

Réconciliation des échelles spatio-temporelles dans les exercices prospectifs de long terme et application à la pénétration du renouvelable en France

-
Journée de la Chaire Modélisation Prospective 13/01/2017

Thèse de Vincent KRAKOWSKI
Sous la direction de Nadia MAÏZI
Centre de Mathématiques Appliquées
Ecole Mines ParisTech, PSL Research University

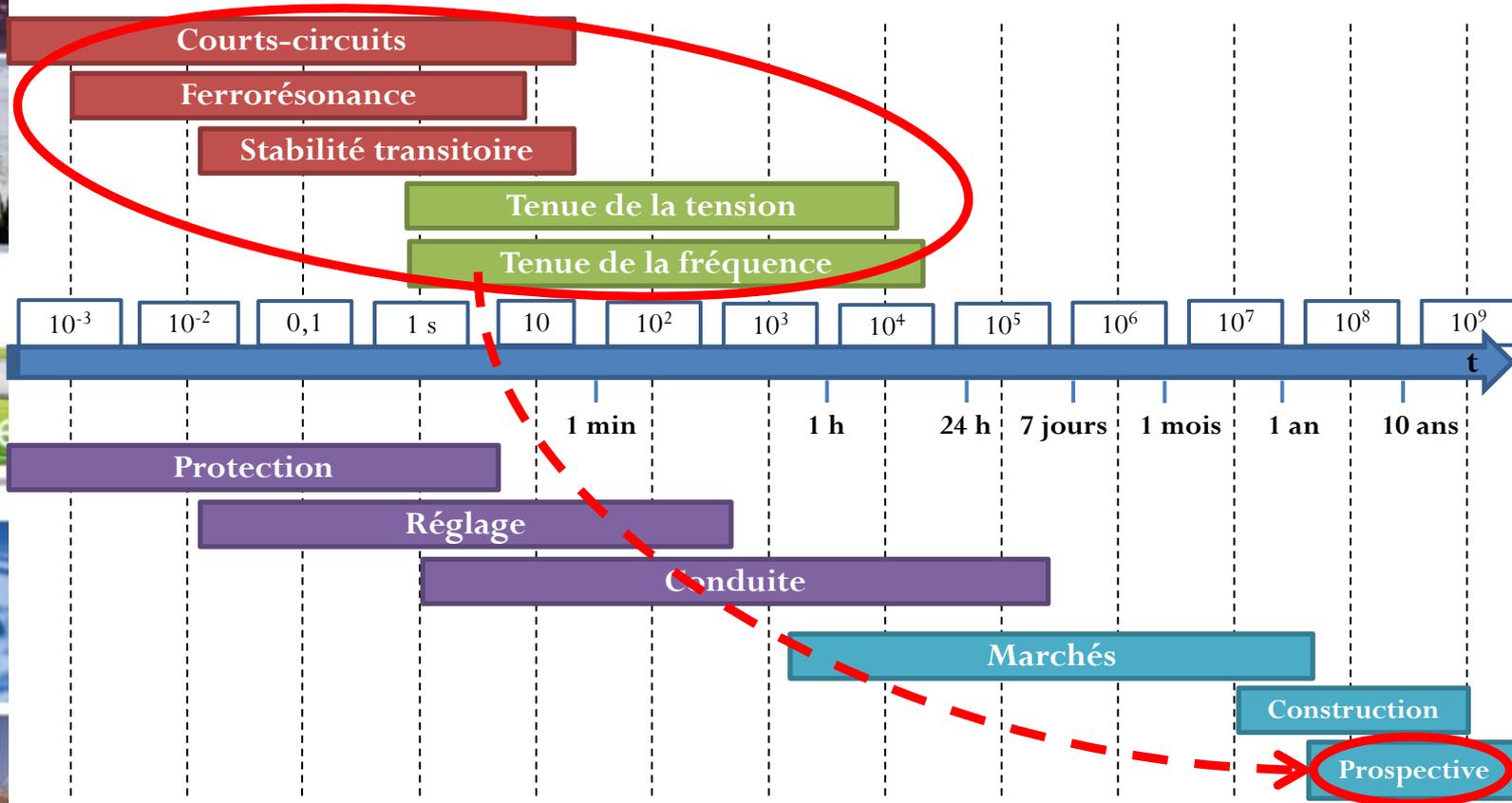
PLAN de la présentation

1. Enjeux de modélisation des évolutions de long terme du système électrique
2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles
3. Application à la pénétration du renouvelable dans le système électrique français
4. Conclusions et perspectives de recherche

1. Enjeux de modélisation des évolutions de long terme du système électrique



Echelles de temps correspondant aux différents phénomènes physiques et grands domaines d'activité des systèmes électriques



Source : Adapté de Drouineau 2012 et de Meyer 1998



PLAN de la présentation

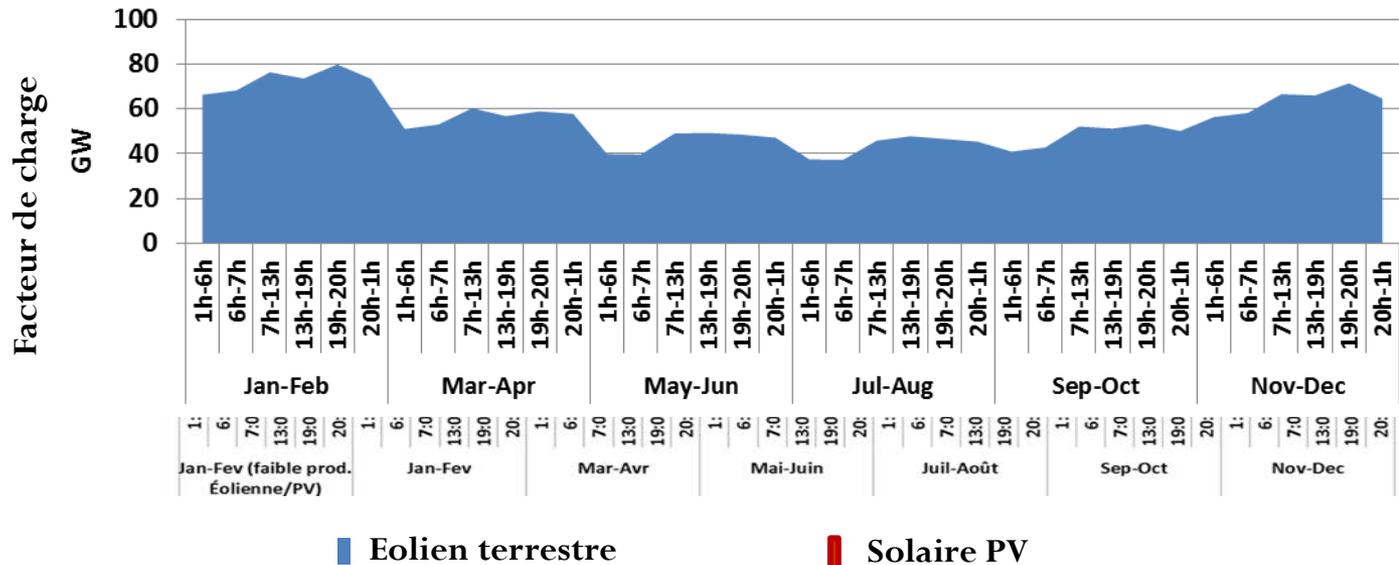
1. Enjeux de modélisation des évolutions de long terme du système électrique
2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles
3. Application à la pénétration du renouvelable dans le système électrique français
4. Conclusions et perspectives de recherche



