



**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**

No. 142

LA METEOROLOGIE SATELLITAIRE

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

par

Alexandre Piaget, Zurich

Avril 1987

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.

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.

## Riassunto

Questa sintesi descrive sommariamente le 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.

## 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.

## Table des matières

	<u>Page</u>
Avant-propos	1
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	9
4.1.1 Les vents	10
4.1.2 Les températures	11
4.1.3 Les températures à la surface terrestre	13
4.1.4 Les constituants mineurs de l'atmosphère	14
4.2 L'imagerie	15
5. Les applications	18
5.1 L'analyse météorologique	18
5.2 La prévision à très court terme	22
5.3 La prévision à court terme	24
5.4 La prévision à moyen terme	25
5.5 La climatologie	27
6. Les coûts et retombées économiques	29
6.1 Les coûts	29
6.2 Les retombées économiques	31
Littérature	31

## Remarques préliminaires

Le présent rapport de travail n'est pas une oeuvre originale, il reprend avec les modifications nécessaires le texte du Rapport de travail no. 100. En ce sens, il représente la seconde édition de ce dernier.

## Avant-propos

Déjà 27 années se sont écoulées depuis la mise en orbite du premier satellite météorologique. Les transmissions opérationnelles d'images directement aux utilisateurs ont débuté en mars 1966. La station de réception de Colovrex près de Genève, opérée par Radio Suisse SA pour le compte de l'ISM, a reçu sa première image le 3 mars 1966, d'ESSA 2, c'est-à-dire au tout début.

Depuis, les sondeurs sont venus compléter les imageurs. Les données en provenance de satellites météorologiques ne tendent pas à remplacer les données conventionnelles, mais à les compléter. C'est ce qu'a justement compris l'Organisation météorologique mondiale (OMM) qui dans sa Veille météorologique mondiale a prévu un système d'observation par satellite comprenant 5 satellites géostationnaires répartis également dans le plan de l'équateur autour de la Terre et 2 satellites sur orbites héliosynchrones.

Il faut bien avouer qu'au début, ces images ne provoquèrent pas un enthousiasme débordant. Les météorologistes ont tout d'abord pris note de cette nouvelle information et ce n'est qu'à la venue des satellites géostationnaires avec leur suite d'images que l'intérêt s'est réellement réveillé. En ce sens, les météorologistes ont eu, face au nouveau, une réaction très humaine.

Les satellites météorologiques sont apparus peu après la percée des ordinateurs. Si les premiers observent de mieux en mieux la situation actuelle, les seconds sortent des prévisions de plus en plus exactes. Donc, il ne faut pas s'étonner si l'utilisation des données satellitaires restent un peu à l'ombre vis-à-vis des prévisions numériques et que leur meilleure utilisation soit pour le moment la détermination des champs de vent et de température.

Les considérations suivantes présentées dans l'avant-propos de la 1<sup>ère</sup> édition restent encore partiellement valables:

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. 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.

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.

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, voir la prévision de la situation météorologique. Le lecteur intéressé est renvoyé au document DOCSAT de l'Institut suisse de météorologie contenant une bibliographie complète. Ce document est déposé à la bibliothèque de l'Institut.

## 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. Les satellites opérationnels futurs seront pour quelques-uns équipés d'instruments actifs. Vers le milieu de la prochaine décade, la mise en service d'une plateforme polaire qui pourra être maintenue et qui offrira de plus la possibilité de changer l'instrumentation, verra l'utilisation opérationnelle d'instruments actifs, tels que radars à ouverture synthétique, altimètres radar et lidars.

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  $\mu\text{m}$ , rayonnement terrestre).

Dans les années 70, de façon expérimentale d'abord, puis de façon opérationnelle, 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. C'est ainsi que METEOSAT 1 fut le premier satellite opérationnel équipé d'un radiomètre sensible aux longueurs d'onde (6-7  $\mu\text{m}$ ) où le rayonnement terrestre est absorbé par la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère.

