



Guillaume Guérard

Analyse Système complexe pour l'Optimisation de  
**SMART GRIDS**

Avril 2013  
v1

# Problématique



## **Optimisation dans les systèmes complexes :**

Optimisation de la distribution de l'énergie dans un Smart Grid.  
Gestion de la production, de la consommation et de la distribution d'une ressource commune.

---

## **Optimisation multicritères :**

- Résilience.
- Fiabilité du réseau.
- Recherche de coût minimum (flots de ressources, production, consommation).
- Equilibre de l'offre et de la demande.

# Problématique

- Il est difficile voir impossible de trouver une fonction objective résolvant le problème dans sa globalité.
- Le nombre de variables impliquées peuvent aller jusqu'à des dizaines de milliers d'entités.
- Optimiser un système complexe :
  - une classe d'algorithmes d'optimisation appropriée pour l'application au système.
  - les paramètres divers de l'algorithme d'optimisation doivent être accordé.

*Kirkpatrick et al. (1983)*

*Grefenstette (1986)*

**Objectif** : définir une méthode d'analyse permettant de fournir les outils nécessaires à la résolution d'un système complexe.

# Smart Grid



Approche système complexe pour la modélisation des Smart Grids



# Etude système complexe

- I. Problématique
- II. Analyse du système complexe
- III. Définition des sous-composantes

Etude et analyse des Systèmes complexes : cas du Smart Grid

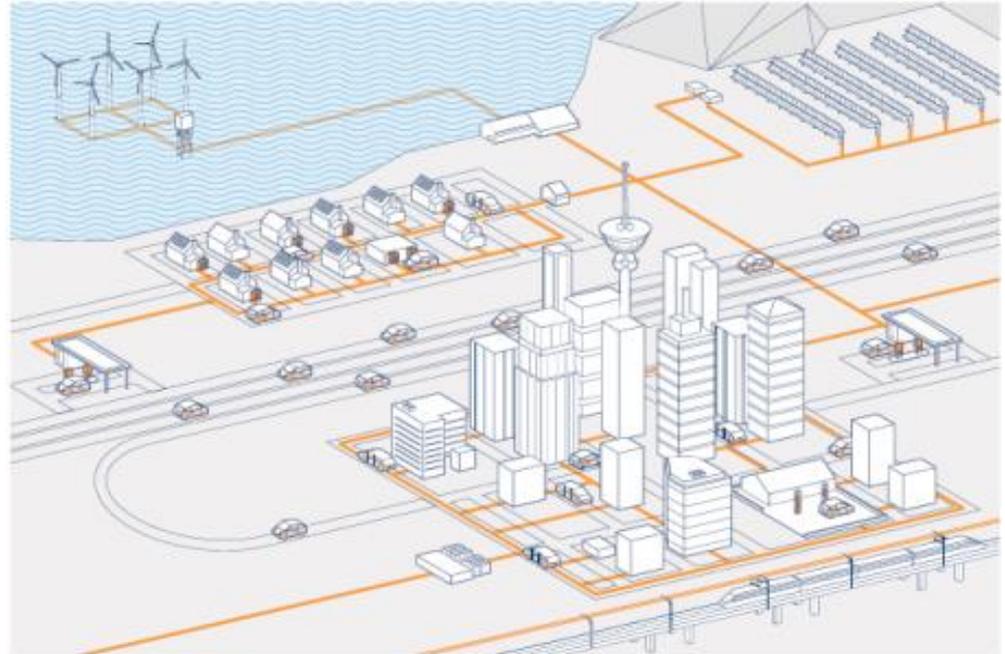
# I. Objectifs industriels

*L'Energy Grid actuel est basé sur la modélisation de Nikola Tesla de 1888.*

## Insuffisances de l'Energy Grid :

- **Structure** : intégration des EnR, conservation de l'énergie, gestion des appareils digitaux ou analogiques.
- **Consommation** : congestion et pertes sur le réseau T&D, rentabilité des centrales de proximité, latence du réseau.

**Smart Grid** : réseau électrique intégrant le **comportement** et les **actions** des utilisateurs

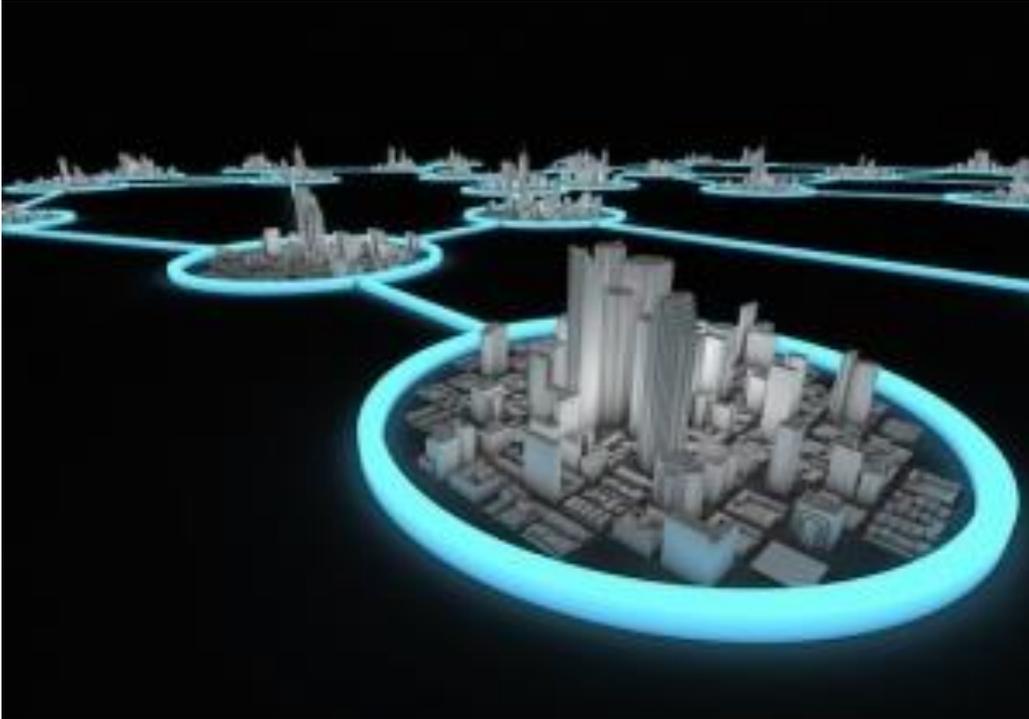


## Nouveaux rôles et objectifs :

- **Réguler** la courbe de consommation
- **Optimiser** l'offre et la demande
- Garantir une **qualité de service**

*65% de l'énergie est utilisé dans des machines fonctionnant en permanence à plein régime.  
Cette consommation peut être réduite de 60%.*

# I. Caractéristiques du Smart Grid



Le **Smart Grid** possède les **caractéristiques** suivante :

- Self-Healing
- Flexibilité
- Prédicatif
- Interactif
- Optimal
- Sûr.

*En 2020, on prévoit 20% de consommation en moins grâce aux nouvelles technologies.*

# I. Simulations actuelles

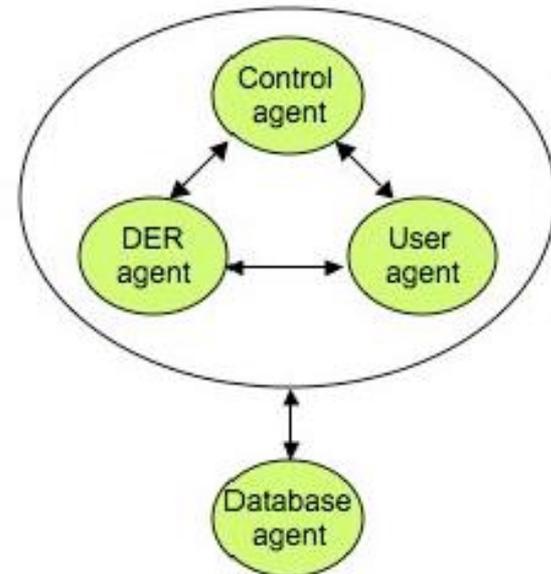
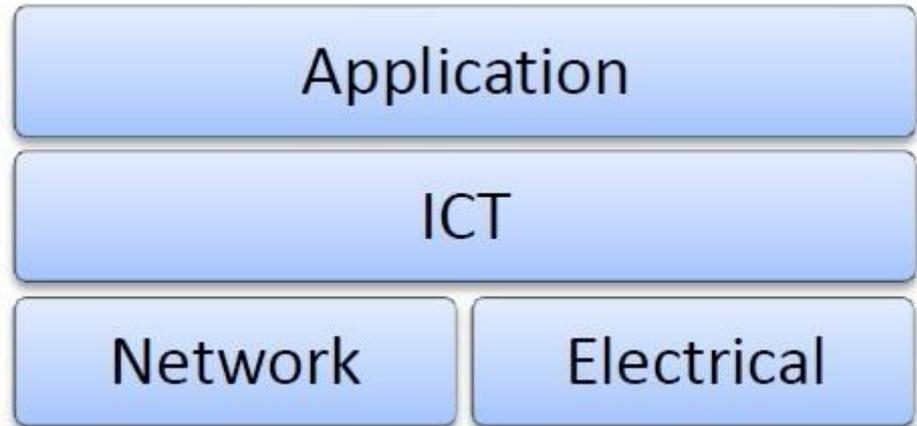
Les simulations actuelles (SMA) sont faites sur des **cas précis et spécifiques**, avec une **évolution limitée**.

