



Smart Grid

Réseau de distribution d'électricité intelligent



Lenka Zdeborová
(IPhT, CNRS & CEA Saclay)

En 2003, l'académie nationale d'ingénierie des Etats-Unis a publié la classification suivante:

A century of innovation: Twenty Engineering Achievements that Transformed our Lives.

n 19: Les technologies nucléaire

n 13: Internet

n 12: La navette spatiale.

n 8: Les ordinateurs.

n 3: Les avions.

En 2003, l'académie nationale d'ingénierie des Etats-Unis a publié la classification suivante:

A century of innovation: Twenty Engineering Achievements that Transformed our Lives.

n 19: Les technologies nucléaire

n 13: Internet

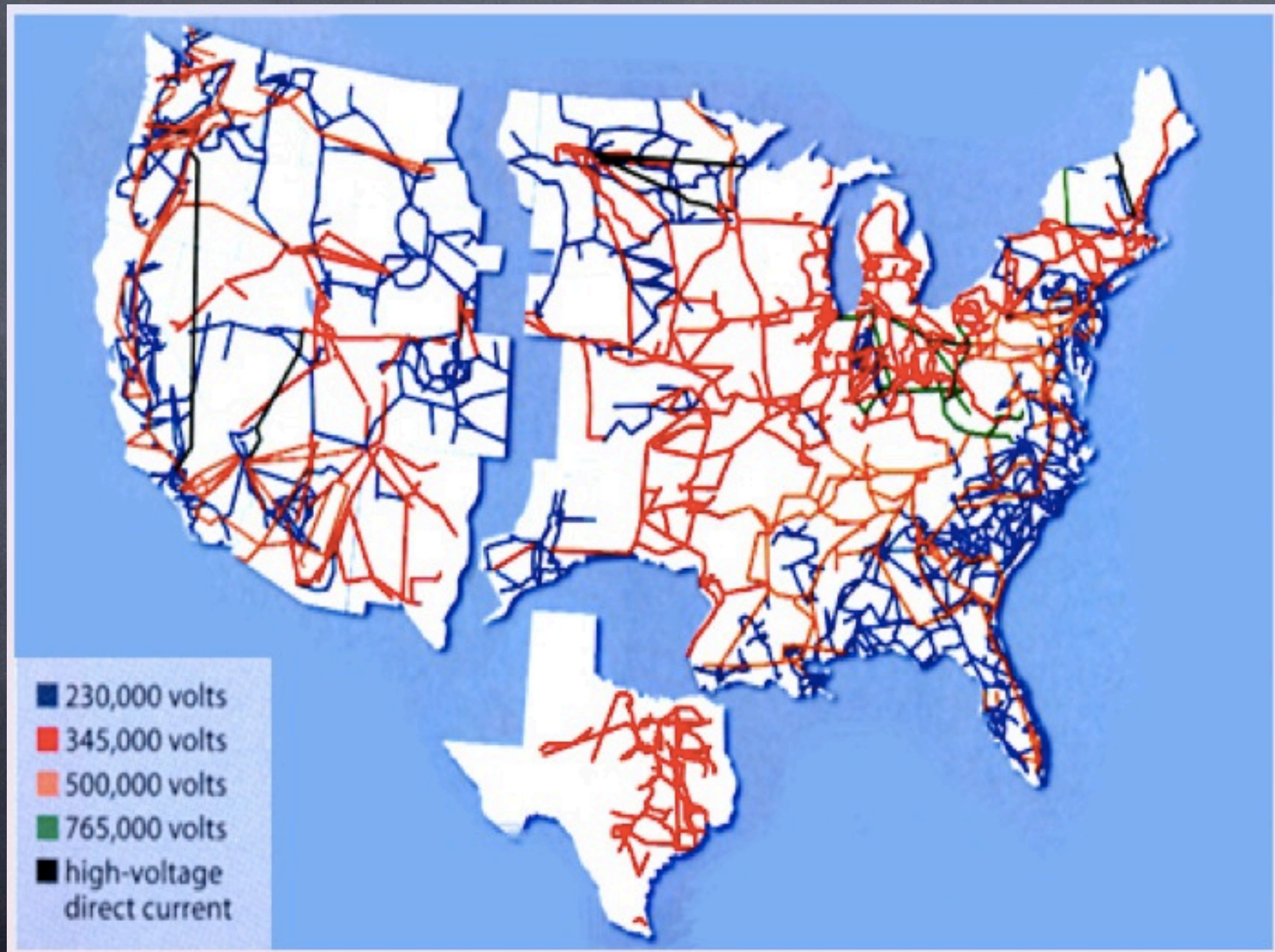
n 12: La navette spatiale.

n 8: Les ordinateurs.

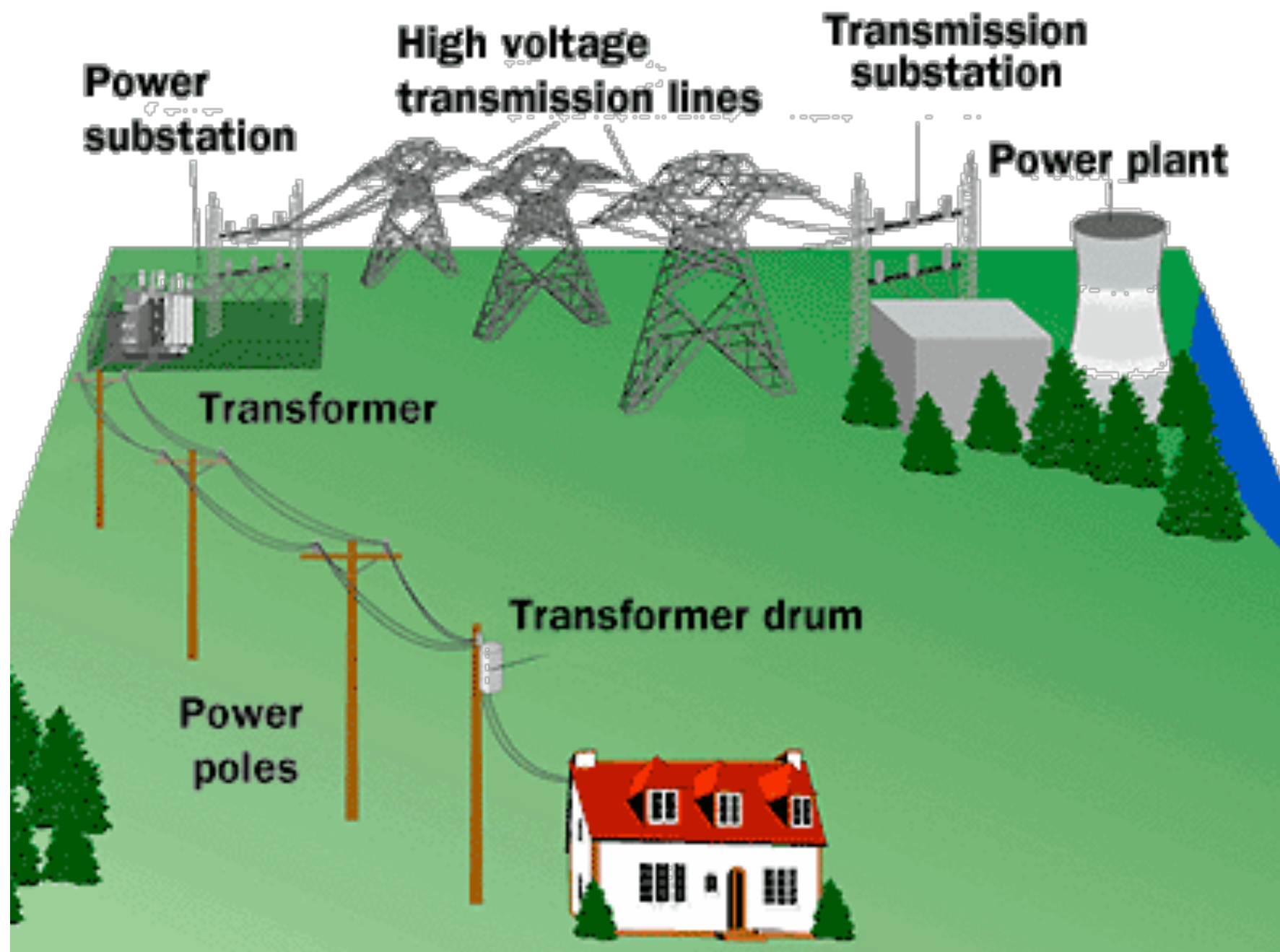
n 3: Les avions.

n 1: Electrification.

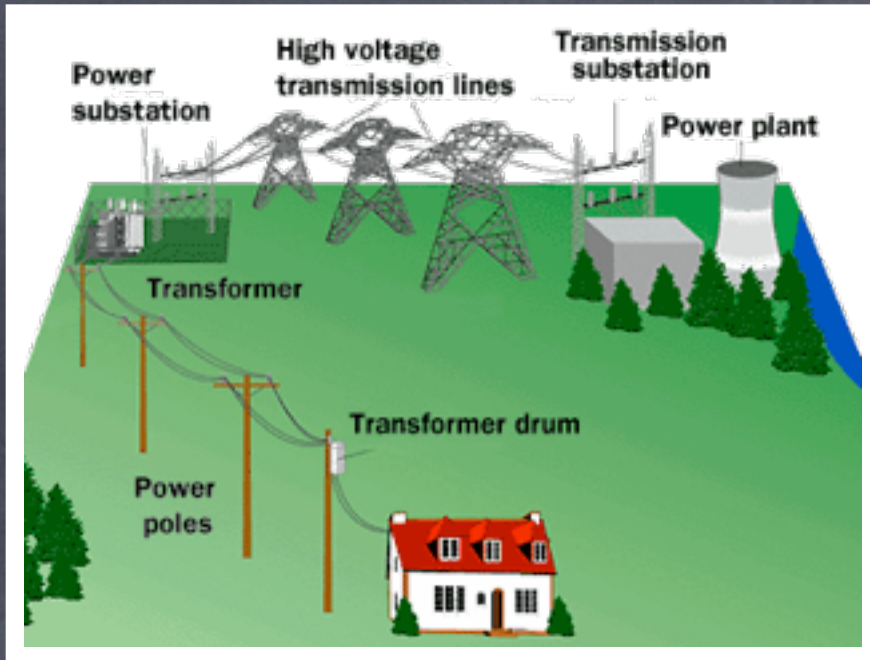
Réseau de distribution d'électricité (réseau des U.S.A. "the largest machine on Earth")



