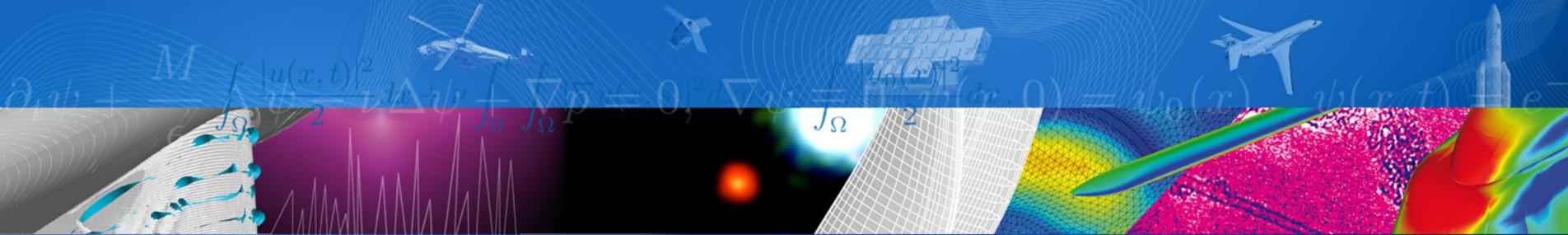


# ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

retour sur innovation

[www.onera.fr](http://www.onera.fr)



*Formation Apprentissage Machine et Deep Learning*

# Les réseaux de neurones appliqués à la météorologie spatiale

**M. Gruet**<sup>1</sup>, **S. Rochel**<sup>1</sup>, **N. Bartoli**<sup>2</sup>, **R. Benacquista**<sup>1</sup>, **A. Sicard**<sup>1</sup>,  
**G. Rolland**<sup>3</sup>, **T. Pellegrini**<sup>4</sup>

Doctorante 2<sup>ème</sup> année

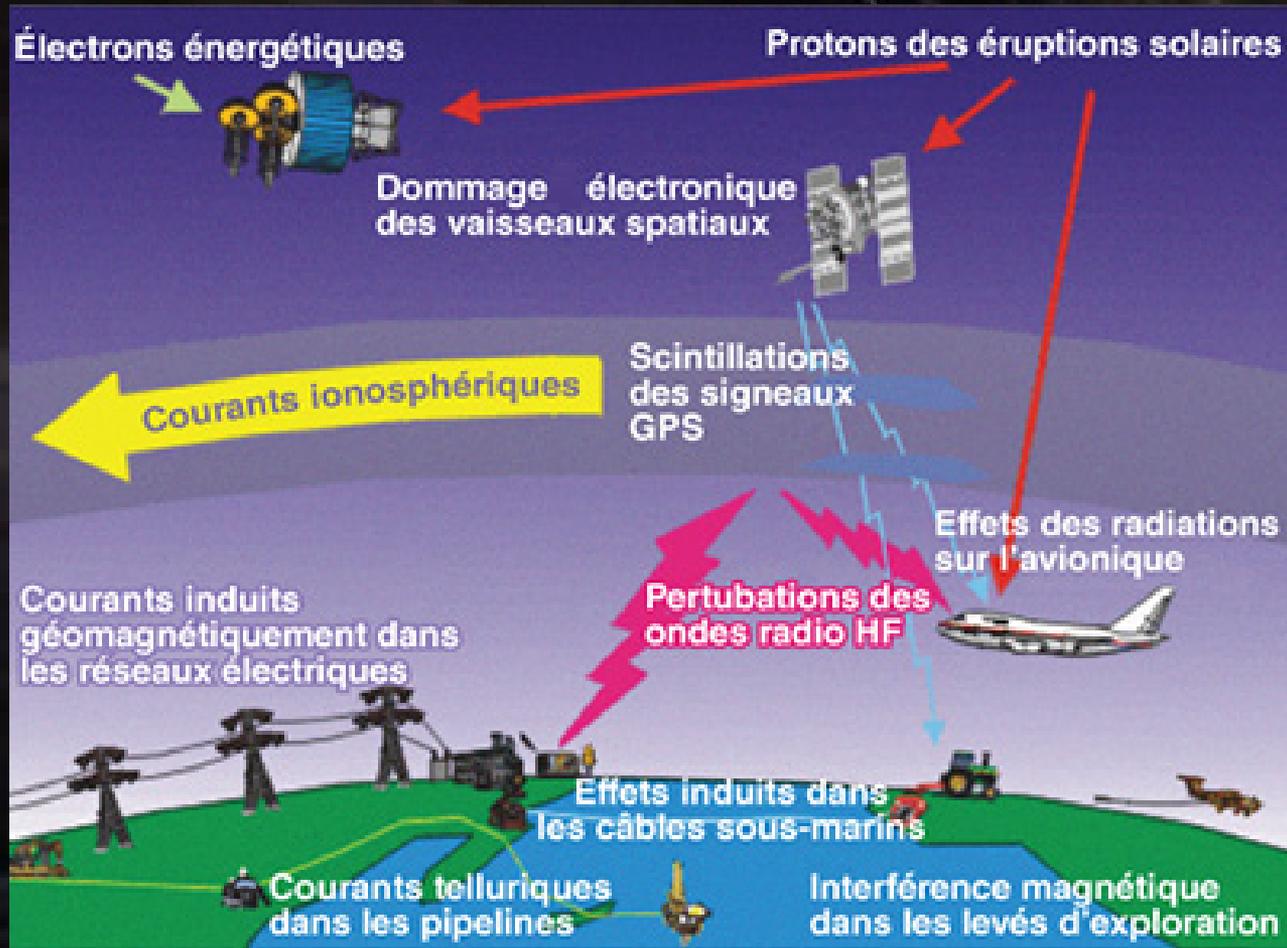
ONERA, Département Physique Environnement Espace

1- ONERA - DPhIEE  
2- ONERA - DCPS  
3- CNES - DCT-AQ  
4- IRIT - SAMOVA



retour sur innovation

# L'interaction Soleil –Terre à l'origine de la météorologie spatiale



Crédits : University of Oslo

# La météorologie spatiale

## Météorologie spatiale :

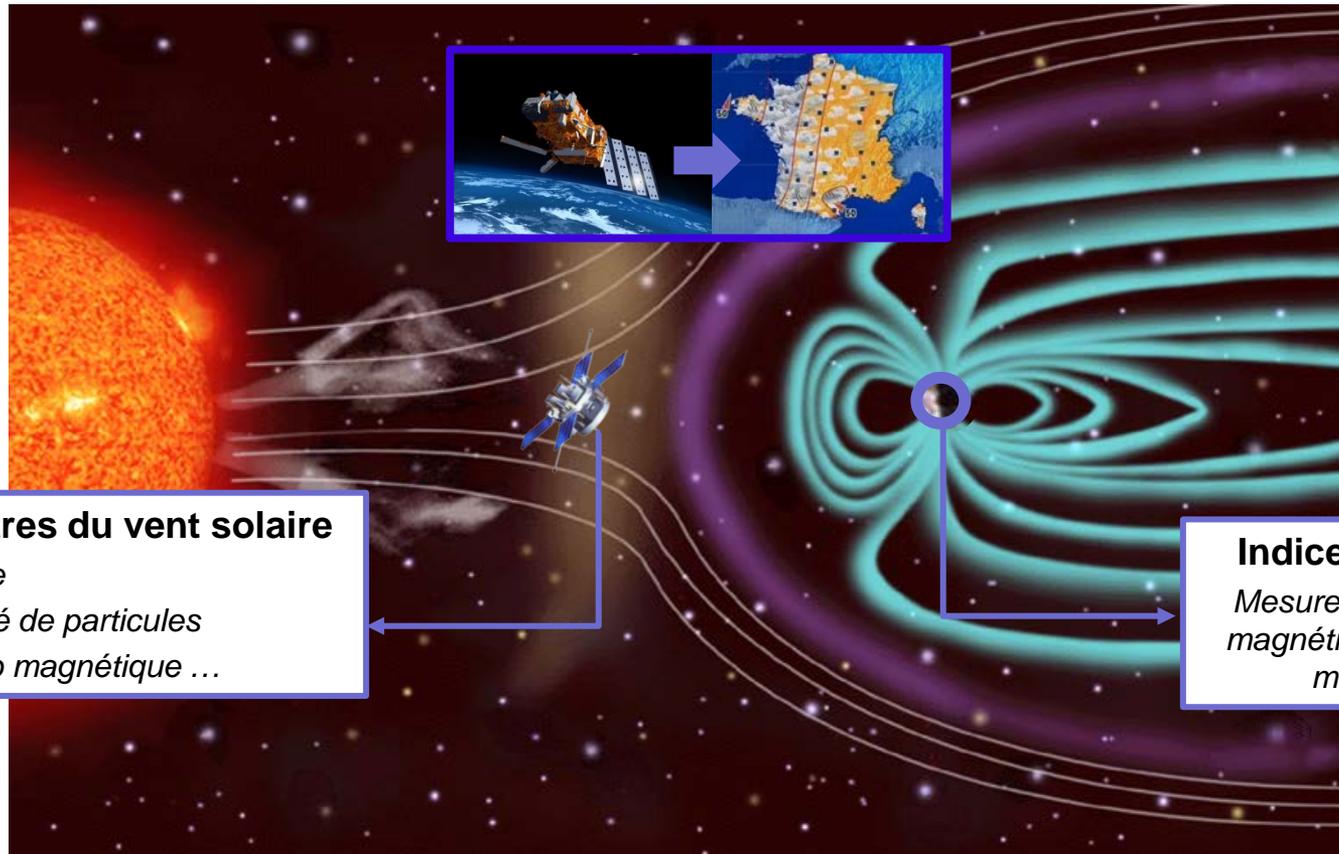
*prédire l'état et les changements des différentes régions de la magnétosphère à partir de l'observation du Soleil.*



Compréhension des phénomènes



Prévision des événements solaires



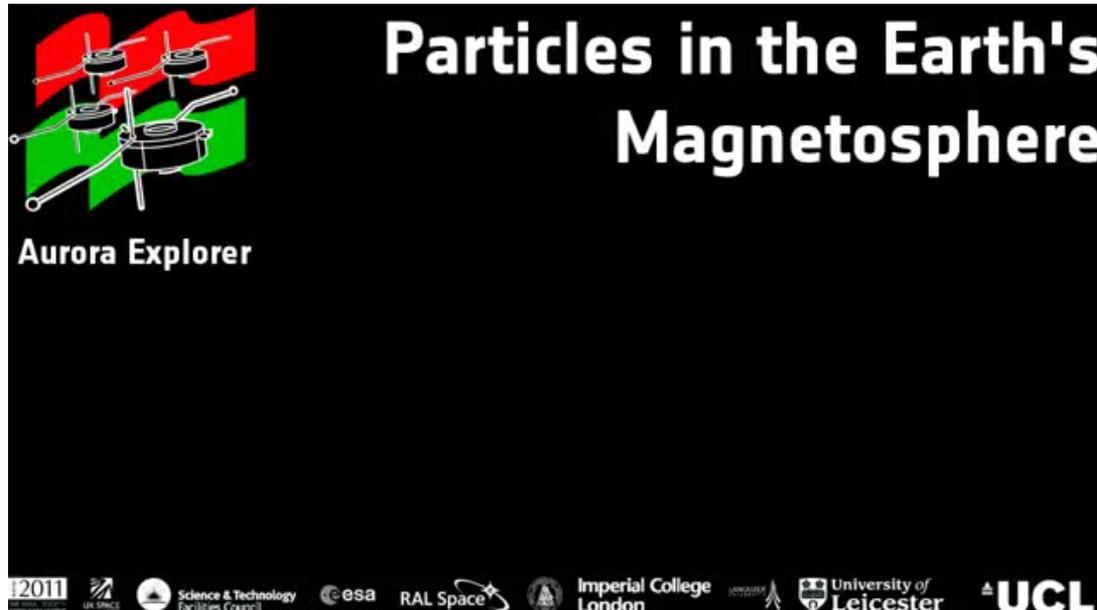
### Paramètres du vent solaire

- Vitesse
- Densité de particules
- Champ magnétique ...

