

Des débuts en France de la prévision numérique opérationnelle au projet AMETHYSTE

Daniel Rousseau

Je traiterai dans cette présentation de la prévision numérique au service météorologique français (DMN, Direction de la Météorologie Nationale à l'époque) de 1968 jusqu'en 1983 où tous les produits développés dans le cadre du projet AMETHYSTE sont devenus opérationnels et date également du retour en France de Jean-François Geleyn en France après son séjour au CEPMMT.



Cette photographie évoque la façon dont était réalisée la prévision à la Météorologie Nationale vers 1968. Les directives nationales étaient élaborées par un chef prévisionniste qui réalisait une analyse détaillée d'une carte de surface dont le pointage avait été réalisé automatiquement par une table traçante – c'était un des premiers résultats de l'introduction des ordinateurs à la météo. Il traçait en particulier sur la carte la position des fronts de la théorie

norvégienne. Pour l'analyse en altitude, une carte « masse d'air » qu'on voit affichée ici derrière le chef prévisionniste était disponible, où l'identification des masses d'air était réalisée selon la classification de Pône. Pour réaliser les cartes au sol prévues, les « préiso », le prévisionniste utilisait notamment une extrapolation des noyaux de variation de pression en 3 heures et se servait avec prudence des produits numériques donnant les géopotentiels à quelques niveaux isobares. Les trois chefs prévisionnistes de l'époque étaient Mrs Van de Stocke que l'on voit sur la photo, Marchand et Brun.

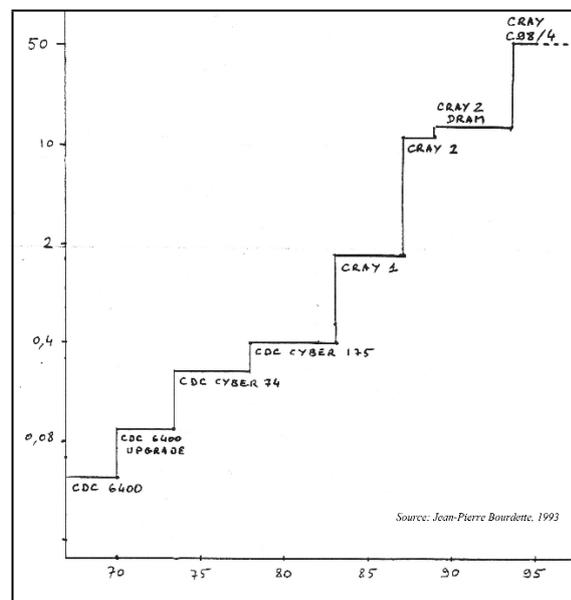
Les débuts opérationnels

Le début de l'utilisation opérationnelle journalière de la prévision numérique n'a réellement débuté en France à la Météorologie Nationale que quand celle-ci pu acquérir un ordinateur commercial, le CDC 6400. C'était à l'époque un très gros investissement, représentant la moitié des crédits d'équipement. La puissance des supercalculateurs actuels se mesure en pétaflops. A l'époque elle se mesurait en mégabits, c.a.d. dans une unité un milliard de fois plus petite.

Il est remarquable de constater que la puissance de calcul des ordinateurs les plus puissants s'est accrue exponentiellement sans discontinuer depuis plus de 50 ans et que les météorologistes ont su en tirer parti pour améliorer régulièrement les performances de leurs analyses et de leurs modèles.

Des modèles filtrés aux modèles à équations primitives

En 1968 les premiers modèles réellement opérationnels ont été des modèles filtrés utilisant l'approximation quasi géostrophique qui avait permis d'utiliser les premiers ordinateurs grâce aux travaux de Rossby et Charney. A la Météorologie Nationale un calculateur prototype, le KL901 avait permis des travaux de recherche sur la prévision numérique sous l'impulsion de Robert Pône et Guy Dady qui avaient tous deux effectués des stages auprès de Rossby à Stockholm. Des travaux précurseurs avaient déjà été réalisés dans le domaine spectral tant



a

pour l'analyse que la prévision par Guy Dady qui initia à cette technique plusieurs promotions d'ingénieurs élèves.

La définition, tant horizontale que verticale était très modeste, car les ordinateurs de l'époque n'étaient pas suffisants pour permettre d'envisager mieux opérationnellement que la résolution d'un système à une seule variable, une fonction de courant, simulant la conservation du tourbillon potentiel. Les géopotentiels s'en déduisaient grâce à la fameuse équation de balance.