Les considérations suivantes restent limitées à la météorologie, un bref paragraphe traitant néanmoins les possibilités qu'offrent ces techniques en aéronomie.

### 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°K ce qui donne un maximum d'intensité du rayonnement vers 10  $\mu\text{m}$ , 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 en 1981, 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'informaion 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: En tenant compte des besoins des services météorologiques, le choix s'est porté sur l'orbite géostationnaire et sur les orbites héliosynchrones.

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), doit comprendre un système de satellites placés sur ces différentes orbites: 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 23h 56min. 4sec.), 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 suffisent 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 NOAA 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 1'100 km, respectivement de 1'400 km, l'inclinaison est de 80°, respectivement de 79°. Les périodes de révolution sont 101, 107 et 113 minutes.

Les images et les télémessures que ces satellites acquerront 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 sur orbite héliosynchrone, 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 techniques 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, dans l'infrarouge, la résolution spatiale de l'imagerie reçue des satellites géostationnaires restera encore pour les satellites de la prochaine génération limitée à quelques kilomètres. Pour aller plus loin dans la résolution, il est nécessaire de refroidir les capteurs à des valeurs exigeant un système de refroidissement actif et non plus passif comme sont refroidi les radiomètres actuels. Il est douteux que cette nouvelle technique soit déjà suffisamment fiable pour l'utiliser dans les satellites de la prochaine génération. Ces

derniers, par contre, seront partiellement équipés d'instruments sensibles au rayonnement terrestre émis dans les micro-ondes. Du reste un sondeur utilisant ce rayonnement fait partie de l'instrumentation des NOAA actuels.

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 regrettable que cette technique n'ait pas éveillé un plus grand enthousiasme tout aussi bien de la part des météorologistes que des opérateurs de transport aérien qui en serait un des premiers bénéficiaires.

Il en va de même, de l'intérêt de la deuxième mission. Dans ce cadre s'inscrit la dissémination par METEOSAT 2 d'un choix d'image de GOES E. Cette expérience devait être testée à bord de SIRIO 2 qui est tombé dans l'Atlantique suite à la défaillance d'Ariane. Mais cette mission sera opérationnelle à bord des satellites M01, M02 et M03 d'EUMETSAT.

L'utilisation de la météorologie et d'une façon générale de l'observation de la Terre par l'économie va fortement s'étendre avec la mise en service des futurs satellites. Du fait de leur équipement, le volume de données va considérablement augmenter. Les données nécessitées par les utilisateurs ne pourront pas toujours être reçues à une seule station avec son horizon limité. Pour résoudre ce problème, il est également prévu de placer sur orbite des satel-

lites-relais et également d'échanger par eux ou par les satellites météorologiques géostationnaires les données reçues par diverses stations. Ainsi il ne sera plus impossible, dans un avenir pas trop lointain, de fournir à un client intéressé une information météorologique du moment en provenance de n'importe quelle région du globe.

#### 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 sont soit générés à bord du satellite lui-même (émission APT = Automatic Picture Transmission des satellites météorologiques NOAA des USA), soit générés par une 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 une valeur quantitative dérivée 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 télescope, 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 stationnarité 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 1/2 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 difficul-

tés 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 - 1/2 et H + 1/2. 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 + 1/2 corresponde un maximum entre les données H et H - 1/2. 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 télémessure 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, quiradient 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 longueurs 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  $\mu\text{m}$ .

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 températures 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 électromagnétique 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 dixièmes 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 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 jusqu'à un certain point, 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 avantageuses. 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 et le dioxyde de carbone pour ne mentionner que quelques-uns des plus importants, absorbe et émet le rayonnement de façon propre. La technique de télémessure 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  $\mu\text{m}$ .

