Rendre moins incertain l'avenir des énergies renouvelables

Margaux Zaffran

18 avril 2023

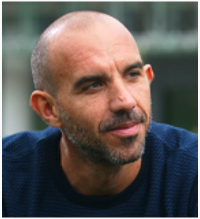
Mes directeurs de thèse

Aymeric Dieuleveut

Ecole Polytechnique
Paris

Olivier Féron

EDF R&D
FiME
Paris



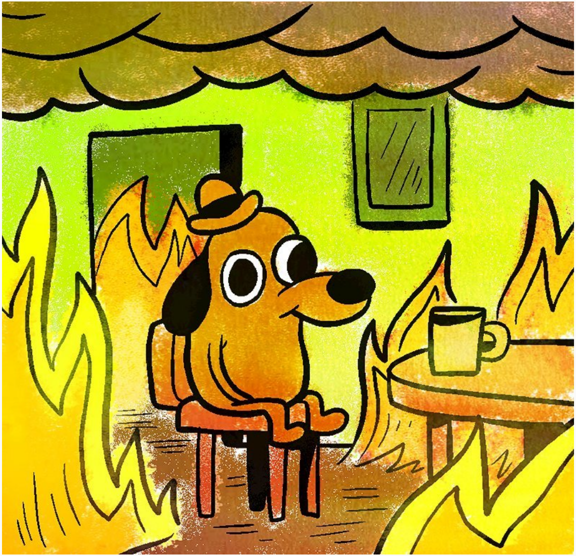
Yannig Goude

EDF R&D
LMO
Paris

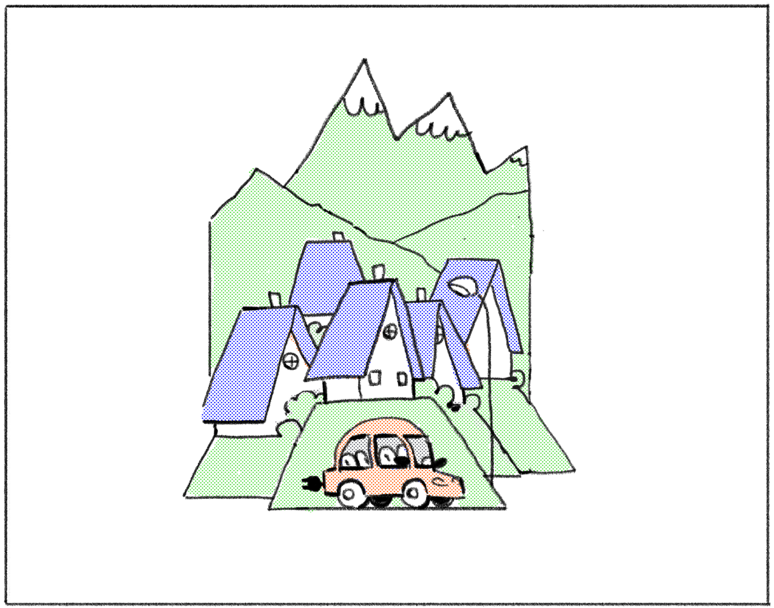
Julie Josse

INRIA
IDESP
Montpellier

Un petit coup au moral...

