussey, 1979 — The TIROS N/NOAA Satellite System. NOAA, Washington, D.C.

NASA, - — Nimbus 3 to 7 User's Guides. NASA, Goddard Flight Space Center, Va.

Chapitre 4.

C.H. Hayden, L.F Hubert, E.P. McClain and R.S. Seaman, 1979 — Quantitative Meteorological Data from Satellites. WMO-No 531, Geneva. contient une bonne bibliographie

B. Kunkel, F. Wolz, H.J. Bolle and E. Randemann, 1975 — Air Quality Measurements from Space Plateforms. ESA-CR-577

WMO 1975 Information on Meteorological Satellite Programms Operated by Members and Organisation
WMO-No 411, Geneva
Est continuellement tenu à jour

Chapitre 5.

R.K. Andersen and al. 1974 Application of Meteorological Satellite Data in Analysis and Forecasting
NOAA Technical Reports NESS No 51

R.K. Andersen and al. 1973 The Use of Satellite Pictures in Weather Analysis and Forecasting
WMO-No 333, Geneva

E.C. Barrett 1974 Climatology from Satellite
Methuen & Co Ltd, London

R.G. Finger and R.M. McIntoff Applications of Satellite Data to Aeronautical Meteorology
WMO-No 413 (Tech. Note No 142) Geneva

T.T. Fujita 1978 Manual of Downburst Identification for Project Nimrod
Satellite and Mesometeorological Research Project
University of Chicago, SMRP Research Paper No 156
Contient une bonne bibliographie sur les systèmes orageux

D.S. Johnson and I.P. Vetlov 1977 The Role of Satellite in WMO Programmes in the 1980s
WMO-No 494, Geneva

Monthly Weather Review - Picture of the Month
Contient chaque mois une courte description d'un exemple intéressant.

A. Piaget 1976 L'évolution orageuse au Nord des Alpes et la tornade du Jura vaudois du 26 août 1971
Publication de l'Institut suisse de météorologie No 35

WMO 1977 The Use of Satellite Imagery in Tropical Cyclone Analysis
WMO-No 473 (Tech. Note No 153), Geneva

Chapitre 6.

ESA	1979	Study of Potential Benefits from an European Meteorological Space Programme ESA-Contract 3802/78, Paris
W.J. Hussey and E.L. Heacock	1978	The Economic Benefits of Environmental Satellites NOAA, Washington D.C.
D. Nicodem	1977	Economic Benefits of Improved Meteorological Forecasts on the Florida Citrus Industry dans: Satellite Meteorology, Proceedings of the Summer School Alpbach/Tyrol Austrian Solar and Space Agency, Vienna