

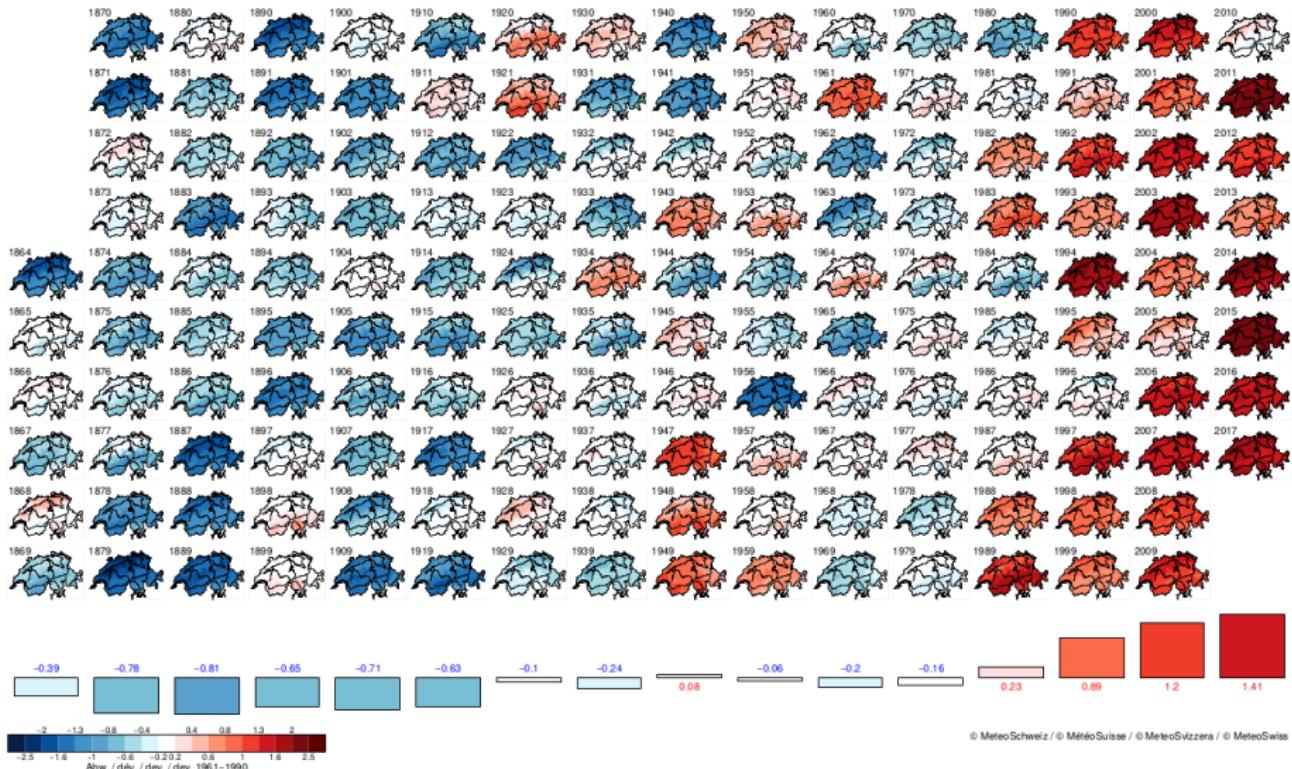
# Des aspects de la transition énergétique et leurs effets sur les réseaux électriques

Laurent Pagnier

le 4 avril 2019

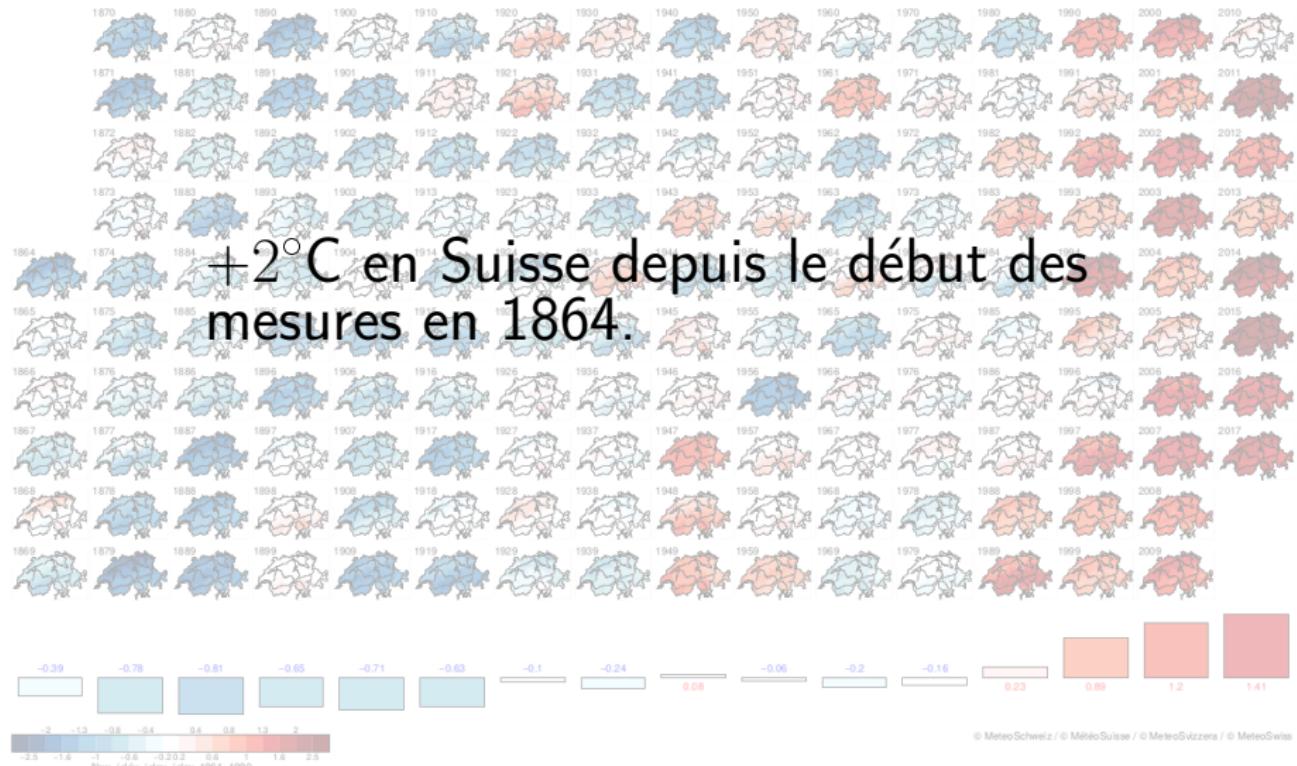


# Avant-propos : le changement climatique



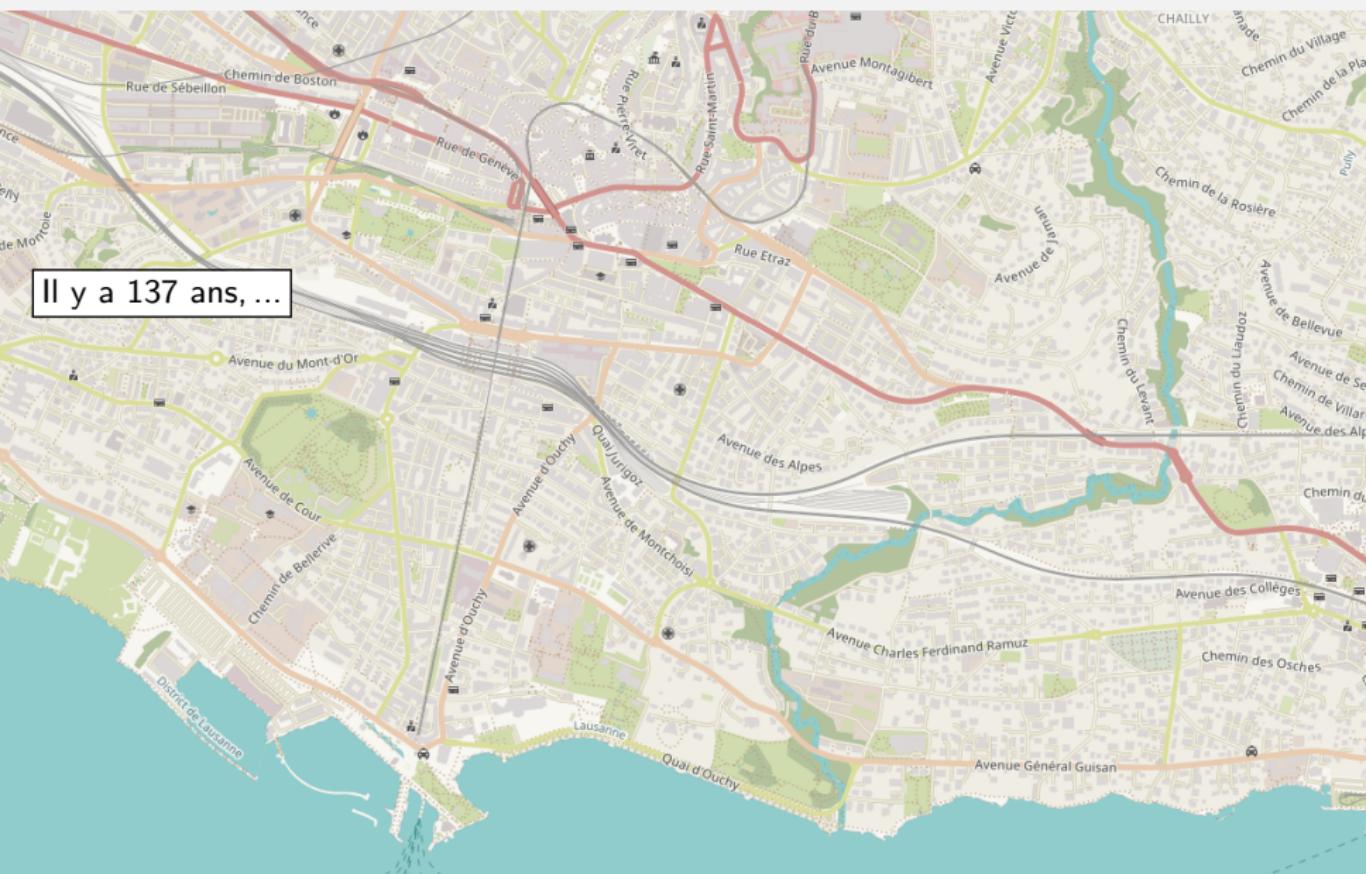
Source : MeteoSuisse

# Avant-propos : le changement climatique

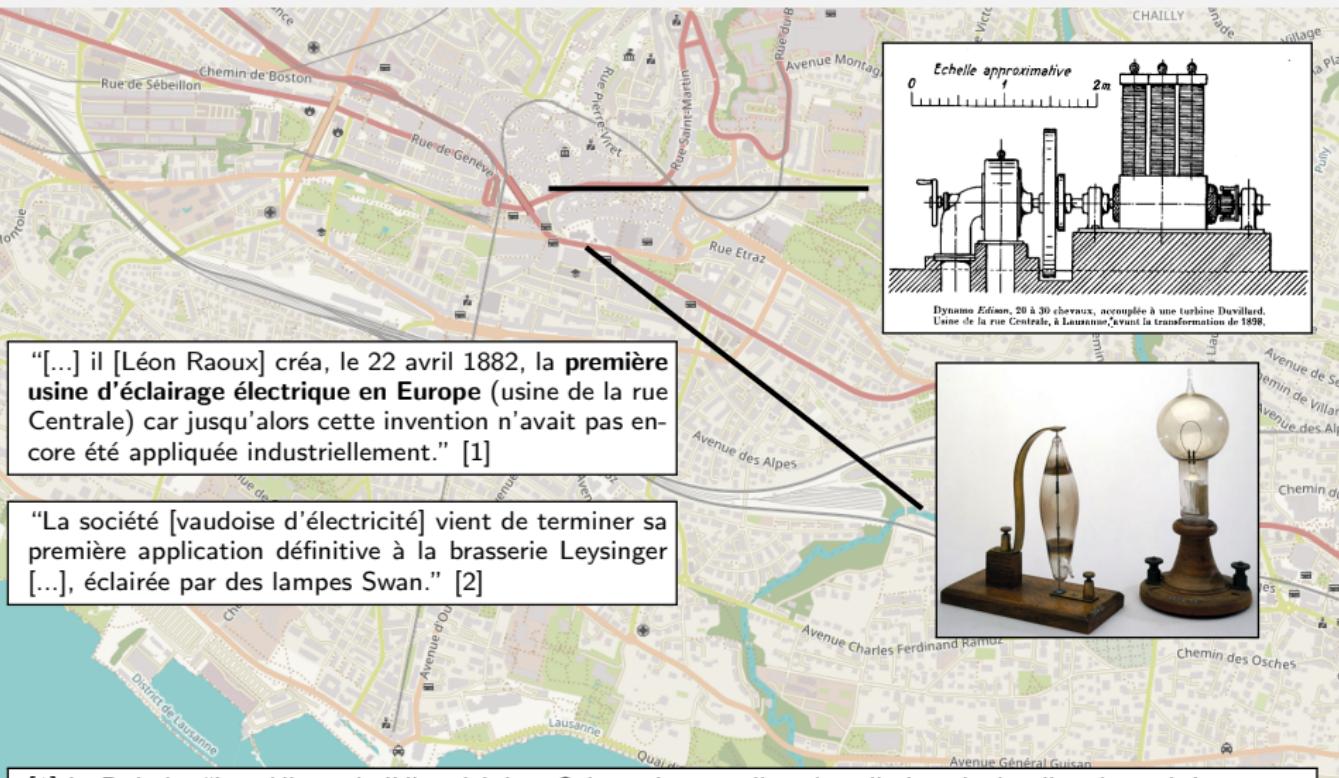


Source : Meteosuisse

# Avant-propos : deux naissances remarquables à Lausanne



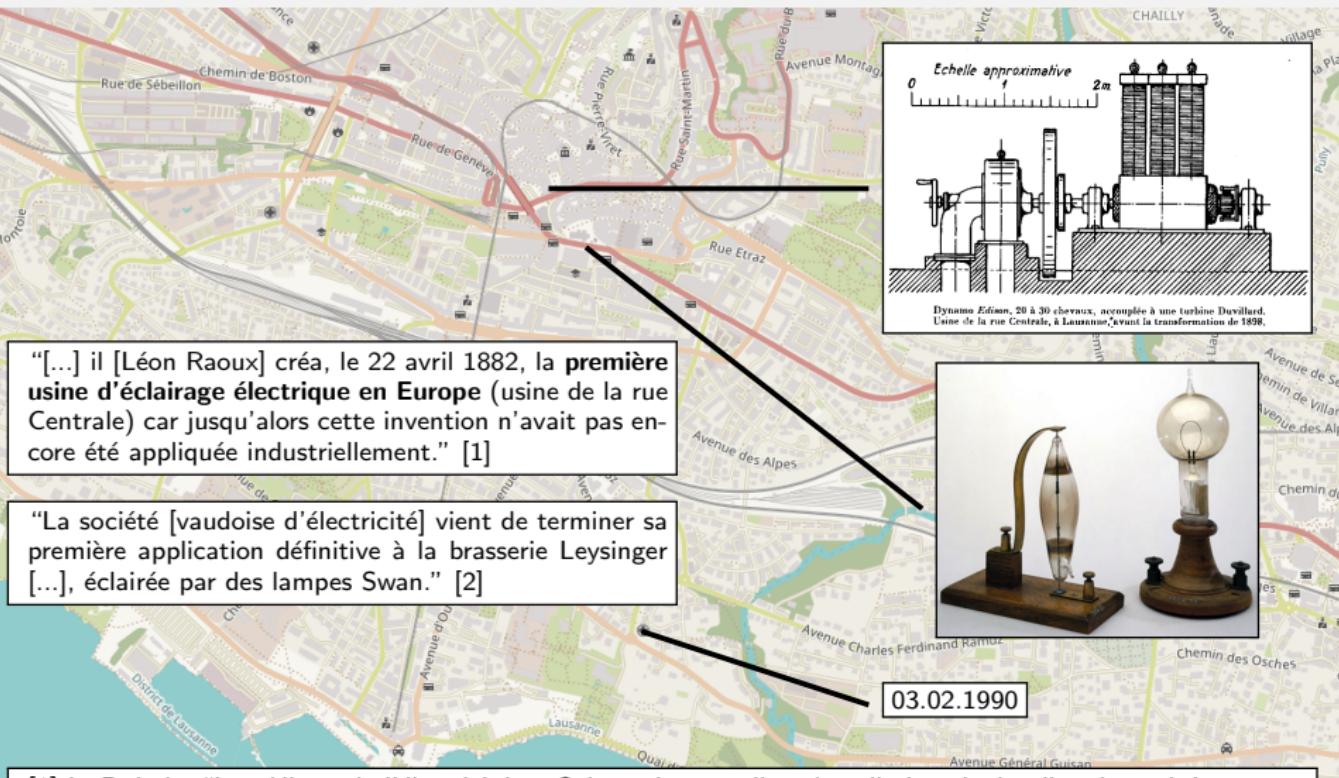
# Avant-propos : deux naissances remarquables à Lausanne



[1] L. Dubois, "Les débuts de l'électricité en Suisse : les premières installations hydro-électriques à Lausanne, en 1882", *Bulletin technique de la Suisse romande*, 1938

[2] "La lumière électrique à Lausanne", *Le Conteur vaudois : journal de la Suisse romande*, 29.04.1882

