



Anecdotes de modèles pragmatiques

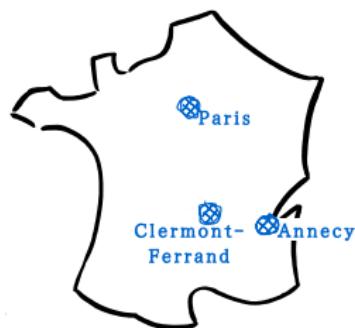
3 février 2026

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. »



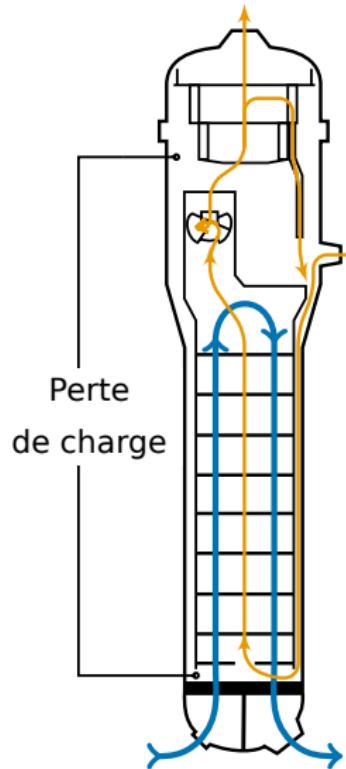
« On collabore pour faire, on coopère pour savoir » ↗ Laurent (2018).

Anecdote de modèles pragmatiques

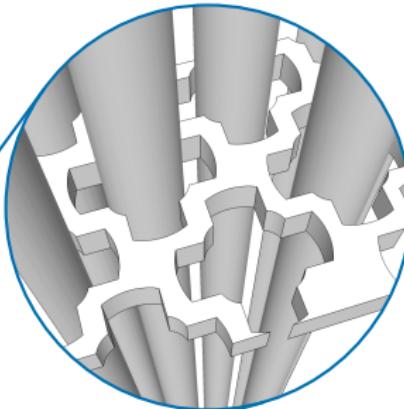
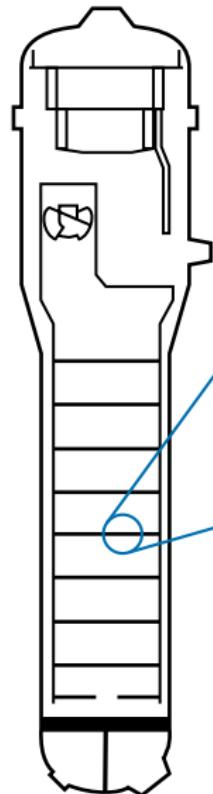
- ▶ Que peut-on attendre, [en pratique](#), des modèles ?
- ▶ Qui peut [utiliser](#) un modèle ? À quelle condition ?
- ▶ Pourquoi certains problèmes d'ingénierie restent ouverts pendant des décennies ?

Je vous propose des  éléments de réponse en passant les premiers 3/8^{ème} de ma carrière scientifique au crible de [~ lectures](#).

Anecdote 1 : Colmatage des générateurs de vapeur



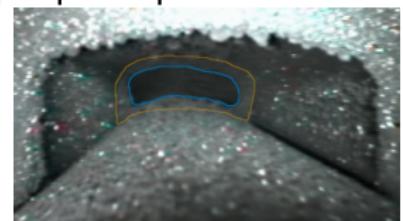
Le colmatage obstrue le passage de la vapeur



Endoscopie de la plaque supérieure :

