

Vers une prévision des incertitudes en météorologie

Laure RAYNAUD

Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques

19 Avril 2018



1 - Introduction

- Les prévisions météorologiques ont beaucoup progressé, mais elles restent **imparfaites** et **incertaines**
- Le caractère incertain est désormais affiché : on communique une **confiance** (bonne ou limitée) dans les prévisions qu'on annonce, ou bien on présente **plusieurs scénarios possibles**
- D'où vient cette incertitude, est-il possible de la contrôler, ou à défaut de l'estimer ?
- Comment communiquer cette incertitude, quelle information en tirer pour la **prise de décision** ?

1 - Introduction - Bref historique de la prévision du temps

Prévoir : évaluer l'état futur d'un système à une échéance plus ou moins lointaine

Jusqu'à la fin du 19^e siècle : observation et description des phénomènes météorologiques

- **Au cours de l'histoire** : accumulation d'expérience en un lieu géographique donné, dictons populaires
- **Antiquité** : observations à l'oeil nu, premiers ouvrages
- **Renaissance** : invention des instruments de mesure (thermomètre, baromètre, anémomètre, hygromètre)
- **À partir du 17^e siècle** : début de compréhension des phénomènes atmosphériques
- **À partir du 19^e siècle** : mise en place de réseaux d'observations, communications facilitées, premières cartes d'observations et de prévision

À partir du 20^e siècle : développement de la modélisation mathématique et numérique du temps.

1 - Introduction - Quelle mécanique derrière les prévisions du temps ?

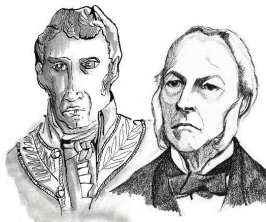
La **prévision numérique du temps** consiste à prévoir l'état futur de l'atmosphère par le biais de modèles mathématiques et physiques.

1 - Introduction - Quelle mécanique derrière les prévisions du temps ?

La **prévision numérique du temps** consiste à prévoir l'état futur de l'atmosphère par le biais de modèles mathématiques et physiques.

Elle s'appuie sur :

- une connaissance précise des lois selon lesquelles un état de l'atmosphère se développe à partir de l'état précédent
⇒ **Système de Navier-Stokes**
- une connaissance précise de l'état de l'atmosphère à l'instant où la prévision est initialisée.

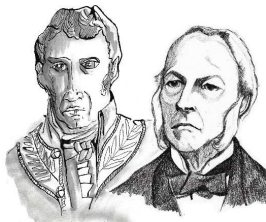


1 - Introduction - Quelle mécanique derrière les prévisions du temps ?

La **prévision numérique du temps** consiste à prévoir l'état futur de l'atmosphère par le biais de modèles mathématiques et physiques.

Elle s'appuie sur :

- une connaissance précise des lois selon lesquelles un état de l'atmosphère se développe à partir de l'état précédent
⇒ **Système de Navier-Stokes**
- une connaissance précise de l'état de l'atmosphère à l'instant où la prévision est initialisée.



Lois
d'évolution ⇒
Etat initial à t_0 ⇒



⇒ **Prévisions**
à $t_0 + \delta t$



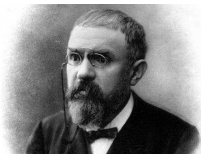
1 - Introduction - La prévision opérationnelle

- ▷ Les modèles de prévision opérationnels se sont développés dès les années 1950
- ▷ Progrès constants depuis : améliorations des modèles, augmentation du nombre d'observations, augmentation de la puissance de calcul *etc.*
- ▷ Mais des sources d'incertitude demeurent ...
 - **État initial** : il est impossible de le connaître précisément en chaque point du globe et de l'atmosphère terrestre
 - **Modèle** : représentation imparfaite du comportement de l'atmosphère
- ▷ **De l'état initial à la prévision la plus lointaine l'information météorologique se trouve entâchée d'incertitude.**

- 1 Introduction
- 2 Sensibilité aux conditions initiales
- 3 L'approche probabiliste de la prévision du temps
- 4 Communiquer et utiliser l'incertitude

2 - L'intuition de Poincaré (1854-1912)

Science et Méthode (1908)



“Une cause très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard... Mais, lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation initiale qu'approximativement. Si cela nous permet de prévoir la situation ultérieure avec la même approximation, c'est tout ce qu'il nous faut, nous disons que le phénomène a été prévu, qu'il est régi par des lois; mais il n'en est pas toujours ainsi, il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux.”

