

Les interactions entre l'atmosphère et la cryosphère

• BARBARA BOURDELLES •

Introduction

La cryosphère est l'ensemble des zones enneigées, englacées ou gelées à la surface de la Terre. Le système climatique est formé de l'atmosphère, la biosphère et la géosphère, dont font partie notamment l'océan et la cryosphère. Ces composantes interagissent en termes de bilan de masse et d'énergie. On s'intéresse ici aux interactions entre l'atmosphère et la cryosphère, d'un point de vue théorique, puis en terme d'applications : effet sur le climat local ou global et prévention des avalanches.

On a construit sur ce thème un module d'enseignement assisté par ordinateur (EAO) dans le cadre du projet européen EuroMET.

Cet article est divisé en trois principaux paragraphes. Le premier, «le projet EuroMet», présente l'enseignement assisté par ordinateur en général et EuroMet en particulier : son histoire, sa philosophie et ses outils. Le paragraphe sur «les interactions cryosphère atmosphère» est la partie centrale de l'article. Il commence par quelques rappels sur les propriétés de la neige, ainsi qu'une présentation théorique des interactions atmosphère-cryosphère. Puis, il propose quelques applications : effet sur la mousson, prévision du risque des avalanches, vents catabatiques et climat des régions polaires. Enfin, le dernier chapitre «le module EuroMET» présente les choix thématiques et pédagogiques effectués pour construire le module.

Le projet EuroMET

L'EAO est «l'ensemble des méthodes pédagogiques faisant appel à des systèmes informatiques et visant à

transmettre des connaissances et des savoir-faire». (Hoffman, 1993). Résumons l'intérêt de l'Enseignement Assisté par Ordinateur.

Tout d'abord, travailler devant un ordinateur a un aspect ludique et l'on y reste concentré pendant de longues périodes. L'apprenant est autonome, il travaille quand il veut ou peut. Ainsi, l'EAO permet un apprentissage personnalisé, à vitesse adaptée, où le retour en arrière est toujours possible si un point a été mal compris, et ceci sans interrompre le cours d'un enseignement magistral. Par ailleurs, le pourcentage de connaissances retenues varie considérablement en fonction de la nature et de la richesse des interactions entre l'apprenant et l'enseignant. La diversification des modes d'apprentissage est donc primordiale pour améliorer l'efficacité d'un enseignement. Celle de l'EAO est liée à l'importance de l'interactivité qu'il propose, car c'est en agissant que l'on apprend le mieux.

Enfin, l'utilisation de l'EAO dans le cadre de la formation continue s'avère intéressante, pour des raisons pratiques et financières. On peut atteindre aisément un grand nombre de personnes réparties sur un vaste territoire en évitant d'une part, les frais de déplacement et d'autre part, la difficulté de trouver une plage de temps de formation commune à des personnes qui ont des contraintes professionnelles. Sans aller jusqu'à remplacer un stage, un module d'EAO en permet la préparation avant de se rendre à une formation plus classique, moins longue.

Dans tous les cas, c'est pour l'apprenant un outil de travail

personnel, complémentaire du cours magistral, au même titre qu'un ouvrage papier.

La composante humaine reste fondamentale. L'enseignant est indispensable dans la phase de conception et de mise au point du didacticiel : son expérience et son expertise thématique sont irremplaçables, tant sur la forme que sur le fond, pour obtenir un logiciel fiable et validé.

Enfin, un bon EAO n'est pas imprimable, il est très interactif et ne contient pas de surcharge en lecture. Ceci peut être un critère de choix pour l'enseignant qui utilise ce mode d'enseignement, ou pour l'apprenant qui veut s'y investir.

EuroMet est un projet européen de partage en ligne de ressources éducatives météorologiques il est né de la conjonction de deux facteurs : d'une part l'intérêt grandissant dans la communauté météorologique pour l'EAO, démontré par un développement spontané au début des années 90 dans plusieurs institutions, et d'autre part, la décision politique de l'Union Européenne d'encourager les applications télématiques par son programme de recherche et développement.

