



Guillaume Guérard

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

Décembre 2012

# Problématique

---

## **Sujet de thèse :**

Optimisation dans les systèmes complexes.

## **Problématique :**

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)
- Recherche de consensus dans une économie de marché.

# 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'algorithmes d'optimisation doivent être accordés pour l'efficacité

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



# Méthodologie

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

Etude et analyse des Systèmes complexes : cas du Smart Grid

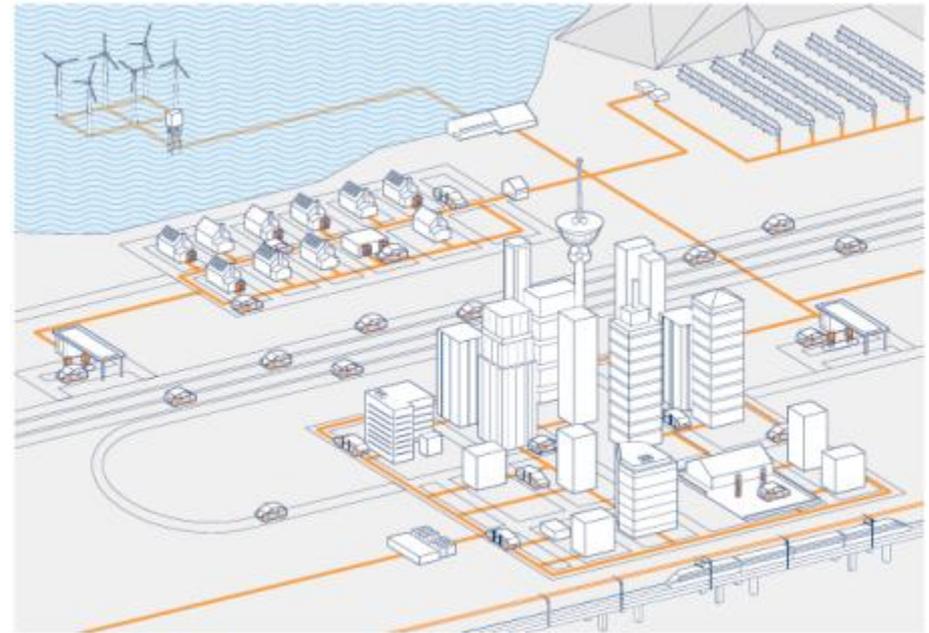
# I. Objectifs industriels

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

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

## 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.

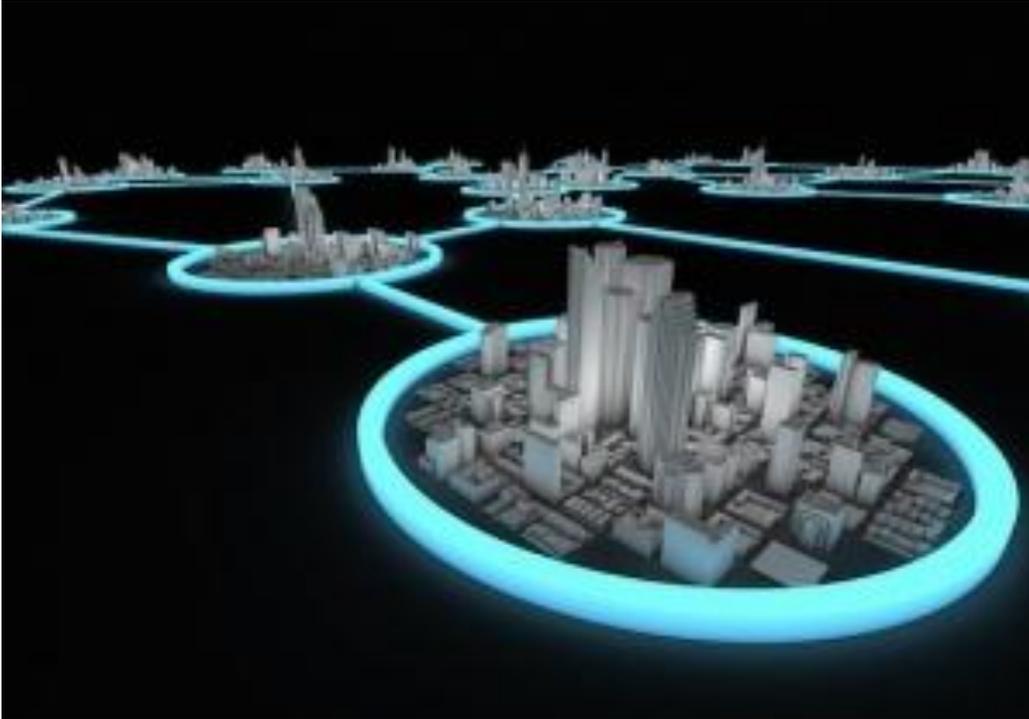


## Nouveaux rôles et objectifs :

- **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

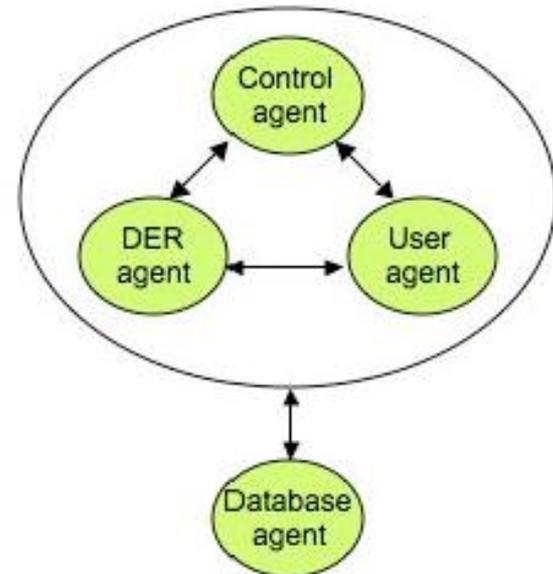
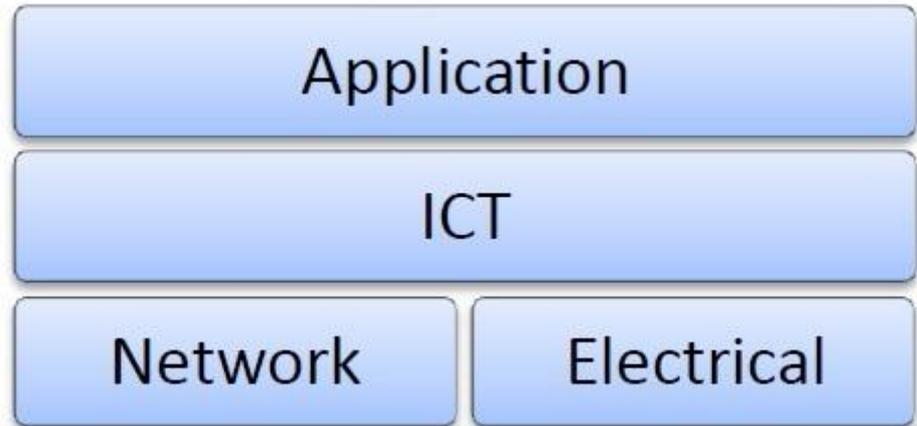
Les simulations actuelles (SMA) sont faites sur des **cas précis et spécifiques**, avec une **évolution limitée**.

## Modèle général :

- Trois niveaux
- Quatre types d'agent

## Inconvénients des simulations :

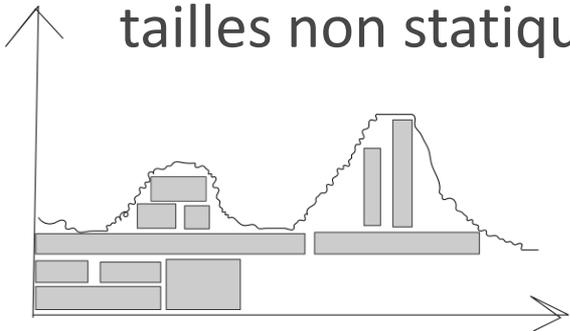
- Temps de calcul exponentiel
- Stockage de toutes les données
- Simulation spécialisée à l'étude d'un unique modèle.