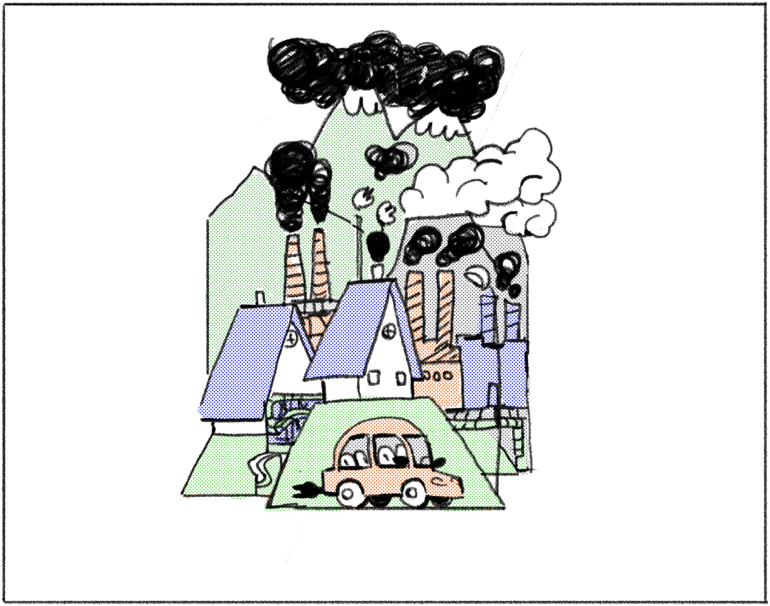


Électrification, électrification renouvelable



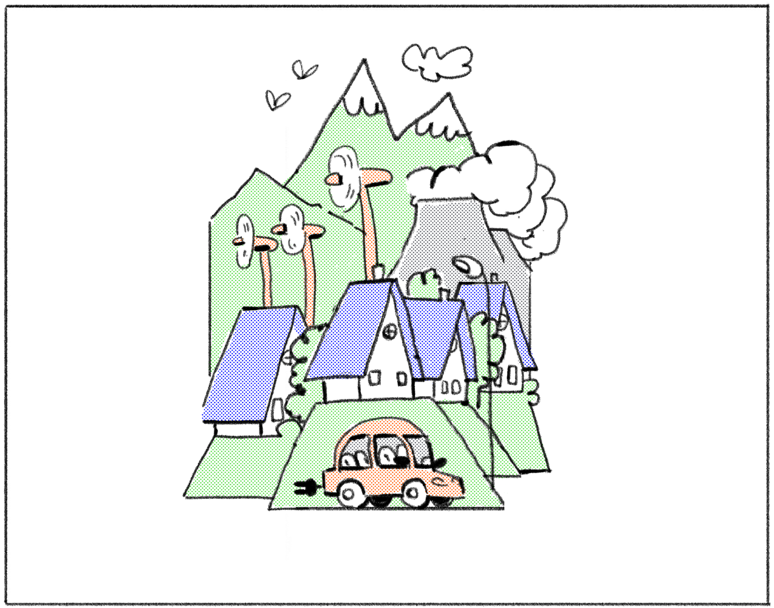
Illustrations @theoremlinger

Électrification, électrification renouvelable



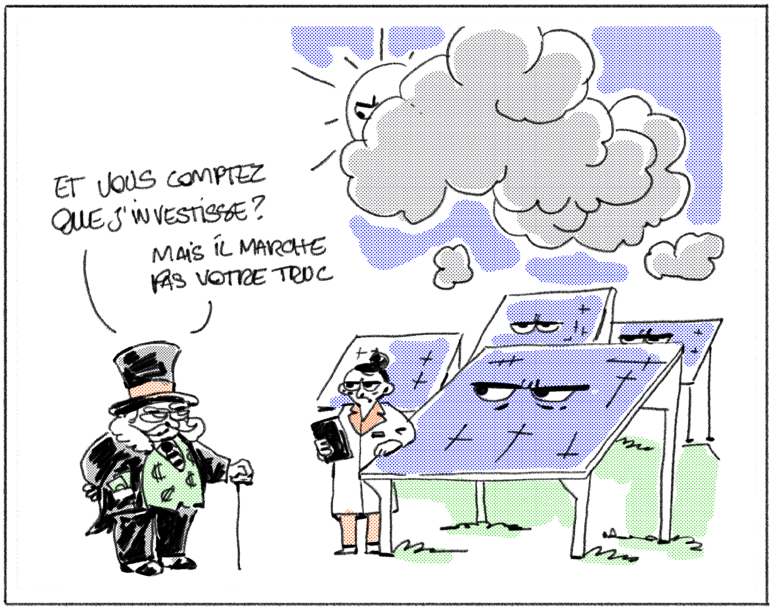
Illustrations @theoremlinger

Électrification, électrification renouvelable

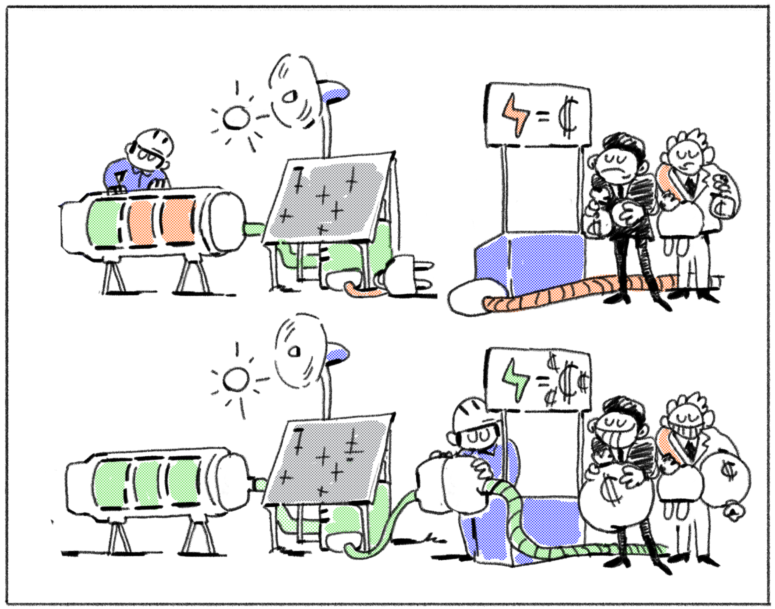


Illustrations @theoremlinger

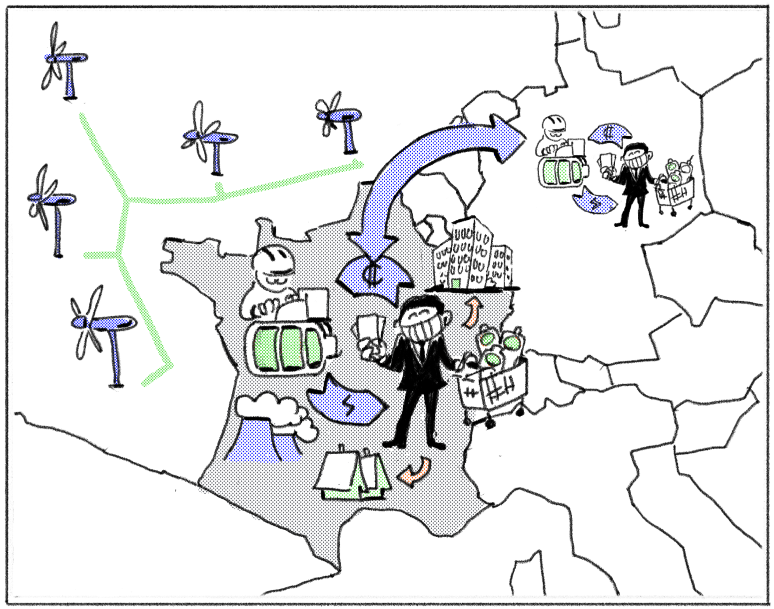
Une situation paradoxale



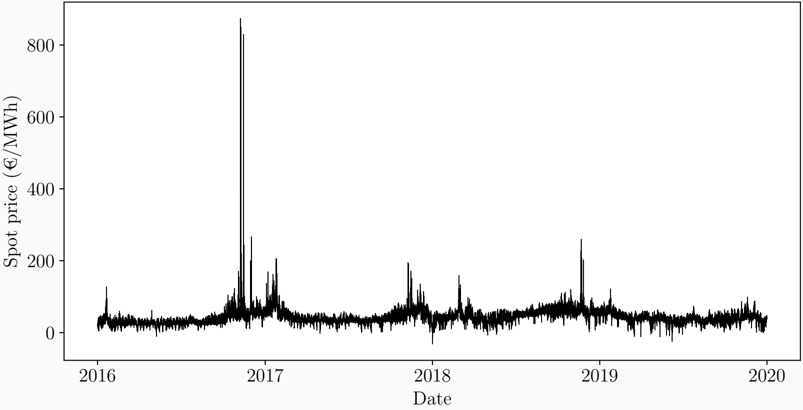
Vendre et stocker au bon moment !