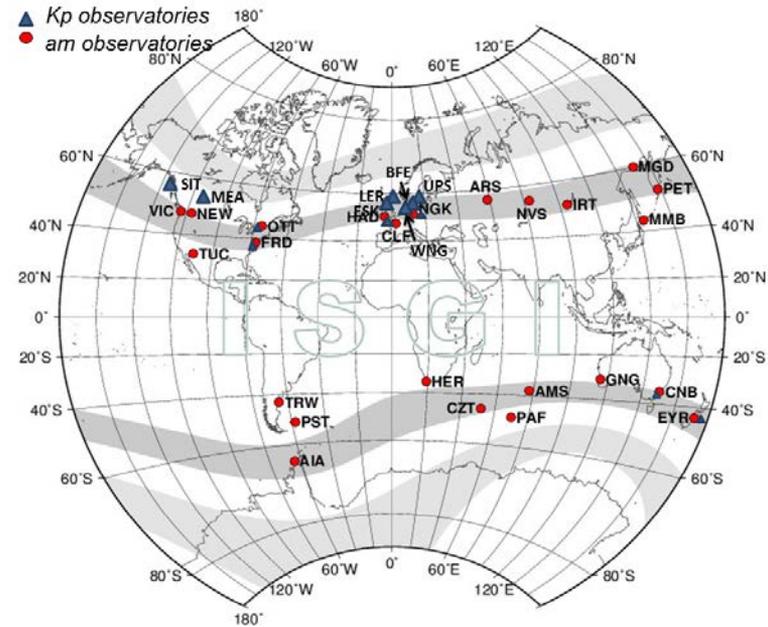
### Indices magnétiques

Mesures des perturbations magnétiques au sol par des magnétomètres

# Les indices magnétiques



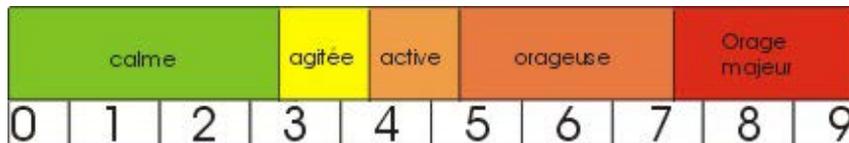
*Courants magnétosphériques*



*Répartition des observatoires de *Kp* et *am* – Source ISGI*

***Kp* et *am* sont des indices d'activités globales définis à 3 heures :**  
représentent l'apport global d'énergie dans le système de la magnétosphère.

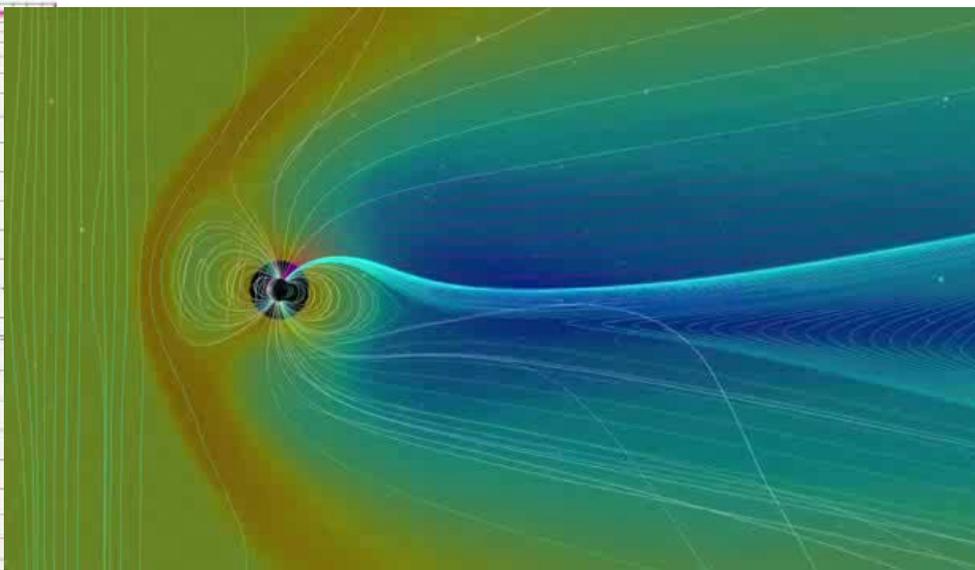
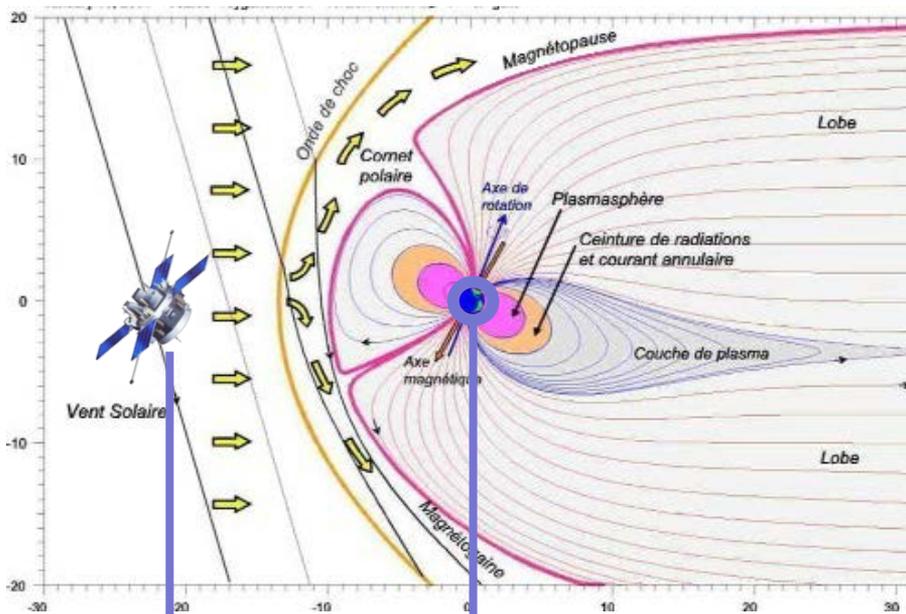
***Kp*** « Echelle de Richter de l'activité magnétique »



Manque de précision pour scientifiques et industriels : intérêt de l'indice ***am*** défini en nanoTesla

# L'intérêt des réseaux de neurones

Résultat de l'Interaction Soleil Terre – Source LPP



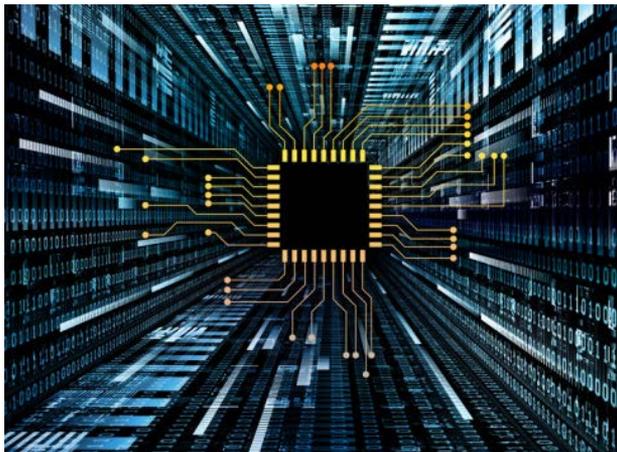
Paramètres du vent solaire

Indices magnétiques

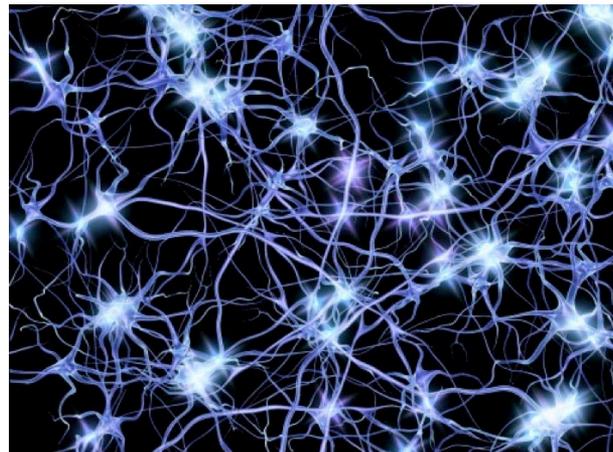
Relation complexe à mettre en place

Utilisation de modèles statistiques :  
**Les réseaux de neurones**

# Les réseaux de neurones



Capacité de calcul d'une machine

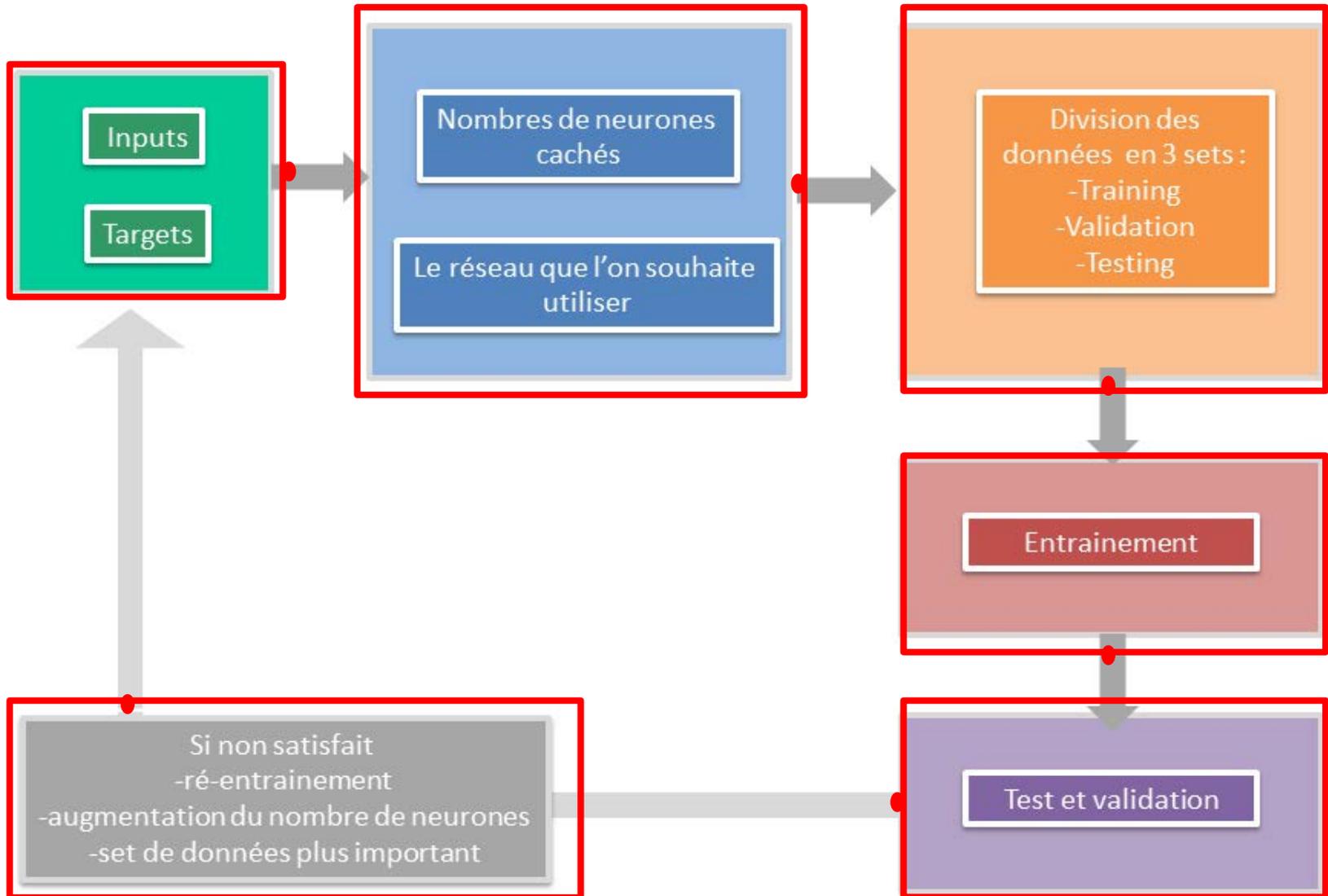


Capacité d'apprentissage et de réflexion  
d'un être humain

**modèle de calcul basé sur le fonctionnement de nos propres neurones**  
**Possède une capacité d'apprentissage à partir d'une base d'entraînement**

