

# Les réseaux électriques dans le contexte de la décarbonation: Défis et perspectives



**N. HADJSAID**

Professeur Grenoble INP-UGA

Directeur G2Elab

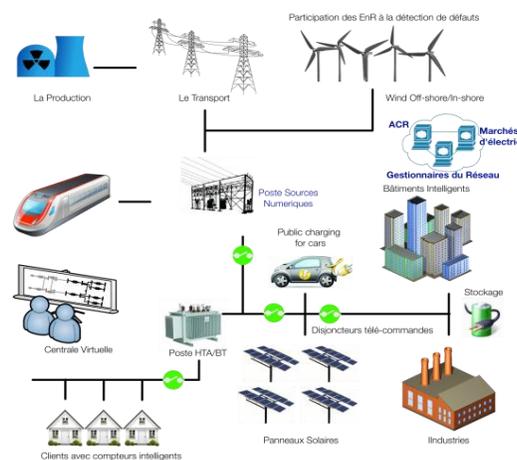
# Le réseau électrique: Un système complexe

## ■ Particularités des réseaux électriques:

- **Couplage fort** avec d'autres infrastructures
  - IC ouvertes
  - Energies primaires
  - ...
- Système **complexe**
  - Grande dimension – Système multi-niveaux – interdépendant
  - Comportement chaotique, difficile à maîtriser
- Sujet à diverses **perturbations**

## ■ Vulnérabilité du système & défaillances

- **Conséquences** économiques considérables
- De moins en **moins acceptées**



Source: Dreamstime

# Les pannes généralisées (blackouts): une menace constante...

## ■ Quelques **Blackouts** d'envergure récents

Pays	Population affectée	Date
Inde	670 Millions	30-07-2012
Indonésie	120 Millions	04-08-2019
Brésil & Paraguay	87 Millions	10-11-2009
Turquie	70 Millions	31-03-2015
USA	55 Millions	14-08-2003
Espagne & Portugal	55 Millions	28-04-2025
Italie	50 Millions	29-09-2003



Toronto, blackout [August 2003](#) (wiki)



## ■ Mais aussi

- Texas-USA (2021), London-UK (2019), Argentine/Uruguay/Paraguay (2019), Guadeloupe (2012), Malaysia (2005), Jordan (2004), Greece (2004), Finland (2003), Sweden & Danmark (2003), London (2003), ...

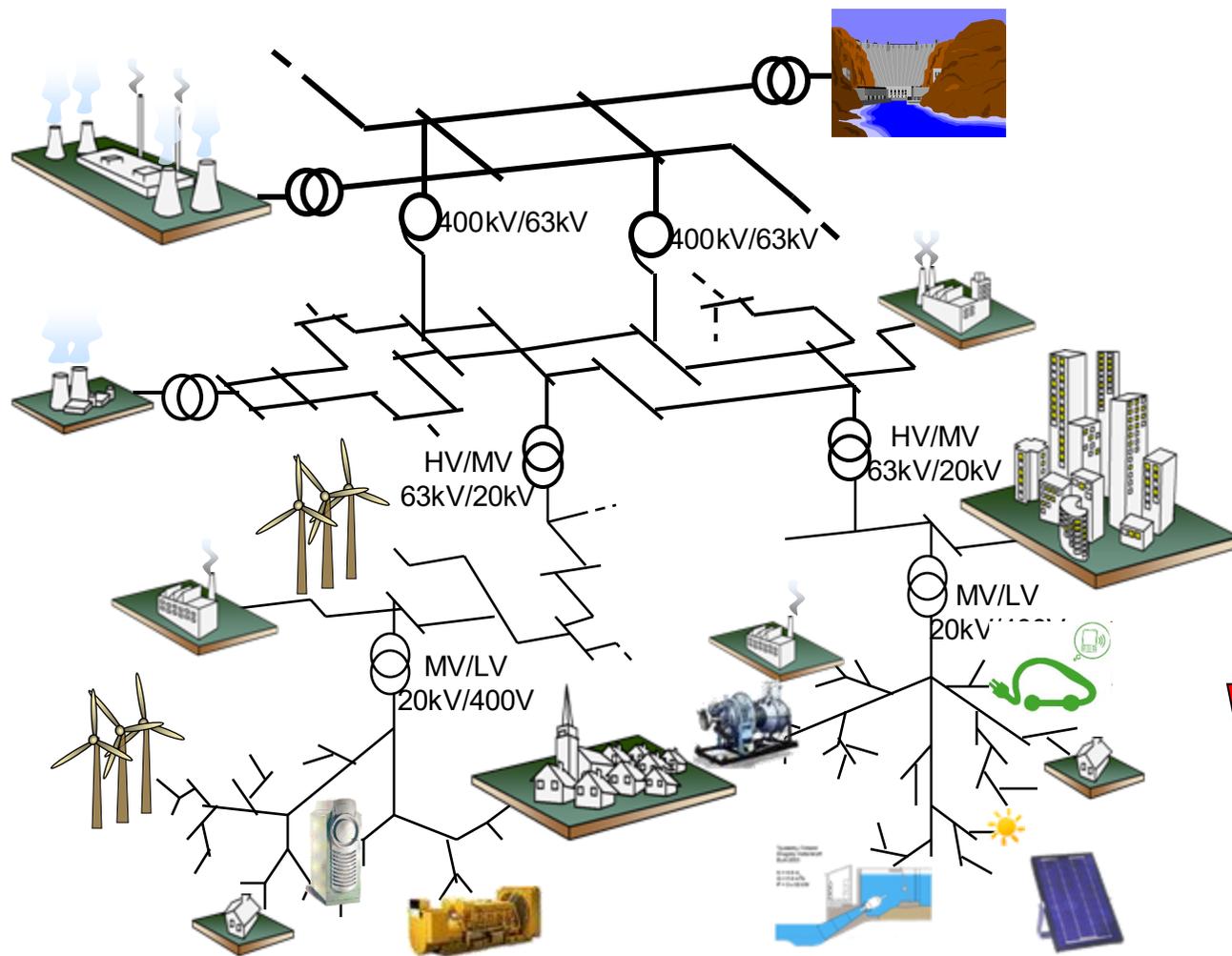
## ■ Cout variable peut avoisiner 1% du PIB