## Modèle général :

- Trois niveaux.
- Quatre types d'agent.

## Inconvénients des simulations :

- Temps de calcul exponentiel.
- Stockage de toutes les données.
- Simulation spécialisée à l'étude d'un unique modèle.



# I. Approches

## • Approche cartésienne

1. Partir d'un problème sans préavis
2. Analyse du problème
3. Identification des ensembles
4. Raisonnement linéaire vers le problème globale

Définition du problème généralisé : *top-down*

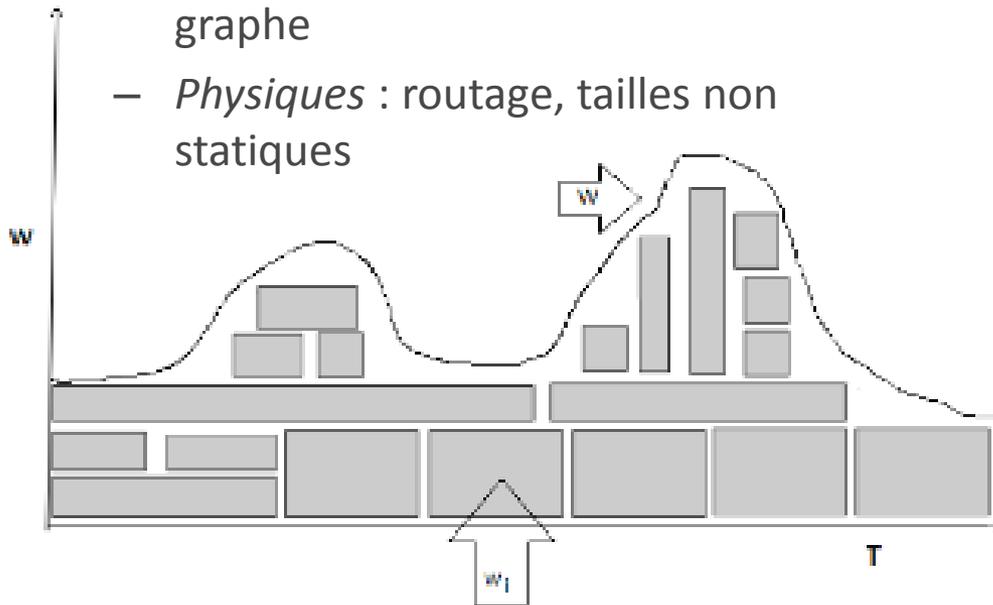
## • Approche systémique

- *Interaction et interrelation*
- *Globalité et sous-ensemble : entropie et émergence*
- *Organisation du système : comportement et auto-organisation*
- *Complexité du système*

Définition des sous-composantes : *bottom-up*

# I. Problème généralisé

- Problème de **sac-à-dos multidimensionnel** sous contraintes :
  - *Temporelles* : temps discret, production, consommation
  - *Spatiales* : granularité, hiérarchie du graphe
  - *Physiques* : routage, tailles non statiques



– Pour tout instant  $T$

$$\sum_{i=1}^n x_i w_i < W$$

- $x_i=1$  si la **demande en énergie** est satisfaite à l'instant  $T$ , 0 sinon.
- $w_i$  l'**énergie demandée par  $i$**  durant l'intervalle de temps
- $W$  : **production de l'échantillon** durant l'intervalle de temps

## II. Analyse

Ne serait-ce pas plus avantageux et permissif de comprendre les fondements et le moteur du Smart Grid plutôt que d'imposer de nouvelles technologies locales et souvent incompatibles entre elles ?

### Equilibre global

Rétroaction

Objectifs  
globaux

### Optimisation des sous-composantes

#### Optimisation

- Interaction
- Communication
- Normalisation

#### Sous-composantes

Structure

Entités

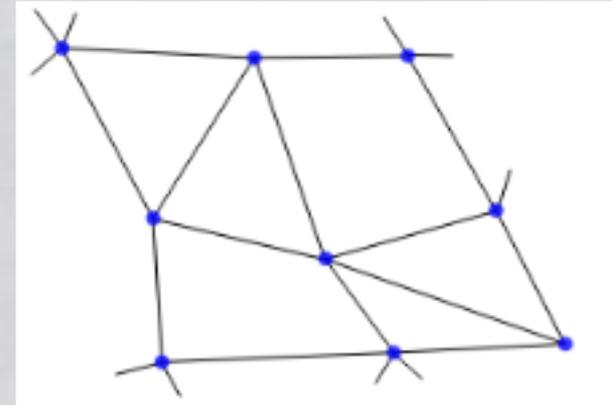
Comportement

### III. Analyse structurelle

#### Le réseau de transmission et distribution T&D :

Maillage « n-1 »

-> **Structure 2-connex** (2-core)



#### Réseau de transmission :

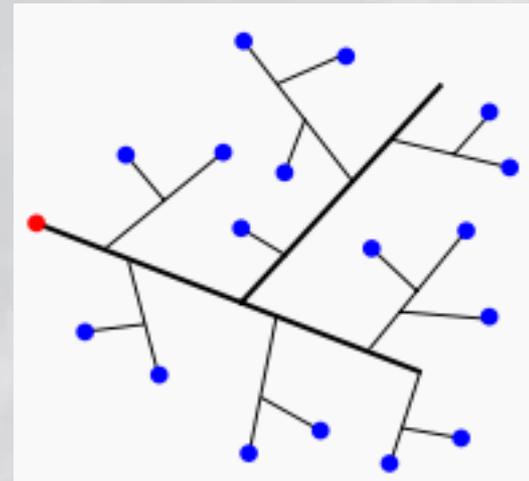
Passage de la haute tension à la moyenne tension