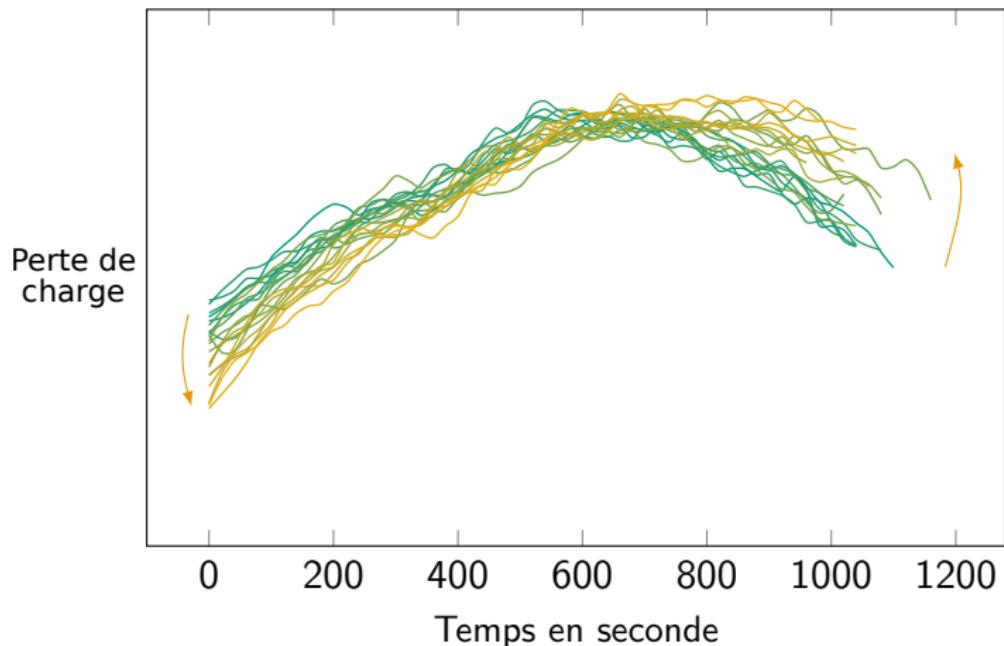


Trou folié sain



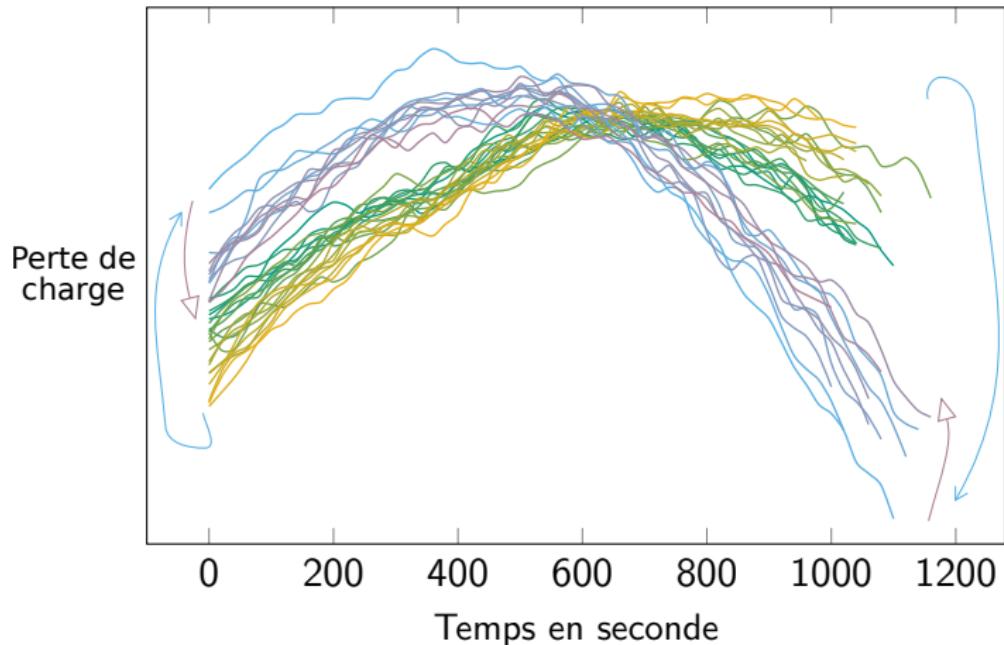
Trou folié colmaté

Le colmatage perturbe la réponse dynamique



↗ : évolution avant nettoyage chimique

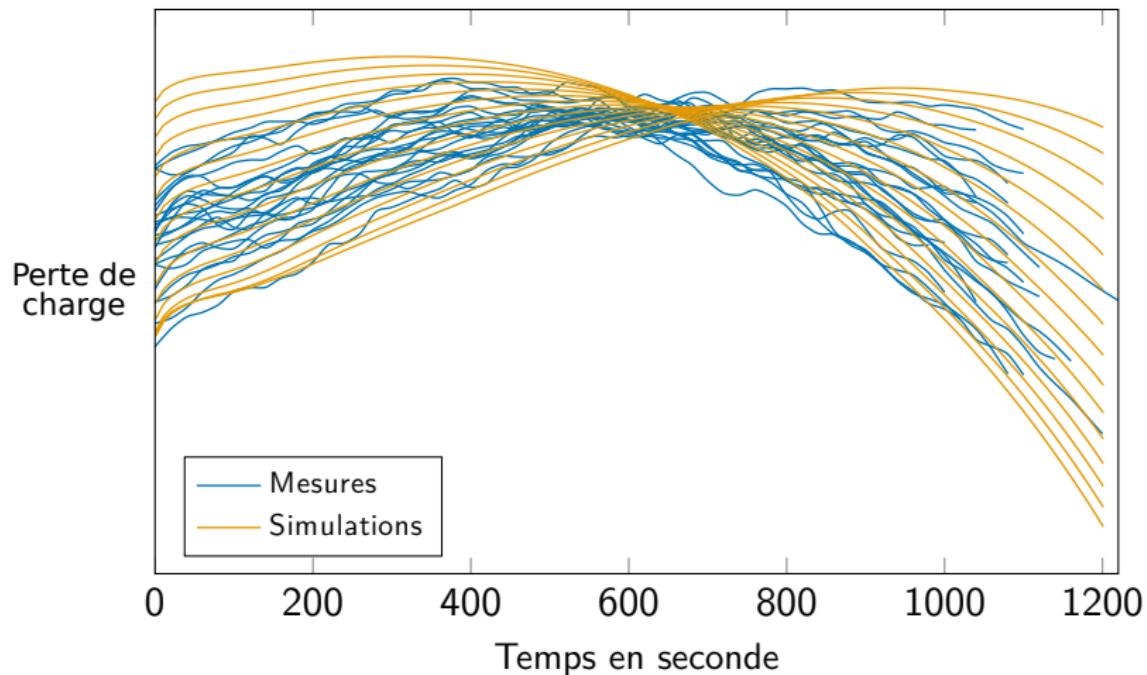
Le colmatage perturbe la réponse dynamique



↗ : nettoyage chimique

↖ : évolution après nettoyage chimique

Un modèle articule ces observations





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 ↵ Dowek (2019).
- ▶ Comment **réfuter** un modèle ?
- ▶ Éviction du terme « **réalité** »

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

↵ « *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** \rightsquigarrow 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).

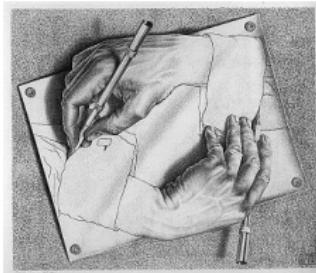


Observation et capteur

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



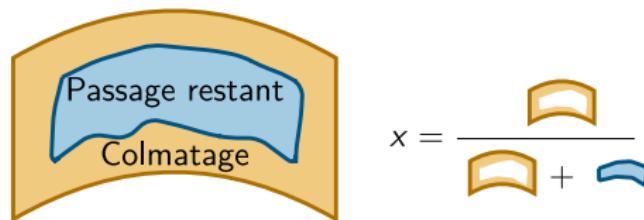
Hormis dans les cas triviaux (mètre étalon), un **capteur intègre un modèle**, qu'il faut **calibrer** (avec quoi ?).



Colmatage... et colmatage

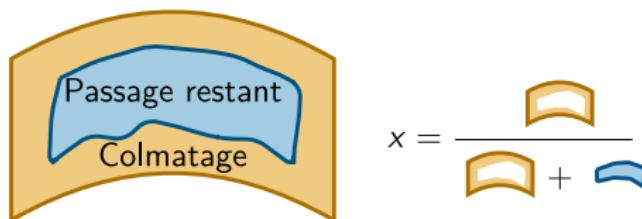
Quel lien y-a-t-il entre les taux de colmatage d'un trou, d'une (demi-)plaque, ou d'un échangeur complet ?

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

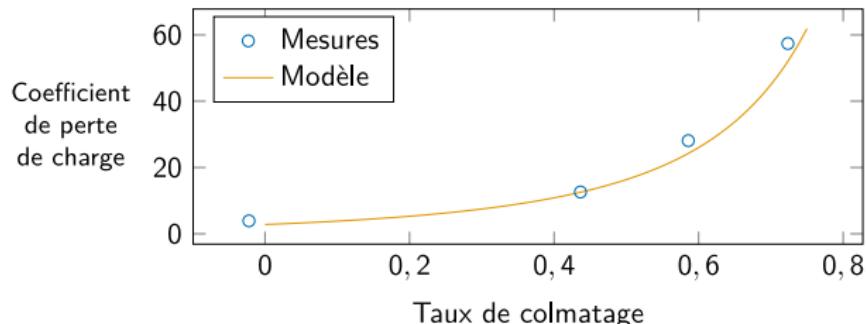


Colmatage... et colmatage

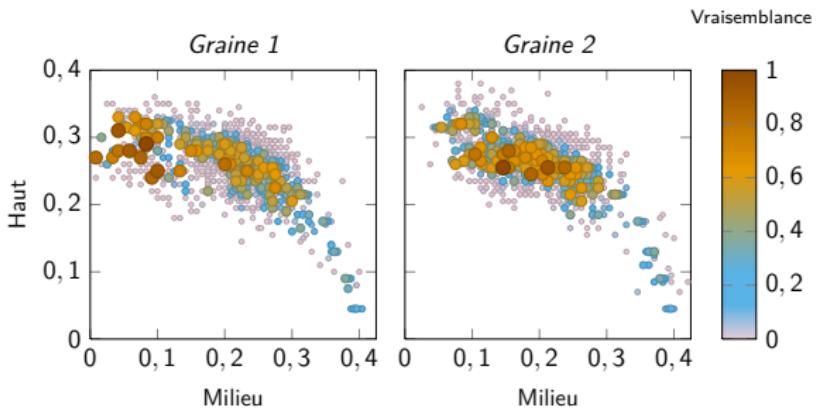
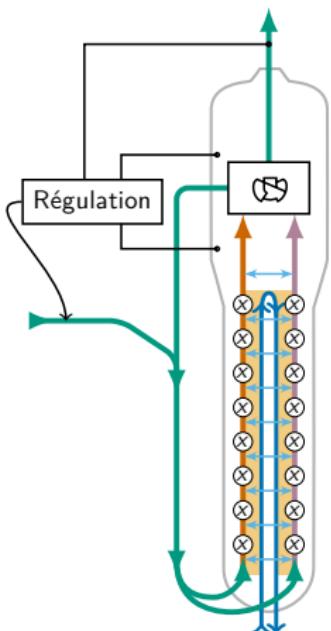
Quel lien y-a-t-il entre les taux de colmatage d'un trou, d'une (demi-)plaque, ou d'un échangeur complet ?
Sont-ce des représentations d'une même réalité ?



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



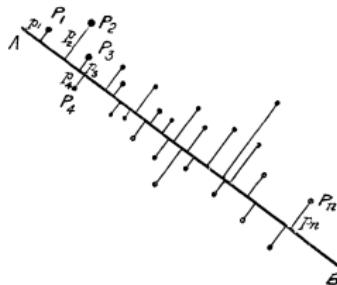
Tentative d'inversion par filtrage particulaire



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)



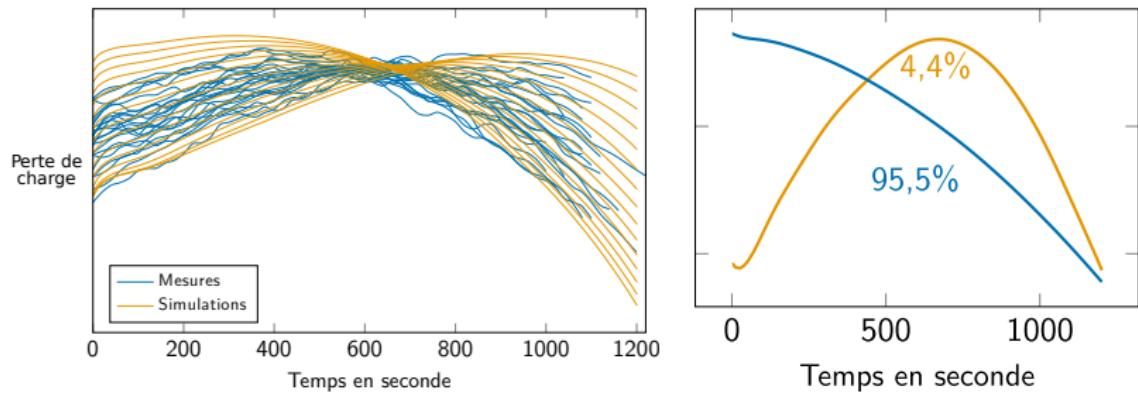
« In many physical, statistical, and biological investigations it is desirable to represent a system of points in plane, three, or higher dimensioned space by the “best-fitting” straight line or plane »
~ (Pearson 1901).