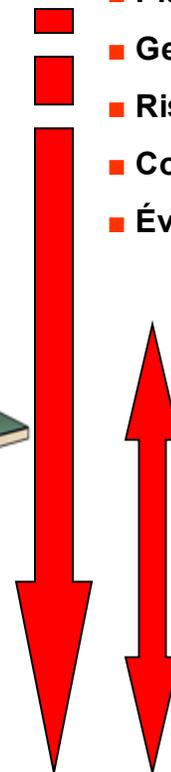
PROMWAD  
BEYOND THE IBERIAN BLACKOUT:  
RESILIENCE, RISKS, AND RECOVERY



# Changement de paradigme



- Impacts positifs et négatifs
- Plupart ENR
- Gestion du patrimoine
- Risque de pannes
- Coût et acceptabilité
- Évolution des réseaux

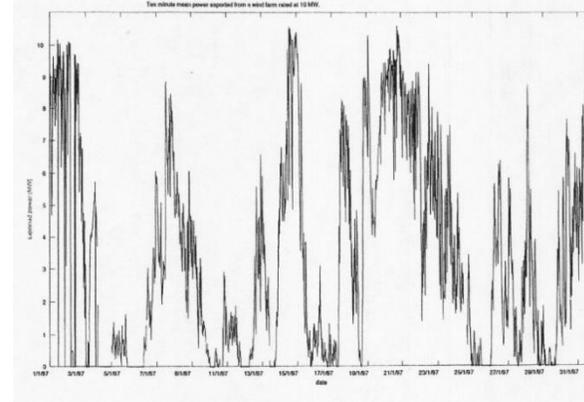


# Intégration de la production "variable" & du VE rechargeable dans le système électrique

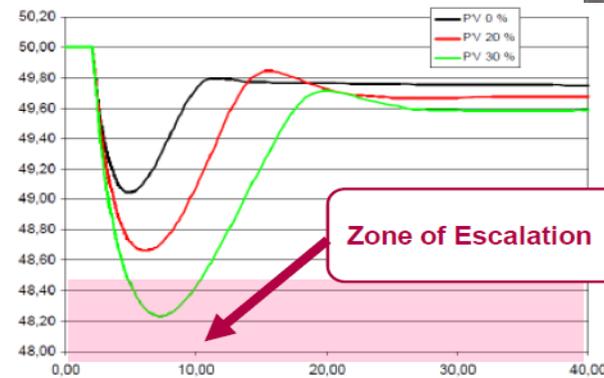
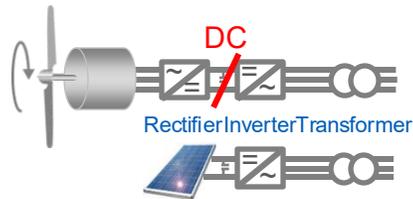
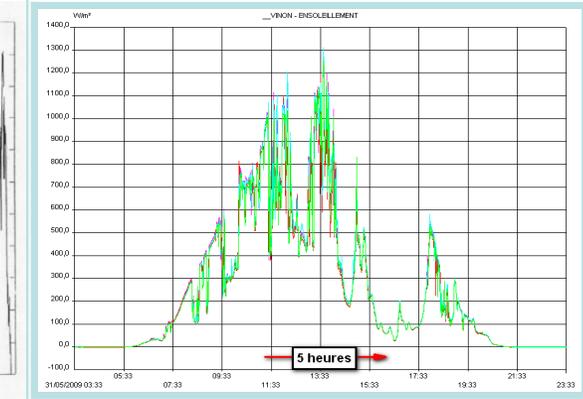
## ■ Enjeux techniques

- **Aspect variabilité**
  - **Global:** maîtrise de la stabilité et d'équilibre P-C dans un contexte incertain
  - **Local:** contraintes V, I, h,...
- **EnR interfacée par EP: E-Grid**
  - **Diminution** de l'inertie globale
  - **Impact** sur la réponse du système: f, Icc, protection, ...
- **Réserves** opérationnelles

