

Illustration de la sensibilité des débits au climat

Usage conjoint d'un réseau neuronal simple et d'analyse en composantes curvilignes

Etienne Leblois, UR RiverLy, INRAE, Lyon, France (etienne.leblois@inrae.fr ; aussi [@free.fr](https://www.free.fr))

Jenny Sjøstad Hagen, Universitet i Bergen, Norway

Lydie Sichoix, UPF, Tahiti

Colloque SHF Eau & IA, Grenoble, 4-6 mars 2026



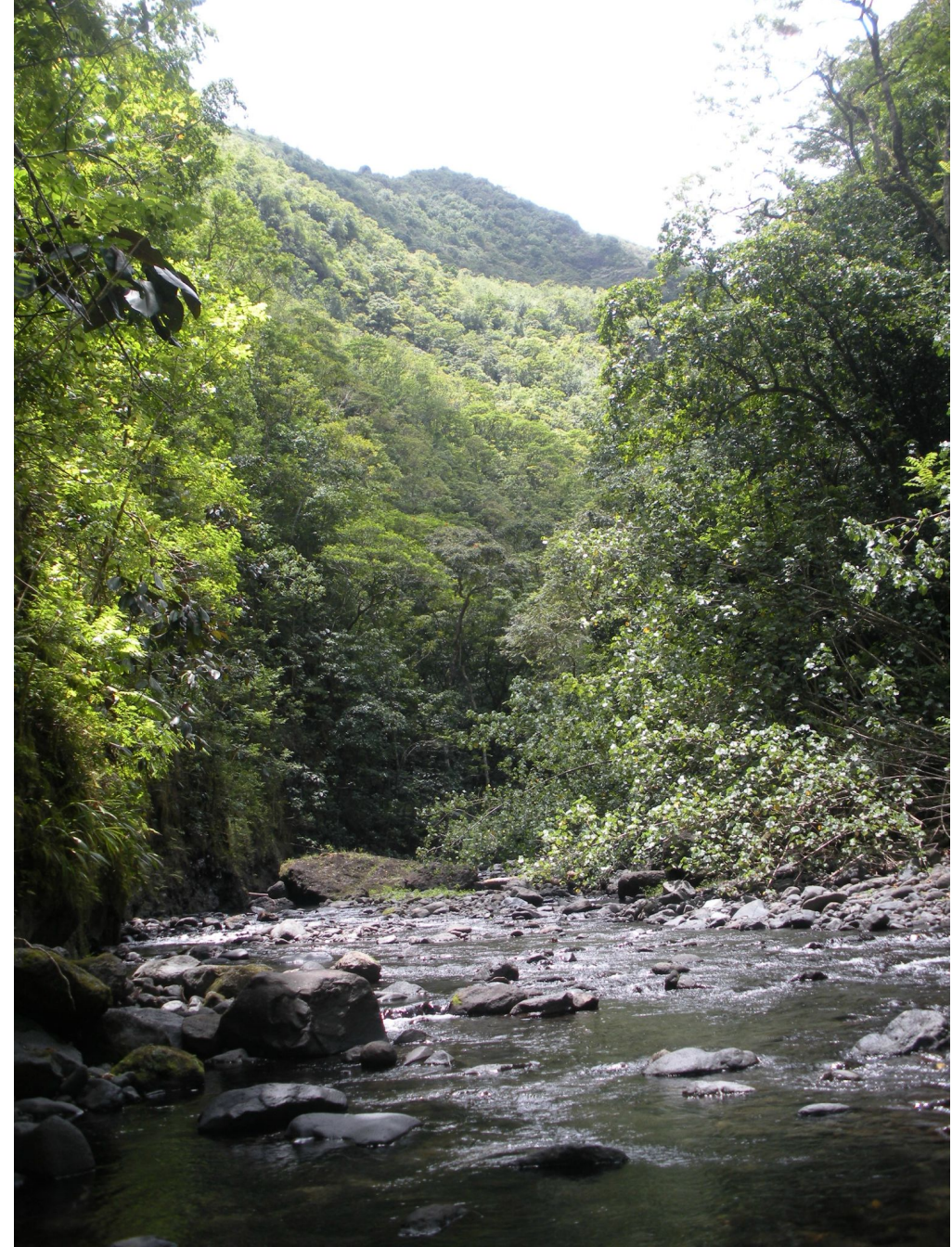
L'hydrologie en raccourci

Le bassin est stimulé par la météorologie (eau, énergie) et la transforme. L'eau en excès forme le débit dans les rivières



Norvège

En détail,
importance
variable de
divers
processus



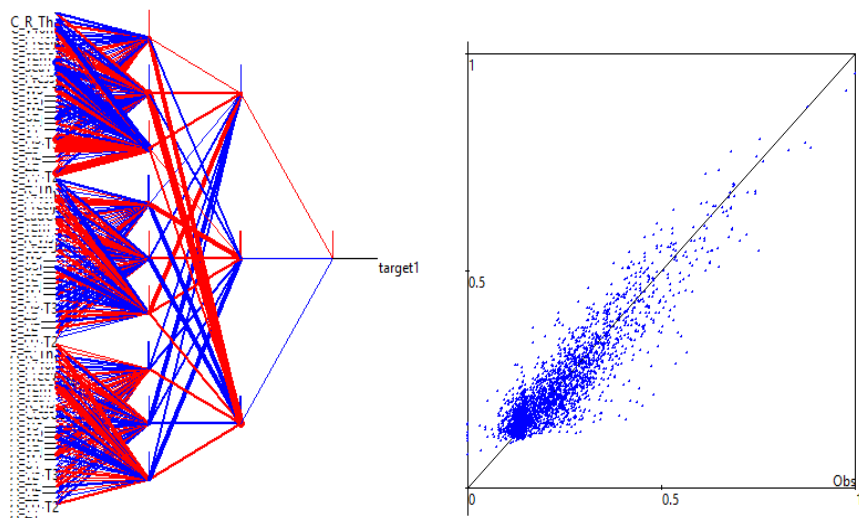
Polynésie

Reconstitution de débit à partir de la réanalyse atmosphérique -Sélection des données d'entrée

- Donnée atmosphérique : ERA5
- Sélection de données possiblement pertinentes au sein d'une famille candidate
 - 1 profil vertical (lat, lon) *[attendu 'en amont' du bassin]*
 - 3 niveaux *[documentant notamment la stabilité verticale]*
 - 3 horizons temporels du passé , 6 = 3*2 paramètres (durée, décalage)
[documentant les temps de réponse du bassin]
- Données de base :
 - Z, HR, T (thermo) ; U, V, W (dynamique) à chaque niveau
 - quelques intégrales et variables de surface (T2m, MSLP, SW, Tcw, ...).
[documentant les flux d'humidité et le bilan d'énergie]
- 11 paramètres à optimiser => 'meilleures' données d'entrée
- Optimisation basée sur R^2 de régression linéaire de reconstitution de Q(data)

- Ensuite on passe à un réseau neuronal simple (MLP 87-15-5-1)
- Le réseau doit faire mieux que la régression linéaire, qu'il contient
- L'amélioration $R^2_{\text{MLP}} - R^2_{\text{LIN}}$ varie souvent
les grands bassins plus linéaires, plus mous...
selon les processus dominants... (?)

