

Intégration des énergies renouvelables

Evaluer l'impact de la pénétration des énergies renouvelables dans le mix électrique sur la fiabilité du réseau à l'horizon 2050
Scénarios : Business-as-Usual (BAU), 40% / 60% / 80% / 100% EnR en 2050

Anticiper la sûreté d'approvisionnement

Fiabilité : maintenir un niveau de **services système** (réserves cinétiques) suffisant pour absorber une fluctuation de charge avant l'activation des réserves primaires (Drouineau, 2011)

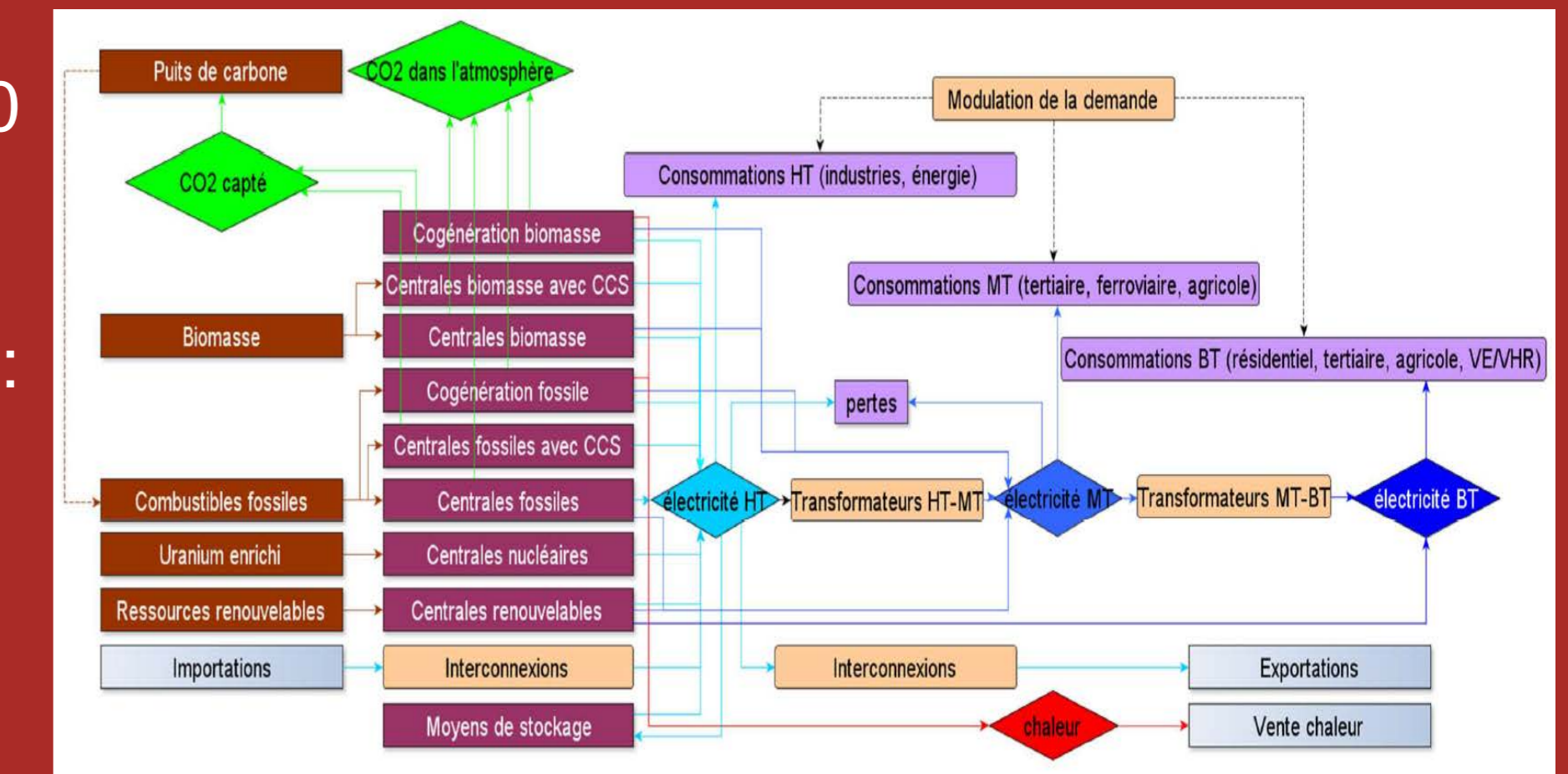
Stabilité : conserver le **synchronisme** des alternateurs en planifiant un réseau suffisamment dimensionné pour limiter la congestion (Krakowski, 2016)