2.1 Le long-terme : Un modèle TIMES pour le système électrique français

Périmètre :

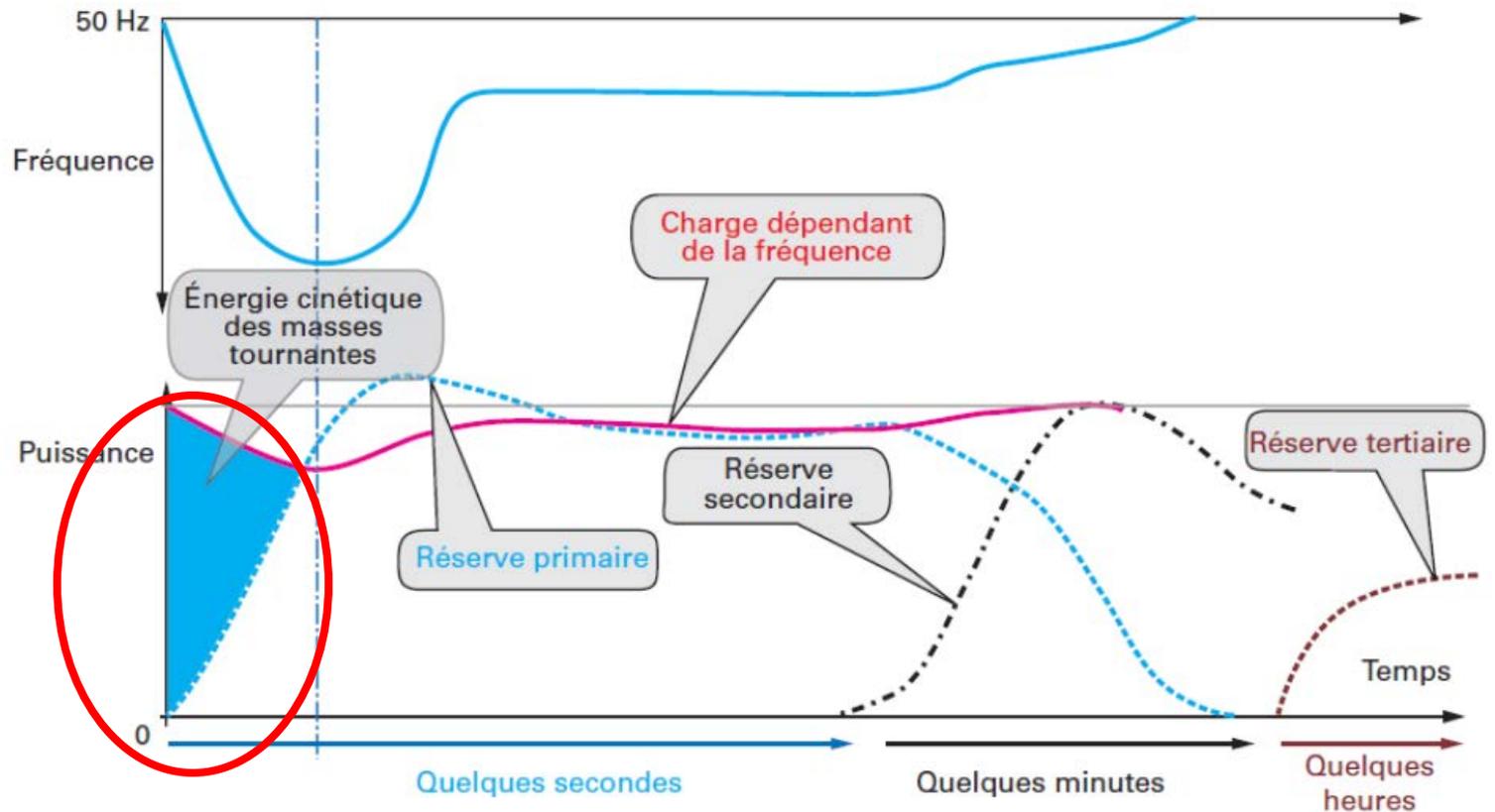
- **Périmètre géographique :** France continentale (1 seule région)
- **Périmètre technologique :** Secteur électrique
- **Périmètre temporel :** 2013 – 2050 (9 périodes)
- **Découpage temporel des périodes :** 84 TS soit 6 « saisons » de 2 mois + 1 semaine hivernale avec faible production éolienne/PV x 2 journées type (WD/WE) x 6 plages horaires
- **Demande :** scénario référence RTE BP2014 (495TWh --> 520TWh en 2050) + élasticité de la demande (-40 TWh max en 2050)



■ Eolien terrestre

■ Solaire PV

2.2 Le court-terme : La réserve cinétique



Source : Techniques de l'ingénieur, Fraisse et Karsenti, 2014

2.2 Le court-terme : La réserve cinétique

temps disponible pour faire face à une fluctuation dimensionnante

$$H_{cin} = \frac{E_{cin,tot}}{\alpha S_{app}}$$

énergie cinétique totale

fraction de la puissance apparente totale

$$E_{cin} = \sum_{i \in \{machines\ synchrones\}} \left\{ \frac{1}{2} J_i \times \left(\frac{\omega^2}{p_i} \right) \right\} = \sum_i H_i S_i$$

J_i : moment d'inertie

p_i : nombre paires de pôles

ω : fréquence réseau

H_i : coefficient cinétique réduit

S_i : puissance apparente

+ H_{cin} élevé, + le système sera capable de faire face à une fluctuation

Mathilde Drouineau (2011)

2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles



2.3 Réconciliation du court-terme et du long-terme : endogénéisation de l'indicateur cinétique dans TIMES

Des process décrivant des TECHNOLOGIES de production d'électricité

Des process décrivant des UNITES de production d'électricité



Modèle TIMES « classique »

Stéphanie Bouckaert (2013)



Modèle TIMES « discret »

Module GAMS calcul H_{cin}
 $\forall t, H_{cin}(t) > H_{cin,min}$

2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles



OUI MAIS....

temps disponible pour faire face à une fluctuation dimensionnante

$$H_{cin} = \frac{E_{cin,tot}}{\alpha S_{app}}$$

énergie cinétique totale

fraction de la puissance apparente totale

$$E_{cin} \leq \sum_{i \in \{machines\ synchrones\}} \left\{ \frac{1}{2} J_i \times \left(\frac{\omega^2}{p_i} \right) \right\} = \sum_i H_i S_i$$