**Principaux enjeux en météorologie spatiale :**

- **trouver le réseau de neurones le plus adapté**
- **l'optimiser avec les jeux de données existant**



Entrées : paramètres du vent solaire à 1h

Densité

Vitesse

IMF B

IMB Bz

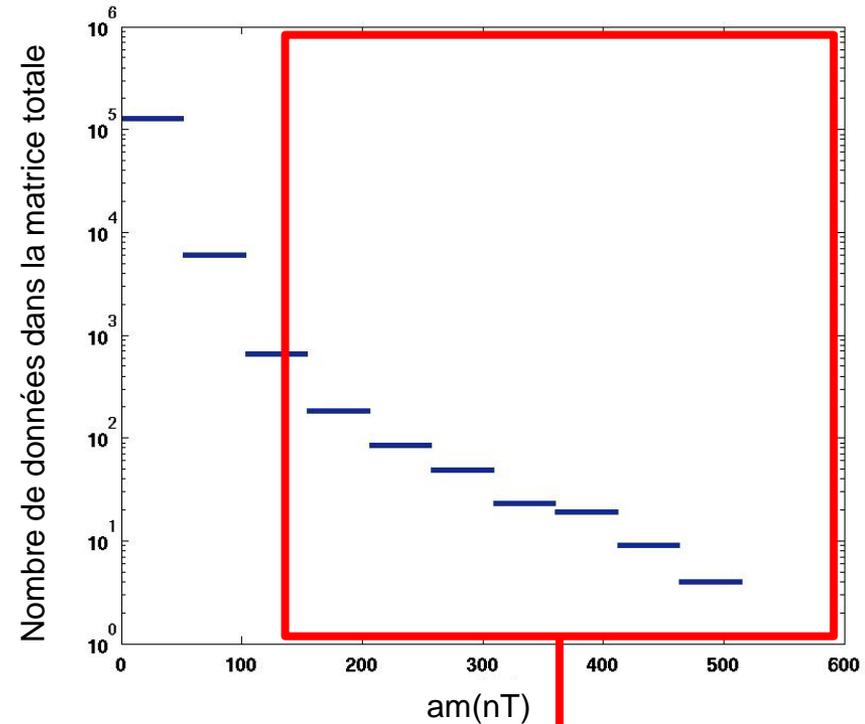
Historique de 24 heures



Sortie : activité magnétique à 1h

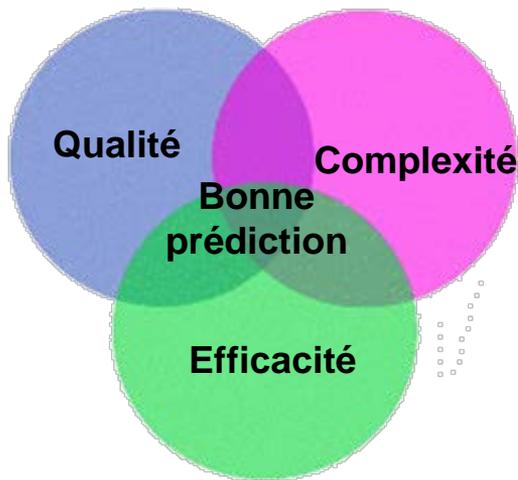
Indice magnétique am correspondant à chaque instant

*Matrices contenant toutes les données entre 1995 et 2012*



1% < des données à activité haute

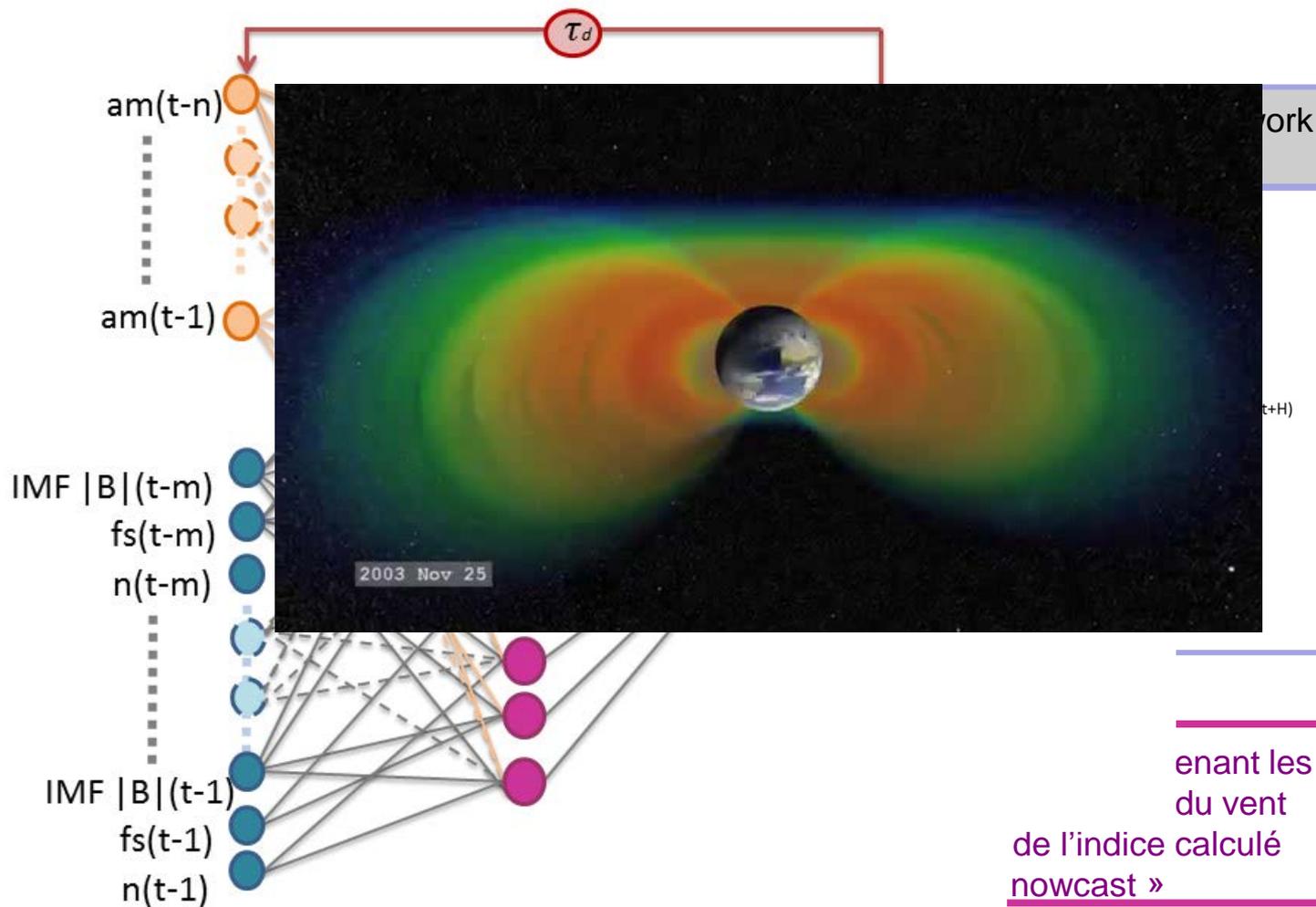
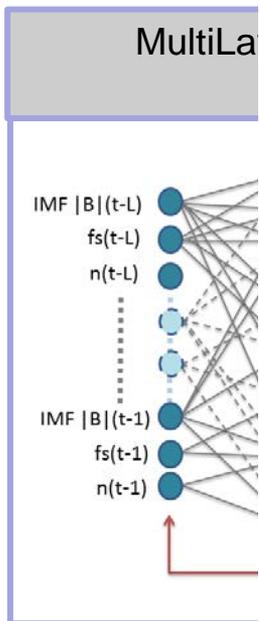
Problématique pour l'entraînement

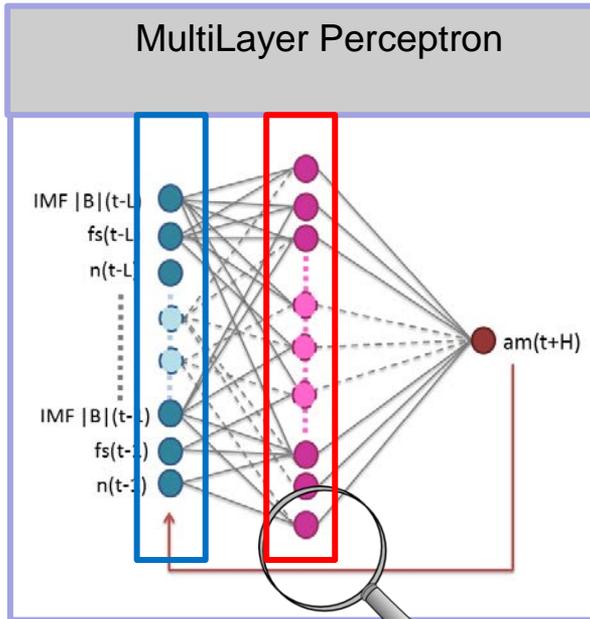


	Données estimées positives	Données estimées négatives
Données positives	Vraie positive	Fausse négative
Données négatives	Fausse positive	Vraie négative

$$\text{Probabilité de détection POD} : \frac{\text{vraie positive}}{\text{vraie positive} + \text{fausse positive}}$$

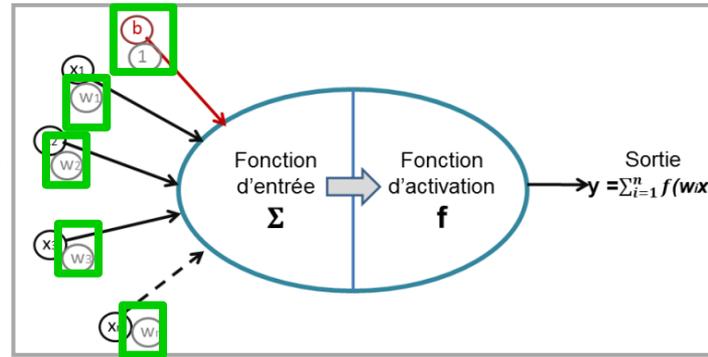
- .Quelle fraction des événements « vrais » sont correctement « prédits » ?
- .Très sensible à la périodicité des événements. Bons pour les événements rares.
- .Comprise entre 0 et 1 : 1 quand la valeur est correctement détectée
- .Complémentaire du **False Alarm Rate** (entre 0 et 1 : 1 pour un événement prédit alors qu'il n'a pas eu lieu )



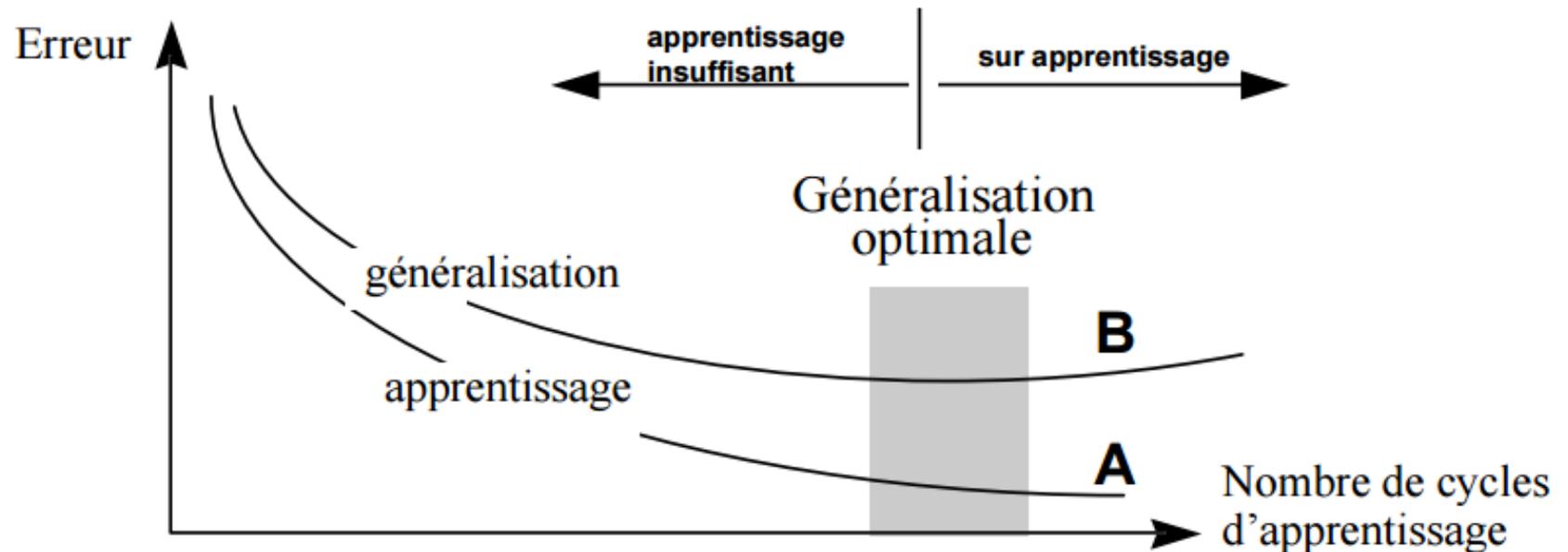


- Définition de la fonction d'activation
- Définition de la fonction d'entrée
- Définition du nombre de couches cachées
- Définition du nombre de neurones dans chaque couche cachée
- Définition des paramètres d'entrées à considérer
- Définition des historiques de temps à considérer (séries temporelles)
- Optimisation des poids : donne l'importance de l'information
- Optimisation des biais : comment l'information est transmise ?