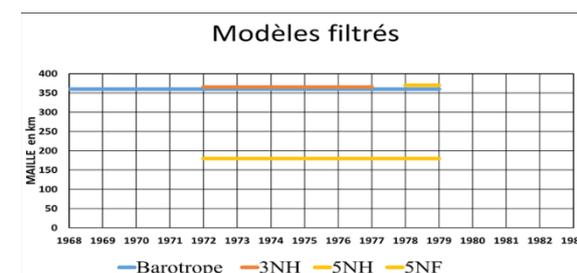
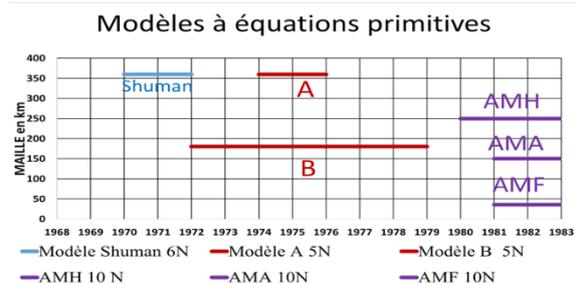
Les modèles filtrés, ainsi que des schémas d'analyse utilisant la méthode Cressman avaient été développées au service de prévision.

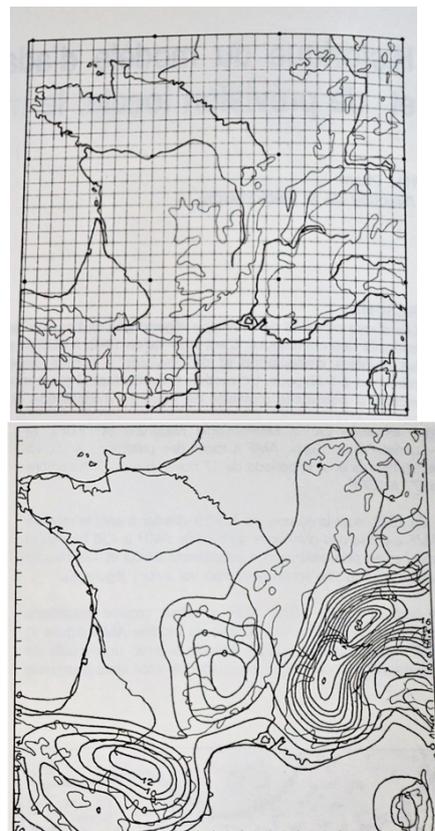
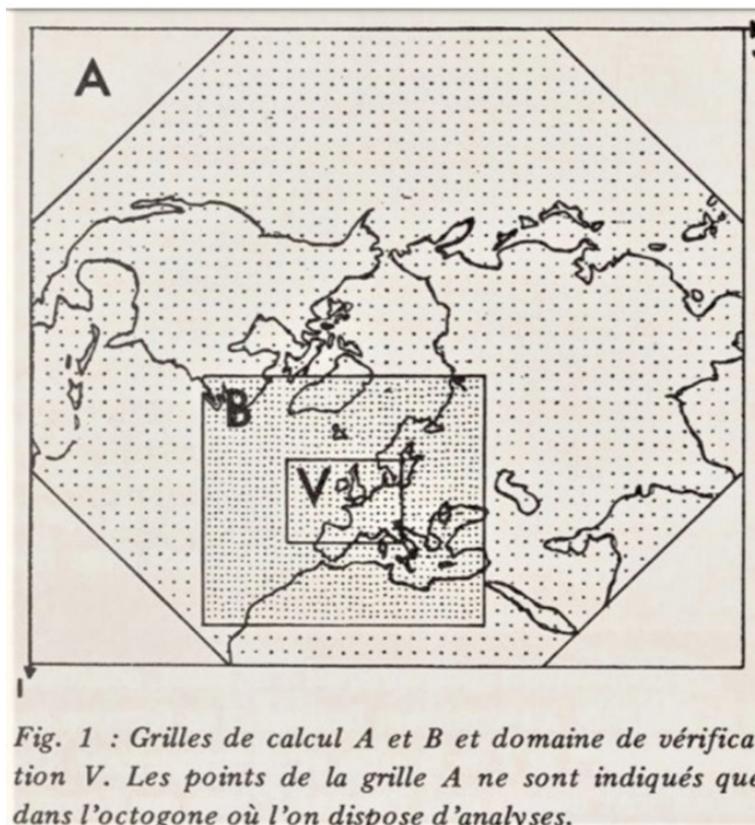
Du coté Recherche, à l'EERM, ce sont les questions de turbulence et de couche limite, la représentation du relief pour l'adaptation des prévisions, l'utilisation des méthodes spectrales qui étaient les sujets étudiés. Ces études se révéleront ultérieurement très utiles pour la prévision numérique.