Cette surveillance de la stratosphère n'est pas encore opérationnelle. Seuls les satellites expérimentaux sont équipés d'instruments permettant cette surveillance. Tout de même, celle de l'ozone a déjà atteint un statut semi-opérationnel. ESA/STAG a vivement recommandé d'envisager de placer à bord de METEOSAT de 2e génération, un appareillage utilisant la technique de sondage du limbe pour déterminer les variations journalières de l'ozone, observation qui jusqu'à présent n'a encore été jamais entreprise.

#### 4.2 L'imagerie

Les données transmises de façon analogique sont visualisées sous forme d'images photographiques ou éventuellement enregistrées sur bande vidéo 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, ce dernier étant le plus souvent interactif, 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, aujourd'hui encore 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 élaborés 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 km serait optimale, mais 2 km reste acceptable. C'est cet ordre de grandeur qui est prévu pour l'imagerie VIS de METEOSAT de 2e génération. Par contre en IR, il ne sera guère possible d'aller en dessous de 4 km, une résolution de 2 km avec un capteur à large bande (10-12  $\mu\text{m}$ ) paraissant aujourd'hui à la limite des possibilités qui seront disponibles en phase C/D.

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".

Les 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'échantillonnage 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 "boursoflures". 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 "boursoflures" conduit à une répétition du même type de temps au-dessus des régions où elles évoluent et à une persistance 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 boursoflures, saisie difficilement obtainable 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 boursouflures 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 boursouffure 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 prévisionniste une vue d'ensemble du champ nuageux. Actuellement 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. La résolution spatiale des images reçues du satellite METEOSAT n'est pas optimale. Les satellites METEOSAT de 2e génération auront une résolution spatiale au moins de 2 km au nadir, voire 1 km.

Grâce à la qualité de cette imagerie, une combinaison de celle fournie des deux sources permet actuellement 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 satellites sur orbite héliosynchrone 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. Ceci sera grandement facilité dès que les nouveaux METEOSAT entreront en opération en 1995 ainsi qu'il est prévu.

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 à une lente diminution d'activité. Connaissant ces règles, le prévisionniste aura la possibilité d'extrapoler l'évolution de l'évènement 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 et à l'avenir pour mieux utiliser les données en provenance de différents instruments, 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 et pouvoir gérer l'ensemble des données acquises. Tant que cette modernisation des moyens d'analyse ne sera pas effectuée, 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 but 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, plus "personnalisée" 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 ou alors à s'en libérer.

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 montre que les descentes d'air stratosphérique dans la troposphère forment la contre-partie des ascendances de la zone tropicale de convergence 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 prévisionniste de mieux déduire le temps à partir des prévisions numériques.

La possibilité de disposer de films en temps accéléré aidera le prévisionniste de mieux discerner le mouvement (sensitivité 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 n'est guère pro-

bable que ces dernières puissent être 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 inexplicables. 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 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 celles 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 pourra dans un avenir pas trop lointain être échangée par l'utilisation de satellites-relais 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°W) des USA ou alors être stockée à bord du satellite météorologique sur orbite héliosynchrone pour être reçue à la station le gérant. L'avènement des plateformes polaires avec leur potentialité nécessitera la présence de ces satellites-relais puisque l'information devra parvenir à l'utilisateur en temps quasi-réel. Tout comme pour les autres prévisions, dans le cas de la prévision à long terme, la connaissance du passé 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 des informations climatologiques aux ingénieurs, architectes ou planificateurs. 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.

Actuellement, EUMETSAT assure la gestion du satellite METEOSAT 2 en position par 0°. Les USA par suite d'un échec au lancement n'ont que le satellite GOES 6 dont la position varie entre 98°W (été) et 108°W (hiver) jusqu'au lancement de GOES H (printemps 1987). Ensuite, ils assureront les positions 75°W et 135°W. Le Japon opère GMS par 140°E et l'Inde gère INSAT par 80°E. Les USA assure l'opération des deux satellites NOAA sur orbite héliosynchrone.