Réseau de distribution d'électricité



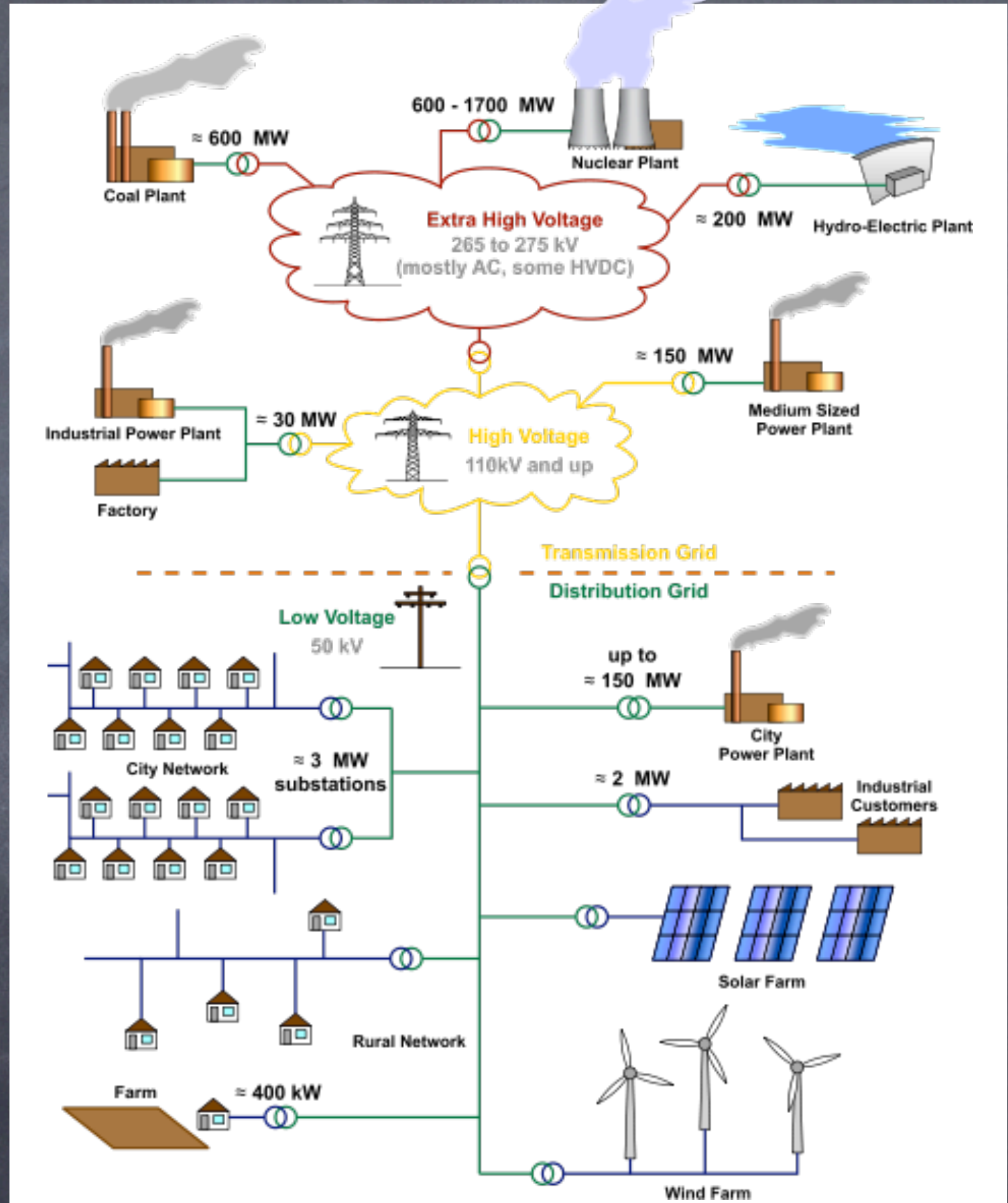
Génération (EDF) – Transmission (RTE) – Distribution (ERDF)



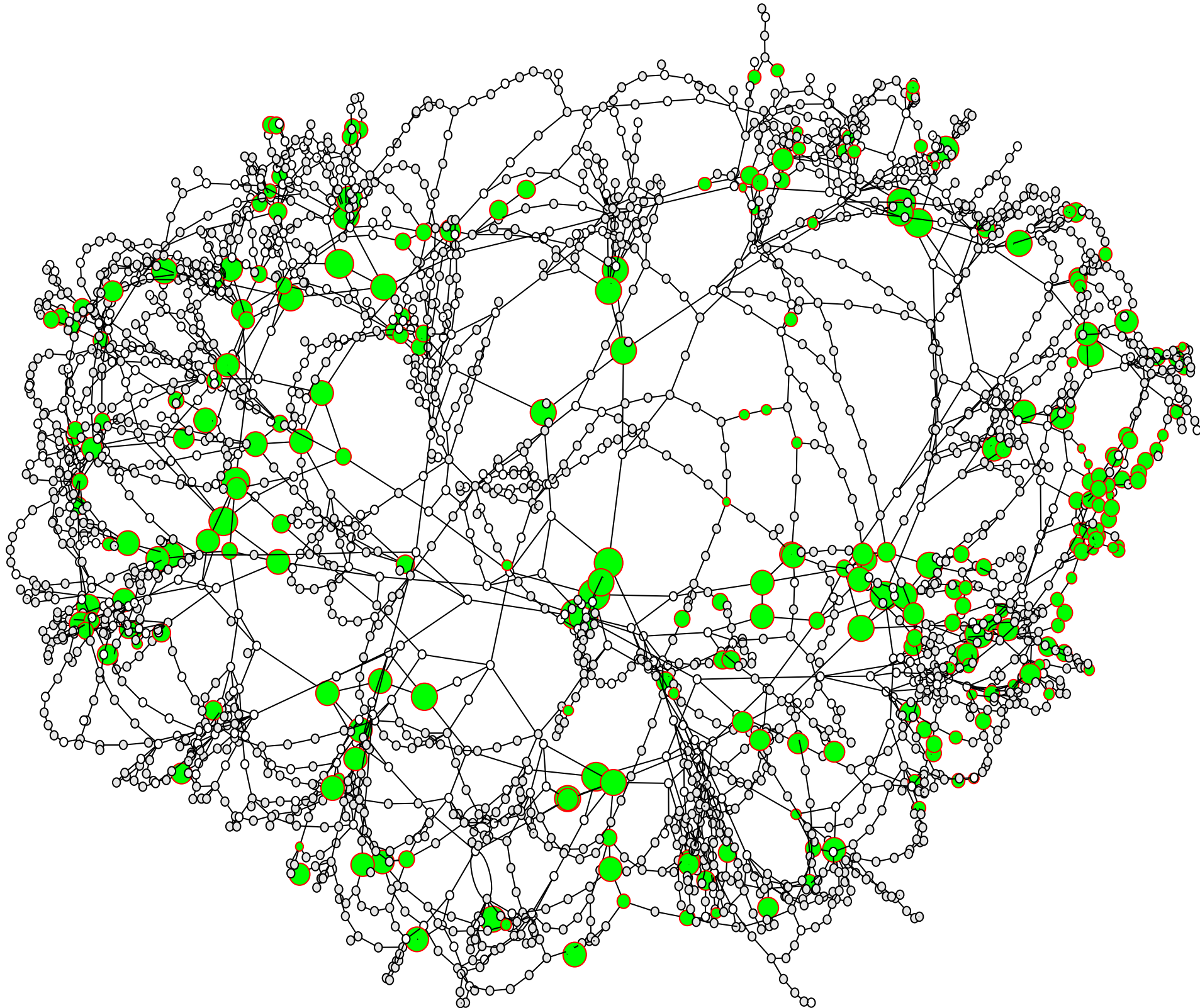
EDF: Électricité De France (produit puissance moyenne de 71,8GW (2010), installée 124GW (2006))

RTE: Réseau de Transport d'Électricité (100 milles de km de lignes)

ERDF: Électricité Réseau Distribution France (1,3 million de km de lignes, et 738 000 transformateurs.)



Réseau de transport de la Pologne, ~3000 noeuds



Une petite comparaison

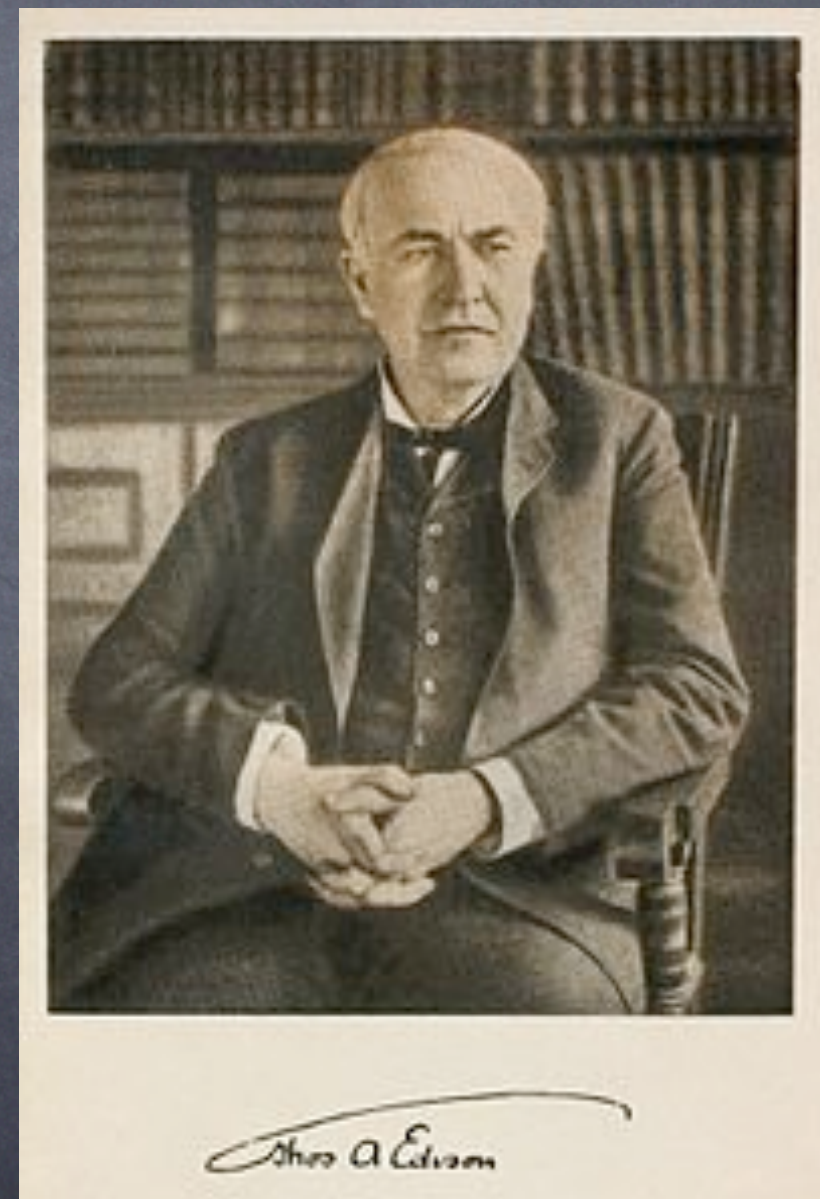
Graham Bell

(1847–1922)

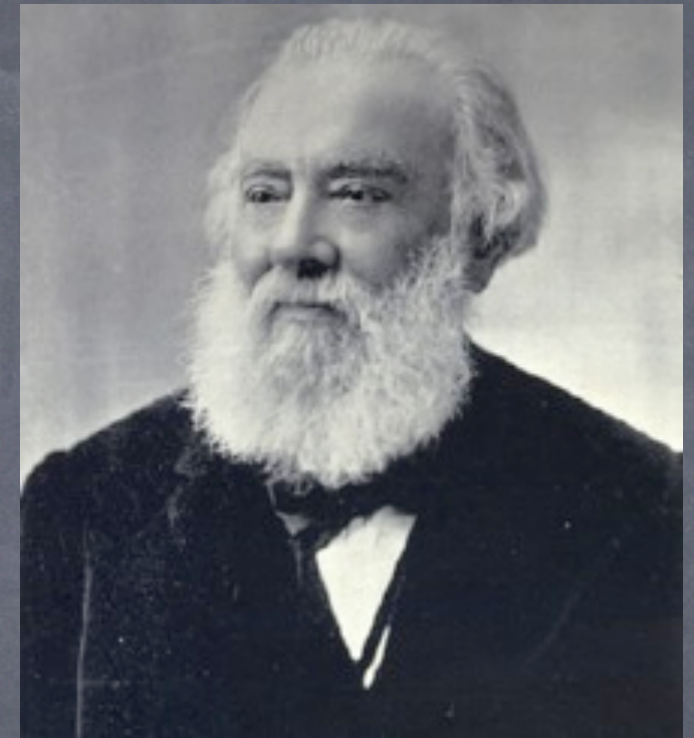


Thomas Edison

(1847–1931)



Si **Graham Bell** était transporté dans le 21ème siècle, il ne pourrait même pas reconnaître les composants d'un téléphone moderne: iphone, skype, antenne-relais GSM, etc.



