



## **Anecdotes de modèles pragmatiques**

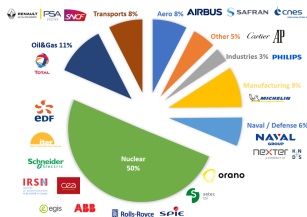
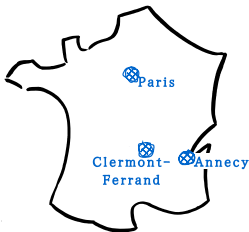
3 février 2026

Sylvain Girard (girard@phimeca.com)

# Phimeca, entreprise à mission

**2021** : 20 ans après sa création, Phimeca inscrit dans ses statuts cette **Raison d'être** :



*« Construire ensemble, par une ingénierie innovante, une industrie respectueuse de l'Homme et de son environnement. »*



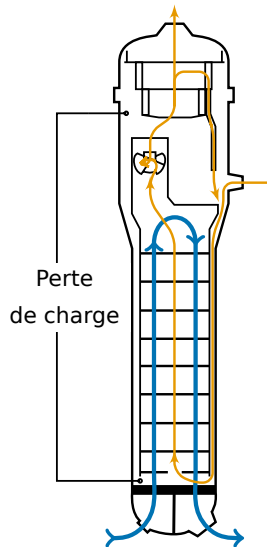
*« On collabore pour **faire**, on coopère pour **savoir** »* ~ Laurent (2018).

# Anecdote de modèles pragmatiques

- ▶ Que peut-on attendre, **en pratique**, des modèles ?
- ▶ Qui peut **utiliser** un modèle ? À quelle condition ?
- ▶ Pourquoi certains problèmes d'ingénierie restent ouverts **pendant des décennies** ?

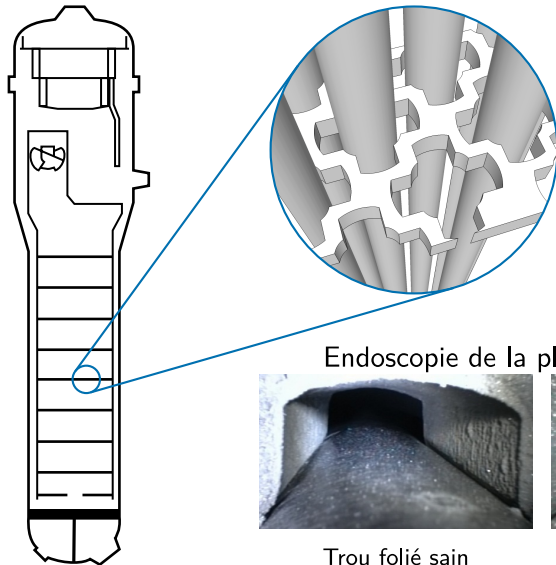
Je vous propose des  *éléments de réponse* en passant les premiers 3/8<sup>ème</sup> de ma carrière scientifique au crible de  **lectures**.

# Anecdote 1 : Colmatage des générateurs de vapeur





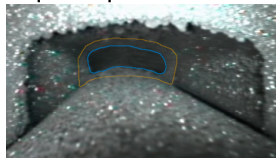
# Le colmatage obstrue le passage de la vapeur



Endoscopie de la plaque supérieure :

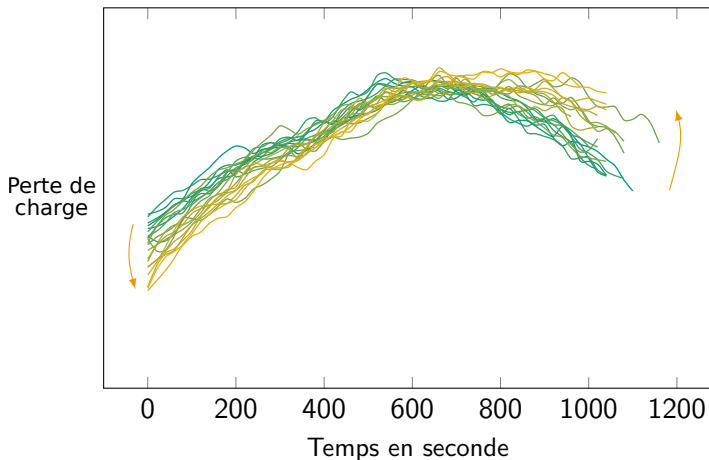


Trou folié sain



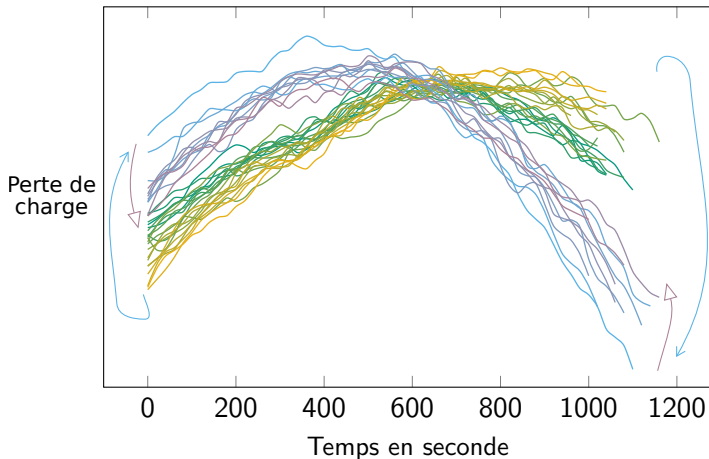
Trou folié colmaté

# Le colmatage perturbe la réponse dynamique



↗ : évolution avant nettoyage chimique

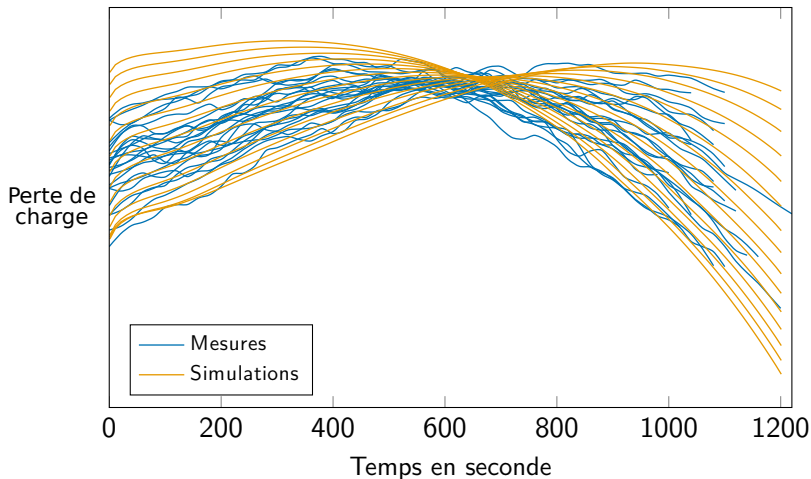
# Le colmatage perturbe la réponse dynamique



↗ : nettoyage chimique

↘ : évolution après nettoyage chimique

# Un modèle articule ces observations



Programmé en Modelica avec ThermoSysPro   <https://thermosyspro.com>.