Vingt-deux institutions venant de quinze pays européens décidèrent d'unir leurs efforts pour la production d'EAO, et de les rendre disponibles sur Internet. Toutefois, l'approche culturelle de la formation en météorologie est très variée, et dix langues différentes sont parlées au sein des seuls pays membres du consortium. Le projet EuroMET devait donc tenir compte de ces spécificités, ainsi que de contraintes pédagogiques et techniques. Ainsi, il a été décidé de présenter le produit

fini sous forme de bibliothèques de modules autonomes. Deux grands thèmes ont été choisis : la météorologie satellitale et la prévision numérique du temps. La forme «bibliothèque» permet à chacun, enseignant ou étudiant, d'adapter la formation à ses besoins. Pour information, les bibliothèques contiennent environ 140 modules pour un total de 4 000 pages. Le public visé est composé de météorologistes professionnels et d'étudiants de troisième cycle. Pour atteindre un nombre maximum d'apprenants, ces modules sont traduits en quatre langues : allemand, anglais, français et espagnol. Pour rendre ces modules utilisables en ligne et sur des plateformes très diverses, le consortium a utilisé les outils de programmation d'Internet : langage HTML comme base (texte, images) et pour l'interactivité, les applets JAVA ou l'interface de programmation CGI.

L'interactivité des modules a été encouragée par la mise à disposition des concepteurs de programmes Java facilement insérables dans les pages de cours.

Les interactions entre l'atmosphère et la cryosphère

La neige a un rôle important dans le système climatique, en raison de ses propriétés radiatives et thermiques très particulières. Sous l'influence de conditions atmosphériques variées, la neige a la capacité d'évoluer très rapidement : en quelques jours, ses propriétés physiques peuvent changer d'un ordre de grandeur, entraînant une forte modification des échanges de masses et

d'énergie avec l'atmosphère. En tenant compte de l'évolution du manteau neigeux, on schématise les échanges entre la neige et l'atmosphère de la façon suivante :

À l'interface entre la neige et l'atmosphère, les termes d'échanges sont :

- Le rayonnement solaire : le soleil émet presque comme un corps noir, essentiellement dans le spectre visible. Le rayonnement solaire est majoritairement réfléchi par la neige dont la réflectance dans le spectre visible est très élevée. Une petite partie est cependant absorbée et contribue à l'équilibre radiatif du manteau neigeux, en augmentant sa température.

- Le rayonnement infrarouge : l'atmosphère, notamment la vapeur d'eau et les nuages, se comportent comme des corps noirs, et émettent dans l'infrarouge thermique. Ils rayonnent dans toutes les directions, et la partie dirigée vers la neige est absorbée entièrement par celle-ci. La neige émet comme un corps noir, en fonction de sa température uniquement. La gamme d'onde concernée se situe aux environs de 10 microns, comme pour l'atmosphère. Pendant les nuits nuageuses, la neige se refroidit peu car son émission propre est compensée par celle des nuages.

- L'effet des précipitations : elles peuvent se présenter sous deux phases : pluie ou neige. Lorsqu'il neige, la surface est recouverte de neige fraîche, à l'albédo très élevé (petits grains) et très isolante (faible densité). Les échanges d'énergie se font sous forme d'un flux de chaleur qui dépend des températures respectives de la neige qui tombe (donc de l'atmosphère) et du manteau neigeux. La pluie, qui se produit uniquement avec des températures atmosphériques positives, pénètre dans le manteau neigeux, où elle est stockée, ou bien percole. L'apport calorifique sert seulement à réchauffer la neige, mais il n'est pas suffisant pour la faire fondre.

- Les échanges turbulents de chaleur latente et sensible : l'air et la neige en contact tendent à être toujours en équilibre thermique, et vont donc échanger de l'énergie jusqu'à

équilibrer leurs températures respectives. Tant que la neige reste à température négative, un flux de chaleur sensible s'établit entre l'air et la neige, dont le sens dépend de leurs températures respectives. Par ailleurs, l'air non saturé d'humidité provoque la sublimation des grains de neige de surface. Ce changement de phase de la glace s'accompagne d'une perte d'énergie pour la neige sous forme de chaleur latente. Donc la neige se refroidit.

- Dans cette étude de l'interface entre la neige et l'atmosphère, on travaille logiquement dans le cadre de la théorie de la couche limite. Les échanges de chaleur latente et sensible sont donc turbulents. De plus, la tempé-

- La fonte et le regel qui changent ses propriétés mécaniques et optiques.