## II. Problème généralisée

- Problème de **sac-à-dos multidimensionnel** sous contraintes :

- *Temporelle* : temps discret, voisinage
- *Spatiales* : granularité, hiérarchie du graphe
- *Physiques* : routage, tailles non statiques



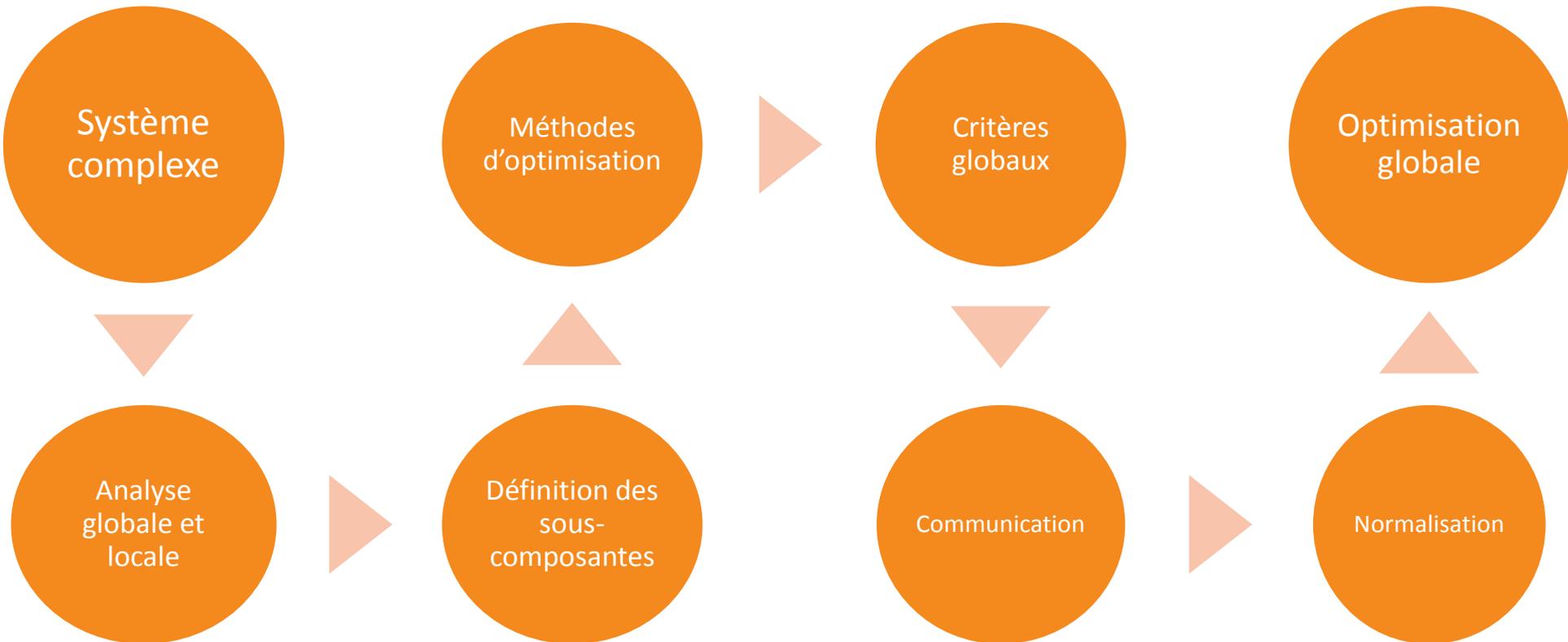
– Pour tout instant  $T$

– Echelle globale:

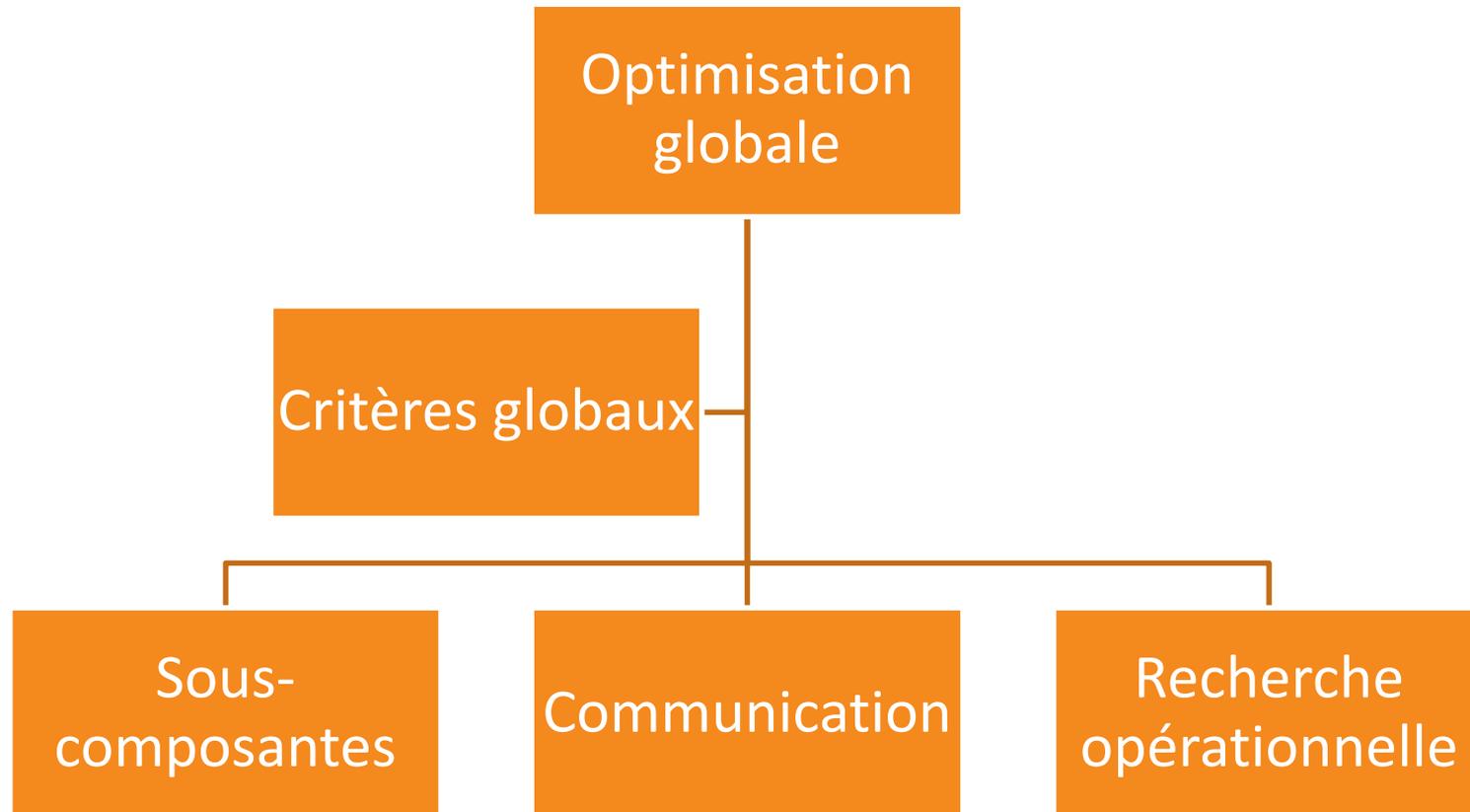
$$\sum_{i=1}^n \frac{x_i w_i}{t_i} < W$$

- $x_i=1$  si la **demande en énergie** est satisfaite à l'instant  $T$ , 0 sinon.
- $w_i$  l'**énergie demandée** en  $T$
- $t_i$  la **durée** de fonctionnement totale
- $W$  : **production globale** à l'instant  $T$