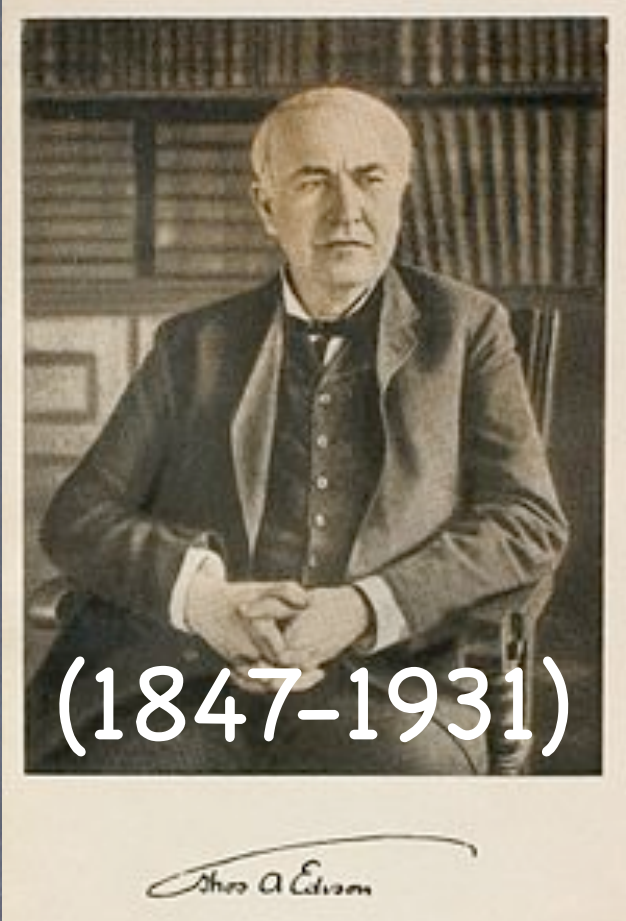
(1847-1922)



vs.



Si **Thomas Edison**, un des architectes du réseau électrique, était transporté dans le 21ème siècle, il serait assez familier avec le réseau d'aujourd'hui.



VS.



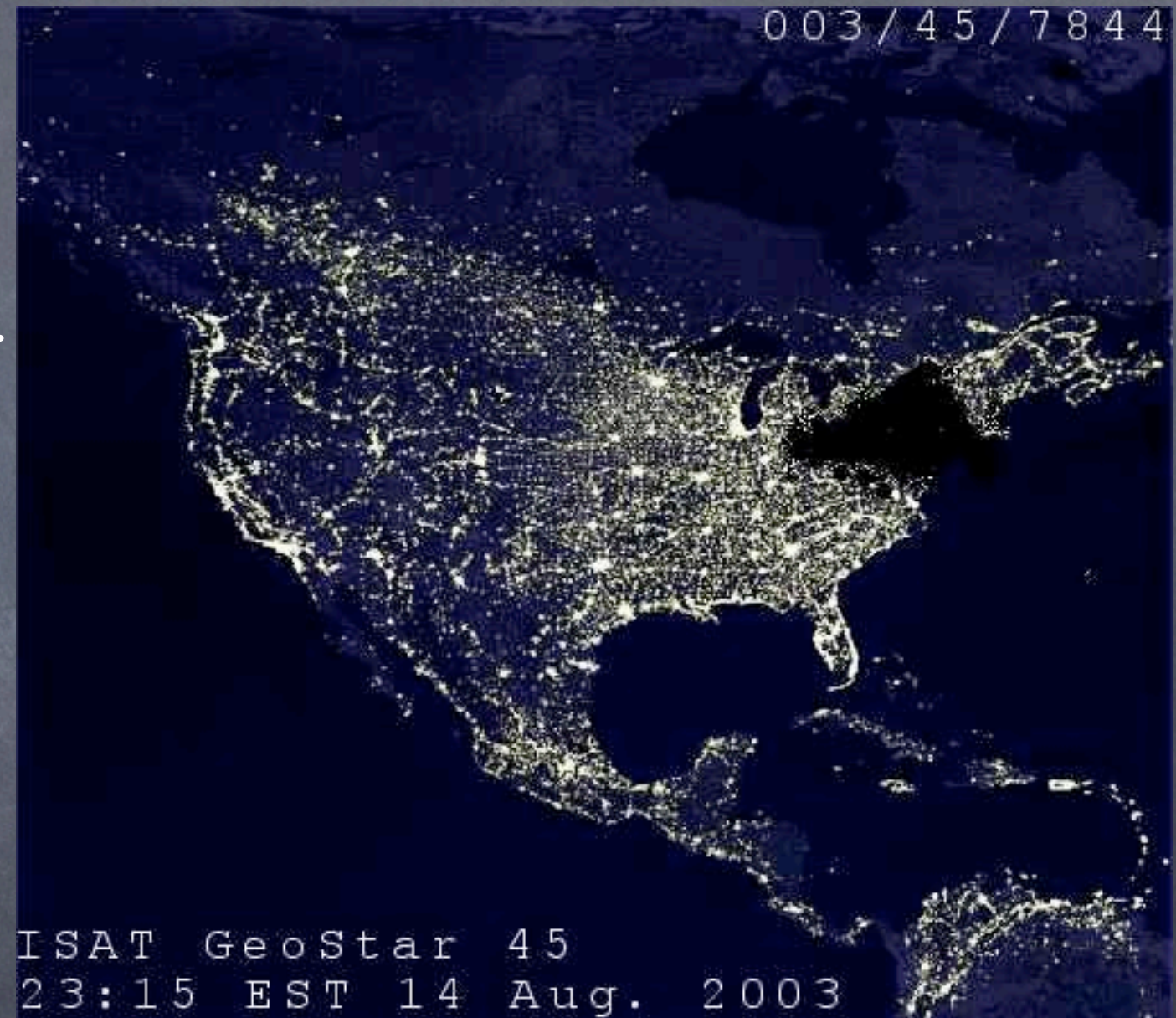
Problèmes

- Stabilité – La demande croissante conduit à de plus en plus de black-outs

Black-outs

- E.g. le black-out du nord-est américain d'août 2003: coût estime \$6 mld

- Coût des black-outs au US: \$80 mld par an



- Les 5 plus grands black-out du monde se sont passés dans les 12 dernières années (1999 Brazil, 2003 USA, 2003 Italy, 2005 Java, 2009 Brazil).

Problèmes

- **Stabilité** – Stabilité – La demande croissante conduit à de plus en plus de black-outs. Coût important \$\$\$.
- **Efficacité** – 7% des pertes en transmission (= 6 mld Eur par an en France). 10%–20% des coûts électriques aux Etats-Unis sont dus aux pics de demande pendant une centaine d'heures par an!
- **Impact sur l'environnement**: 50% de l'électricité mondiale vient du charbon. Nécessité d'utiliser plus d'énergies d'origine renouvelable! Mais l'intégration de sources renouvelables déstabilise beaucoup le réseau (estimation: pas plus de 30% d'énergie renouvelable avec le réseau actuel).

Plusieurs composants/plusieurs échelles

- France: 100 milles de km de lignes de transport; 1,3 million de km de lignes de distribution, et 738 000 transformateurs.
- 1kW – maison, 1MW – grand bâtiment de commerce, 1GW – une centrale nucléaire, 100GW production totale.
- 17ms – période AC, monitoring idéal à cette échelle de temps, 1s – propagation d'un événement dans le réseau, 5s – temps nécessaire pour délivrer le résultat d'une mesure, 1 min – changement de la consommation, rafale de vents, heures – maturation d'un black-out

Impossible?

http://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid:

“The reliability of complex systems is very difficult to analyze and guarantee. A more practical approach to improving reliability and power quality is to simply follow the well established and well documented engineering principles developed by federal agencies like the USDA's Rural Utility Service”.

Espérons que non!

Le problème est un challenge difficile, mais aussi une grande opportunité de recherche.

Solution: Smart grid

- Objectif des smart grid: réduire les dépenses électriques, améliorer la fiabilité et diminuer l'impact environnemental en optimisant la gestion du réseau.
- Notamment: En utilisent le réseau de communication et les méthodes de la technologie des informations.
Mécanismes efficaces de contrôles de la demande et bonne stabilité.
- En Octobre 2009 Barack Obama a demandé au congrès "to act without delay to pass legislation that included doubling alternative energy production in the next three years and building a new electricity smart grid"

Monitoring: Une composante nécessaire des smart-grids

- Compteur intelligent (smart meter)
- Phasor Measurement Unit (PMU)