Un modèle à maille fine, le Modèle C, développée à l'EERM sur un domaine limité à la France, qui avait une définition 10 fois plus fine que le modèle Shuman mis en service en 1966 aux USA avait été développé pour simuler les effets orographiques sur la France. Il fut à l'origine des modèles à équations primitives de prévision testés pour la prévision numérique.

A la Météorologie, voici la succession des modèles qui ont été mis en œuvre de 1968 à 1993

Jusqu'en 1979, les modèles filtrés, barotrope et à 3 puis 5 niveaux étaient utilisés opérationnellement. Après l'échec en exploitation de l'introduction du modèle Shuman dont le code avait été importé des USA, le code du modèle C à équations primitives de l'EERM fut adapté pour pouvoir être utilisé à toute échelle. Comme les moyens de calcul étaient encore insuffisants, le concept de modèles emboîtés fut rapidement mis en œuvre : un modèle de très grande échelle A de maille 380 km fournissait les conditions aux limites à un modèle B de maille 180 km sur l'Europe Atlantique. Ces modèles n'avaient encore que 5 niveaux. L'adaptation au relief de la France par le modèle C qui avait une maille 36 km et 10 niveaux ne pouvait guère se réaliser opérationnellement, faute de puissance de calcul. Le modèle B était mis à disposition des chefs prévisionnistes, le couplage pouvant se faire avec le modèle A ou avec le modèle filtré à 3N ou à 5N.





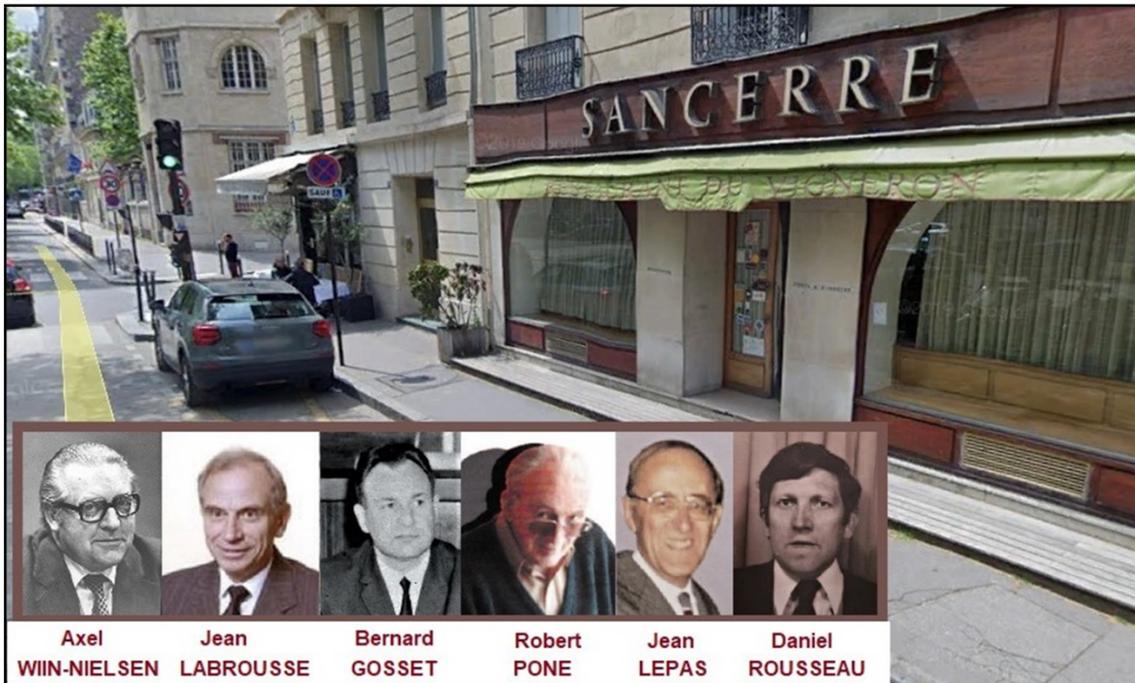
Durant cette période de 1972 à 1976 les modèles de prévision filtrés et à équations primitives étaient en compétition, l'analyse réalisée opérationnellement restant adaptée aux modèles filtrés. La physique du modèle à équations primitives était encore très rudimentaire

Naissance du Centre européen et des relations entre la Météorologie Nationale et le Centre

Durant cette période, la date du 19 avril 1974 est importante pour la prévision numérique en France et en Europe et elle a eu des répercussions profondes sur la vie d'un grand nombre de personnes de cette assemblée.