- $X$  = paramètres d'entrée
- $W$  = poids de l'information
- $f$  = fonction d'activation

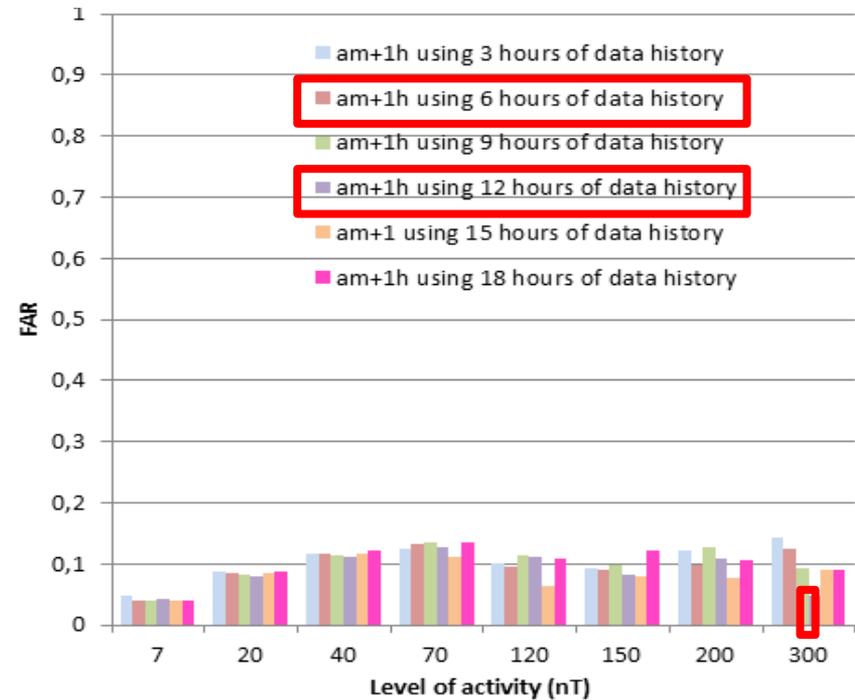
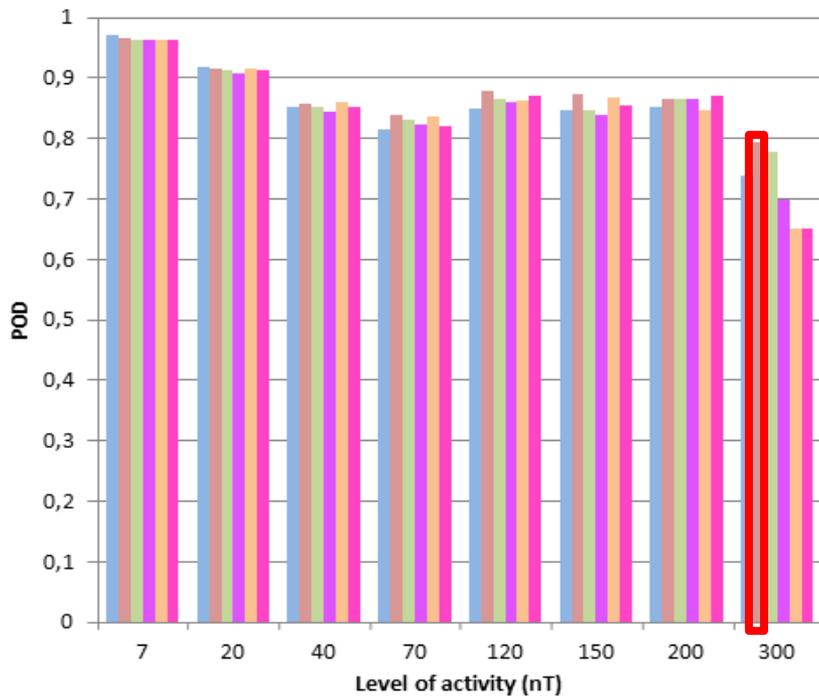
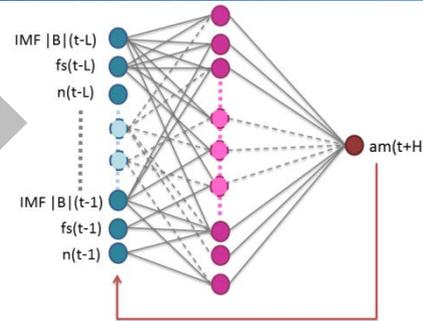


Le véritable problème consiste à réussir à construire un réseau capable également de **bien prévoir les nouvelles données** : **Généralisation**



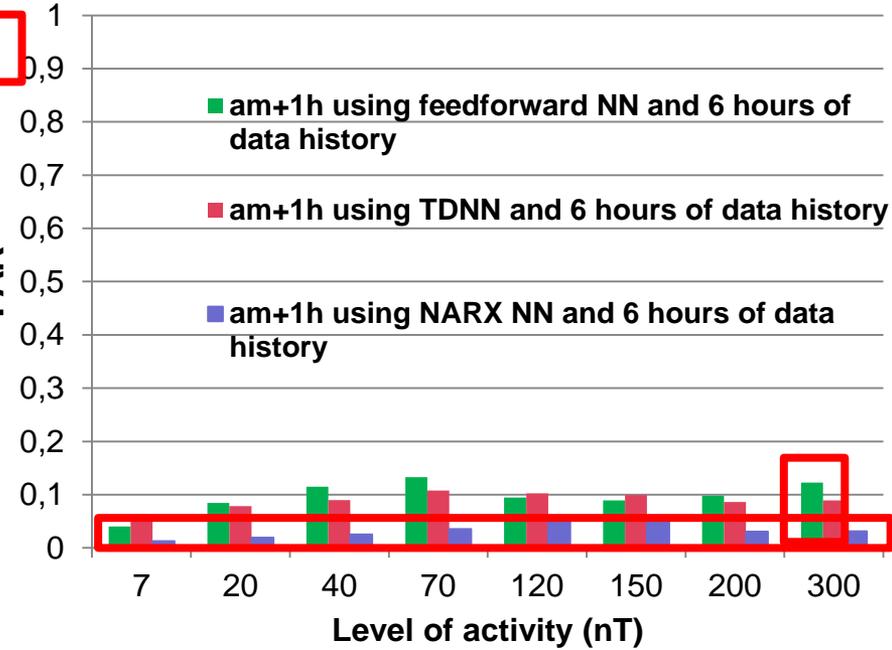
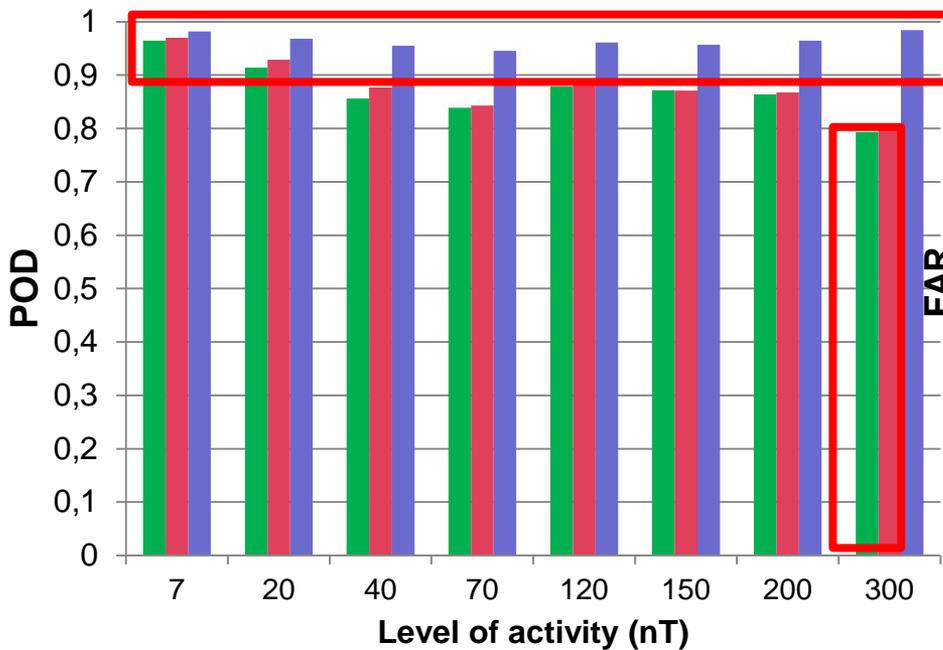
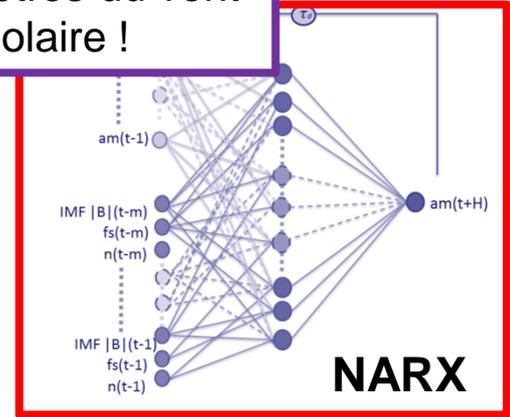
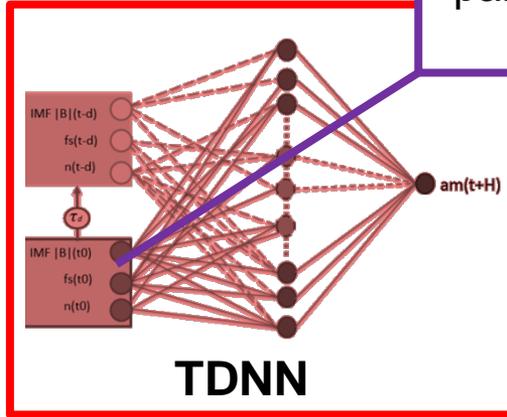
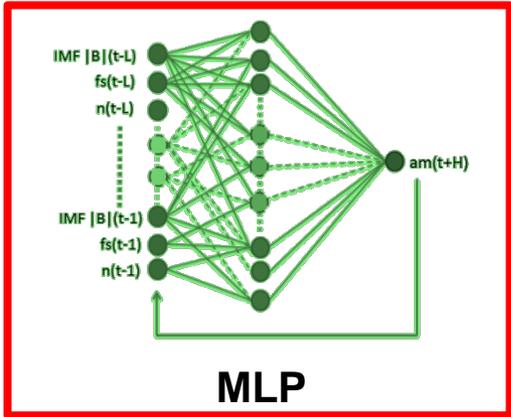
Généralisation : La performance des réseaux de neurones se mesure par la manière dont ils savent prévoir des données inconnues (données hors apprentissage).