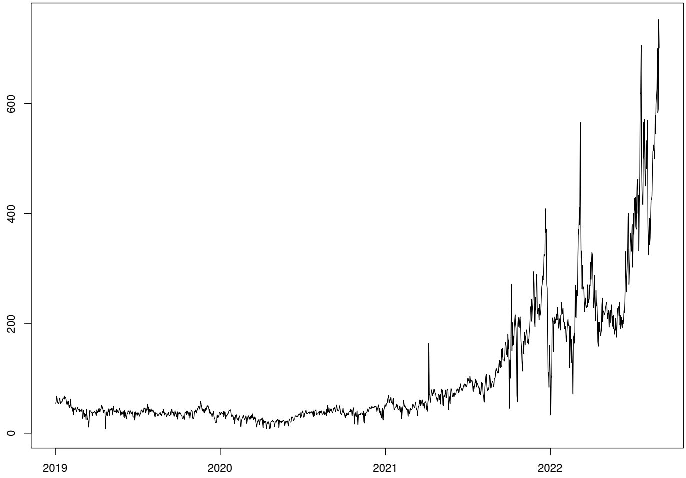
Mais au fait, à qui vendre ? Et qui vend ?



Visualisation des prix spot français de l'électricité

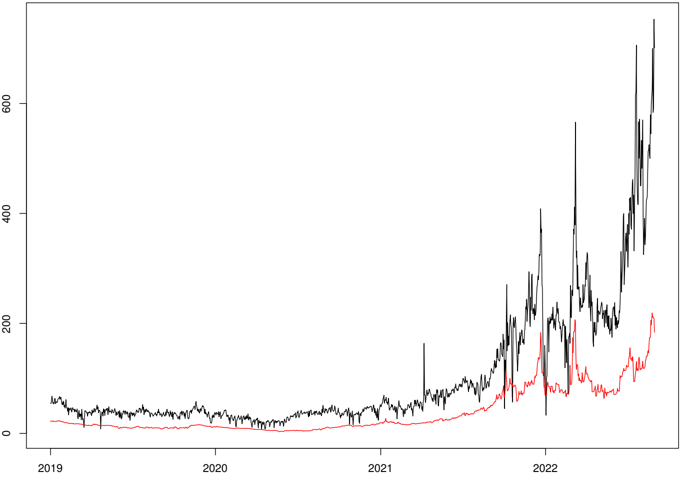


Visualisation des prix spot français de l'électricité



axe des y : prix, axe des x : temps

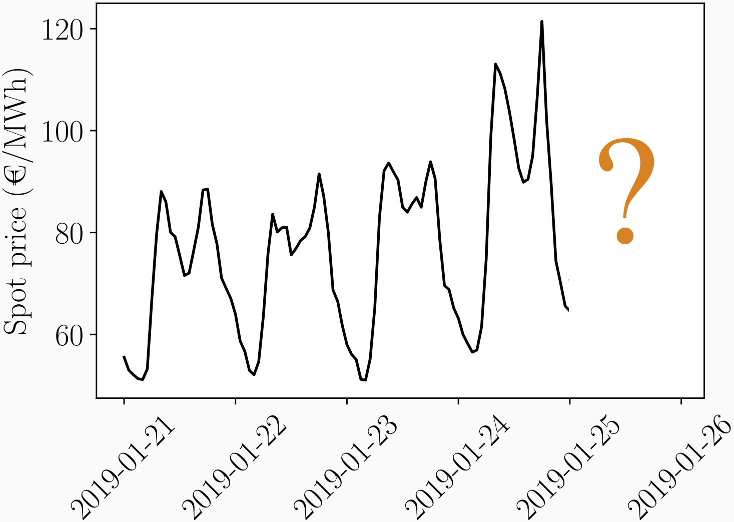
Visualisation des prix spot français de l'électricité



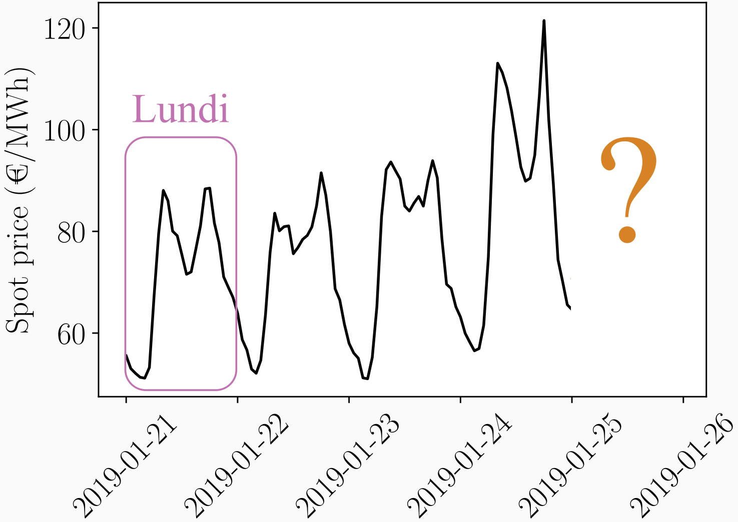
axe des y : prix (en rouge gaz), axe des x : temps