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](#) ↵ Li (1991).

ACP : $\text{Projection}(X)$ est une bonne approximation de X .

SIR : $\text{Projection}(X)$ 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](#) ↵ Li (1991).

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

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

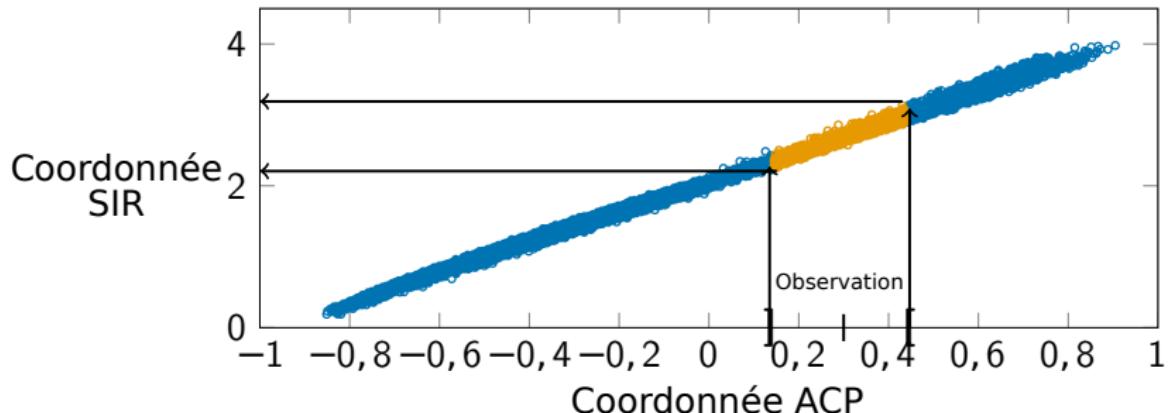
Sous des conditions peu contraignantes sur X, la courbe de [régression inverse](#) $E(X | Y)$ est contenue dans l'espace recherché.

Algorithme :

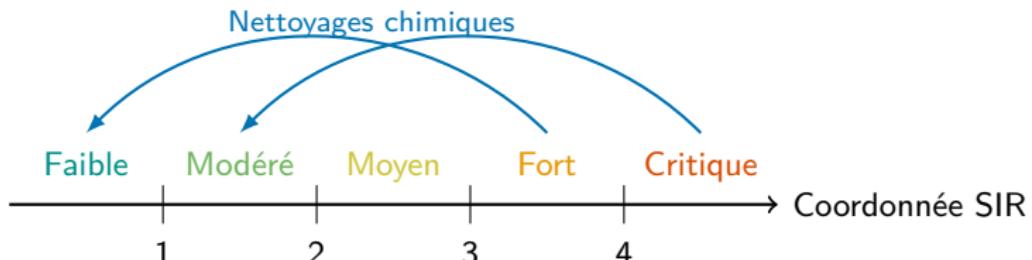
1. Approximation par morceaux (*slices*) de la régression inverse.
2. Estimation de l'espace la contenant au mieux par ACP.

Résultat : nouvelle méthode de diagnostic

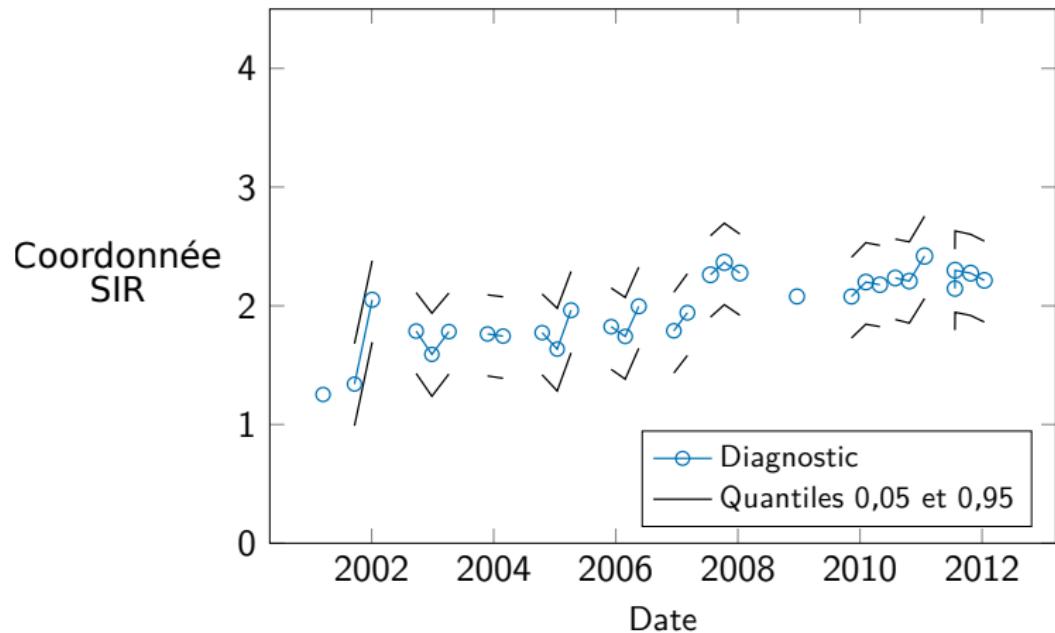
L'inversion est devenue triviale ($1d \rightarrow 1d$).



- ▶ Échelle de gravité établie empiriquement

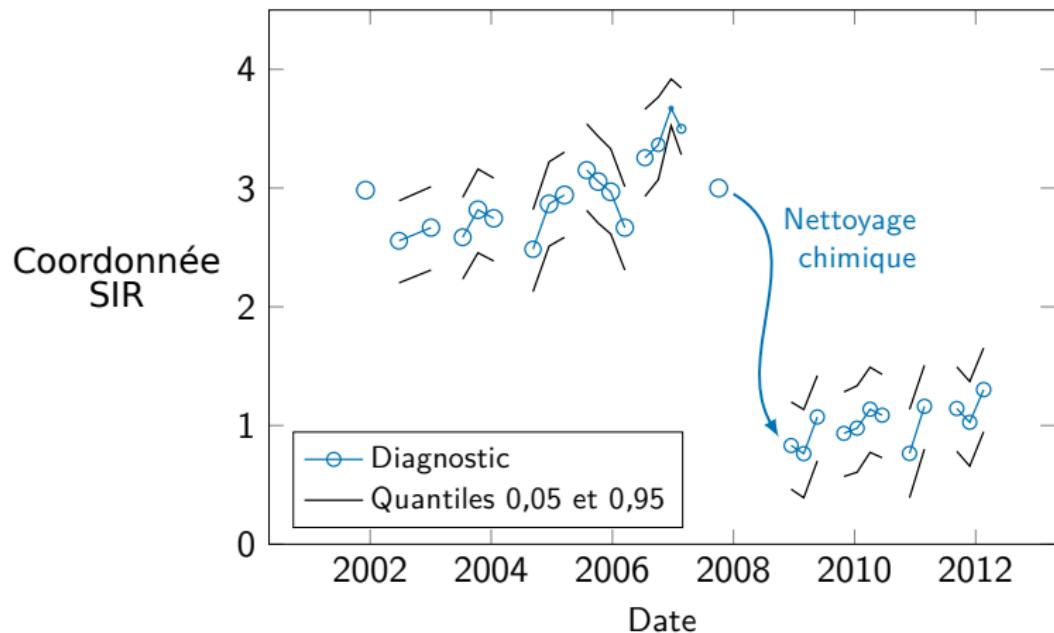


Diagnostic du colmatage 1/2



- ▶ 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** articulée par un **raisonnement**.