- La métamorphose des grains : la neige fraîche tombe sous forme de cristaux étoilés. Au fur et à mesure du temps et des couches successives qui se déposent, ces cristaux évoluent. Leur transformation dépend du gradient de température au sein du manteau, de la présence éventuelle d'eau liquide, et des phénomènes de sublimation et condensation entre les parties convexes et concaves des grains.

À l'interface neige-sol, les échanges sont de deux types : échanges thermiques et de masse.

Lorsque la quantité d'eau liquide présente dans le man-

Quelques applications au climat :

La mousson asiatique

L'influence de la neige sur la mousson a été observée depuis plus d'un siècle, puisque H. F. Blandford la notait déjà dans un compte-rendu à la Royal Meteorology Society en 1884. Il apparaît que lorsque le manteau neigeux persiste au printemps, ou, s'il est important (en termes de masse), la mousson est retardée et la quantité de précipitations est inférieure aux années normales. On assiste donc à une sécheresse dans certaines zones, comme l'Inde, après un printemps neigeux sur le continent eurasiatique, notamment le plateau du Tibet.

Le mécanisme qui peut expliquer cette relation est le suivant : lorsque le continent est recouvert de neige, la mise en place du gradient de température entre le continent et les océans est retardée, puisque une large partie de l'énergie solaire est réfléchi, et que le reste est utilisé pour faire fondre la neige. La fonte de la neige se traduit alors par une humidification du sol sous-jacent. Cette eau empêche le réchauffement de la surface (chaleur sensible) puisque l'énergie est employée pour l'évaporation (chaleur latente). De tous ces éléments, c'est la quantité de neige à faire fondre qui est le paramètre essentiel.

La prévision

des avalanches :

Un autre exemple des interactions neige-atmosphère dont l'importance, tant économique que pour la sécurité des personnes et des biens n'est plus à démontrer, est la prévision du risque d'avalanches. Celui-ci n'est pas un paramètre mesurable, et l'on ne peut prévoir l'heure et le lieu de déclenchement d'une avalanche. Toutefois, les conditions favorables aux déclenchements spontanés sont plutôt bien connues.

Le déclenchement d'une avalanche résulte de l'interaction de nombreux paramètres : paramètres internes au manteau, (comme le type des grains de glace constituant les couches de neige, la qualité de la liaison entre les strates, les profils verticaux de température, de densité, de

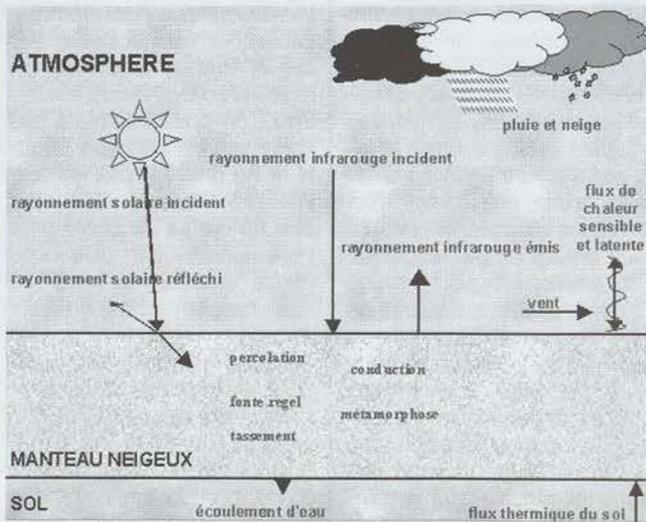


figure 1 : Schématisation des interactions neige-atmosphère.

rature de l'air est en général bien plus élevée que celle de la neige, de sorte que cette couche limite est très stable. Le vent accélère les processus d'échanges thermiques entre l'air et la neige.