## Définition constructiviste d'un modèle

---

Un **Modèle** est un raisonnement motivé par une intention, rendant compte de façon cohérente d'observations ou d'idées.

---

- ▶ Un modèle est **transcrit** dans des langages  $\leadsto$  Dowek (2019).
- ▶ Comment **réfuter** un modèle ?
- ▶ Éviction du terme « **réalité** »

$\leadsto$  « *No word ever has exactly the same meaning twice* » (Hayakawa 1974).

$\leadsto$  « Le rêve de la réalité : H. Von Foerster et le constructivisme » (Segal 1990).

# Réfuter un modèle, vu comme une argumentation

Pour l'ingénieur·e l'intention est une souvent une **décision**.

## Argument déductif

$P_1$  : Tous les hommes sont mortels.

$P_2$  : Socrate est un homme.

C : Donc Socrate est mortel.

# Réfuter un modèle, vu comme une argumentation

Pour l'ingénieur·e l'intention est une souvent une **décision**.

## Argument déductif

$P_1$  : Tous les hommes sont mortels.

$P_2$  : Socrate est un homme.

$C$  : Donc Socrate est mortel.

## Argument inductif

$P_{1,2,3}$  : Il fait lourd, le ciel est sombre, les hirondelles volent bas.

$P'_{1,2,3}$  : Quand il fait lourd etc. un orage éclate **souvent**.

$C$  : Donc un orage va **probablement** éclater.

L'argument inductif n'est pas **conclusif**  $\leadsto$  Vuille (2024)...  
mais indispensable.

# Logique et probabilité : les maths de « l'entre-deux »

Soit  $n \in \mathbb{N}$

- ▶ A : «  $n$  est multiple de 9 »
- ▶ B : «  $n$  est multiple de 3 »

Si A est vraie, alors B aussi :  $A \implies B$

Que dire de A si B est vraie ?



# Logique et probabilité : les maths de « l'entre-deux »

Soit  $n \in \mathbb{N}$

- ▶ A : «  $n$  est multiple de 9 »
- ▶ B : «  $n$  est multiple de 3 »

Si A est vraie, alors B aussi :  $A \implies B$

Que dire de A si B est vraie ?

« Une probabilité est un nombre entre 0 et 1 » :  
indispensable à tout modèle utilisant des arguments inductifs.



## Éviction du terme « réalité »



« En fait, il n'y a pas, il ne saurait y avoir, de *probabilité en soi*. Il n'y a que des modèles probabilistes » ~ Matheron (1978).



« Je sais très bien que cet aveu suffira déjà à m'attirer les coups [...] de mes collègues scientifiques : [Cher ami, laissez-nous tranquille avec ça, nous préférons] *admettre l'existence d'un monde matériel comme cause de notre vécu* » ~ Schrödinger (1982).

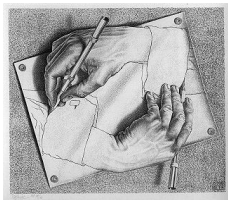


## Observation et capteur

Une observation est un élément de l'**expérience d'un observateur** stable par l'observateur (on le vérifie par le langage).



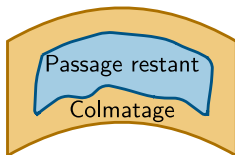
Hormis dans les cas triviaux (mètre étalon), un **capteur intègre un modèle**, qu'il faut **calibrer** (avec quoi ?).



## Colmatage... et colmatage

Quel lien y-a-t-il entre les taux de colmatage d'un trou, d'une (demi-)plaque, ou d'un échangeur complet ?

Sont-ce des représentations d'une même **réalité** ?

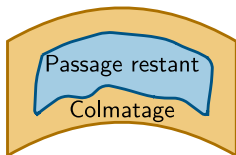


$$x = \frac{\text{Diagram of a yellow semi-circular shape}}{\text{Diagram of a yellow semi-circular shape} + \text{Diagram of a blue semi-circular shape}}$$

## Colmatage... et colmatage

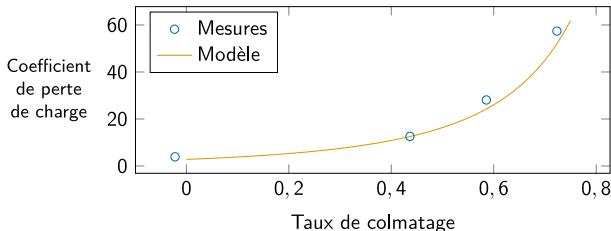
Quel lien y-a-t-il entre les taux de colmatage d'un trou, d'une (demi-)plaque, ou d'un échangeur complet ?

Sont-ce des représentations d'une même **réalité** ?

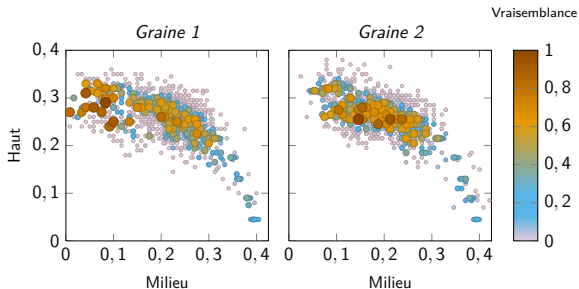
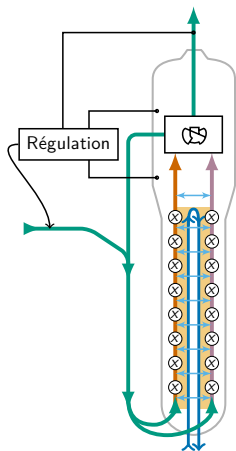


$$x = \frac{\text{Diagram of a single orange-brown arc}}{\text{Diagram of a single orange-brown arc} + \text{Diagram of a single blue arc}}$$

Ce qui « compte » pour la pression, c'est la **perte de charge**... qu'on utilise par ailleurs pour calibrer le modèle.