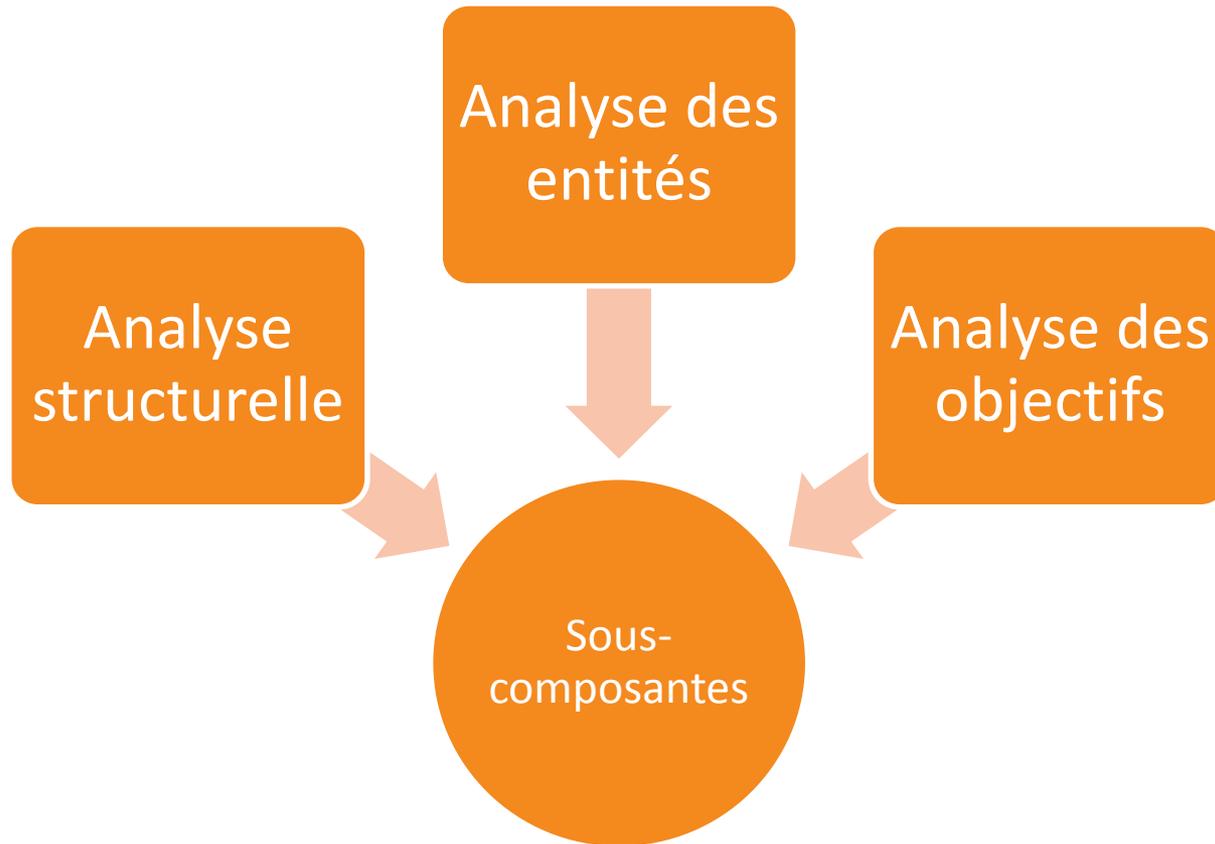
## II. Analyse des Systèmes complexes



## II. Interaction des sous-composantes



## II. Définition des sous-composantes



# III. Analyse structurelle

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

Maillage « n-1 » dans la littérature : le retrait d'une arête n'altère pas la connexité du graphe

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

## Réseau de transmission :

Passage de la haute tension à la moyenne tension  
Industries & EnR

-> **Structure linéaire**

## Réseau de distribution :

Distribution finale aux PME/PMI et particuliers

-> **Réseau scale free**

# III. Analyse des entités

## Les producteurs :

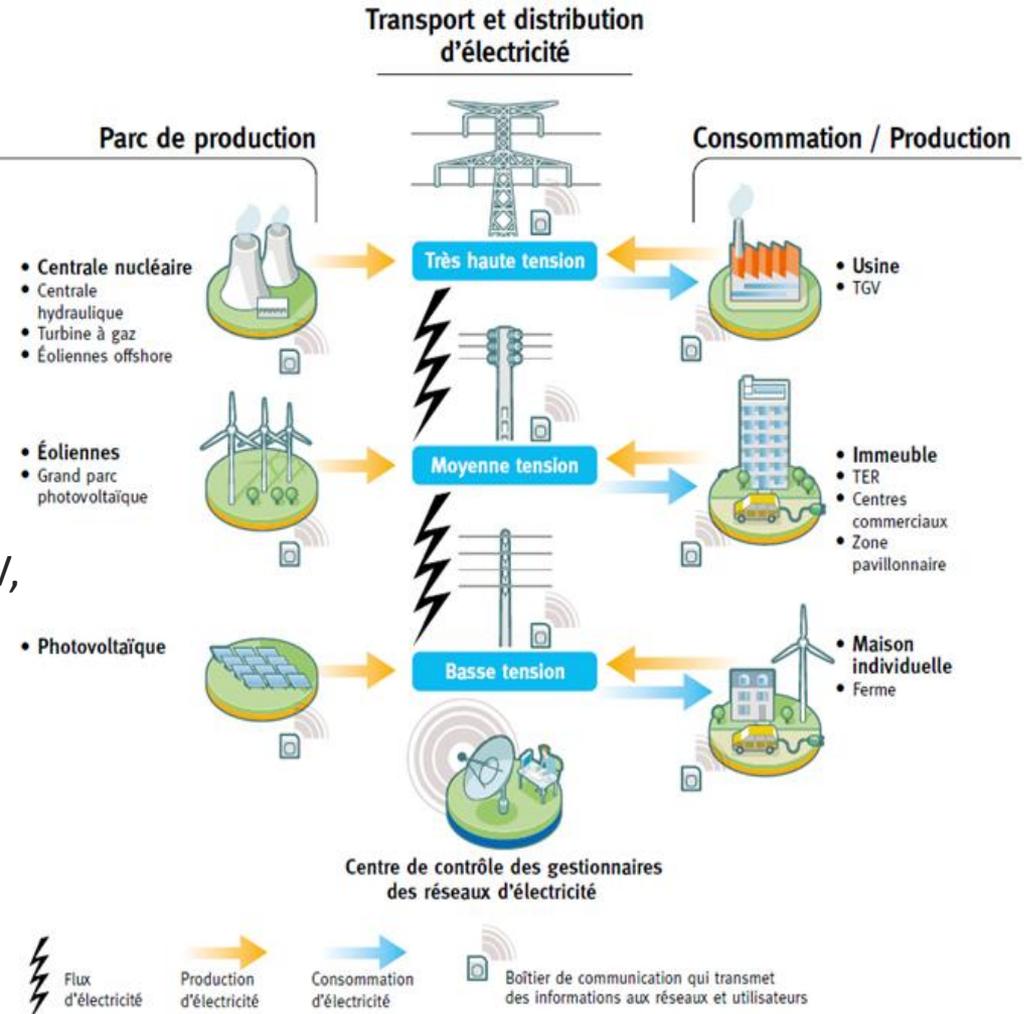
- Centrales à production constante
- Centrales à production variable
- Parc d'EnR et EnR locales

## Les consommateurs :

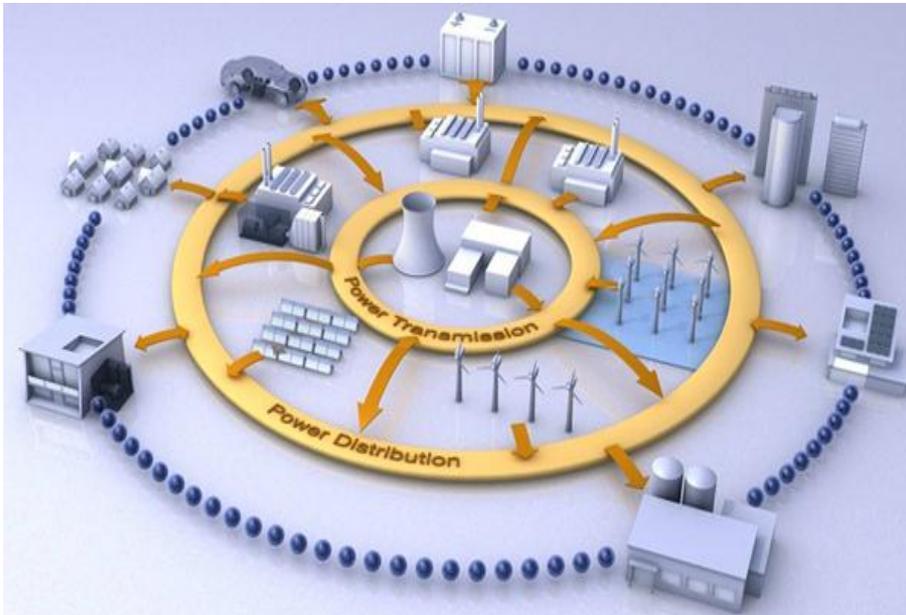
- Appareil locaux (domotique, PME/PMI)
- Grand consommateur (usine, TGV, immeuble)

