

# Optimisation & systèmes électriques

olivier.teytaud@inria.fr

**But: l'optimisation de grands systèmes électriques.**

**Avec des partenaires industriels au niveau données et modèles.**

**Notre expertise est au niveau des composants numériques.**



# Optimisation & systèmes électriques

olivier.teytaud@inria.fr

- I. La question la plus importante de l'univers**
- II. Exemples à suivre ou ne pas suivre**
- III. Le problème: ce qu'on ne sait pas**
- IV. Alors, comment on fait ?**

# L'énergie c'est bien!

Les 30 glorieuses

- Plein emploi
- Croissance
- Baby boom

s'arrêtent au choc pétrolier.

Corrélations éco/énergie.

# La pollution c'est compliqué: les chiffres de *nextbigfuture*

Energy Source	Death Rate (deaths per TWh) OLD
Coal - world average	161 (26% of world energy, 50% of electricity)
Coal - China	278
Coal - USA	15
Oil	36 (36% of world energy)
Natural Gas	4 (21% of world energy)
Biofuel/Biomass	12
Peat	12
Solar (rooftop)	0.44 (less than 0.1% of world energy)
Wind	0.15 (less than 1% of world energy)
Hydro	0.10 (europe death rate, 2.2% of world energy)
Hydro - world including Banqiao)	1.4 (about 2500 TWh/yr and 171,000 Banqiao dead)
Nuclear	0.04 (5.9% of world energy)

**Le charbon  
plus radioactif que  
le nucléaire ?**

Ces chiffres sont là pour être contestés.  
Et le nombre de morts n'est pas forcément le seul critère.

# Coûts: à vous de voir

- Coûts économiques
- Coûts écologiques
  - Air
  - CO2 (et assimilés)
  - Eau
  - Stockage déchets
  - ...
- Toute autre “externalité”
  - Mortalité de maintenance
  - Défaillance

# L'énergie c'est cher!

Desertec = centaines de milliards d'euros pour mettre des renouvelables en Afrique.

Medgrid = réseaux pour transporter cette électricité.

Ca vaut la peine de bien réfléchir à ce qu'on fait.

# L'énergie ça pollue

Changement climatique: oui c'est important...  
mais on ne fait rien. (changera ?)

Pollution de l'air: tue plus que sida + paludisme ?

Le charbon = pas cher + encore abondant.

Nucléaire: Tchernobyl + Fukushima

# L'électricité c'est compliqué

Trop de production ==> on casse tout.

Pas assez de production ==> on casse tout.

==> équilibre instantané.

==> mais certaines énergies sont intermittentes  
(éoliennes) ou lentes (certains nucléaires).

Comparer centrales seulement du point de vue du  
prix au MWh = dire n'importe quoi.

# Payer des gens à ne rien faire ?

Équilibre prod./demande + éolien intermittent

=

besoin de centrales pour moments sans vent.

Au prix de marché, ces centrales sont déficitaires.

==> Marché de capacité ?

==> Payer les centrales même si elles ne travaillent pas ==> modèle économique complexe dans contexte dérégulé

# L'énergie c'est collectif

L'énergie implique des partages (d'heures de pointe, d'heures creuses, de réserves...), entre pays par exemple.

Tout le monde jouera-t-il le jeu ?

Maximiser le surplus social; faire confiance au législateur pour inciter dans le bon sens.

# Optimisation & énergie

I. La question la plus importante de l'univers

**II. Exemples à suivre ou ne pas suivre**

III. Le problème: ce qu'on ne sait pas

IV. Alors, comment on fait ?

# Danemark

Eoliennes offshore.

33% de la conso. danoise

Besoin de

- connections, pour “éponger” la variabilité
- ou de centrales thermiques pour compléter.  
==> parfois prix négatifs !



==> 8.4 t CO2 per person (France 6.1, Usa 17.2)

Stockage: ajouter des véhicules électriques ?