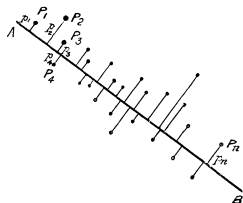
# Tentative d'inversion par filtrage particulaire



La prédiction des taux colmatage à partir des signaux de pression est un **problème inverse mal posé**.

Nous avons eu recours à la **réduction de dimension**.

# Analyse en composantes principales (ACP)



*« In many physical, statistical, and biological investigations it is desirable to represent a system of points in plane, three, or higher dimensioned space by the “best-fitting” straight line or plane »*  
~ (Pearson 1901).

---

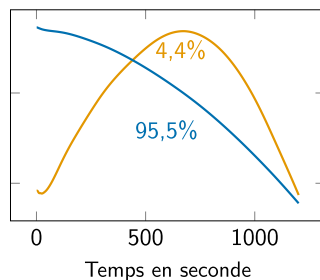
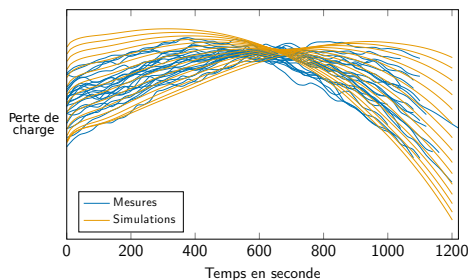
L'ACP produit une famille imbriquée d'espaces vectoriels qui minimisent les résidus de projection.

---

**Solution algébrique** : décomposition aux valeurs singulières (SVD).

# ACP de la sortie dynamique

Les résidus d'approximation en dimension 2 sont presque nuls.



Le colmatage modifie essentiellement la **pente**, et en moindre mesure la **courbure**.



# Régression inverse par morceaux (SIR)

---

La SIR produit un espace vectoriel tel que la régression est préservée par projection  $\leadsto$  Li (1991).

---

ACP :  $Projection(X)$  est une bonne approximation de  $X$ .

SIR :  $Projection(X)$  est un bon prédicteur de  $Y$ .

# Régression inverse par morceaux (SIR)

---

La SIR produit un espace vectoriel tel que la **régression est préservée par projection**  $\leadsto$  Li (1991).

---

ACP :  $Projection(X)$  est une bonne approximation de  $X$ .

SIR :  $Projection(X)$  est un bon prédicteur de  $Y$ .

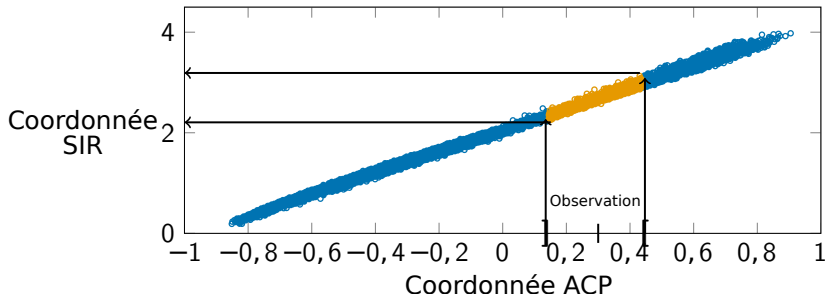
Sous des conditions peu contraignantes sur  $X$ , la courbe de **régression inverse**  $E(X | Y)$  est contenue dans l'espace recherché.

## Algorithme :

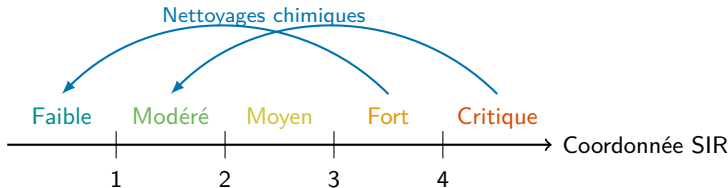
1. Approximation par morceaux (*slices*) de la régression inverse.
2. Estimation de l'espace la contenant au mieux par ACP.

# Résultat : nouvelle méthode de diagnostic

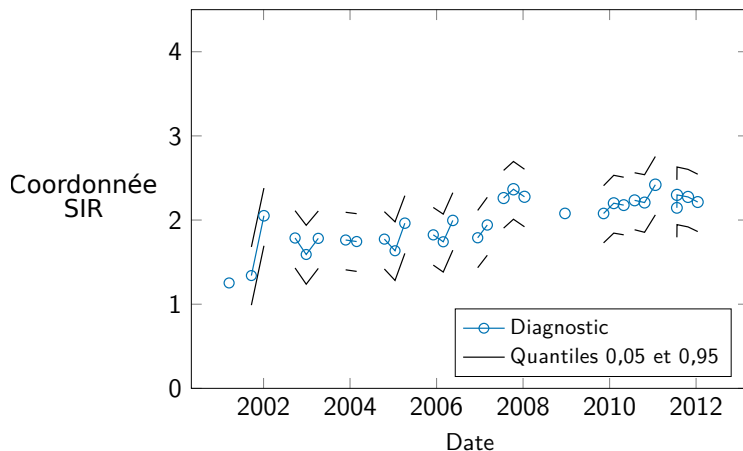
L'inversion est devenue triviale ( $1d \rightarrow 1d$ ).



## ► Échelle de gravité établie empiriquement

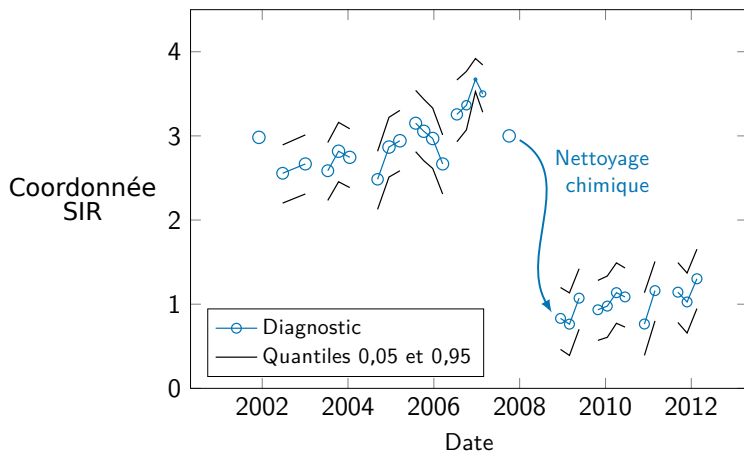


## Diagnostic du colmatage 1/2



► Générateur de vapeur en bon état.

## Diagnostic du colmatage 2/2



► La fissuration d'un tube a causé un arrêt fortuit.