## Distribution et transport :

- Stations et sous-stations
- Contrôle du réseau
- Système de distribution (graphe pondéré)



### 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 connexe isolé
- Gestion de la consommation localisée
  - Domotique
  - Usine
  - EnR locale
  - V2G
- Répartition de l'énergie localisée



## Niveau Microgrid

- Structure en arbre (voir à invariance d'échelle).
- Correspondance entre les consommateurs et les distributeurs
- Equilibrage de l'offre et de la demande



## Niveau T&D

- Structure maillée
- Gestion de la production globale
  - Centrale continue
  - Centrale variable
  - Parc EnR
- 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

## Entités

- Appareils
- EnR locales
- Smart meter

## Structure

- Ilot connexe
- Groupe isolé

## Objectifs

- Réguler la consommation
- Prévoir la consommation

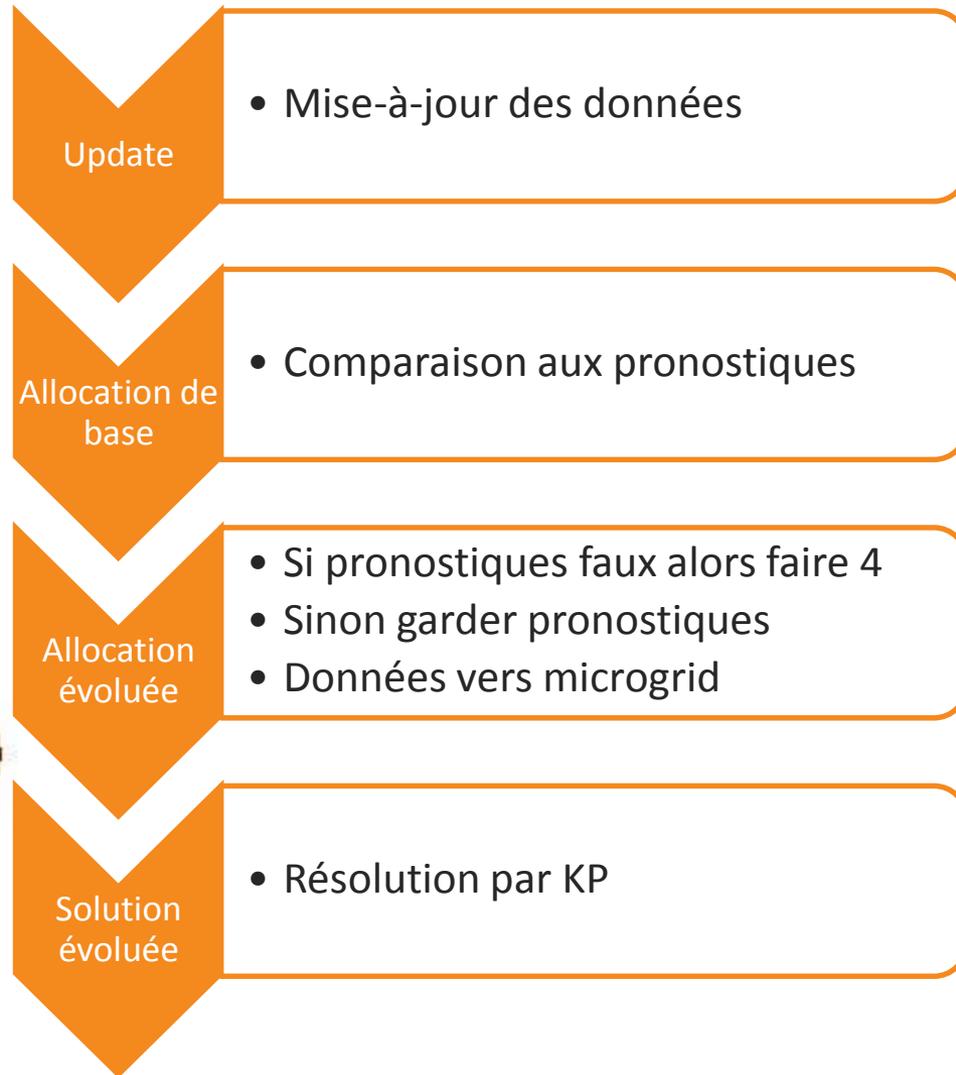
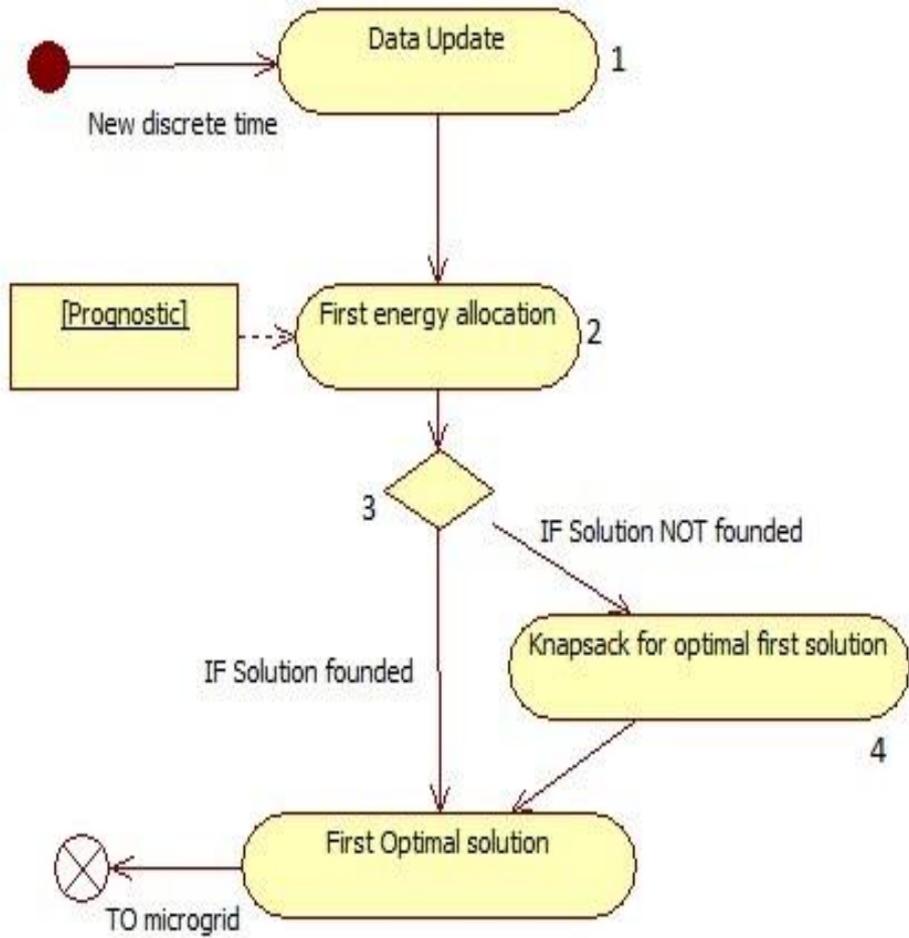
## Recherche Opérationnelle