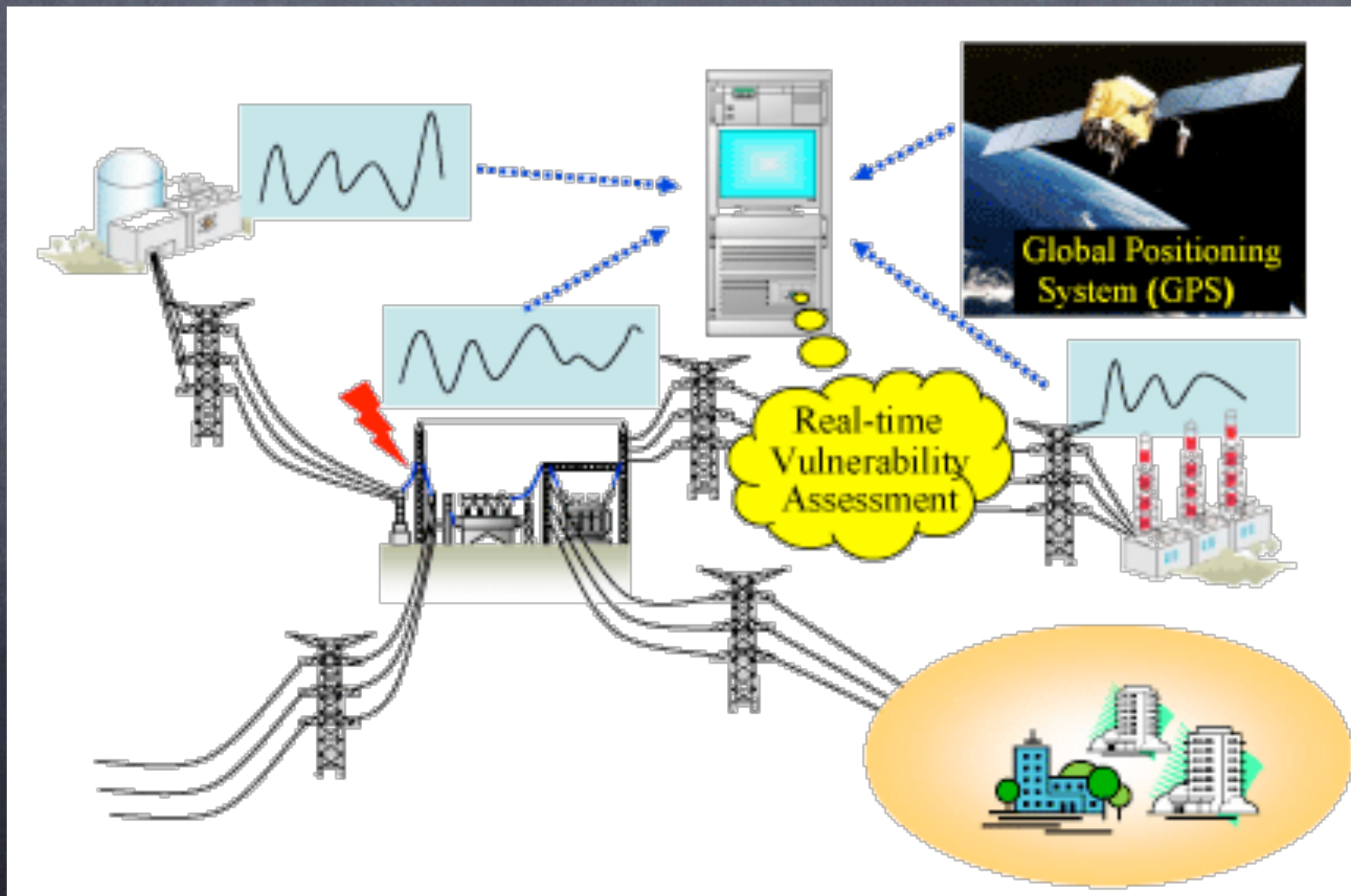
Smart meter

- Mesure et transmet en temps réel la consommation.
- Reçoit l'information sur les prix, et de besoins des distributeurs d'énergie.
- En France le projet **Linky** de l'ERDF.
 - Mars 2009, installation de 300 000 compteurs Linky en Indre-et-Loire et à Lyon.
 - La généralisation à partir de 2012.



Phasor measurement unit (PMU)

- Mesure la phase et l'amplitude du courant.
- Un réseau de PMU (avec synchronisation GPS) monitore en temps réel l'état du réseau électrique.



Que faire avec ça?

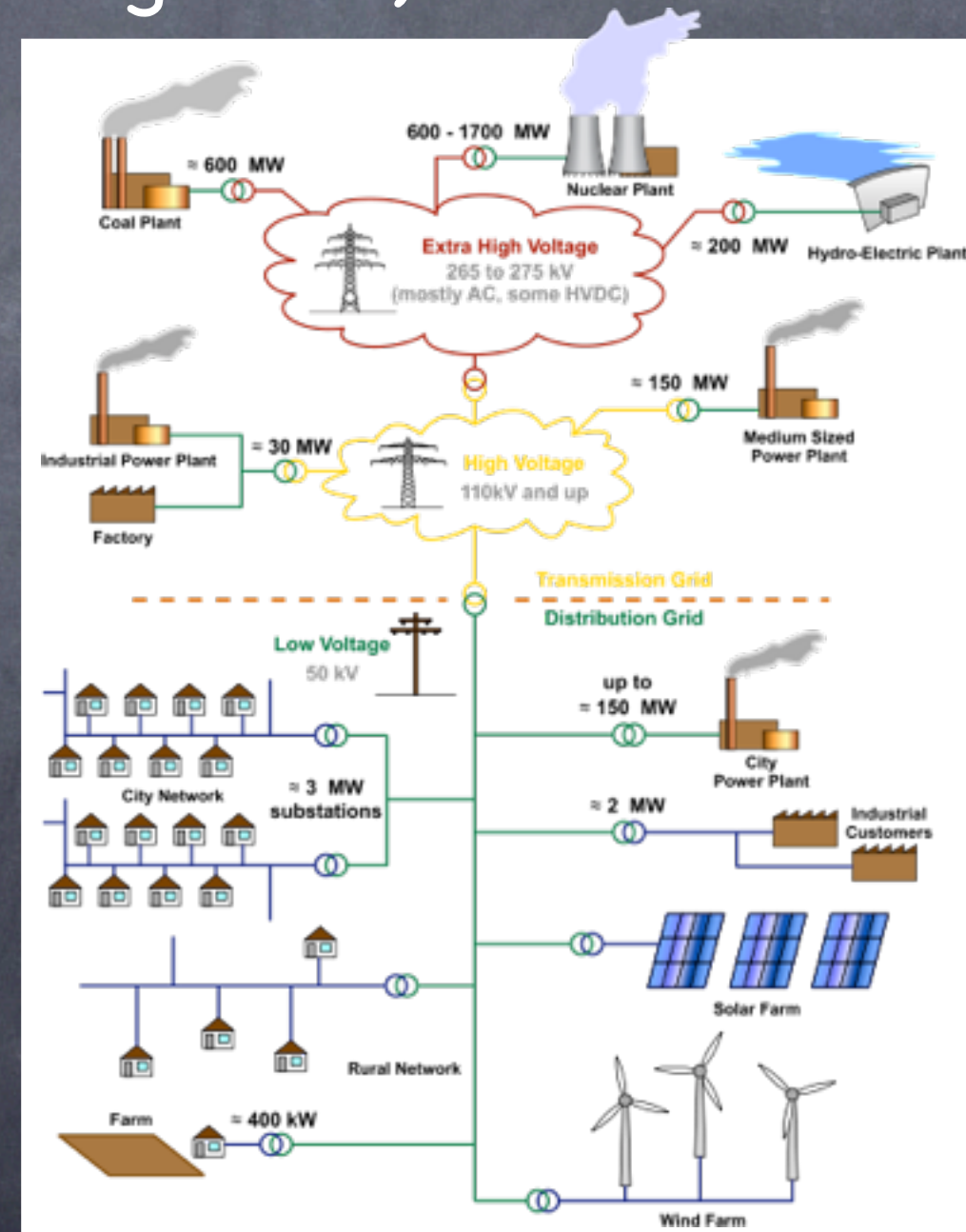
- Faire correspondre plus efficacement la demande à la production
- Contrôler le réseau pour éviter les cascades de coupures

Que faire avec ça?

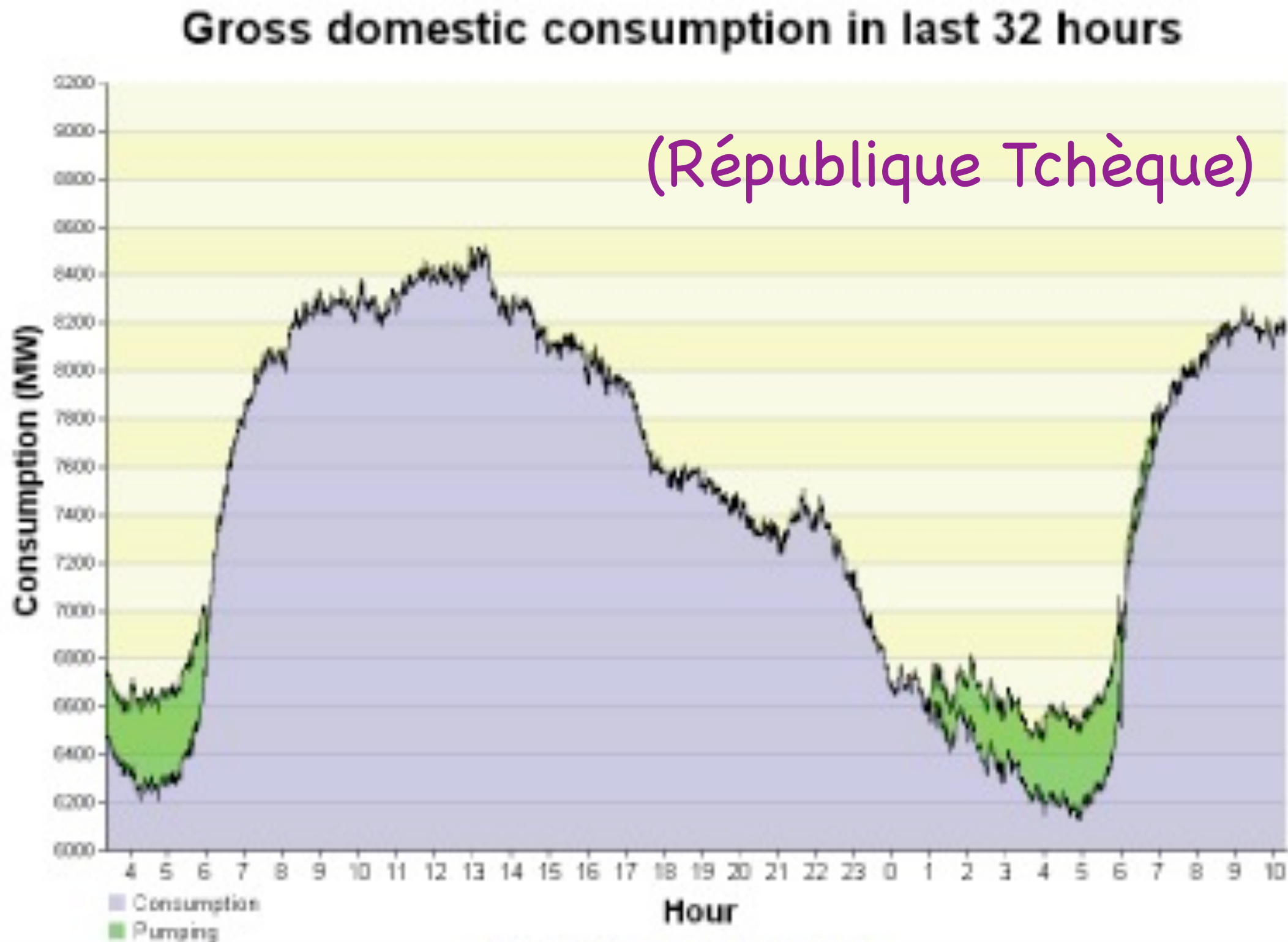
- Faire correspondre plus efficacement la demande à la production
- Contrôler le réseau pour éviter les cascades de coupures