Au sein du manteau, d'autres phénomènes doivent être pris en compte pour bien décrire l'interaction neige-atmosphère :

- la conduction thermique dans le manteau.
- Le tassement des couches : la neige se tasse par l'effet combiné du métamorphisme et du poids des couches supérieures.
- La percolation : l'eau liquide percole à travers le manteau neigeux si elle excède la Teneur en Eau Liquide de rétention qui est de l'ordre de 5 % du volume des pores (poches d'air entre les cristaux de neige).

teau neigeux est trop importante, cette eau s'écoule dans le sol. Il en résulte une humidification du sol qui persiste après la fonte du manteau neigeux. D'autre part, le sol apporte en permanence une certaine quantité de chaleur grâce au flux thermique de sol. Bien que faible, il maintient la couche de neige basale à 0 °C, dès que le manteau est assez épais (50 cm). Ce flux thermique dépend de la nature du sol (roche, glacier, terre) et de l'altitude. Toutefois il ne permet pas au manteau neigeux de fondre. La fonte se fait toujours à partir des couches superficielles.

teneur en eau liquide, de résistance à l'enfoncement) et paramètres de surface (épaisseur et qualité de la neige récente, les effets du vent, l'humidification de la couche superficielle...). On comprend que la stabilité du manteau neigeux et le risque d'avalanches sont liés à différents facteurs qui vont évoluer en fonction des seules conditions météorologiques. La prévision du risque d'avalanches est donc intrinsèquement dépendante des interactions entre la neige et l'atmosphère.

L'utilisation d'un modèle déterministe d'évolution du manteau neigeux a révolutionné cette discipline. Tous ces modèles (une dizaine dans le monde) sont basés sur les interactions présentées plus haut dans cet article. Le seul qui tienne compte de la métamorphose des grains à l'intérieur du manteau neigeux s'appelle Crocus. Développé et validé au Centre d'Études de la Neige de Météo France, il est utilisé de façon opérationnelle depuis plus de cinq ans.

Les vents catabatiques en Antarctique :

L'adjectif catabatique vient du grec cata qui signifie «en bas». L'écoulement catabatique violent est caractérisé par une couche d'air froid épaisse de quelques centaines de mètres, qui s'écoule sous une atmosphère plus chaude de quelques degrés. Avec ses plateaux centraux culminant à plus de 2 000 à 3 000 mètres, ses fortes pentes côtières et sa surface perpétuellement enneigée, l'Antarctique est le royaume des vents catabatiques, qui soufflent avec violence au niveau du sol.

À grande échelle, les conséquences principales du vent catabatique en Antarctique sont les suivantes :

- d'une part, il constitue un moyen très efficace pour redistribuer l'énergie aux latitudes polaires. Soufflant des régions centrales de l'Antarctique vers les côtes, il transporte une énorme quantité d'air froid des latitudes subpolaires. Par exemple, un vent catabatique soufflant à vitesse de 100 km/h sur les 200 km côtiers, sous une atmosphère plus chaude de 2

°C refroidit les zones côtières d'environ 1 °C par heure.

- d'autre part, en conjonction avec la houle, il fractionne et disperse la banquise. Or, les variations de celle-ci modifient le bilan thermique atmosphérique, en changeant les échanges entre l'océan et l'atmosphère.

La banquise :

Les fluctuations de l'étendue de la glace de mer changent le bilan thermique de l'atmosphère en augmentant ou diminuant ses échanges de chaleur avec l'océan. À titre d'exemple, la surface du continent antarctique est deux fois plus importante en hiver, quand la glace de mer est formée, qu'en été. Cela affecte la circulation atmosphérique globale et donc le climat de la planète entière. Pour l'Arctique, les trajets statistiques pour les mois d'hiver des anticyclones et des dépressions, déterminés à l'aide d'observations synoptiques sur de longues périodes présentent quelques caractéristiques marquées. En Atlantique, un axe sur l'Est du Canada converge au voisinage de l'Islande avec un autre axe, situé sur la côte Est du continent nord-américain, pour former la bien nommée Dépression d'Islande. Ces dépressions pénètrent ensuite dans la zone arctique selon un chemin qui suit la limite des glaces dans la mer norvégienne, puis progressent en mer de Barents le long de la côte eurasiennne.

La glace de mer agit aussi comme mémoire de l'atmosphère. Lorsque la glace de mer se forme, ou au contraire lorsqu'elle fond, elle stocke ou libère de grandes quantités d'énergie. De plus, les mouvements de dérive de la banquise se produisent avec un certain retard par rapport aux conditions atmosphériques (vent) qui les ont créés. Ainsi, entre les phénomènes atmosphériques qui engendrent des mouvements ou des changements de phase de la glace de mer, et la rétroaction de l'étendue de glace sur le climat, il se passe plusieurs mois.