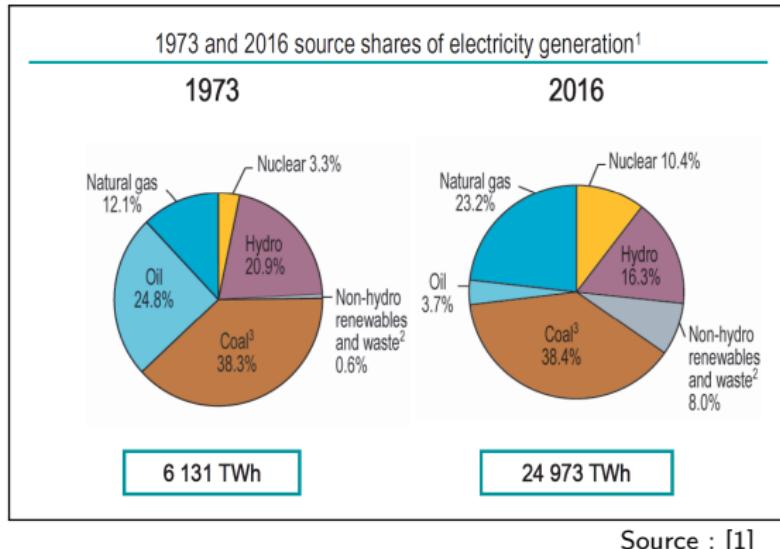
# Avant-propos : deux naissances remarquables à Lausanne



[1] L. Dubois, "Les débuts de l'électricité en Suisse : les premières installations hydro-électriques à Lausanne, en 1882", *Bulletin technique de la Suisse romande*, 1938

[2] "La lumière électrique à Lausanne", *Le Conteur vaudois : journal de la Suisse romande*, 29.04.1882

# Avant-propos : la production d'électricité en Suisse et dans le monde

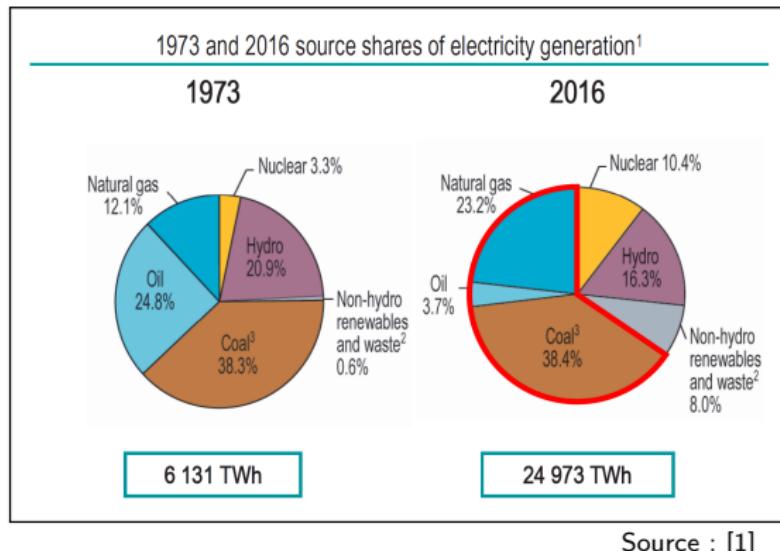


[1] "Key world energy statistics", International Energy Agency (IEA), 2018

[2] "Statistique suisse de l'électricité 2017", Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018

# Avant-propos : la production d'électricité en Suisse et dans le monde

Près des **deux** tiers de l'électricité est encore produite par des sources émettant du CO<sub>2</sub>.

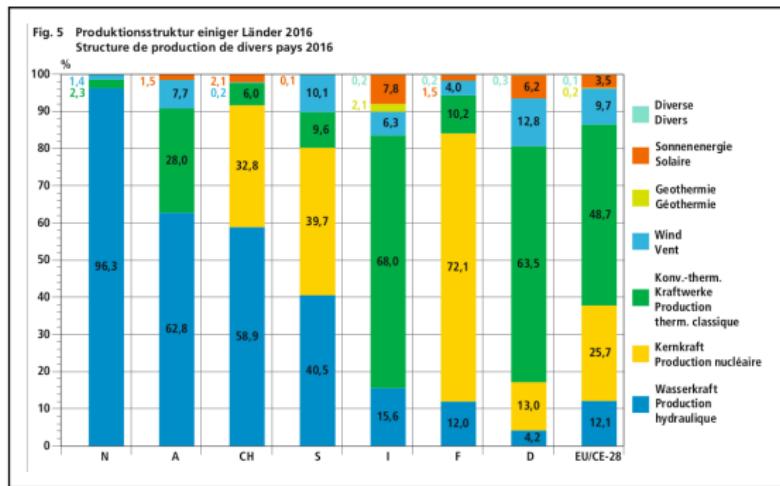


[1] "Key world energy statistics", International Energy Agency (IEA), 2018

[2] "Statistique suisse de l'électricité 2017", Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018

# Avant-propos : la production d'électricité en Suisse et dans le monde

En Europe, les mix énergétiques varient fortement d'un pays à un autre.



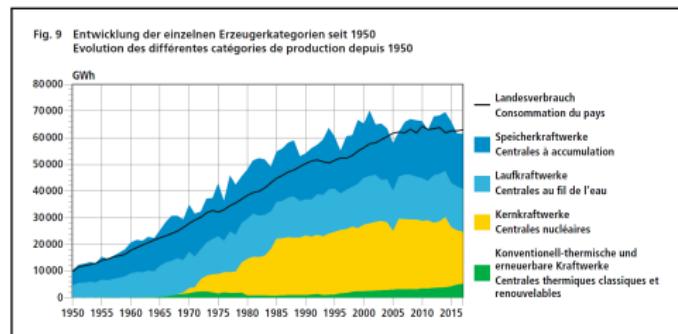
Source : [2]

[1] "Key world energy statistics", International Energy Agency (IEA), 2018

[2] "Statistique suisse de l'électricité 2017", Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018

# Avant-propos : la production d'électricité en Suisse et dans le monde

## Le mix énergétique suisse :



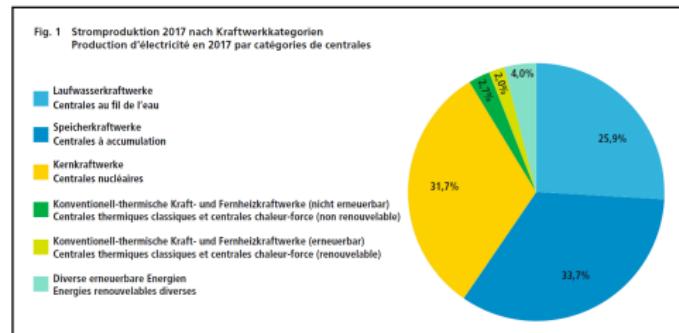
Source : [2]

[1] "Key world energy statistics", International Energy Agency (IEA), 2018

[2] "Statistique suisse de l'électricité 2017", Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018

# Avant-propos : la production d'électricité en Suisse et dans le monde

## Le mix énergétique suisse :



Source : [2]

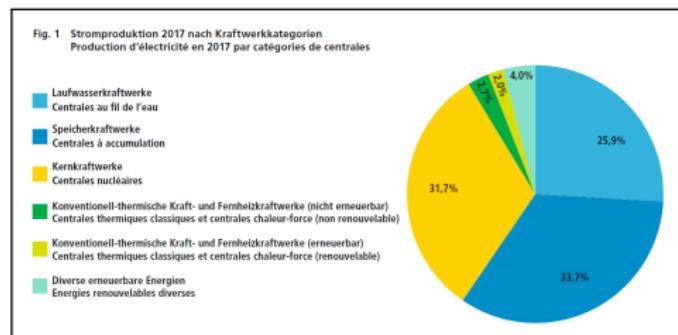
- des émissions “marginales” de CO<sub>2</sub> négligeables
- une faible pénétration des renouvelables
- une production assez flexible

[1] “Key world energy statistics”, International Energy Agency (IEA), 2018

[2] “Statistique suisse de l'électricité 2017”, Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018

# Avant-propos : la production d'électricité en Suisse et dans le monde

## Le mix énergétique suisse :



Source : [2]

"La Suisse bonne élève en matière de transition énergétique.", **Le Temps**, le 27 mars 2019

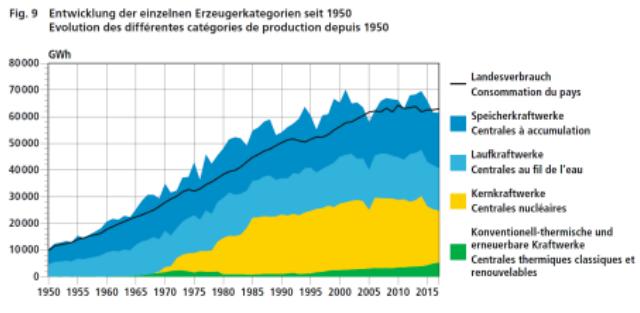
- des émissions "marginales" de CO<sub>2</sub> négligeables
- une faible pénétration des renouvelables
- une production assez flexible

[1] "Key world energy statistics", International Energy Agency (IEA), 2018

[2] "Statistique suisse de l'électricité 2017", Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018

# Avant-propos : la production d'électricité en Suisse et dans le monde

## Le mix énergétique suisse :



Source : [2]

"La Suisse bonne élève en matière de transition énergétique.", **Le Temps**, le 27 mars 2019

**Albert Maret (1900 – 1984)**

Réalisations : barrages de Mauvoisin, de Salanfe et d'Emosson

**Construction de la Grande-Dixence :**

"Opération béton" (1953) de Jean-Luc Godard



[1] "Key world energy statistics", International Energy Agency (IEA), 2018

[2] "Statistique suisse de l'électricité 2017", Office fédéral de l'énergie (OFEN), 2018

# Avant-propos : la transition énergétique en Europe

Les énergies fossiles sont progressivement remplacées par les nouvelles énergies renouvelables.

## Énergies conventionnelles :

- centrales
- dispatchables (généralement)
- générateurs synchrones
- coût du combustible



## Nouvelles énergies renouvelables (NER) :

- génération distribuée
- non-dispatchables & fluctuantes
- onduleurs
- coûts marginaux négligeables



# Avant-propos : la transition énergétique en Europe

Les énergies fossiles sont progressivement remplacées par les nouvelles énergies renouvelables.

## Énergies conventionnelles :

- centrales
- dispatchables (généralement)
- générateurs synchrones
- coût du combustible



## Nouvelles énergies renouvelables (NER) :

- génération distribuée
- non-dispatchables & fluctuantes
- onduleurs
- coûts marginaux négligeables



Les NER diffèrent des énergies conventionnelles à plusieurs égards.

↳ *Comment sera produite notre électricité dans le futur ?*

# Avant-propos : la transition énergétique en Europe

Les énergies fossiles sont progressivement remplacées par les nouvelles énergies renouvelables.

## Énergies conventionnelles :

- centrales
- dispatchables (généralement)
- générateurs synchrones
- coût du combustible



## Nouvelles énergies renouvelables (NER) :

- génération distribuée
- non-dispatchables & fluctuantes
- onduleurs
- coûts marginaux négligeables

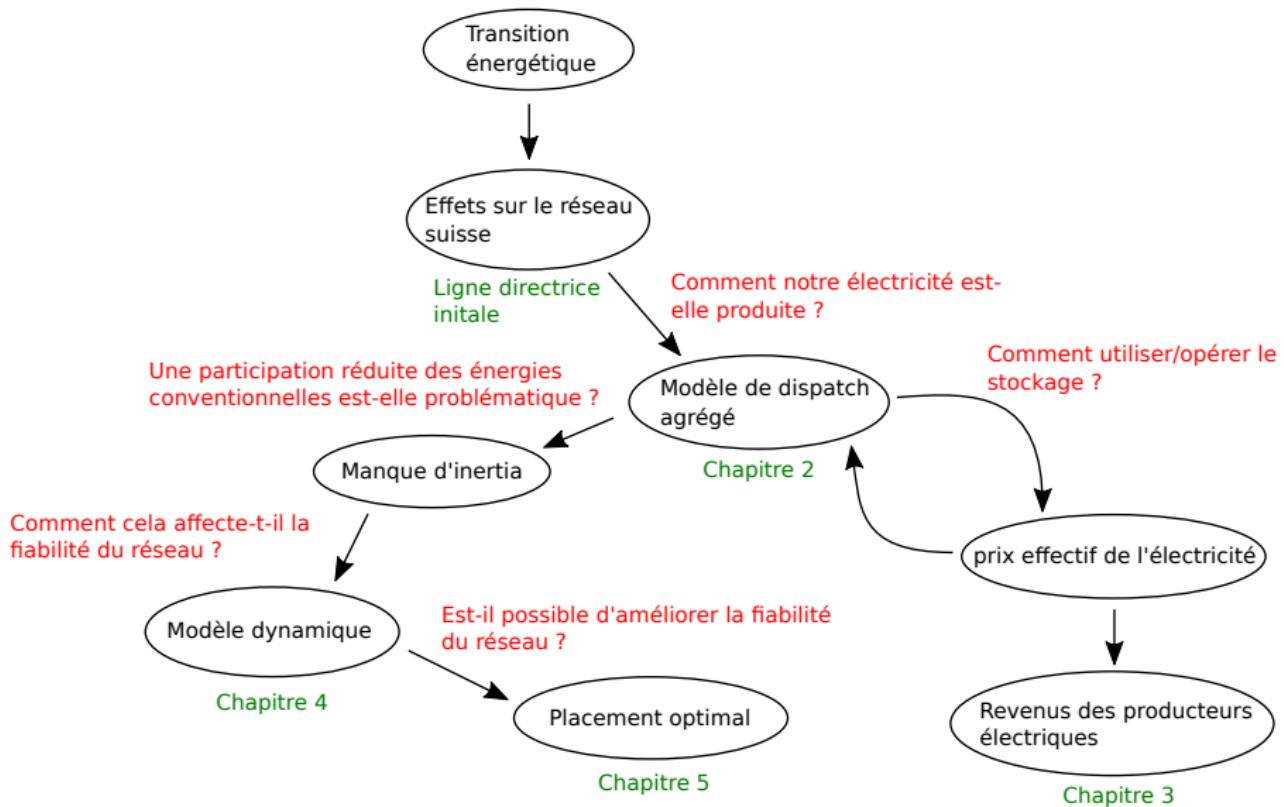


Les NER diffèrent des énergies conventionnelles à plusieurs égards.

↳ *Comment sera produite notre électricité dans le futur ?*

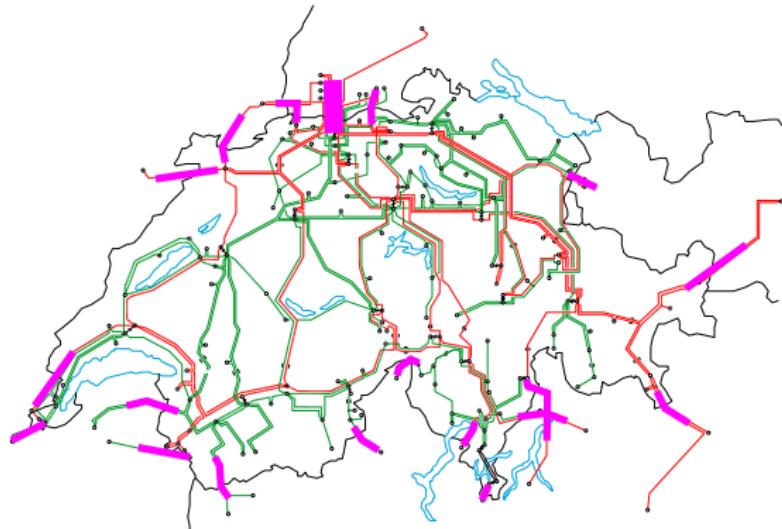
Union Européenne : 20/20/20, Suisse : stratégie énergétique 2050, ...

# Structure de ma thèse



## Les prémisses de nos investigations

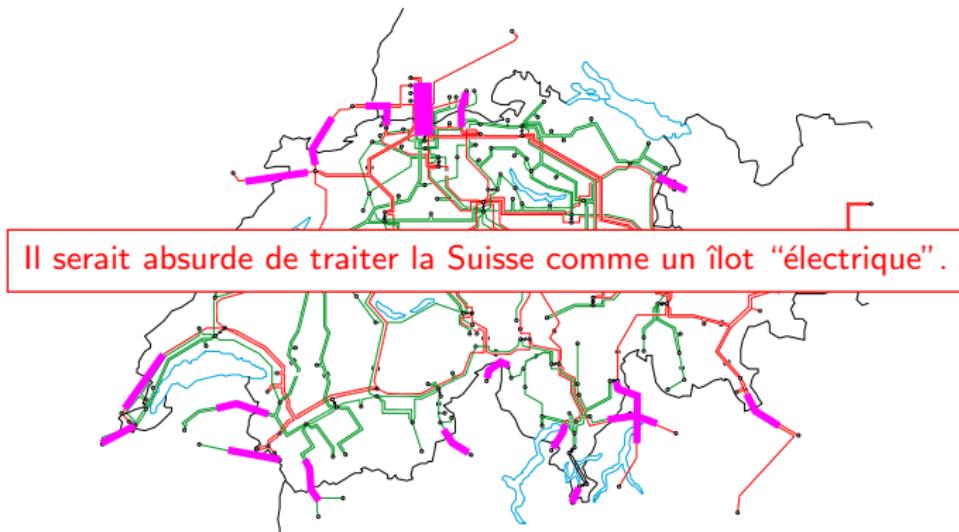
La Suisse est un îlot (politique) en Europe, néanmoins son **réseau électrique** est **fortement connecté** à ceux de ses voisins. (Les interconnections suisses représentent ~15% des lignes internationales en Europe.)



De grands flux de puissance transitent par le réseau suisse.

## Les prémisses de nos investigations

La Suisse est un îlot (politique) en Europe, néanmoins son **réseau électrique** est **fortement connecté** à ceux de ses voisins. (Les interconnections suisses représentent ~15% des lignes internationales en Europe.)