-> **Structure linéaire**

#### Réseau de distribution :

Distribution finale aux consommateurs

-> **Réseau scale free ou arbre**



# III. Analyse des entités

## Les producteurs :

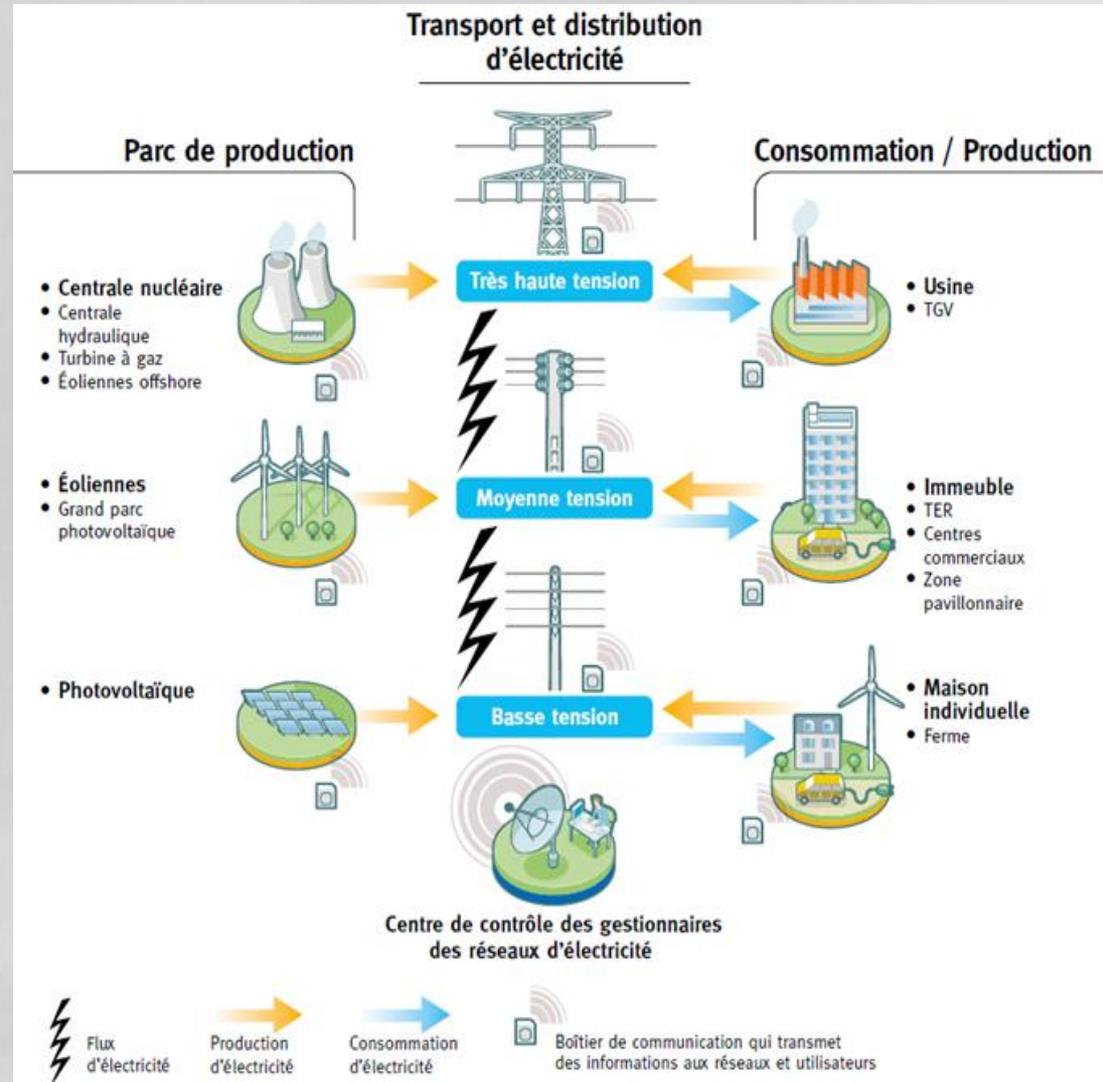
- Centrales à production constante
- Centrales à production variable
- Parc d'EnR et EnR locales

## Les consommateurs :

- Appareil locaux sous Smart Meter
- Grand consommateur

## Distribution et transport :

- Stations et sous-stations
- Contrôle du réseau
- Système de distribution

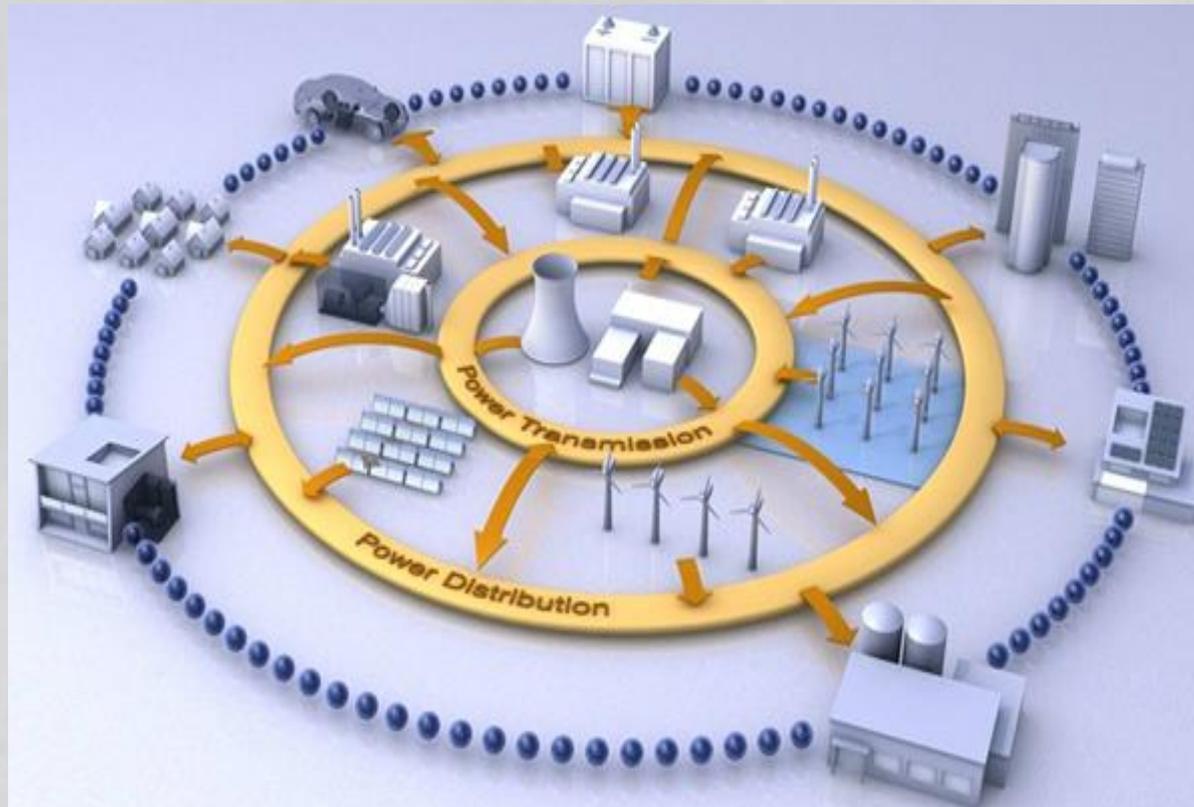


### III. Analyse des objectifs

Transport : éviter la congestion, satisfaire les consommateurs

Production : équilibrer l'offre et la demande, prévoir la consommation future

- Consommateur : réguler sa consommation
- Global : réguler l'offre et la demande, distribuer l'énergie dans le réseau



# III. Définition des sous-composantes



## Niveau local

- Structure isolé
- Gestion de la consommation locale
  - Domotique
  - EnR
  - V2G
- Répartition de l'énergie locale



## Niveau Microgrid

- Structure en arbre
- Consensus
  - Production
  - Consommation
  - Distribution
- Equilibrage de l'offre et de la demande



## Niveau T&D

- Structure maillée
- Gestion de la production globale
  - Production
  - Planification
- Distribution de l'énergie dans le réseau