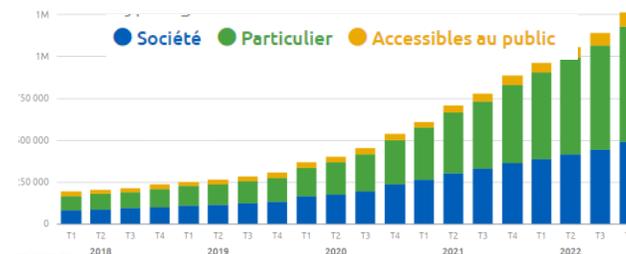
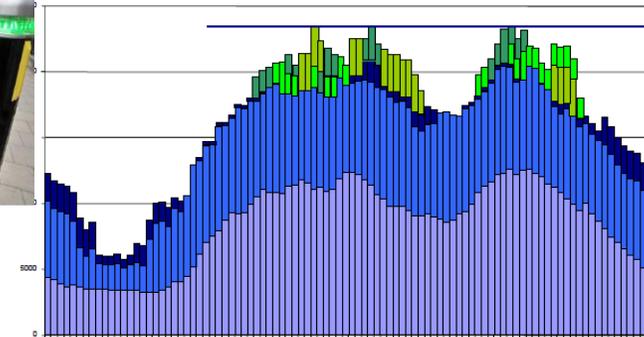
Wind farm over output over 1 month, UK



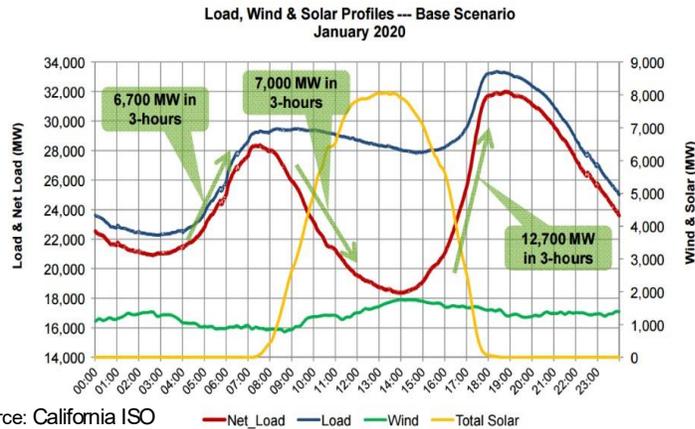
Ex : Vinon sur Verdon (May 31st)



Example of frequency variation due to 20% loss of production on an off-grid system depending on Renewable integration (EdF source)