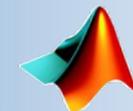
Quelle est la longueur  $L$  de l'historique de temps à considérer en entrée du réseau pour l'optimiser ?



# L'impact de la structure du réseau

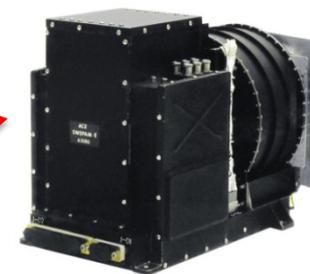
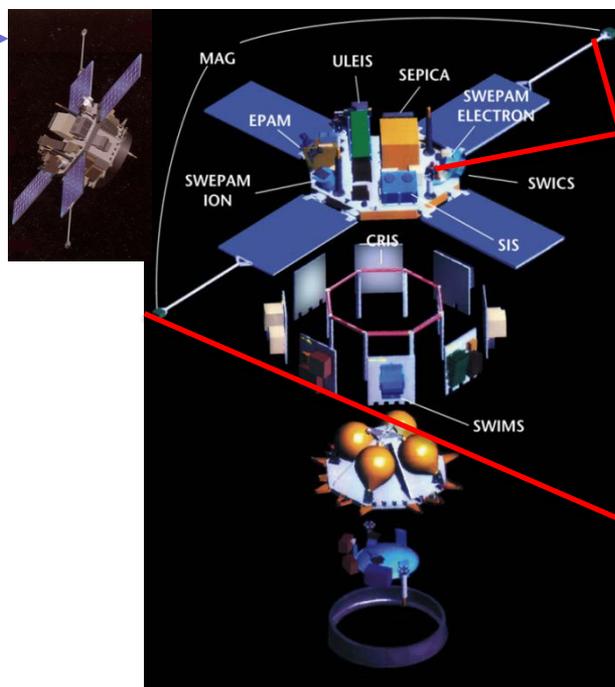
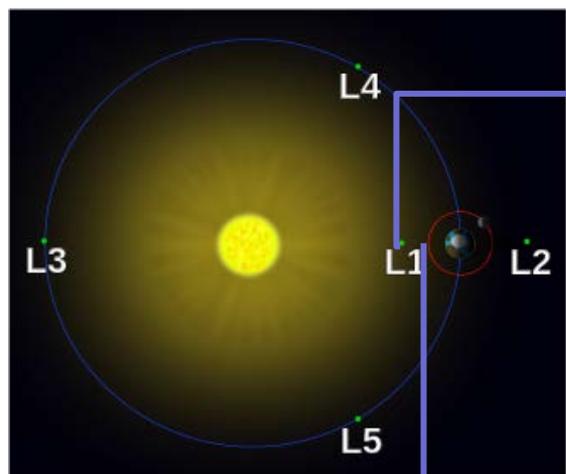
En entrée :  
uniquement les  
paramètres du vent  
solaire !





# L'impact des données considérées

- On considère alors les paramètres enregistrés au point de Lagrange 1 à partir des données ACE : Advanced Composition Explorer – mission ayant pour objectif d'étudier in situ les particules d'origine solaire, interplanétaire, interstellaire et galactique. (1997-2024)



SWEPAM (Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor)

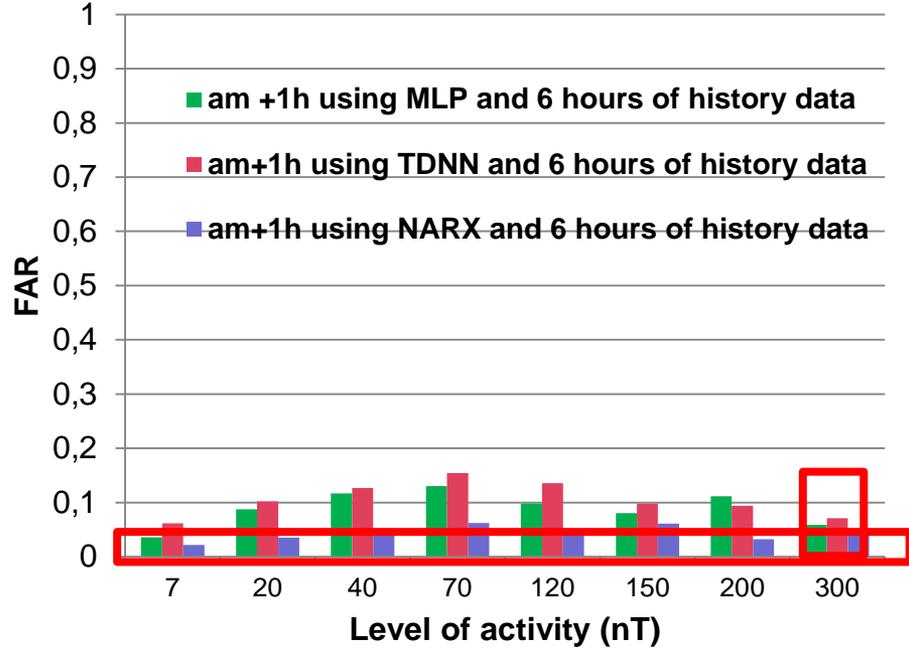
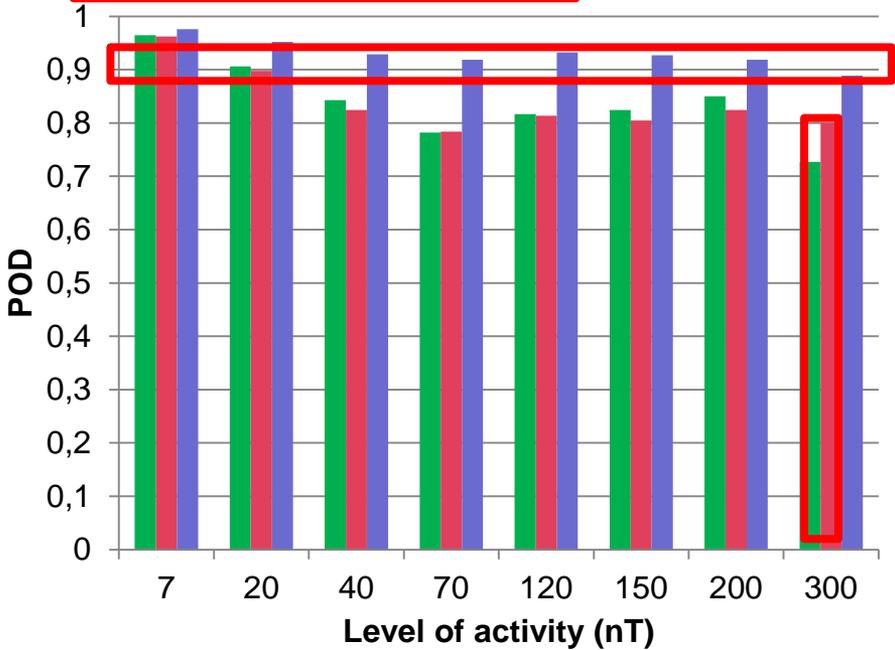
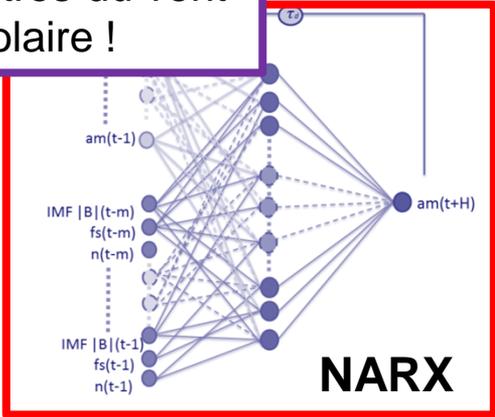
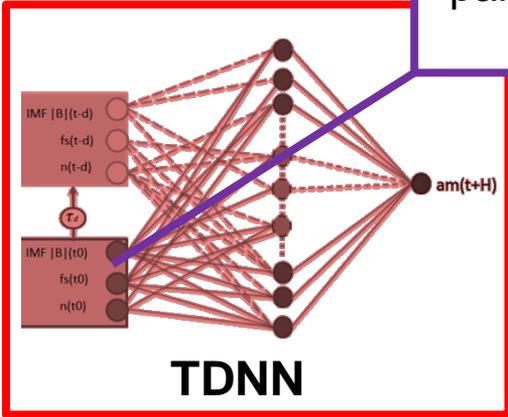
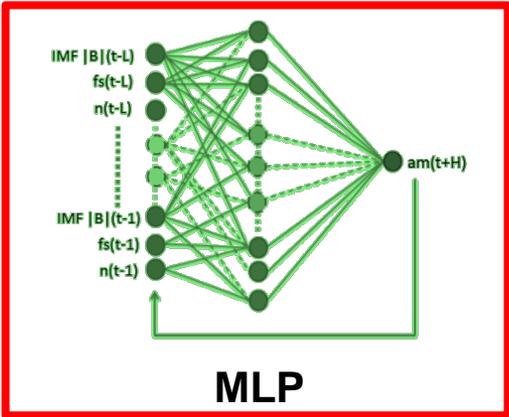


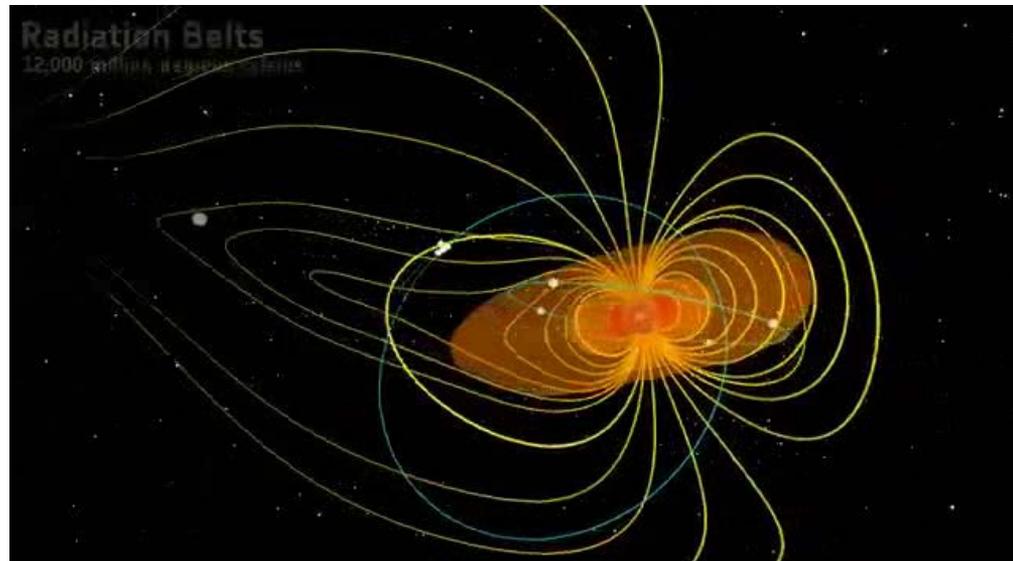
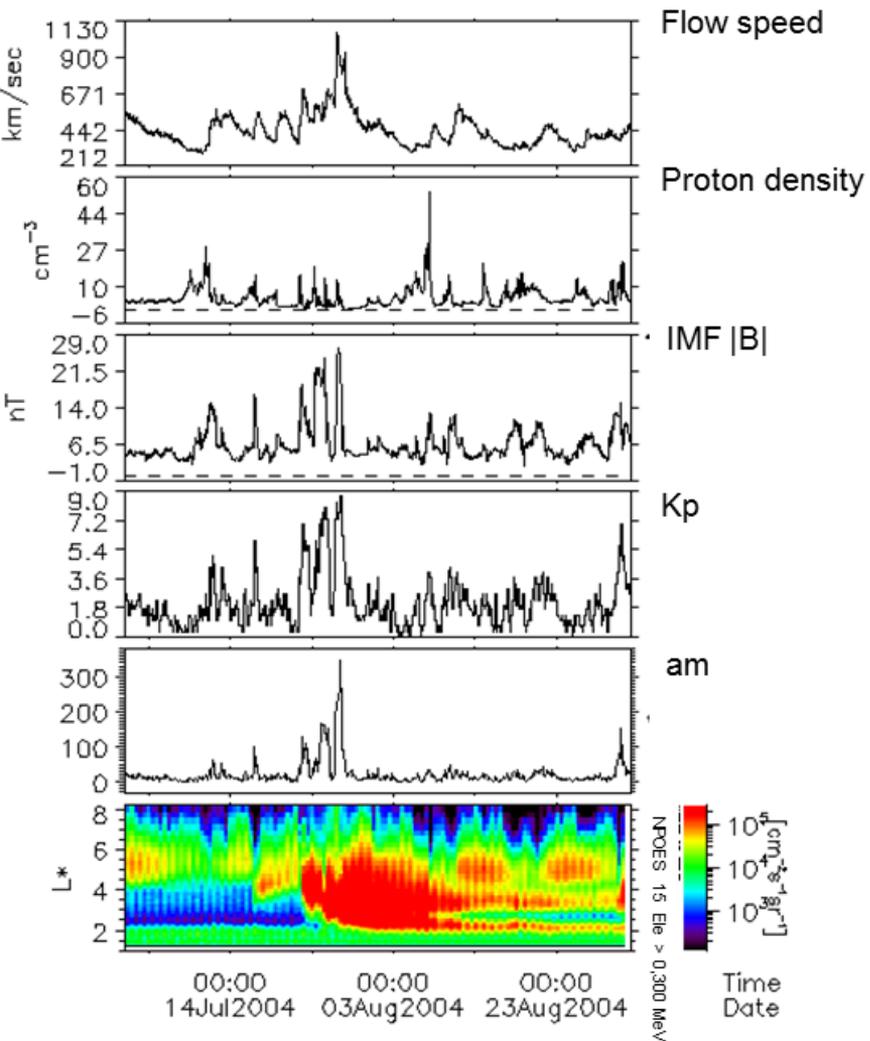
MAG (magnétomètre)