Le module EuroMET

Le module «Interactions neige-atmosphère» est intégré au sein de la bibliothèque

«Prévision numérique». Il s'agissait alors d'appréhender la question sous l'aspect de la paramétrisation des échanges cryosphère-atmosphère, pour leur prise en compte ultérieure dans les modèles numériques. On s'est volontairement cantonné à une présentation de l'interaction neige-atmosphère pour ne pas surcharger le module, et se focaliser sur les principes physiques majeurs de ce type d'interactions (aspect énergétique et transfert de masse).

Dans le module que nous avons construit pendant ces quelques semaines, la première page est conçue comme une interpellation de l'apprenant, afin de lui donner l'envie de tourner la page pour en savoir plus. Elle est systématiquement suivie par une présentation des objectifs du module, des prérequis pour l'étudier, des débouchés éventuels et du contenu des pages suivantes.

Pour la suite, la liberté du concepteur est totale, la seule contrainte étant d'avoir une page de conclusion, qui spécifie ce qui a été appris et vers quoi cela peut mener. Pour le module «interactions neige-atmosphère», nous avons choisi d'aborder les échanges sous la forme d'un dessin (figure 1), dont chaque terme peut être cliqué et fait apparaître une nouvelle fenêtre d'explications. Un schéma facilite la compréhension et évite bien des phrases de description. À la fin de cette page, l'apprenant a déjà compris les bases physiques de l'interaction. La page suivante formalise un peu ces explications, sous la forme d'une équation générale de bilan d'énergie et de masse. La partie théorique est donc présentée en deux pages, très interactives, qui permettent de poser les fondements physiques de l'interaction. Après cela, on avait le choix entre de multiples applications de ces interactions. On a choisi la mousson asiatique et sa relation au couvert neigeux eurasienn, car c'est un phénomène bien étudié, et qui concerne une population nombreuse. La fin de cette page sur la mousson propose à l'apprenant motivé d'aller plus loin et de lire une page annexe sur les relations entre

la glace de mer et l'atmosphère. Ceci est bien sûr tout à fait optionnel, et peut être imprimé sur papier (confort visuel).

Pour lui permettre d'évaluer son niveau de compréhension des points les plus importants du module, un questionnaire à choix multiple est ensuite proposé à l'apprenant. Les questions ont été pensées pour vérifier si les objectifs du module ont été atteints.

Enfin, la conclusion fait le point sur les idées fortes à retenir.

L'étude du module prend une trentaine de minutes, comme c'est généralement le cas des modules EuroMET.

Pour accéder au module «interactions neige-atmosphère», la démarche est la suivante : se connecter à <http://euromet.meteo.fr>, puis choisir le français comme langage, la bibliothèque «Prévision numérique» et le chapitre «paramétrisation».

Bibliographie et module euroMET

Barbara Bourdelles

CDM 20A, Aéroport de Campo dell'Oro, Ajaccio Brgm.club-internet.fr

Bibliographie

- Brun, E., E. Martin, V. Simon, C. Gendre & C. Coleou, 1989 : « An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting », *J. of Glacio.*, 35/121, 333-342.
- Brun, E., P. David, M. Sudul & G. Brugnot, 1992 : « A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting », *J. of Glacio.*, 38/128, 13-22.
- Dong B. & P.J. Valdes, 1998 : « Modeling the Asian summer monsoon rainfall and Eurasian winter/spring snow mass », *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, sous presse.
- Gondouin, D., 1997 : « L'évolution de l'enseignement assisté par ordinateur et le projet EuroMET », *La Météorologie*, 8e série, 19, septembre 1997.
- Hoffman, J., 1993 : « EAO et météorologie font bon ménage », *La Météorologie* ; 8e série, 4, décembre 1993.
- Kergomard C., 1983 : « les interactions entre climat et extension des glaces marines : un problème essentiel de la climatologie arctique », *Physico-Géo*, 8, 1-30.
- Pettré P. & C. Périard, 1996 : « Aspects du climat de Dumont d'Urville et de l'Antarctique », *La Météorologie*, 8e série, 13, 55-62. <http://euromet.meteo.fr> : le site d'EuroMET, où l'on trouvera une présentation du projet, les bibliothèques de module, ainsi que des liens sur l'enseignement assisté par ordinateur.