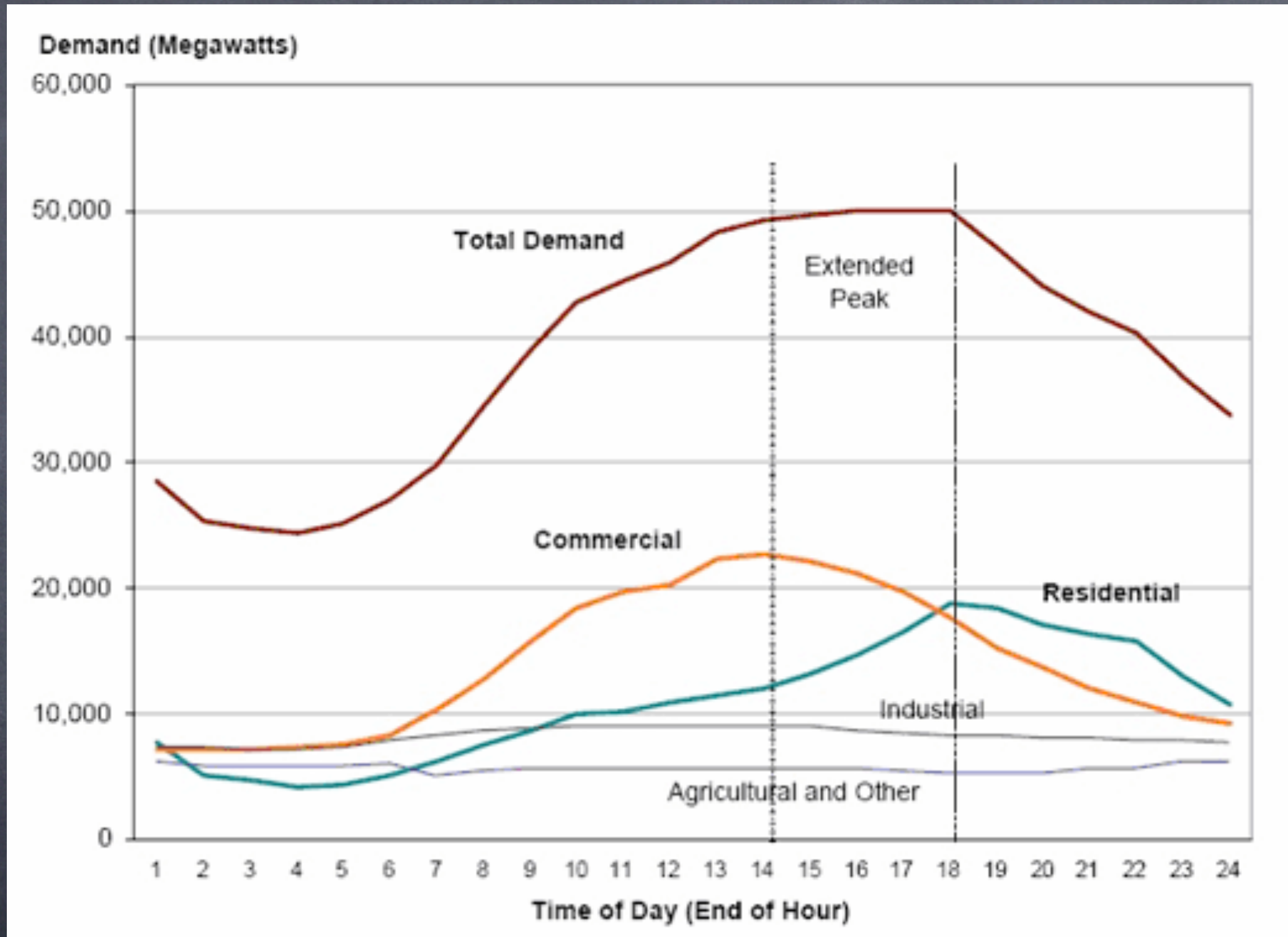
Faire correspondre la consommation à la production

- Le réseau électrique fonctionne seulement si production = consommation! (production < consommation – fréquence baisse
production > consommation – fréquence grandit)
- La consommation change tout le temps!
- Avec des ressources d'énergie renouvelables la productions change également tout le temps!



Profil de la demande journalière



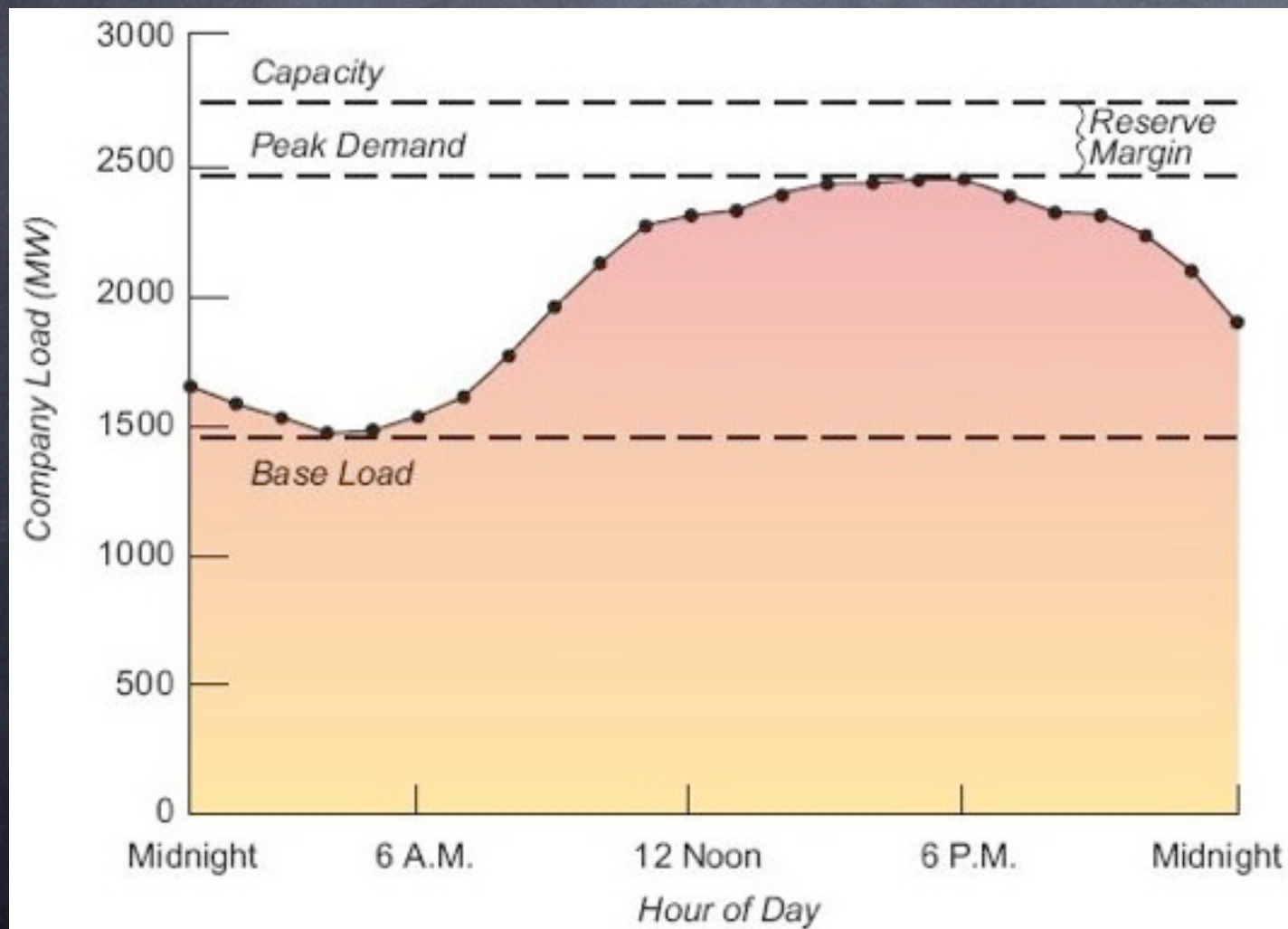


(Consommation totale de la Californie pour un jour d'été en 1999)

Centrales pour la production de base = charbon et nucléaire; électricité la moins couteuse (une fois lancées!)

Centrales pour la production en pic = utilisation ponctuelle, seulement quelques heures par jours, facile a éteindre/allumer (hydroélectrique, fuel e.g. gaz) mais plus chères.

Réserve de puissance (la réserve synchronisée) = la capacité de production disponible pour le gestionnaire du réseau en cas d'arrêt d'une unité de production ou d'une rupture dans la fourniture d'électricité, ou d'un pic de la demande non prévu.



- 10%-20% des coûts électriques aux Etats Unis sont dus aux pics de consommation durant une centaine d'heures dans l'année.

Smart grid solutions: Réponse de la demande

Idée: Faire répondre la demande en continu pour la faire correspondre à la production. Utilisation de la puissance quand elle est disponible.

- Chauffage, climatisation, chauffe-eau, changement de l'intensité de l'éclairage, report du cycle du lave-vaisselle ou du congélateur.
- Combiner avec le stockage: charge ou decharge selon les besoins (e.g. voitures électriques, charge de la voiture au réseau, ou du réseau à la voiture)

Pricing en temps réel: les prix et les économies sont une source de motivation pour le consommateur

Méthode: Utilisation des smart meters pour l'information.
Développement d'algorithmes de réponse efficace.

Des idées à la réalité?

- Contrôle du prix basé sur la demande: Tout ce qu'un consommateur reçoit est l'information sur le prix. Utilisation d'un logiciel pour optimiser la consommation domestique.
 - ➔ Quand plus de consommation est nécessaire – décroître les prix, moins de consommation nécessaire – monter les prix. Mais quelle stratégie exacte pour fixer les prix (sans créer des instabilités dynamiques dangereuses... comme dans les marchés financiers)
- Contrôle automatique des tâches: choisir un tarif – plus de confort ou plus d'économie? Possibilité de permettre à la compagnie d'effectuer ou non une tâche donnée (encore plus difficile algorithmiquement...)

Problèmes?