2 - L'intuition de Poincaré (1854-1912)

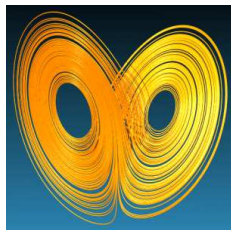
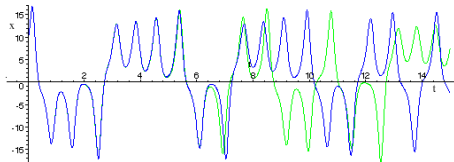
Science et Méthode (1908)

“Pourquoi les météorologistes ont-ils tant de peine à prédire le temps avec quelque certitude ? Pourquoi les chutes de pluie, les tempêtes elles-mêmes nous semblent-elles arriver au hasard ... un dixième de degré en plus ou en moins en un point quelconque, le cyclone éclate ici et non pas là ... Si on avait connu ce dixième de degré, on aurait pu le savoir d'avance, mais les observations n'étaient ni assez serrées, ni assez précises, et c'est pour cela que tout semble dû à l'intervention du hasard. Ici encore nous retrouvons le même contraste entre une cause minime, inappréciable pour l'observateur, et des effets considérables, qui sont quelquefois d'épouvantables désastres.”

2 - L'expérience de Lorenz (1917-2008)

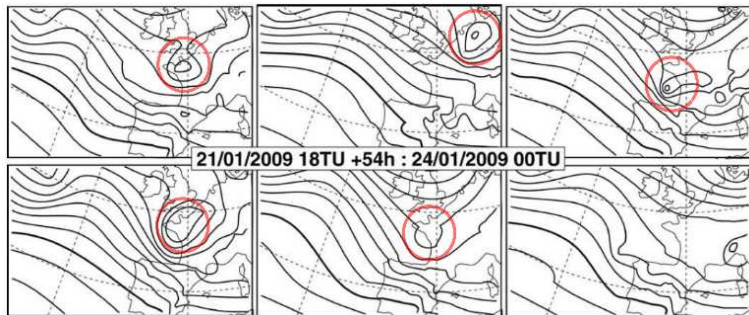
Ou le battement d'aile de papillon ...

▷ Les travaux de Lorenz (1963) confirment l'intuition de Poincaré et démontrent numériquement la **sensibilité aux conditions initiales** : *“deux états qui ne diffèrent que par d'infimes quantités peuvent évoluer vers deux états totalement différents.”*



<http://experiences.math.cnrs.fr/Modele-de-Lorenz.html>

2 - L'expérience quotidienne en météo



▷ 6 prévisions réalisées à partir de 6 conditions initiales très semblables : les petites différences sont devenues de grands écarts ...

2 - Limites de la prévision déterministe

Horizon de prévisibilité

- ▷ Des prévisions initialement voisines divergent au bout d'un certain temps, appelé **horizon de prévisibilité**
- ▷ Il dépend notamment de l'échelle du phénomène auquel on s'intéresse
- ▷ Exemples : dépression 2-3 jours, orages quelques heures

2 - Limites de la prévision déterministe

Horizon de prévisibilité

- ▷ Des prévisions initialement voisines divergent au bout d'un certain temps, appelé **horizon de prévisibilité**
- ▷ Il dépend notamment de l'échelle du phénomène auquel on s'intéresse
- ▷ Exemples : dépression 2-3 jours, orages quelques heures

Toute tentative de prévision lointaine est-elle vouée à l'échec ?

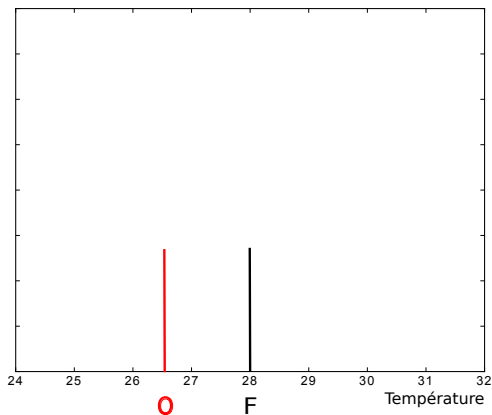
- ▷ Au-delà de cet horizon de prévisibilité la prévision météorologique n'a de sens que si l'on considère l'incertitude qui lui est associée
- ▷ L'incertitude est donc une information à part entière qu'il convient d'estimer
- ▷ Pour cela une **approche probabiliste** devient nécessaire.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Sensibilité aux conditions initiales
- 3 L'approche probabiliste de la prévision du temps**
- 4 Communiquer et utiliser l'incertitude