Egalité si synchronisme

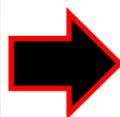
J_i : moment d'inertie

p_i : nombre paires de pôles

ω : fréquence réseau

H_i : coefficient cinétique réduit

S_i : puissance apparente

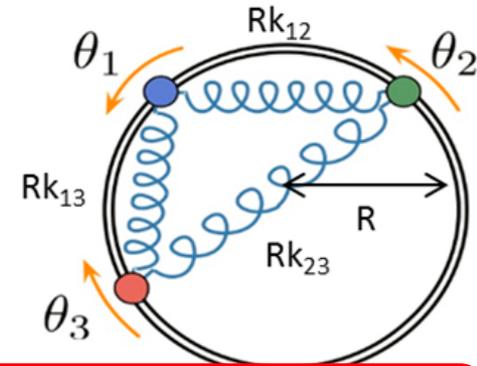
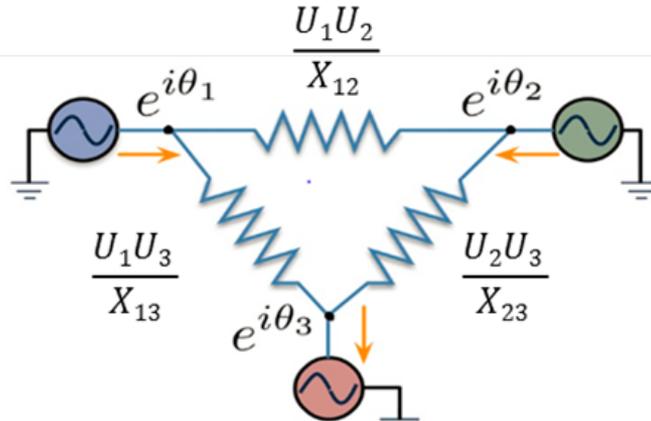


+ H_{cin} élevé, + le système sera capable de faire face à une fluctuation... à condition qu'il y ait synchronisme !

2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles



2.4 Analyse dynamique du système électrique et modèle de Kuramoto



Sch... échangeant de...
travers un réseau inductif

Modèle de Kuramoto

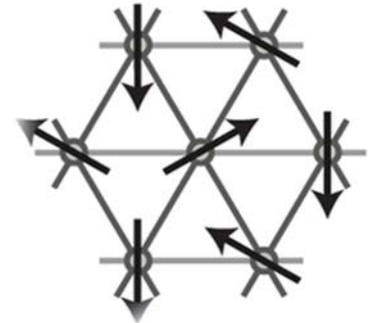
...angeant de...
...e ressorts



2.4 Analyse dynamique du système électrique et modèle de Kuramoto

Dynamique transitoire d'un système électrique (suite à une perturbation) :

$$\begin{cases} M_i \ddot{\theta}_i + D_i \dot{\theta}_i = P_{g,i} - P_{c,i} - \sum_j C_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \\ D_i \dot{\theta}_i = P_{g,i} - P_{c,i} - \sum_j C_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \end{cases}$$



θ_i : Phase de la tension au nœud i

M_i : Moment d'inertie équivalent au nœud i

D_i : Coefficient d'amortissement équivalent au nœud i

$P_{g,i}$: Puissance générée au nœud i

$P_{c,i}$: Puissance consommée au nœud i

C_{ij} : Coefficient de couplage de la ligne reliant i et j

$$C_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \approx \frac{U_i^2}{X_{ij}}$$

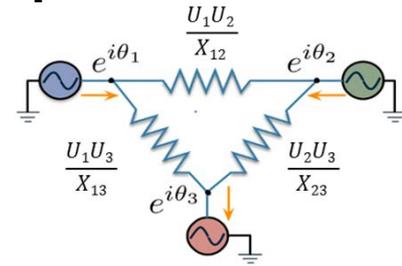
U_i : Amplitude de la tension au nœud i

X_{ij} : Réactance de la ligne reliant i et j

2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles

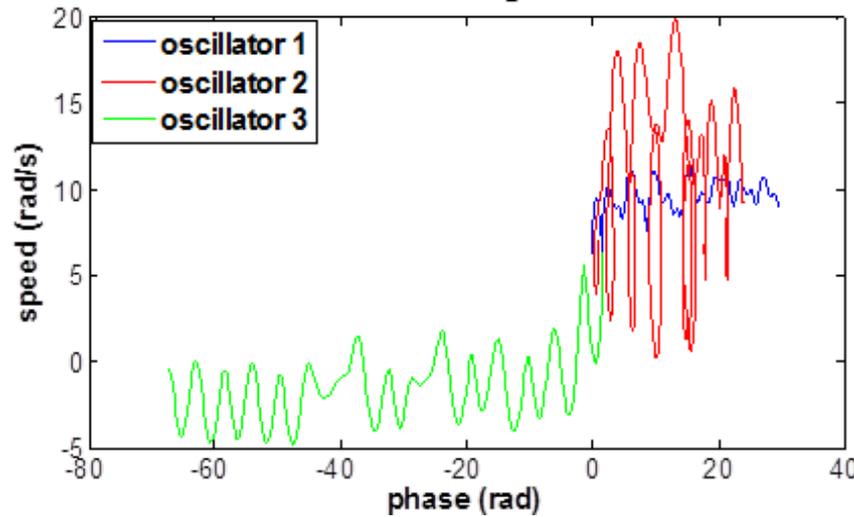


2.4 Analyse dynamique du système électrique et modèle de Kuramoto



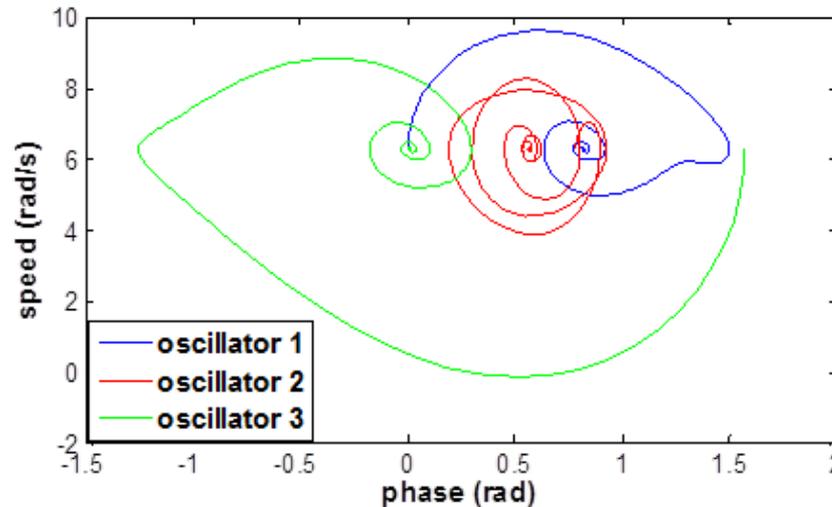
Cas instable

$$\forall(i,j), C_{ij} = 7$$



Cas stable

$$\forall(i,j), C_{ij} = 7,2$$



2.5 L'indicateur de synchronisme

Condition suffisante de stabilité locale d'un système dynamique décrit par un modèle de Kuramoto (du 1^{er} ou 2^{ème} ordre) :

$$\lambda_2(L_{G,p}) \geq \max_{(i,j) \in \mathcal{A}_G} |P_i - P_j|$$

(Dörfler, 2013)

Pour le système électrique, la vérification de cette condition garantit le retour au synchronisme suite à un aléa (« pas trop grand »)

Indicateur de « synchronisme »:

$$H_{sync} = \frac{\lambda_2(L_{G,p})}{\max_{(i,j) \in \mathcal{A}_G} |P_i - P_j|}$$