Modèle TIMES-FR_ELEC

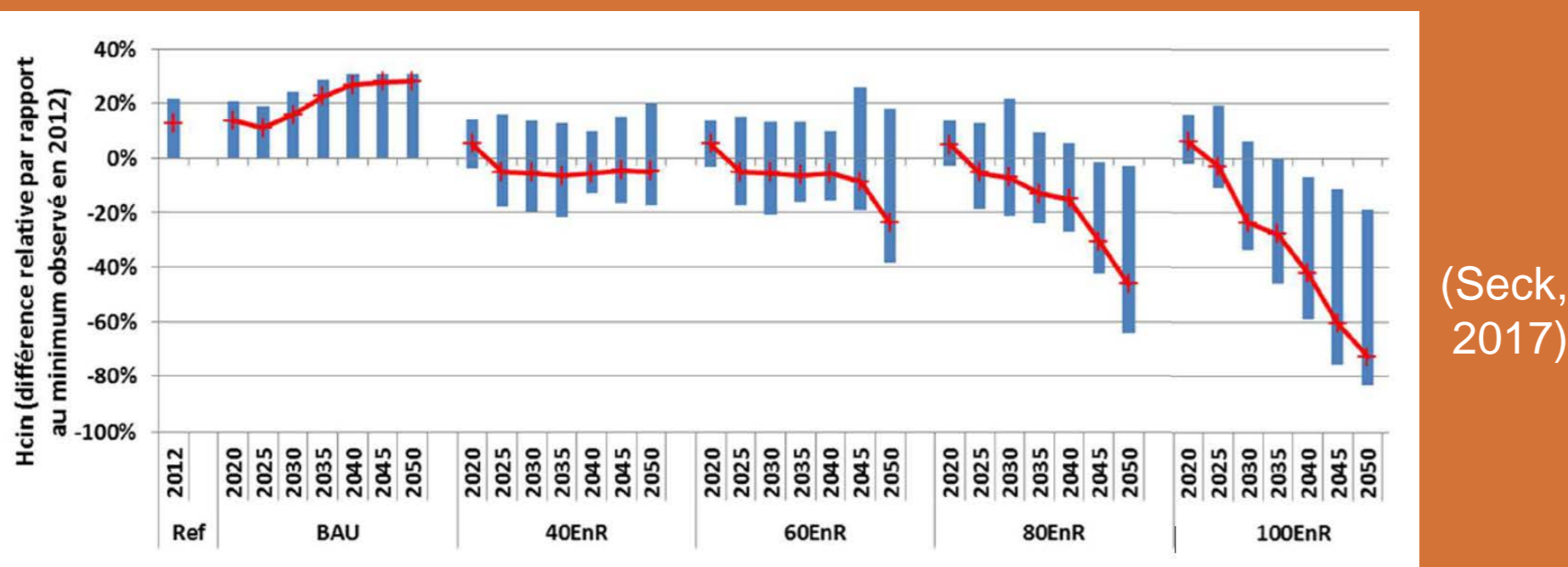
Optimisation linéaire : minimisation du coût actualisé du système électrique

Modèle bottom-up 2013-2050
28 technologies

84 « time-slices » par année :
6 saisons mensuelles
* 2 journées type
* 6 plages horaires



Réserves cinétiques – résultats de TIMES



EnR ~ Réserves → Contraindre réserves minimales ≥ 30 sec
Méthode de calcul du synchronisme

Projeter la répartition spatiale (dispatch régional) de 2013 à 2050, par technologie

- Etudier la dynamique des technologies / croisement de données
- Formulation de scénarios de répartition