OMNI : propagées jusqu'à la magnétopause

# L'impact des données considérées

En entrée :  
uniquement les  
paramètres du vent  
solaire !

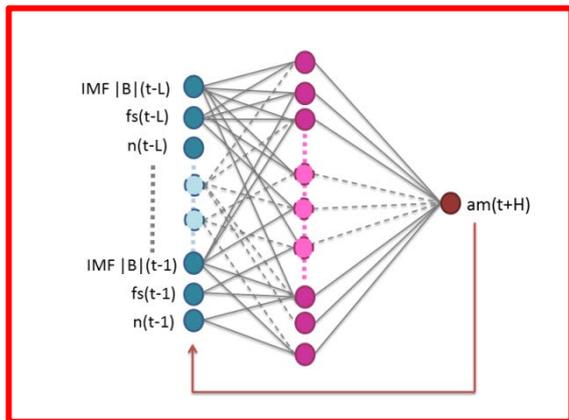




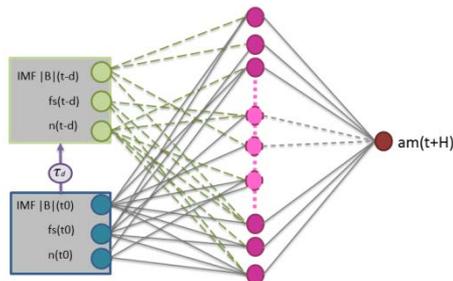
**Définition de  $L^*$**  : coquille respectant le 3<sup>ème</sup> invariant adiabatique

*La coquille de dérive se contracte pour conserver le flux magnétique lorsque le champ magnétique à l'intérieur augmente.*

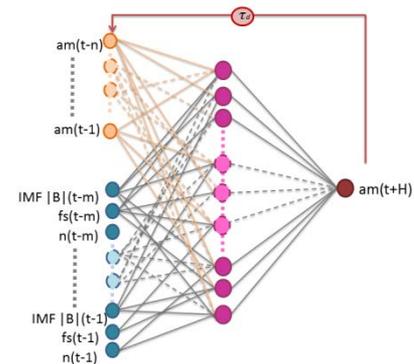
# Test sur un cas d'événement extrême



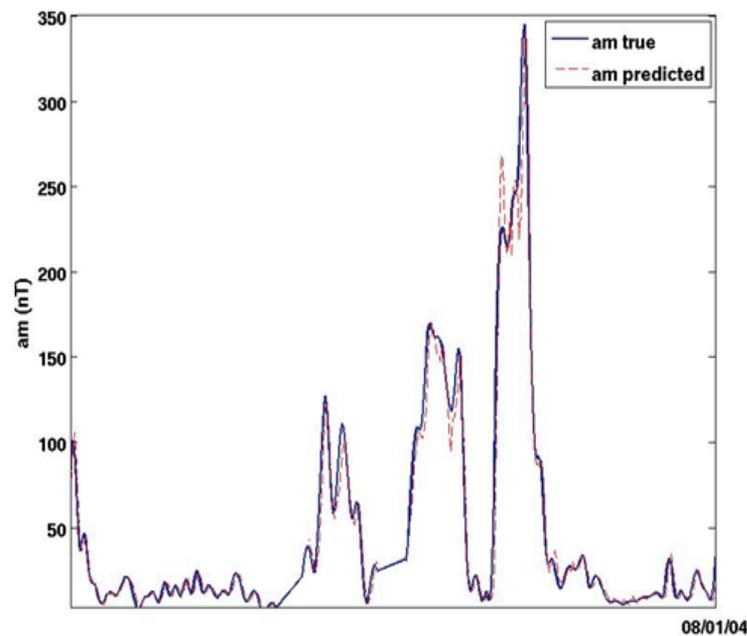
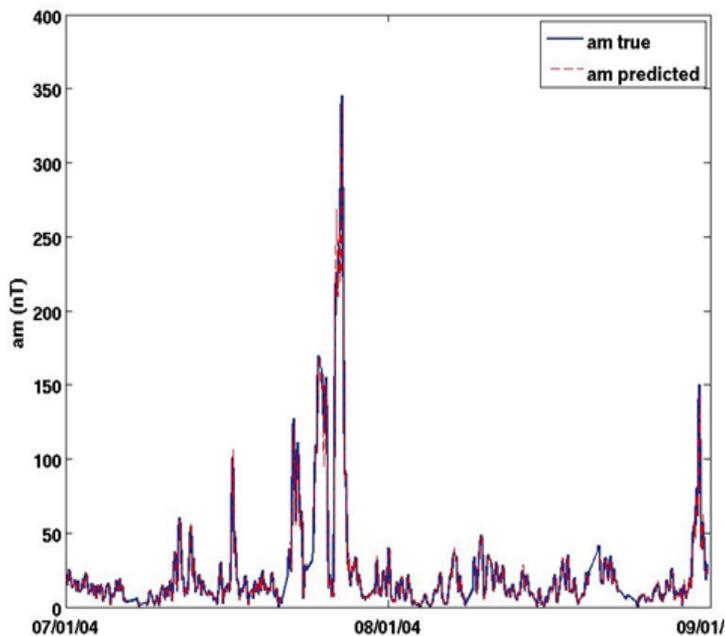
MLP



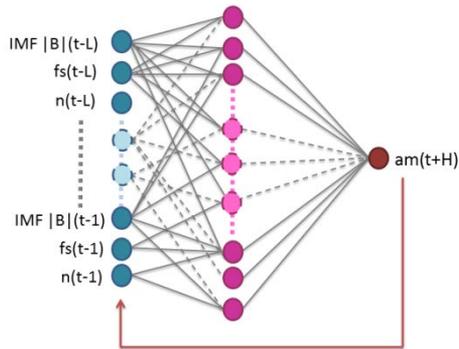
TDNN



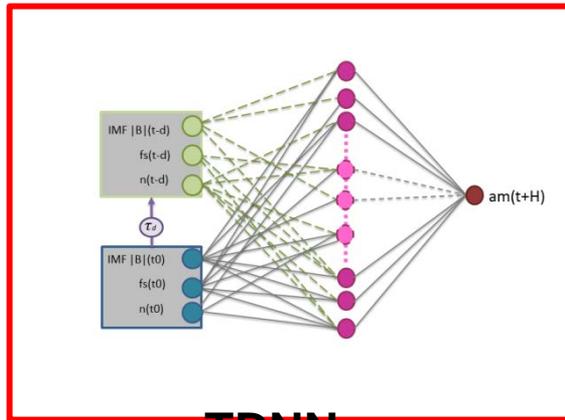
NARX



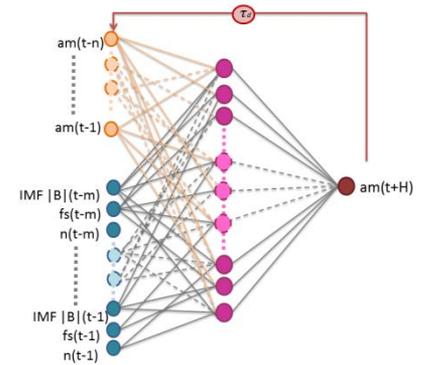
# Test sur un cas d'événement extrême



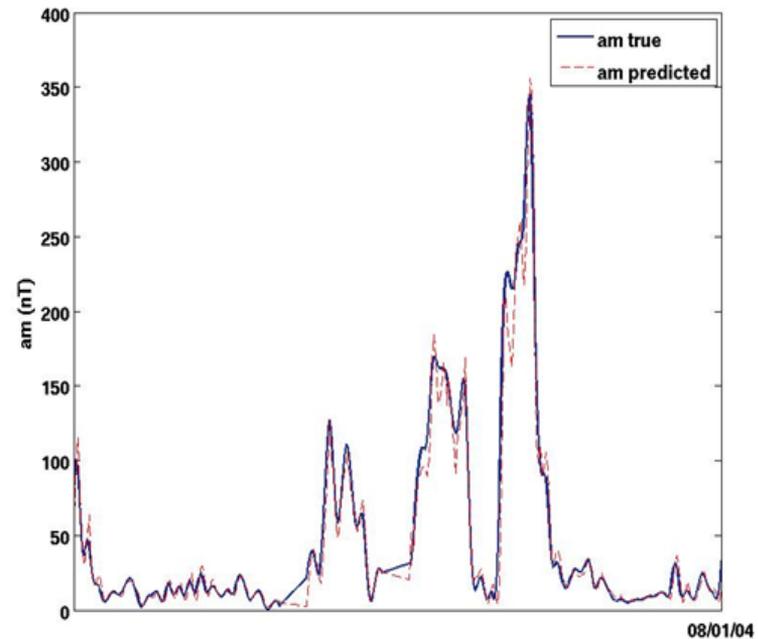
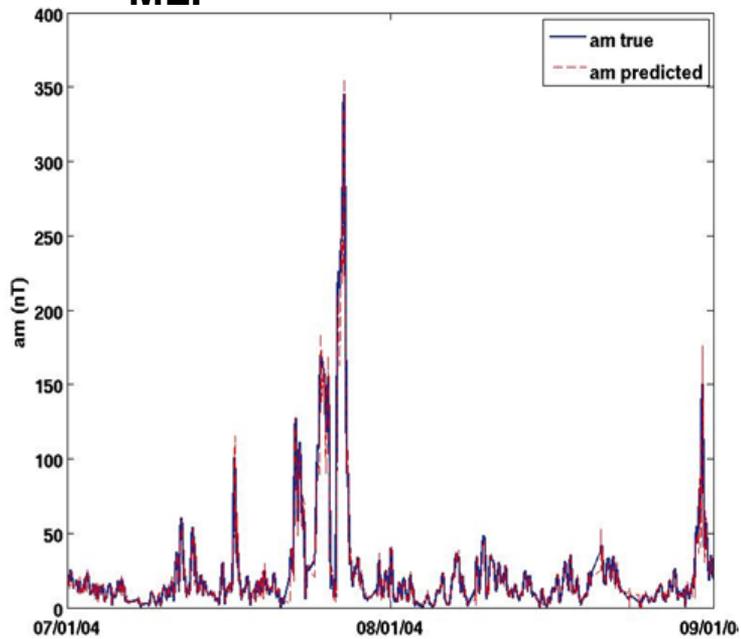
MLP