Ici un exemple



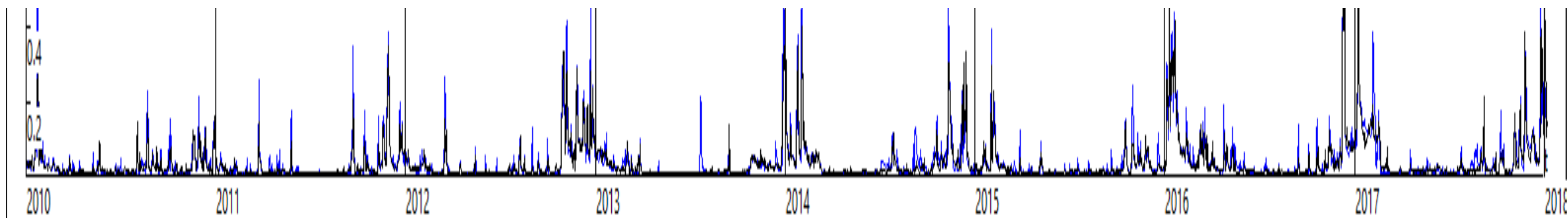
Usage possible d'outils standards (Keras/Tensorflow...)

Parfois codes maison (artisanat de compréhension et contrôle)

Ici réduction préalable à 3 neurones par fenêtre temporelle, pour diminuer la paramétrisation (une idée de délégation démocratique)

Souvent nous normalisons quelque peu les données

Entrées $[0-1]$, linéaire ; débit par $(Q/Q_{\max})^{0.4} \leq \text{EL's choice}$



Qu'est-ce que le réseau retranscrit ?

Calcul de **dérivée partielle pour chaque variable d'entrée**

$$dQ/dX_j = 1/n * \sum (RN(x + \varepsilon_j) - RN(x)) / \varepsilon$$

$\varepsilon_j = \varepsilon (0, 0, 0, 1, 0, 0 \dots 0)$, autrement dit ε pour la variable j

$$dQ/dX_{i,j} - (dQ/dX_i + dQ/dX_j)$$

positif si effet non linéaire (synergie)

Ad-hoc, infra à l'état de l'art... mais on voit des choses.

En Norvège (climat océanique froid), influence positive sur le débit

- de trois mois précédents modérément froid

L'air océanique humide forme un manteau neigeux, de l'air arctique serait trop sec.

- de beaucoup d'ensoleillement les dernières semaines
- de pluies et un flux d'air chaud le jour même, éventuellement

À Tahiti (climat tropical), le facteur dominant est la pluie

- deux mois pluvieux avant !
- deux semaines pluvieuses avant !
- deux jours pluvieux avant !

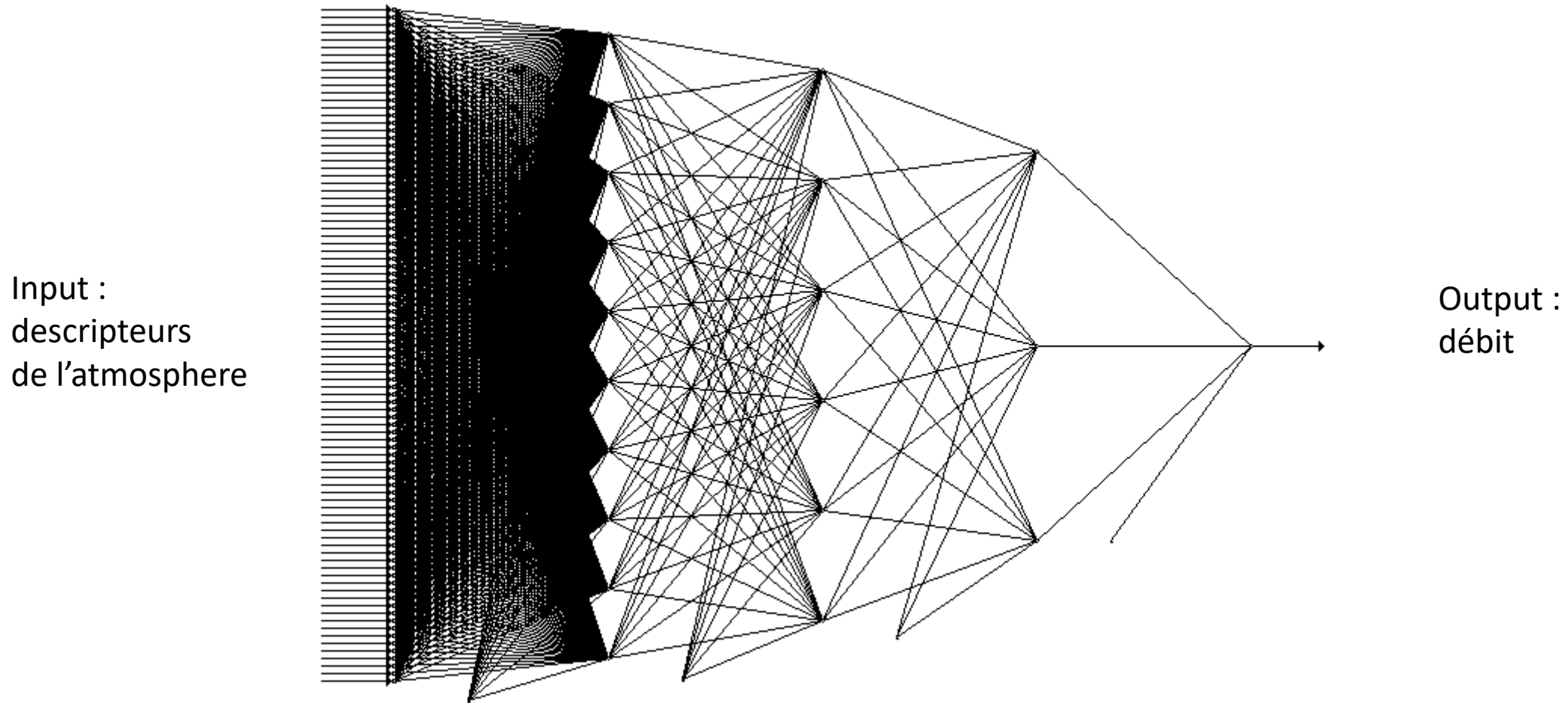
Tous les horizons sont nécessaires ; compensation difficilement possible (bassins très perméables).