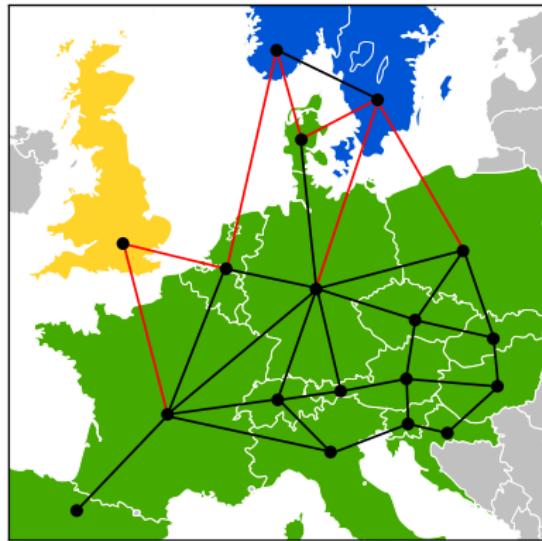


De grands flux de puissance transitent par le réseau suisse. Nous devons modéliser les réseaux de nos voisins.

# Un modèle agrégé de production et de transmission

Il trouve les profiles de production qui minimisent les coûts :

- de production
- dus au pompage-turbinage
- dus aux flux de puissance électrique
- dus à la restriction ("curtailment") des NER



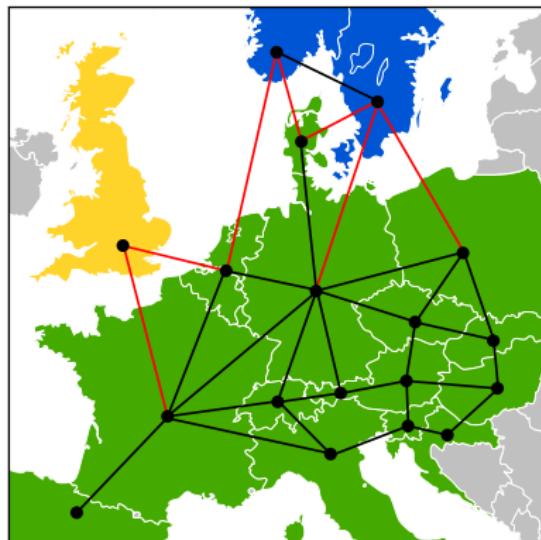
# Un modèle agrégé de production et de transmission

Il trouve les profiles de production qui minimisent les coûts :

- de production
- dus au pompage-turbinage
- dus aux flux de puissance électrique
- dus à la restriction ("curtailment") des NER

suivant les contraintes suivantes :

- puissances installées
- montées en puissance
- limites thermiques des lignes
- capacités des barrages



# Un modèle agrégé de production et de transmission

Il trouve les profiles de production qui minimisent les coûts :

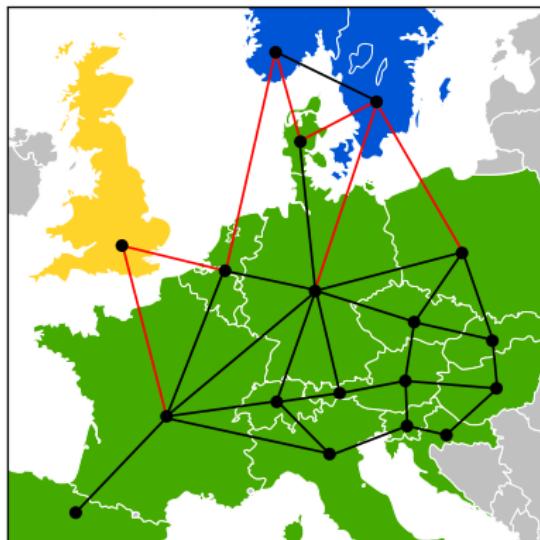
- de production
- dus au pompage-turbinage
- dus aux flux de puissance électrique
- dus à la restriction ("curtailment") des NER

suivant les contraintes suivantes :

- puissances installées
- montées en puissance
- limites thermiques des lignes
- capacités des barrages

Approximations :

- transmission sans perte
- parfaites prévisions des productions des NER
- zones en "plaques de cuivre"



# Un modèle agrégé de production et de transmission

Il trouve les profiles de production qui minimisent les coûts :

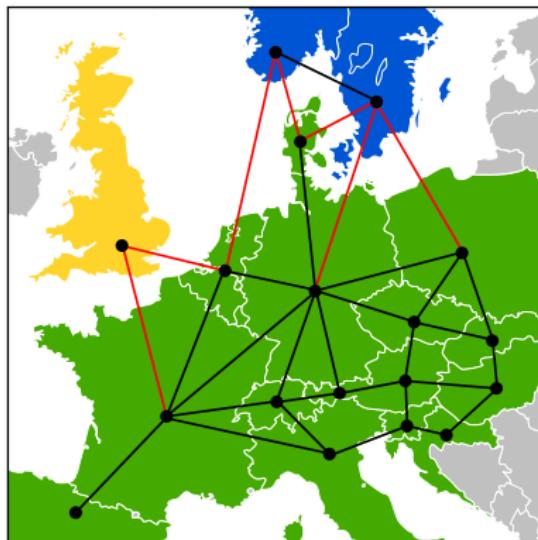
- de production
- dus au pompage-turbinage
- dus aux flux de puissance électrique
- dus à la restriction ("curtailment") des NER

suivant les contraintes suivantes :

- puissances installées
- montées en puissance
- limites thermiques des lignes
- capacités des barrages

Approximations :

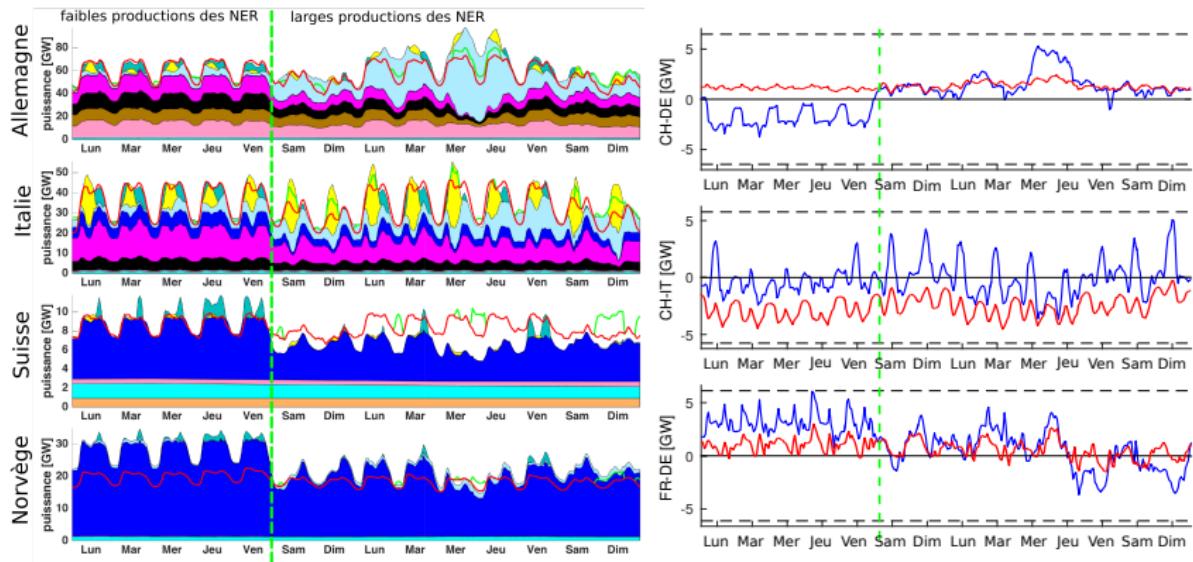
- transmission sans perte
- parfaites prévisions des productions des NER
- zones en "plaques de cuivre"



Notre modèle de dispatch est mathématiquement équivalent à un problème d'optimisation quadratique

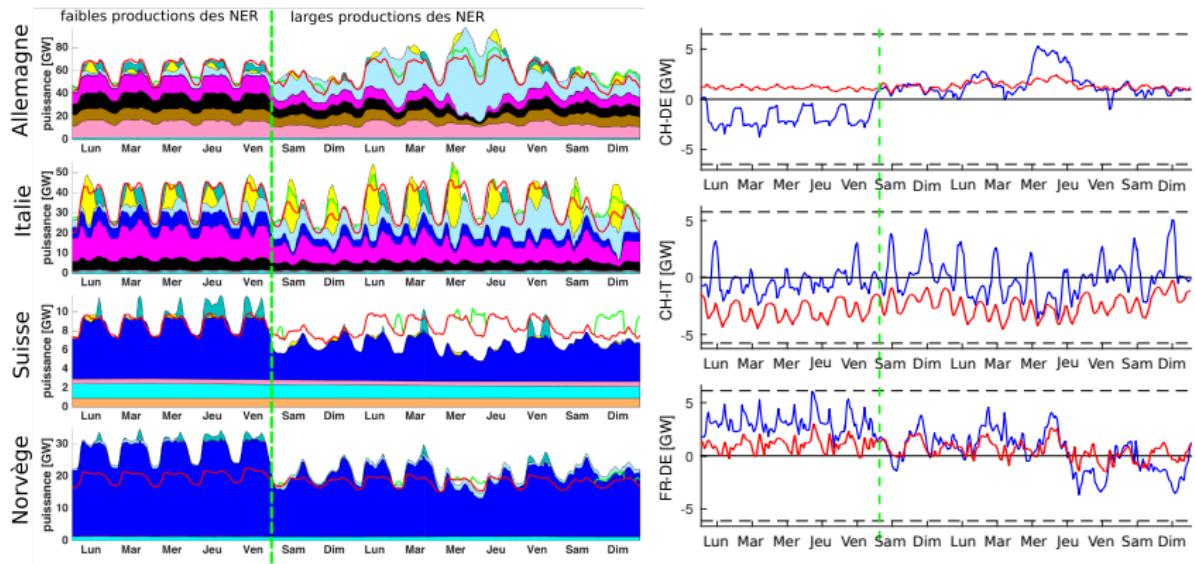
$$\begin{aligned} & \min \mathbf{x}^\top \mathbf{Qx} + \mathbf{c}^\top \mathbf{x}, \\ \text{s.t. } & \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}}, \\ & \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}, \end{aligned}$$

# Application : la production électrique européenne à l'horizon 2030



- Un changement des schémas de production.
- Une grande flexibilité est demandée aux énergies conventionnelles.
- Échanges internationaux plus intenses.
- Restriction négligeable des NER.

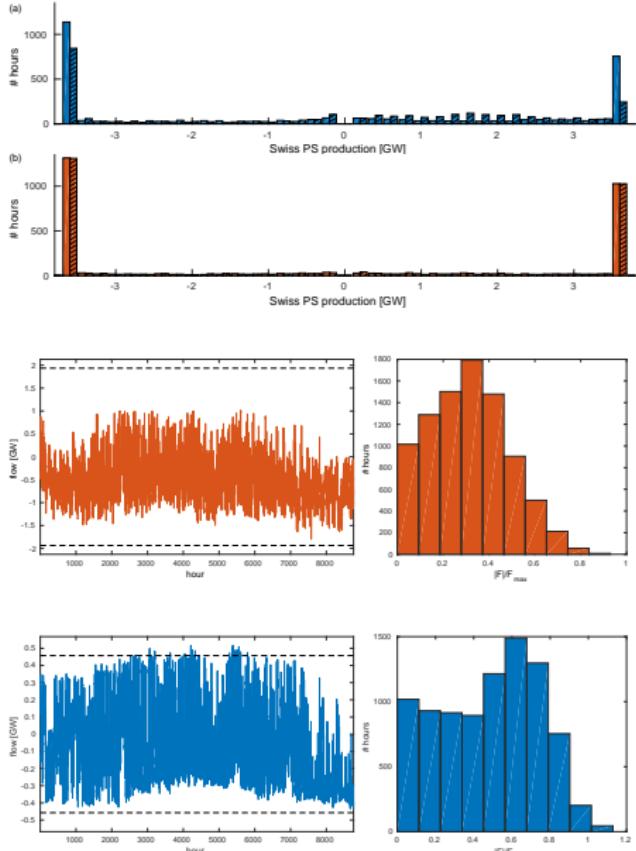
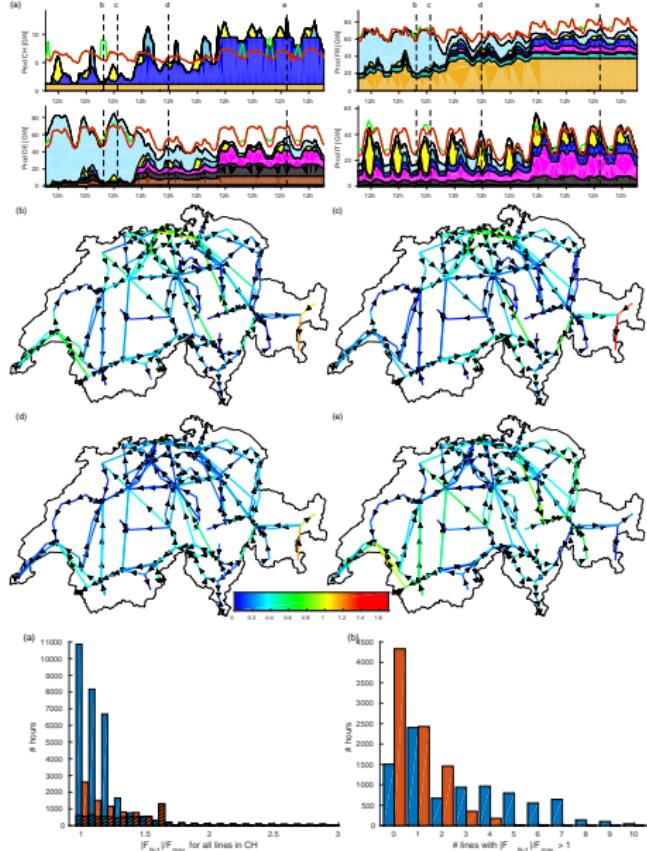
# Application : la production électrique européenne à l'horizon 2030



- Un changement des schémas de production.
- Une grande flexibilité est demandée aux énergies conventionnelles.
- Échanges internationaux plus intenses.
- Restriction négligeable des NER.

Les infrastructures actuelles (stockage et réseau) semblent être capables de faire face à des pénétrations de NER bien supérieures à leurs niveaux actuels.

# Des études plus profondes, ...



# L'hydroélectricité suisse souffre des bas prix de l'électricité.

Dans les journaux, on peut lire :

Tribune  
de Genève

Genève Suisse Monde **Economie** Sports Culture Auto High-Tech People Savoir Vivre Plus  
Entreprises Argent & finances Emploi & formation Bourse Chroniques Images

## Trop coûteux, la Grande-Dixence et Emosson sont à vendre

**Hydroélectricité** Alpiq, dont les SIG sont actionnaires, a fait part d'une perte de 830 millions pour l'exercice 2015.



Image d'archives.

Tribune de Genève, le 08 mars 2016

Tages-Anzeiger

## Wasserkraft lohnt sich nicht

Zu tiefe Strompreise: Von 25 untersuchten Grosswasserkraft-Projekten sind 24 nicht rentabel. Schuld seien marktverzerrende Subventionen für erneuerbare Energien, sagt der Bund.



Staudamm beim Projekt Linthal. (5. Juli 2011) Bild: Keystone

Tages-Anzeiger, le 13 décembre 2013

# L'hydroélectricité suisse souffre des bas prix de l'électricité.

Dans les journaux, on peut lire :

**Tribune de Genève**

Genève Suisse Monde **Economie** Sports Culture Auto High-Tech People Savoir Vivre Plus  
Entreprises Argent & finances Emploi & formation Bourse Chroniques Images

## Trop coûteux, la Grande-Dixence et Emosson sont à vendre

**Hydroélectricité** Alpiq, dont les SIG sont actionnaires, a fait part d'une perte de 830 millions pour l'exercice 2015.



Image d'archives.

Combien de temps cela va-t-il durer ?

**Tages-Anzeiger**

## Wasserkraft lohnt sich nicht

Zu tiefen Strompreise: Von 25 untersuchten Grosswasserkraft-Projekten sind 24 nicht rentabel. Schuld seien marktverzerrende Subventionen für erneuerbare Energien, sagt der Bund.



Staudamm beim Projekt Linthal. (5. Juli 2011) Bild: Keystone

**Tages-Anzeiger**, le 13 décembre 2013

**Tribune de Genève**, le 08 mars 2016

## un indicateur physico-économique

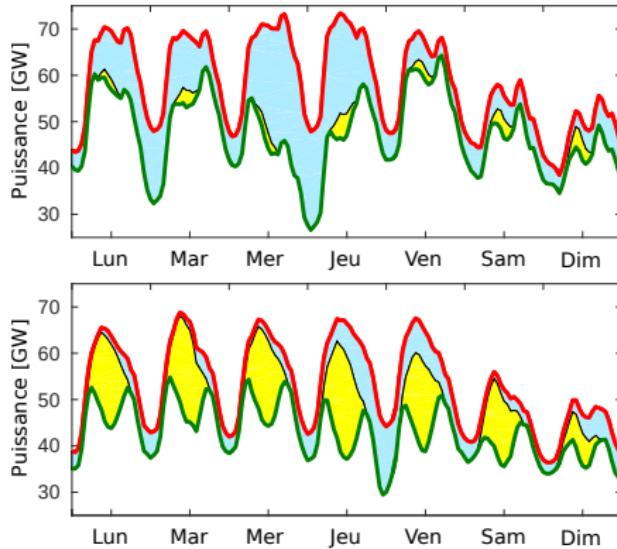
La **charge résiduelle** est définie comme la **charge** à laquelle sont soustraîtes les différentes productions non-flexibles

$$R(t) = L(t) - P^{\text{PV}}(t) - P^{\text{wind}}(t) - P^{\text{mrun}}.$$

Productions non-flexibles :

- photovoltaïque
- éolien
- must-run

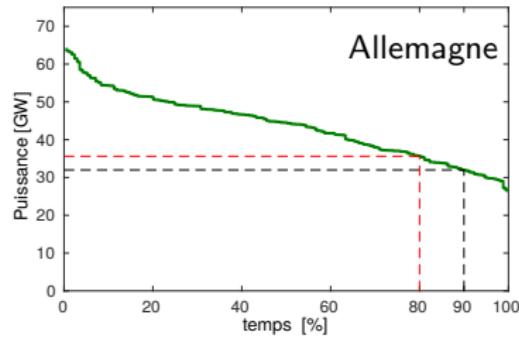
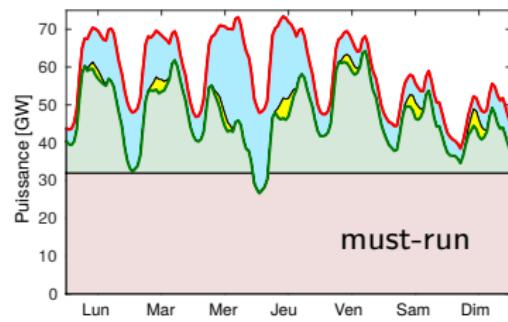
la charge résiduelle représente la balance entre l'offre et la demande.