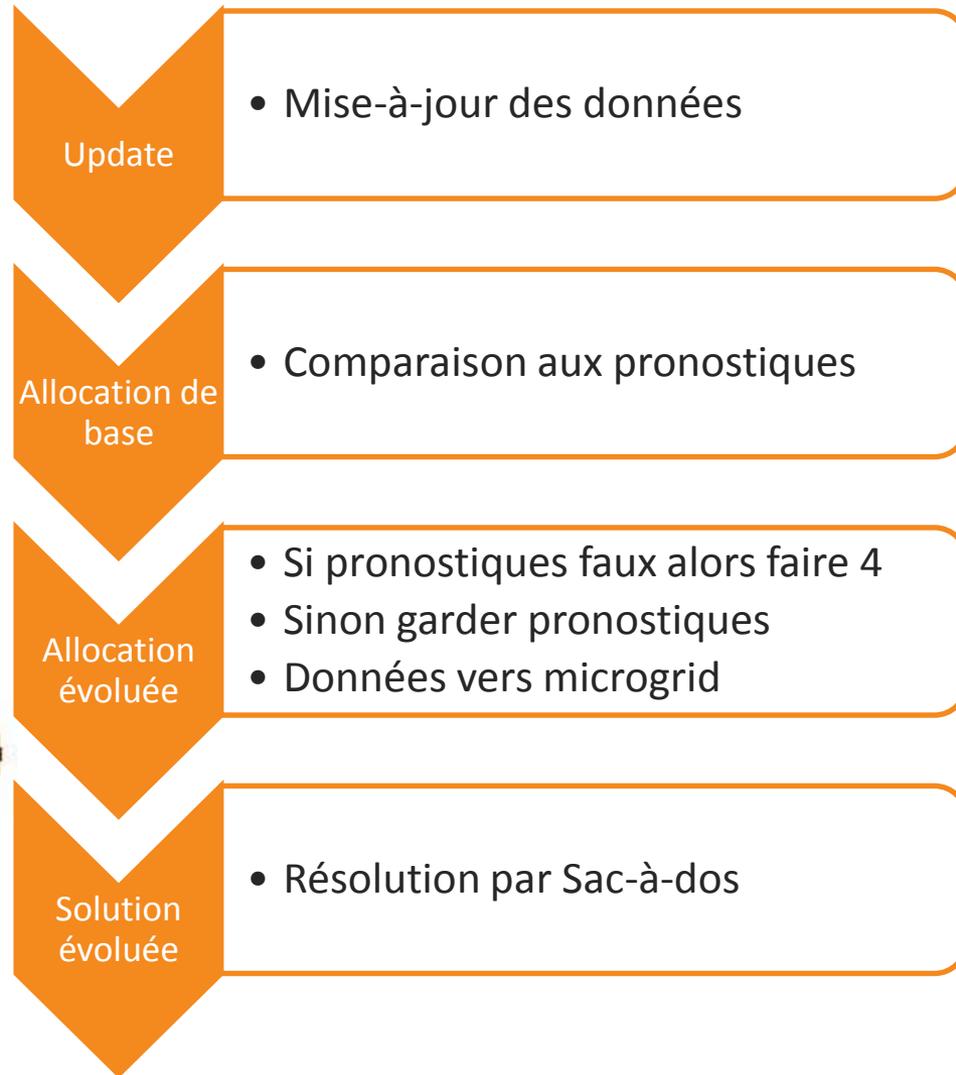
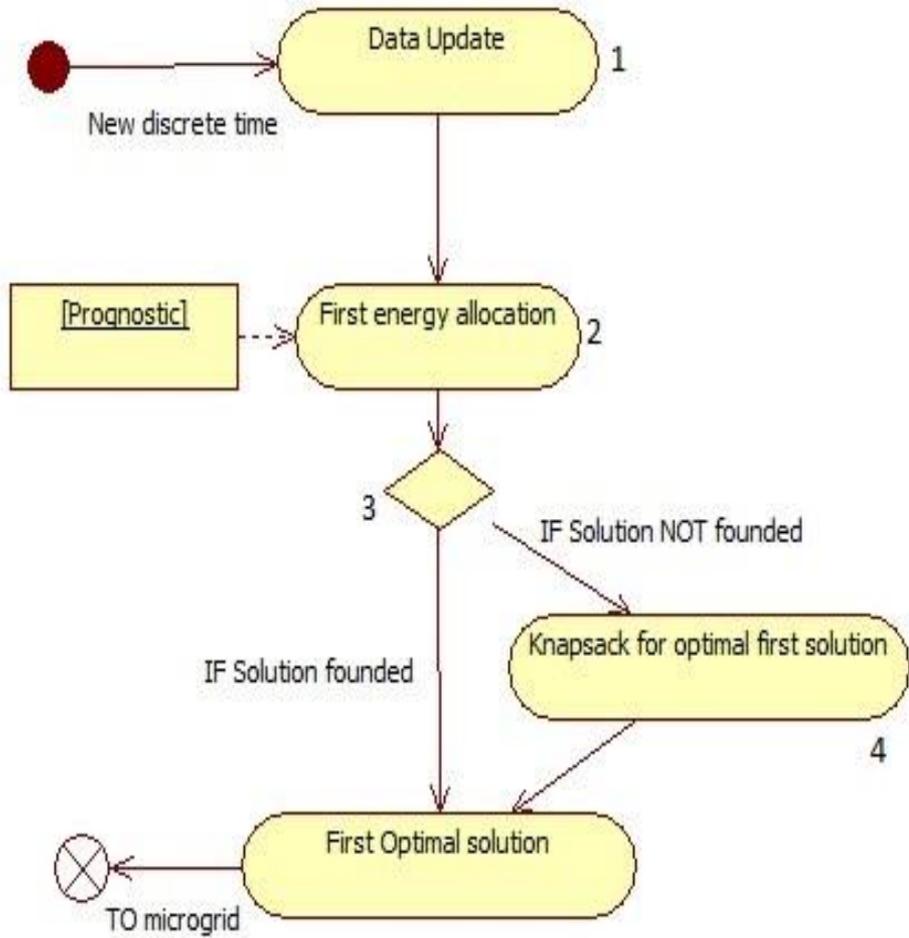
# Optimisation du Smart Grid

- I. Etude des 3 niveaux
- II. Résolution

Propriétés structurels et impact de l'environnement

# I. Niveau local

Résolution en temps discret (5min)



# I. Niveau local

Gestion de la répartition énergétique au sein d'une zone organisée autour d'un Smart Meter.  
Priorité de fonctionnement pour gérer la domotique.

- **Normalisation**

- **Enlever** les appareils consommateurs
- **Diviser** au plus les consommations et l'énergie reçue  $K$  par **pgcd**

*Complexité :  $O(n_e \log(e_{max}))$*

- **Sac-à-dos**

- Attribution de **l'utilité** :  $O(n_e)$ 
  - fonction des consommations locales
- Résolution par **programmation dynamique**

*Complexité :  $O(n_e * K)$*

Bénéfice si :  $K' * ne * \log(e_{max}) < K * ne$  avec  $K'$  le poids normalisé  
càd  $\log(e_{max}) < K * x$  avec  $x \in ]\frac{1}{2}; 1]$ , toujours vrai si  $pgcd \geq 2$

# I. Niveau local

Gestion de la répartition énergétique au sein d'une zone organisée autour d'un Smart Meter.  
Priorité de fonctionnement pour gérer la domotique.

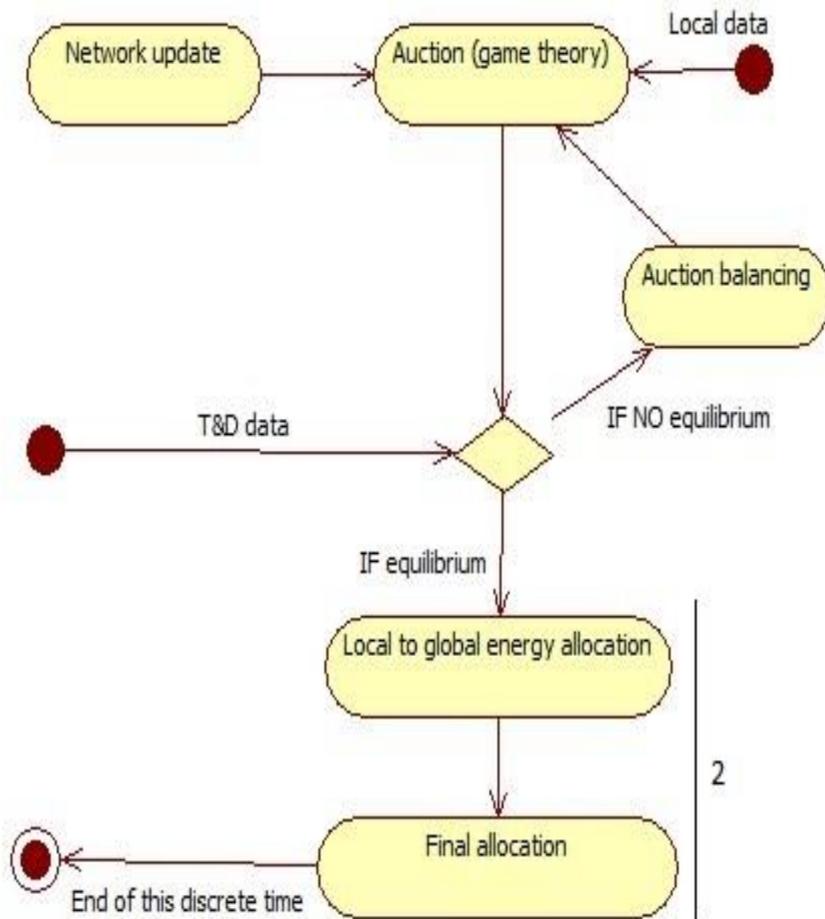
- **Avantages**

- Résolution rapide quelque soit le résultat initial
- Solution optimale
- Prise en compte de la domotique
- Intégration de toutes technologies actuelles ou futures

- **Inconvénients**

- Chaque appareil peut posséder une stratégie d'utilisation particulière
- Prise en compte économique etc. dans la valeur du sac-à-dos actuel
- Pas de contrôle au cas par cas des EnR, V2G etc locaux

# I. Niveau microgrid



1

Jeux  
d'enchères

- Enchères sur les données locales
- Données vers T&D
- Rectification par réaction top-down

Allocation  
finale

- Résolution par KP locale
- Résolution par KP en réaction bottom-up

# I. Niveau microgrid

Gestion de l'offre et de la demande, équilibre et consensus entre les consommateurs et les producteurs.