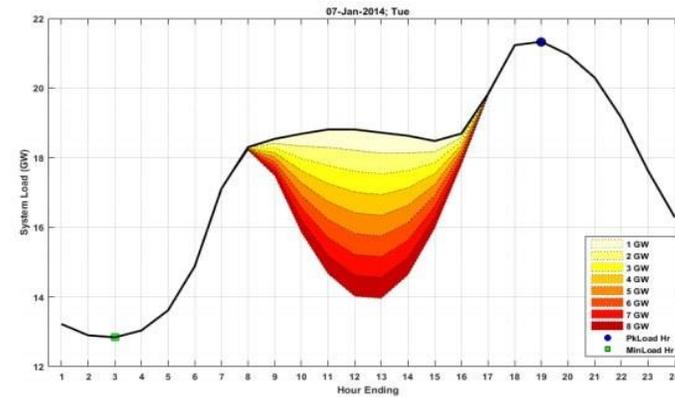


# “The Duck Curves”

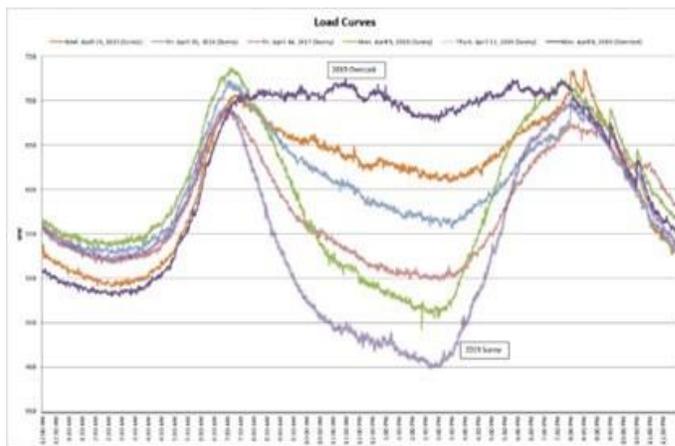


Source: California ISO

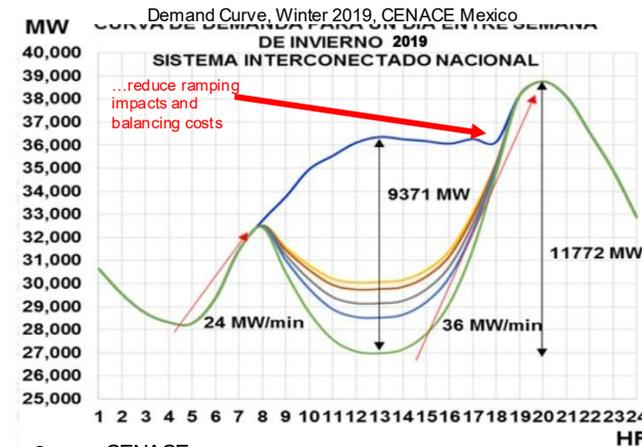
— Net\_Load — Load — Wind — Total Solar



Source: ISO NE



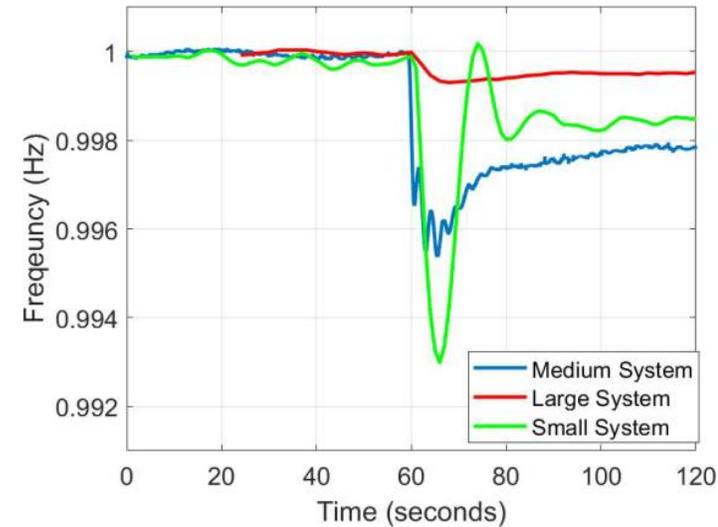
Source: Vermont Electric Co.



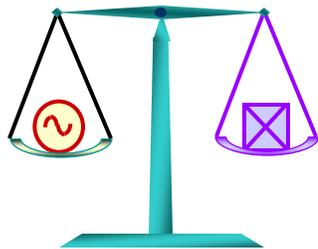
Source: CENACE

# Le maintien de la stabilité du système devient critique dans le contexte d'arrivée massive d'EnR et des VE

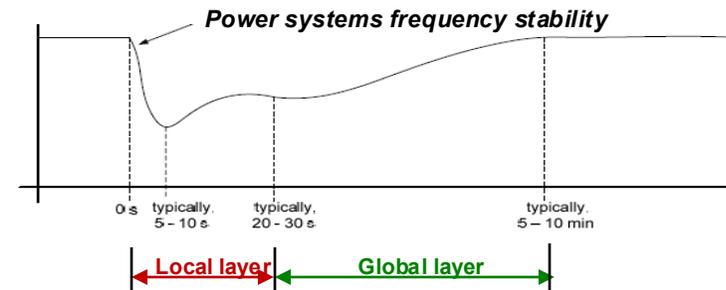
Power system stability is the ability of an electric power system, for a given initial operating condition, to regain a state of operating equilibrium after being subjected to a physical disturbance, with most of the system variables bounded so that practically the entire system remains intact” (IEEE/CIGRE)



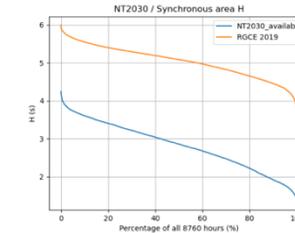
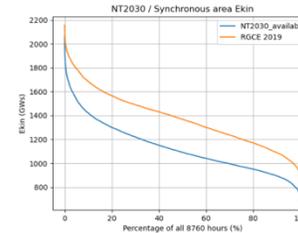
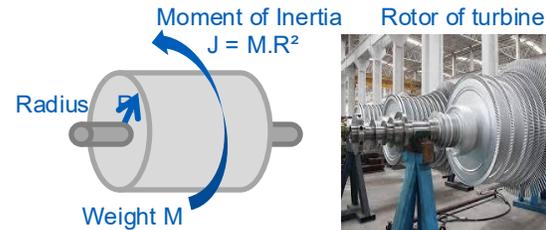
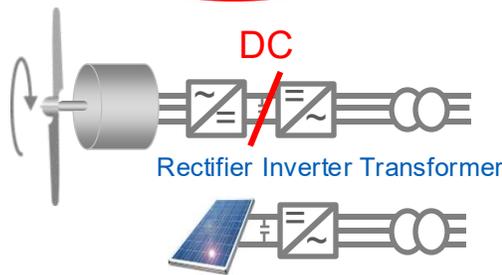
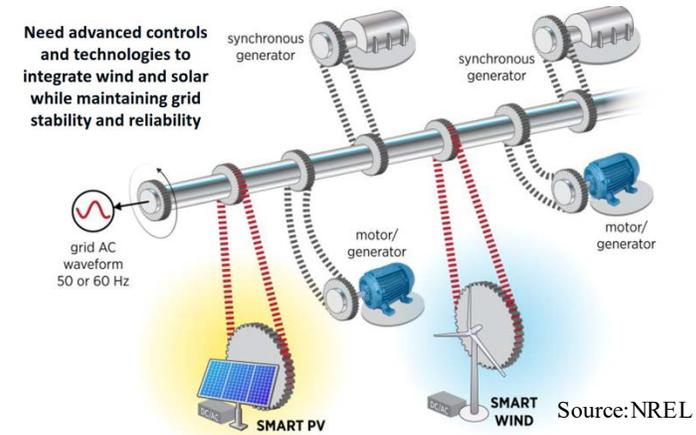
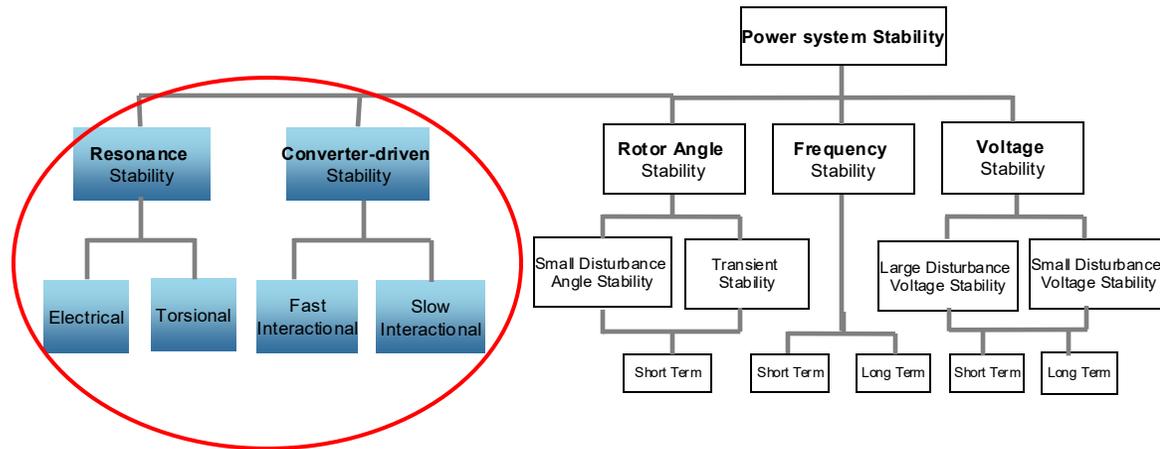
Frequency response plots for a very large system (red), medium/large system (blue), and small system (green) \_IEEE