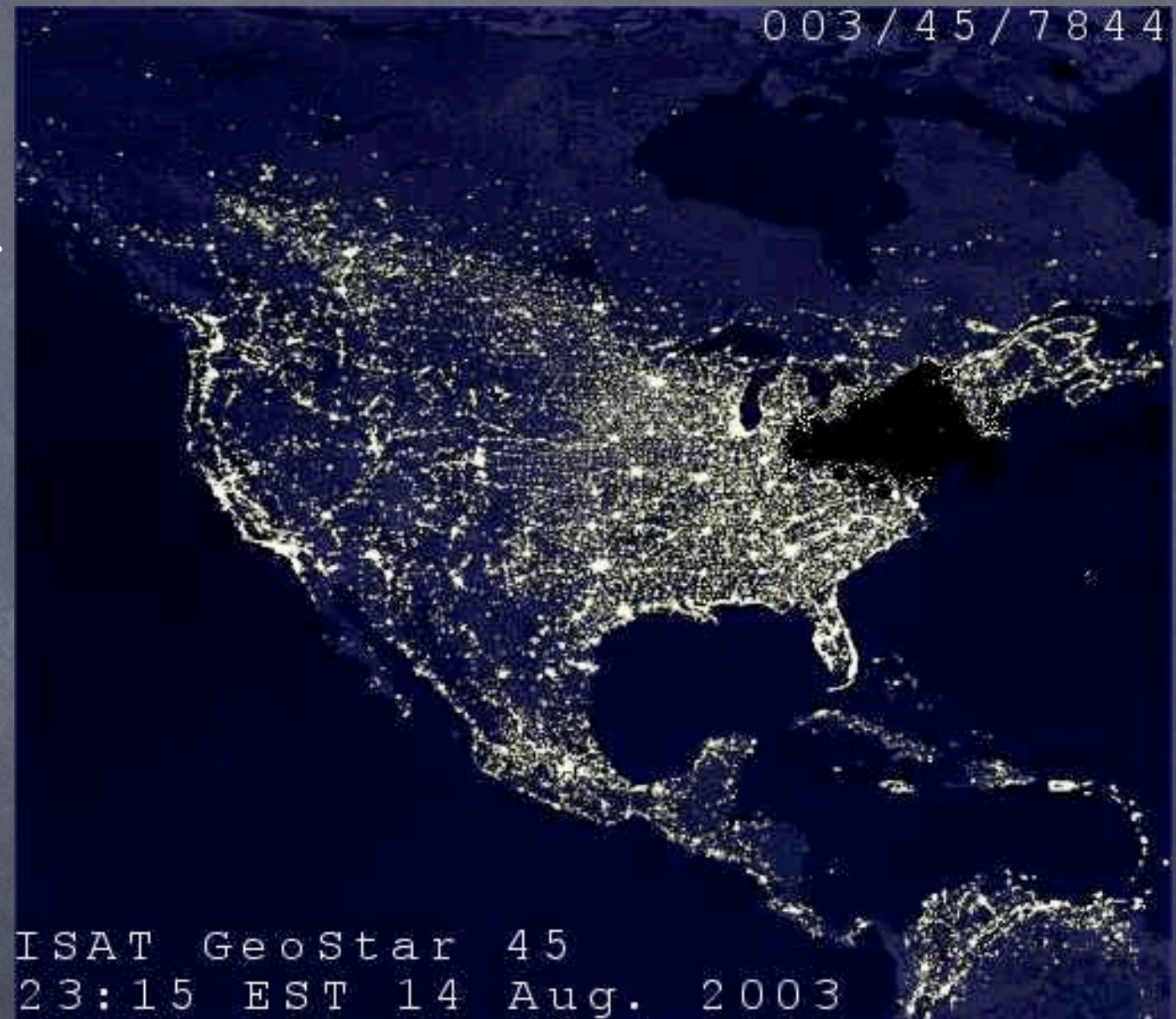
- Sécurité – protocole pour empêcher un adversaire d'attaquer le système.
- Vie privée – accès à la consommation individuelle.
- Spéculation – comme dans les marchés financiers...
- Couplage du réseau électrique à celui de communication: chacun a des problèmes de stabilité et de sécurité... quel rôle est joué par le couplage?

Que faire?

- Faire correspondre plus efficacement la demande à la production
- Contrôler le réseau pour éviter les cascades de coupures

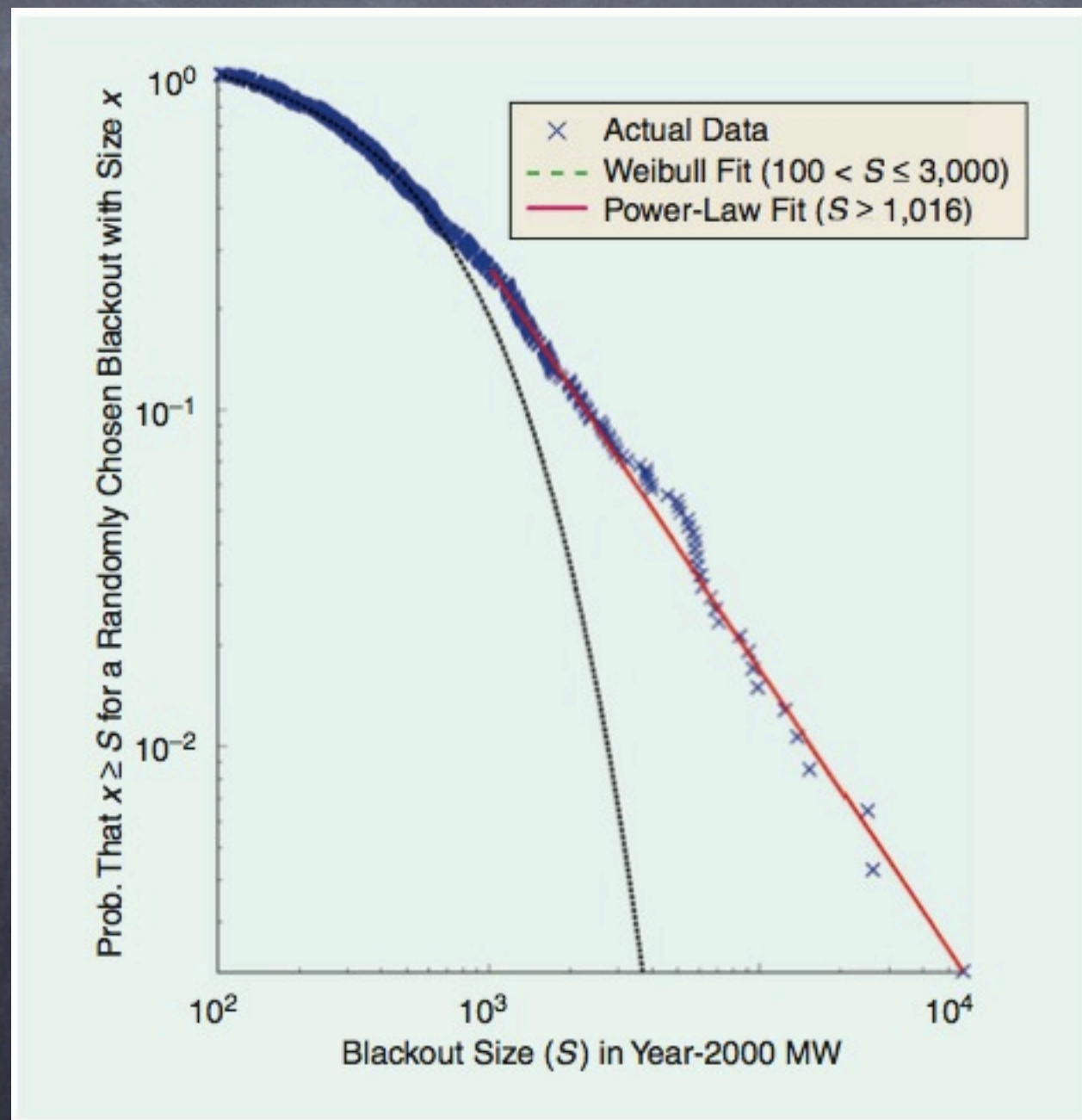
Black-outs

- La demande croissante conduit à de plus en plus de black-outs
- E.g. le black-out du nord-est américain d'août 2003: coût estime \$6 mld
- Coût des black-outs au US: \$80 mld par an
- Les 5 plus grands black-out du monde se sont passés dans les 12 dernières années (1999 Brazil, 2003 US, 2003 Italy, 2005 Java, 2009 Brazil).



Tailles des black-outs

- Probabilité de distribution des black-outs avec des "fat tails" => grands black-outs relativement probable



North America
1984-2006

Comment apparaissent les black-outs?

- Coupure initiale: Dégâts sur des lignes de transmissions (chute d'arbre, tempête ...), court-circuit, surcharge due à la demande ne correspondant pas à la production, problème du système de protection, et parfois (plus rarement) problème de générateur.
- Les composantes fautives sont automatiquement déconnectées du réseau, possible surcharge (= fort courant, fréquence différente de 50Hz, voltage différent de 220V) à d'autres endroits, induisant de nouvelles coupures des composants etc...

⇒ Cascade de coupures!

Prévention des black-outs aujourd'hui

- Réseau actuel: Multiples chemins entre les générateurs et consommateurs. **N-1 contingency** = la coupure d'une ligne de conduit pas à une cascade.
- Délestage électrique: consiste à arrêter l'approvisionnement de plusieurs consommateurs pour rétablir l'équilibre entre la production et la consommation.

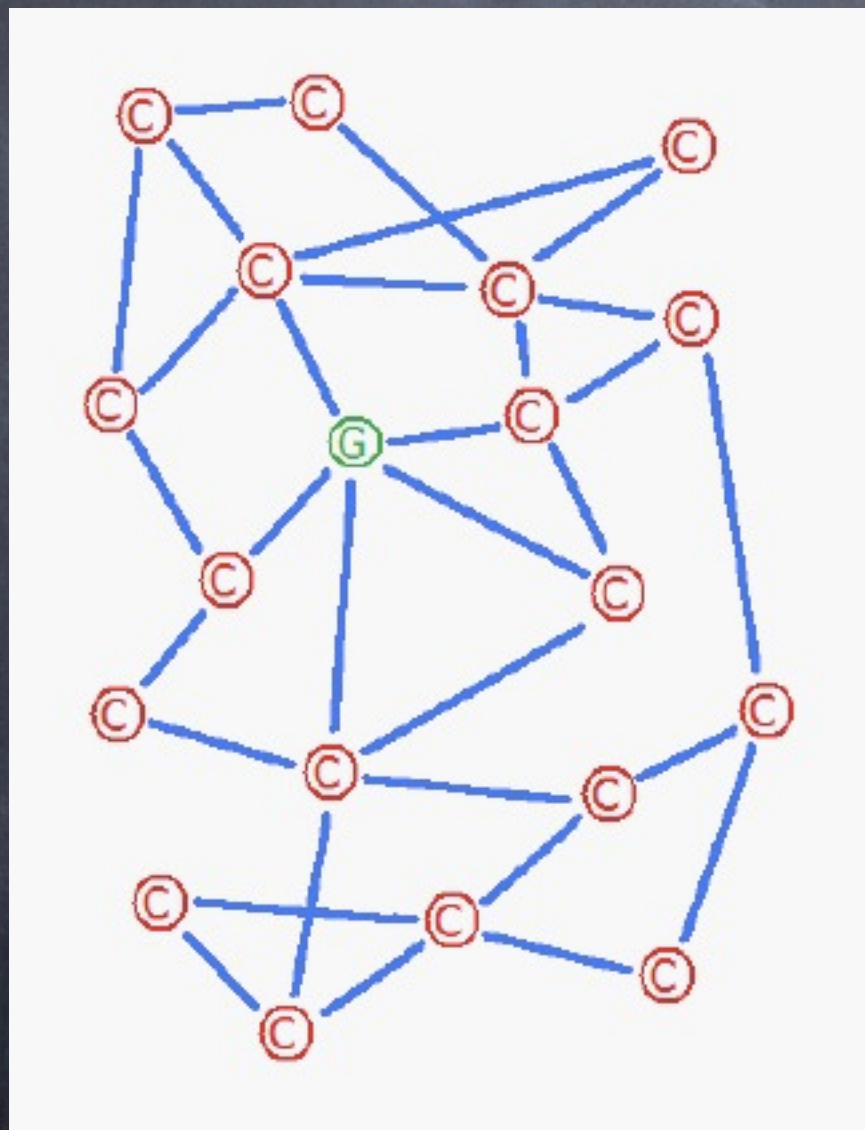
Les solutions "Smart grid"

- Faire répondre la demande pour contrôler la stabilité. Besoin de développer des algorithmes fiables de contrôle
- Technologie de stockage, et réseaux de générateurs de secours pour empêcher les black-outs.
 - ➔ Ou placer les batteries et avec quelles performances pour minimiser le \$\$\$ et le coût social? E.g. les hôpitaux et les contrôles aériens ont de bons systèmes de secours. Pour les feux de contrôles routier, l'investissement vaut la peine...