Essayons de prévoir les prix de l'électricité

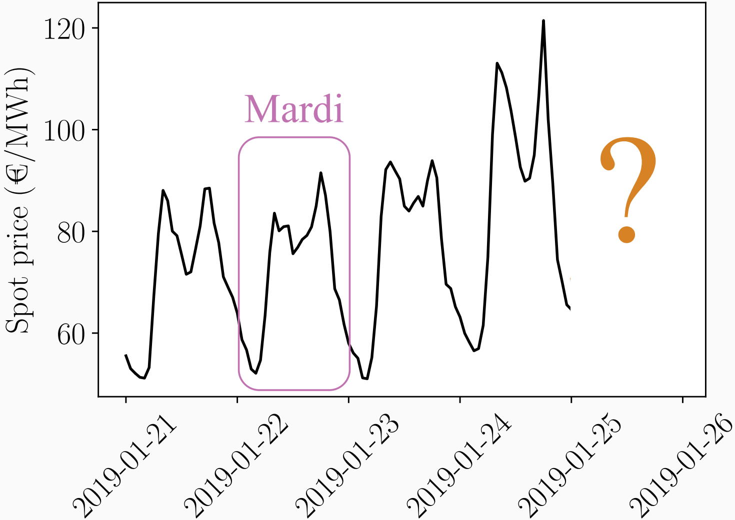
Objectif de prévision



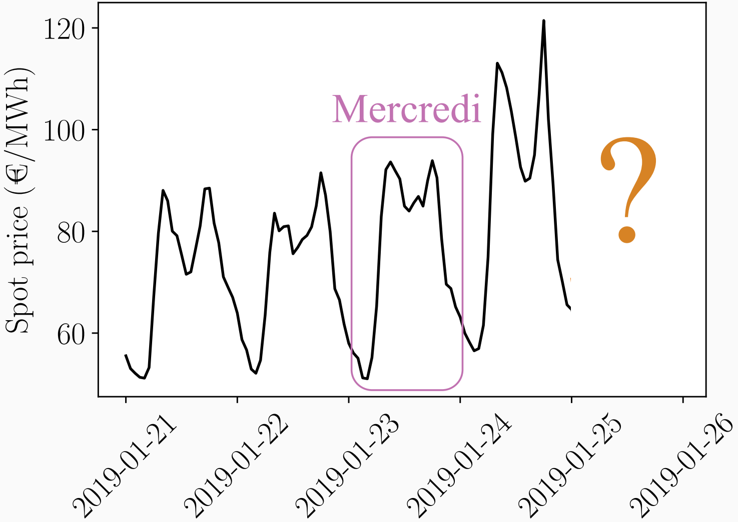
Objectif de prévision



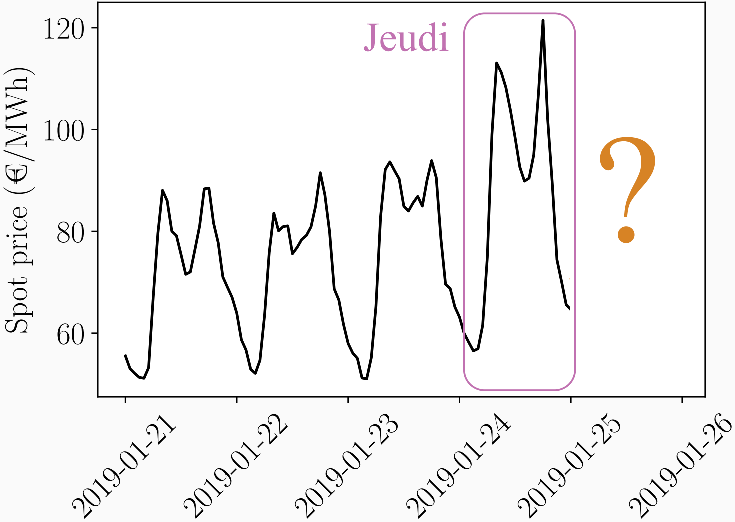
Objectif de prévision



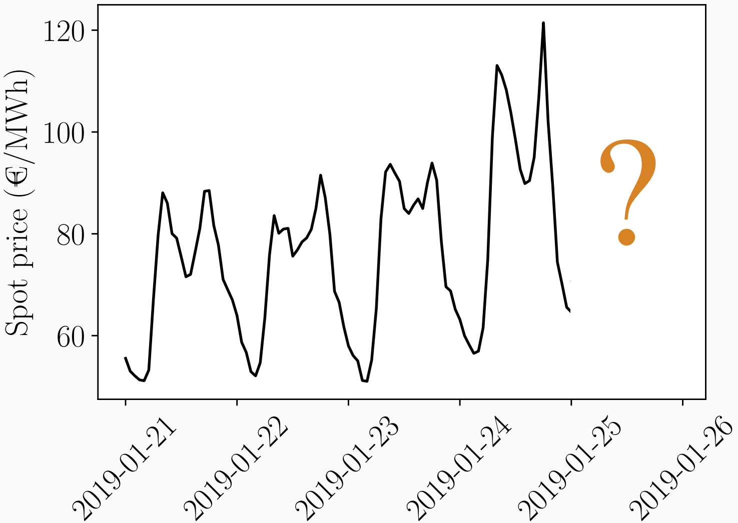
Objectif de prévision



Objectif de prévision



Objectif de prévision



Une première modélisation

Jour et heure	Prix	Prix J-1	Prix J-7
11/01/16 0PM	21.95	15.58	13.78
11/01/16 1PM	20.04	19.05	13.44
⋮	⋮	⋮	⋮
12/01/16 0PM	21.51	21.95	25.03
12/01/16 1PM	19.81	20.04	24.42
⋮	⋮	⋮	⋮
18/01/16 0PM	38.14	37.86	21.95
18/01/16 1PM	35.66	34.60	20.04
⋮	⋮	⋮	⋮