- Physical disturbances:
  - Load / Generation changes
  - Tripping / Switching
  - Various faults
  - Motor Starting
  - Operation losses
  - ...



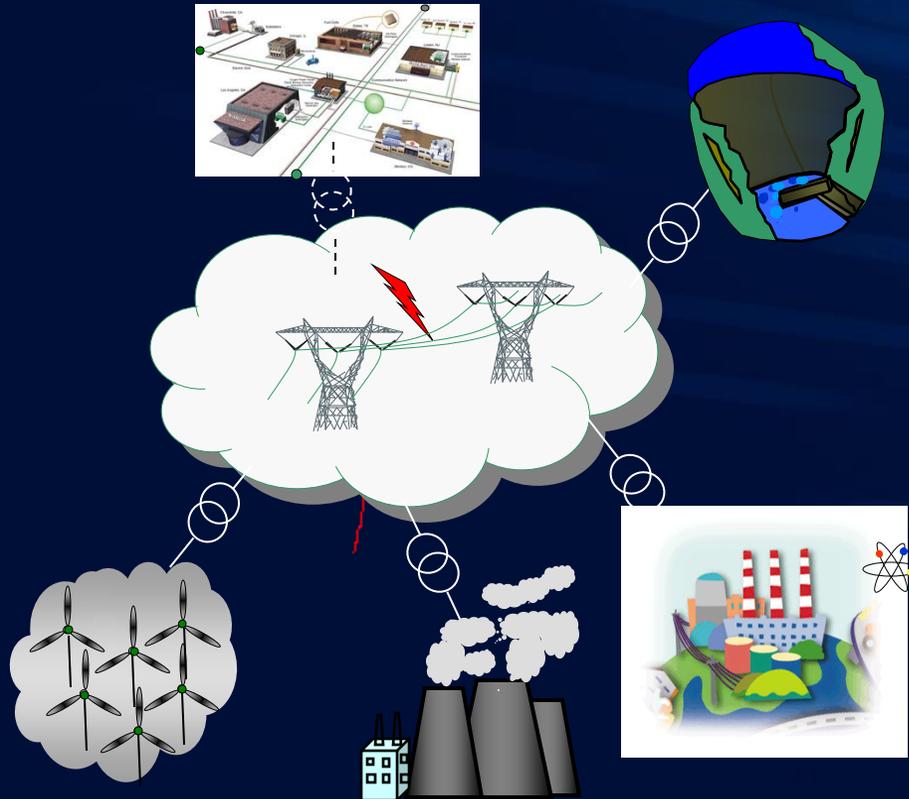
# Evolution de la définition de la stabilité avec les EnR variables et raccordés via de l'EP (IEEE)



## ■ Défis de la baisse de l'inertie:

- Concept traditionnel de stabilité angulaire: ne s'applique pas directement avec les EnR interfacées par EP
- Stabilité transitoire et dynamique: réduction de la capacité de réponse face aux perturbations avec la baisse de l'inertie → besoin accrue de capacité de *ride-through* à partir d'EnR
- Besoin de réglage de fréquence (1aire, 2aire et 3aire) à partir des EnR
- Réglage Volt/VAR: besoin de capacités locale de réglage de tension (même sans observabilité)

# Fondamentaux de la dynamique des réseaux électriques



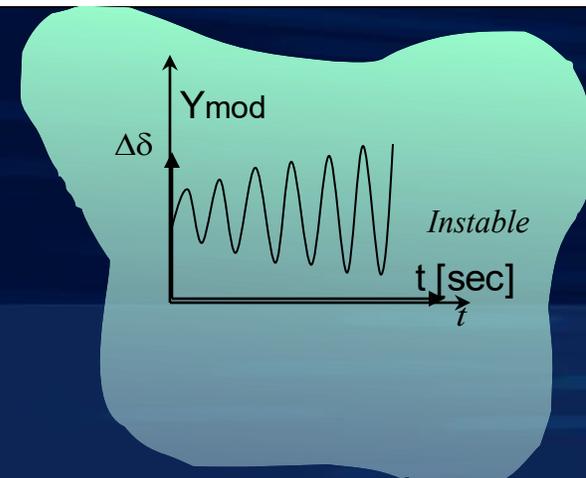
Modèle du réseau non linéaire: 
$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(u, x, t) \\ y = g(u, x, t) \end{cases}$$