L'indicateur de synchronisme compare la « robustesse » du réseau électrique aux flux maximaux devant transiter sur ce réseau (congestions)



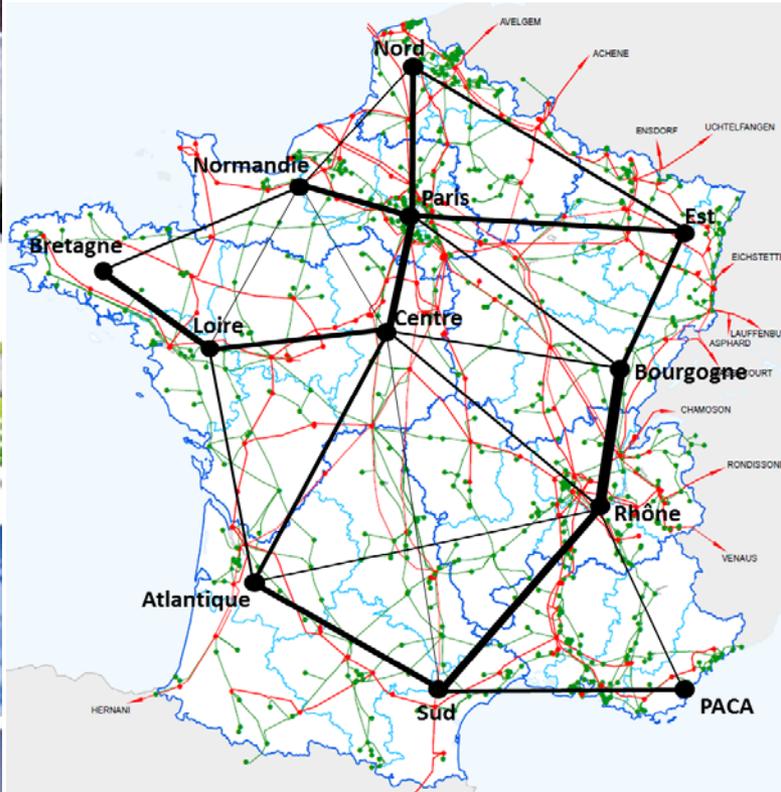
2.5 L'indicateur de synchronisme

Calcul agrégé de l'indicateur de synchronisme

$$H_{sync} = \frac{\lambda_2(L_{G,p})}{\max_{(i,j) \in \mathcal{A}_G} |P_i - P_j|}$$

$$\lambda_2(L_{G,p}) = \lambda_2(L_G) \times \bar{C}$$

$$\bar{C} = \frac{U^2}{\bar{l}\bar{x}}$$



— Ligne 400 kV
— Ligne 225 kV

— Faible connexion entre régions
— Forte connexion entre régions

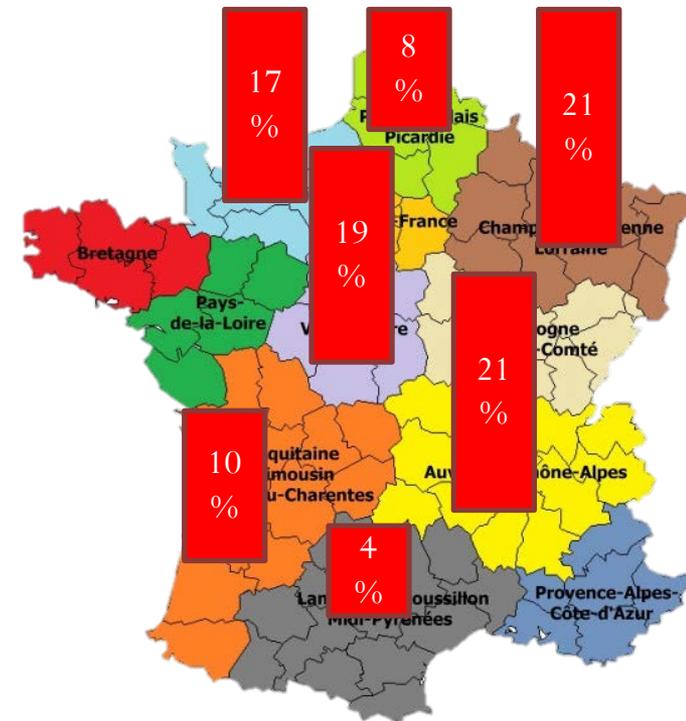
- λ_2 : Connectivité algébrique
- G : Graphe du réseau
- $L_{G,p}$: Laplacienne pondérée de G
- L_G : Laplacienne non-pondérée de G
- \bar{C} : Couplage moyen
- U : Tension du réseau (400 kV)
- \bar{l} : longueur moyenne des lignes
- \bar{x} : réactance moyenne du réseau



2.5 L'indicateur de synchronisme

$$H_{sync} = \frac{\lambda_2(L_{G,p})}{\max_{(i,j) \in \mathcal{A}_G} |P_i - P_j|}$$

	Régions			
Techno	R ₁	R ₂	R ₃	tot
T _X	$\alpha_{Tx,1}$	$\alpha_{Tx,2}$	$\alpha_{Tx,3}$	1
T _Y	$\alpha_{Ty,1}$	$\alpha_{Ty,2}$	$\alpha_{Ty,3}$	1
Imports	$\alpha_{Imp,1}$	$\alpha_{Imp,2}$	$\alpha_{Imp,3}$	1
Exports	$\alpha_{Exp,1}$	$\alpha_{Exp,2}$	$\alpha_{Exp,3}$	1
Conso	$\alpha_{Dem,1}$	$\alpha_{Dem,2}$	$\alpha_{Dem,3}$	1



Hypothèse : « non-évolution » de la répartition des technologies :
 $\forall t \in \{Techno\}, \forall r \in \{Régions\}, \forall a \in \{Années\}, \alpha_{t,r}(a) = \alpha_{t,r}(2013)$



PLAN de la présentation

1. Enjeux de modélisation du système électrique dans des exercices prospectifs de long terme
2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles
3. Application à la pénétration du renouvelable dans le système électrique français
4. Conclusions



3.1 Scénarios modélisés

Scénarios	Années	BAU	60EnR 2050	70EnR 2050	75EnR 2050	80EnR 2050
Part max du nucléaire dans le mix	> 2025	NA	50%	50%	50%	50%
Part min du renouvelable dans le mix	2020	NA	27%	27%	27%	27%
	2030	NA	40%	40%	40%	40%
	2035	NA	40%	40%	40%	40%
	2040	NA	40%	40%	45%	50%
	2045	NA	45%	55%	60%	65%
	2050	NA	60%	70%	75%	80%