Une première modélisation

Jour et heure	Prix	Prix J-1	Prix J-7
11/01/16 0PM	**21.95**	15.58	13.78
11/01/16 1PM	**20.04**	19.05	13.44
⋮	⋮	⋮	⋮
12/01/16 0PM	**21.51**	21.95	25.03
12/01/16 1PM	**19.81**	20.04	24.42
⋮	⋮	⋮	⋮
18/01/16 0PM	**38.14**	37.86	21.95
18/01/16 1PM	**35.66**	34.60	20.04
⋮	⋮	⋮	⋮

Une première modélisation

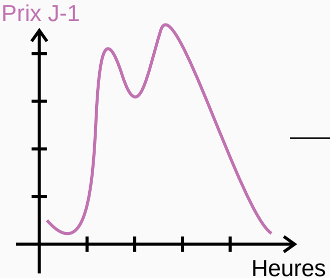
Jour et heure	Prix	Prix J-1	Prix J-7
11/01/16 0PM	**21.95**	15.58	13.78
11/01/16 1PM	**20.04**	19.05	13.44
⋮	⋮	⋮	⋮
12/01/16 0PM	**21.51**	21.95	25.03
12/01/16 1PM	**19.81**	20.04	24.42
⋮	⋮	⋮	⋮
18/01/16 0PM	**38.14**	37.86	21.95
18/01/16 1PM	**35.66**	34.60	20.04
⋮	⋮	⋮	⋮

$$\rightarrow \textbf{Prix} = f(\text{Prix J - 1}, \text{Prix J - 7}) + \varepsilon$$

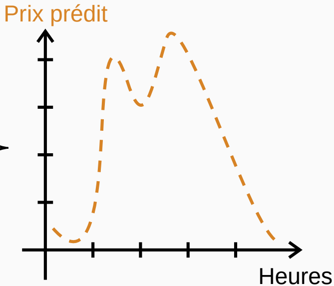
Des exemples de modèles

$$\text{Prix prédit} \approx f\Big(\text{Prix J-1}, \ \text{Prix J-7}\Big)$$

$$= \ \text{Prix J-1}$$



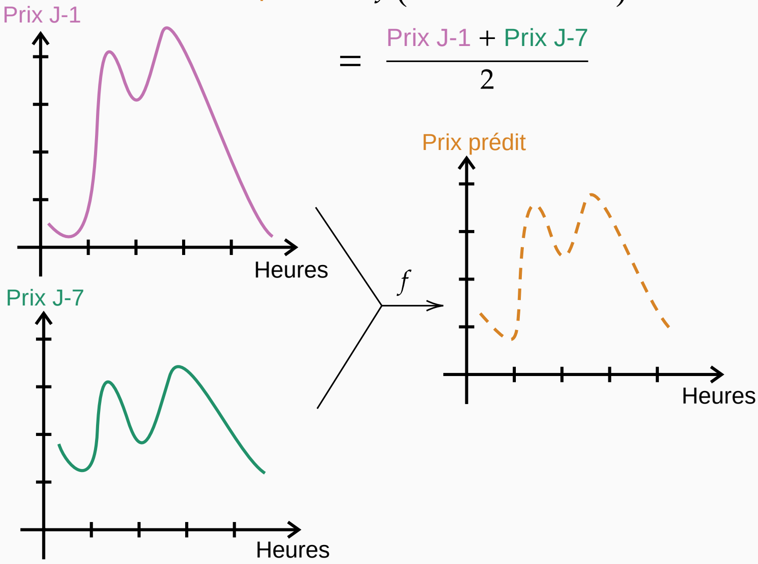
$\xrightarrow{f}$



Des exemples de modèles

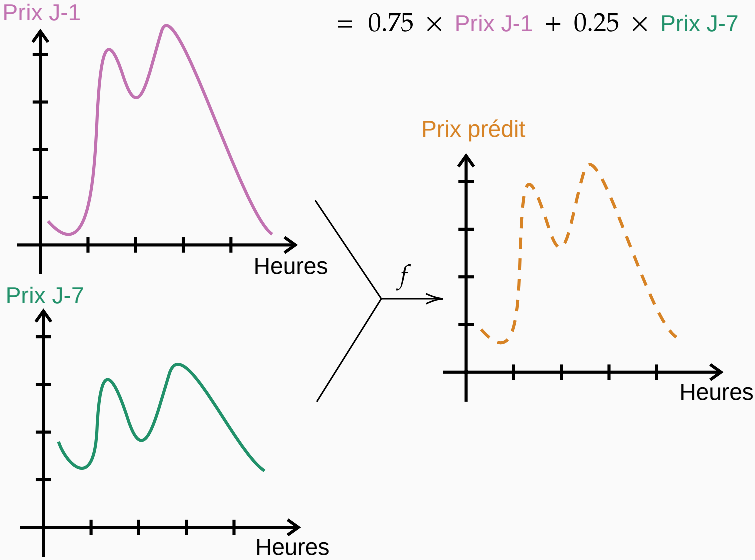
$$\text{Prix prédit} \approx f\big(\text{Prix J-1}, \ \text{Prix J-7}\big)$$

$$= \frac{\text{Prix J-1} + \text{Prix J-7}}{2}$$



Des exemples de modèles

$$\text{Prix prédit} \approx f(\text{Prix J-1}, \text{Prix J-7})$$
$$= 0.75 \times \text{Prix J-1} + 0.25 \times \text{Prix J-7}$$