# Moralité de l'anecdote 1

Nous avons vu deux capteurs–modèles de (l'effet du) colmatage :  
chacun s'appuie sur des **observations** articulées par un **raisonnement**.

Je ne pense pas qu'il soit utile d'assujettir l'un à l'autre.

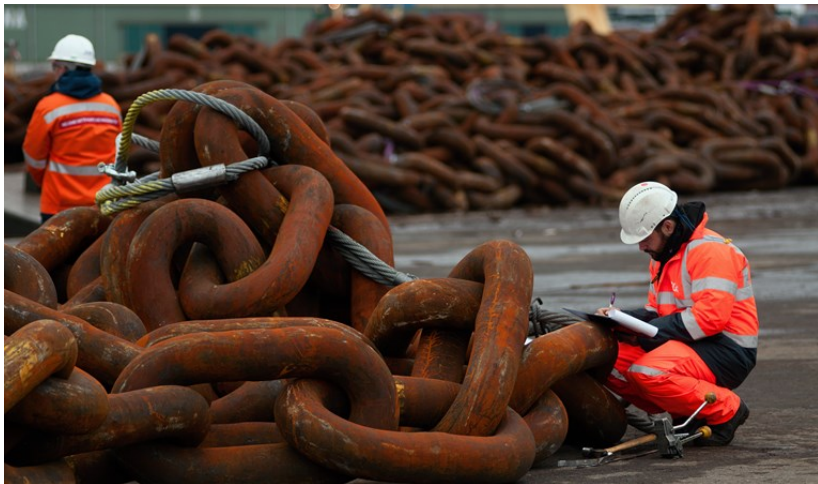
Chacun apporte des **arguments** qu'il faut pondérer pour **décider**  
d'un nettoyage chimique.

## Anecdote 2 : Longévité des ancrages



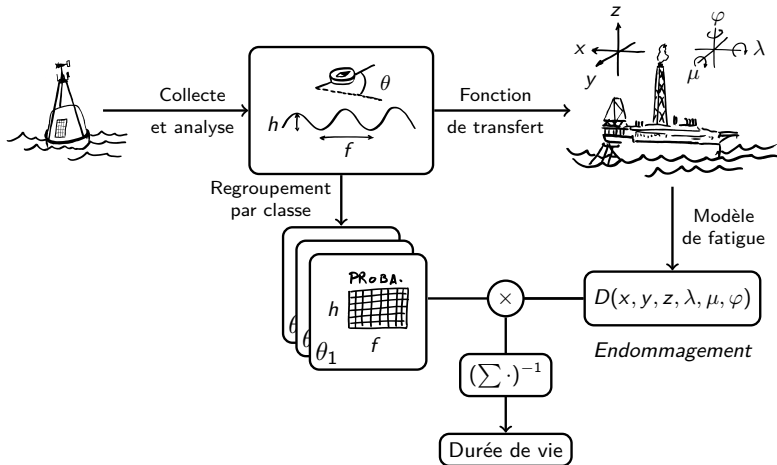
## Pliez et dépliez sans cesse un trombone :

Il se rompt brutalement à cause de la **fatigue**.

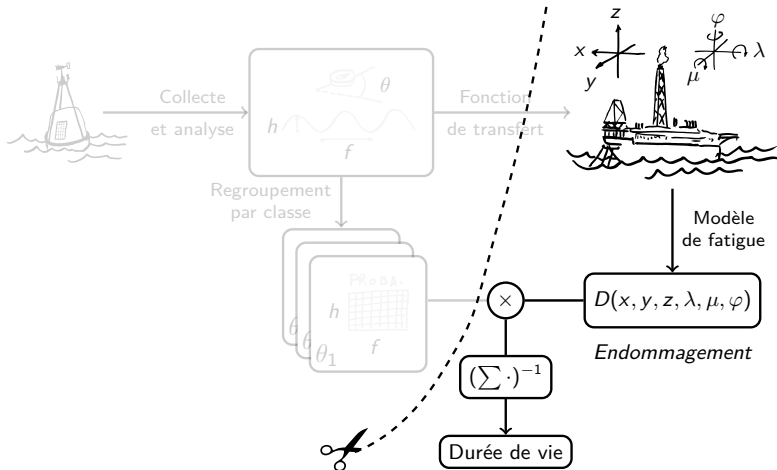




# Méthode de pronostic traditionnelle

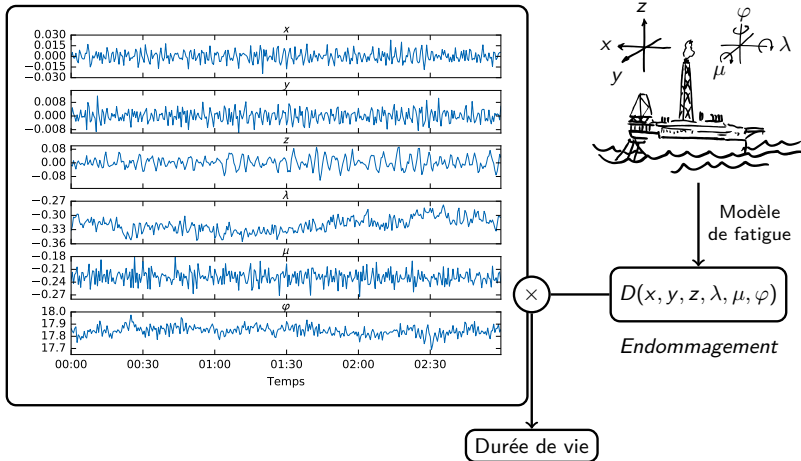


# Utilisons les mesures embarquées

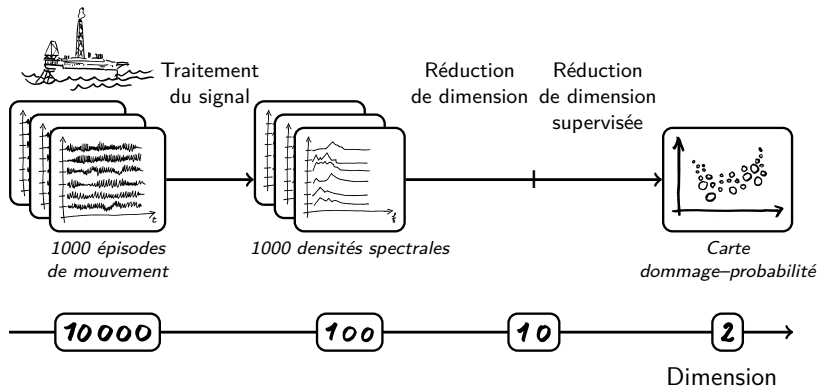


C'est le mouvement du flotteur et non les vagues qui nous intéressent !