- **Enchères**

- Utilisation de stratégies  $\omega$  : enchères aléatoire par loi normale
- Complexité linéaire en fonction des niveaux locaux  $n_i$

*Complexité :  $O(n_i\omega)$*

- **Equilibre**

- Utilisation de stratégies  $\mu$  : punitions et récompenses par défaut
- Complexité linéaire en fonction des niveaux locaux  $n_i$

*Complexité :  $O(n_i\mu)$*

# I. Niveau microgrid

Répartition de l'énergie en fonction des enchères

- **Sac-à-dos local**

- Distribution sans normalisation
- Complexité linéaire en fonction des niveaux locaux  $n_l$

*Complexité :  $O(n_e * K)$*

$n_e$  représente le nombre d'appareil locale ou non consommateur dans le cas de la réattribution énergétique

- **Réattribution énergétique**

- Sac-à-dos résiduel avec appareil et énergie restante
- Regroupement à l'échelle supérieur  $k$  fois

*Complexité :  $O(n_e * K)$*

# I. Niveau microgrid

Gestion de l'offre et de la demande, équilibre et consensus entre les consommateurs et les producteurs.

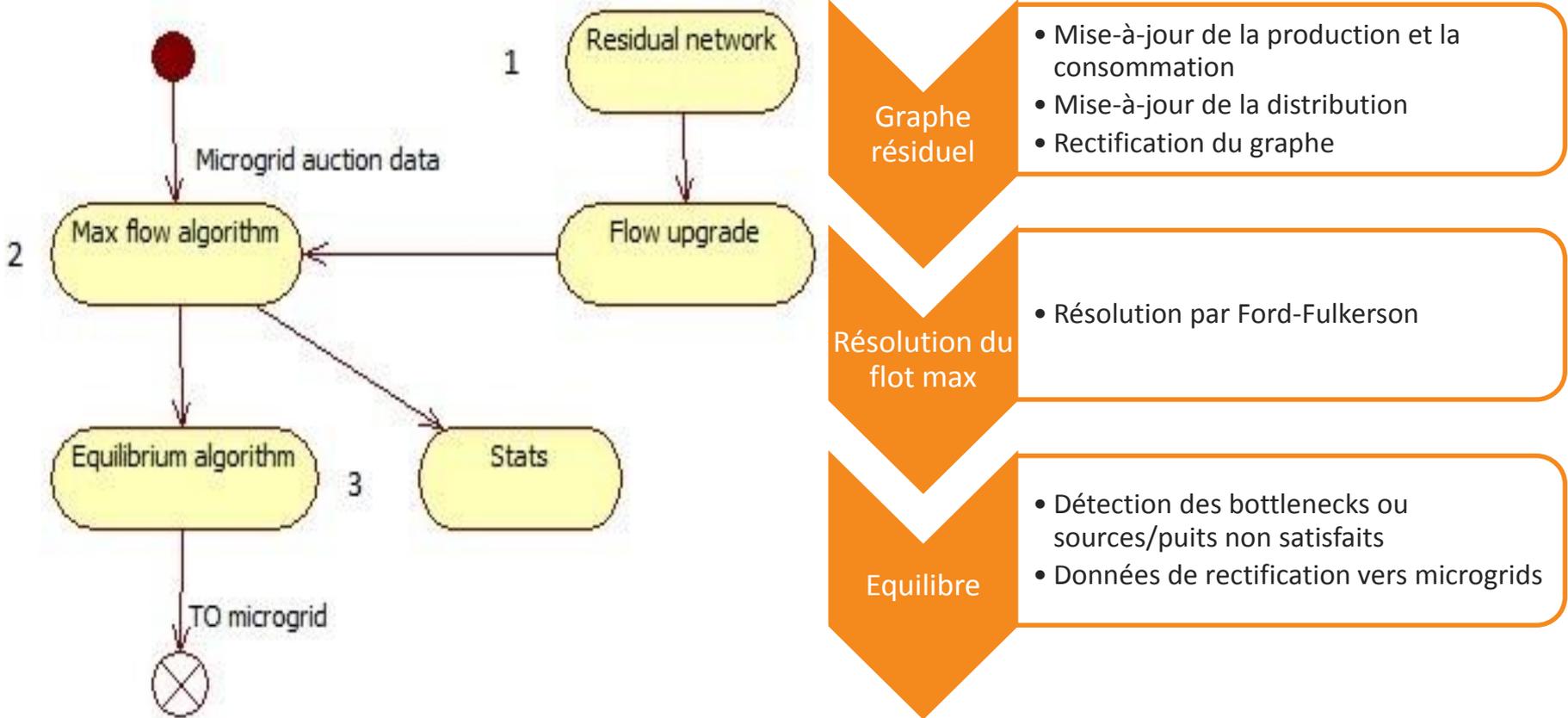
- **Avantages**

- Recherche d'équilibre entre l'offre et la demande
- Confidentialité des consommateurs
- Flexibilité dans le choix des stratégies (théorie des jeux, équilibre de Nash/Pareto etc)

- **Inconvénients**

- La stratégie d'enchère modifie le résultat final
- La stratégie de récompenses modifie le résultat final
- Pas de prise en compte d'impact économique dans le modèle actuel

# I. Niveau T&D



# I. Niveau T&D

Gestion de la distribution de l'énergie dans le réseau T&D.

- **Ford-Fulkerson**

- Répartition de l'énergie dans le réseau
- Résultat optimal sous contrainte d'entiers naturels

*Complexité :  $O(A*f)$*

*avec  $A$  le nombre d'arête et  $f$  le flot max*

- **Graphe résiduel**

- Prendre en compte que les changements au niveau des sources et puits

*Complexité :  $O(A*f)$*

Bénéfice : le flot du graphe résiduel est égale à baisse générale de production; au pire, le nouveau flot est égale à la somme du différentiel de production et de consommation entre chaque nouveau temps ou rétroaction (un faible pourcentage de la production/consommation totale).

# I. Niveau T&D

Gestion de la distribution de l'énergie dans le réseau T&D.

- **Avantages**

- Routage rapide et optimale
- Possibilité d'utilisation d'arête pondérée
- Calcul des pronostiques en temps réel

- **Inconvénients**

- Pas de prise en compte de préférence de consommateurs ou de producteurs (prétopologie)
- Pas de prise en compte économique
- Pas de prise en compte de la robustesse du réseau (percolation)