Ce jour-là le directeur du Centre européen nouvellement nommé, Axel Wiin-Nielsen, qui constituait son équipe pour le démarrage du Centre s'est rendu à la Direction de la Météorologie nationale pour rencontrer le directeur de la Météorologie Nationale Roger Mittner et son adjoint Bernard Gosset, qui avait œuvré dans le groupe européen COST qui proposa la création d'un Centre européen pour la prévision à moyen terme. Il s'agissait d'obtenir l'accord de la direction de la Météorologie pour que Jean Labrousse, qui avait mené avec succès la création du CETI, centre de calcul de la Météorologie française fasse de même pour le Centre européen et devienne le Chef du département des opérations du Centre. Le principe d'un apport au Centre de jeunes ingénieurs météorologistes français par détachement, pour une durée limitée, fut aussi vraisemblablement discuté

Le lieu où fut fêté cet accord existe encore. C'est le restaurant Sancerre, avenue Rapp, dont l'aspect extérieur n'a guère changé depuis l'époque. Il n'y avait pas de smartphone pour prendre une photo des participants à cette célébration, mais on peut néanmoins donner la photo des présents : Axel Wiin-Nielson qui avait été tout récemment nommé Directeur du futur CEPMMT, Jean Labrousse que Wiin-Nielsen venait de recruter comme chef des Opérations et qui sera le successeur de Wiin-Nielson, Bernard Gosset, directeur adjoint de la Météorologie Nationale qui, avec ses collègues européens avait œuvré pour la création du Centre, Robert Pône, alors chef de la Prévision. A ce repas avaient également été invité Jean Lepas alors à l'IHFR d'Oran et futur responsable de la Prévision et Daniel Rousseau responsable de la section prévision numérique (EERM/PN) à la recherche.



Séjour de Jean-François Geleyn à l'EERM en 1975.

	page		page		
5.1.	Répartition spectrale du rayonnement solaire à la limite supérieure de l'atmosphère	41	11.2.	Les méthodes de linéarisation	106
5.2.	Répartition spectrale et intensité de l'effet des divers agents	42	11.3.	Méthode itérative de résolution directe	106
5.3.	L'albédo du sol	42	11.4.	Répartitions verticales des absorbants	106
			11.5.	Stabilité	107
6.	<u>Etude mathématique du rayonnement de courtes longueurs d'onde</u>	53	12.	<u>Sur les problèmes posés actuellement par le rayonnement en météorologie</u>	109
6.1.	Géométrie du problème	53	12.1.	Coût des calculs de rayonnement	109
6.2.	Absorption monochromatique	54	12.2.	Manque d'information	112
6.3.	Diffusion et absorption monochromatiques	55	12.3.	Les problèmes de couplage	116
6.4.	Intégration spectrale	60	12.4.	Conclusion	116
7.	<u>Etude générale du rayonnement de grandes longueurs d'onde</u>	62			
7.1.	Répartition spectrale et intensité de l'effet des divers agents	62			
7.2.	Pouvoir émissif du sol	66			
8.	<u>Etude mathématique du rayonnement de grandes longueurs d'onde</u>	67			
8.1.	Absorption monochromatique	67			
8.2.	Diffusion et absorption monochromatiques	70			
8.3.	Simplification pour les nuages et le sol	72			
8.4.	Intégration spectrale	73			
9.	<u>Conception d'un modèle de rayonnement</u>	76			
9.1.	Généralité	76			
9.2.	Problèmes pour le rayonnement solaire	77			
9.3.	Problèmes pour le rayonnement thermique	84			
10.	<u>Quelques résultats d'un modèle de rayonnement</u> ..	90			
10.1.	Quels résultats?	90			
10.2.	Quelques remarques	100			
11.	<u>Sondages atmosphériques indirects</u>	102			
11.1.	Principe	102			

A sa sortie de l'Ecole de la Météorologie, Jean-François avait choisi de poursuivre sa formation par une formation complémentaire à l'Université de Mayence. C'est là qu'il acquit sa première expertise sur le rayonnement. Des bourses d'un an, gérées par le CNES, qui souhaitait développer les applications en météorologie des futurs satellites, permettaient à cette époque aux jeunes ingénieurs sortant de l'Ecole

d'acquérir un complément de formation à l'étranger. Les stagiaires s'engageaient à leur retour à dispenser pendant au moins 3 ans un enseignement de la spécialité qu'ils avaient acquise.