Loi transition énergétique ←

Objectifs
→ pénétration EnR +
ambitieux

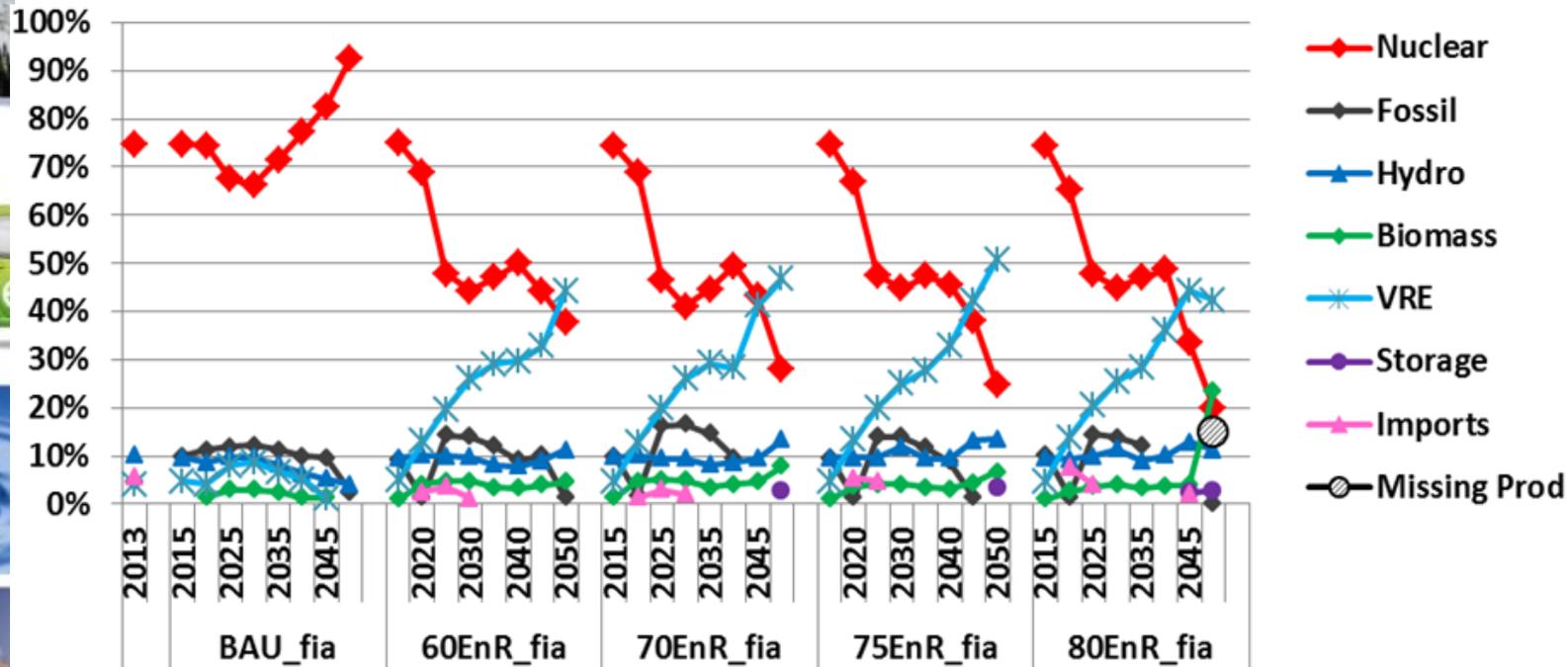
Contrainte de fiabilité (scénarios « *fia* ») :

$$\forall t, H_{cin}(t) \geq \min_{2013} H_{cin} = 30 \text{ s}$$



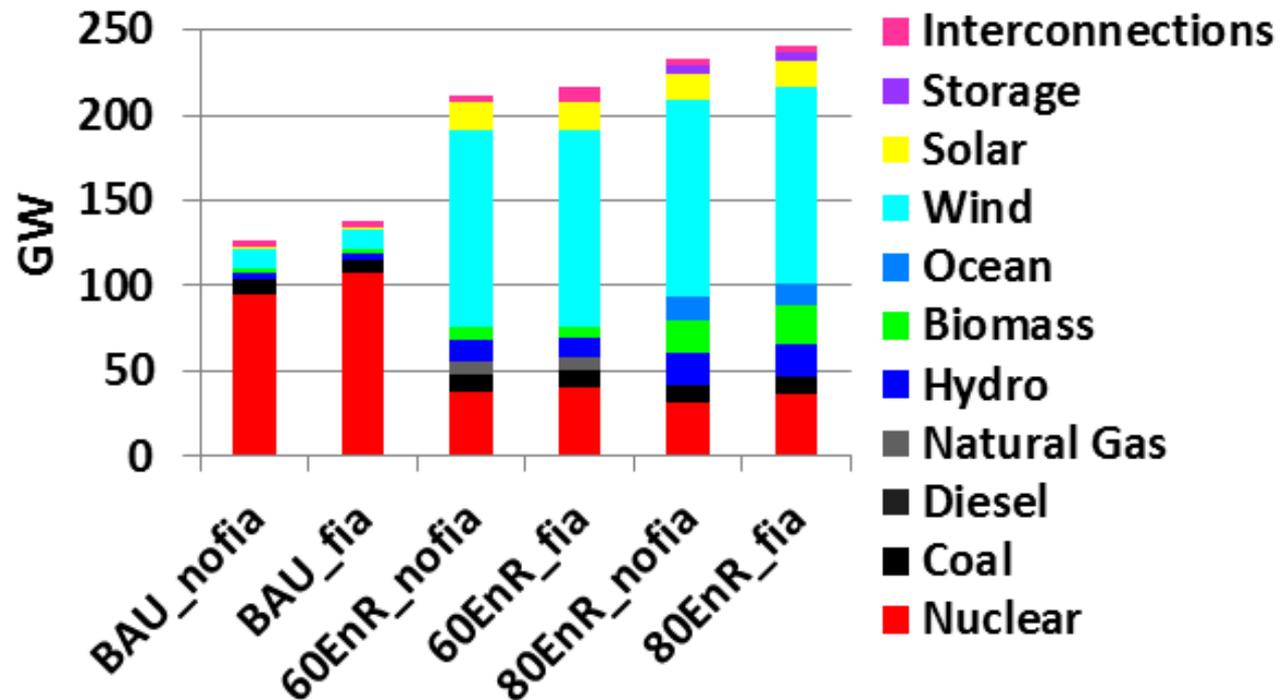
3.2 Evolution optimale du mix de production

Evolution de la part des différents combustibles dans la production d'électricité française pour différents objectifs de pénétration du renouvelable avec contrainte de fiabilité de la fourniture.