Méthodes basées sur les Fonctions d'Energie Transitoire (FET):

$$V(\delta, \omega) = \sum_{i=1}^n \int_{\delta_s, \omega_s}^{\delta, \omega} \left( M_i \frac{d\delta}{dt} - (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{CI}) \right) d(\delta, \omega)$$

Représentation d'état linéarisée:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta x}{\partial t} = A \cdot \Delta x + B \cdot \Delta u \\ \Delta y = C \cdot \Delta x + D \cdot \Delta u \end{cases}$$



# Stabilité aux petites perturbations

**Représentation dynamique d'un système électrique**

$$\dot{x} = f(x, u)$$
$$y = g(x, u)$$

$\Delta u$   
petite perturbation

Fluctuation de faibles amplitudes des grandeurs



**Le système linéarisé autour d'un point de fonctionnement**

$$\frac{\partial \Delta x}{\partial t} = A \Delta x + B \Delta u$$
$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u$$

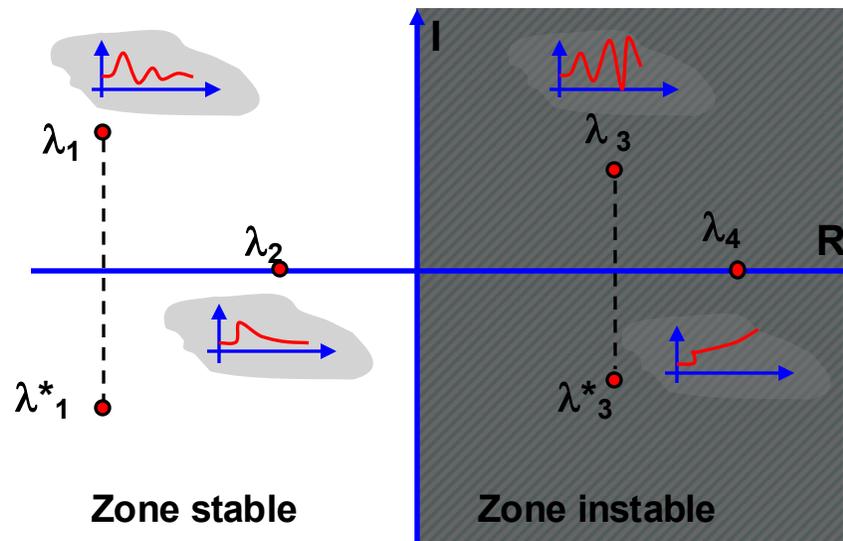

**Matrice d'état A**

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i : \text{valeur propre}$$
$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$$