C'est ainsi que Jean-François conçut son premier cours sur le rayonnement à son retour de Mayence. Il l'enseignait en particulier aux Ingénieurs élèves en 1975, 1976 et 1977 et aux ingénieurs des travaux en 1975. C'est donc dès le début de son parcours professionnel, que Jean-François exerça une activité de formateur, qu'il devait poursuivre pendant 40 ans conjointement à son activité de chercheur

C'est au 2^{ème} étage du bâtiment de la Météorologie Nationale que Jean-François avait son bureau au GMD en 1975, puis au CRMD à son retour du CEPMMT de 1983 à 1992.



C'est aujourd'hui une cathédrale orthodoxe qui a pris la place de ce bâtiment.

Le projet AMETHYSTE

La figure ci-contre établie, d'après une conférence donnée par A. Robert au Stansead Seminar au Canada en 1975, donne une idée des questions qui se posaient aux modélisateurs de l'époque pour améliorer les modèles de prévision numérique. Ce sont d'abord les questions liées au code du noyau dynamique du modèle qui prévalaient. La finesse des modèles tant horizontalement que verticalement étaient encore très insuffisante pour intégrer avec précision la partie dynamique des modèles et prendre en compte le relief. Des schémas numériques performants étaient requis afin d'utiliser au mieux les calculateurs. La modélisation de l'eau, puis l'analyse étaient aussi des questions importantes pour améliorer les modèles.

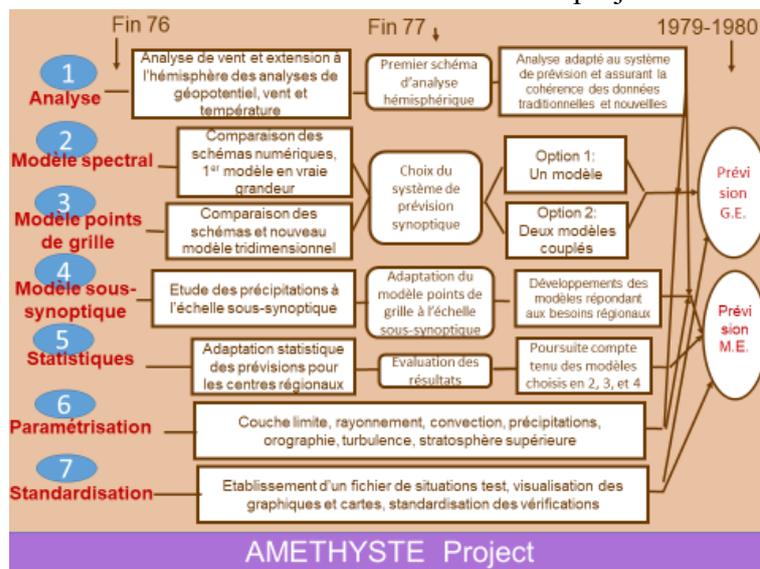
Maille fine (200km)	35%
Montagnes	27
Précipitations	18
Résolution verticale fine (10N)	15
Observation	13
Viscosité	11
Frottement/ Pas de frottement	8
Convection	6
Initialisation	4
Maille ultra-fine	4
Rayonnement	3
Montagnes plus ou moins adoucies	3
Seuil précipitations	2
Résolution verticale ultra-fine	2
Conditions aux limites	2
Frottement linéaire/non-linéaire	1
Intégration temporelle	1

Le recours à un système imbriqué de modèles était une première réponse pour diminuer l'erreur de troncature et permettre une meilleure prévision pour la zone la plus fine et à courte échéance.

Pour améliorer la prévision numérique en France il était nécessaire de repenser dans son ensemble son développement en mobilisant sur un même projet cohérent les équipes travaillant sur la modélisation à l'EERM, sur l'analyse et la mise en œuvre opérationnelle à la PREVI.