3.2 Evolution optimale du mix de production

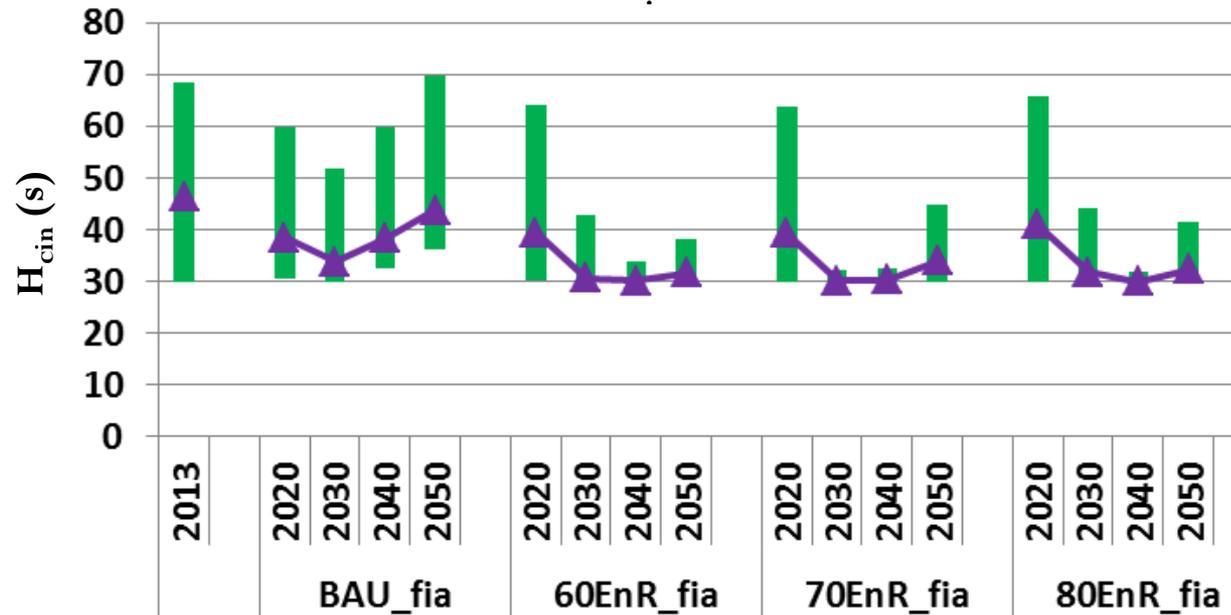
Capacité totale installée de nouveaux moyens de production d'électricité entre 2014 et 2050 pour différents objectifs de pénétration du renouvelable, avec et sans contrainte de fiabilité (« fia » et « nofia »).





3.3 Evolution de la capacité du système à faire face aux aléas

Evolution de la fiabilité du système électrique français (H_{cin}) pour différents objectifs de pénétration du renouvelable, avec et sans contrainte de fiabilité (« fia » et « nofia »).



$$\forall t, H_{cin}(t) \geq \min_{2013} H_{cin} = 30 \text{ s}$$

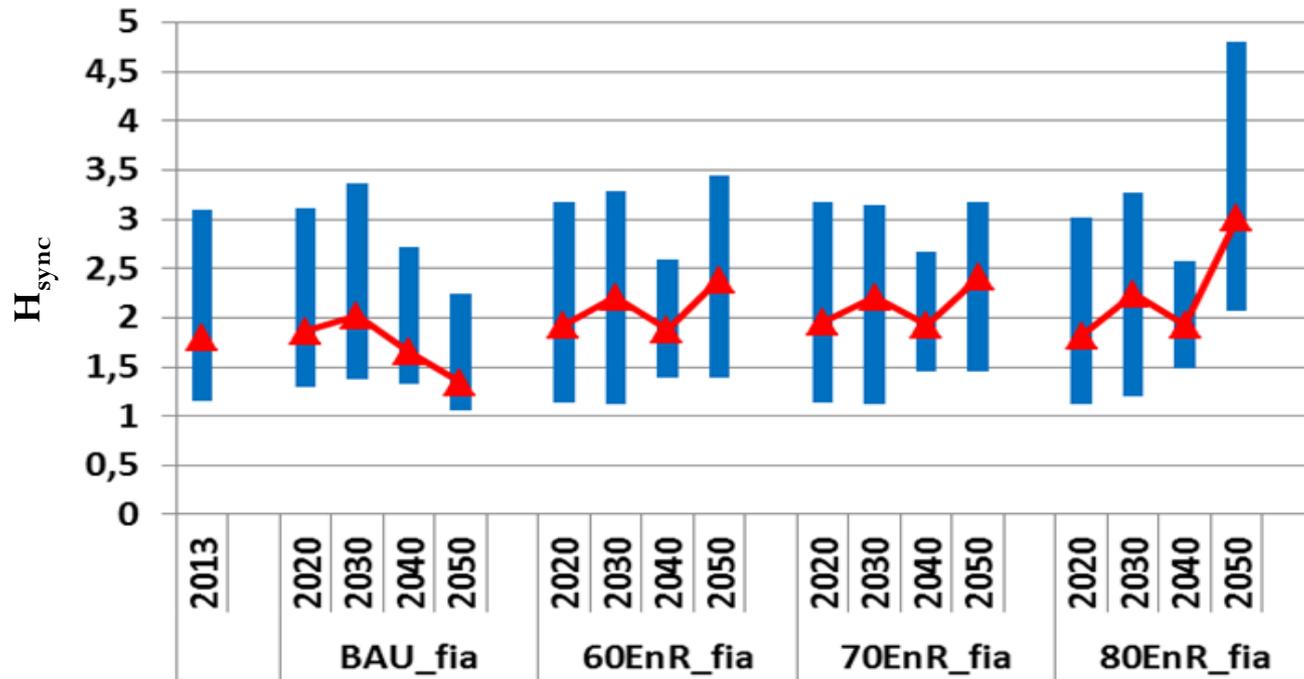
▲ H_{cin} moyen

█ Plage de variation H_{cin}



3.4 Evolution de la stabilité du système électrique

Evolution de la stabilité du système électrique français (H_{sync}) pour différents objectifs de pénétration du renouvelable.



$$H_{sync} = \frac{\lambda_2(L_{G,p})}{\max_{(i,j) \in \mathcal{A}_G} |P_i - P_j|}$$