- Knapsack problem

## Données complémentaires

- Gestion de priorité
- Normalisation

# I. Niveau local



# I. Niveau microgrid

## Entités

- Sous-stations et stations
- Connaissance en aval et en amont

## Structure

- Arbre
- Groupe isolé ou scale-free

## Objectifs

- Satisfaire l'offre et la demande
- Réguler la consommation

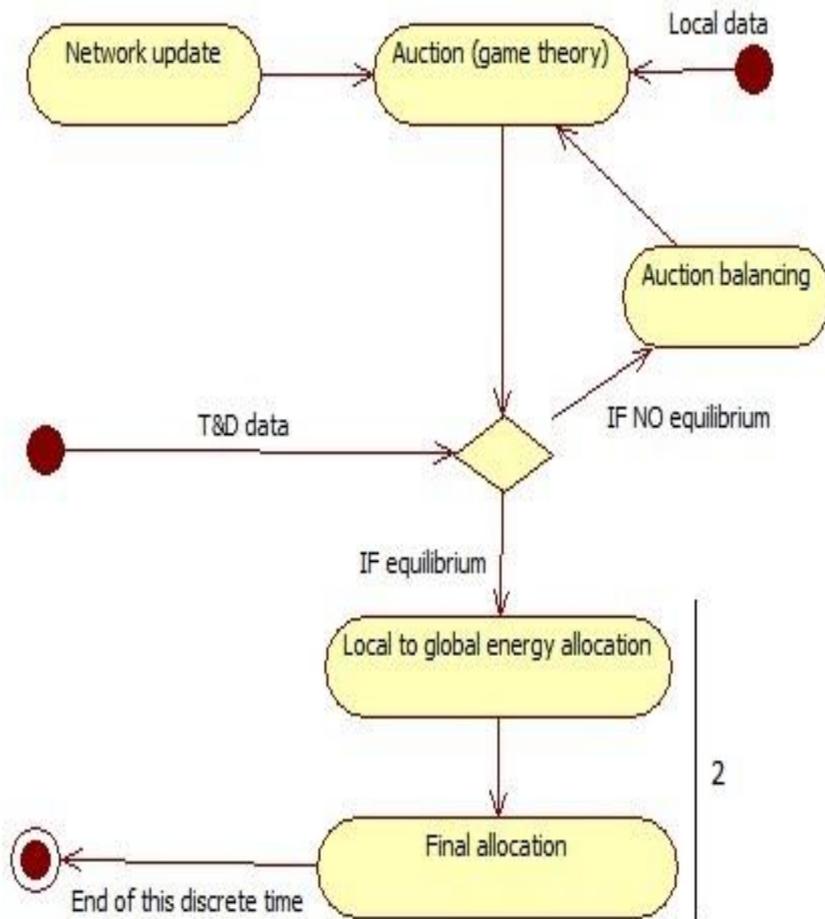
## Recherche Opérationnelle

- Théorie des jeux
- Enchères ou coopération

## Données complémentaires

- Gestion de priorité
- Connaissance en aval et en amont

# I. Niveau T&D



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 T&D

## Entités

- Centrales et parcs EnR
- Connaissance en aval

## Structure

- Réseau 2-connexe
- Groupe uni

## Objectifs

- Gérer la distribution de l'énergie
- Réguler la production

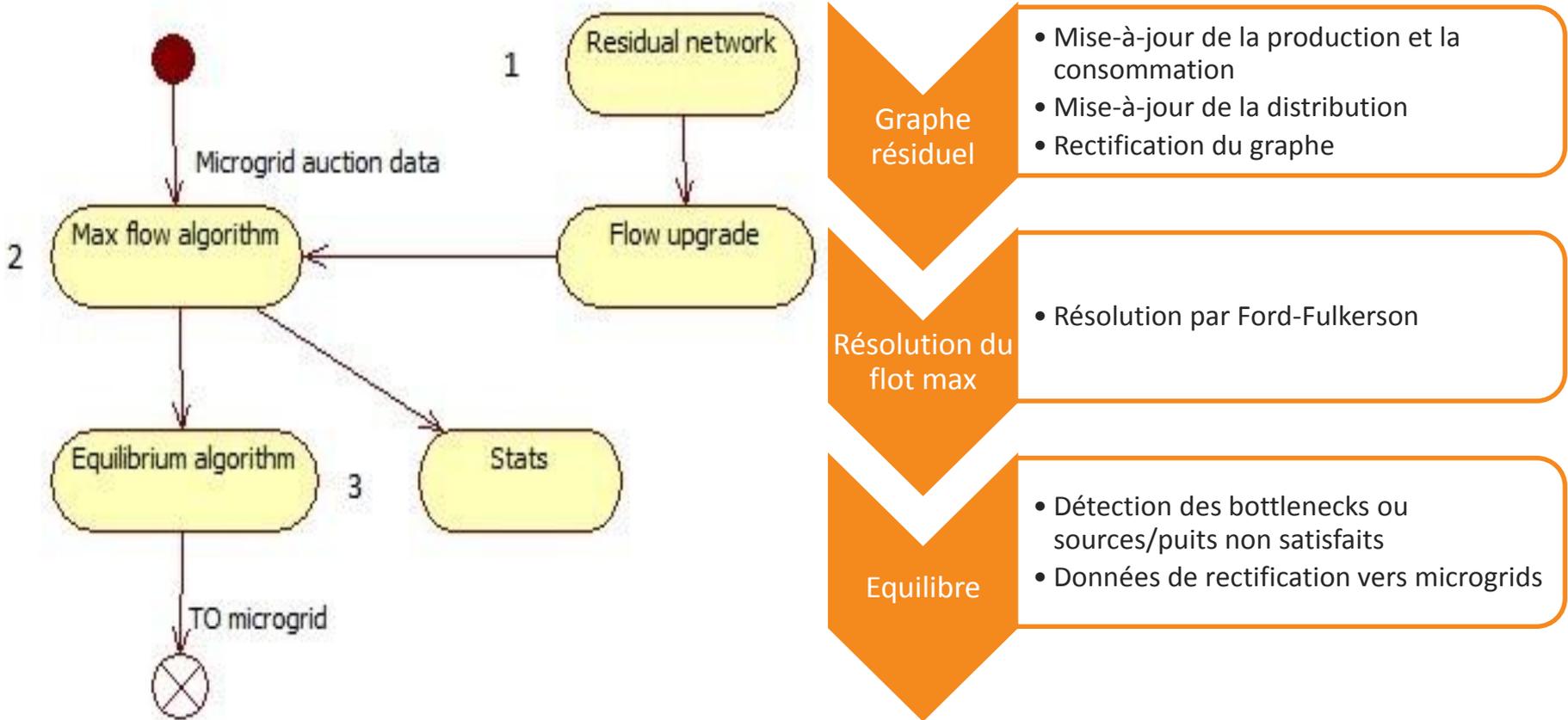
## Recherche Opérationnelle

- Problème de flot maximum

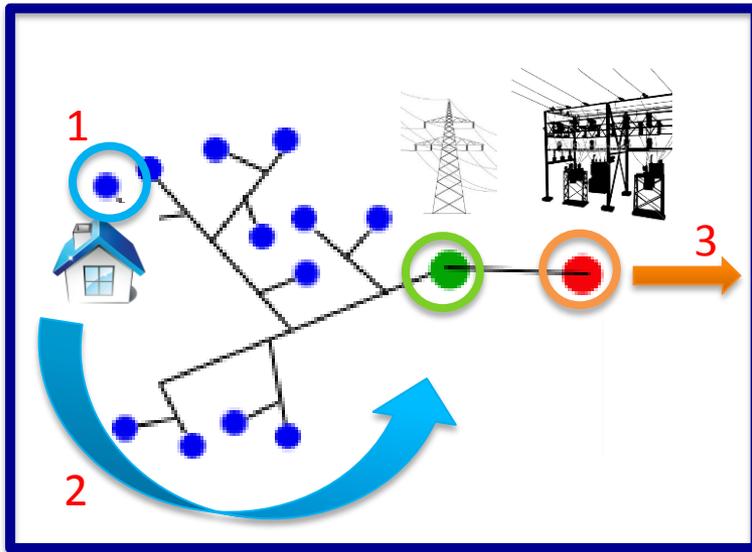
## Données complémentaires

- Gestion de la production
- Connaissance en aval

# I. Niveau T&D



## II. Résolution en aval



1. Chaque consommateur:
  - Regarde sa consommation (capteur)
  - Met-à-jour sa priorité en fonction de sa consommation prédite.
2. Chaque sous-station reçoit les vecteurs de consommation des agents sous sa responsabilité. **Jeux d'enchères** entre les consommateurs et leurs niveaux d'énergie résultant du sac à dos.
3. La station teste la distribution de l'énergie totale demandée par la sous-station (contrôle du réseau).