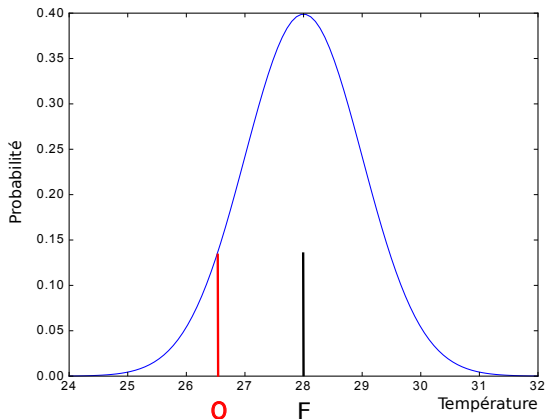
3 - Prédiction probabiliste

▷ La prédiction **déterministe** fournit l'état le plus probable de l'atmosphère



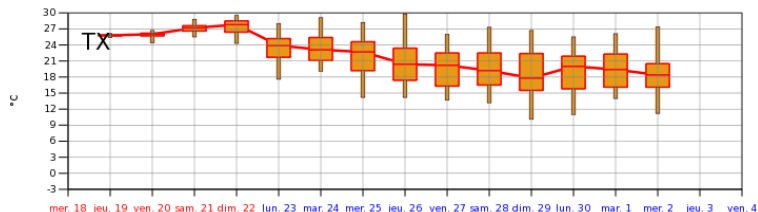
3 - Prédiction probabiliste

- ▷ La prédiction **déterministe** fournit l'état le plus probable de l'atmosphère
- ▷ La prédiction **probabiliste** fournit la distribution de probabilité de l'état de l'atmosphère



3 - Prédiction probabiliste

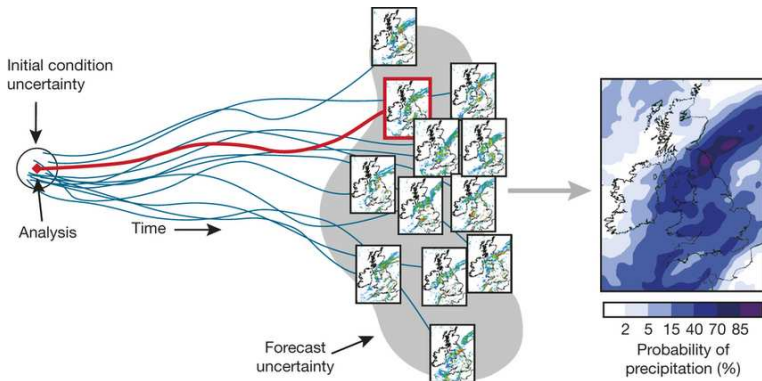
- ▷ La prédiction **déterministe** fournit l'état le plus probable de l'atmosphère
- ▷ La prédiction **probabiliste** fournit la distribution de probabilité de l'état de l'atmosphère



3 - La prévision d'ensemble

Comment obtenir une prévision probabiliste ?

- ▷ Le modèle est lancé plusieurs fois, à partir d'états initiaux légèrement différents et, éventuellement, de configurations modèle légèrement différentes
- ▷ on ne fait plus une prévision mais **un ensemble de prévisions** (en pratique entre 10 et 50).

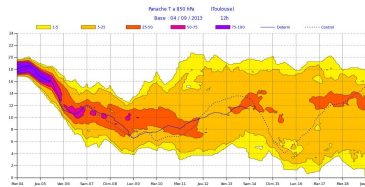
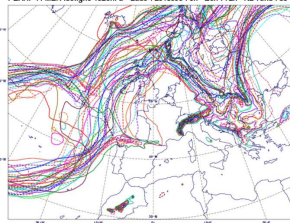


3 - 25 ans de prévision d'ensemble

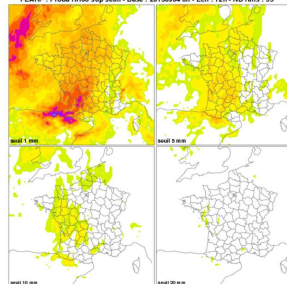
▷ Utiliser une prévision d'ensemble c'est :

- Proposer de vrais scénarii alternatifs
- Avoir une quantification de l'incertitude des prévisions
⇒ indice de confiance
- Avoir une quantification du risque de survenue d'un évènement météorologique donné
- Mieux anticiper les phénomènes intenses

PEARP : PMER Isoline 1020hPa - Base : 20130904 6h - Ech : 72h - NB runs : 35



PEARP : Probe RR06 sup seuil - Base : 20130904 6h - Ech : 72h - NB runs : 35



Plan

- 1 Introduction
- 2 Sensibilité aux conditions initiales
- 3 L'approche probabiliste de la prévision du temps
- 4 Communiquer et utiliser l'incertitude**

4 - Pourquoi indiquer l'incertitude des prévisions ?