L'arrivée à l'EERM d'un nouveau directeur Adelin VILLEVIEILLE, qui restructurait la recherche autour de grands projets et le retour en France de Jean LEPAS permit de mobiliser un potentiel de compétences autour d'un projet fédérateur, le projet AMETHYSTE, qui fut présenté et approuvé par le Conseil de la Recherche en décembre 1976. Ce projet bénéficia aussi de la contribution de nombreux élèves-ingénieurs de l'ENM, l'école venant de réformer ses cursus en instaurant des stages de recherche de fin de scolarité dans toutes les formations ingénieurs.

Le diagramme ci-contre montre les composantes du projet, telles qu'elles étaient définies en 1976, avec les objectifs visés à l'échéance de 1979-1980., qui était de disposer d'une prévision



synoptique de grande échelle et d'une prévision sous-synoptique de petite échelle capable de prévoir localement le temps sensible.

Pour l'analyse il s'agissait de mieux prendre en compte les données de vent en particulier, l'analyse PANAL conçu pour les modèles filtrés ne réalisant que des analyses de géopotentiels à certains niveaux de pression. Une nouvelle technique, l'analyse optimale 3D fut mise en œuvre et déboucha sur une nouvelle analyse SAPHIR en février 1981.

Pour les modèles, deux techniques numériques étaient testées, l'une, le spectral, a priori plus performante pour traiter la partie dynamique, mais qui était alors très coûteuses pour atteindre une définition fine, l'autre, points de grille, bien adaptée à la prise en compte de la physique. Le projet AMETHYSTE explorait les deux approches.

Pour la prévision concrètes du temps, en particulier les températures au sol et les précipitations, le projet AMETHYSTE a développé deux techniques :

- l'utilisation d'un modèle très fin pour adapter les prévisions au relief, dont on avait déjà une bonne expérience avec le modèle C de la génération précédente de modèle.
- le recours à des méthodes statistique : la méthode de prévision parfaite et la méthode de statistiques de sortie de modèle. Ce projet bénéficiait des bonnes compétences en méthodes statistiques développées dans l'équipe statistique animée par Guy der Megreditchian.

Une partie importante du projet était l'introduction dans les modèles d'une physique cohérente utilisable dans tous les modèles.

Enfin un premier effort de standardisation des outils de la prévision numérique, par exemple pour le contrôle des précipitations.

Le projet AMETHYSTE a permis de mobiliser environ 25 personnes très motivées, qui ont développé un premier système numérique complet de prévision, de l'analyse au produit final de prévision. Ces participants sont les signataires des notes internes rendant compte des résultats du projet.

Notes techniques de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques

N° 36- PROJET AMETHYSTE cahier n°1. Le modèle de prévision en points de grille. Partie dynamique
Jean COIFFIER, Danièle DECAM, René JOURDAIN, Jean LEPAS, Hong-Le PHAM, Daniel ROUSSEAU
 Octobre 1979

N° 37- PROJET AMETHYSTE cahier n°2. Le modèle de prévision. Partie physique
Jean LEPAS, Guy LE GOFF, Gérard DE MOOR, Luc MUSSON GENON, Marie-Claire PIERRARD, Jean-Pierre ROCAFORT, Daniel ROUSSEAU
 Octobre 1979

N° 56- PROJET AMETHYSTE cahier n°3. Le modèle à 15 niveaux. Application à la prévision numérique sur les données de l'expérience E.T.G.A.
Yves BIDE, Bernard BRET, Georges DHONNEUR, François DUVERNET, René JOURDAN, Jean LEPAS, Serge PLANTON
 Mars 1980

N° 53- PROJET AMETHYSTE cahier n°4. Un schéma opérationnel d'analyse objective par interpolation optimale
Paul BETOUT, Yves DURAND, Jean PAILLEUX.
 Juillet 1980.

N° 76- PROJET AMETHYSTE cahier n°5. Présentation d'un modèle spectral de simulation des mouvements atmosphériques à grande échelle
Michel ROCHAS, Germaine ROCHAS, Jean-Pierre MITTELBERGER, Jean-François ROYER, Yves ERNIE
 Juillet 1980

Notes techniques de l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques

N° 36- PROJET AMETHYSTE cahier n°1. Le modèle de prévision en points de grille. Partie dynamique
Jean COIFFIER, Danièle DECAM, René JOURDAIN, Jean LEPAS, Hong-Le PHAM, Daniel ROUSSEAU
 Octobre 1979