Topologie du réseau

$$H_{syn} = \frac{\lambda_2(L_{G,w})}{\max_{(i,j) \in A_G} |P_i - P_j|}$$

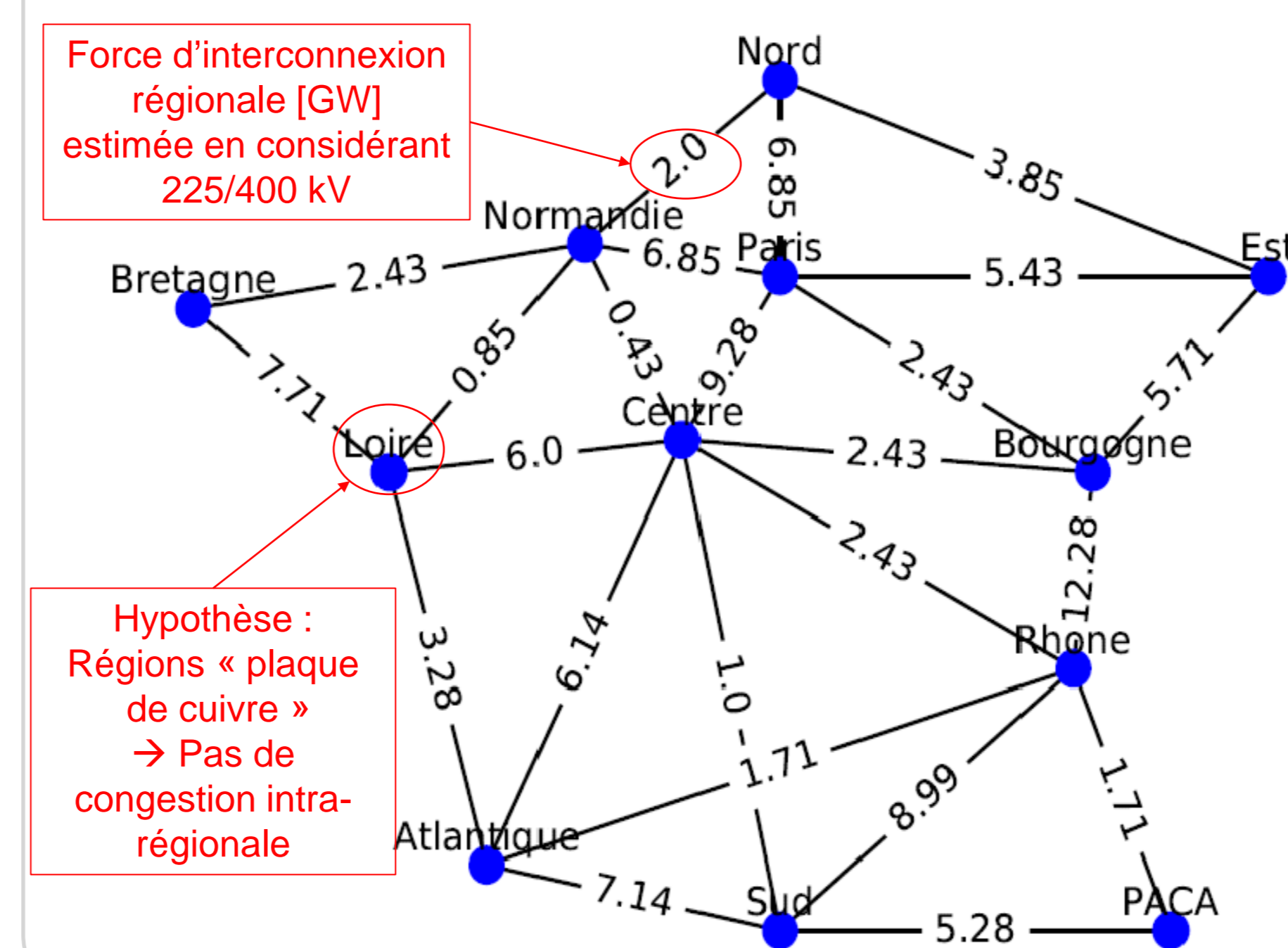
Flux inter-régional maximal

Spatialisation du mix électrique

Théorie des graphes

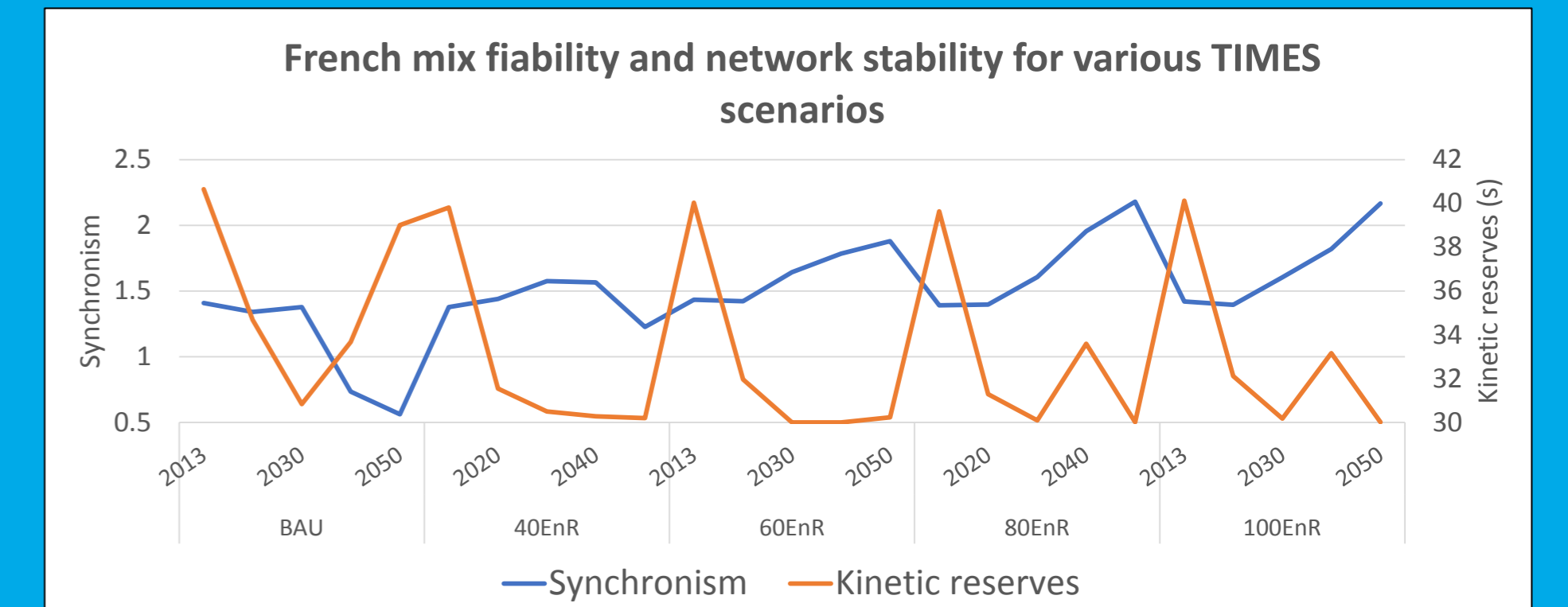
Réseau de transport	Graphe
12 régions administratives	12 nœuds
Connectivité inter-régionale	Matrice d'admittance du graphe

Représentation du réseau de transport français



Etude du synchronisme

Scénario	Qualité du réseau de transport au regard du synchronisme
BAU	Renforcer le réseau dès 2040
40 % EnR	Synchronisme non assuré dès 2050 (hiver)
60 % EnR	Réseau actuel adapté Surdimensionné à partir de 2030
80 % EnR	
100 % EnR	



Tendance inverse services système vs synchronisme → Mix centralisé vs Mix décentralisé

Désinvestissement du réseau de transport
Envisageable dès 2040 pour : pénétration EnR ≥ 60 %

Etude de l'autonomisation des régions

Contexte : Autonomisation énergétique des territoires à travers le développement des énergies renouvelables dans le respect des objectifs de la transition énergétique.

Cas d'étude - Autonomisation unilatérale de PACA

Quel est l'impact financier/réseau d'une autonomisation unilatérale ?
Quel impact sur les services système ?

Méthode

Résultats

- Formuler un scénario de répartition des productions privilégiant l'exploitation du gisement renouvelable PACA
- Introduction de rythmes de déploiement maximal des nouvelles capacités en PACA
- Surcoût** : saturation des gisements coûteux
- Impacte la **stabilité du réseau** en 2050 : pour EnR ≥ 60% ET rythme de déploiement **élevé**
- Autonomie énergétique difficilement atteignable
- Quasi autonomie des services système**

Déploiement maximal	MW/année	250	500	750	1000
BAU		0,5	0,3	0,5	0,7
Surcoût de l'autonomisation de PACA [Mds €]	40EnR	5,8	19	19	19,1
	60EnR	15	30	36	35,8
	80EnR	11	30	30	29,8
	100EnR	14	31	31	31,1

Autonomisation des régions

Impact de l'autonomisation unilatérale de chaque région à long terme ?

L'autonomie énergétique régionale assure-t-elle une autonomie en puissance (inertie) ?

Méthode

Descente d'échelle temporelle pour analyser l'adéquation offre/demande.