Utiliser le passé pour évaluer les modèles

	Jour et heure	Prix	Prix J-1	Prix J-7
→	11/01/16 0PM	**21.95**	15.58	13.78
→	11/01/16 1PM	**20.04**	19.05	13.44
	⋮	⋮	⋮	⋮
→	12/01/16 0PM	**21.51**	21.95	25.03
→	12/01/16 1PM	**19.81**	20.04	24.42
	⋮	⋮	⋮	⋮
→	18/01/16 0PM	**38.14**	37.86	21.95
→	18/01/16 1PM	**35.66**	34.60	20.04
	⋮	⋮	⋮	⋮

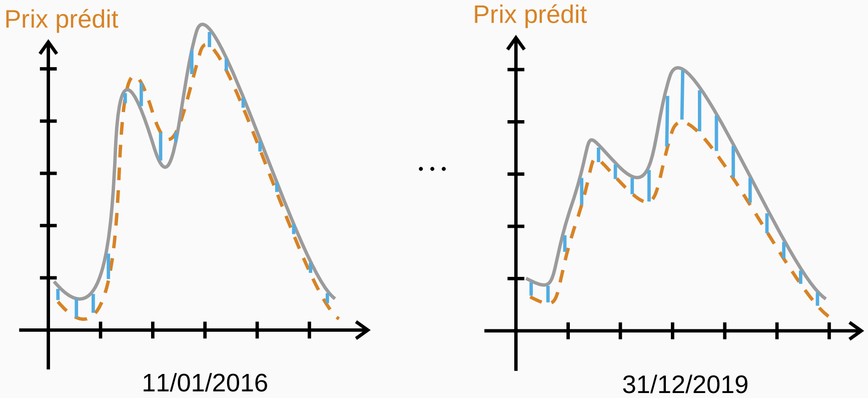
Utiliser le passé pour évaluer les modèles

	Jour et heure	Prix	Prix J-1	Prix J-7
$\rightarrow$	11/01/16 0PM	?	15.58	13.78
$\rightarrow$	11/01/16 1PM	?	19.05	13.44
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\rightarrow$	12/01/16 0PM	?	21.95	25.03
$\rightarrow$	12/01/16 1PM	?	20.04	24.42
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\rightarrow$	18/01/16 0PM	?	37.86	21.95
$\rightarrow$	18/01/16 1PM	?	34.60	20.04
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Utiliser le passé pour évaluer les modèles

	Jour et heure	Prix	Prix J-1	Prix J-7
$\rightarrow$	11/01/16 0PM	**21.95**	15.58	13.78
$\rightarrow$	11/01/16 1PM	**20.04**	19.05	13.44
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\rightarrow$	12/01/16 0PM	**21.51**	21.95	25.03
$\rightarrow$	12/01/16 1PM	**19.81**	20.04	24.42
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$\rightarrow$	18/01/16 0PM	**38.14**	37.86	21.95
$\rightarrow$	18/01/16 1PM	**35.66**	34.60	20.04
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

Évaluer les prédictions d'un modèle



erreur $=$ | prix réel − prix prédit |

Évaluer les fonctions f d'un groupe de candidates

Pour chaque modèle ou fonction f, on calcule l'**erreur moyenne empirique** :

$$\text{erreur empirique } (f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \text{erreur de } f \text{ sur l'exemple i}.$$

Évaluer les fonctions f d'un groupe de candidates

Pour chaque modèle ou fonction f, on calcule l'**erreur moyenne empirique** :

$$\text{erreur empirique } (f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \text{erreur de } f \text{ sur l'exemple i}.$$

Impossible de tester toutes les fonctions f possibles.
En pratique, on restreint notre recherche à $f \in \mathcal{F}$.

Évaluer les fonctions f d'un groupe de candidates

Pour chaque modèle ou fonction f, on calcule l'**erreur moyenne empirique** :

$$\text{erreur empirique } (f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \text{erreur de } f \text{ sur l'exemple i}.$$

Impossible de tester toutes les fonctions f possibles.
En pratique, on restreint notre recherche à $f \in \mathcal{F}$.

Exemple (modèle linéaire)

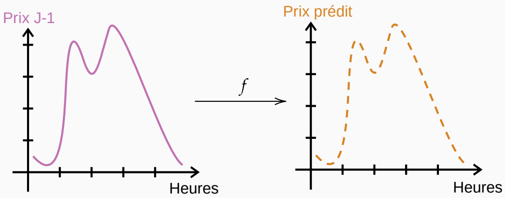
$$\mathcal{F} := \{ f \textit{ telles que}$$
$$f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma,$$
$$\textit{avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \}$$

Exemple (modèle linéaire)

$$\mathcal{F} := \{ f \text{ telles que } f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma, \text{ avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \}$$

Si $\beta = 1$ et $\delta = 0, \gamma = 0$ on retrouve la première fonction f.

$$\text{Prix prédit} \approx f(\text{Prix J-1}, \text{Prix J-7}) = \text{Prix J-1}$$

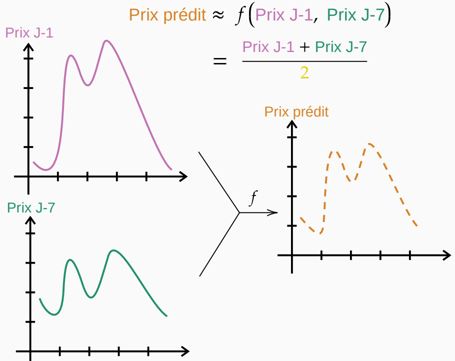


Groupe de candidates linéaires

Exemple (modèle linéaire)

$$\mathcal{F} := \{ f \textit{ telles que}$$
$$f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma,$$
$$\textit{avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \}$$

Si $\beta = \delta = 0.5$ et $\gamma = 0$ on retrouve la deuxième fonction f.