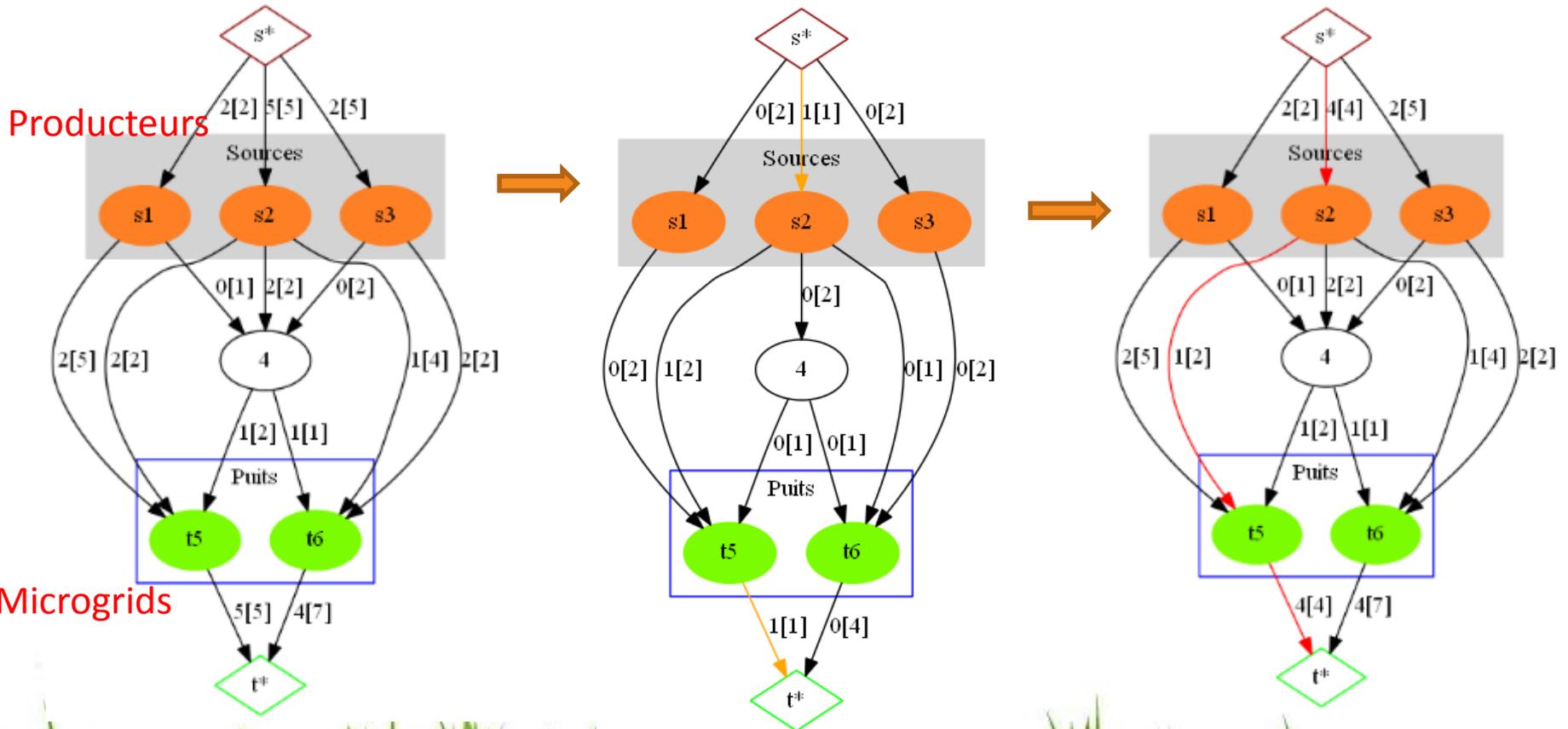
# II. Résolution en amont

## 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.

Routage par Ford-Fulkerson

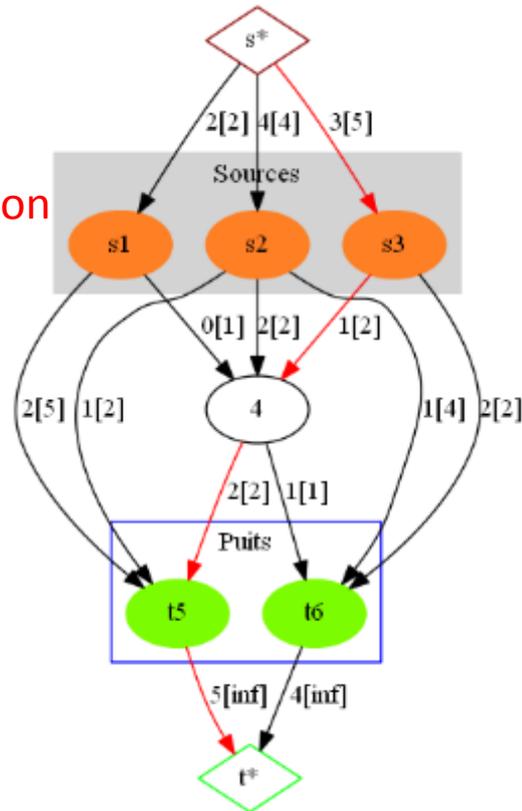


## II. Résolution en amont

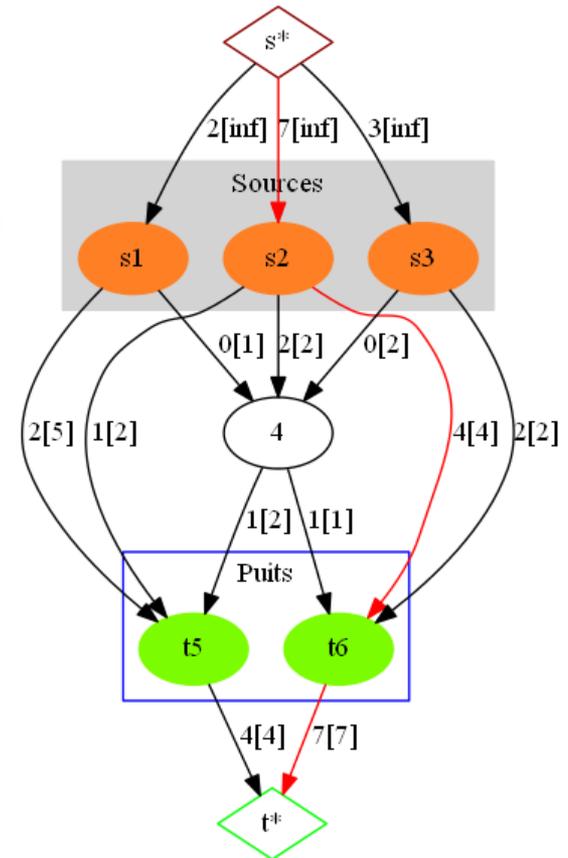
3. Détection des goulots d'étranglement (production et consommation) et de la congestion