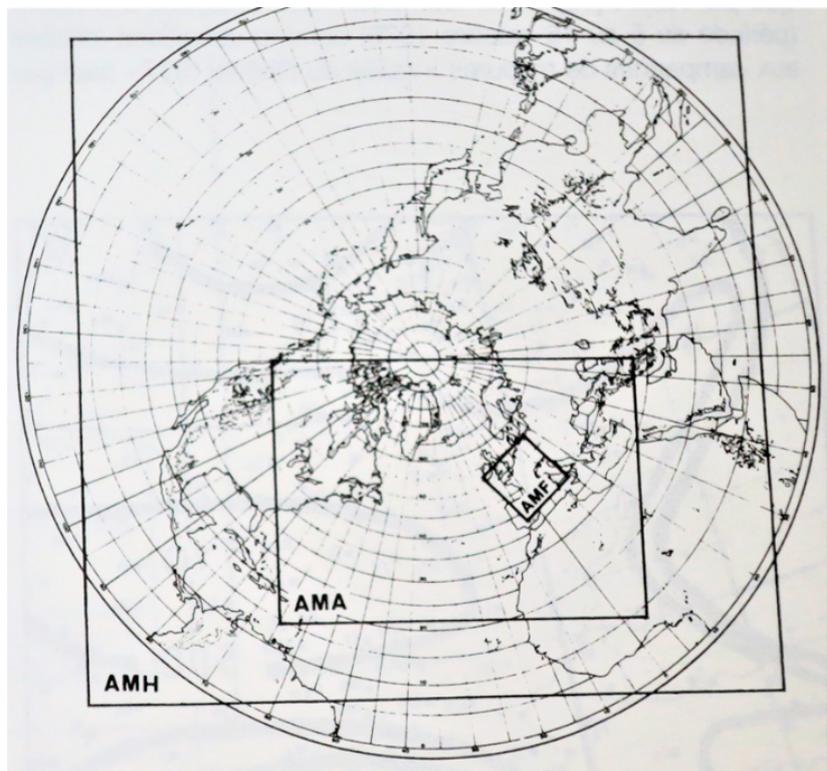
N° 37- PROJET AMETHYSTE cahier n°2. Le modèle de prévision. Partie physique
Jean LEPAS, Guy LE GOFF, Gérard DE MOOR, Luc MUSSON GENON, Marie-Claire PIERRARD, Jean-Pierre ROCAFORT, Daniel ROUSSEAU
 Octobre 1979

N° 56- PROJET AMETHYSTE cahier n°3. Le modèle à 15 niveaux. Application à la prévision numérique sur les données de l'expérience E.T.G.A.
Yves BIDE, Bernard BRET, Georges DHONNEUR, François DUVERNET, René JOURDAN, Jean LEPAS, Serge PLANTON
 Mars 1980

N° 53- PROJET AMETHYSTE cahier n°4. Un schéma opérationnel d'analyse objective par interpolation optimale
Paul BETOUT, Yves DURAND, Jean PAILLEUX.
 Juillet 1980.