“Douter de tout ou tout croire, ce sont deux solutions également commodes qui l'une et l'autre nous dispensent de réfléchir.” Poincaré

- Reflète l'état actuel de la science
- Renforce la confiance des utilisateurs
- Permet de prendre de meilleures décisions
- Permet de prendre en compte les attentes des utilisateurs

4 - Utilisation des prévisions d'ensemble

Annoncer qu'il y a 30% de chance qu'il pleuve demain n'est pas forcément perçu comme une information qui aide à la prise de décision !

- ▷ Difficulté de compréhension et d'interprétation des probabilités et de la terminologie employée (très peu/peu/très/extrêmement probable, risque, possibilité de ...)
- ▷ Difficulté d'utilisation des probabilités, qui semblent aller à l'encontre de la décision oui/non généralement demandée
- ▷ Nécessité de traiter l'information produite par les prévisions d'ensemble afin de la présenter sous une forme à la fois intelligible, synthétique et la plus juste possible
- ▷ Considérer la finalité des prévisions : quel usager ? quelle utilisation ?

4 - Exemples

- *Une personne hésite à prendre son parapluie.*

L'action de prendre un parapluie ne coûtant rien, il y a un intérêt à le prendre quelque soit le niveau de probabilité prévu.

4 - Exemples

- *Une personne hésite à prendre son parapluie.*

L'action de prendre un parapluie ne coûtant rien, il y a un intérêt à le prendre quelque soit le niveau de probabilité prévu.

- *Une personne organise une manifestation en plein air.*

Elle doit décider d'opter ou non pour une solution de repli (location de salle, chapiteau). Que faire ?

4 - Exemples

- *Une personne hésite à prendre son parapluie.*

L'action de prendre un parapluie ne coûtant rien, il y a un intérêt à le prendre quelque soit le niveau de probabilité prévu.

- *Une personne organise une manifestation en plein air.*

Elle doit décider d'opter ou non pour une solution de repli (location de salle, chapiteau). Que faire ?

- *Un agriculteur souhaite épandre de l'engrais.*

Pour que l'opération réussisse il faut un peu de pluie afin que cet engrais soit absorbé par le sol. L'agriculteur a établi une règle selon laquelle, si la probabilité de pluie est inférieure à 80 %, le risque de perdre l'engrais est trop important. Il attend donc que la probabilité augmente.

4 - Exemples

- *Une personne hésite à prendre son parapluie.*

L'action de prendre un parapluie ne coûtant rien, il y a un intérêt à le prendre quelque soit le niveau de probabilité prévu.

- *Une personne organise une manifestation en plein air.*

Elle doit décider d'opter ou non pour une solution de repli (location de salle, chapiteau). Que faire ?

- *Un agriculteur souhaite épandre de l'engrais.*

Pour que l'opération réussisse il faut un peu de pluie afin que cet engrais soit absorbé par le sol. L'agriculteur a établi une règle selon laquelle, si la probabilité de pluie est inférieure à 80 %, le risque de perdre l'engrais est trop important. Il attend donc que la probabilité augmente.

▷ Les usagers adaptent leur action à divers degrés d'incertitude des prévisions, selon leurs propres besoins.

4 - Exemples

- *Une personne hésite à prendre son parapluie.*

L'action de prendre un parapluie ne coûtant rien, il y a un intérêt à le prendre quelque soit le niveau de probabilité prévu.

- *Une personne organise une manifestation en plein air.*

Elle doit décider d'opter ou non pour une solution de repli (location de salle, chapiteau). Que faire ?

- *Un agriculteur souhaite épandre de l'engrais.*

Pour que l'opération réussisse il faut un peu de pluie afin que cet engrais soit absorbé par le sol. L'agriculteur a établi une règle selon laquelle, si la probabilité de pluie est inférieure à 80 %, le risque de perdre l'engrais est trop important. Il attend donc que la probabilité augmente.