## Détermination du “must-run”

Le “must-run” provient des centrales qui pour des raisons économiques continuent de produire même lorsque que le prix de l'électricité n'est pas suffisant pour leur production soit rentable.

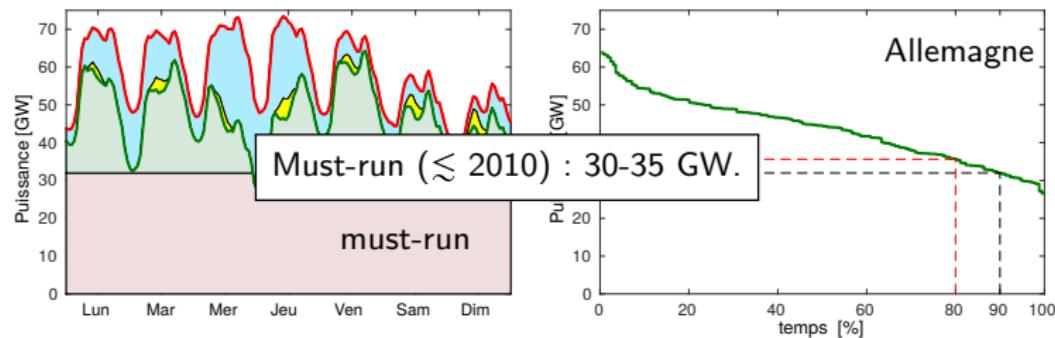
Estimation :



## Détermination du “must-run”

Le “must-run” provient des centrales qui pour des raisons économiques continuent de produire même lorsque que le prix de l'électricité n'est pas suffisant pour leur production soit rentable.

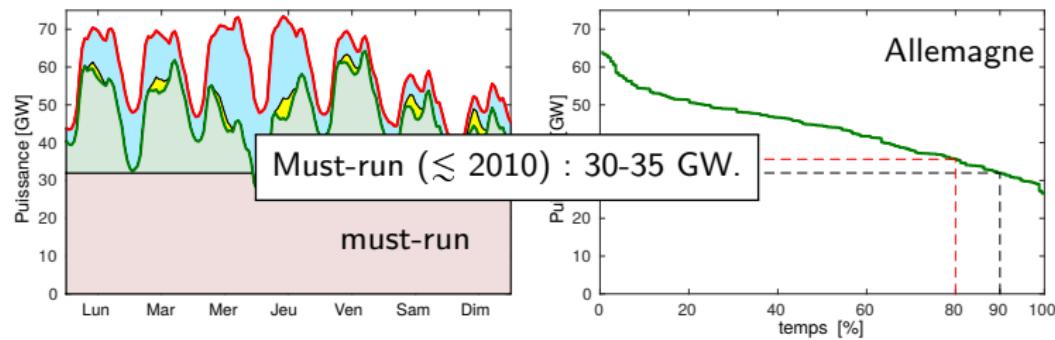
Estimation :



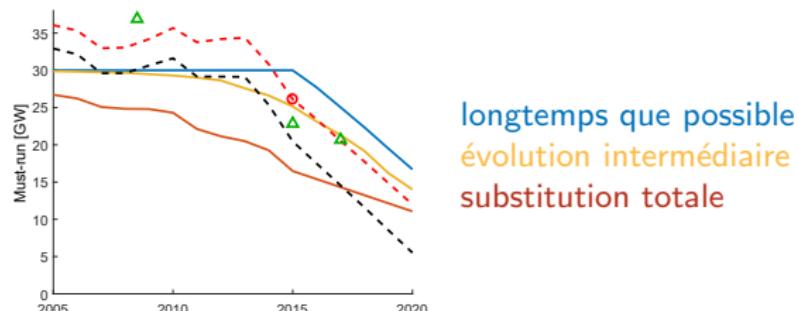
## Détermination du “must-run”

Le “must-run” provient des centrales qui pour des raisons économiques continuent de produire même lorsque que le prix de l'électricité n'est pas suffisant pour leur production soit rentable.

Estimation :

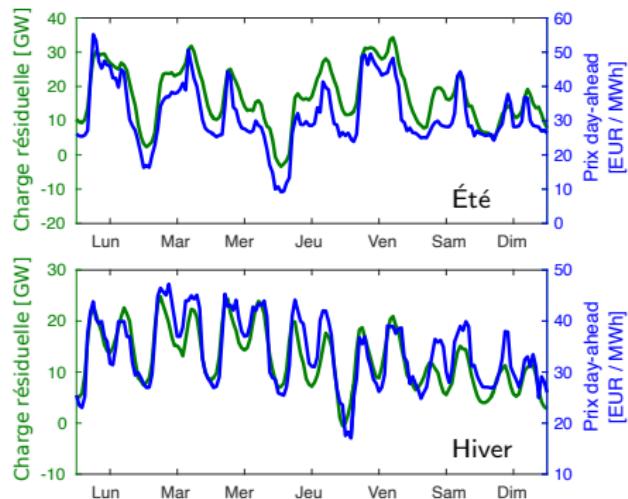


Scénarios :



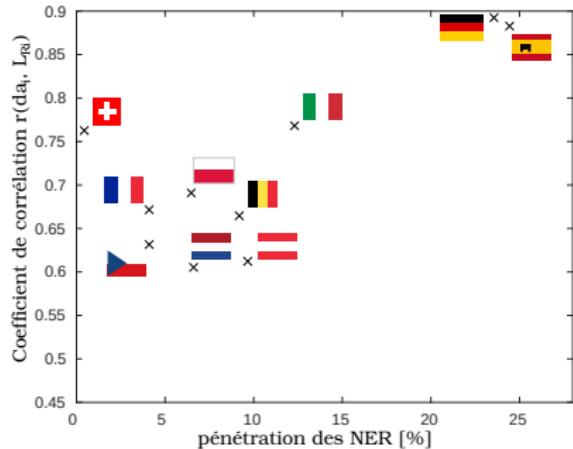
# Une forte corrélation entre la charge résiduelle et le prix de l'électricité

En Allemagne :



Coefficient de corrélation :

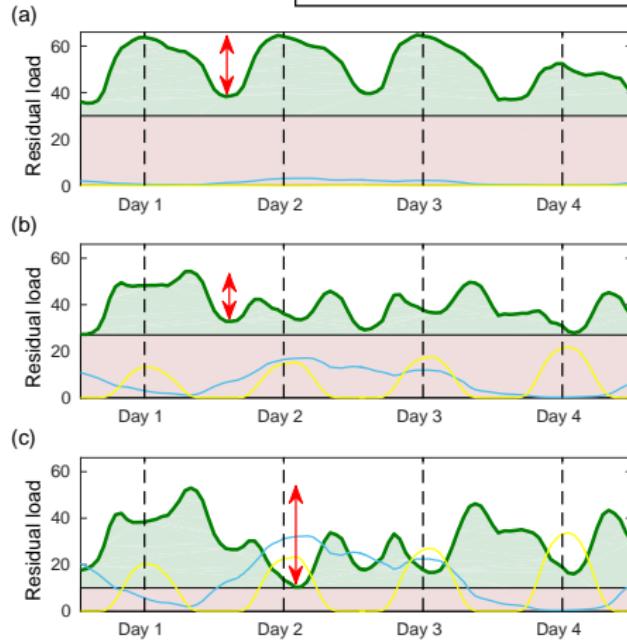
$$r(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^n (x(t_k) - \bar{x})(y(t_k) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x(t_k) - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n (y(t_k) - \bar{y})^2}}$$
$$-1 \leq r(x, y) \leq 1$$



Nous pouvons introduire un prix effectif de l'électricité basé sur la charge résiduelle.

# Évolution de notre prix durant la transition énergétique

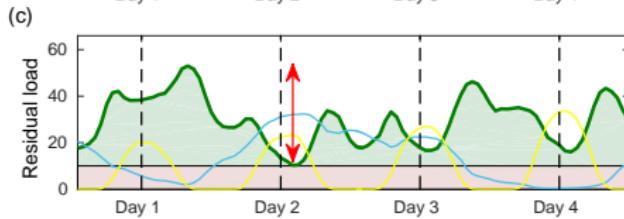
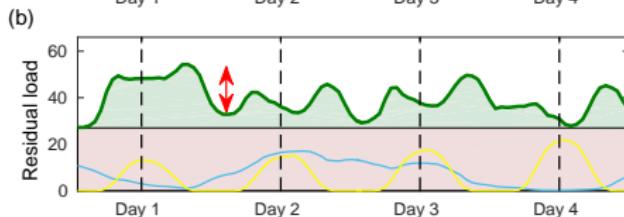
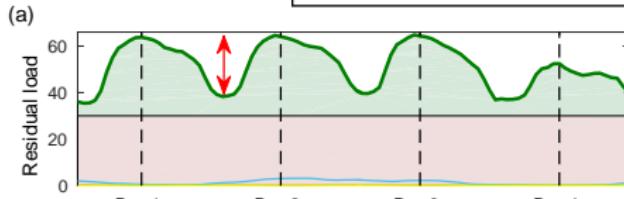
$$\text{Prix effectif : } p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$$



charge résiduelle, must-run, éolien,  
photovoltaïque

# Évolution de notre prix durant la transition énergétique

$$\text{Prix effectif : } p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$$

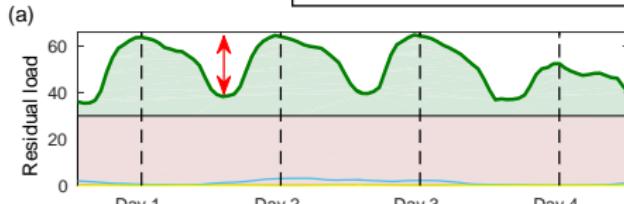


**Initial (<2005) :** La charge résiduelle ~ la charge. Le must-run est élevé.

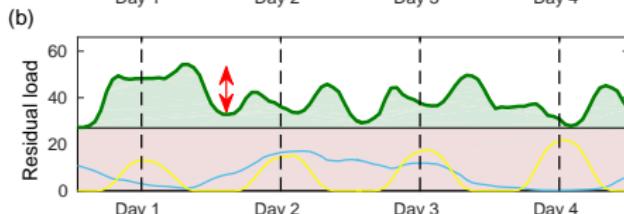
charge résiduelle, must-run, éolien,  
photovoltaïque

# Évolution de notre prix durant la transition énergétique

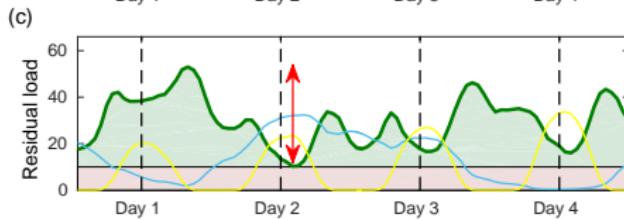
$$\text{Prix effectif : } p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$$



**Initial (<2005) :** La charge résiduelle ~ la charge. Le must-run est élevé.



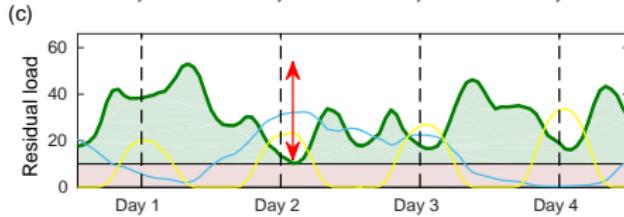
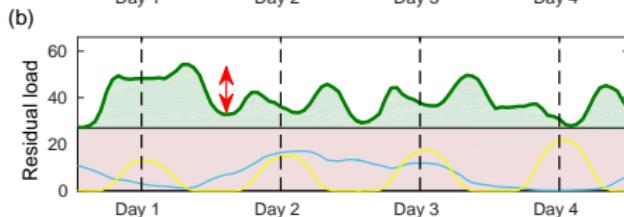
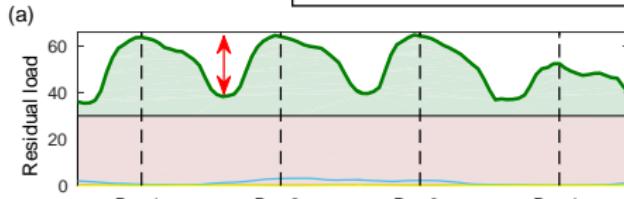
**Intermédiaire (~now) :** Les variations sont réduits par le PV. Le must-run reste élevé.



charge résiduelle, must-run, éolien,  
photovoltaïque

# Évolution de notre prix durant la transition énergétique

$$\text{Prix effectif : } p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$$



**Initial (<2005) :** La charge résiduelle ~ la charge. Le must-run est élevé.

**Intermédiaire (~now) :** Les variations sont réduits par le PV. Le must-run reste élevé.

**mature (>2025) :** Le must-run est réduit. Les variations augmentent.

charge résiduelle, must-run, éolien,  
photovoltaïque

# Revenus d'une centrale de pompage turbinage

$$\text{revenus} \propto \text{Var}[R]$$

Revenus :  $\$ = \int p_{\text{da}}(t) P^{\text{ps}}(t) dt$

les maximiser sous contrainte :

$\int P^{\text{ps}}(t) = 0$ , (sans perte).

$\Rightarrow P^{\text{ps}}(t) \cong a[p_{\text{da}}(t) - \bar{p}_{\text{da}}]$

finalement avec

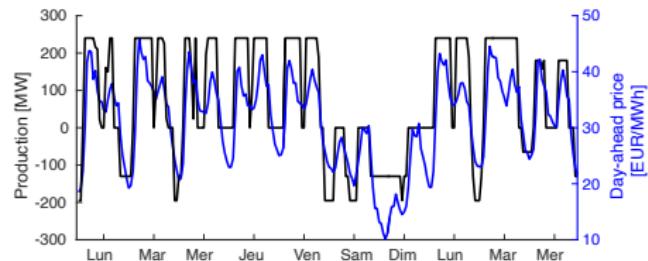
$$p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$$

# Revenus d'une centrale de pompage turbinage

$$\text{revenus} \propto \text{Var}[R]$$

Revenus :  $\$ = \int p_{\text{da}}(t) P^{\text{PS}}(t) dt$   
les maximiser sous contrainte :  
 $\int P^{\text{PS}}(t) = 0$ , (sans perte).  
 $\Rightarrow P^{\text{PS}}(t) \cong a[p_{\text{da}}(t) - \bar{p}_{\text{da}}]$   
finalement avec  
 $p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$

## Production d'une centrale suisse :

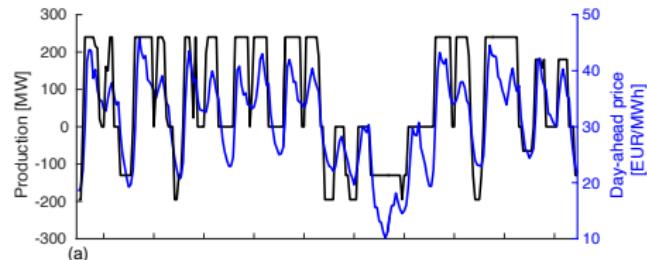


# Revenus d'une centrale de pompage turbinage

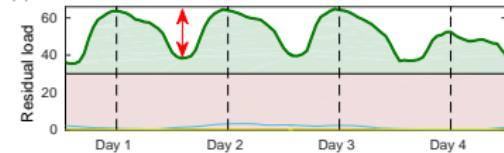
$$\text{revenus} \propto \text{Var}[R]$$

Revenus :  $\$ = \int p_{\text{da}}(t) P^{\text{PS}}(t) dt$   
les maximiser sous contrainte :  
 $\int P^{\text{PS}}(t) = 0$ , (sans perte).  
 $\Rightarrow P^{\text{PS}}(t) \cong a[p_{\text{da}}(t) - \bar{p}_{\text{da}}]$   
finalement avec  
 $p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$

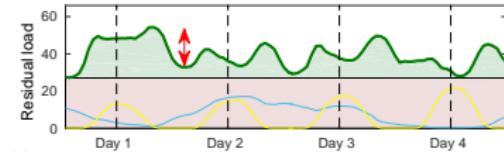
## Production d'une centrale suisse :



(a)



(b)



(c)

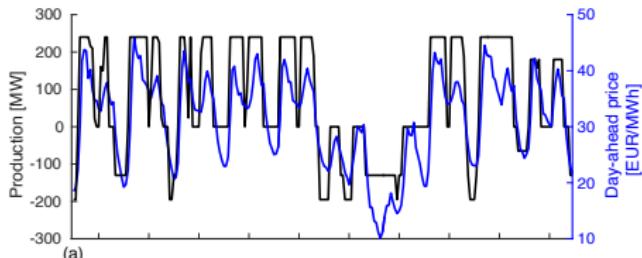
# Revenus d'une centrale de pompage turbinage

$$\text{revenus} \propto \text{Var}[R]$$

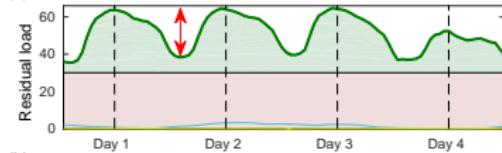
Revenus :  $\$ = \int p_{\text{da}}(t) P^{\text{PS}}(t) dt$   
les maximiser sous contrainte :  
 $\int P^{\text{PS}}(t) = 0$ , (sans perte).  
 $\Rightarrow P^{\text{PS}}(t) \cong a[p_{\text{da}}(t) - \bar{p}_{\text{da}}]$   
finalement avec  
 $p_{\text{da}}(t) = \Delta p_{\text{da}} R(t) + p_{\text{da}0}$