## II. Optimalité et confidentialité

- **Optimalité**

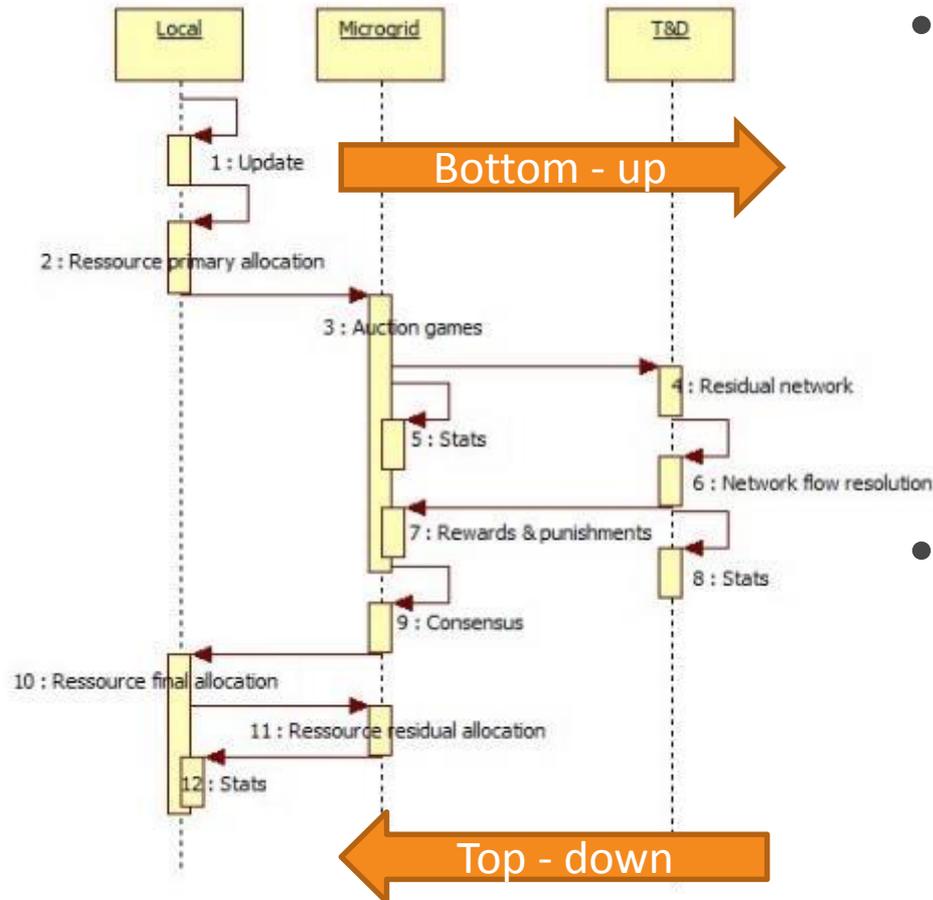
- Utilisation de méthode exacte de résolution
- Recherche d'équilibre locale
- Consensus globale
- Redistribution des ressources bottom-up



- **Confidentialité**

- Pas de données ouvertes d'un niveau à l'autre
- Echange de données normalisées

## II. Schéma séquentiel d'une itération



- **Action bottom-up**

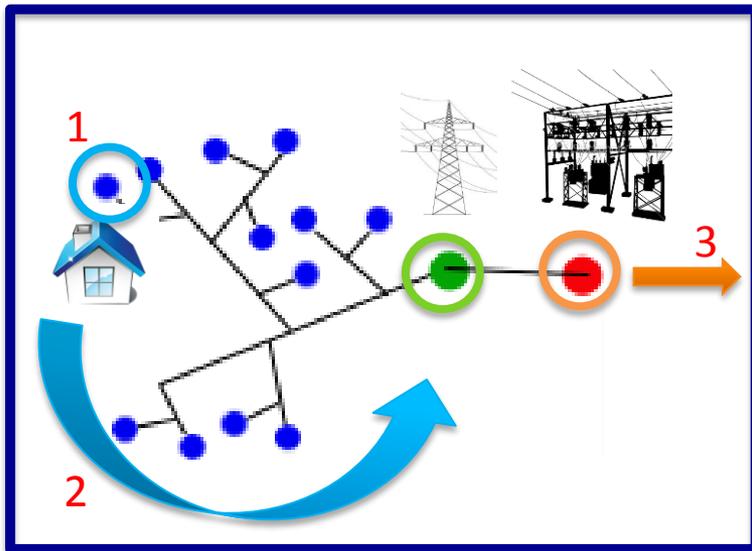
- Mise en place d'une solution initiale
- Si les pronostiques sont justes, la solution finale est déjà obtenue

- **Action top-down**

- Recherche d'une solution finale
- Distribution et calcul des pronostiques

## II. Résolution en aval

1. Pour chaque consommateur :
  - Mise-à-jour (capteurs).
  - Gestion de la domotique (priorité de fonctionnement).



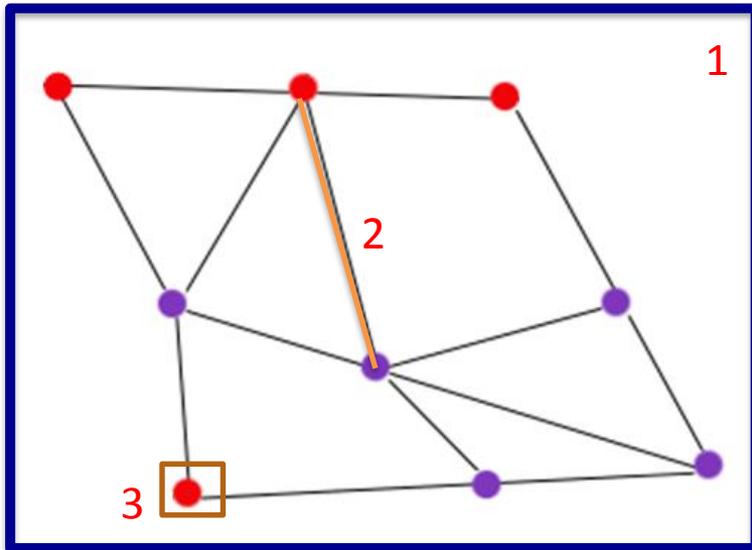
**Jeux d'enchères** : Chaque sous-station reçoit les vecteurs de consommation des consommateurs sous sa responsabilité.

3. Envoie des données de consommation vers le réseau T&D pour la mise-à-jour des données.

**Optimisation globale** : pronostiques, gestion des priorités de fonctionnement.

**Optimisation locale** : sac-à-dos, domotique.

## II. Résolution en amont



1. Mise-à-jour du réseau :

- Production
- Mise en place du graphe résiduel

2. Résolution du graphe résiduel et mise-à-jour du routage partiel. Mise-à-jour du routage et calcul du routage optimal.

3. Détection des goulots d'étranglement (production et consommation) et de la congestion.

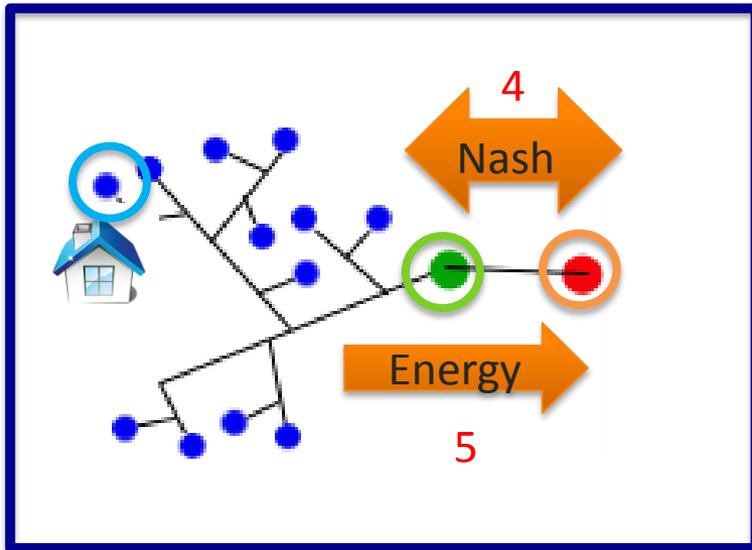
4. **Consensus** : *équilibre de l'offre et de la demande.*

**OU** *Rétroaction pour équilibrage des enchères.*

**Optimisation globale** : consensus, planification.

**Optimisation locale** : pronostiques.

## II. Distribution de l'énergie



**4. Consensus : équilibre de l'offre et de la demande.**

***OU Nouveaux jeux d'enchères après rétroaction.***

**5. La station délivre l'énergie aux consommateurs par résolution des ac-à-dos bottom-up**

**Optimisation globale :** rétroaction top-down et bottom-up, distribution finale.

**Optimisation locale :** résolution par sac-à-dos bottom-up



## Exemple

- I. Ancienne itération
- II. Gestion bottom-up
- III. Gestion top-down

Gestion au niveau local, microgrid et T&D

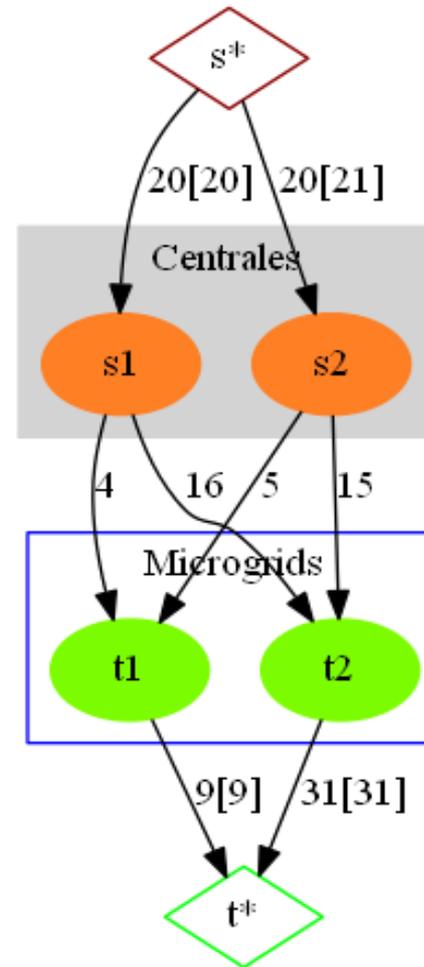
# I. Ancienne itération

- Exemple :