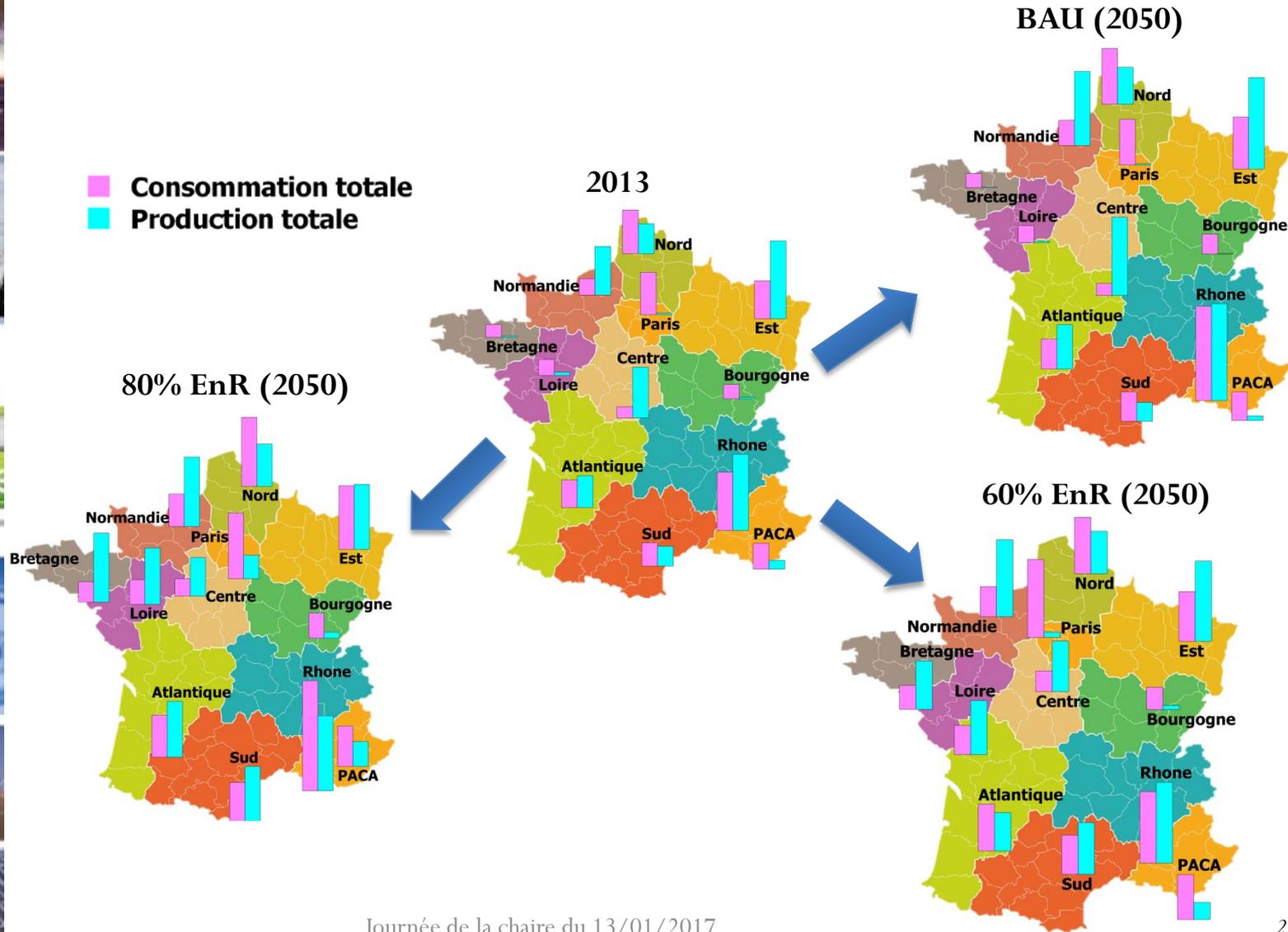
▲ H_{sync} moyen

■ Plage de variation H_{sync}



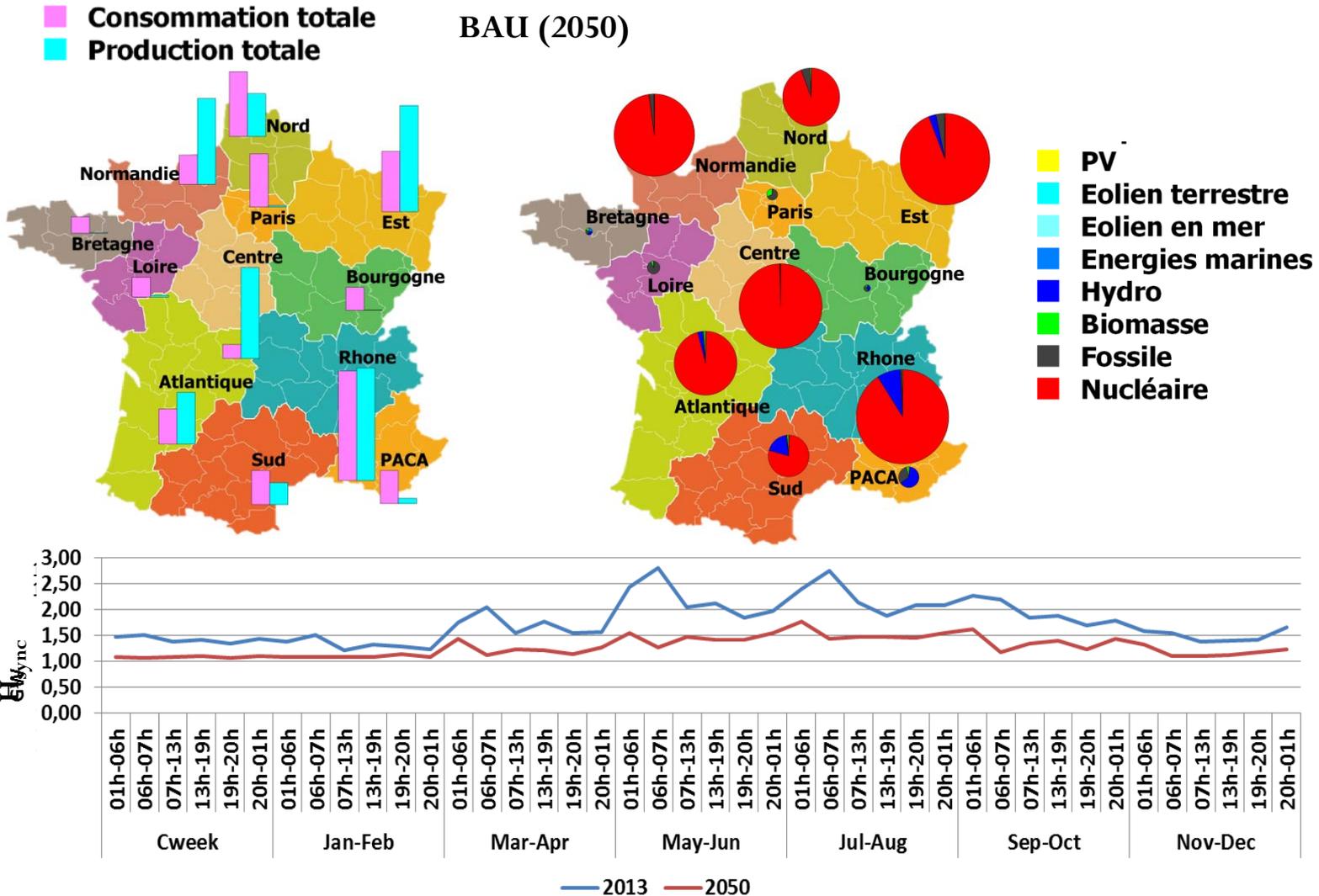
3.4 Evolution de la stabilité du système électrique