Histoires complexes qui sont

1/ spécifiques à chaque cas, mais validables par le thématicien

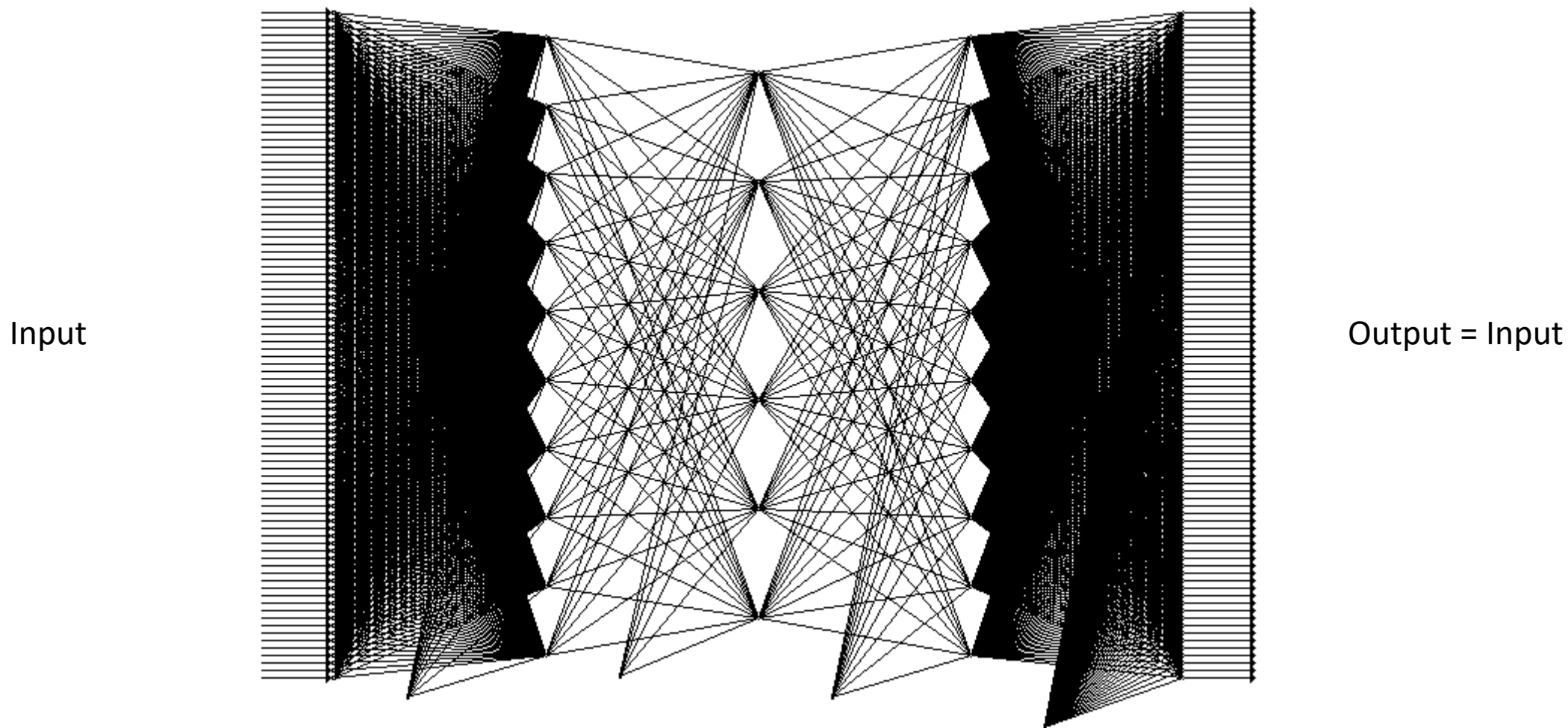
2/ non linéaires : effets organisés en séquence temporelle, et dépendants : un RN peut exprimer cela.

Circulation de l'information dans un réseau

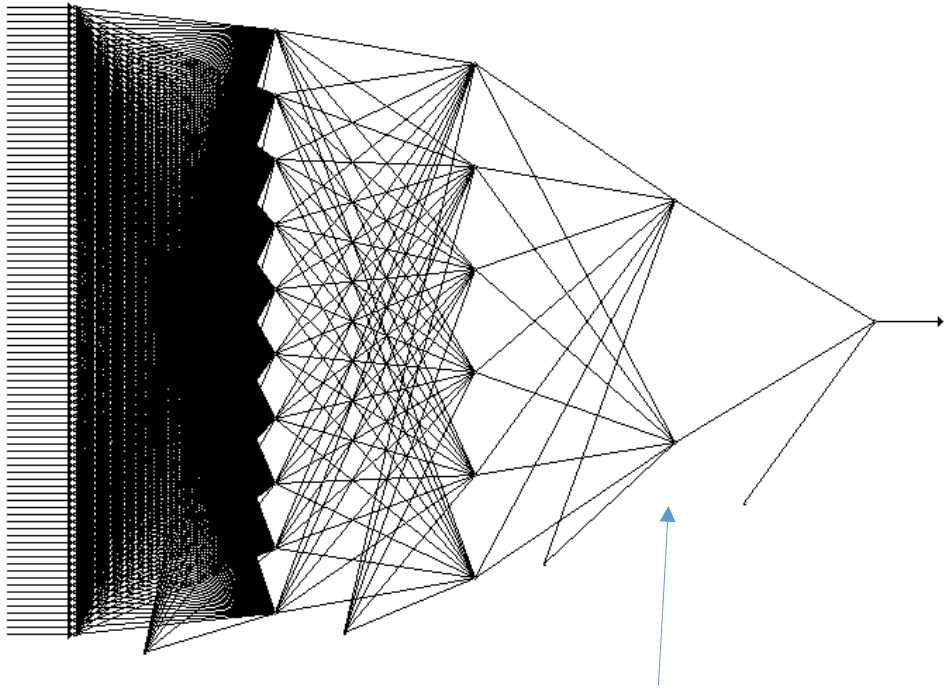


L'information circule de gauche à droite *selon ce qui est pertinent pour reconstruire le débit*