- 2 centrales
- 2 microgrids
- 5 maisons

- Résultats/pronostiques :

- *Maison1* : 4/4
- *Maison2* : 5/7
- *Maison3* : 17/12
- *Maison4* : 4/9
- *Maison5* : 10/6
- *Centrale1* : 20/20
- *Centrale2* : 21/20



# I. Mise à jour des consommations

Nous rajoutons la consommation dans le calcul de la valeur :

$$\text{max\_maison}(\text{poids} \times \text{priorité}) - (\text{poids} \times \text{priorité}) + \text{poids}$$

Maison1	Maison2	Maison3	Maison4	Maison5
1/0/81	1/0/16	1/0	1/0/33	1/0
1/1/80	1/0/16	1/0	1/1/32	3/0
3/0/83	2/1/15	10/0	3/0/35	
5/2/75	3/0/18		3/2/29	Prévision: 6
20/4/20	4/3/7	Prévision: 12	4/1/32	Conso < Prévision
	5/3/5	Prévision juste	8/4/8	Conso_moy: 4
Prévision: 4		Conso_moy: 12		
Conso_moy: 5	Prévision: 6		Prévision: 8	
	Conso_moy: 7		Conso_moy: 9	
Impossible : KP				
Conso_moy: 4	Impossible : KP		Impossible : KP	
	Conso_moy: 5		Conso_moy: 8	

Poids/Priorité/Valeur, le résultat du KP est en rouge.

## II. Enchères

3sigma = 10% de la conso\_moy

- Microgrid1

- *Maison1* :  $\mathcal{N}(4; 0,4/3)$ ,  
enchère de 3,6.  
**Conso\_min=4** donc  
enchère de 4.
- *Maison2* :  $\mathcal{N}(5; 0,5/3)$ ,  
enchère de 7.
  
- *Total* : 11, *Prévision* : 10,  
*Reçu i-1*: 9.

- Microgrid2

- *Maison3* :  $\mathcal{N}(12; 1,2/3)$ ,  
enchère de 13.
- *Maison4* :  $\mathcal{N}(8; 0,8/3)$ ,  
enchère de 7,5.
- *Maison5* :  $\mathcal{N}(4; 0,4/3)$ ,  
enchère de 4,5.
  
- *Total* : 25, *Prévision* : 26,  
*Reçu i-1* : 31.

## II. Mise-à-jour du routage

### 1. Mise-à-jour du réseau :

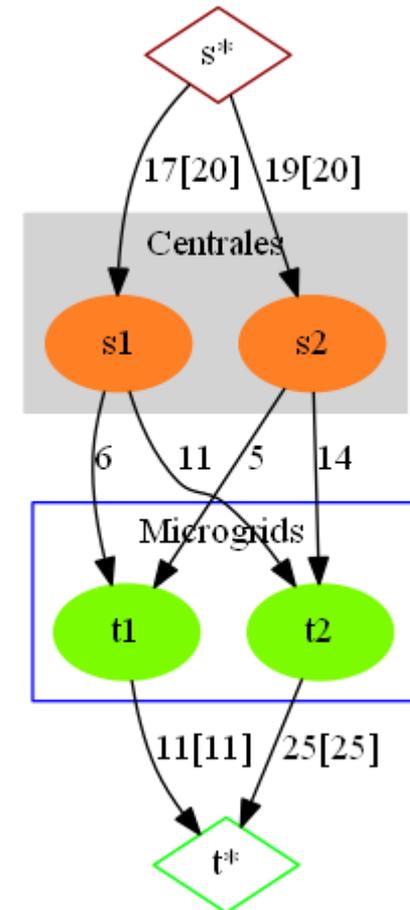
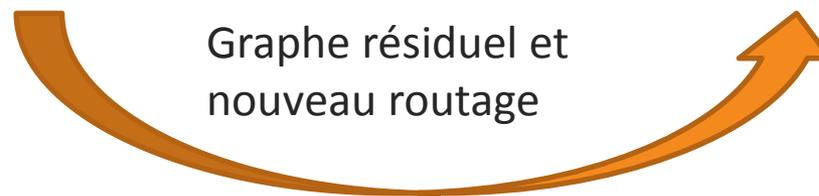
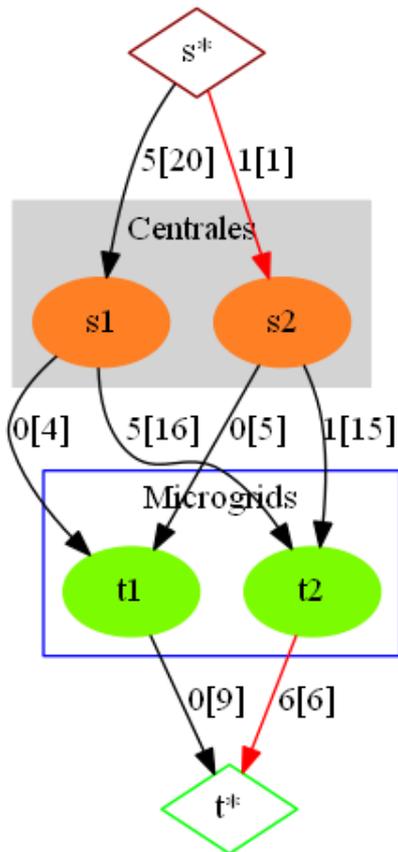
- Production
- Mise en place du graphe résiduel

### 2. Mise-à-jour du routage.

- 3. Flot max par Ford-Fulkerson.

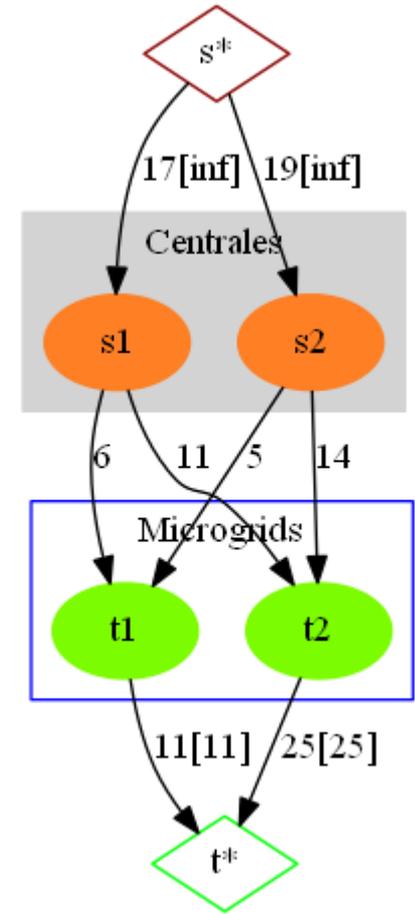
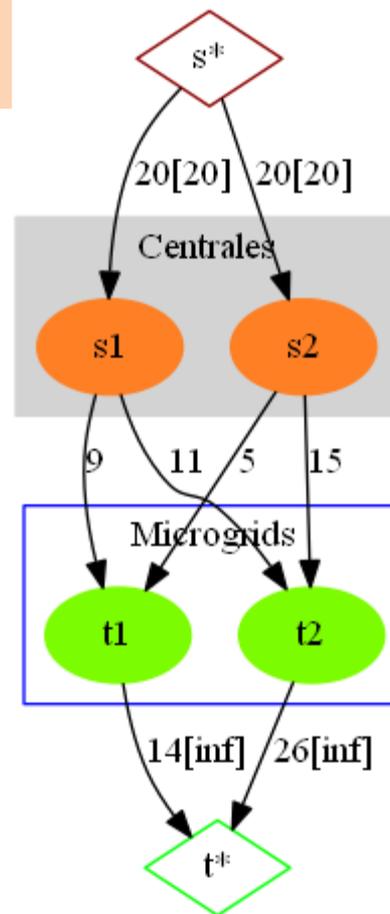
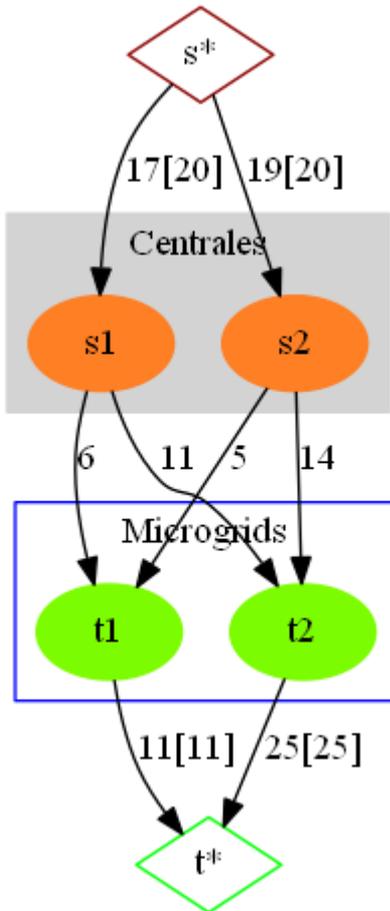
## Mise-à-jour