Revenus ↘ ↗

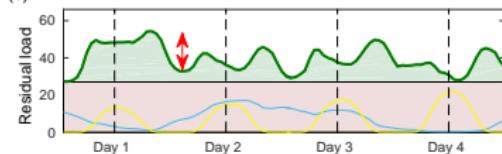
## Production d'une centrale suisse :



(a)



(b)

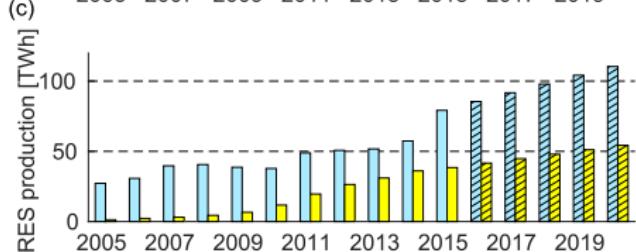
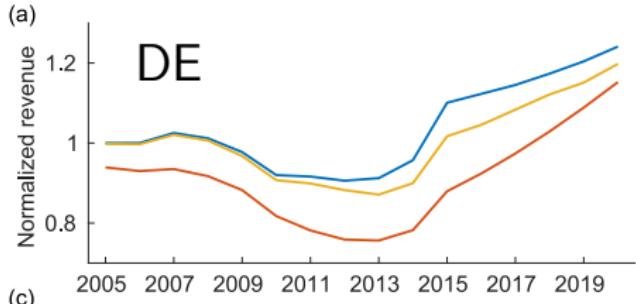


(c)

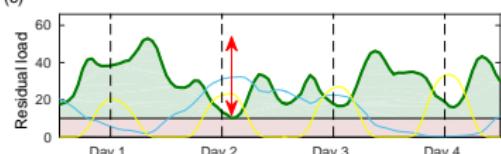
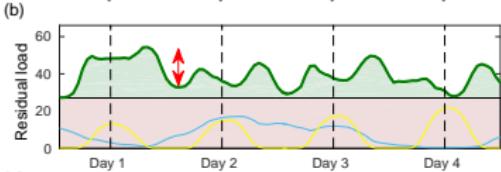
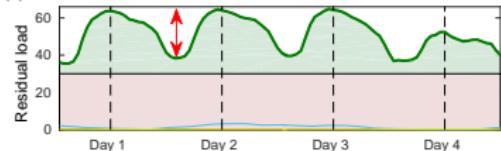
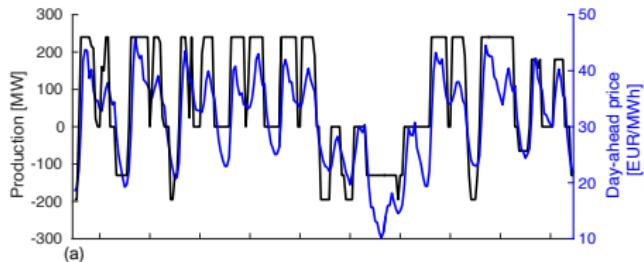
# Revenus d'une centrale de pompage turbinage

$$\text{revenus} \propto \text{Var}[R]$$

Revenus :  $\$ = \int p_{da}(t) P^{ps}(t) dt$   
les maximiser sous contrainte :  
 $\int P^{ps}(t) = 0$ , (sans perte).  
 $\Rightarrow P^{ps}(t) \cong a[p_{da}(t) - \bar{p}_{da}]$   
finalement avec  
 $p_{da}(t) = \Delta p_{da} R(t) + p_{da0}$



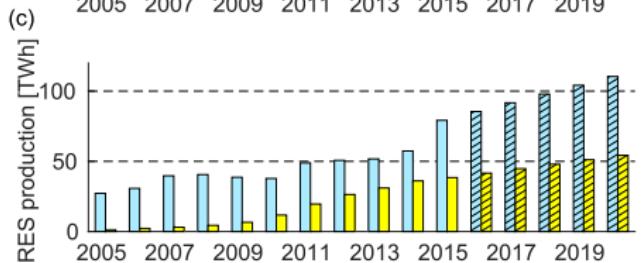
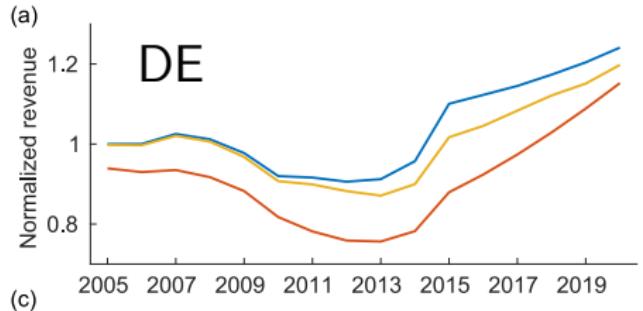
## Production d'une centrale suisse :



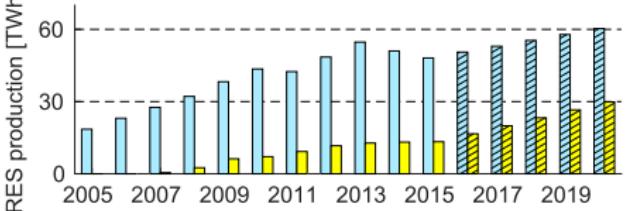
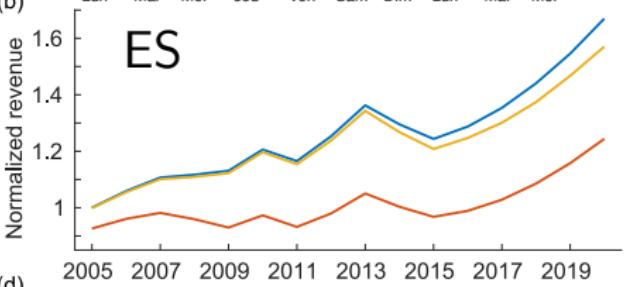
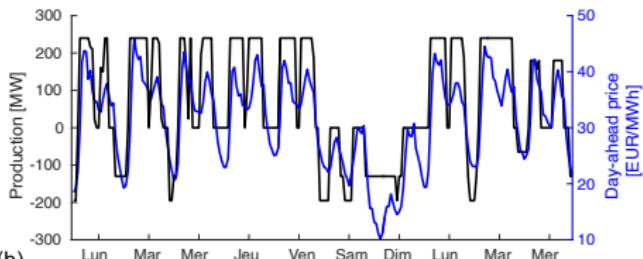
# Revenus d'une centrale de pompage turbinage

$$\text{revenus} \propto \text{Var}[R]$$

Revenus :  $\$ = \int p_{da}(t) P^{ps}(t) dt$   
les maximiser sous contrainte :  
 $\int P^{ps}(t) = 0$ , (sans perte).  
 $\Rightarrow P^{ps}(t) \cong a[p_{da}(t) - \bar{p}_{da}]$   
finalement avec  
 $p_{da}(t) = \Delta p_{da} R(t) + p_{da0}$



## Production d'une centrale suisse :



Courant alternatif :

$$i(t) = I \cos(\omega_0 t + \theta_I),$$

$$v(t) = V \cos(\omega_0 t + \theta_V),$$

où  $\omega_0 = 2\pi f_0$  et  $f_0 = 50[\text{Hz}]$ .

# Étude de la dynamique des réseaux électrique : la fréquence du réseau

Courant alternatif :

$$i(t) = I \cos(\omega_0 t + \theta_I),$$
$$v(t) = V \cos(\omega_0 t + \theta_V),$$

où  $\omega_0 = 2\pi f_0$  et  $f_0 = 50[\text{Hz}]$ .



# Étude de la dynamique des réseaux électrique : la fréquence du réseau

Courant alternatif :

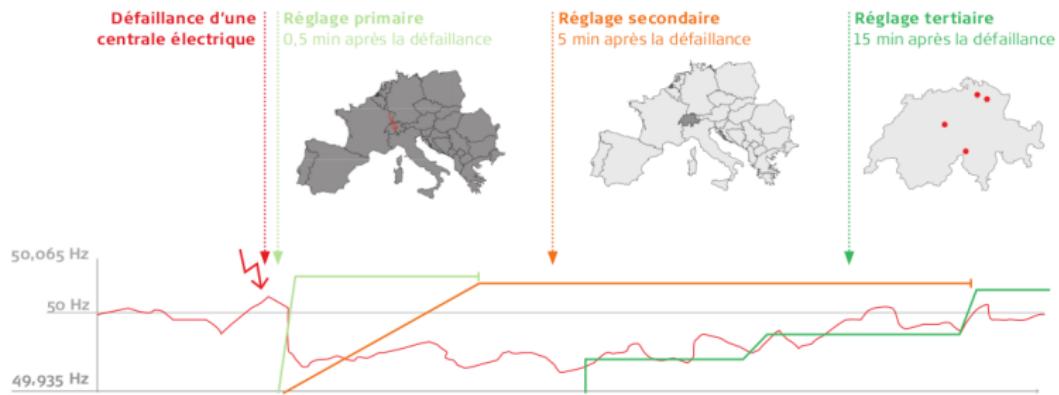
$$i(t) = I \cos(\omega_0 t + \theta_I),$$

$$v(t) = V \cos(\omega_0 t + \theta_V),$$

où  $\omega_0 = 2\pi f_0$  et  $f_0 = 50[\text{Hz}]$ .



# Étude de la dynamique des réseaux électrique : la fréquence du réseau

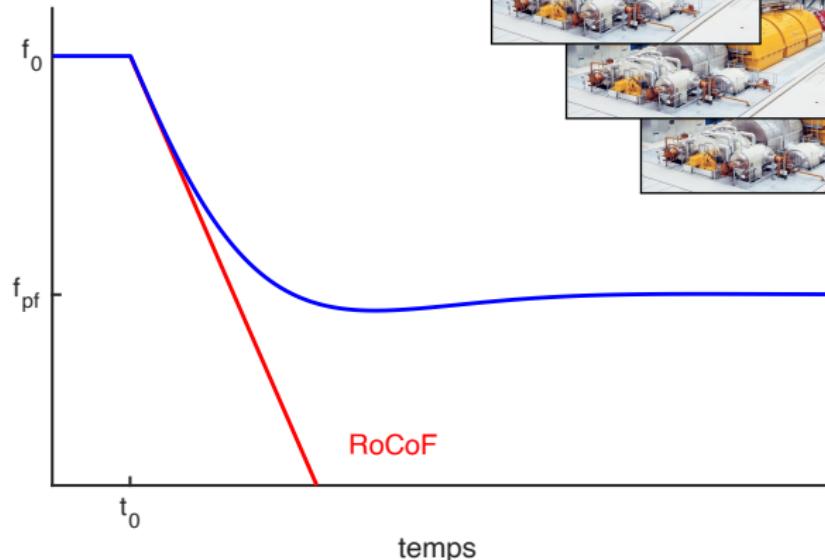


Source : Swissgrid

# Étude de la dynamique des réseaux électrique : la fréquence du réseau

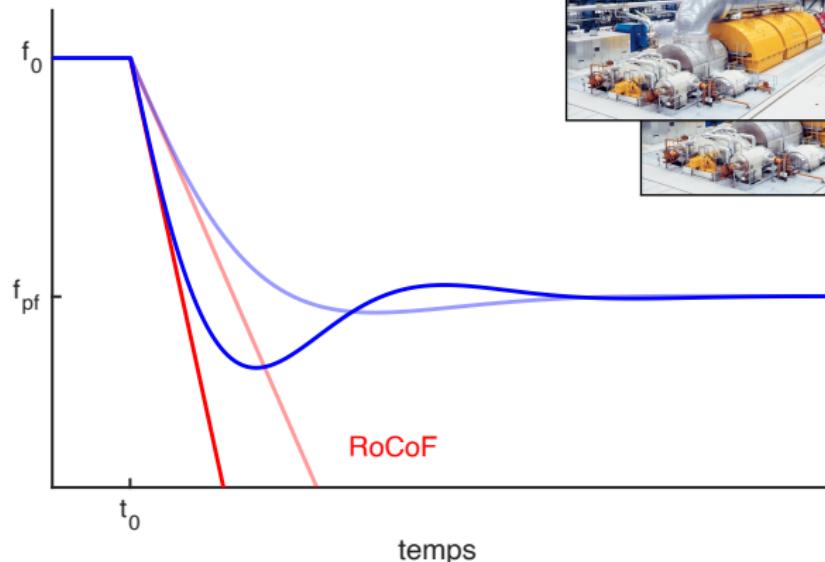


# Étude de la dynamique des réseaux électrique : la fréquence du réseau



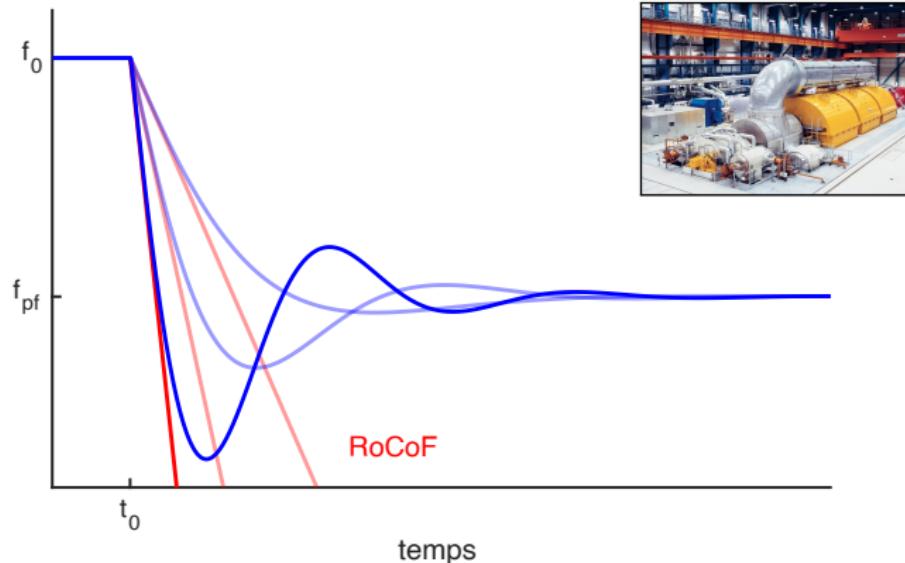
**RoCoF = taux de changement de fréquence**

# Étude de la dynamique des réseaux électrique : la fréquence du réseau



$\text{RoCoF} = \text{taux de changement de fréquence}$

# Étude de la dynamique des réseaux électrique : la fréquence du réseau



**RoCoF = taux de changement de fréquence**

# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

**Structure preserving model : Bergen and Hill (1981)**

Hypothèse : transmission sans perte

Pour les générateurs synchrones ("Swing equations") :

$$m_i \dot{\omega}_i + d_i \omega_i = P_i - \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

Les bus sans inertie sont traités comme des charges dépendantes de la fréquence :

$$d_i \dot{\omega}_i = P_i - \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

$\theta_i$  : phase de la tension

$\omega_i$  : fréquences,  $\omega_i = \dot{\theta}_i = 2\pi f_i$

$m_i$  : inertie

$d_i$  : amortissement (réglage primaire)

$P_i$  : injections de puissance

$b_{ij}$  : susceptances des lignes

# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

**Structure preserving model : Bergen and Hill (1981)**

Hypothèse : transmission sans perte

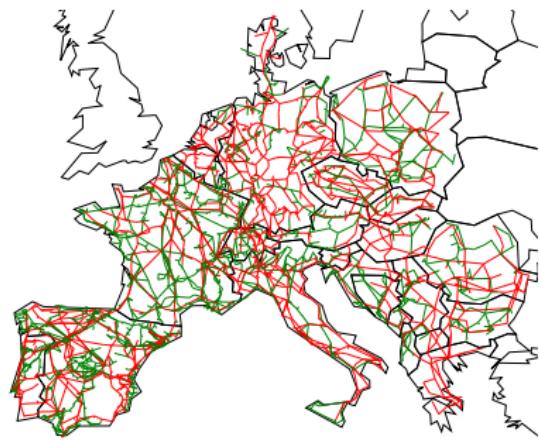
Pour les générateurs synchrones ("Swing equations") :

$$m_i \dot{\omega}_i + d_i \omega_i = P_i - \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

Les bus sans inertie sont traités comme des charges dépendantes de la fréquence :

$$d_i \dot{\omega}_i = P_i - \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

Nous avons développé un modèle dynamique du réseau continental européen.



# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

**Structure preserving model : Bergen and Hill (1981)**

Hypothèse : transmission sans perte

Pour les générateurs synchrones ("Swing equations") :

$$m_i \dot{\omega}_i + d_i \omega_i = P_i - \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

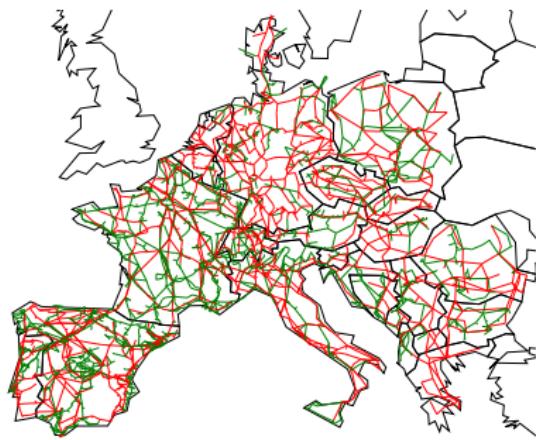
Les bus sans inertie sont traités comme des charges dépendantes de la fréquence :

$$d_i \dot{\omega}_i = P_i - \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

Fautes standardisées :

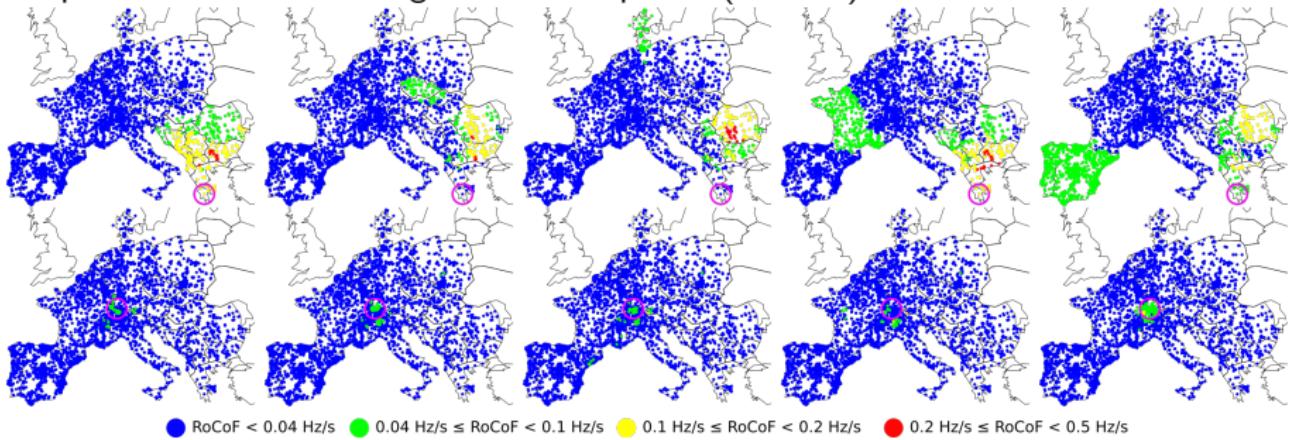
- toujours sur un générateur (indexé  $\#b$ )
- $P_b \rightarrow P_b - \delta P_b$  (900MW)
- seulement si  $P_b > \delta P_b$
- bus  $\#b$  perd son inertie

Nous avons développé un modèle dynamique du réseau continental européen.



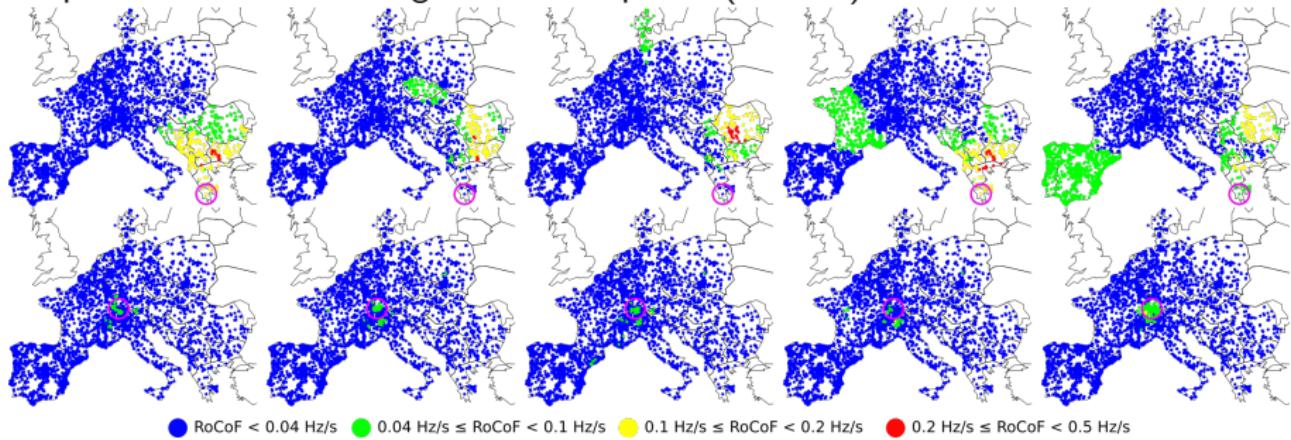
# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

Snapshots des taux de changement de fréquence (RoCoFs) :



# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

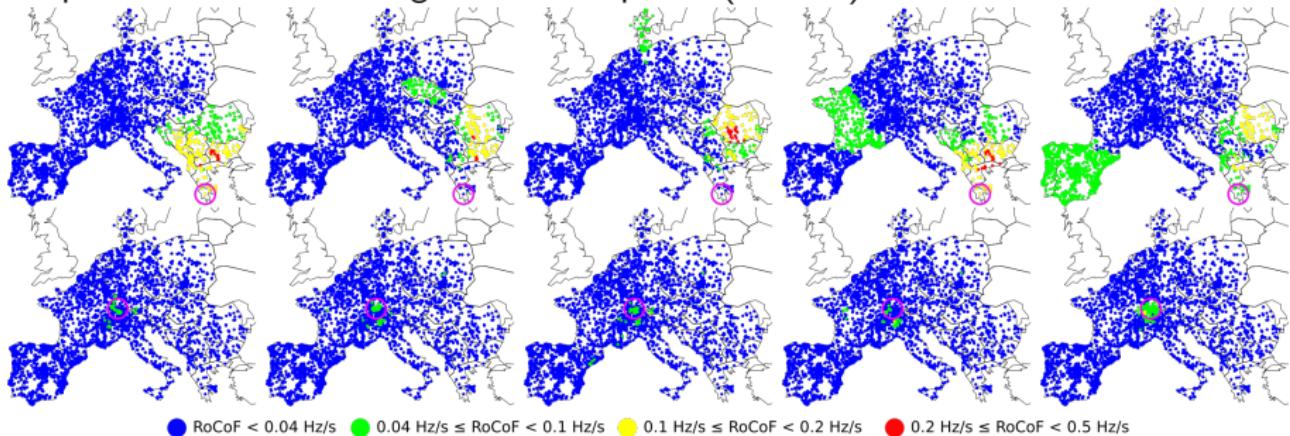
Snapshots des taux de changement de fréquence (RoCoFs) :



Lors d'une faute en Suisse : la perturbation reste localisée.

# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

Snapshots des taux de changement de fréquence (RoCoFs) :

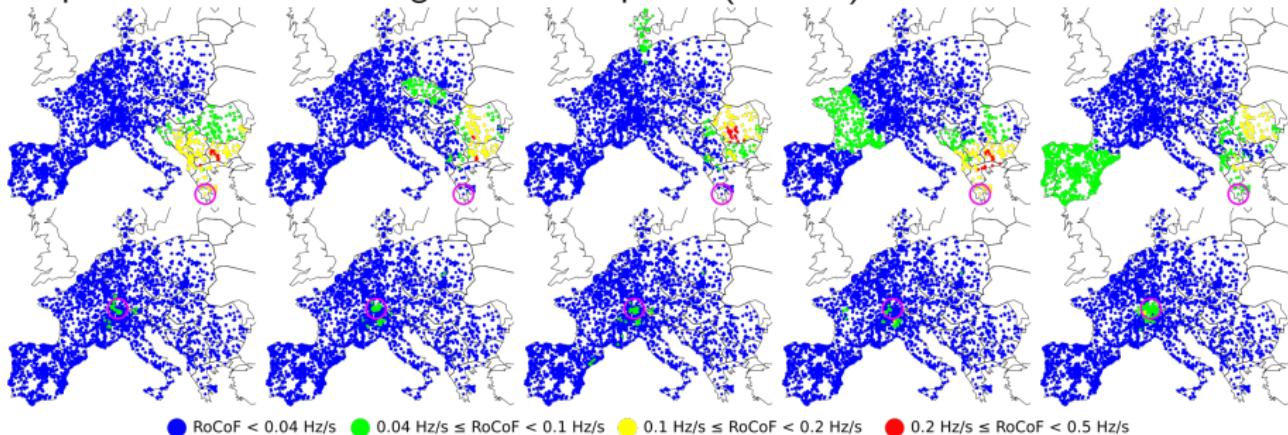


Lors d'une faute en Suisse : la perturbation reste localisée.

Lors d'une faute en Grèce : celle-ci induit des RoCoFs plus élevés et la perturbation se propage à travers le réseau.

# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

Snapshots des taux de changement de fréquence (RoCoFs) :



● RoCoF < 0.04 Hz/s   ● 0.04 Hz/s ≤ RoCoF < 0.1 Hz/s   ● 0.1 Hz/s ≤ RoCoF < 0.2 Hz/s   ● 0.2 Hz/s ≤ RoCoF < 0.5 Hz/s   ● > 0.5 Hz/s

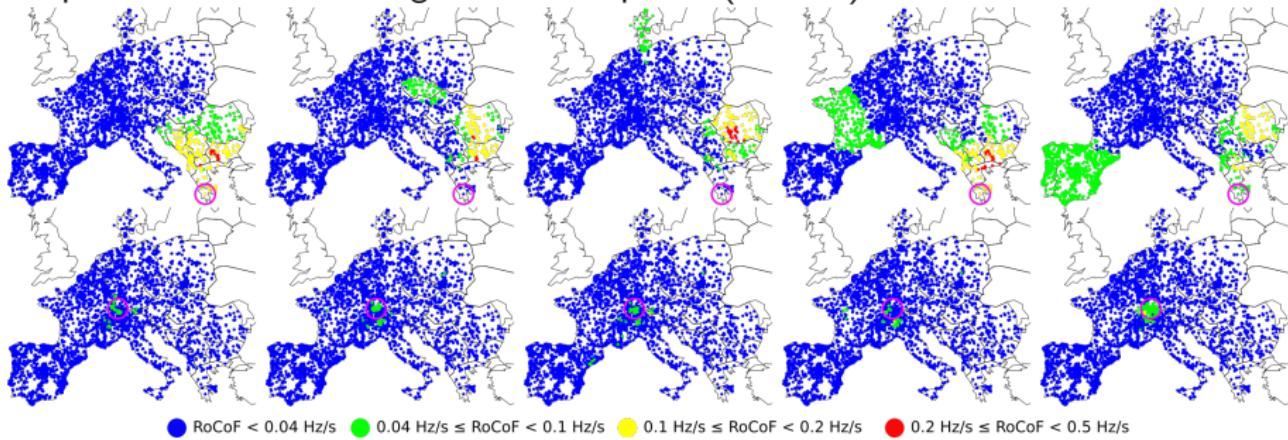
Lors d'une faute en Suisse : la perturbation reste localisée.

Lors d'une faute en Grèce : celle-ci induit des RoCoFs plus élevés et la perturbation se propage à travers le réseau.

Observation : Les perturbations diffèrent fortement selon l'emplacement de la faute.

# Propagation des perturbations dans le réseau européen.

Snapshots des taux de changement de fréquence (RoCoFs) :



● RoCoF < 0.04 Hz/s   ● 0.04 Hz/s ≤ RoCoF < 0.1 Hz/s   ● 0.1 Hz/s ≤ RoCoF < 0.2 Hz/s   ● 0.2 Hz/s ≤ RoCoF < 0.5 Hz/s

Lors d'une faute en Suisse : la perturbation reste localisée.

Lors d'une faute en Grèce : celle-ci induit des RoCoFs plus élevés et la perturbation se propage à travers le réseau.

Observation : Les perturbations diffèrent fortement selon l'emplacement de la faute.

Pour une étude systématique :

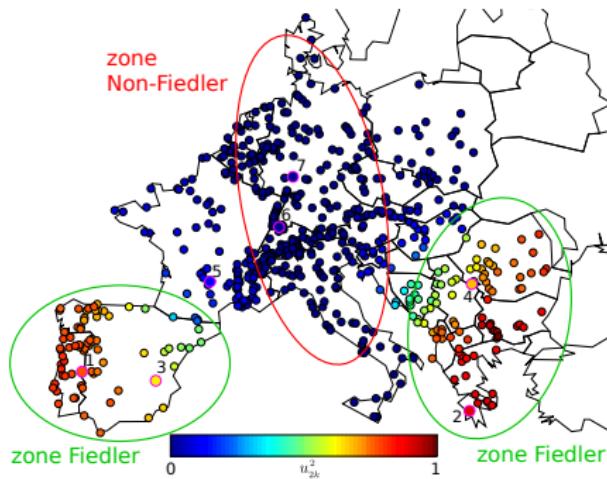
$$\mathcal{M}_b = \sum_{k=1}^{N_{\text{sim}}} \sum_{i \in \mathcal{V}} |r_i(k\Delta t)|, \text{ où } r_i(t) = \frac{\omega_i(t+\Delta t) - \omega_i(t)}{2\pi\Delta t}.$$

## zones Fiedler et non-Fiedler vs la magnitude des perturbations

Diagonalisation de la matrice Laplacienne :

$$L = U^\top \Lambda U$$

$$L_{ij} = \begin{cases} \sum_k b_{ik}, & \text{si } i = j, \\ -b_{ij}, & \text{sinon.} \end{cases}$$



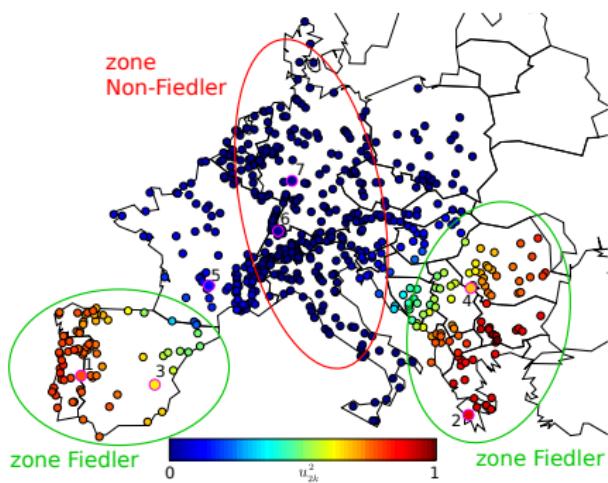
vecteur propre associé avec la plus petite valeur propre.

# zones Fiedler et non-Fiedler vs la magnitude des perturbations

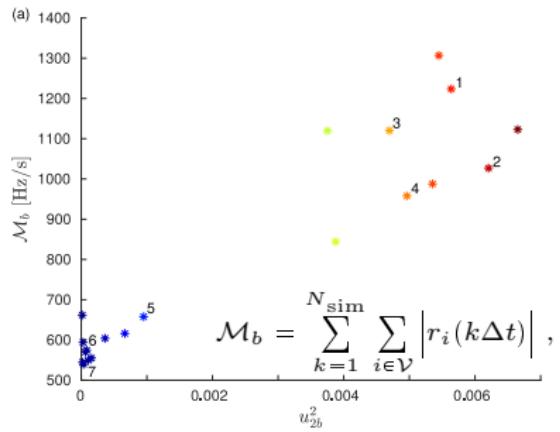
Diagonalisation de la matrice Laplacienne :

$$L = U^\top \Lambda U$$

$$L_{ij} = \begin{cases} \sum_k b_{ik}, & \text{si } i = j, \\ -b_{ij}, & \text{sinon.} \end{cases}$$



vecteur propre associé avec la plus petite valeur propre.

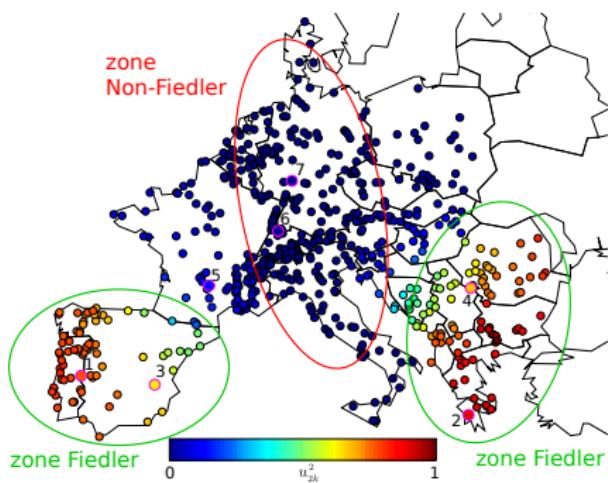


# zones Fiedler et non-Fiedler vs la magnitude des perturbations

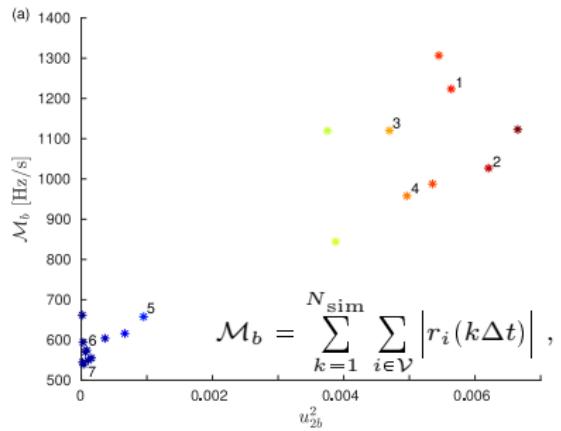
Diagonalisation de la matrice Laplacienne :

$$L = U^\top \Lambda U$$

$$L_{ij} = \begin{cases} \sum_k b_{ik}, & \text{si } i = j, \\ -b_{ij}, & \text{sinon.} \end{cases}$$



vecteur propre associé avec la plus petite valeur propre.



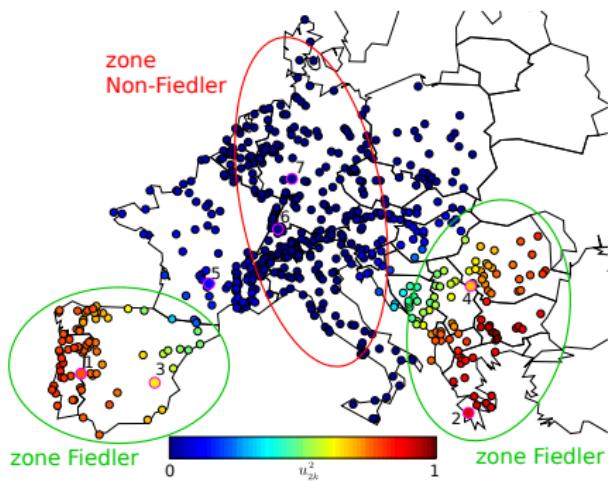
Que ce passe-t-il si l'inertie est réduite ?