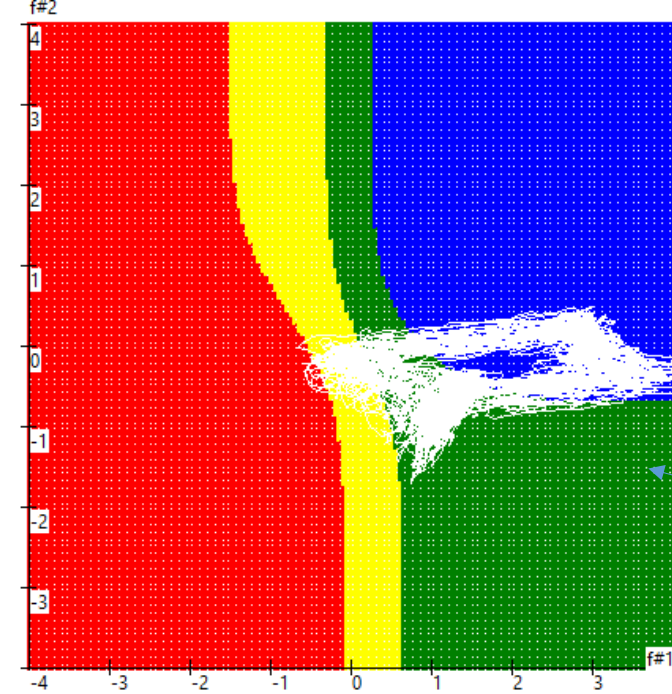
Très différent des autoencodeurs,
qui condensent l'information sans objectif particulier



Peut-on voir ce que le réseau fait ?
Cas d'une couche de 2 neurones



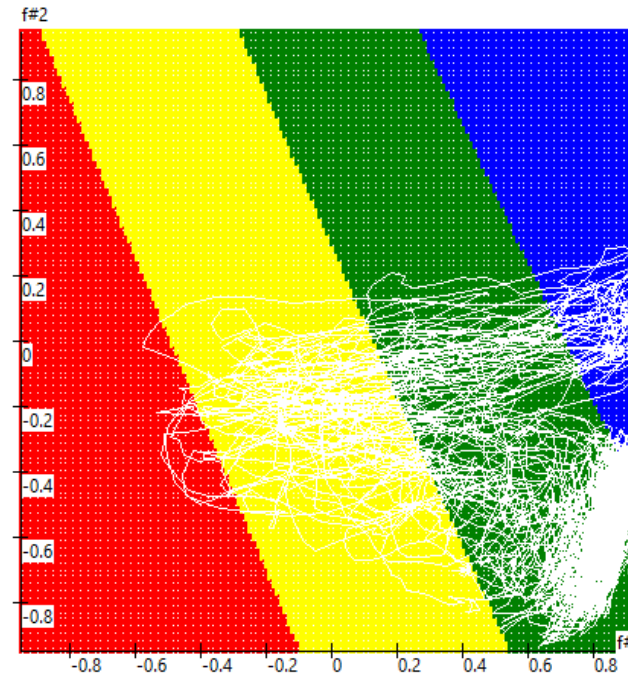
Ici on peut lire les entrées et activations



En blanc la trajectoire
du système

Axes : entrées sur
la couche à 2 neurones

Arrière plan : le débit



Axes :

activations
en sortie de la
même couche

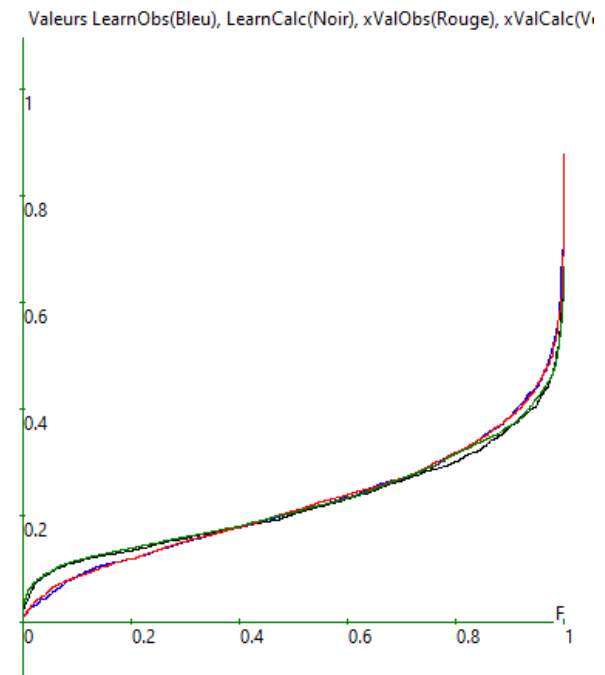
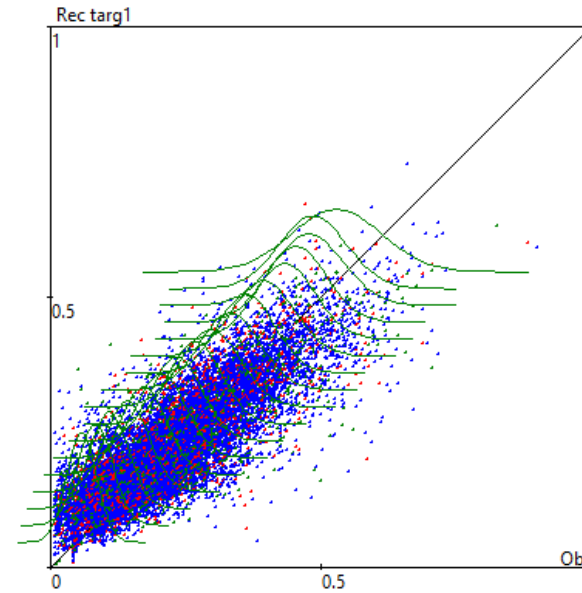
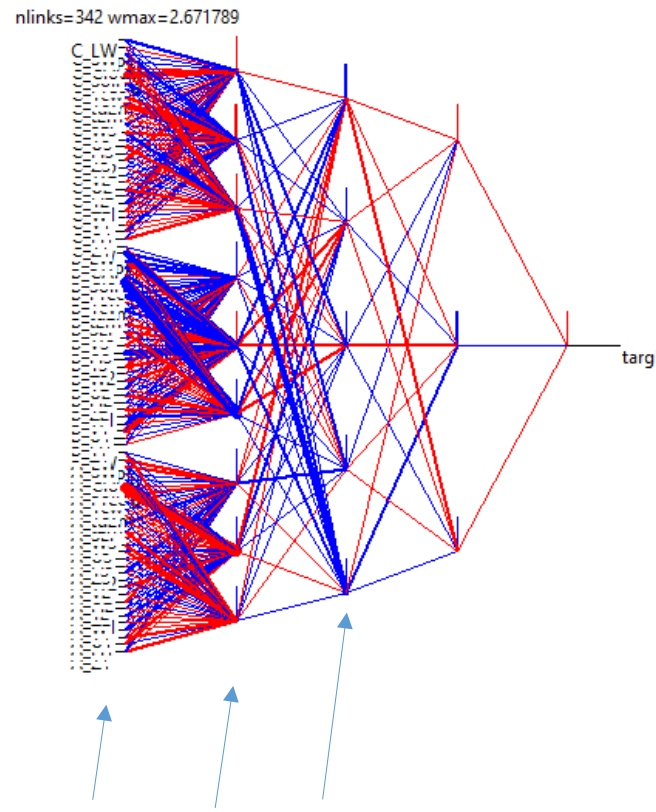
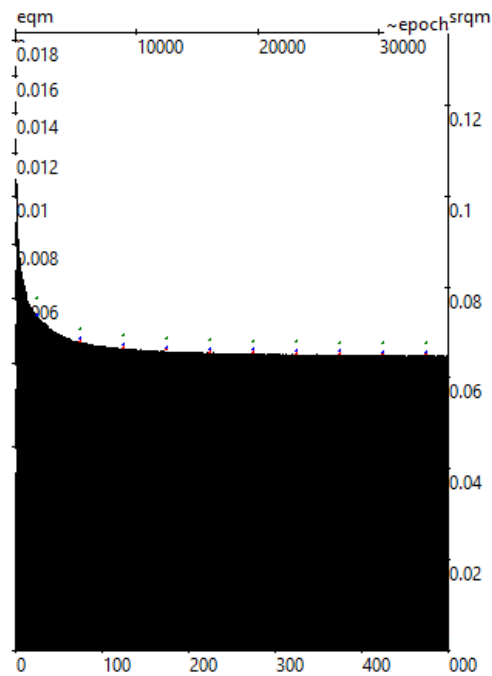
Arrière plan : le débit