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

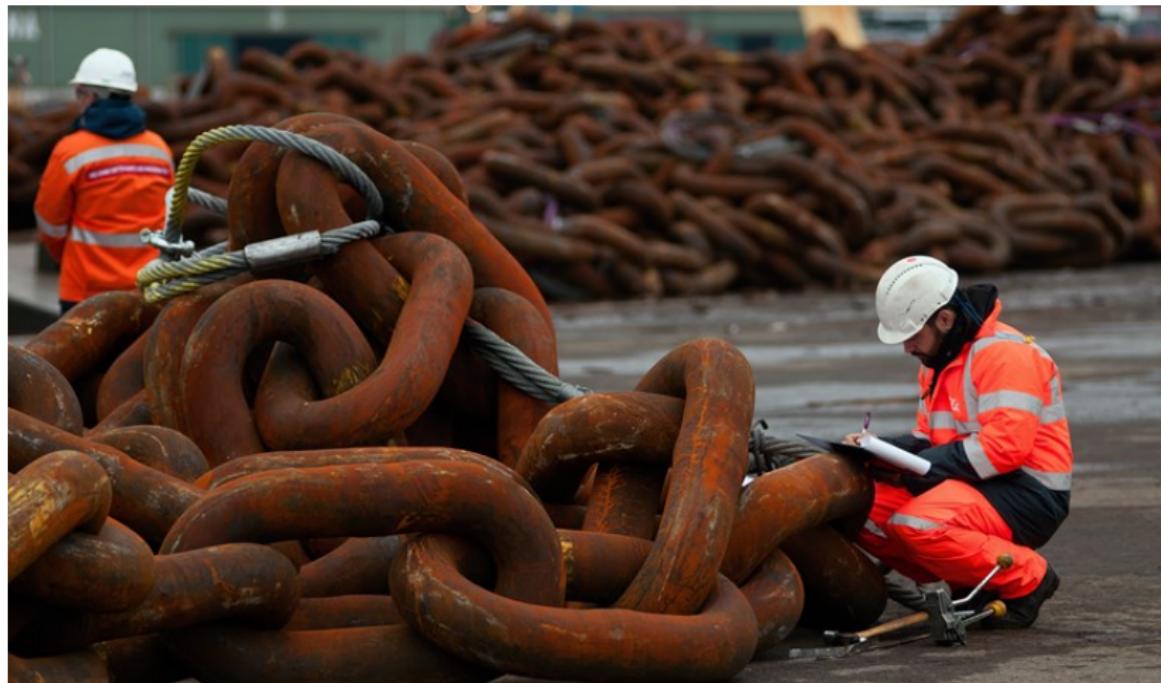
Chacun apporte des **arguments** qu'il faut pondérer pour **décider** d'un nettoyage chimique.

Anecdote 2 : Longévité des ancrages

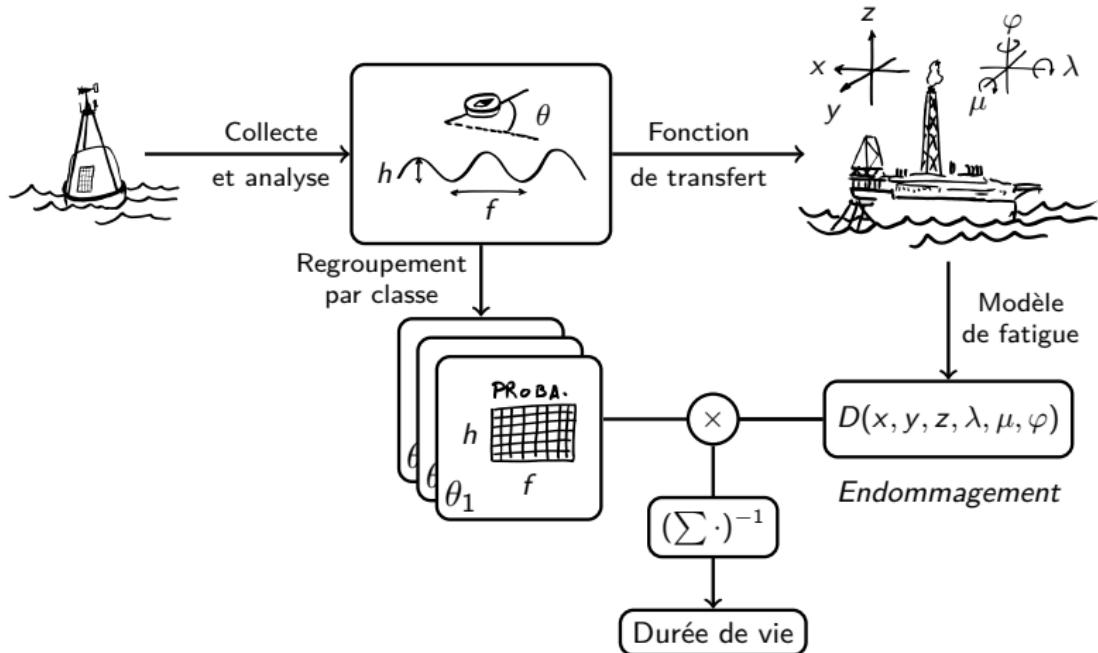


Pliez et dépliez sans cesse un trombone :

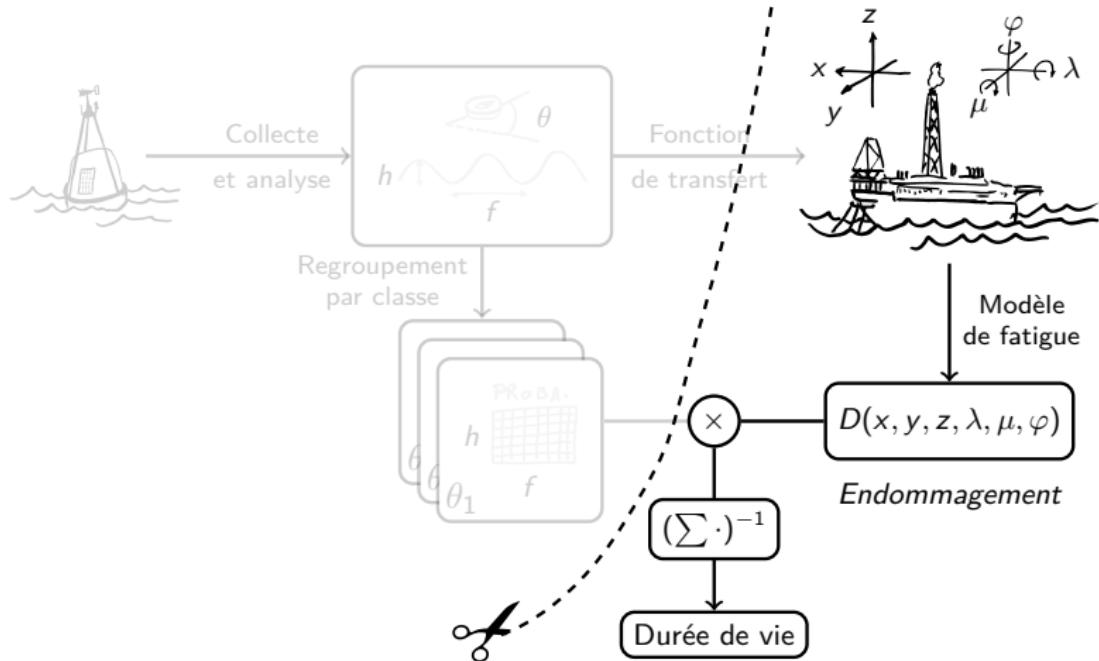
Il se rompt brutalement à cause de la **fatigue**.



Méthode de pronostic traditionnelle

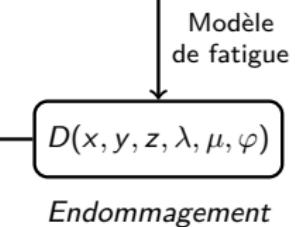
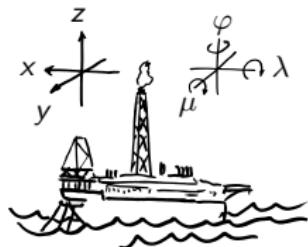
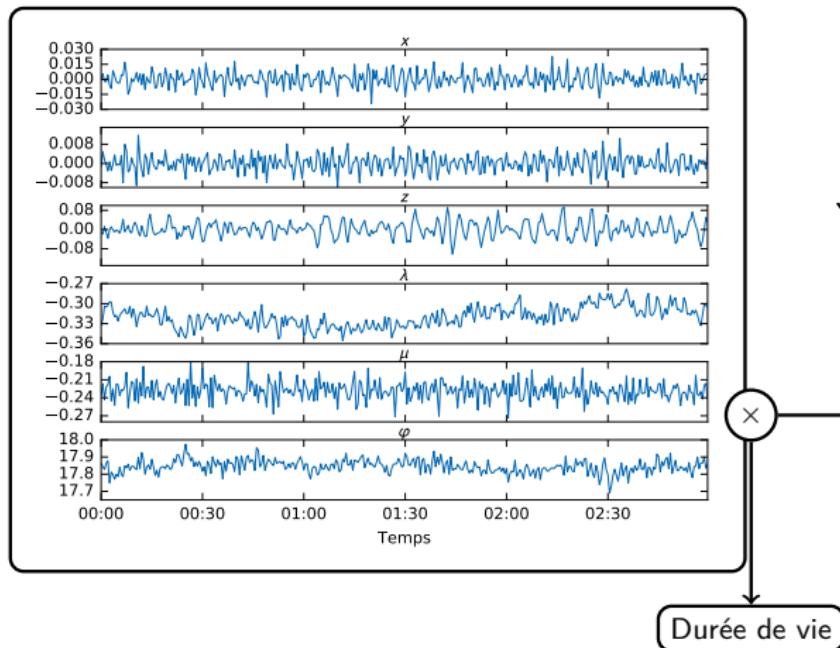