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

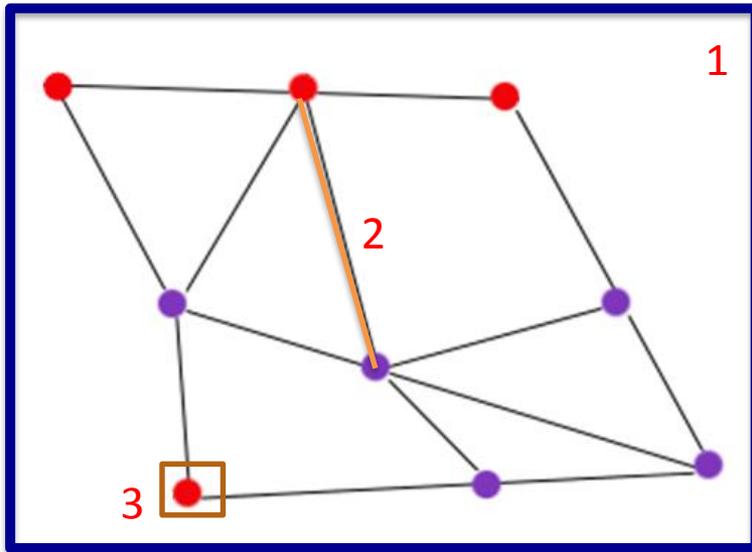
Sur/Sous-  
consommation



Sur/Sous-  
production

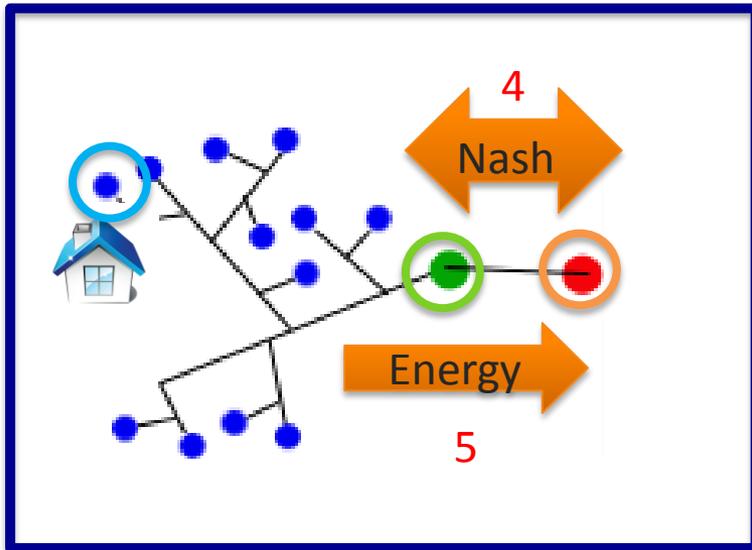


## II. Résolution en amont



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  
Routage par Ford-Fulkerson
3. Détection des goulots d'étranglement (production et consommation) et de la congestion
4. **Consensus:** équilibre de l'offre et de la demande.

## II. Distribution de l'énergie



1. Chaque consommateur:
  - Regarde sa consommation (capteur)
  - Met-à-jour sa priorité en fonction de sa consommation prédite.
2. Chaque sous-station reçoit les vecteurs de consommation des agents sous sa responsabilité. **Jeux d'enchères** entre les consommateurs et leurs niveaux d'énergie résultant du sac à dos.
3. La station teste la distribution de l'énergie totale demandée par la sous-station (contrôle du réseau).
4. **Consensus:** Nash equilibrium.
5. La station délivre l'énergie aux consommateurs par résolution de sac-à-dos en bottom-up



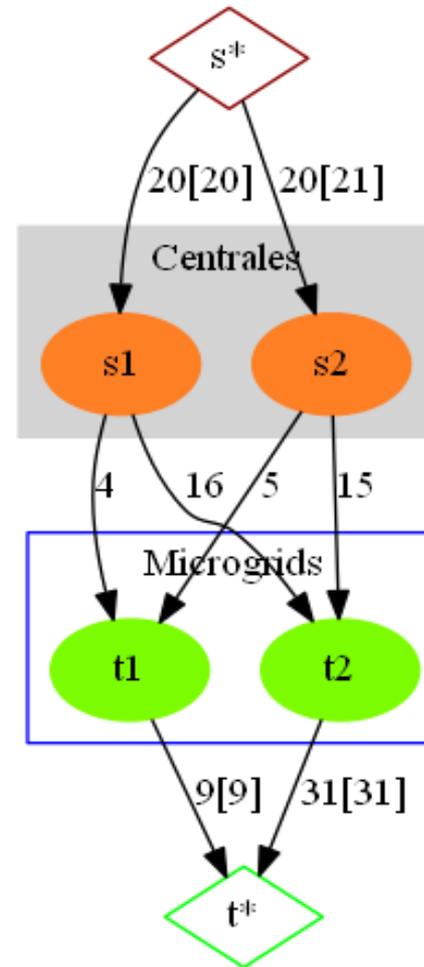
## Exemple

- 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
  - Centrale 2 : 21/20



# I. Mise à jour des consommations

Nous rajoutons la consommation dans le calcul de la valeur :

$$\max_{\text{maison}}(\text{poids} \times \text{priorité}) - (\text{poids} \times \text{priorité}) + \text{poids}$$

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 donc				
Calcul par KP	Impossible donc		Impossible don	
Conso_moy: 4	Calcul par KP		Calcul par KP	
	Conso_moy: 5		Conso_moy: 8	

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

## II. Enchères

$3\sigma = 10\%$  de la conso\_moy

- Microgrid1

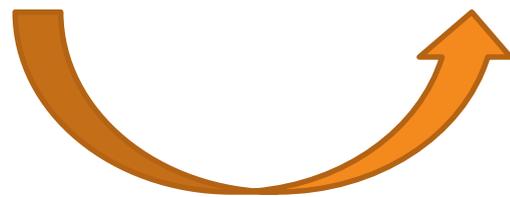
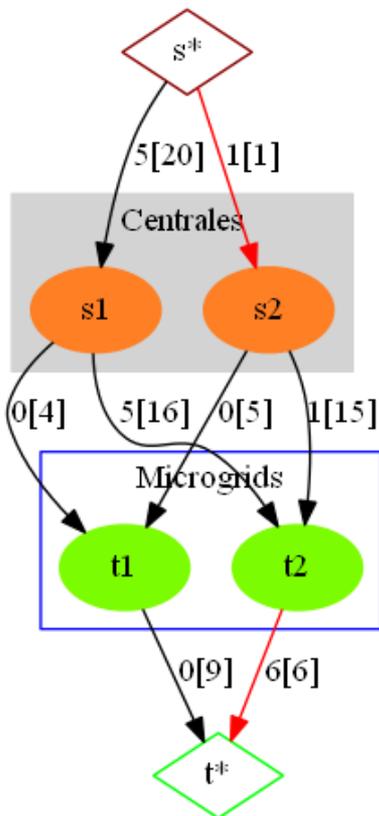
- Maison1 :  $N(4; 0,4/3)$ ,  
enchère de 3,6.  
Conso\_min=4 donc  
enchère de 4.
- Maison2 :  $N(5; 0,5/3)$ ,  
enchère de 7.
- Total: 11, Prévision: 10,  
Reçu i-1: 9.

- Microgrid2

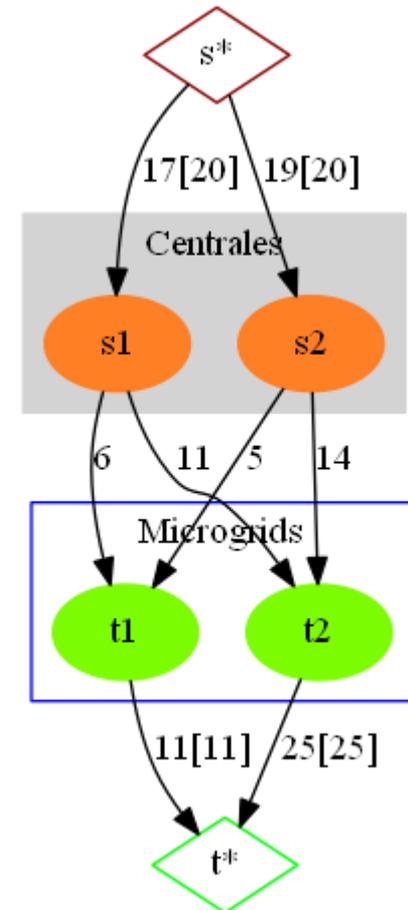
- Maison3 :  $N(12; 1,2/3)$ ,  
enchère de 13.
- Maison4 :  $N(8; 0,8/3)$ ,  
enchère de 7,5.
- Maison5 :  $N(4; 0,4/3)$ ,  
enchère de 4,5.
- Total: 25, Prévision:26,  
Reçu i-1: 31.