Dans le futur, la gestion des satellites géostationnaires ne subira pas de modification. EUMETSAT mettra sur orbite les satellites METEOSAT P2 (automne 1987), M01 (printemps 1988), M02 (automne 1989) et M03 (1991). Les USA continueront d'assurer les deux positions 75°W et 135°W. La nouvelle série de GOES (GOES I-M) sera disponible dès 1990. Le Japon, qui à l'avenir collaborera avec l'Australie, assurera la position 140°E et l'Inde prévoit également de poursuivre l'opération d'un satellite géostationnaire au-dessus de l'Océan indien.

L'URSS, mais est-elle encore crédible?, pense placer en orbite un satellite géostationnaire avant le milieu de 1988. La Chine étudie sérieusement de placer par 105°-110°E un satellite météorologique géostationnaire. Si ces plans se réalisent, l'Océan indien et l'ouest du Pacifique seront les régions du globe les mieux observées!

Dans le courant de la prochaine décade, ce ne seront pas moins de 13 satellites météorologiques géostationnaires qui seront mis sur orbite. Cet effort ne serait pas possible si leur utilité n'avait été démontrée.

Pour autant que les conditions financières le permettent, les USA continueront d'assurer la permanence de deux satellites sur orbite héliosynchrone. Sur le plan international, la situation a évolué vers une collaboration entre les pays et groupes de pays capables d'assurer le développement et l'opération de satellites d'observation de la Terre. Dès le milieu de la prochaine décade, les satellites météorologiques devraient être remplacés par des plateformes polaires (sur orbite héliosynchrones à une altitude de 830 km) multidisciplinaire avec un "service d'entretien", c'est-à-dire que l'instrumentation pourrait soit être révisée, soit être remplacée. Les plans actuels prévoient que l'ESA (en collaboration avec EUMETSAT) assure le développement et l'exploitation de la plateforme polaire matinale, les USA celle de l'après-midi. Le Japon envisage également de mettre en service une telle plateforme vers la fin de la prochaine décade.

Pour être à même de profiter des données, il sera nécessaire de faire un effort correspondant, non seulement dans le système d'échange des données, mais avant tout dans les équipements au sol pour leur réception, leur traitement et leur affichage.

Sans avoir des informations suffisantes, il n'est pas possible, ni utile de présenter des estimations peu assurées. La discussion se restreindra au programme européen qui déjà contient suffisamment d'incertitudes car des décisions restent encore à prendre.

Les coûts pour le programme préopérationnel METEOSAT qui a compris le développement, le lancement et l'opération des satellites METEOSAT 1 et METEOSAT 2 jusqu'à fin 1986, plus le finissage de METEOSAT P2 et sa mise sur orbite, le développement, la mise en place et l'exploitation de la station centrale à Darmstadt avoisinent, au niveau des prix de 1986, 800 Mfrs. Les coûts du premier programme opérationnel s'élèvent à quelque 800 Mfrs (au niveau des prix de 1983) et comprennent le développement, le lancement et l'exploitation des satellites METEOSAT 2 à partir de 1983, P2, M01,

M02 et M03 jusqu'en 1995. Entre 1971, début du programme préopérational et 1995, fin du premier programme opérationnel, la Suisse aura investi une somme de 60 Mfrs. A ceci s'ajoutent les redevances à Radio Suisse SA pour l'exploitation de la station de réception de Colovrex dont la mise en service date de mars 1966 avec la première émission opérationnelle APT (Automatic Picture Transmission) qui s'élèveront pour la période 1966 à 1995 à 2.5 Mfrs.

## 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.

### Littérature

Une littérature complète se trouve dans DOCSAT, document publié par l'Institut suisse de météorologie à Zurich et dont un exemplaire est en dépôt à sa bibliothèque.

**Adresse de l'auteur:**

Alexandre Piaget, Dr sc.nat.  
Institut suisse de météorologie  
Krähbühlstrasse 58  
CH - 8044 Zurich