Utilisons les mesures embarquées

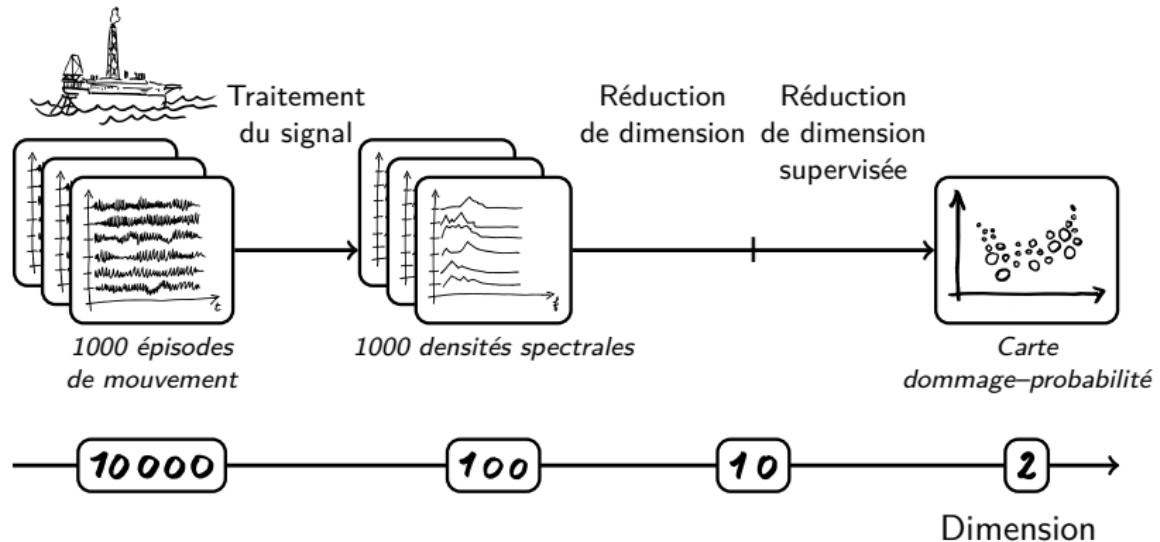


C'est le mouvement du flotteur et non les vagues qui nous intéressent !

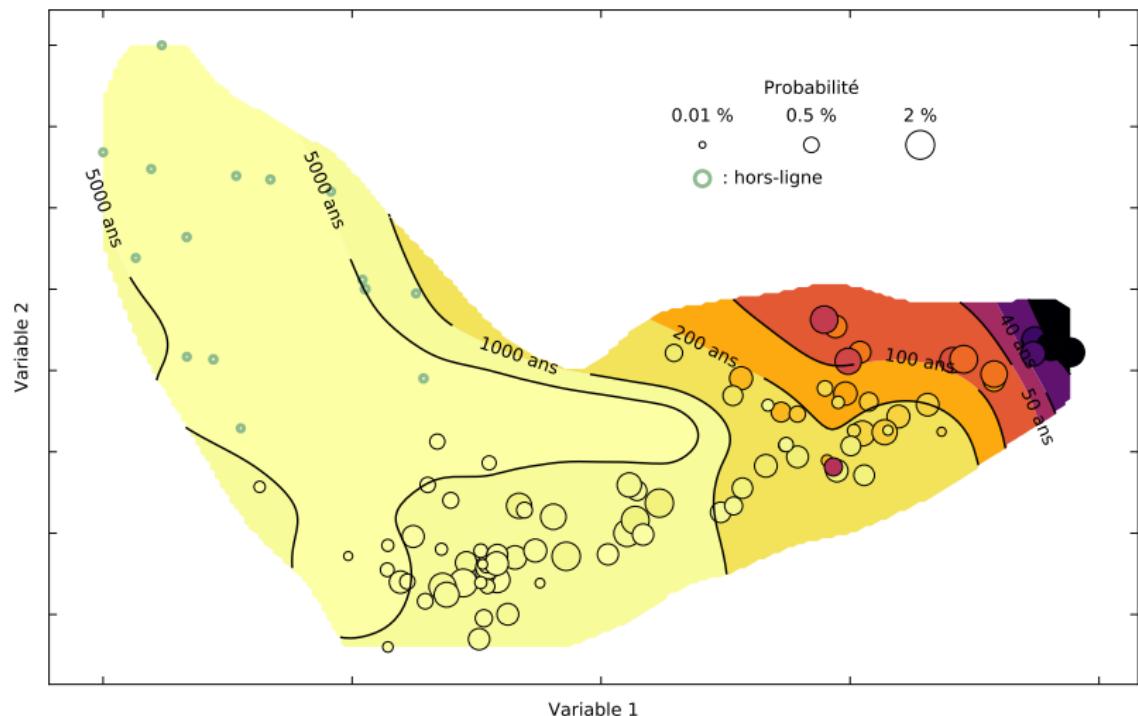
Le signal de mouvement est de grande dimension



Réduction de dimension en cascade



Surveillance et pronostic





Hypothèse des étourneaux

On peut créer un modèle simple avec des observations complexes.



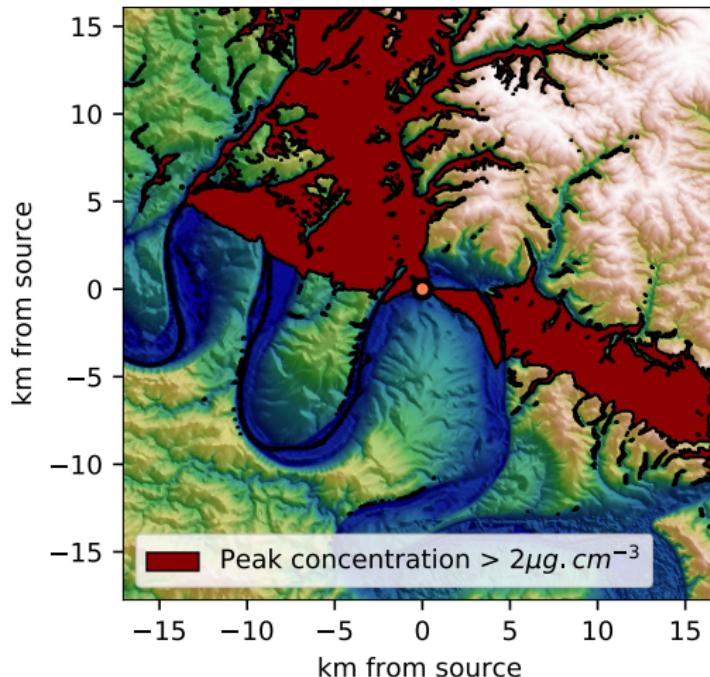
~ « Comme un vol d'étourneaux » (Parisi 2024).

Anecdote 3 : Pollution atmosphérique



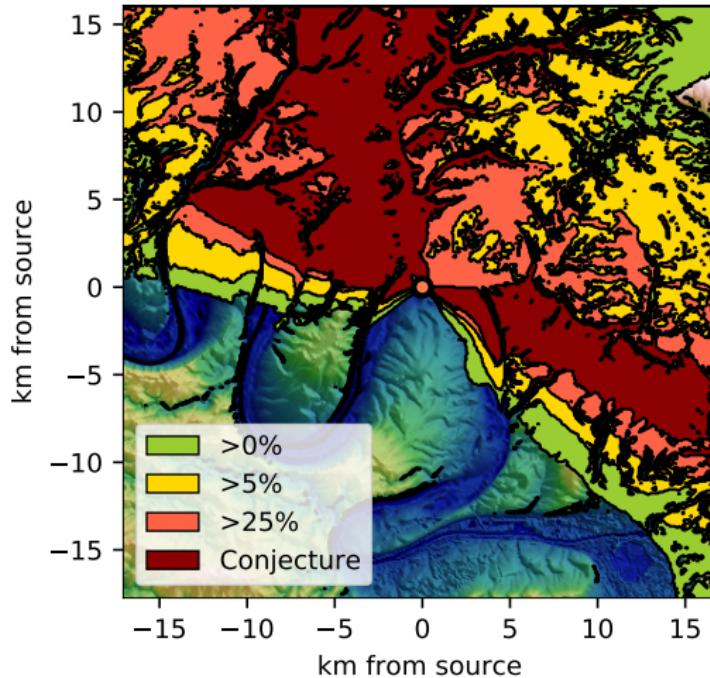
Comment établir des préconisations « *raisonnablement pénalisante* » ?