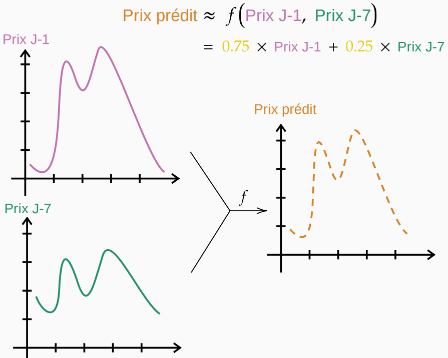


Groupe de candidates linéaires

Exemple (modèle linéaire)

$$\mathcal{F} := \{ f \text{ telles que}$$
$$f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma,$$
$$\text{avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \}$$

Si $\beta = 0.75$, $\delta = 0.25$ et $\gamma = 0$ on retrouve la troisième fonction f.



Trouver la meilleure fonction f parmi un groupe de candidates

Exemple (modèle linéaire)

$$\mathcal{F} := \Big\{ f \textit{ telles que}$$
$$f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma,$$
$$\textit{avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \Big\}$$

On cherche donc les **meilleures valeurs de** β**,** δ **et** γ pour que f donne des prédictions qui ressemblent au mieux à nos valeurs à prédire.

Trouver la meilleure fonction f parmi un groupe de candidates

Exemple (modèle linéaire)

$$\mathcal{F} := \{ f \textit{ telles que } \\ f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma, \\ \textit{avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \}$$

On cherche donc les **meilleures valeurs de β, δ et γ** pour que f donne des prédictions qui ressemblent au mieux à nos valeurs à prédire.

$\Rightarrow$ On cherche les valeurs de β, δ et γ telles que f donne des prédictions de **plus petite erreur moyenne empirique possible**.

Trouver la meilleure fonction f parmi un groupe de candidates

Exemple (modèle linéaire)

$$\mathcal{F} := \{ f \textit{ telles que } \\ f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma, \\ \textit{avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \}$$

On cherche donc les **meilleures valeurs de** β**,** δ **et** γ pour que f donne des prédictions qui ressemblent au mieux à nos valeurs à prédire.

$\Rightarrow$ On cherche les valeurs de β, δ et γ telles que f donne des prédictions de **plus petite erreur moyenne empirique possible**.

$$\boxed{f^* = \underset{f \in \mathcal{F}}{\text{argmin}} \{\text{erreur empirique } (f)\}}$$

Trouver la meilleure fonction f parmi un groupe de candidates

Exemple (modèle linéaire)

$$\mathcal{F} := \{ f \text{ telles que } \\ f(\textit{Prix J-1}, \textit{Prix J-7}) = \beta \times \textit{Prix J-1} + \delta \times \textit{Prix J-7} + \gamma, \\ \textit{avec } (\beta, \delta, \gamma) \in \mathbb{R}^3 \}$$

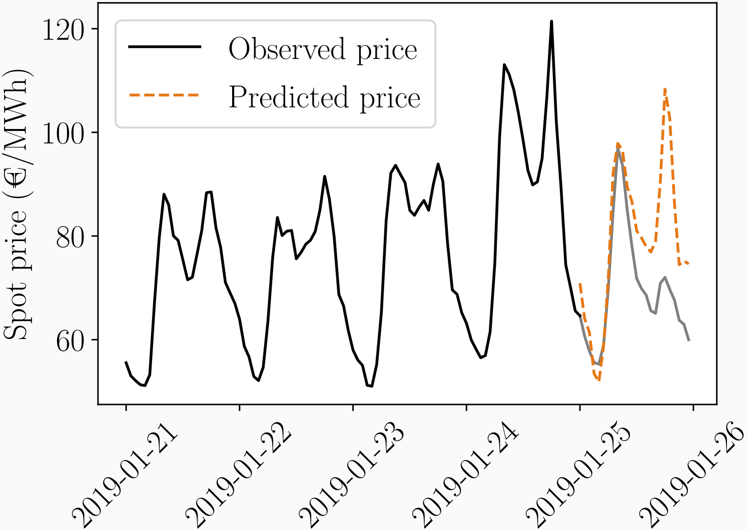
On cherche donc les **meilleures valeurs de β, δ et γ** pour que f donne des prédictions qui ressemblent au mieux à nos valeurs à prédire.

$\Rightarrow$ On cherche les valeurs de β, δ et γ telles que f donne des prédictions de **plus petite erreur moyenne empirique possible**.

$$\boxed{f^* = \underset{f \in \mathcal{F}}{\operatorname{argmin}} \{\text{erreur empirique } (f)\}}$$

$\hookrightarrow$ Réseau de neurones $\longrightarrow$ $\mathcal{F}$ plus riche

Voilà notre prévision



Et la fiabilité dans tout ça ?

Peut-on créer un indicateur de confiance des modèles ?