## II. Mise-à-jour du routage

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

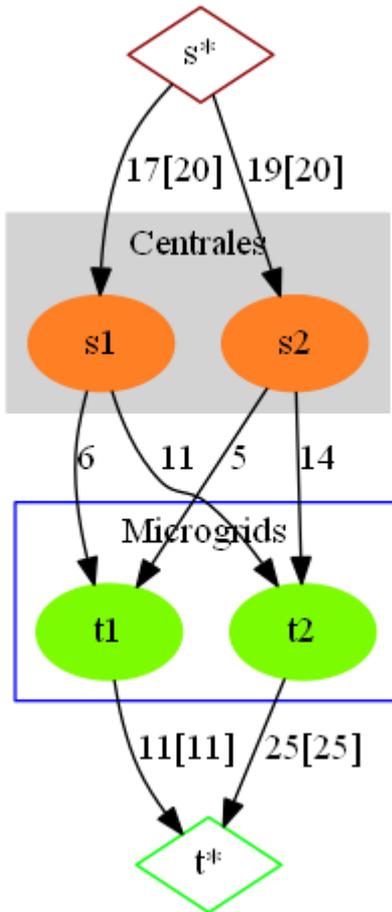


Mise-à-jour du routage  
à l'iteration  $i-1$

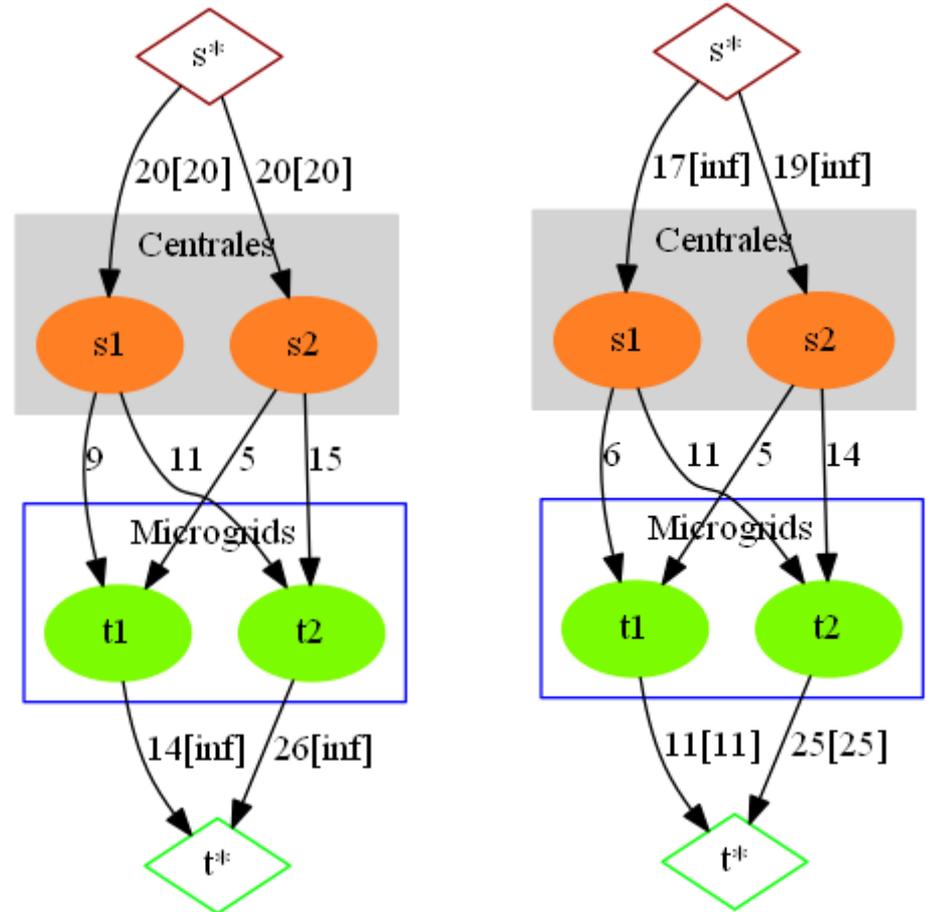


# II. Nouveau routage et rétroaction

Résolution par Ford-fulkerson



Rétroaction

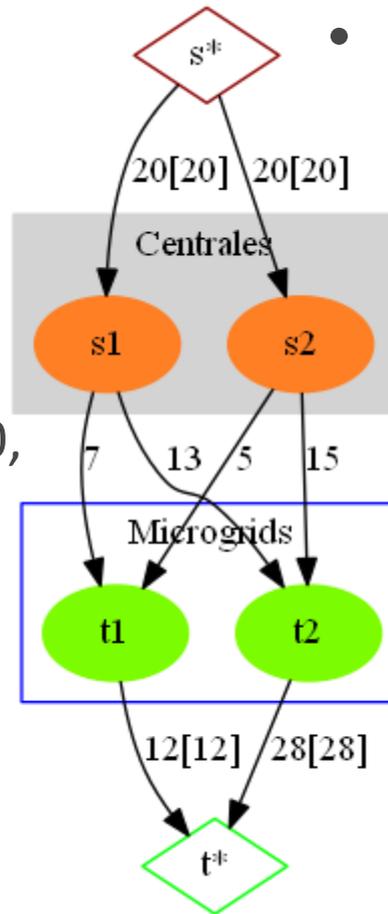


1. Nous pouvons récompenser les deux Microgrids
2. Légère sur-production détectée

# III. Enchères finales

- Microgrid1

- Maison1 : enchère de 4.
- Maison2 : enchère de 8.
- Total: 12, Prévision: 10, Reçu i-1: 9.



- Microgrid2

- Maison3 : enchère de 13.
- Maison4 : enchère de 11.
- Maison5 : enchère de 4.
- Total: 28, Prévision:26, Reçu i-1: 31.

### III. Consommation finale

Nous rajoutons la consommation dans le calcul de la valeur :

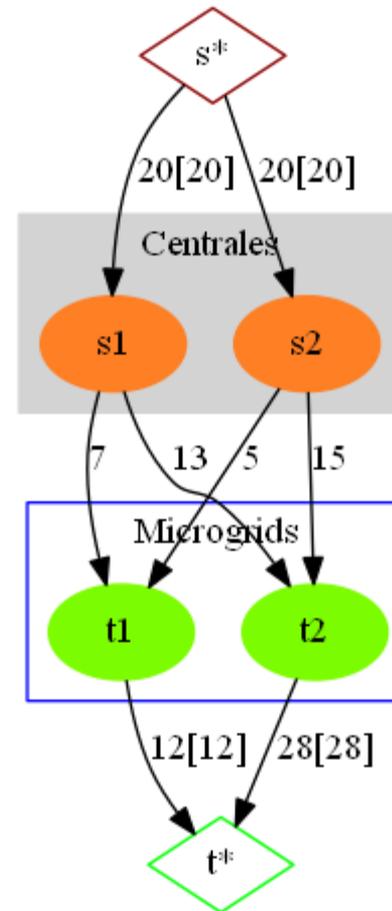
$$\text{max\_maison}(\text{poids} * \text{priorité}) - (\text{poids} * \text{priorité}) + \text{poids}$$

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
Microgrid1 reste: 1		Microgrid2 reste: 3		

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 :

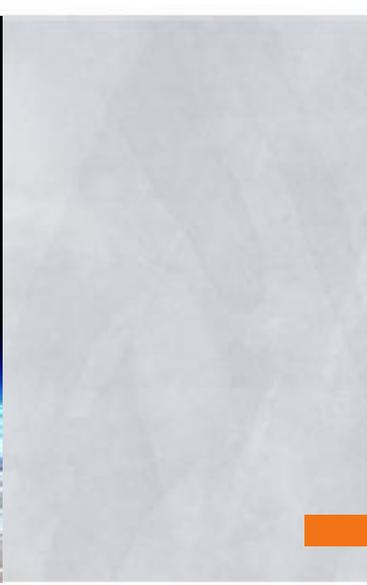
- Etat de l'art sur le concept de Smart Grid (industriel, scientifique, commercial)
- Définition des théories appropriées à la résolution des problèmes relatant de la modélisation d'un Smart Grid
- Définition des modules et des algorithmes à implémenter.

## Travaux futurs :

1. Calibrer les algorithmes de résolution
2. Module de contrôle de la résilience et de l'efficacité
3. Implémentation de la notion de voisinage par prétopologie.

## Publications :

- ROADEF 2012, Approche système complexe pour la modélisation des Smart Grids, G. Guérard, S.Ben Amor, A. Bui, p263-264.
- KES 2012, A Complex System Approach for Smart Grid Analysis and Modeling, G. Guérard, S.Ben Amor, A. Bui, p788-797.
- Int. J. Systems, Control and Communications, Survey on Smart Grid Modelling. Guérard, G., Amor, S.B. and Bui, A. (2012), Vol. 4, No. 4, pp.262–279.



# Smart Grid