Avec une seule simulation



Carte de dépassement d'un seuil de concentration.

Avec 100 simulations

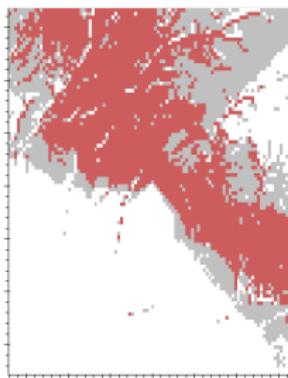


Probabilités de dépassement en postulant des perturbations des entrées (vitesse et direction du vent, pluie, terme source).

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**

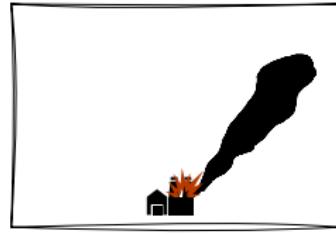
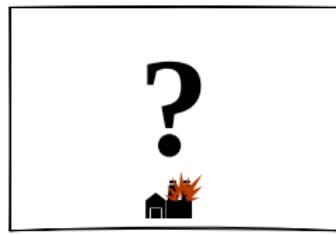
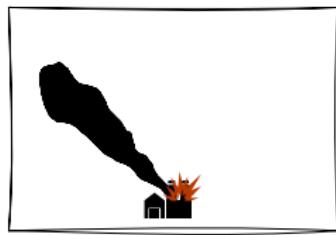
Information conclusive : **action**, **non-action**, décider autrement

Appropriation du raisonnement par l'**interactivité**.

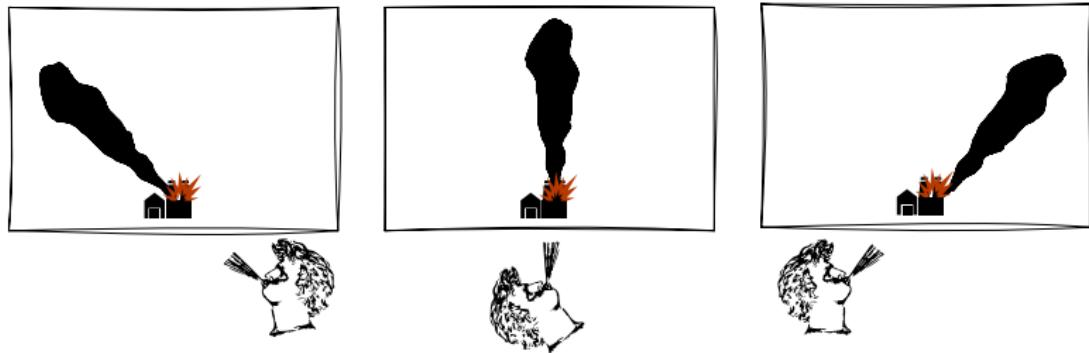


https://showroom.phimeca.com/decision_map

Interpoler un modèle de transport

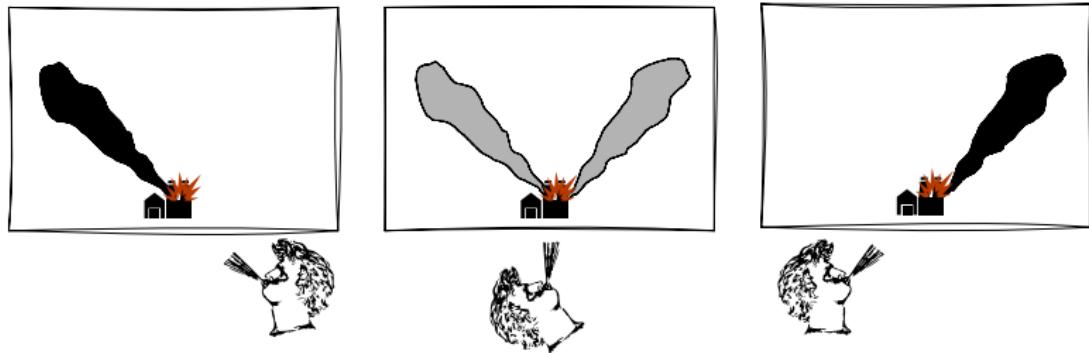


Interpoler un modèle de transport



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.

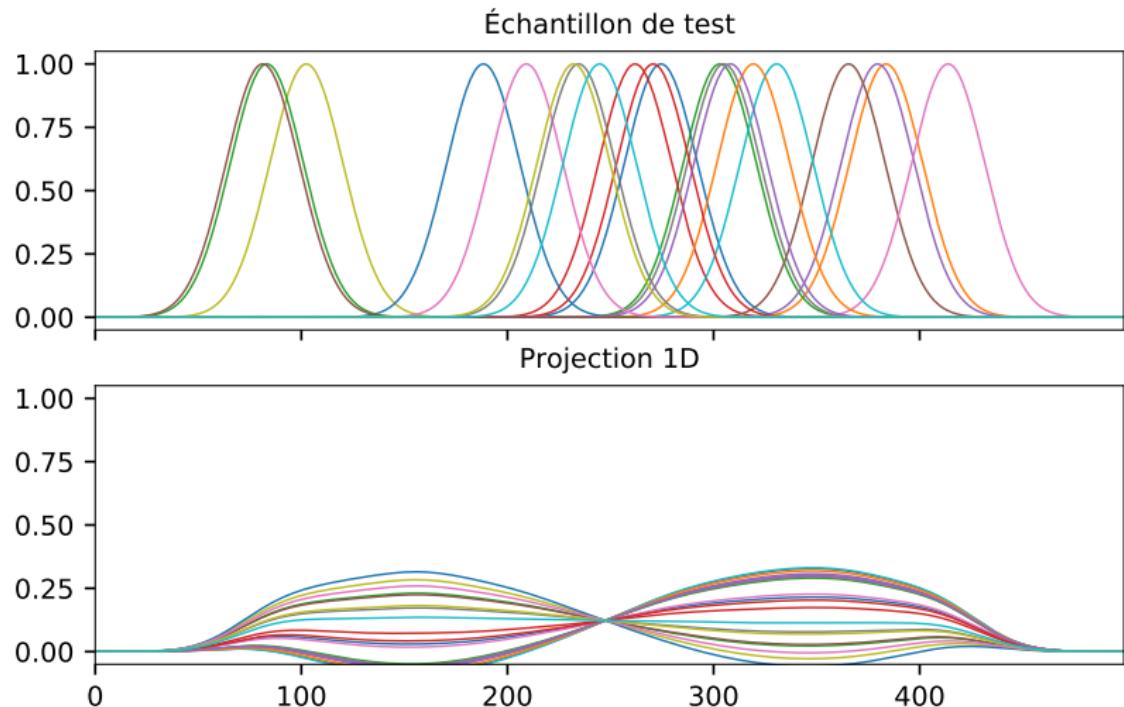
MAA : La projection préserve localement les voisinages.

La solution reste algébrique ↗ Girard et lovleff (2008).