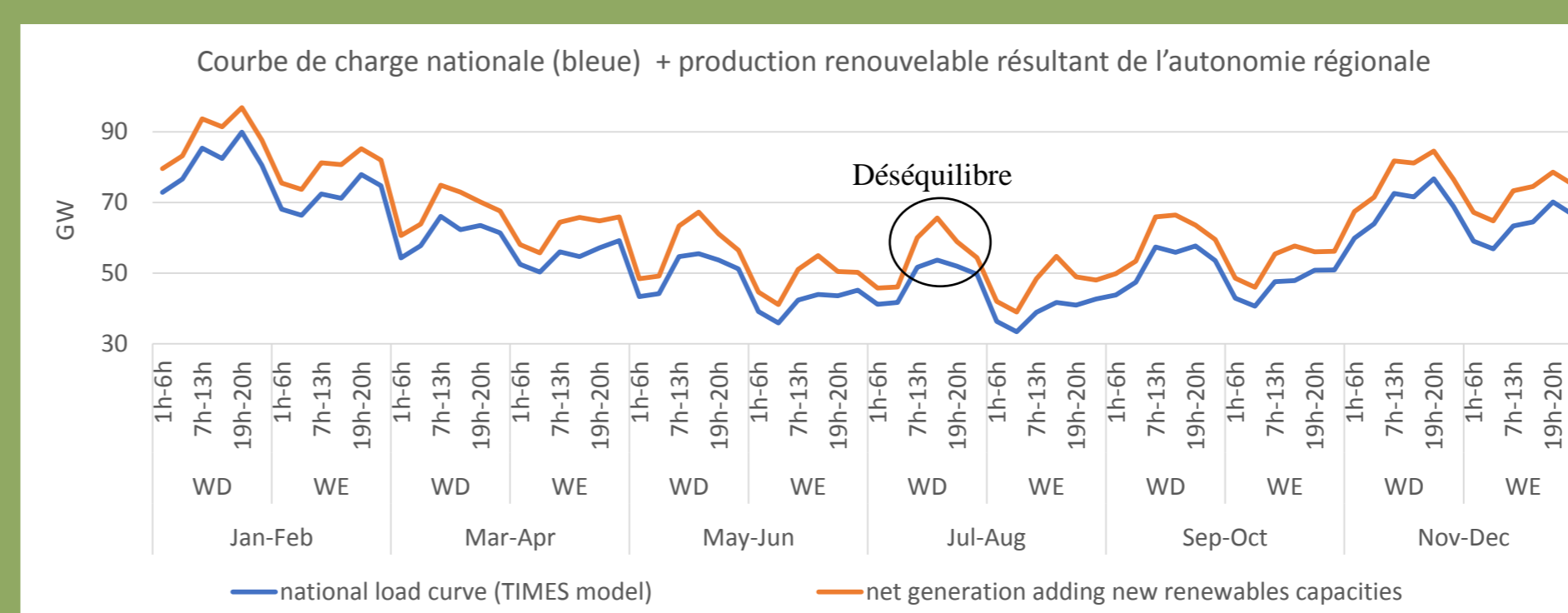
Année → Mois → Time-slice

Etude du scénario 60% EnR, « réalisable », année 2050

Résultats

Epuisement des potentiels renouvelables pour atteindre l'autonomie en 2050
Impact sur la courbe de charge lissé (peu discernable) à l'échelle annuelle / mensuelle

Echelle time-slice / plage horaire :



Production des nouveaux potentiels renouvelables :

- Hétérogène en été** : fortement impactée par le solaire PV Requiert une capacité de **stockage supplémentaire de 4 GW** pour absorber le déséquilibre maximal indépendamment des exports
- Lissée en hiver** par l'effet de foisonnement de l'éolien

- Deux phénomènes liés au développement des EnR :
 - Renforcement du synchronisme sur le réseau de transport à l'échelle nationale au détriment des réserves cinétiques qui assurent la fiabilité du système
 - En découle un éventuel désinvestissement du réseau THT dès 2040 pour des taux de pénétration des renouvelables proches de 60 % en parallèle d'un renforcement du réseau de distribution
- Autonomisation des territoires atteignable (difficilement) pour quelques régions à travers l'épuisement des gisements recensés mais surcoût
- Autonomisation énergétique peu corrélée à l'autonomisation des services système (seuls 23 % du potentiel renouvelable national apportent de l'inertie, et ce de façon inégalement répartie : technologies biomasse, biogaz, incinération des déchets et géothermie)
- Développement du stockage nécessaire à moyen/long terme pour absorber les flux de puissance résultant de la prédominance du photovoltaïque sur les autres énergies renouvelables
- Intérêt de penser une stratégie collective intégrant les contraintes précédemment citées
- Travaux futurs : mener l'étude à l'échelle régionale en s'appuyant sur le réseau physique réel et investiguer le renforcement du réseau aux niveaux de tension inférieurs (exploration de la nécessité d'utiliser une technique de réduction de graphe pour rester cohérent avec la démarche de prospective)