# zones Fiedler et non-Fiedler vs la magnitude des perturbations

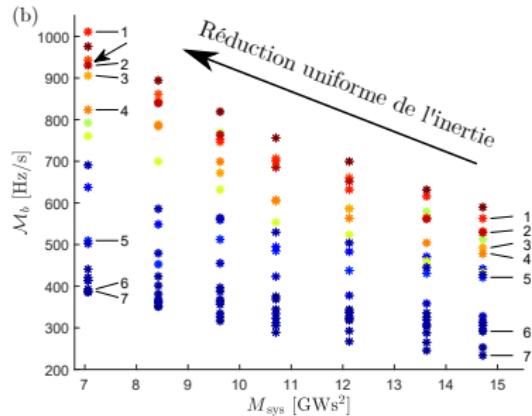
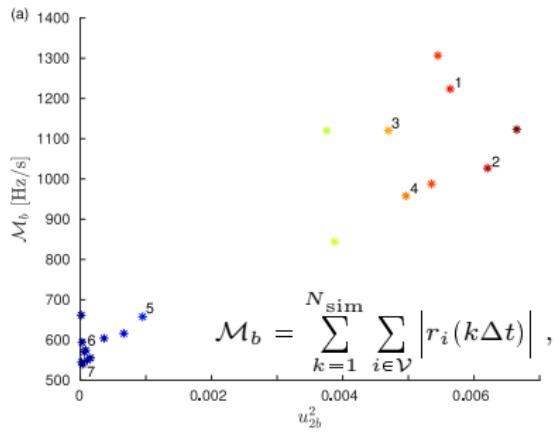
Diagonalisation de la matrice Laplacienne :

$$L = U^\top \Lambda U$$

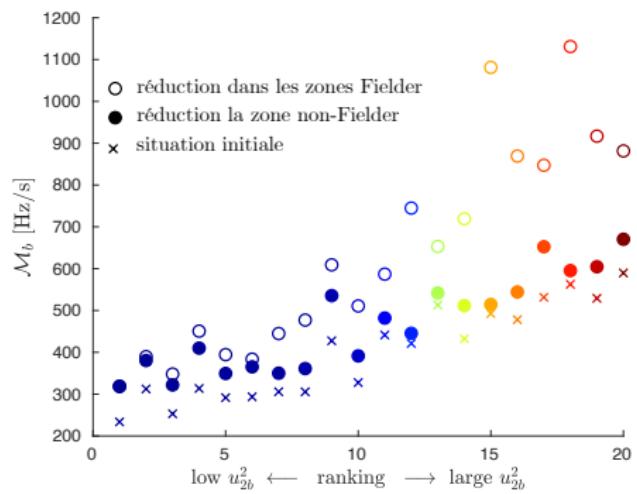
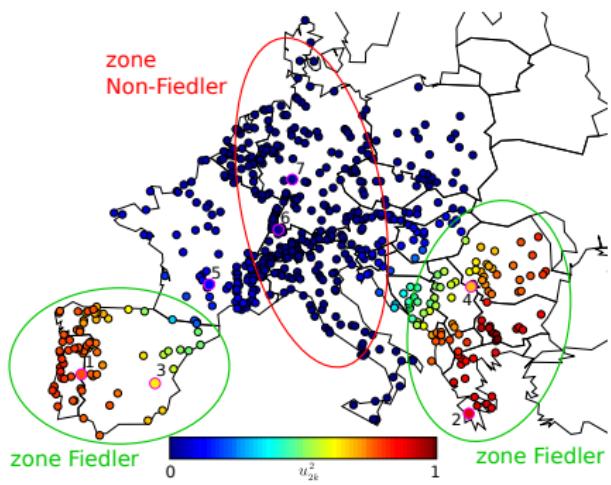
$$L_{ij} = \begin{cases} \sum_k b_{ik}, & \text{si } i = j, \\ -b_{ij}, & \text{sinon.} \end{cases}$$



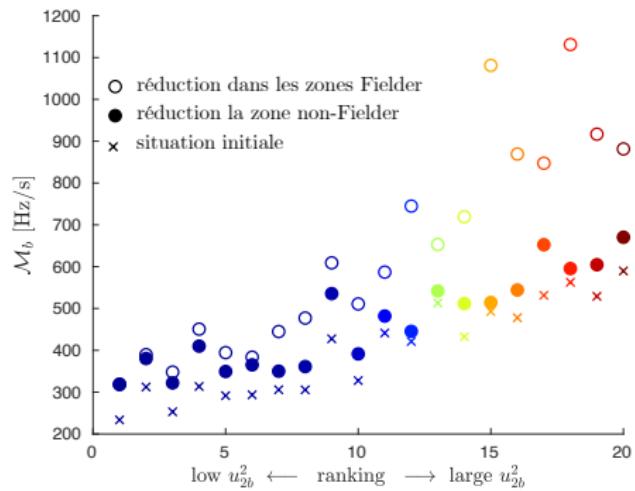
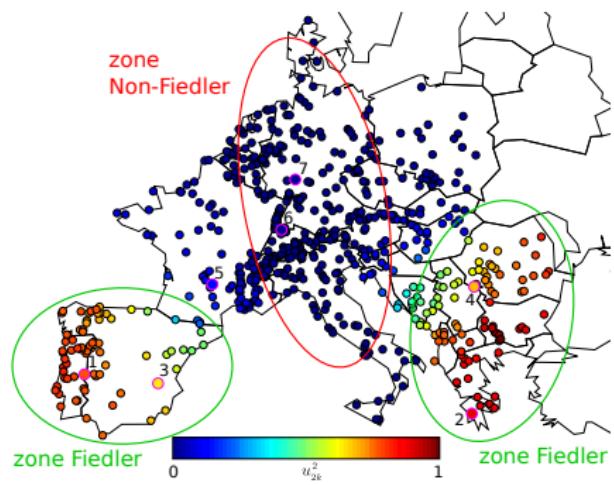
vecteur propre associé avec la plus petite valeur propre.



# Inertie dans les zones Fiedler et non-Fiedler vs l'intensité des perturbations



# Inertie dans les zones Fiedler et non-Fiedler vs l'intensité des perturbations



Plus il y a d'inertie dans la zone Fiedler, plus le réseau est résilient.

# Inertie virtuelle : la magie de l'électronique de puissance

Le retrait des générateurs conventionnels diminue la quantité d'inertie et de contrôle primaire connectée au réseau.



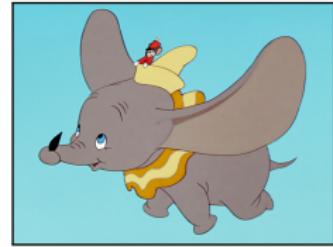
# Inertie virtuelle : la magie de l'électronique de puissance

Le retrait des générateurs conventionnels diminue la quantité d'inertie et de contrôle primaire connectée au réseau.



# Inertie virtuelle : la magie de l'électronique de puissance

Le retrait des générateurs conventionnels diminue la quantité d'inertie et de contrôle primaire connectée au réseau.



# Inertie virtuelle : la magie de l'électronique de puissance

Le retrait des générateurs conventionnels diminue la quantité d'inertie et de contrôle primaire connectée au réseau.



Ces services réseau peuvent aussi être fournis par :

- des volants d'inertie ("flywheels")
- des batteries
- de la gestion de la charge ("demand response")
- ...

## Algorithmes de placement optimal

**Théorème 1|2** Pour une perte abrupte de puissance, en admettant que l'inhomogénéité soit faible et que  $\Gamma|M = \gamma|m \mathbb{1}_N$ , la distribution optimal des paramètres  $\{r_i|a_i\}$ , qui minimise  $\mathcal{M}_b$ , est obtenue de la manière suivante.

- 1) calculer les sensitivités  $\rho_i|\alpha_i = \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial(r_i|a_i)}$
- 2) ordonner  $\{\rho_i|\alpha_i\}_{i=1,\dots,N}$  en ordre croissant
- 3) Set  $r_i|a_i = 1$  for  $i = \{1, \dots, \text{Int}[N/2]\}$  and  $r_i|a_i = -1$  for  $i = \{N - \text{Int}[N/2] + 1, \dots, N\}$

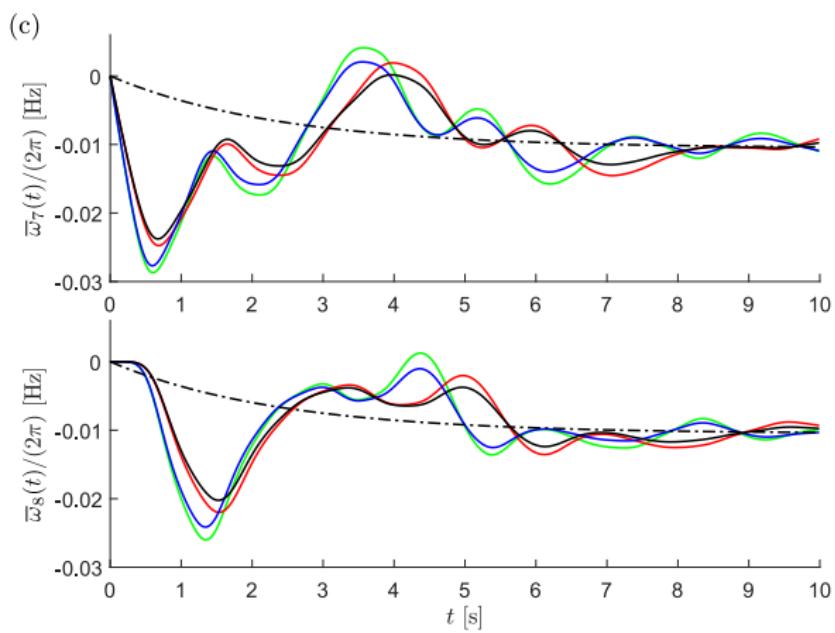
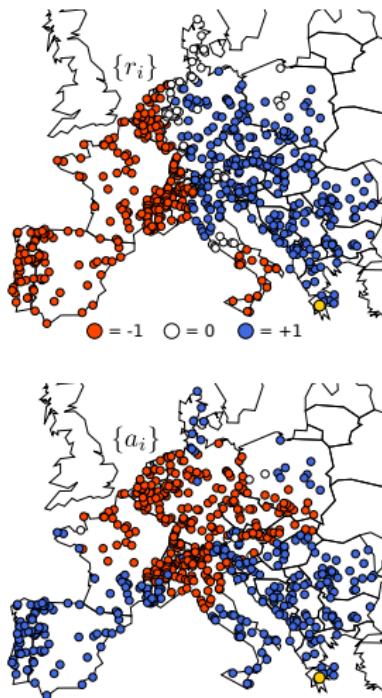
avec les susceptibilités :

$$\rho_i = \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial r_i} = -\frac{\mu \delta P^2}{\gamma N} \sum_{\alpha > 1} \frac{u_{\alpha i}^{(0)} u_{\alpha b}^{(0)}}{\lambda_\alpha^{(0)}},$$

$$\alpha_i = \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial a_i} = -\frac{g \delta P^2}{2 \gamma m} \left[ \sum_{\alpha > 1} \frac{u_{\alpha i}^{(0)2} u_{\alpha b}^{(0)2}}{\lambda_\alpha^{(0)}} + \sum_{\substack{\alpha > 1, \\ \beta \neq \alpha}} \frac{u_{\alpha i}^{(0)} u_{\beta i}^{(0)} u_{\alpha b}^{(0)} u_{\beta b}^{(0)}}{(\lambda_\alpha^{(0)} - \lambda_\beta^{(0)})^2 + 2\gamma(\lambda_\alpha^{(0)} + \lambda_\beta^{(0)})} \right].$$

**Optimisation combinée** orthogonaliser  $\{r_i\}$  et  $\{a_i\}$  avec la plus petite augmentation possible de  $\mathcal{M}_b$ .

## Perturbation résultant d'une perte de puissance abrupte et localisée



uniforme, réglage primaire, inertie, opt. combinée

Avec un placement judicieux du réglage primaire et de l'inertie, on peut fortement réduire l'intensité de la perturbation.

## Réduction de la vulnérabilité du réseau

A priori, nous n'avons aucune information concernant l'emplacement de la prochaine faute.

Mesure de “vulnérabilité” :

$$\mathcal{V} = \sum_b \eta_b \mathcal{M}_b$$

## Réduction de la vulnérabilité du réseau

A priori, nous n'avons aucune information concernant l'emplacement de la prochaine faute.

Mesure de "vulnérabilité" :

$$\mathcal{V} = \sum_b \eta_b \mathcal{M}_b$$

Avec  $\eta_b = 1$ ,  $\forall b$ , nous obtenons

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial r_i} = 0$$

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial a_i} = -\frac{g\delta P^2}{2\gamma m} \sum_{\alpha>1} \frac{u_{\alpha i}^{(0)2}}{\lambda_\alpha}.$$

# Réduction de la vulnérabilité du réseau

A priori, nous n'avons aucune information concernant l'emplacement de la prochaine faute.

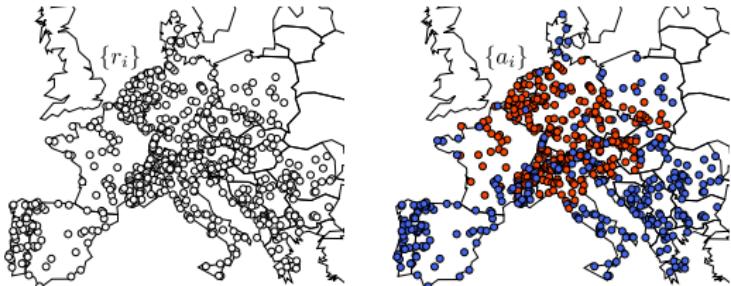
Mesure de "vulnérabilité" :

$$\mathcal{V} = \sum_b \eta_b \mathcal{M}_b$$

Avec  $\eta_b = 1$ ,  $\forall b$ , nous obtenons

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial r_i} = 0$$

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial a_i} = -\frac{g\delta P^2}{2\gamma m} \sum_{\alpha>1} \frac{u_{\alpha i}^{(0)2}}{\lambda_\alpha}.$$



# Réduction de la vulnérabilité du réseau

A priori, nous n'avons aucune information concernant l'emplacement de la prochaine faute.

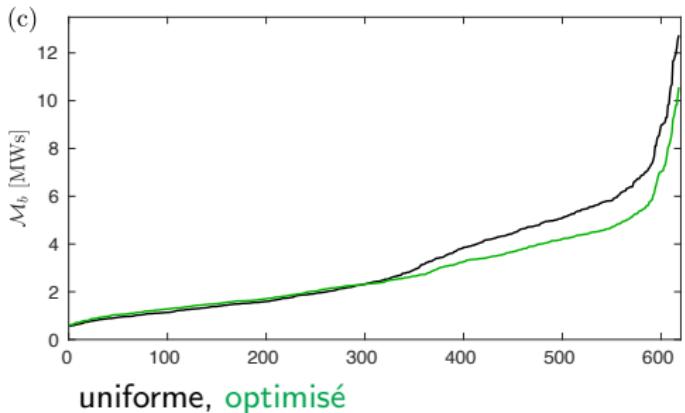
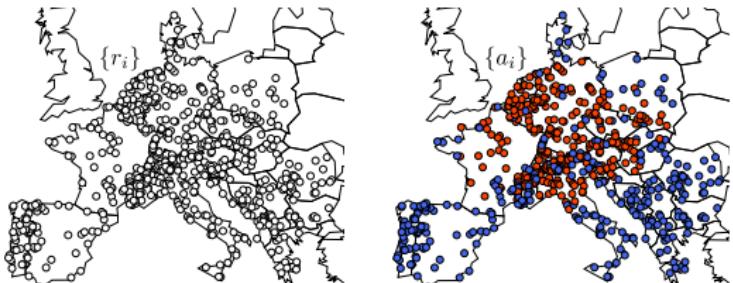
Mesure de "vulnérabilité" :

$$\mathcal{V} = \sum_b \eta_b \mathcal{M}_b$$

Avec  $\eta_b = 1$ ,  $\forall b$ , nous obtenons

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial r_i} = 0$$

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial a_i} = -\frac{g\delta P^2}{2\gamma m} \sum_{\alpha>1} \frac{u_{\alpha i}^{(0)2}}{\lambda_\alpha}.$$



# Réduction de la vulnérabilité du réseau

A priori, nous n'avons aucune information concernant l'emplacement de la prochaine faute.