De l'importance des régions prédictives

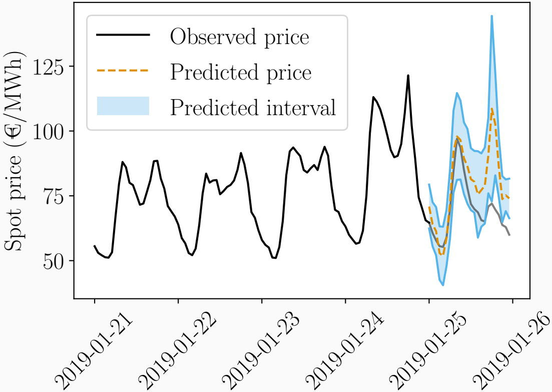
- "Demain, il fera 20° $\pm$ 1°" versus "Demain, il fera 20° $\pm$ 10°"

De l'importance des régions prédictives

- "Demain, il fera 20° $\pm$ 1°" versus "Demain, il fera 20° $\pm$ 10°"
- "Si vous prenez 1g de ce médicament, votre pression sanguine sera de 125 $\pm$ 5" versus "Si vous prenez 1g de ce médicament, votre pression sanguine sera de 125 $\pm$ 30"

De l'importance des régions prédictives

- "Demain, il fera 20° $\pm$ 1°" versus "Demain, il fera 20° $\pm$ 10°"
- "Si vous prenez 1g de ce médicament, votre pression sanguine sera de 125 $\pm$ 5" versus "Si vous prenez 1g de ce médicament, votre pression sanguine sera de 125 $\pm$ 30"
- Dans notre cas, on cherche à construire de tels intervalles :



Les objectifs d'une région prédictive

L'utilisateur choisit un **niveau de confiance** $1 - \alpha$.

Par exemple 0.9 (autrement dit 90%) correspond à $\alpha = 0.1$.

Les objectifs d'une région prédictive

L'utilisateur choisit un **niveau de confiance** $1 - \alpha$.

Par exemple 0.9 (autrement dit 90%) correspond à $\alpha = 0.1$.

Notons $\mathcal{C}_{0.9}(x)$ une région prédictive de niveau 90% en un point x.

Les objectifs d'une région prédictive

L'utilisateur choisit un **niveau de confiance** $1 - \alpha$.

Par exemple 0.9 (autrement dit 90%) correspond à $\alpha = 0.1$.

Notons $\mathcal{C}_{0.9}(x)$ une région prédictive de niveau 90% en un point x.

Celle-ci doit vérifier la propriété suivante :

$$\boxed{\mathbb{P}\left(Y \in \mathcal{C}_{0.9}(X)\right) \geq 0.9,}$$

tout en étant la plus petite possible.

Les objectifs d'une région prédictive

L'utilisateur choisit un **niveau de confiance** $1 - \alpha$.
Par exemple 0.9 (autrement dit 90%) correspond à $\alpha = 0.1$.

Notons $\mathcal{C}_{0.9}(x)$ une région prédictive de niveau 90% en un point x.

Celle-ci doit vérifier la propriété suivante :

$$\boxed{\mathbb{P}\left(Y \in \mathcal{C}_{0.9}(X)\right) \geq 0.9,}$$

tout en étant la plus petite possible.

Une méthode existe, et est même utilisée par Amazon ou The Washington post !

Les objectifs d'une région prédictive

L'utilisateur choisit un **niveau de confiance** $1-\alpha$.
Par exemple 0.9 (autrement dit 90%) correspond à $\alpha = 0.1$.

Notons $\mathcal{C}_{0.9}(x)$ une région prédictive de niveau 90% en un point x.

Celle-ci doit vérifier la propriété suivante :

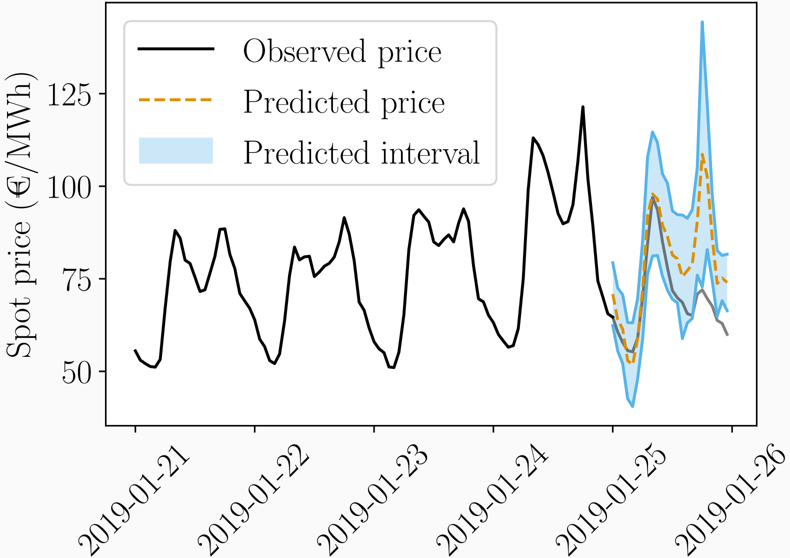
$$\boxed{\mathbb{P}\left(Y \in \mathcal{C}_{0.9}(X)\right) \geq 0.9,}$$

tout en étant la plus petite possible.

Une méthode existe, et est même utilisée par Amazon ou The Washington post !

$\hookrightarrow$ Principe : utiliser les erreurs effectuées dans le passé pour en déduire l'ordre de grandeur de l'erreur que le modèle fait aujourd'hui.

Revenons-en aux prix de l'électricité



Conclusion

Messages à retenir

- Les mathématiques peuvent permettre de faire des prédictions

Messages à retenir

- Les mathématiques peuvent permettre de faire des prédictions
- Applicable pour des problèmes sociétaux

Messages à retenir

- Les mathématiques peuvent permettre de faire des prédictions
- Applicable pour des problèmes sociétaux
- Ne jamais interpréter des prédictions ponctuelles

Messages à retenir

- Les mathématiques peuvent permettre de faire des prédictions
- Applicable pour des problèmes sociétaux
- Ne jamais interpréter des prédictions ponctuelles
- Offrir des garanties aux citoyens

Messages à retenir

- Les mathématiques peuvent permettre de faire des prédictions
- Applicable pour des problèmes sociétaux
- Ne jamais interpréter des prédictions ponctuelles
- Offrir des garanties aux citoyens
- Transversalité et universalité des mathématiques