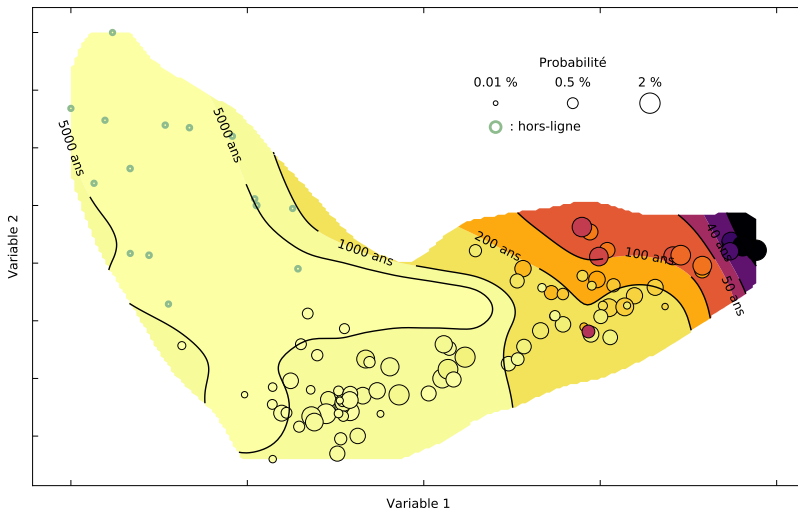
# Le signal de mouvement est de grande dimension



# Réduction de dimension en cascade



# Surveillance et pronostic





# Hypothèse des étourneaux

---

*On peut créer un modèle simple avec des observations complexes.*

---



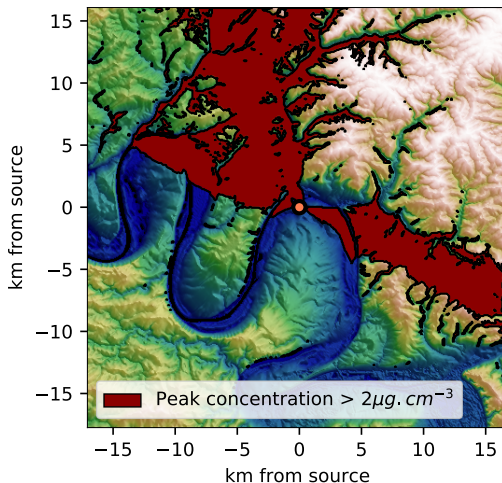
~ « Comme un vol d'étourneaux » (Parisi 2024).

## Anecdote 3 : Pollution atmosphérique



Comment établir des préconisations « **raisonnablement pénalisante** » ?

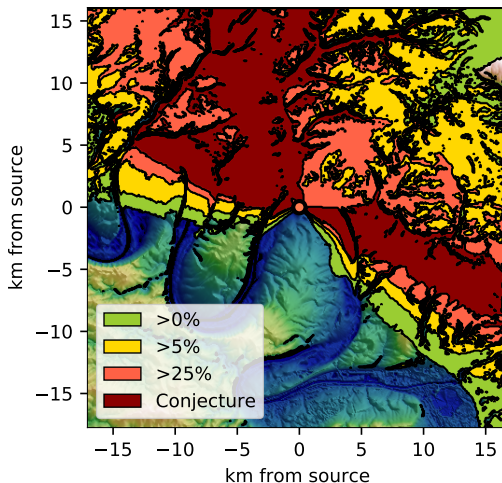
## Avec une seule simulation



Carte de **dépassement d'un seuil** de concentration.



## Avec 100 simulations

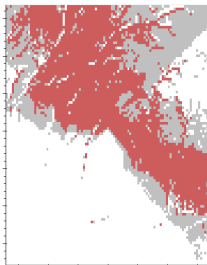


Probabilités de dépassement en postulant des perturbations des entrées (vitesse et direction du vent, pluie, terme source).

# Traduction pragmatique de l'incertitude

L'incertitude est un mauvais produit : personne n'en veut.

Quand est-il, à votre avis, de l'incertitude *sur l'incertitude*?



Concentration threshold ( $\mu\text{g}/\text{cm}$ ): 2.00



Exceedance probability threshold: 0.05



Risk: 0.05



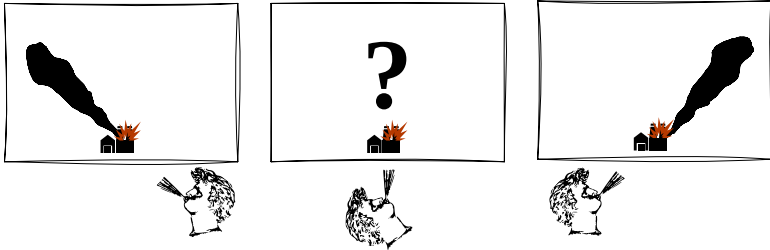
Information conclusive : **action**, **non-action**,  
décider autrement

Appropriation du raisonnement par  
l'interactivité.

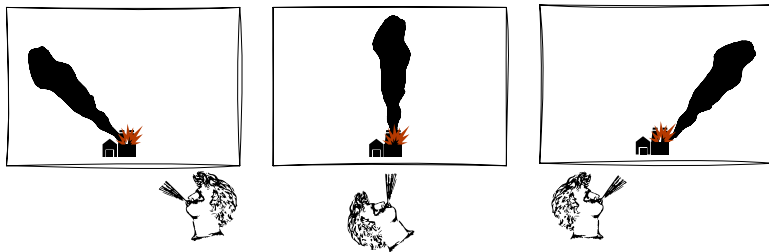


[https://showroom.phimeca.com/decision\\_map](https://showroom.phimeca.com/decision_map)

# Interpoler un modèle de transport

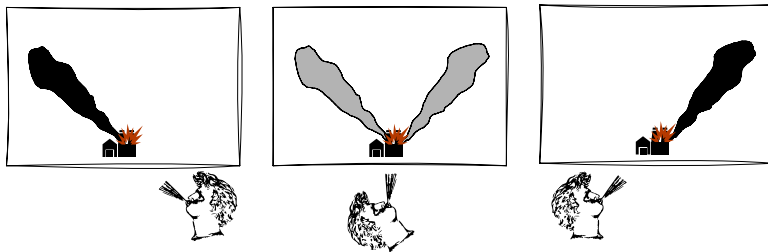


# Interpoler un modèle de transport



La rotation du panache est **topologiquement** de dimension 1.