Premier pas: bien comprendre les mécanismes et les propriétés des black-outs.

Modéliser les cascades

Graphe: représentation du réseau électrique



Noeud: $i = 1, \dots, N$

Voisins du noeud i : ∂i

Noeuds: La puissance totale
générée ou consommée P_i

Liens: Réactance X_{ij}

Les lois de Kirchhoff en DC

θ_i voltage sur le noeud i

X_{ij} résistance de ligne ij

P_{ij} courant de j à i

P_i "consommation" du courant

conservation du courant

$$P_i = \sum_{j \in \partial i} P_{ij}$$

loi d'Ohm

$$X_{ij} P_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

DC approximation de AC



θ_i voltage sur noeud i

X_{ij} résistance de ligne ij

P_i "consommation" de courant



phase du voltage

réactance de ligne

puissance consommée

$$P_i = \sum_{j \in \partial i} \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}}$$

$$\sum_i P_i = 0$$

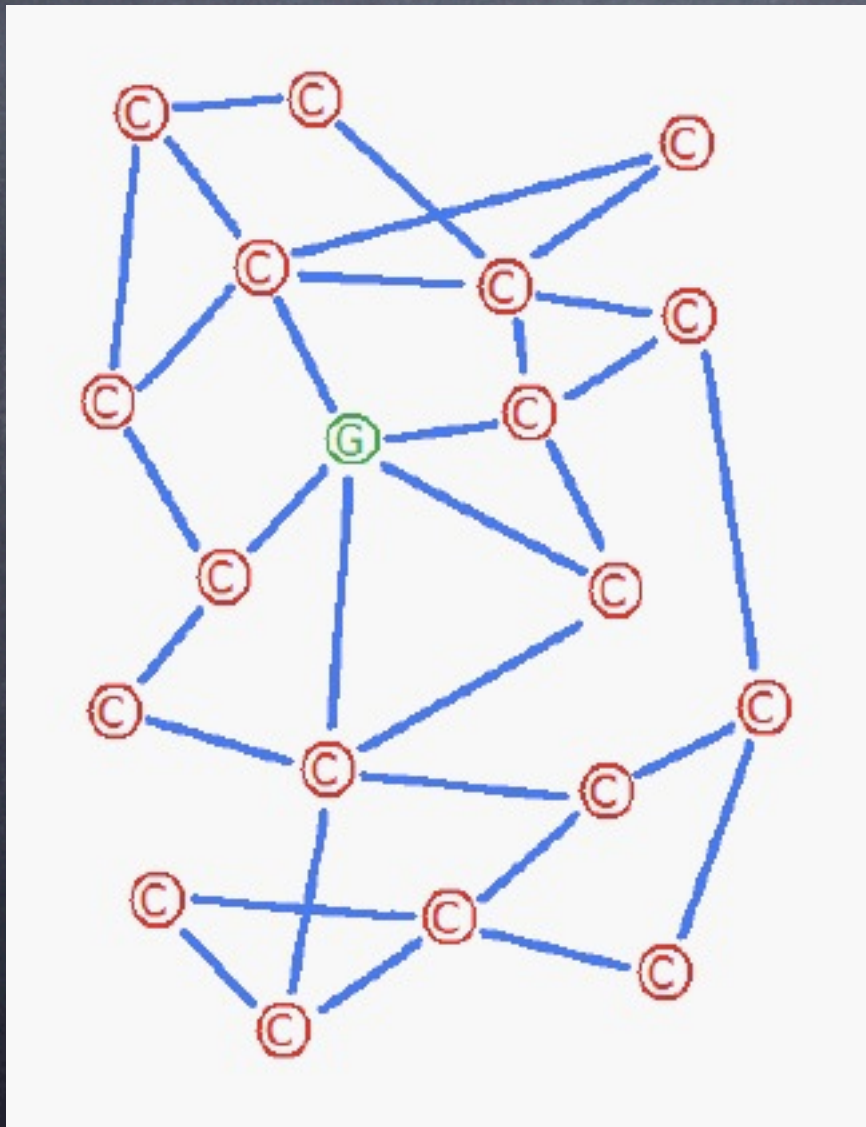
Valide si (1) voltage constant, (2) résistivité négligeable, (3) différence de phase petite.

Modéliser les cascades

$$P_i = \sum_{j \in \partial i} \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}}$$

P_i et X_{ij} sont connus.

θ_i inconnus



N équations linéaires

N inconnues

contrainte $\sum_i P_i = 0$

$\Rightarrow$ une solution

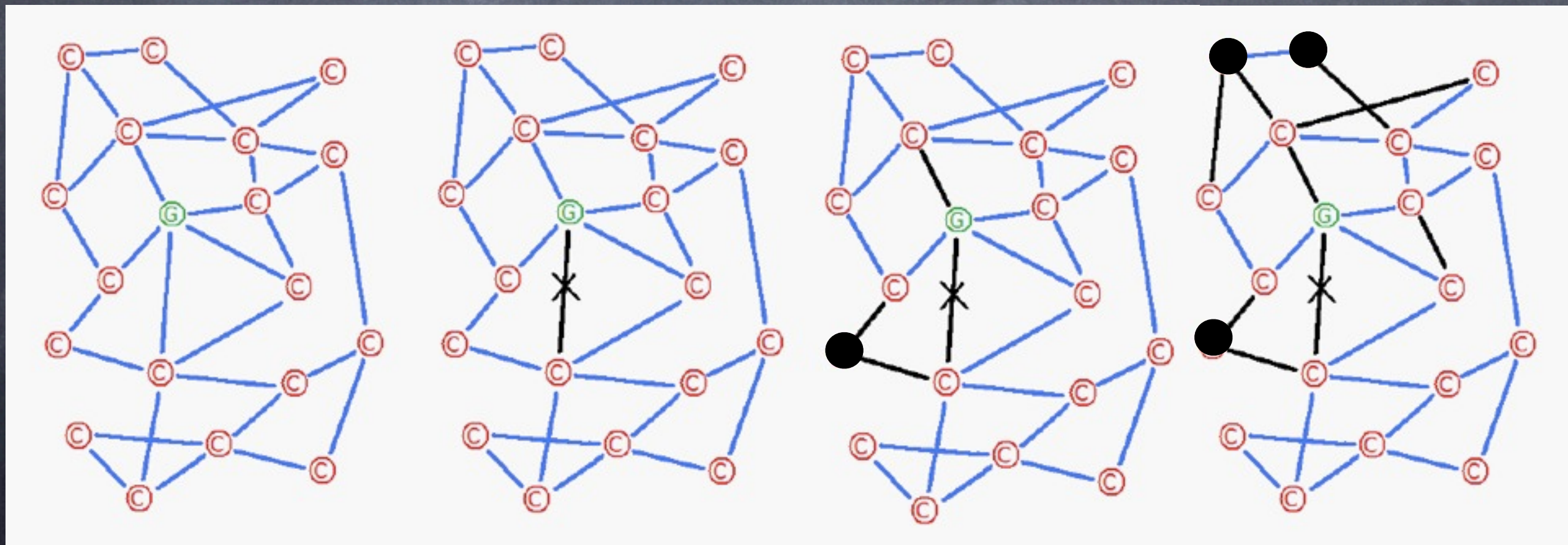
(si θ_0 fixée, et
si réseau connexe)

Modéliser les cascades

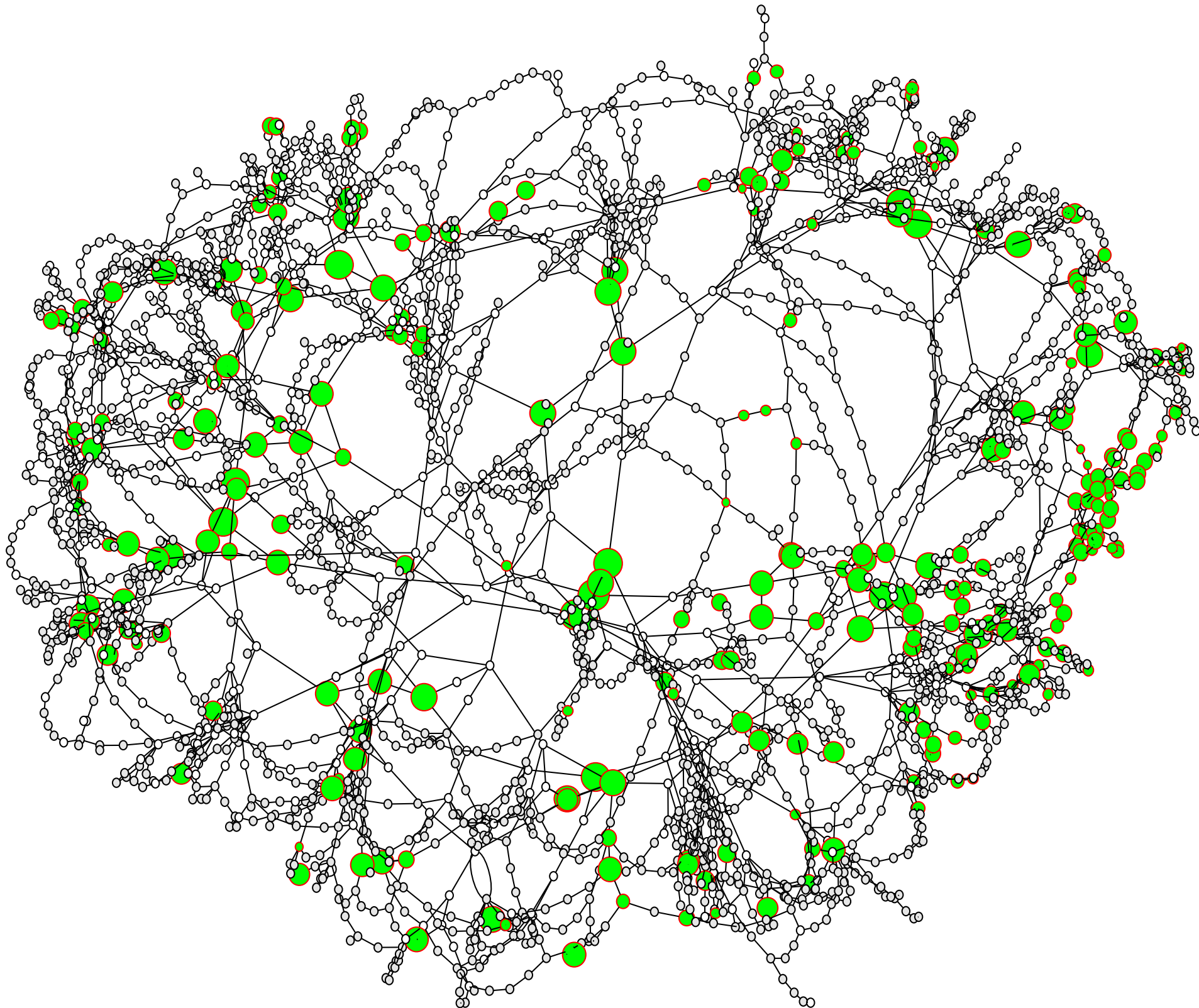
capacité de liens limitée

$$|P_{ij}| < P_{ij}^{\max}$$

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}}$$



Réseau de la Pologne, 3000 noeuds



- Ce modèle est étudié dans plusieurs articles, e.g.