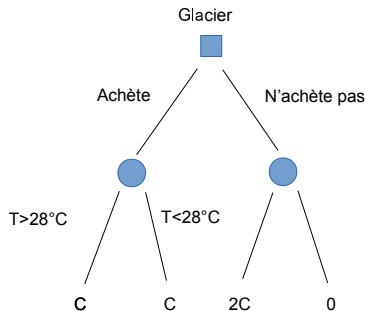
▷ Les usagers adaptent leur action à divers degrés d'incertitude des prévisions, selon leurs propres besoins.

▷ Il est possible d'optimiser cette adaptation en estimant **les coûts et les pertes** associés à la décision.

4 - Le vendeur de glaces et le chaos

Objectif : gérer efficacement son approvisionnement quotidien avec les contraintes suivantes

- si la température de l'air est supérieure à 28°C , la vente de son stock génère un gain de deux fois son investissement ;
- si la température est inférieure à 28°C , tout son investissement est perdu.



4 - Le vendeur de glaces et le chaos

Pour l'aider à prendre sa décision, il dispose de prévisions météo¹ :

- une **prévision déterministe** : c'est la valeur de température la plus probable prévue pour le lendemain ;
- s'il le souhaite, le vendeur peut compléter cette information en achetant une **prévision probabiliste** : elle indique la probabilité que la température soit supérieure à 28°C le lendemain.

1. http://www.umr-cnrm.fr/recyf/produits/Vendeur_De_Glaces/

4 - Le vendeur de glaces et le chaos



vendredi 1 juin

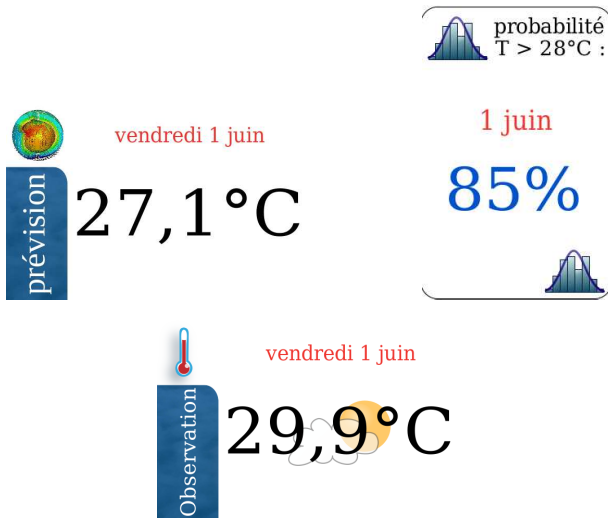
prévision

27,1°C

4 - Le vendeur de glaces et le chaos

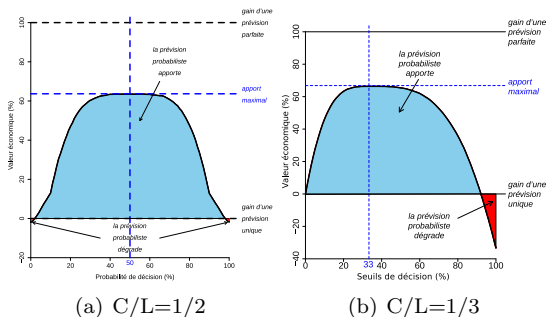


4 - Le vendeur de glaces et le chaos



4 - Le vendeur de glaces et le chaos

- ▷ Si on répète l'expérience un grand nombre de fois on peut évaluer la **valeur économique** des prévisions probabilistes, i.e., *le gain apporté par l'utilisation de la prévision probabiliste par rapport à la prévision déterministe, en fonction du seuil de décision*
- ▷ **Seuil de décision** : valeur de probabilité à partir de laquelle on prend la décision d'acheter un stock de glaces
- ▷ **Le gain maximal est obtenu pour le seuil Coût/Perte**
- ▷ Plus le coût est élevé par rapport à la perte plus l'utilisateur doit attendre des probabilités élevées pour agir.



4 - Conclusions

“La prévision est un art difficile, surtout quand elle concerne l’avenir.” Niels Bohr

- L’incertitude reste un facteur inhérent au processus de prévision météorologique : les conditions pour une prévision parfaite n’existent pas !
- Une prévision n’est complète que lorsqu’elle est exprimée sous la forme d’une distribution de probabilité
- L’exploitation des prévisions probabilistes est propre à chaque usager et peut conduire à de meilleures prises de décision que la prévision déterministe.