Que faire pour percevoir un état à plus de deux ddl ?

Réseau 3*(29=>3)-5-3-1

QQ-plot

distributions



Ici l'ajustement est correct, sans plus ; nous ne voudrions donc pas créer de goulot d'étranglement !
Nous voulons au demeurant pouvoir « lire » l'entrée (87 ddl), ou bien la couche à 9 ou à 5 neurones.

Réduction dimensionnelle par Analyse en Composantes Curvilignes (engl. CCA)

X_{ij} : distances d'origine (87d, 15d, 5d...)

Calculées une fois pour toutes

Y_{ij} : distances de projection (2D)

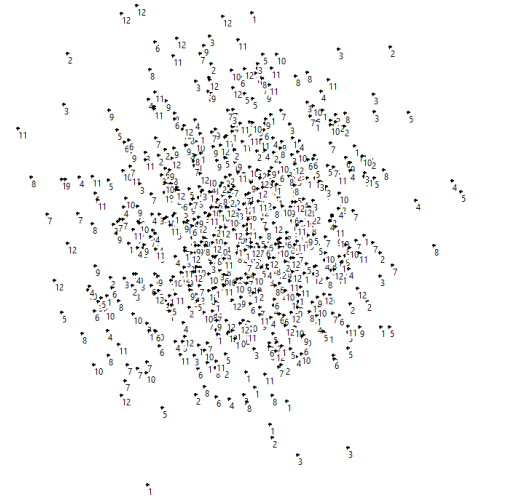
Ceci se fait par minimisation itérative de

$$E = \sum_i \sum_{j < i} F(Y_{ij}) * (X_{ij} - Y_{ij})^2$$

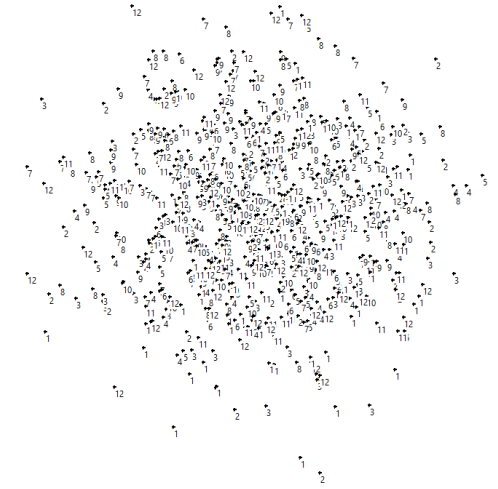
E est une métrique (de distorsion)

F(h) est une
pondération positive décroissante avec h,
ceci favorise le respect des petites distances

« Ecrasement dans l'espace de projection »