De l'ACP au MAA :

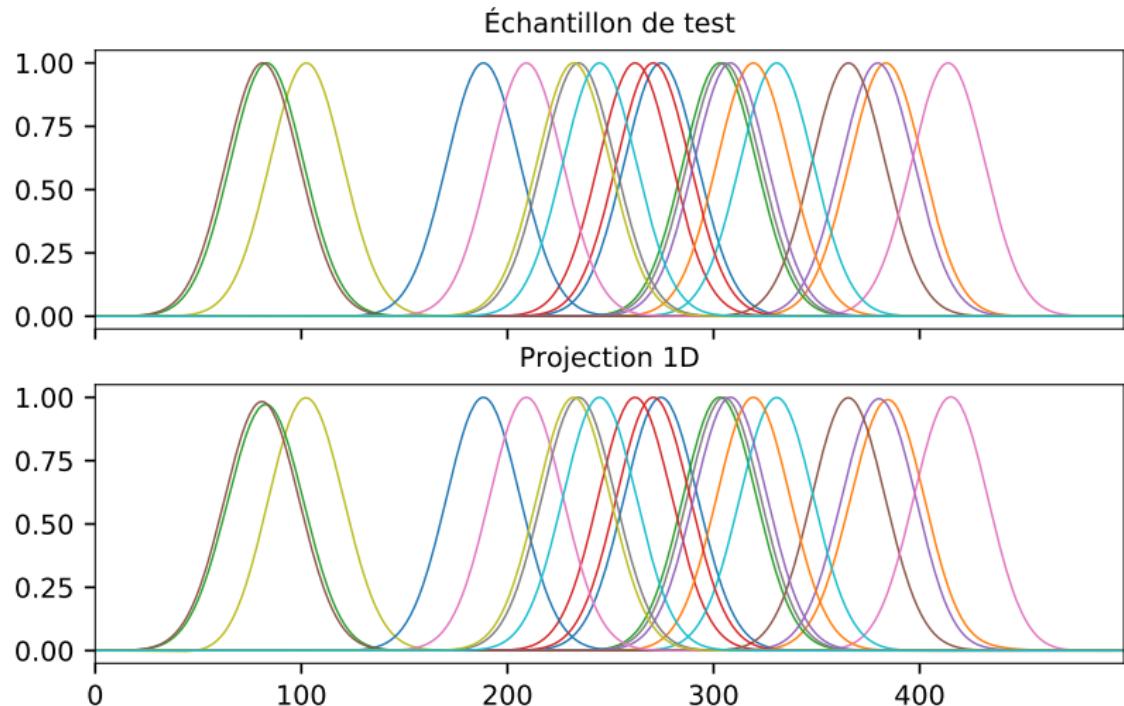
https://showroom.phimeca.com/unsupervised_dimension_reduction.

L'ACP 1D échoue à approcher une translation



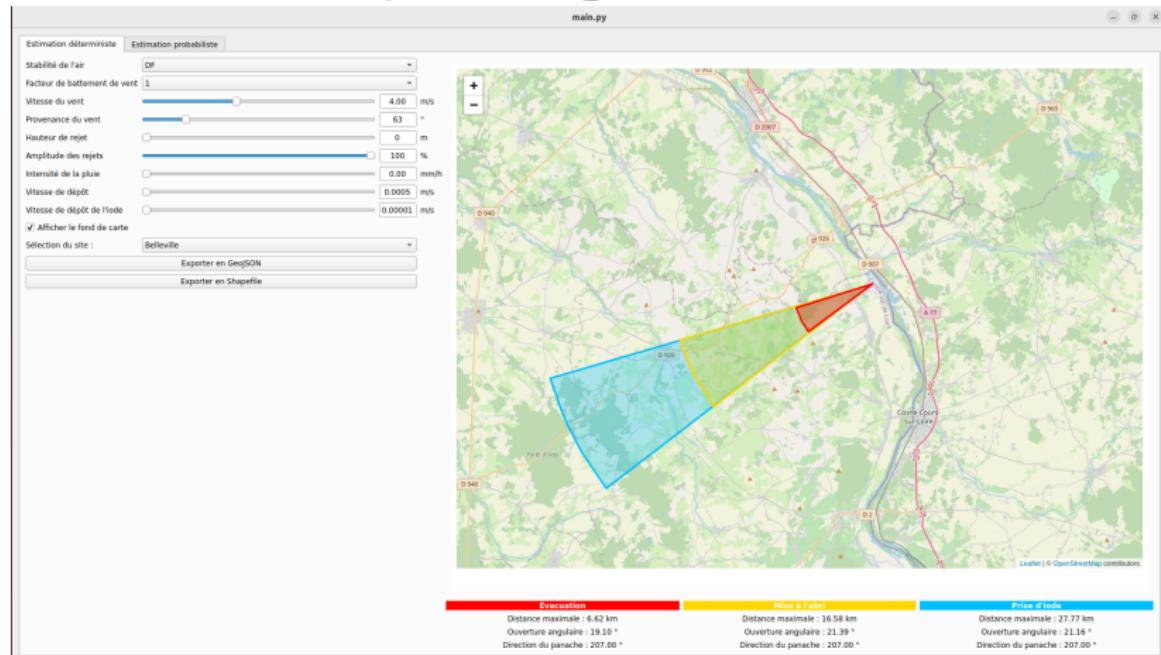
~ Fukunaga et Olsen (1971).

Le MAA fonctionne parfaitement...



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

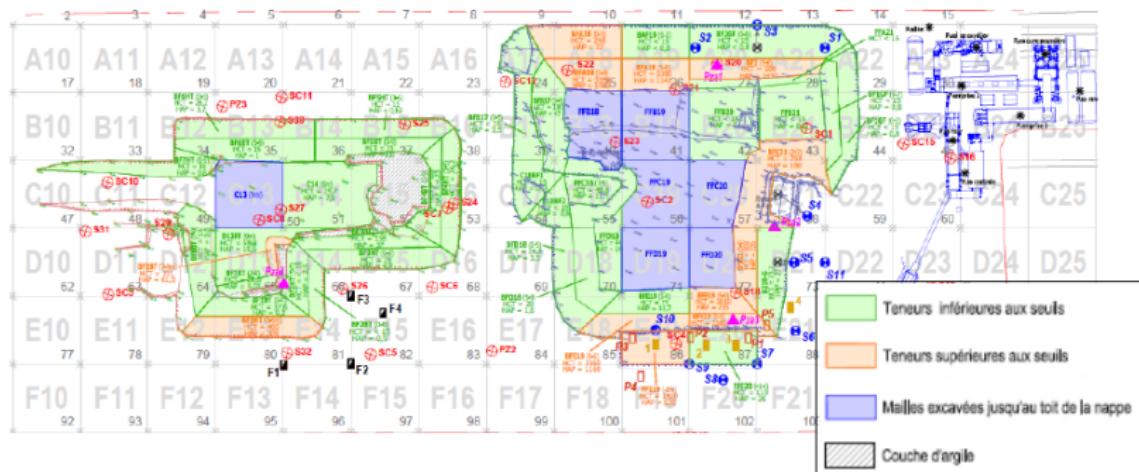
Modèle interactif pour la gestion de crise



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

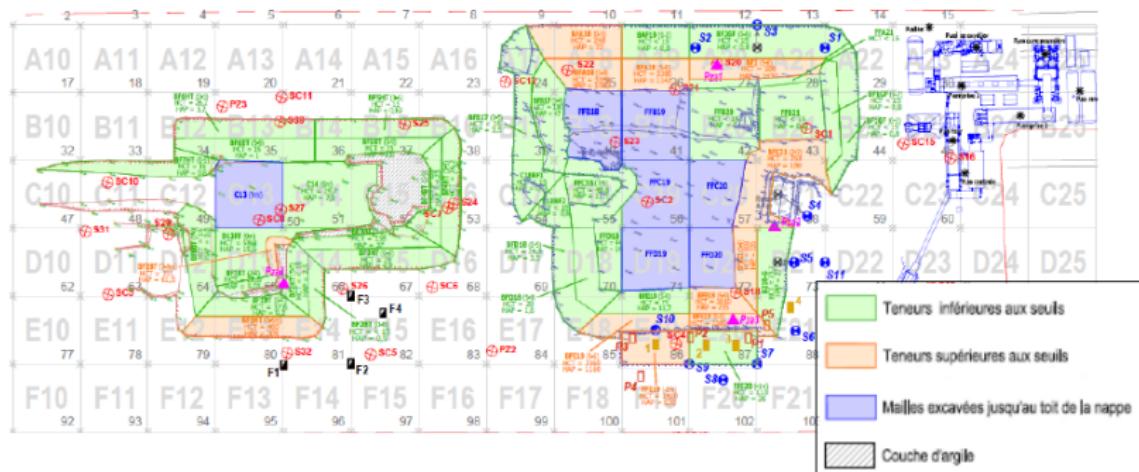
Les travaux de dépollution d'un ancien site industriel débutent après 4 ans d'études et un total de 78 sondages.



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.