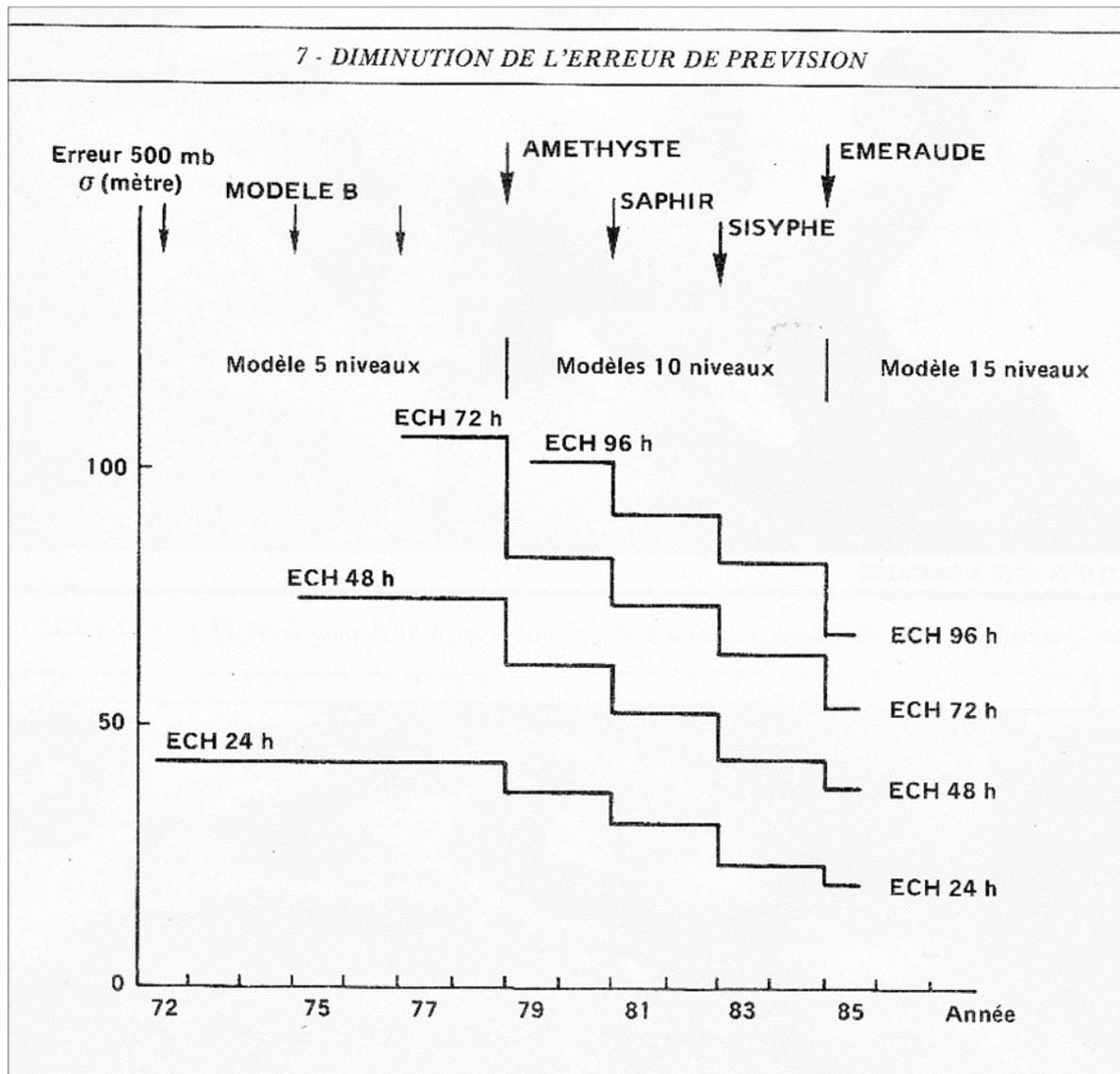
N° 76- PROJET AMETHYSTE cahier n°5. Présentation d'un modèle spectral de simulation des mouvements atmosphériques à grande échelle
Michel ROCHAS, Germaine ROCHAS, Jean-Pierre MITTELBERGER, Jean-François ROYER, Yves ERNIE
 Juillet 1980

Le modèle développé pour le projet utilisait une intégration temporelle semi-implicite et comprenait 10 niveaux. En 1980 un système de modèles imbriqués AMA à maille 150 km couplé à un modèles AMH à maille 250 km remplaça tous les modèles opérationnels précédents avec un premier gain en qualité. Une adaptation des prévisions étaient réalisée par le modèle AMF de maille 36 km et par la méthode statistique de prévision parfaite mise en œuvre également pour la prévision concrète des températures et de l'occurrence de précipitations dans les centres régionaux.



Un nouveau gain en qualité fut obtenu lors de l'introduction de la nouvelle analyse SAPHYR en 1981.

Enfin le modèle spectral utilisant la physique AMETHYSTE et initialisé par la technique des modes normaux fut opérationnel début 1983 en remplaçant du modèle points de grille, apportant un nouveau gain de qualité.



Lancement des projets PERIDOT et EMERAUDE

Après le succès de la mise en exploitation de 1979 à 1983 des produits développés dans le cadre du projet AMETHYSTE, de nouvelles perspectives s'ouvraient :

- Les techniques spectrales devenaient plus performantes
- L'initialisation par modes-normaux permettait une meilleure prise en compte des observations de vent
- La disponibilité de moyens de calcul plus puissant au CEPMMT et la possibilité d'utiliser un CRAY 1 permettaient de tester des définitions horizontales comme verticales plus fines, et d'introduire une physique plus élaborée, en liaison avec le CEPMMT
- Utiliser pour la prévision un modèle de même définition que le modèle d'adaptation AMF devenait envisageable. Pour ce modèle l'utilisation directe des radiances satellitaires TOVS pouvait être envisagée.

C'est ainsi que furent lancées le projet PERIDOT en 1980 et le projet EMERAUDE en 1981 destinés à réaliser un système cohérent de prévision basée sur 2 seuls modèles à l'échéance de 1985.