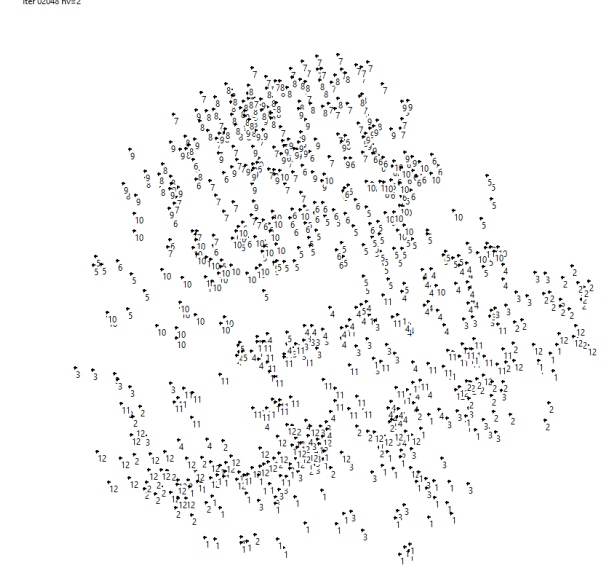
iter
1



iter
32



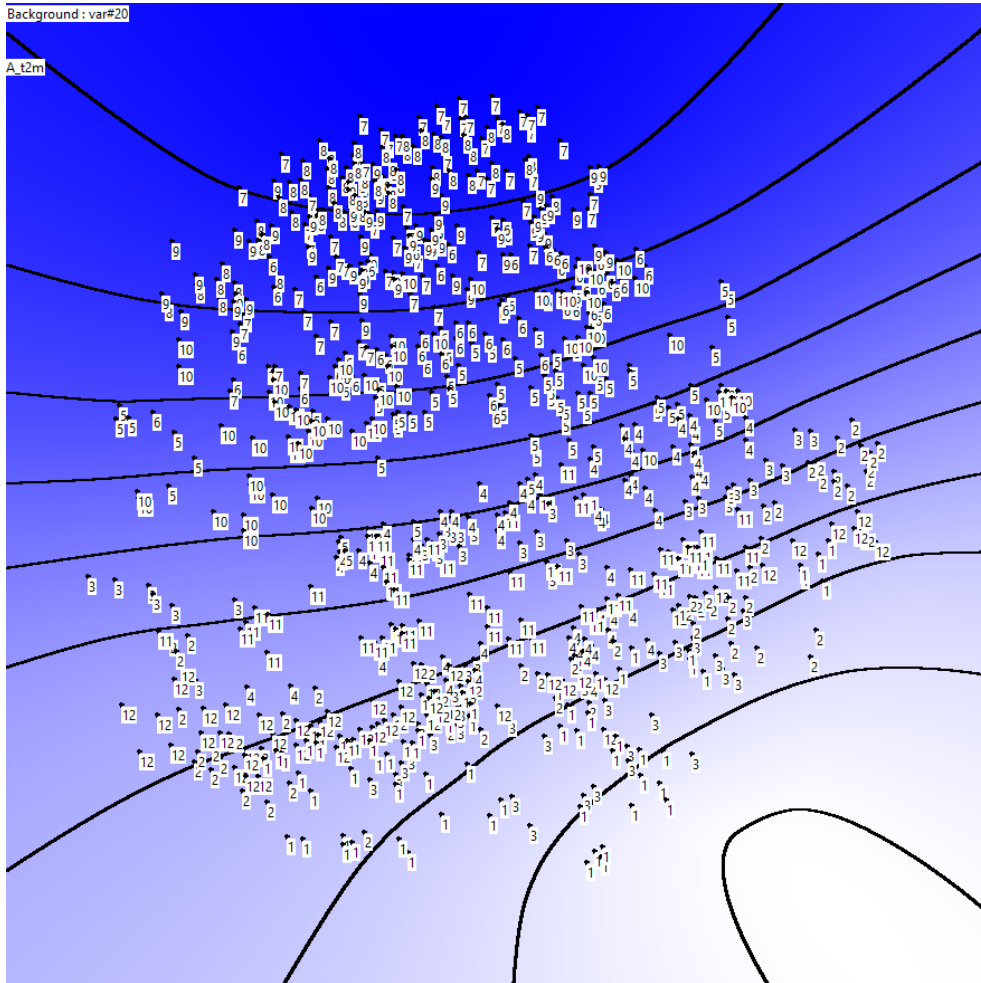
iter
128



iter
2048

Lien entre variables d'état et plan d'ACC ?

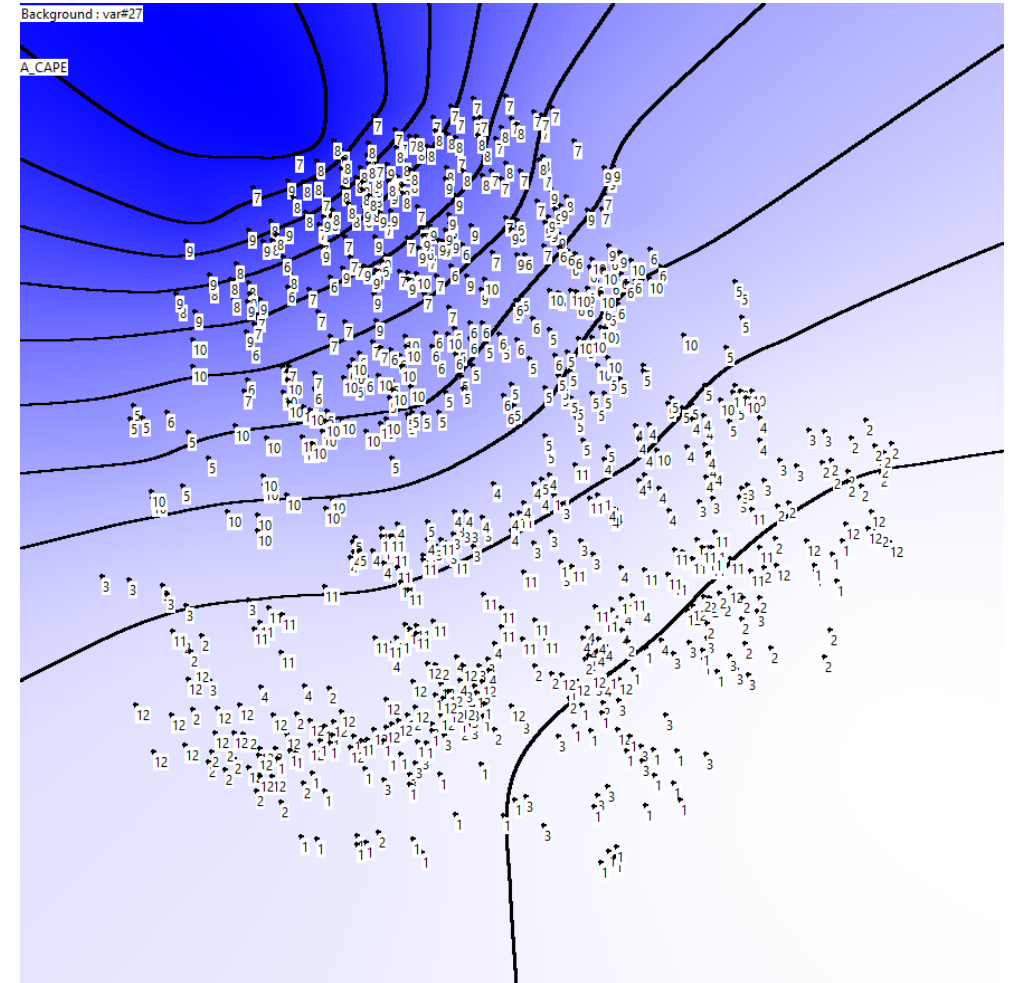
En associant aux points projetés une variable d'intérêt, on peut en « interpoler » un arrière plan