# L'ACP est une approximation *linéaire*



Il faudrait **une composante par direction** pour projeter adéquatement une rotation !

# Modèle auto-associatif (MAA) : « ACP non linéaire »

---

Le MAA alterne

1. projection aussi inversible que possible
  2. et approximation des résidus par une fonction de rattrapage.
- 

ACP : La projection préserve **toutes** les **distances euclidiennes**.

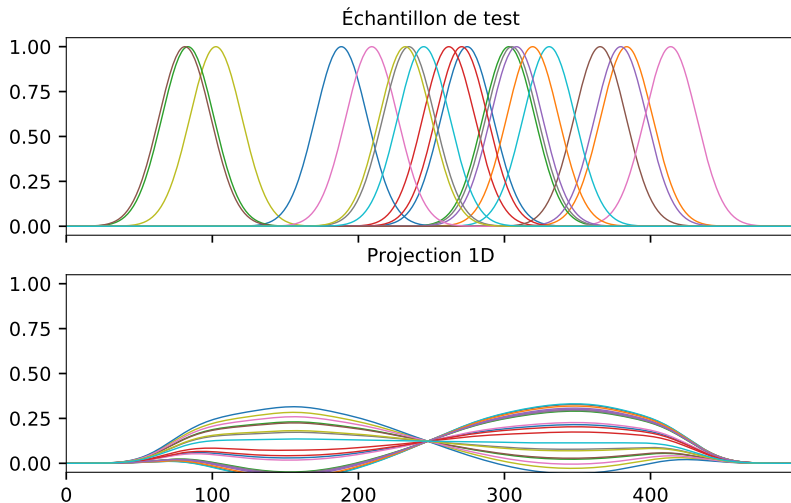
MAA : La projection préserve **localement** les **voisinages**.

La solution reste **algébrique**  $\leadsto$  Girard et Iovleff (2008).

De l'ACP au MAA :

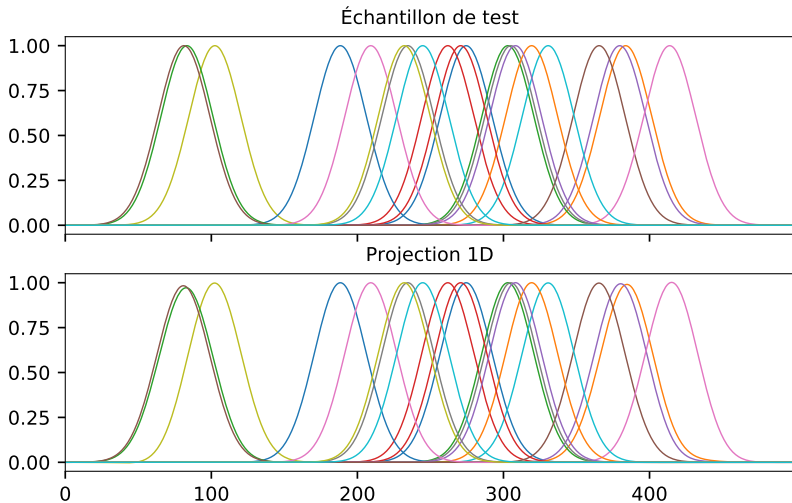
[https://showroom.phimeca.com/unsupervised\\_dimension\\_reduction](https://showroom.phimeca.com/unsupervised_dimension_reduction).

# L'ACP 1D échoue à approcher une translation



~ Fukunaga et Olsen (1971).

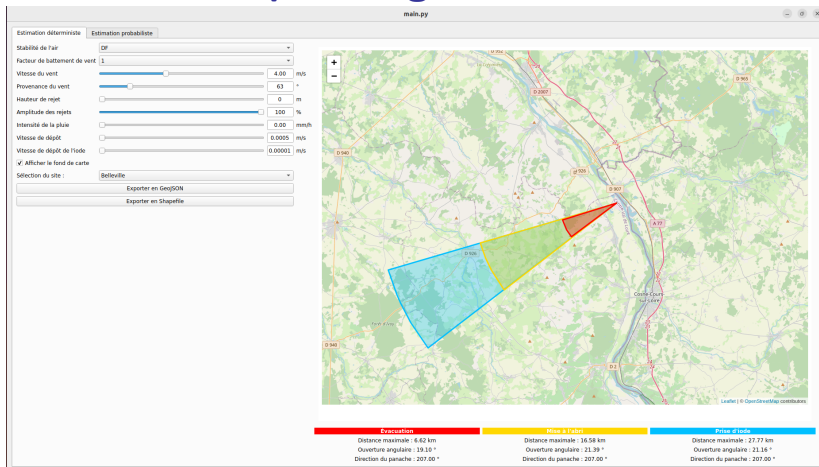
# Le MAA fonctionne parfaitement...



...en **dimension 1**. Au-delà, seulement dans certains cas (lesquels ?).



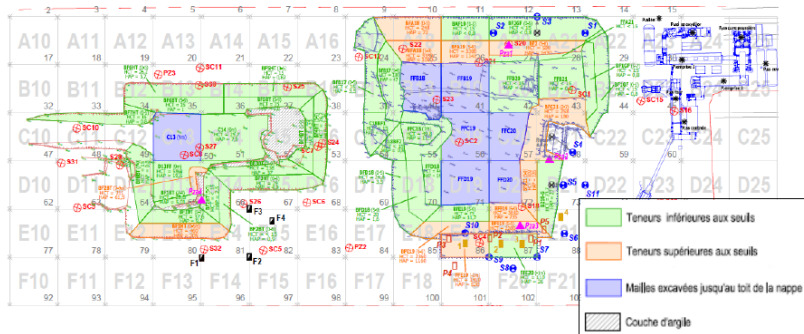
# Modèle interactif pour la gestion de crise



Au contraire des modèles probabilistes, la **simulation interactive** peut s'insérer dans le mode actuel de gestion des crises nucléaires  
~ Périllat, Girard, et Korsakissok (2025).