- J. Chen, J. S. Thorp, and I. Dobson, Int. J. of Electr. Power & Energy Sys. (2005).

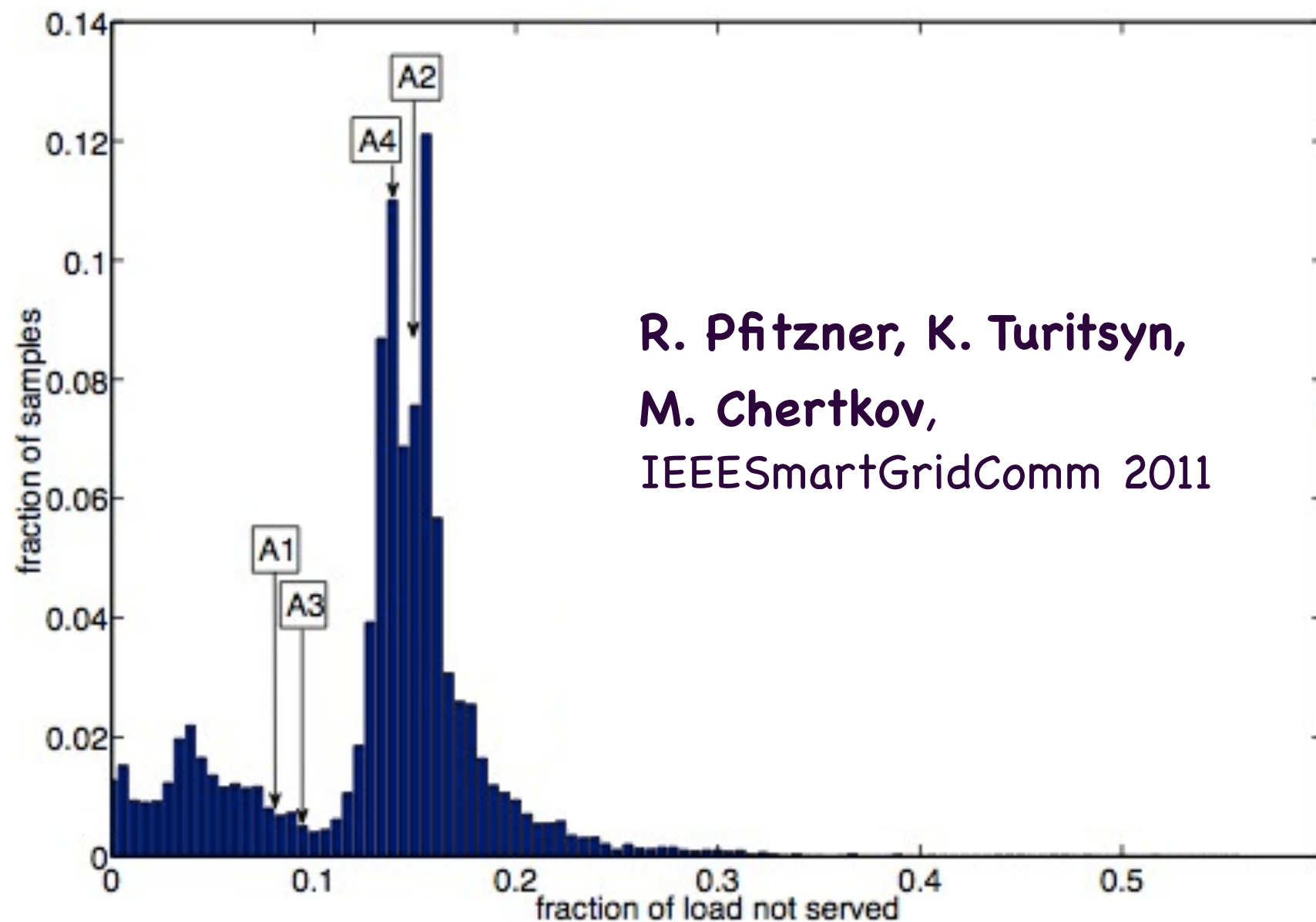
- D. Nedic, I. Dobson, D. Kirschen, B. Carreras, and V. Lynch, Int. J. of Electr. Power & Energy Sys. (2006).

- R. Pfitzner, K. Turitsyn, M. Chertkov, IEEE SmartGridComm 2011.

- R. Pfitzner, K. Turitsyn, and M. Chertkov, IEEE PES 2011.

- La plupart des propriétés de ce modèle ne sont pas encore comprises.

L'ordre dans quel les liens sont
déconnectés est important!



R. Pfitzner, K. Turitsyn,
M. Chertkov,
IEEE SmartGridComm 2011

Avertissement!



- Beaucoup de pseudo-recherche avec les mots-clefs "smart grid" est publiée...
- Toujours être critique sur ce que vous lisez!!! Et essayez de juger si les propos sont crédibles ou pas!

Avertissement!



- Beaucoup de pseudo-recherche avec les mots-clefs “smart grid” est publiée...
- Toujours être critique sur ce que vous lisez!!! Et essayez de juger si les propos sont crédibles ou pas!

Catastrophic cascade of failures in interdependent networks

Example

Sergey V. Buldyrev^{1,2}, Roni Parshani³, Gerald Paul², H. Eugene Stanley² & Shlomo Havlin³

nature

“A dramatic real-world example of a cascade of failures is the electrical blackout that affected much of Italy on 28 September 2003: the shutdown of power stations directly led to the failure of nodes in the Internet communication network, which in turn caused further breakdown of power stations.”

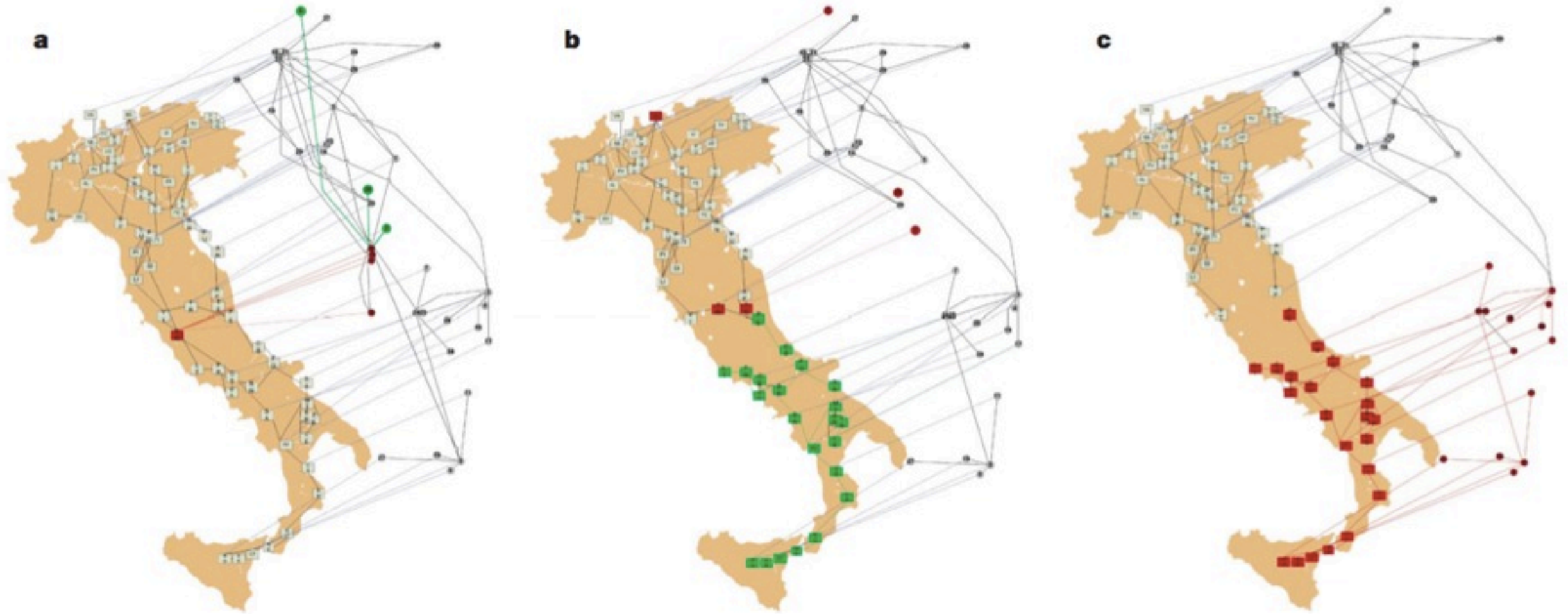


Figure 1 | Modelling a blackout in Italy. Illustration of an iterative process of a cascade of failures using real-world data from a power network (located on the map of Italy) and an Internet network (shifted above the map) that were implicated in an electrical blackout that occurred in Italy in September 2003²⁰. The networks are drawn using the real geographical locations and every Internet server is connected to the geographically nearest power station. **a**, One power station is removed (red node on map) from the power network and as a result the Internet nodes depending on it are removed from the Internet network (red nodes above the map). The nodes that will be disconnected from the giant cluster (a cluster that spans the entire network)

at the next step are marked in green. **b**, Additional nodes that were disconnected from the Internet communication network giant component are removed (red nodes above map). As a result the power stations depending on them are removed from the power network (red nodes on map). Again, the nodes that will be disconnected from the giant cluster at the next step are marked in green. **c**, Additional nodes that were disconnected from the giant component of the power network are removed (red nodes on map) as well as the nodes in the Internet network that depend on them (red nodes above map).

Conclusions sur les Smart Grid



- Réduire les dépenses électriques, améliorer la fiabilité et décroître l'impact environnemental en optimisant la gestion du réseau. En utilisant le réseau de communication et les méthodes de la technologie des informations.
- Challenge difficile, mais une grande opportunité de recherche
- Myriade de problèmes ouverts

Merci pour votre attention!