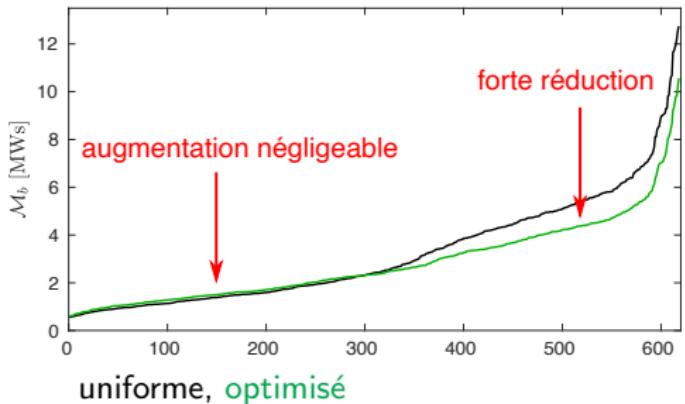
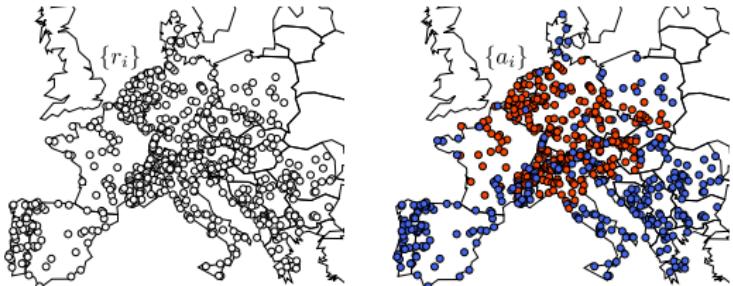
Mesure de "vulnérabilité" :

$$\mathcal{V} = \sum_b \eta_b \mathcal{M}_b$$

Avec  $\eta_b = 1$ ,  $\forall b$ , nous obtenons

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial r_i} = 0$$

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial a_i} = -\frac{g\delta P^2}{2\gamma m} \sum_{\alpha>1} \frac{u_{\alpha i}^{(0)2}}{\lambda_\alpha}.$$



# Réduction de la vulnérabilité du réseau

A priori, nous n'avons aucune information concernant l'emplacement de la prochaine faute.

Mesure de "vulnérabilité" :

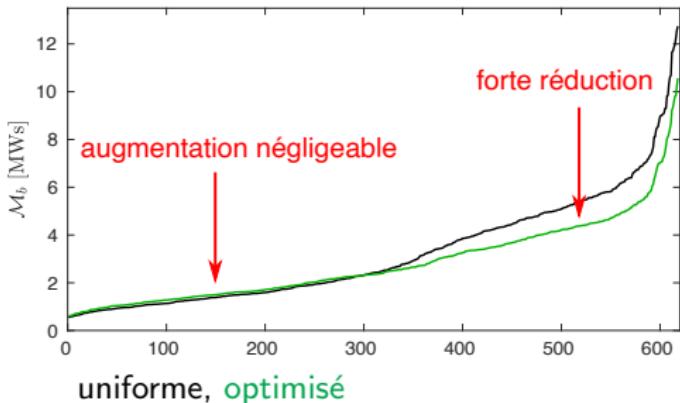
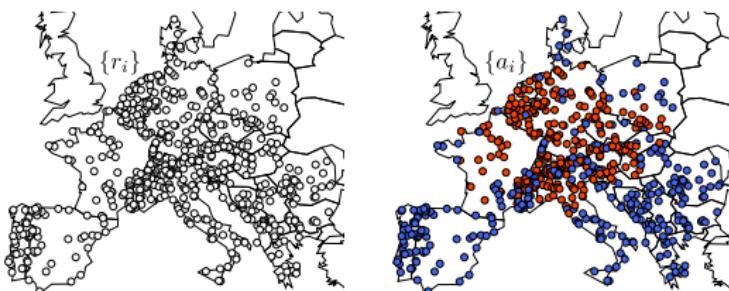
$$\mathcal{V} = \sum_b \eta_b \mathcal{M}_b$$

Avec  $\eta_b = 1$ ,  $\forall b$ , nous obtenons

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial r_i} = 0$$

$$\sum_b \frac{\partial \mathcal{M}_b}{\partial a_i} = -\frac{g\delta P^2}{2\gamma m} \sum_{\alpha>1} \frac{u_{\alpha i}^{(0)2}}{\lambda_\alpha}.$$

12% de réduction de la vulnérabilité.



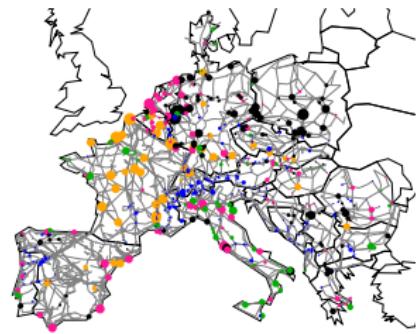
# Conclusion

Nous avons développé différents modèles afin d'étudier les effets de la transition énergétique sur les réseaux électriques.

Du point de vue énergétique : Les infrastructures actuelles (stockage et réseau) semblent être capables de faire face à des pénétrations de NER bien supérieures à leurs niveaux actuels.

Du point de vue dynamique : Le retrait des générateurs conventionnels diminue la quantité d'inertie et de contrôle primaire connectée au réseau.

Avec un placement judicieux du réglage primaire et de l'inertie, on peut fortement réduire l'intensité de la perturbation ou la vulnérabilité globale du réseau.





# Une étude analytique des perturbations dans les réseaux électriques

But : comprendre le rôle de la géométrie du réseau, du contrôle primaire et de l'inertie

- 1) résoudre la dynamique du système après une faute
- 2) quantifier la perturbation  $\Rightarrow$  introduire une mesure
- 3) évaluer cette mesure
- 4) essayer de la minimiser

# Une étude analytique des perturbations dans les réseaux électriques

But : comprendre le rôle de la géométrie du réseau, du contrôle primaire et de l'inertie

- 1) résoudre la dynamique du système après une faute
- 2) quantifier la perturbation  $\Rightarrow$  introduire une mesure
- 3) évaluer cette mesure
- 4) essayer de la minimiser

Une étude analytique implique des hypothèses :

- tous les bus ont de l'inertie

$$m_i \dot{\omega}_i + d_i \omega_i = P_i(t) - \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)$$

# Une étude analytique des perturbations dans les réseaux électriques

But : comprendre le rôle de la géométrie du réseau, du contrôle primaire et de l'inertie

- 1) résoudre la dynamique du système après une faute
- 2) quantifier la perturbation  $\Rightarrow$  introduire une mesure
- 3) évaluer cette mesure
- 4) essayer de la minimiser

Une étude analytique implique des hypothèses :

- tous les bus ont de l'inertie
- la dynamique peut être linéarisée  $[\theta_i(t) = \theta_i^{(0)} + \delta\theta_i(t)]$

$$m_i \delta \dot{\omega}_i + d_i \delta \omega_i = \delta P_i(t) - \sum_j b_{ij} \cos(\theta_i^{(0)} - \theta_j^{(0)}) (\delta \theta_i - \delta \theta_j)$$

$$P_i(t) = P_i^{(0)} + \delta P_i(t), \text{ where } P_i^{(0)} = \sum_j b_{ij} \sin(\theta_i^{(0)} - \theta_j^{(0)})$$

# Une étude analytique des perturbations dans les réseaux électriques

But : comprendre le rôle de la géométrie du réseau, du contrôle primaire et de l'inertie

- 1) résoudre la dynamique du système après une faute
- 2) quantifier la perturbation  $\Rightarrow$  introduire une mesure
- 3) évaluer cette mesure
- 4) essayer de la minimiser

Une étude analytique implique des hypothèses :

- tous les bus ont de l'inertie
- la dynamique peut être linéarisée  $[\theta_i(t) = \theta_i^{(0)} + \delta\theta_i(t)]$

$$\boxed{\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{D}\boldsymbol{\omega} = \delta\boldsymbol{P}(t) - \boldsymbol{L}\boldsymbol{\theta}}$$

$$\boldsymbol{M} = \text{diag}(\{m_i\}), \boldsymbol{D} = \text{diag}(\{d_i\}) \text{ and } \boldsymbol{L}_{ij} = \begin{cases} \sum_k b_{ik} \cos(\theta_i^{(0)} - \theta_k^{(0)}), & \text{si } i = j, \\ -b_{ij} \cos(\theta_i^{(0)} - \theta_j^{(0)}), & \text{sinon.} \end{cases}$$

# Une étude analytique des perturbations dans les réseaux électriques

But : comprendre le rôle de la géométrie du réseau, du contrôle primaire et de l'inertie

- 1) résoudre la dynamique du système après une faute
- 2) quantifier la perturbation  $\Rightarrow$  introduire une mesure
- 3) évaluer cette mesure
- 4) essayer de la minimiser

Une étude analytique implique des hypothèses :

- tous les bus ont de l'inertie
- la dynamique peut être linéarisée  $[\theta_i(t) = \theta_i^{(0)} + \delta\theta_i(t)]$
- faibles inhomogénéités dans les paramètres d'inertie et d'amortissement.

$$\boxed{M\dot{\omega} + D\omega = \delta P(t) - L\theta}$$

# Une étude analytique des perturbations dans les réseaux électriques

But : comprendre le rôle de la géométrie du réseau, du contrôle primaire et de l'inertie

- 1) résoudre la dynamique du système après une faute
- 2) quantifier la perturbation  $\Rightarrow$  introduire une mesure
- 3) évaluer cette mesure
- 4) essayer de la minimiser

Une étude analytique implique des hypothèses :

- tous les bus ont de l'inertie
- la dynamique peut être linéarisée  $[\theta_i(t) = \theta_i^{(0)} + \delta\theta_i(t)]$
- faibles inhomogénéités dans les paramètres d'inertie et d'amortissement.

$$\boxed{M\dot{\omega} + D\omega = \delta P(t) - L\theta}$$

Nous limitons notre étude à des pertes de puissances abruptes  $\delta P(t) = \delta P\Theta(t)$ .

Fonction de Heaviside :  $\Theta(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t \leq 0, \\ 1, & \text{si } t > 0 \end{cases} .$

# Une étude analytique des perturbations dans les réseaux électriques

But : comprendre le rôle de la géométrie du réseau, du contrôle primaire et de l'inertie

- 1) résoudre la dynamique du système après une faute
- 2) quantifier la perturbation  $\Rightarrow$  introduire une mesure
- 3) évaluer cette mesure
- 4) essayer de la minimiser

Une étude analytique implique des hypothèses :

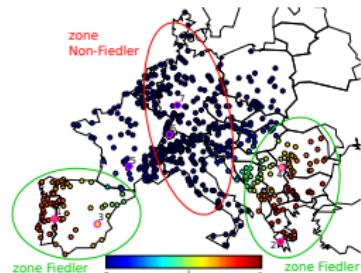
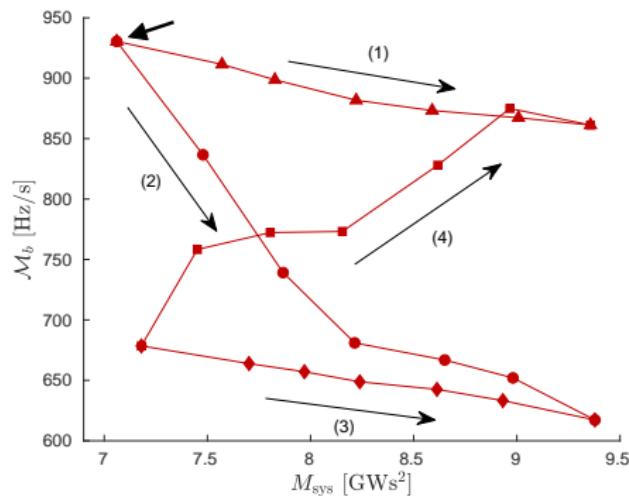
- tous les bus ont de l'inertie
- la dynamique peut être linéarisée  $[\theta_i(t) = \theta_i^{(0)} + \delta\theta_i(t)]$
- faibles inhomogénéités dans les paramètres d'inertie et d'amortissement.

$$\boxed{M\dot{\omega} + D\omega = \delta P(t) - L\theta}$$

Nous limitons notre étude à des pertes de puissances abruptes  $\delta P(t) = \delta P\Theta(t)$ .

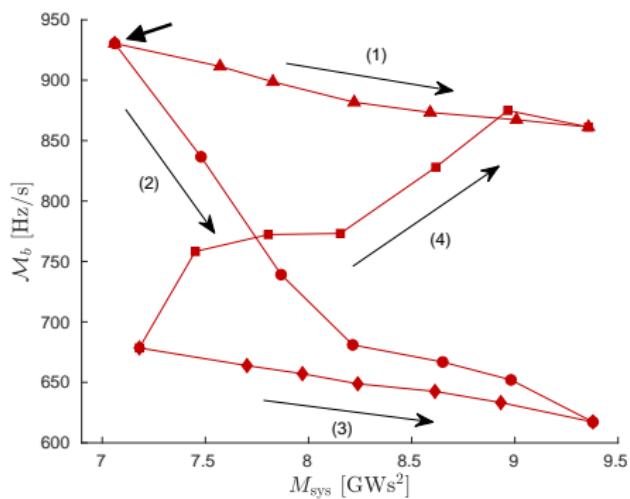
Notre mesure :  $\boxed{\mathcal{M} = \int_0^{\infty} (\omega^\top - \bar{\omega}^\top) M (\omega - \bar{\omega}) dt, \quad \text{où} \quad \bar{\omega}_i = \sum_k m_k \omega_k / \sum_k m_k}$

# Inertie dans les zones Fiedler et non-Fiedler vs l'intensité des perturbations

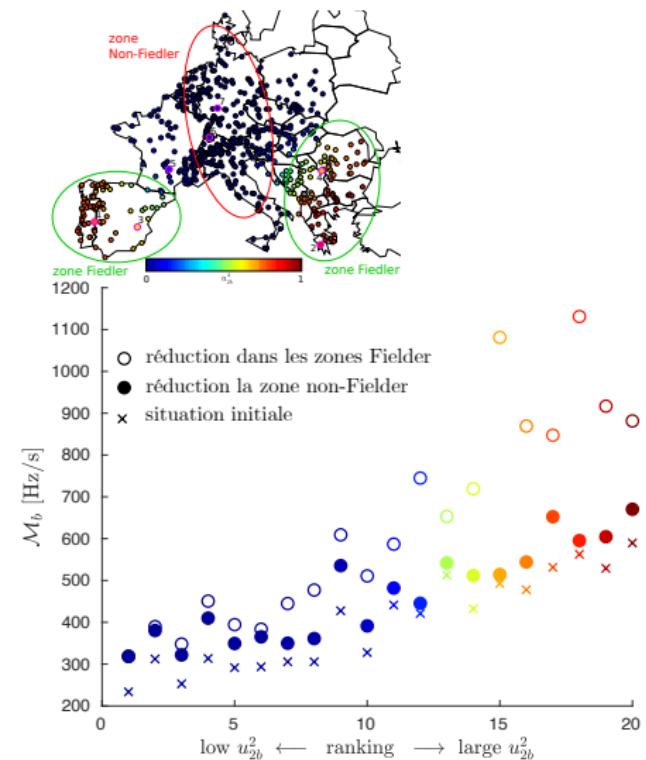


- (1) Augmentation dans la zone non-Fiedler
- (2) Augmentation dans les zones Fiedler
- (3) Augmentation dans la zone non-Fiedler
- (4) Réduction dans les zones Fiedler et augmentation dans la zone non-Fiedler

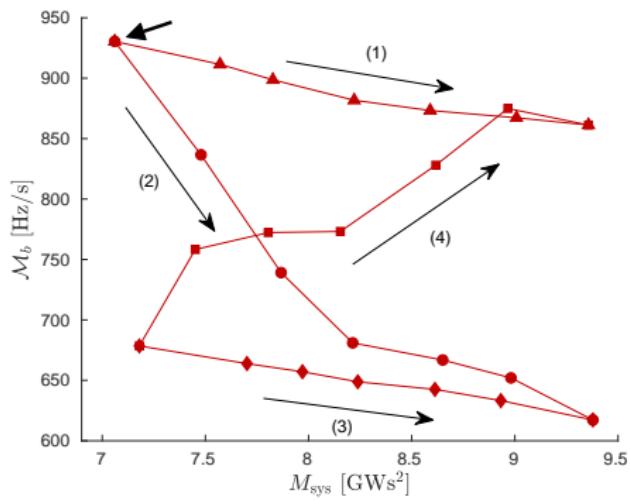
# Inertie dans les zones Fiedler et non-Fiedler vs l'intensité des perturbations



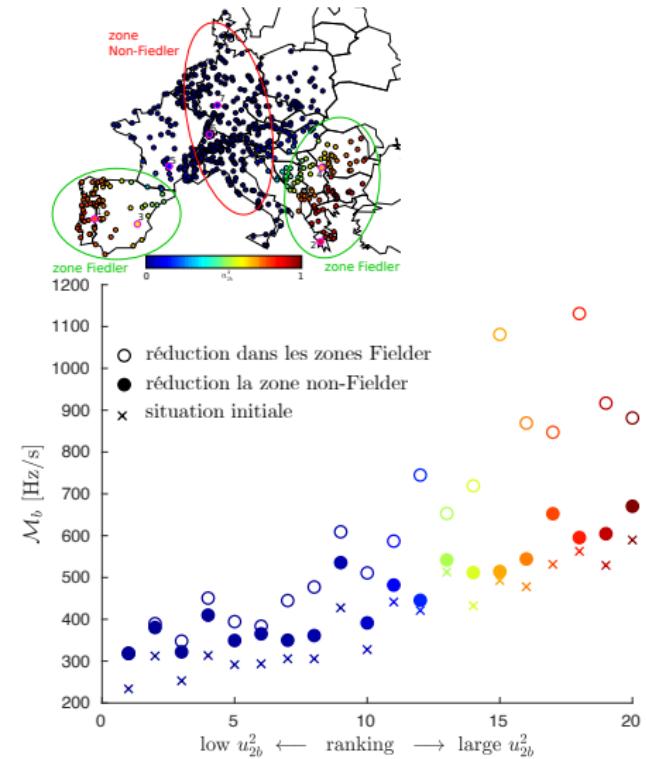
- (1) Augmentation dans la zone non-Fiedler
- (2) Augmentation dans les zones Fiedler
- (3) Augmentation dans la zone non-Fiedler
- (4) Réduction dans les zones Fiedler et augmentation dans la zone non-Fiedler



# Inertie dans les zones Fiedler et non-Fiedler vs l'intensité des perturbations



- (1) Augmentation dans la zone non-Fiedler
- (2) Augmentation dans les zones Fiedler
- (3) Augmentation dans la zone non-Fiedler
- (4) Réduction dans les zones Fiedler et augmentation dans la zone non-Fiedler



Plus il y a d'inertie dans la zone Fiedler, plus le réseau est résilient.