- *Centrale2* : production de **21** à **20**
- *Microgrid2* : consommation de **31** à **25**



## II. Nouveau routage et rétroaction

### 3. Détection des goulots d'étranglement (production et consommation) et de la congestion



1. Nous récompensons les deux Microgrids.
2. Surproduction sur les deux centrales.

# III. Enchères finales

- Microgrid1

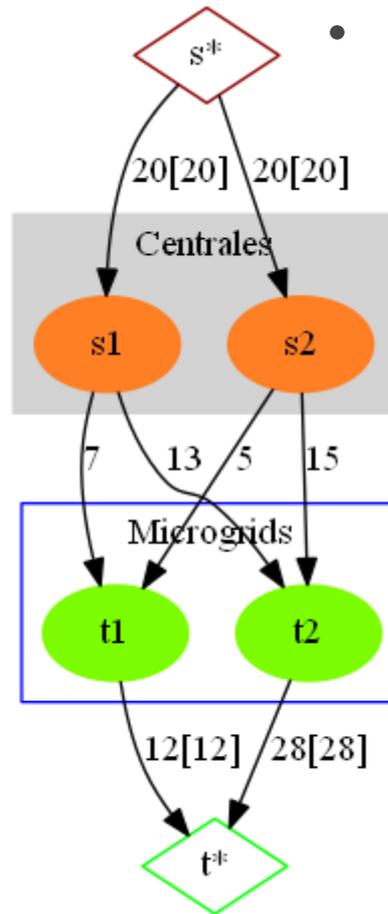
- *Maison1* : enchère de 4.
- *Maison2* : enchère de 8.

– *Total: 12, Prévission: 10, Reçu i-1: 9.*

- Microgrid2

- *Maison3* : enchère de 13.
- *Maison4* : enchère de 11.
- *Maison5* : enchère de 4.

– *Total: 28, Prévission:26, Reçu i-1: 31.*



### III. Consommation finale

Nous rajoutons la consommation dans le calcul de la valeur :

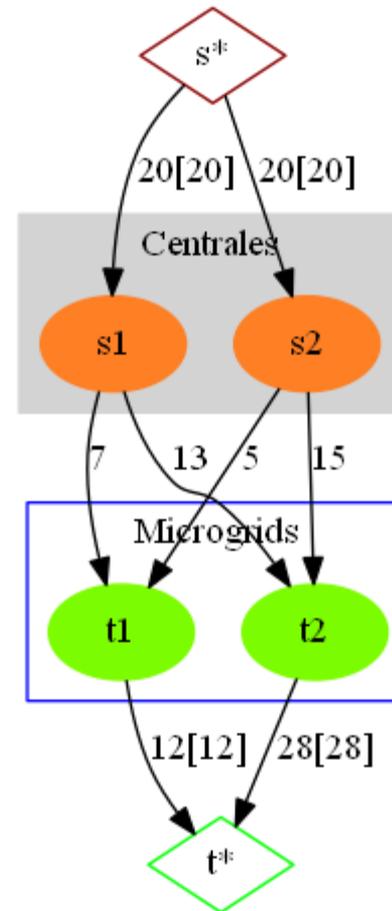
$$\text{max\_maison}(\text{poids} * \text{priorité}) - (\text{poids} * \text{priorité}) + \text{poids}$$

Maison1	Maison2	Maison3	Maison4	Maison5
1/0/81	1/0/16	1/0	1/0/33	1/0
1/1/80	1/0/16	1/0	1/1/32	3/0
3/0/83	2/1/15	10/0	3/0/35	
5/2/75	3/0/18		3/2/29	
20/4/20	4/3/7		4/1/32	
	5/3/5		8/4/8	
Reçu: 4	Reçu: 8	Reçu: 13	Reçu: 11	Reçu: 4
Consommé: 4	Consommé: 7	Consommé: 12	Consommé: 9	Consommé: 4
Reste: 0	Reste: 1	Reste: 1	Reste: 2	Reste: 0
<hr/> Microgrid1 reste : 1 Consommé : 1 Reste : 0			<hr/> Microgrid2 reste : 3 Consommé : 3 Reste : 0	

Poids/Priorité/Valeur, le résultat du KP local est en rouge, et du KP microgrid en vert.

# I. Résultat itération

- Exemple :
  - 2 centrales
  - 2 microgrids
  - 5 maisons
- Résultats/pronostiques :
  - Maison1 : 4/4+
  - Maison2 : 7/7+
  - Maison3 : 12/12-
  - Maison4 : 12/12
  - Maison5 : 4/4+
  - Centrale1 : 20/20+
  - Centrale 2 : 20/20+



# Conclusion

## Etat actuel :

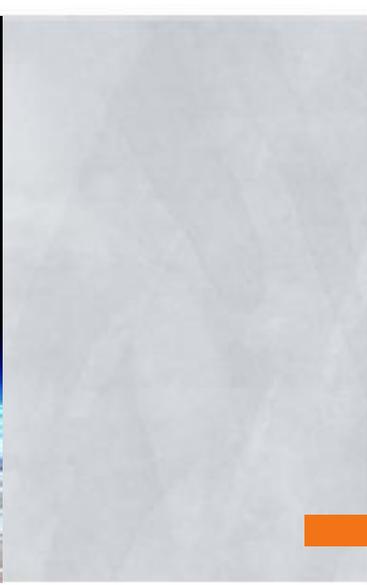
- Etat de l'art sur le concept de Smart Grid(industriel, scientifique, commercial).
- Définition des théories appropriées à la résolution des problèmes relatant de la modélisation d'un Smart Grid.
- Définition des modules et des algorithmes à implémenter.

## Travaux futurs :

- 1.Calibrer les algorithmes de résolution (normalisation).
- 2.Module de contrôle de la résilience et de l'efficacité.
- 3.Implémentation de la notion de voisinage par prétopologie.
- 4.Implémentation des réseaux de jeux.

## Publications :

- ROADEF 2012**, '*Approche système complexe pour la modélisation des Smart Grids*', G. Guérard, S.BenAmor, A. Bui, pp.263-264.
- Int. J. Systems, Control and Communications**, Vol. 4, No. 4 (2012), '*Survey on smart gridmodelling*', G. Guérard, S.BenAmor, A. Bui, pp.262–279.
- KES 2012**, '*A ComplexSystem Approachfor Smart GridAnalysisand Modeling*', G. Guérard, S. Ben Amor, A. Bui, pp.788-797.
- American Journal of Operations Research**, Vol. 3, No. 1A, (2013), '*Smart Gridand Optimization*', M. Ahat, S. Ben Amor, M. Bui, A. Bui, G. Guérard, C. Petermann, pp. 196-206.
- ROADEF 2013**, '*Méthode d'Analyse d'un Système Complexe pour la Recherche Opérationnelle : Smart Grid*', S. Ben Amor, A. Bui, G. Guérard



# Smart Grid