■ Consommation totale
■ Production totale





3.4 Evolution de la stabilité du système électrique

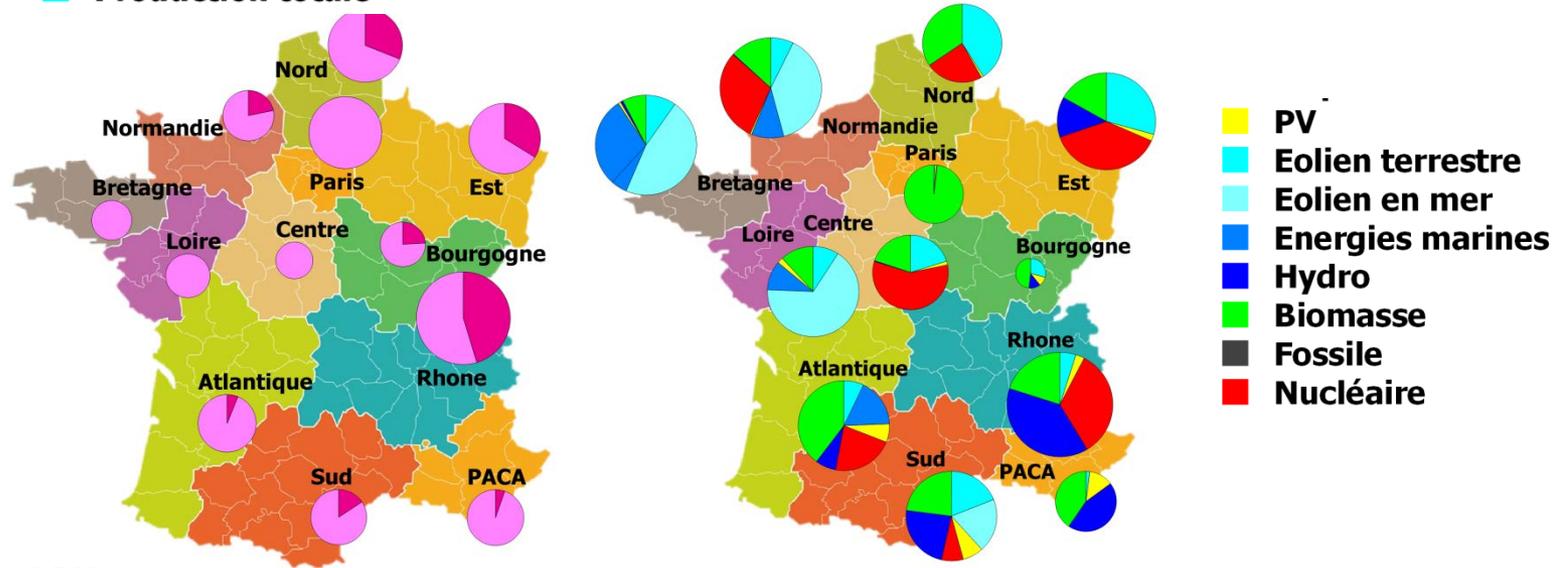




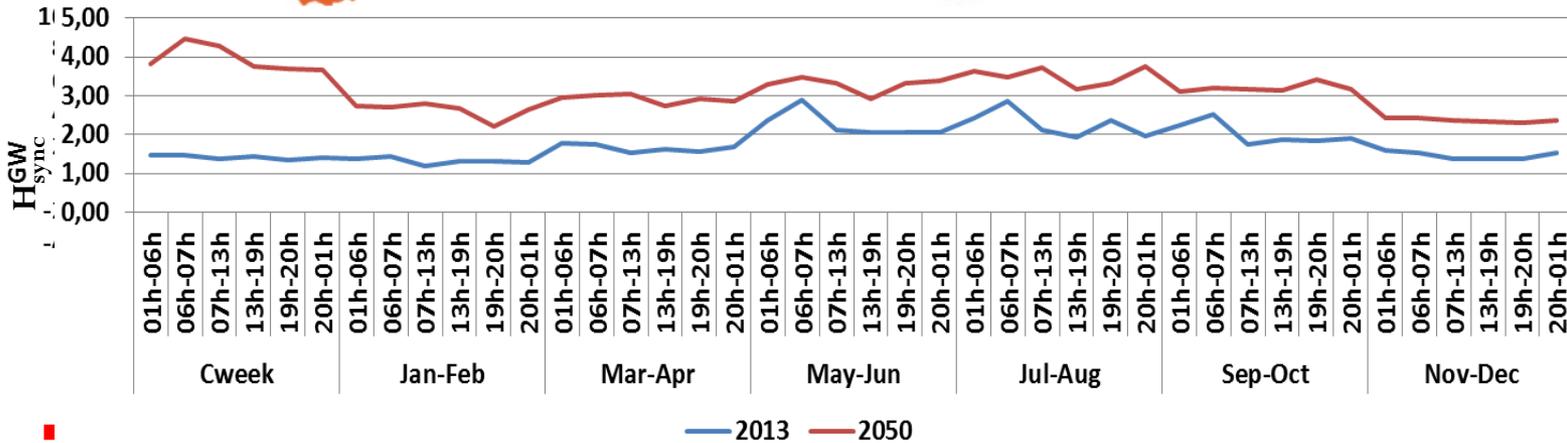
3.4 Evolution de la stabilité du système électrique

■ Consommation totale
■ Production totale

80% EnR (2050)



- PV
- Eolien terrestre
- Eolien en mer
- Energies marines
- Hydro
- Biomasse
- Fossile
- Nucléaire



PLAN de la présentation

1. Enjeux de modélisation du système électrique dans des exercices prospectifs de long terme
2. L'approche proposée : réconciliation des échelles spatio-temporelles
3. Application à la pénétration du renouvelable dans le système électrique français
4. Conclusions



Contribution principale :

- **Réconcilier le court-terme** de la dynamique de ces systèmes (phénomènes transitoires) avec le **long-terme de la prospective**
- 2 indicateurs proposés :
 - **Indicateur de synchronisme (H_{sync})** : maintien du synchronisme suite à un aléa grâce au réseau électrique
 - ✓ Mesure des **congestions** sur un réseau électrique agrégé, augmente avec le degré de **décentralisation** du système
 - ✓ Si $H_{sync} \geq 1$: on peut **agrégier l'inertie** apportée par chaque machine connectée au réseau électrique
 - **Indicateur cinétique (H_{cin})** : stock d'énergie emmagasinée dans les machines tournantes pour faire face à un déséquilibre offre-demande
 - ✓ **Durée** dont dispose un opérateur pour **faire face à une fluctuation** dimensionnante
 - ✓ Besoin de machines avec une **inertie suffisante**

Application de la méthodologie :

- Développement d'une suite de modèles pour :
 - **Scénarios** d'évolution du système électrique **cohérents** avec son fonctionnement
 - Evaluation de **la stabilité du système électrique** (*validant ou invalidant le calcul endogène de H_{cin}*)
 - Evaluation des **renforcements du réseau de transport** nécessaires
- Pénétration du renouvelable dans le système électrique français :
 - **Dégradation des réserves cinétiques**
 - Jusqu'à **75% de pénétration**, maintien de ces réserves au dessus d'un seuil, au-delà besoin de **ressources biomasse** plus conséquentes
 - **Coût** plus élevé et **baisse de la demande**
 - **Décentralisation** du système électrique et baisse de la demande donc de la production = **moins d'échanges** d'électricité entre régions = **moins** de besoins de **réseau de transport interrégional** (*possiblement reporté sur le réseau de transport infrarégional et sur le réseau de distribution*)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Références :

- Thèse d'Edi Assoumou « *Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français* » (2006)
- Thèse de Mathilde Drouineau « *Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique* » (2011)
- Thèse de Stéphanie Bouckaert « *Contribution des Smart Grids à la transition énergétique : évaluation dans des scénarios long terme* » (2013)
- Rapports de stage OSE de Pengbo Wang, Yvann Faust Nzengue et Xiang Li
- Article Revue de l'énergie n°627 « *Enjeux d'une transition vers une production d'électricité 100% renouvelable en France* » (sept.-oct. 2015)
- Article Applied Energy 171 « *Feasible path toward 40-100% renewable energy shares for power supply in France by 2050: A prospective analysis* » (2016)
- Article Energy Procedia, « *Power system synchronism in planning exercises: From Kuramoto lattice model to kinetic energy aggregation* » (à paraître)