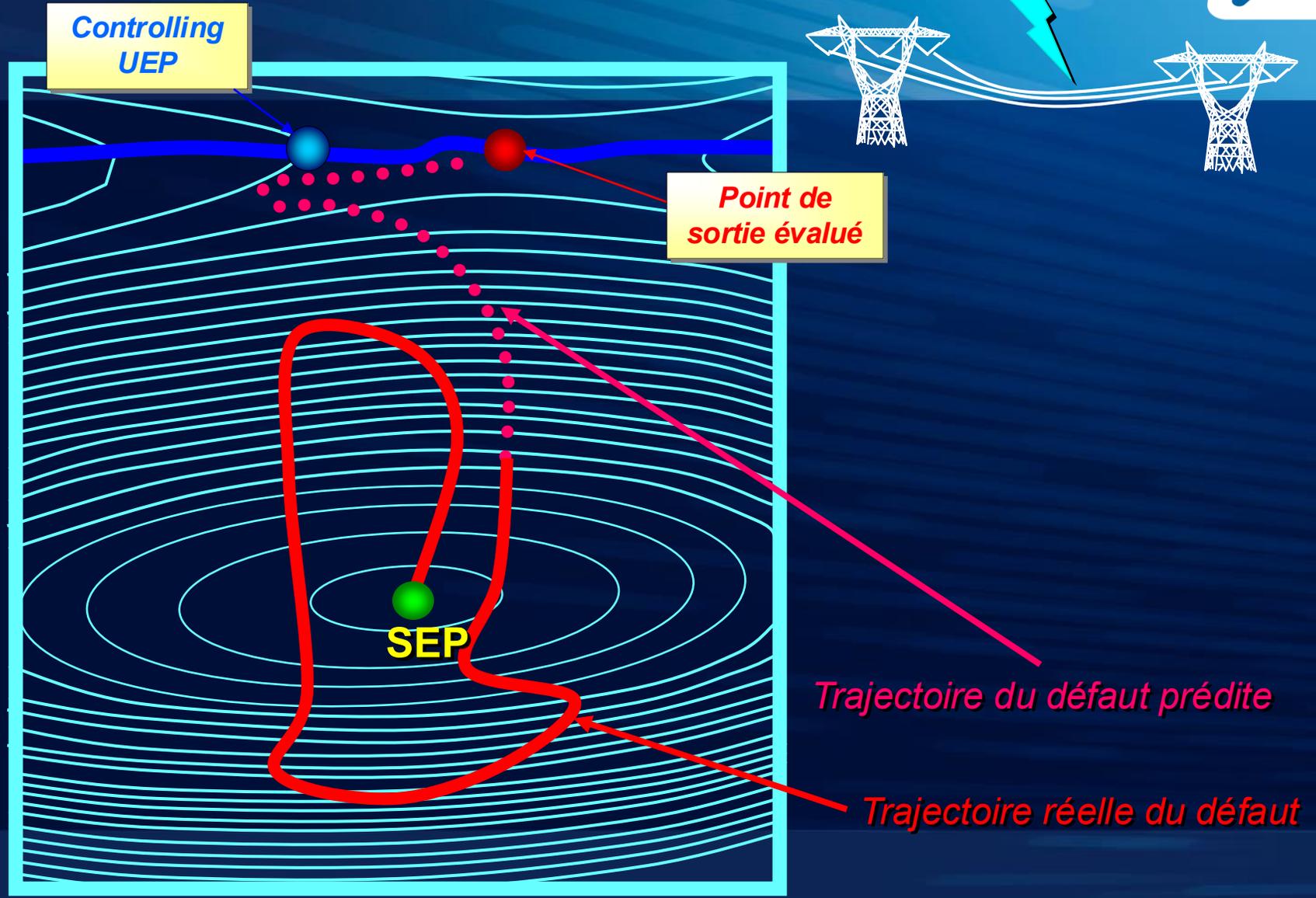
Fréquence d'oscillation

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}}$$

Taux d'amortissement



# Des non linéarités inhérentes mais nécessité d'anticipation de la trajectoire du défaut



# Un système de plus en plus en limite: Où va-t-on?

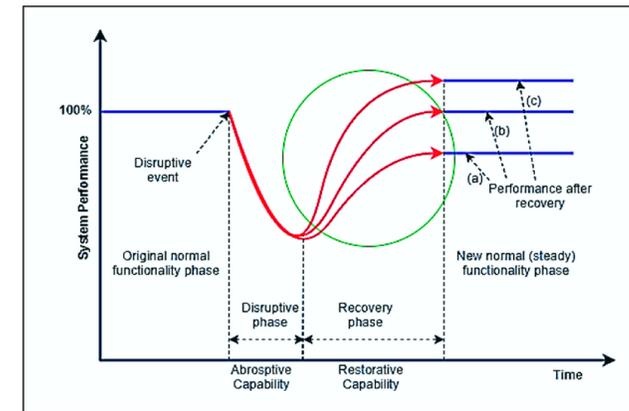
■ **Préoccupations croissantes pour la stabilité** du réseau avec l'intégration massive des EnRs variables et interfacées par des convertisseurs EP

■ **Des difficultés** peuvent apparaître dès les premiers stades de la pénétration des EnRs:

- Souvent à partir d'un % donné du taux de pénétration: besoin de Nouvelles technologies
  - Baisse de l'inertie, essentielle pour la stabilité
  - Besoin de source de tension stable pour le raccordement

■ **Des travaux de recherche en cours:**

- Solutions de contrôle, de simulation avec des EnR-V interfacées par des convertisseurs EP, stratégie de mitigation de la faible inertie et optimisation GFM/GFL, protection pour les réseaux avec EP, capacité « *fault ride through* »



[CIS resilience curve](#)

■ **Plus d'efforts R&D sont nécessaires:**

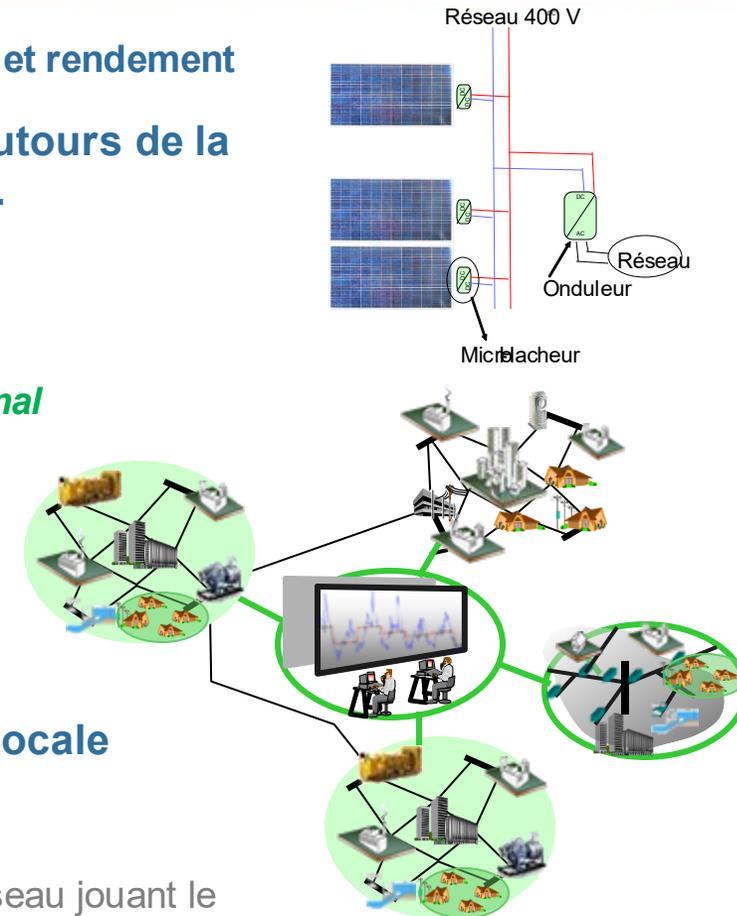
- **Reconsidération des dynamiques** dans les modèles de stabilité avec une part importante de EnR-V interfacés par EP dans un contexte de forte incertitude: couplage modèles EMT – RMS Phasor
- **Stratégie de protection avec capacités Icc limitées** pour les EnR-V interfacés par EP
- **Analyse et caractérisation des interactions** fréquentielles (basses et hautes)
- **Développement des VSG** (inertie virtuelle) à large échelle
- **Modèles de stabilité de tension avec des convertisseurs:** augmentation des périodes à tension hautes, diminution des amortissements, risque de résonance, dynamique des PLL, interopérabilité des équipements, risques liés aux interactions des convertisseurs EP, ...
- **Approches systémiques considérant la coordination GRT/GRD** pour la stabilité avec une part importante de EnR-V interfacés par des convertisseurs EP
- ...