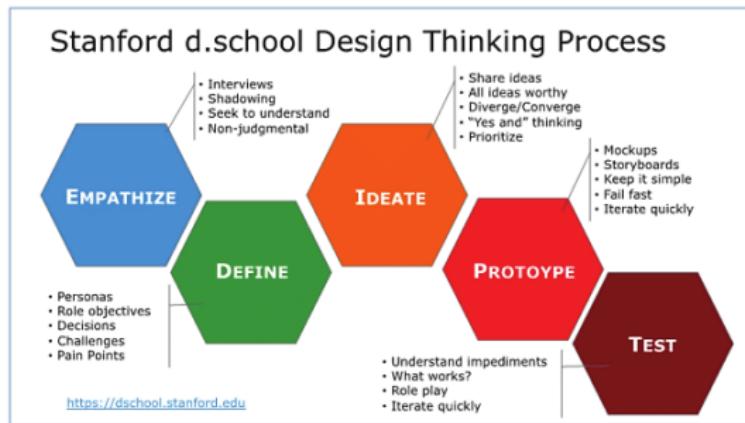




Greffé impossible et *design thinking*

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.



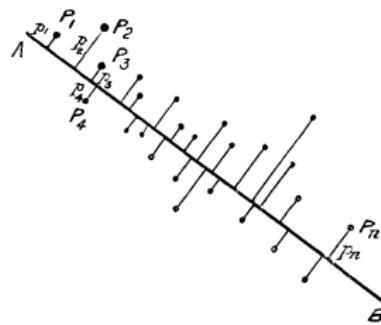
Le *design thinking* est une méthode de conception itérative par l'interaction avec les utilisateurs.

~ 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 ?

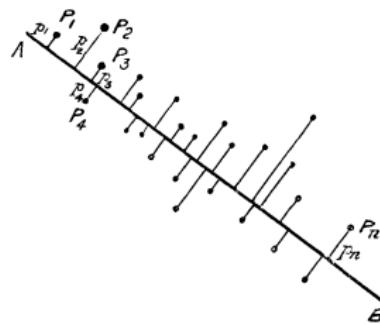
Pourquoi orthogonaliser ?

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



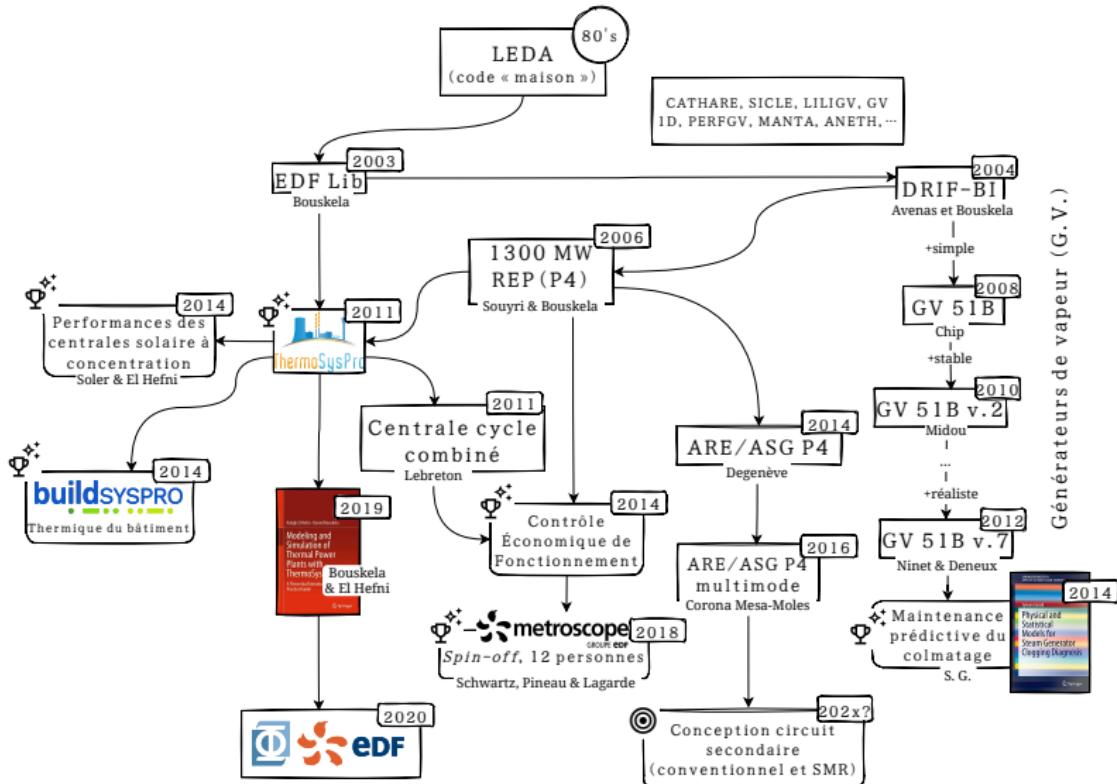
L'énoncé d'un fait partage avec lui une structure qui elle même ne peut être **dite**, seulement **montrée**. ↵ Wittgenstein (1993).

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.

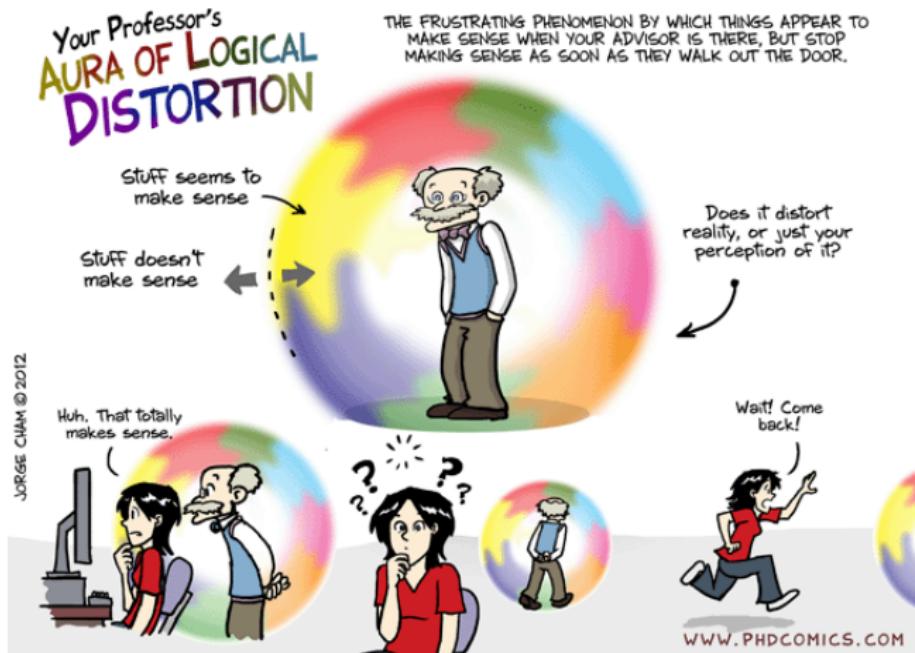
- ↪ « Autonomie et connaissance » (Varela 1989).
- ↪ « L'Esprit, ça ne marche pas comme ça » (Fodor 2003).

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).

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

Personnel et contextuel



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

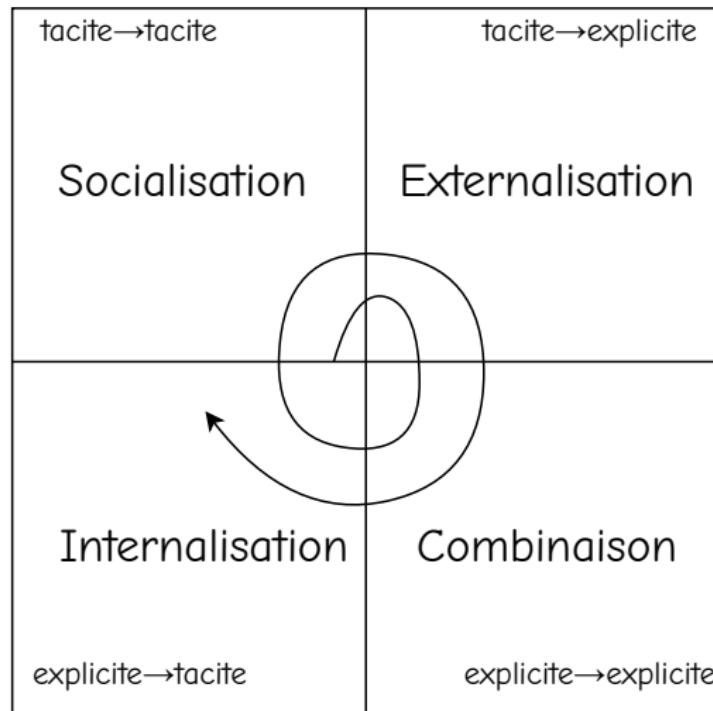
↗ Dowek (2019).

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

Personnel et contextuel

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 pas 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
<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.
- 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.
- 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>.