## Mini anecdote 4 : Pollution des sols

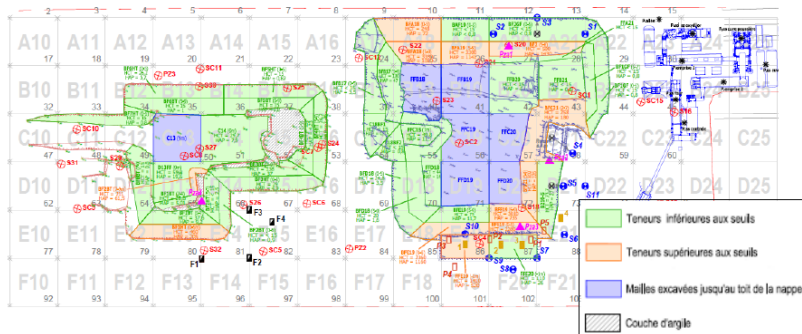
Les travaux de dépollution d'un ancien site industriel débutent après 4 ans d'études et un total de 78 sondages.



Le volume de terre à traiter estimé à  $25\,848\text{ m}^3$  est excédé de 32 %.

## Mini anecdote 4 : Pollution des sols

Les travaux de dépollution d'un ancien site industriel débutent après 4 ans d'études et un total de 78 sondages.



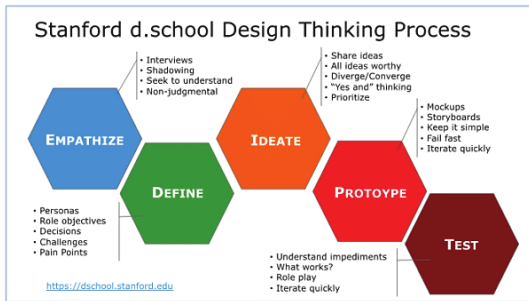
Le volume de terre à traiter estimé à  $25\,848\text{ m}^3$  est excédé de 32 %.



## Grefe impossible et *design thinking*

Un processus de décision **qui** nie le doute exclue les probabilités.

Développer un modèle sans se préoccuper de qui réalisera l'intention est voué à l'échec.



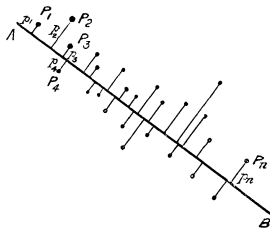
Le *design thinking* est une méthode de **conception itérative** par **l'interaction avec les utilisateurs**.

~ Schanks (2013).

## Retour sur l'ACP

L'ACP produit une projection **minimisant les résidus**.

⇔ L'ACP produit une combinaison linéaire de **variance maximale**.



Pourquoi maximiser la variance ? Pourquoi normer à 1 ?

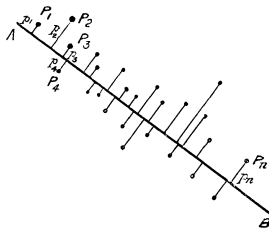
Pourquoi orthogonaliser ?

À ce compte là : « ACP = SVD de  $\mathbf{X}$  ».

# Retour sur l'ACP

L'ACP produit une projection **minimisant les résidus**.

⇔ L'ACP produit une combinaison linéaire de **variance maximale**.



Pourquoi maximiser la variance ? Pourquoi normer à 1 ?

Pourquoi orthogonaliser ?

À ce compte là : « ACP = SVD de  $\mathbf{X}$  ».

⇔ maximise les distances au barycentre,

⇔ préserve les distances euclidiennes.



## Dire de plusieurs façon



L'énoncé d'un fait partage avec lui une structure qui elle même ne peut être dite, seulement montrée. ~ Wittgenstein (1993).

En multipliant les points de vue, on accède à cet indicible : géométrie, algèbre, statistique, analyse, topologie... Il y a des **déclics**.



## Dire de plusieurs façon



L'énoncé d'un fait partage avec lui une structure qui elle même ne peut être dite, seulement montrée. ~ Wittgenstein (1993).

En multipliant les points de vue, on accède à cet indicible : géométrie, algèbre, statistique, analyse, topologie... Il y a des **déclics**.

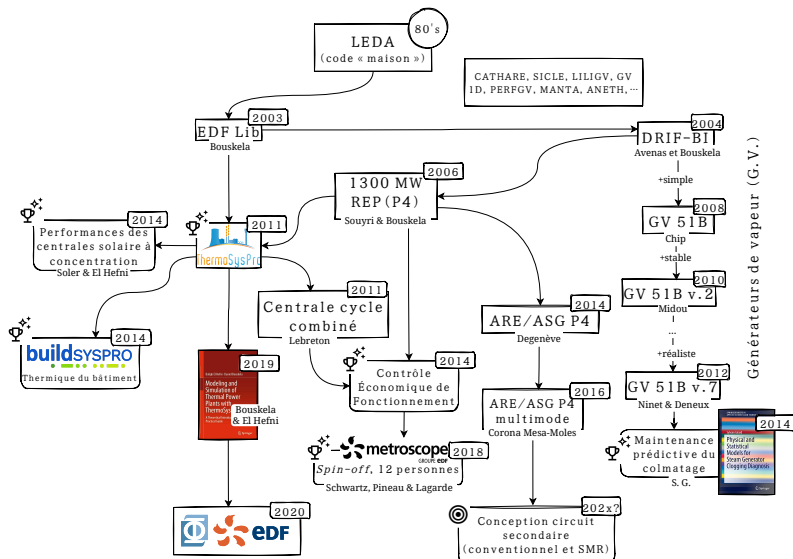
La **métaphore du cerveau-machine** me semble un obstacle à *montrer* tant la modélisation que la connaissance humaine.

~ « Autonomie et connaissance » (Varela 1989).

~ « L'Esprit, ça ne marche pas comme ça » (Fodor 2003).

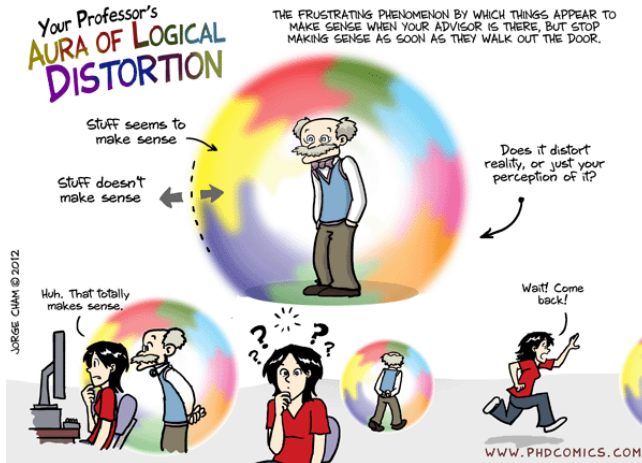


# 20 ans d'innovation nourrie de modèles



# Récrire le même modèle tous les 2 ans... sérieux ?

l'Effet aura





# Toute connaissance a des racines tacites

## Explicite

- ▶ Texte,
- ▶ équations,
- ▶ programme informatique,
- ▶ maquette,
- ▶ spécification,
- ▶ schéma,
- ▶ procédure...