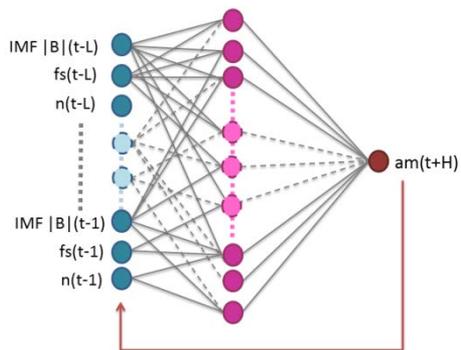
TDNN



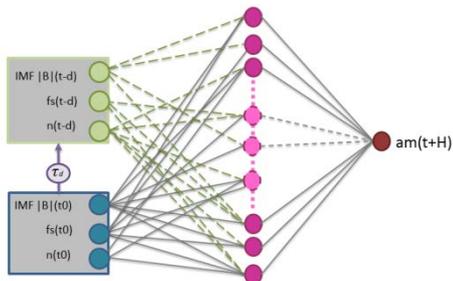
NARX



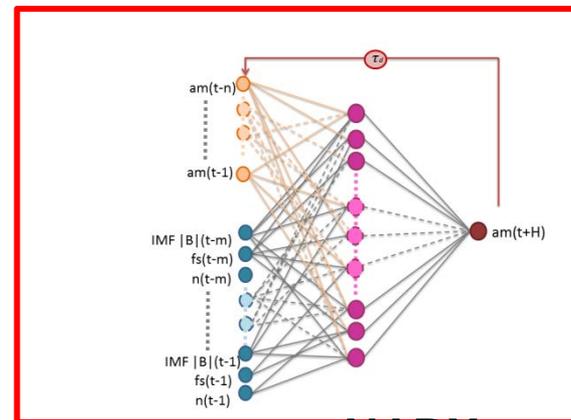
# Test sur un cas d'événement extrême



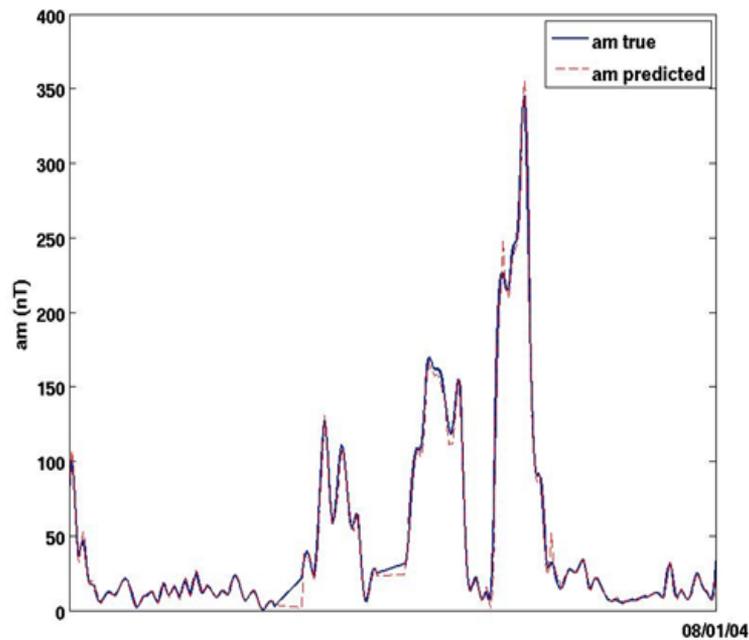
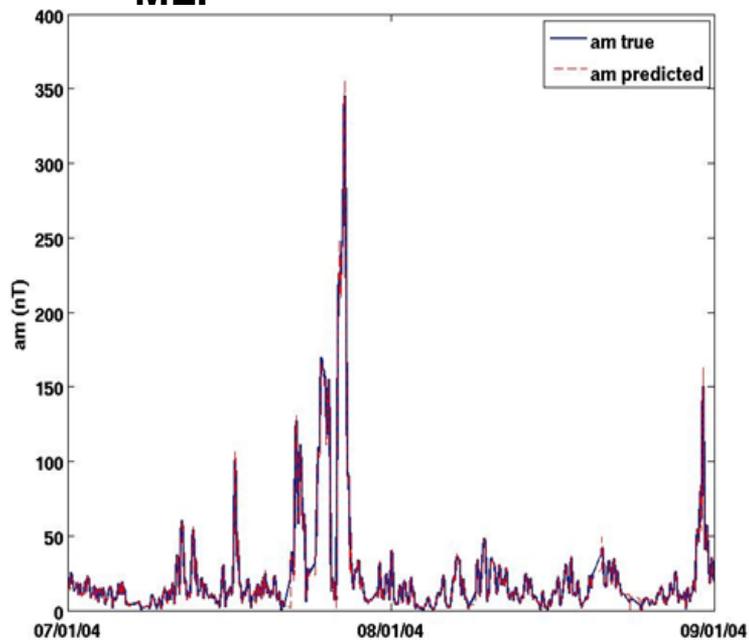
**MLP**



**TDNN**



**NARX**





- ✓ Prise en main rapide
- ✓ Limiteurs inclus automatiquement
- ✓ Toolbox unique

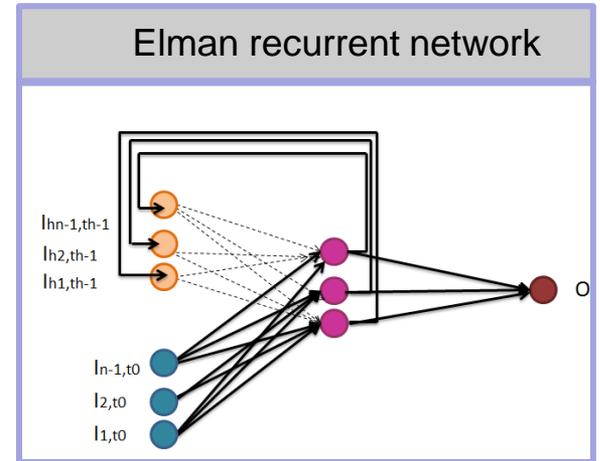
- ✓ Visibilité totale sur le réseau
- ✓ Gratuit donc échanges et communications aisés avec la communauté



- ✓ Manque de visibilité sur le cœur du réseau
- ✓ Payant donc compliqué d'échanger avec la communauté

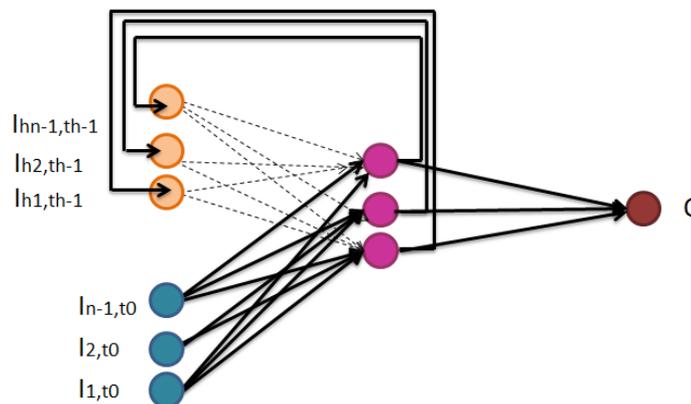
- ✓ Grand nombre de bibliothèques associées aux réseaux de neurones
- ✓ Pas de limiteurs automatiques donc développement du réseau plus complexe



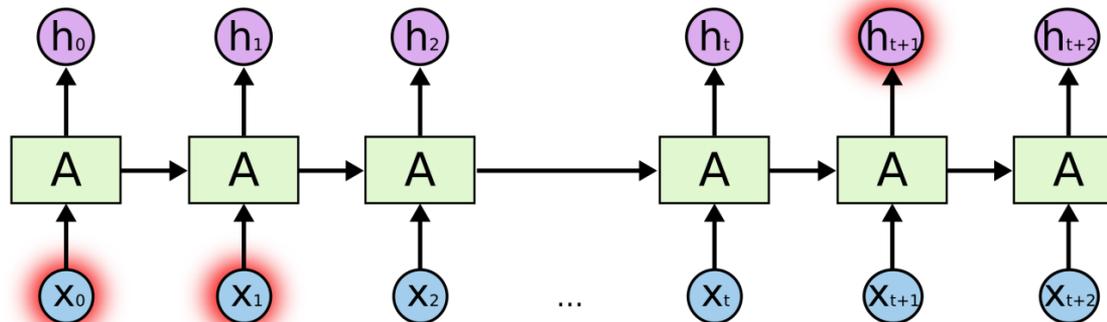


Les neurones de la couche de contexte mémorisent l'activité des neurones cachés, à l'instant précédent.

- Les réseaux récurrents (RNN) ont la capacité de faire persister l'information
- Apparus en 1990 avec les travaux d'Elman



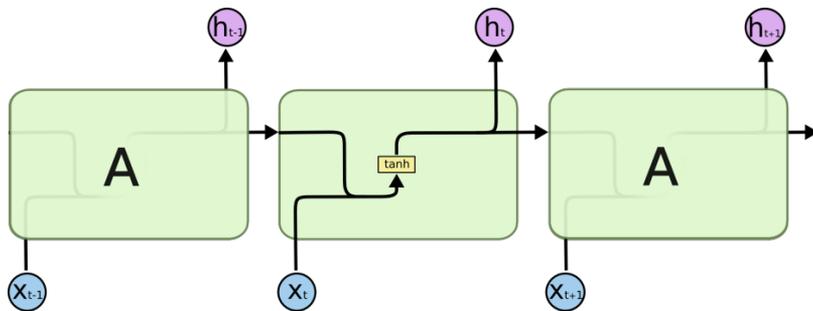
- Connectent informations des instants précédents aux instants actuels  
→ Possible tant que l'écart temporel entre l'information nécessaire et le temps requis en terme d'historique n'est pas trop important



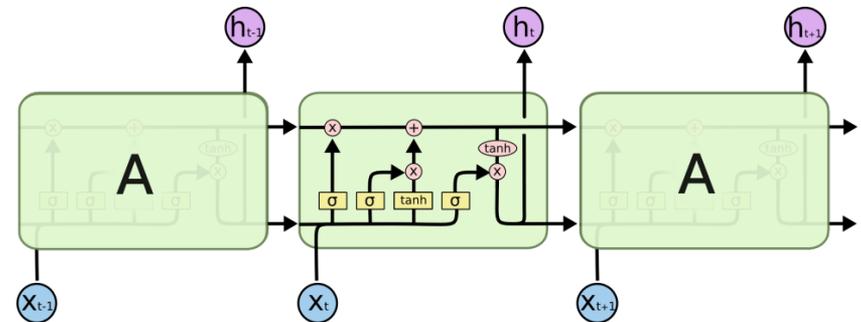
- $X$  : input
- $A$  : neurone
- $h$  : output

# Les réseaux récurrents LSTM

- Les RNN Long Short Term Memory sont capables d'apprendre des dépendances à long termes
- Développés en 1997 par Hochreiter et Schmidhuber
- RNN : chaine de modules répétant des NN



RNN standard : module de répétition a une structure très simple (une seule couche tangente hyperbolique)