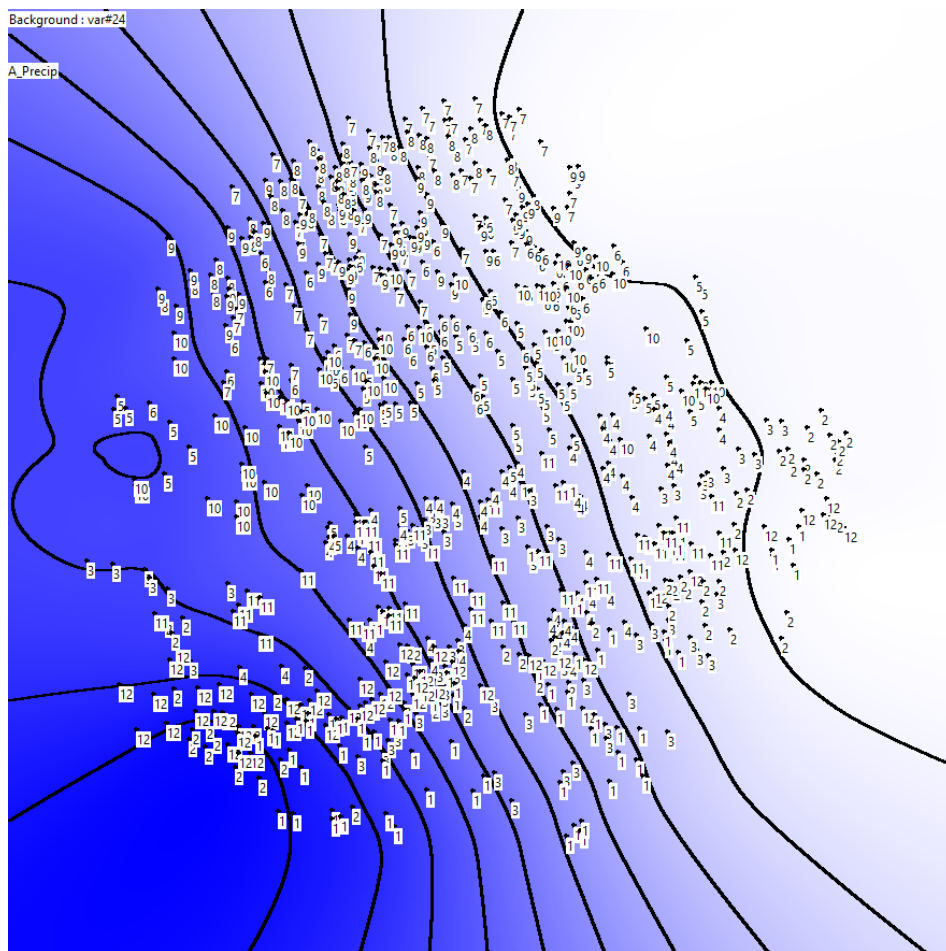


< T2m

CAPE >

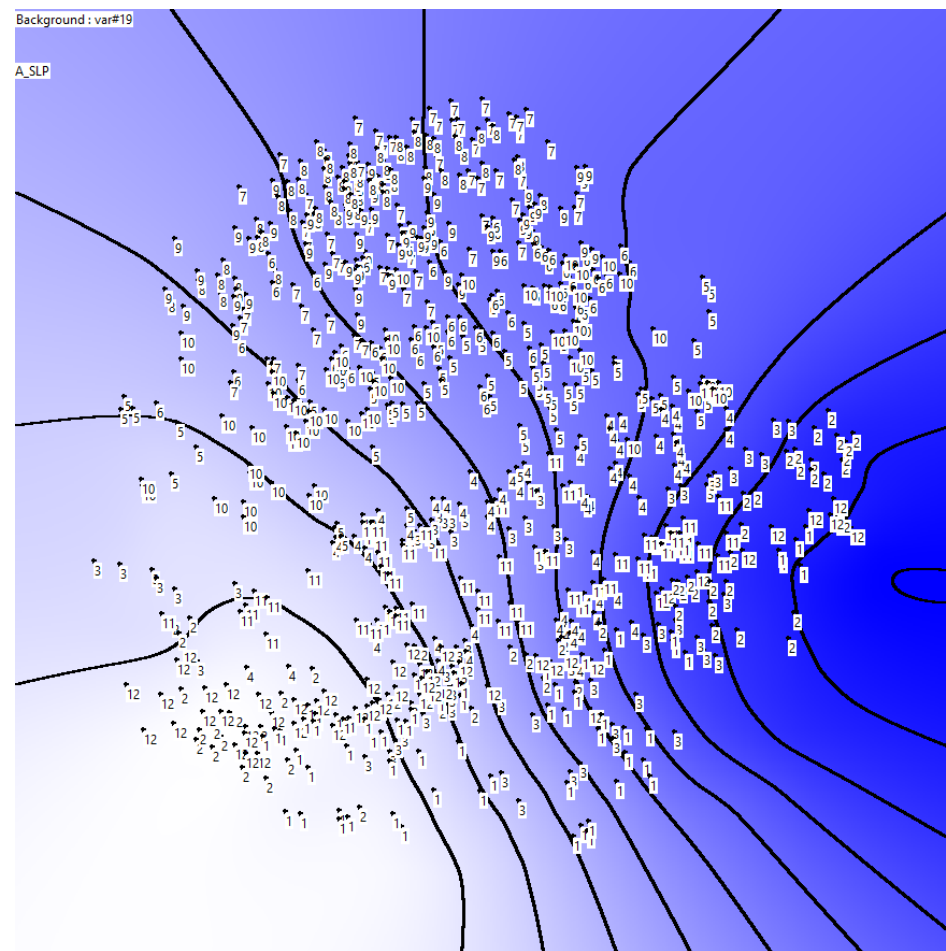
*points
étiquetés
par le mois*





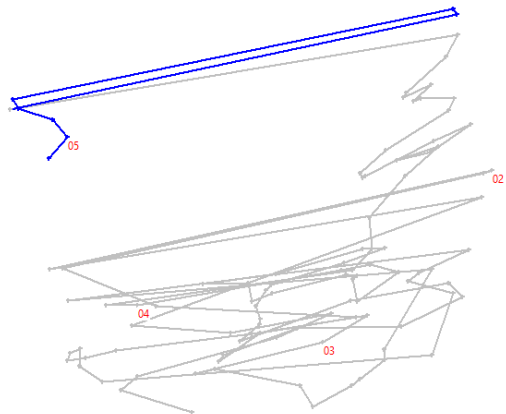
< Précipitation

Pression >

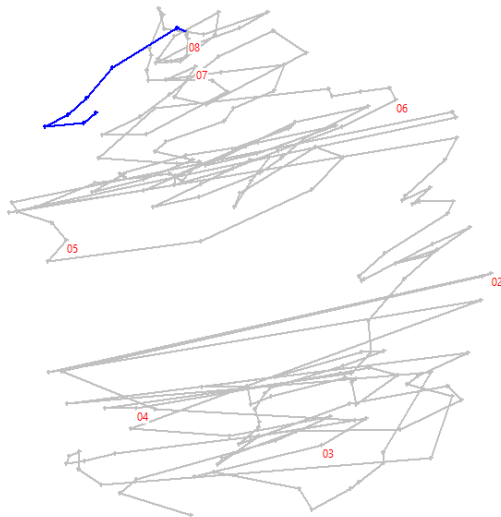


Remarque : représentation interprétative, n'impactant pas le fonctionnement du réseau

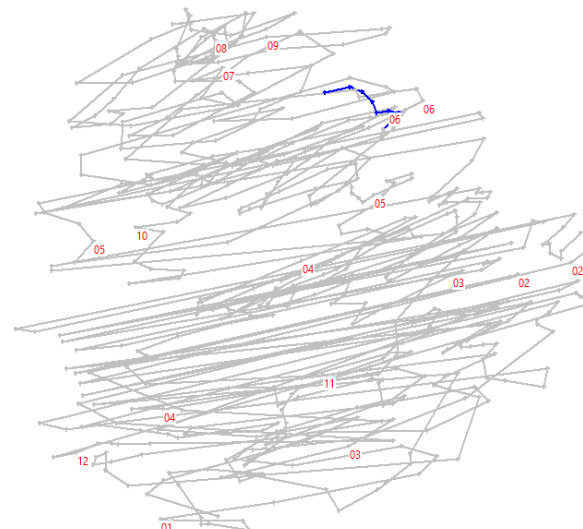
16/05/1958



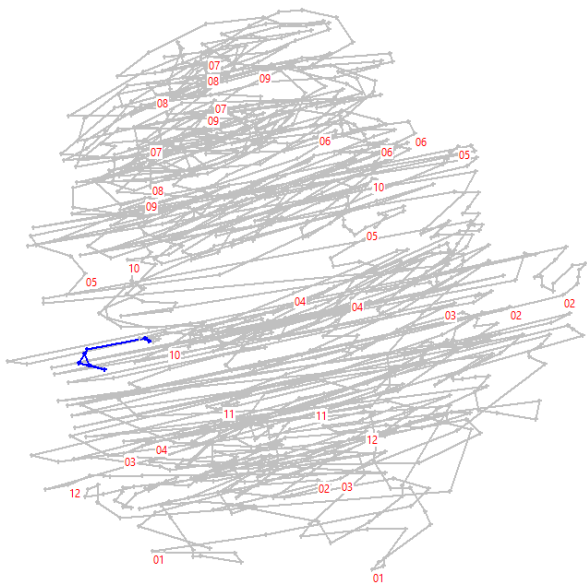
24/08/1958



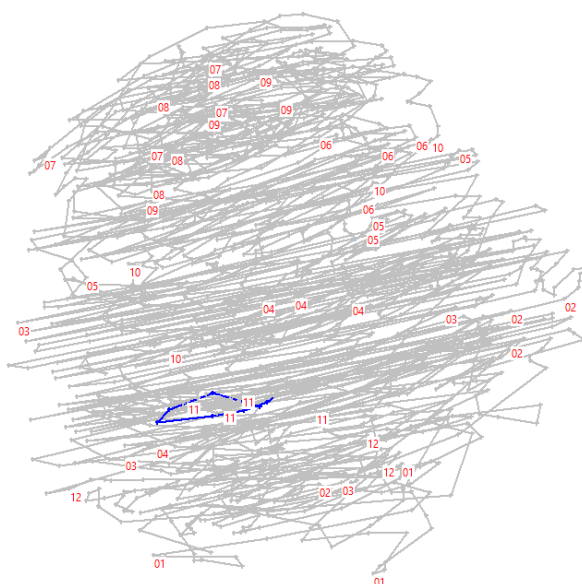
20/06/1959



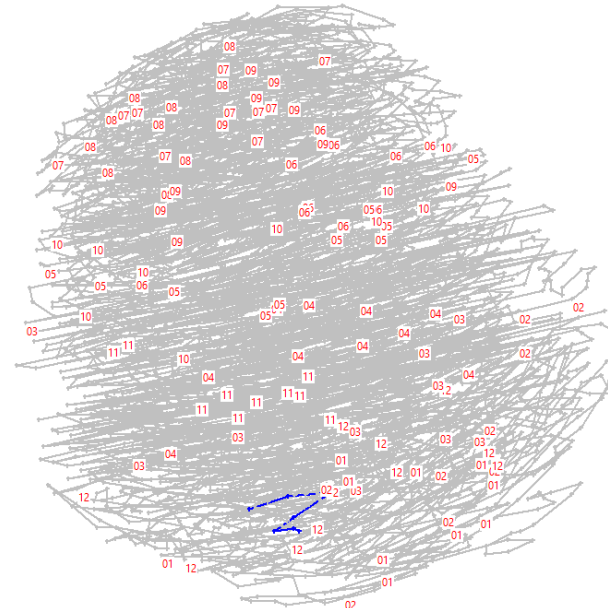
01/11/1960



06/12/1961



13/02/1968



Ici la trajectoire que se construit sur 3 mois, 6 mois, 18 mois, 4 ans, 10 ans ...

Conclusions ?

En conditions contrôlées, les petits réseaux (MLP) fonctionnent bien

Diagnostics et visualisation associées permettent d'illustrer la sensibilité du système, compatible avec le sens physique de l'hydrologue.

La pertinence opérationnelle des réseaux semble essentiellement due à leur non-linéarité (encodage de dépendances entre processus) et leur capacité à exploiter des infos proxies (pas seulement P et T). Sinon c'est comme un 'modèle global'.

En reconstruction de débit,

- les données d'entrée doivent être présélectionnées (paramétrisation, au sein des données, d'un espace de recherche admissible)
- les réseaux doivent rester de petite taille (pas de réseaux profonds) car le nombre de répliques (données) sur un bassin est faible.

Moyennant quoi, les réseaux neuronaux restent sous contrôle scientifique et peuvent être utilement intégrés à la boîte à outils.