[Source: NREL](#)

# Quelques conséquences en émergence...

- **Vers une revanche** d'Edison (retour au DC) ?...EnR et rendement
- **Emergence d'acteurs locaux** et « communautés » autour de la production de l'énergie et des nouveaux usages, ...
- **Changement du paradigme économique et technique:**
  - De la **vente de l'énergie** sur la base du **coût/prix marginal** au paradigme d' **offre de service**
  - De la consommation **passive** à la **synchronisation** de la consommation sur la disponibilité de l'énergie (variabilité)
  - Des **micros grids** à la mise à disposition de **blocs d'énergie** à l'échelle locale
- **Gestion des « poches/cellules »** réseau à l'échelle locale
- **Quelques défis associés:**
  - **Mutualisation:** valeur du foisonnement → Vision d'un réseau jouant le rôle de « **back up** »? Evolution les règles de partage – coûts d'accès au réseau,
  - **Marché:** liquidité vs. taille du marché (local vs global)?
  - **Qualité** et continuité de service sur demande?



# Un système électrique qui doit s'adapter ...vite

## ■ Défis liés au:

- **Renouvellement** et **adaptation** de l'infrastructure
- **Intégration** en masse des EnR et des nouveaux usages
- **Electrification** massive

## ■ Défis de la **résilience**

- Equilibre P-C dans un contexte incertain
- Variabilité/inertie – stabilité
- Numérique – Cybersécurité
- Changement climatique – fiabilité

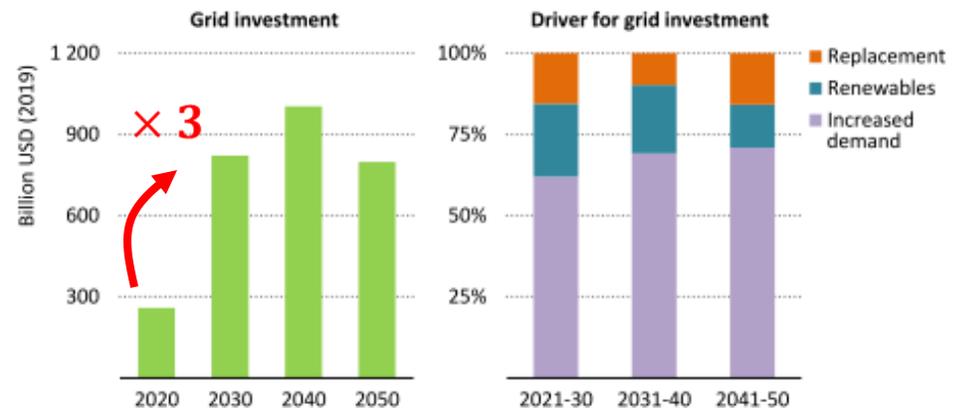
## ■ Enjeux de la **flexibilité**

- → Maîtrise des dynamiques
- → Plus d'intelligence

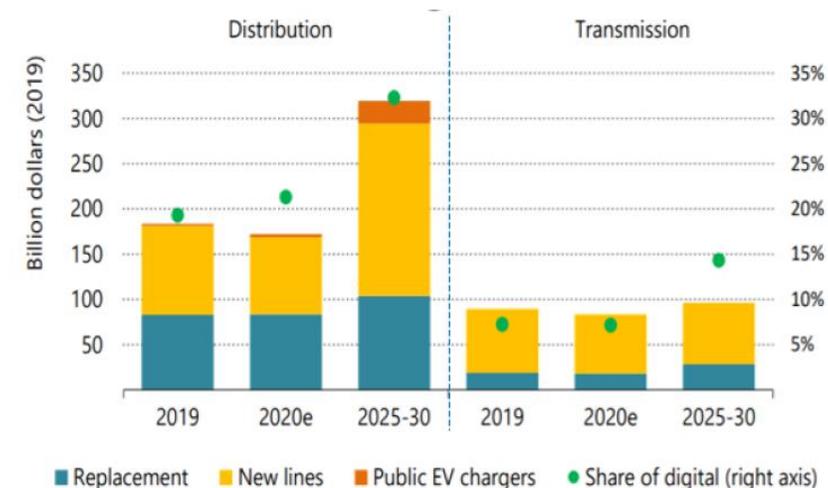
## ■ **Maîtrise des investissements**<sup>(1)</sup>

## ■ **Emergence de nouveaux mode de gouvernance: locale-globale**

Global investment in electricity networks in the NZE  
(Net Zero Emissions)



Source: IEA



Source: IEA

(1) Investments. 1\$ on Renewable trigger 1\$ on electric grids (IEA)