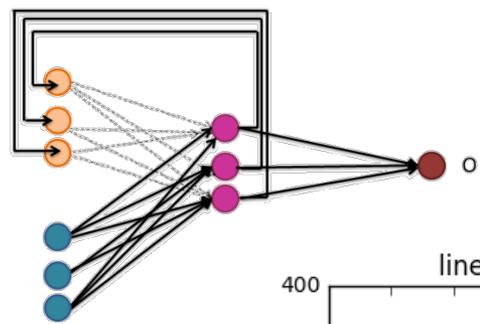


RNN LSTM : le module de répétition a 4 couches interagissant entre elles

# Le réseau récurrent LSTM - Test sur événement extrême

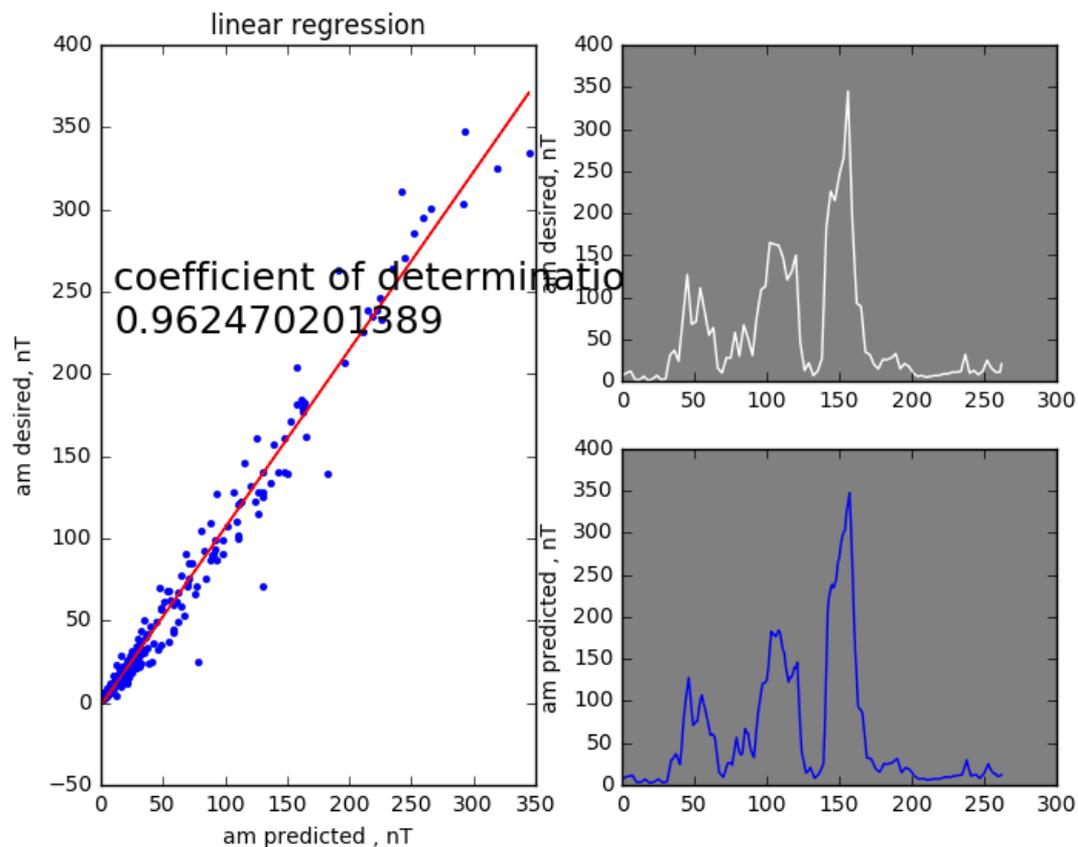
## Paramètres d'entrée

Paramètres du vent solaire avec un historique de 12 heures (B, Bz, v et d) avec les données ACE



## Sortie

Indice magnétique am calculé à 1h



# NOAA space weather prediction center



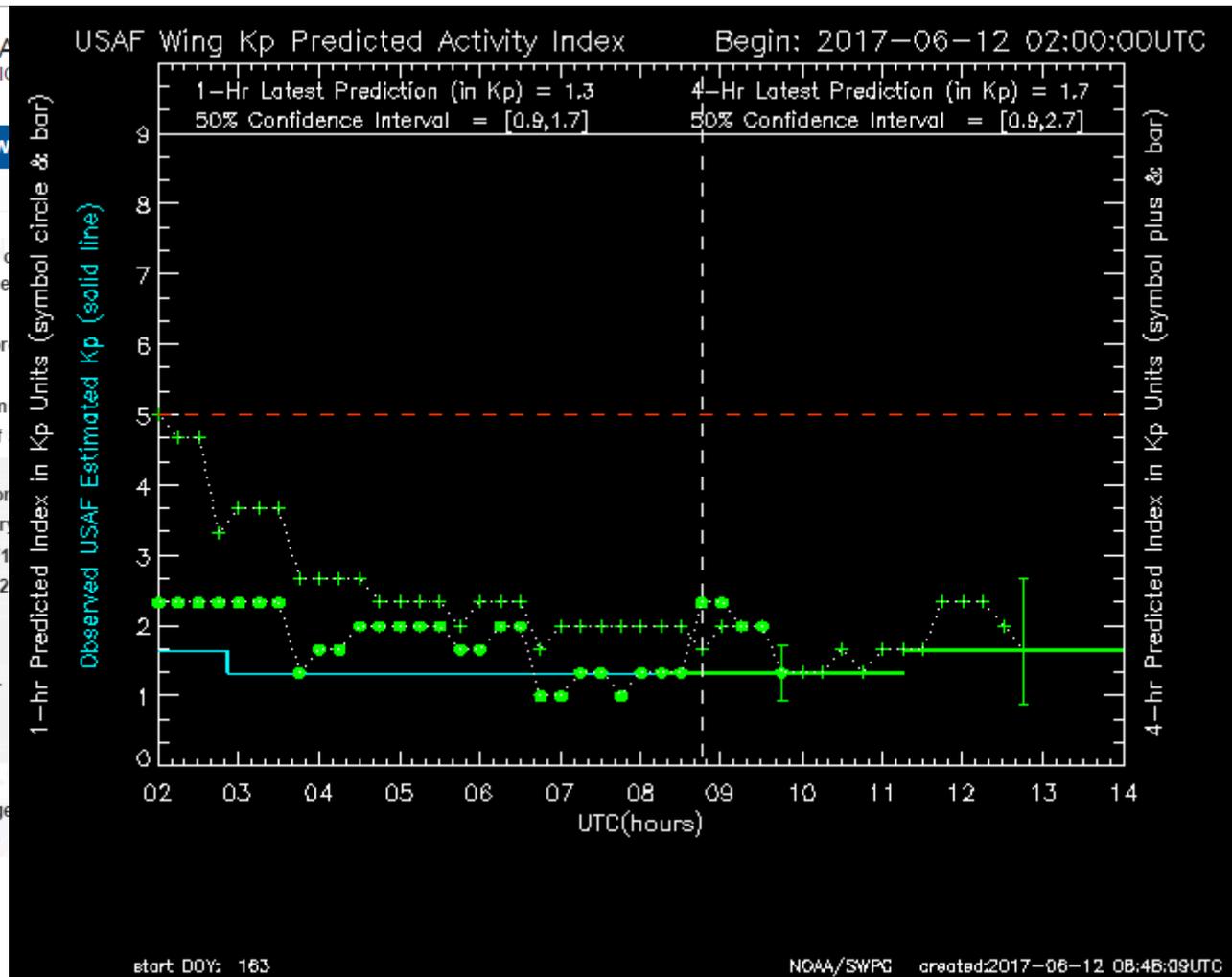
HOME ABOUT SPACE WEATHER

**FORECASTS**

- 27-Day Outlook of 10.7 cm Radio Flux
- Geomagnetic Indices
- 3-Day Forecast
- 3-Day Geomagnetic Forecast
- Forecast Discussion
- Predicted Sunspot Number
- Report and Forecast of Solar Activity
- Solar Cycle Progression
- Space Weather Advisory
- USAF 45-Day Ap and F10.7
- Weekly Highlights and 2

**OBSERVATIONS**

- Boulder Magnetometer
- GOES Electron Flux
- GOES Magnetometer
- GOES Proton Flux
- GOES Solar X-ray Image
- GOES X-ray Flux



day, June 12, 2017 09:01:33 UTC

Search

Next

Noon 10.7cm Radio Flux: 74 stu

09 UTC due to an observed SSB

017

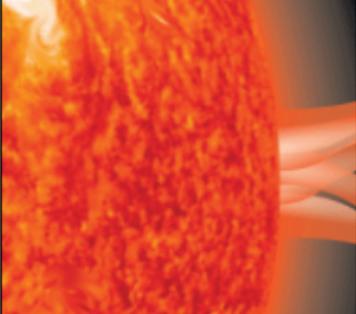
processing system beginning at

cast

lots of Geospace model derived

Wing, S., J. R. Johnson, J. Jen, C. I. Meng, D. G. Sibeck, K. Bechtold, J. Freeman, K. Costello, M. Balikhin and K. Takahashi (2005), Kp forecast models, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110

# PROGRESS

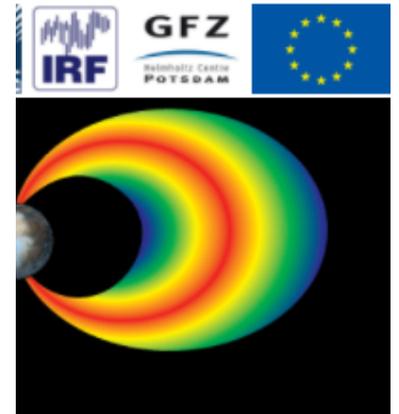
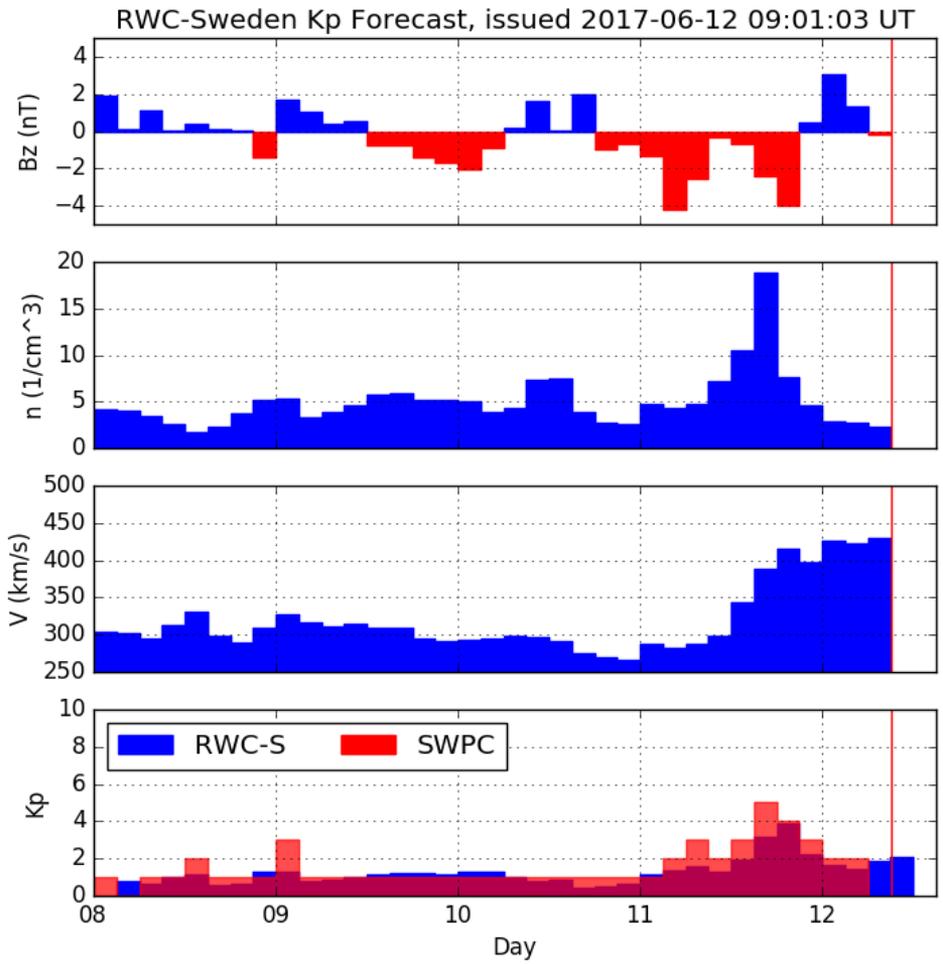



Home Overview

## Results

- Geomagnetic indices [+]
- Electron Flux forecasts [+]
- Statistical wave models

Sign in



## Current Conditions

Time: 2017-06-12 08:15:11 UTC

Magnetosphere	Current Forecast
Bz (nT)	3
p	0.3
Solar wind	Current Forecast
V (nT)	8.3
z (nT gsm)	-0.8
ensity (cm <sup>-3</sup> )	2.6
elocity (kms <sup>-1</sup> )	416.3

Boberg, F., P. Wintoft, and H. Lundstedt (2000), Real time Kp predictions from solar wind data using neural networks, *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 25(4), 275-280.

Merci pour votre attention !



*Vue depuis la Station Spatiale Internationale*