## Tacite

- ▶ Intuitions,
- ▶ savoir-faire,
- ▶ point de vue,
- ▶ convictions,
- ▶ système de valeurs...

Transcriptible dans un langage

↪ Dowek (2019).

Personnel et contextuel

↪ « *The tacit dimension* » (Polanyi 1966).



# Toute connaissance a des racines tacites

## Explicite

- ▶ Texte,
- ▶ équations,
- ▶ programme informatique,
- ▶ maquette,
- ▶ spécification,
- ▶ schéma,
- ▶ procédure...

## Tacite

- ▶ Intuitions,
- ▶ savoir-faire,
- ▶ point de vue,
- ▶ convictions,
- ▶ système de valeurs...

Transcriptible dans un langage

↪ Dowek (2019).

Personnel et contextuel

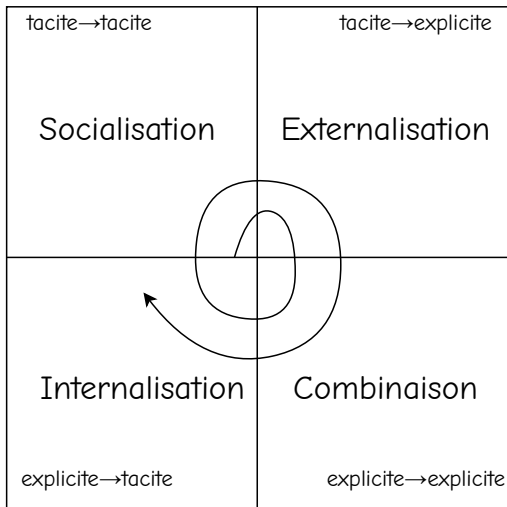
↪ « *The tacit dimension* » (Polanyi 1966).

---

Hypothèse : Les modèles simples ont une forte charge tacite.

---

# Le modèle de création de connaissance « SECI »



~ « *The knowledge creating company* » (Nonaka et Takeuchi 1995).

# Vision du monde, bouteille à mouche



*« La seule façon pour la mouche d'en sortir était d'emprunter le même conduit étroit par lequel elle était entrée. [...] Selon Wittgenstein, il aurait fallu, dans une pareille situation, convaincre la mouche que la seule solution à son dilemme était en fait celle qui semblait la moins appropriée, et la plus dangereuse ». ~ « l'Invention de la réalité » (Watzlawick 1988).*

**Expédient** : nouer des **relations de coopération** ouvertes dans le temps et leurs objets, mobilisant l'ensemble des facultés humaines ~ (Laurent 2018).

# Idées clefs

- 🔑 Modèle = raisonnement motivé, « ~~réalité~~ »
- 🔑 Capteur  $\supset$  modèle  $\supset$  capteur  $\supset$  modèle  $\supset$  ...
- 🔑 Hypothèse des étourneaux
- 🔑 Greffe impossible et *design thinking*
- 🔑 Dire de plusieurs façons
- 🔑 Connaissance tacite
- 🔑 Coopération



**Merci de votre attention.**

Sylvain Girard : [girard@phimeca.com](mailto:girard@phimeca.com)

<https://sylvaingirard.net>



## Pistes de curiosités

*Ce découpage est arbitraire : logique, sémantique, théorie de la connaissance en général, constructivisme (radical) en particulier... s'imbriquent et se recouvrent.*

## Coopération

Laurent, Éloi. 2018. *L'impasse collaborative: pour une véritable économie de la coopération*. Éditions Les liens qui libèrent.

Schanks, Michael. 2013. « An Introduction to Design Thinking ». <https://www.web.stanford.edu/~mshanks/MichaelShanks/files/509554.pdf>.

Vuille, Antoine. 2024. *Contre la culture du clash*. Éliott. <https://eliotteditions.fr/42-contre-la-culture-du-clash/>.

## Constructivisme radical et cybernétique d'ordre 2

Segal, Lynn. 1990. *Le rêve de la réalité : Heinz Von Foerster et le constructivisme*. Seuil.

Watzlawick, Paul. 1988. *L'Invention de la réalité*. Point.

## Langage et sémantique

Dowek, Gilles. 2019. *Ce dont on ne peut parler il faut l'écrire – Langues et langages*. Le Pommier.

Hayakawa, Samuel Ichiye. 1974. *Language in Thought and Action*. 3rd éd. Allen & Unwin.

Wittgenstein, Ludwig. 1993. *Tractatus logico-philosophicus*. Gallimard.

## Théorie et pratique de la connaissance

Fodor, Jerry. 2003. *L'Esprit, ça ne marche pas comme ça*. Odile Jacob.

Nonaka, Ikujiro, et Hirotaka Takeuchi. 1995. *The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation*. Oxford university press.

Polanyi, Michael. 1966. *The tacit dimension*. University of Chicago press.

Varela, Francisco. 1989. *Autonomie et connaissance : essai sur le vivant*. Seuil.

## Pratique des sciences

Matheron, Georges. 1978. *Estimer et choisir : essai sur la pratique des probabilités*. École des Mines de Paris.

[http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/MATHERON\\_Ouvrage\\_00208.pdf](http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/MATHERON_Ouvrage_00208.pdf).

Parisi, Giorgio. 2024. *Comme un vol d'étourneaux*. Flammarion.

## Métaphysique et mystique

Schrödinger, Erwin. 1982. *Ma conception du monde : Le Veda d'un physicien*. Mercure de France.

## Mathématiques

Fukunaga, Keinosuke, et David R. Olsen. 1971. « An Algorithm for Finding Intrinsic Dimensionality of Data ». *IEEE Transactions on Computers* C-20 (2): 176-83. <https://doi.org/10.1109/t-c.1971.223208>.

Girard, Stéphane, et Serge Iovleff. 2008. « Auto-Associative Models, Nonlinear Principal Component Analysis, Manifolds and Projection Pursuit ». In *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, 202-18. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73750-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73750-6_8).

Li, Ker Chau. 1991. « Sliced Inverse Regression For Dimension Reduction (with discussion) ». *Journal of the American Statistical Association* 86 (414): 316-27.

Pearson, Karl. 1901. « On lines and planes of closest fit to systems of points in space ». *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2 (11): 559-72. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>.

Périllat, Raphaël, Sylvain Girard, et Irène Korsakissok. 2025. « Accurate and fast prediction of radioactive pollution by Kriging coupled with Auto-Associative Models », février. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3838>.