# Chine

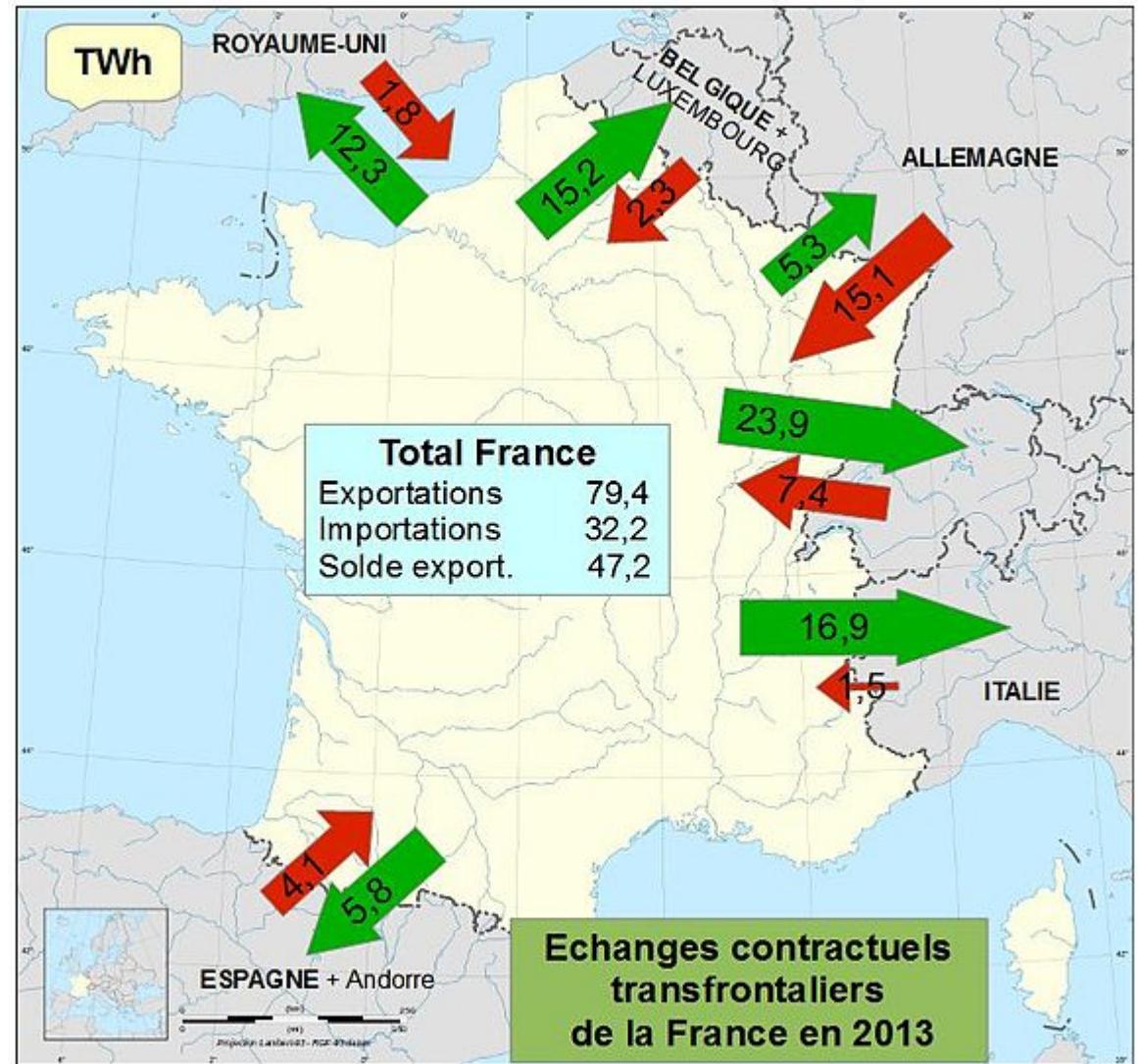
- Charbon massif  
==> pollution de l'air.
- Fort producteur de photovoltaïque  
(mais pollution à la construction)
- Grandes connections (courant continu) + éolien



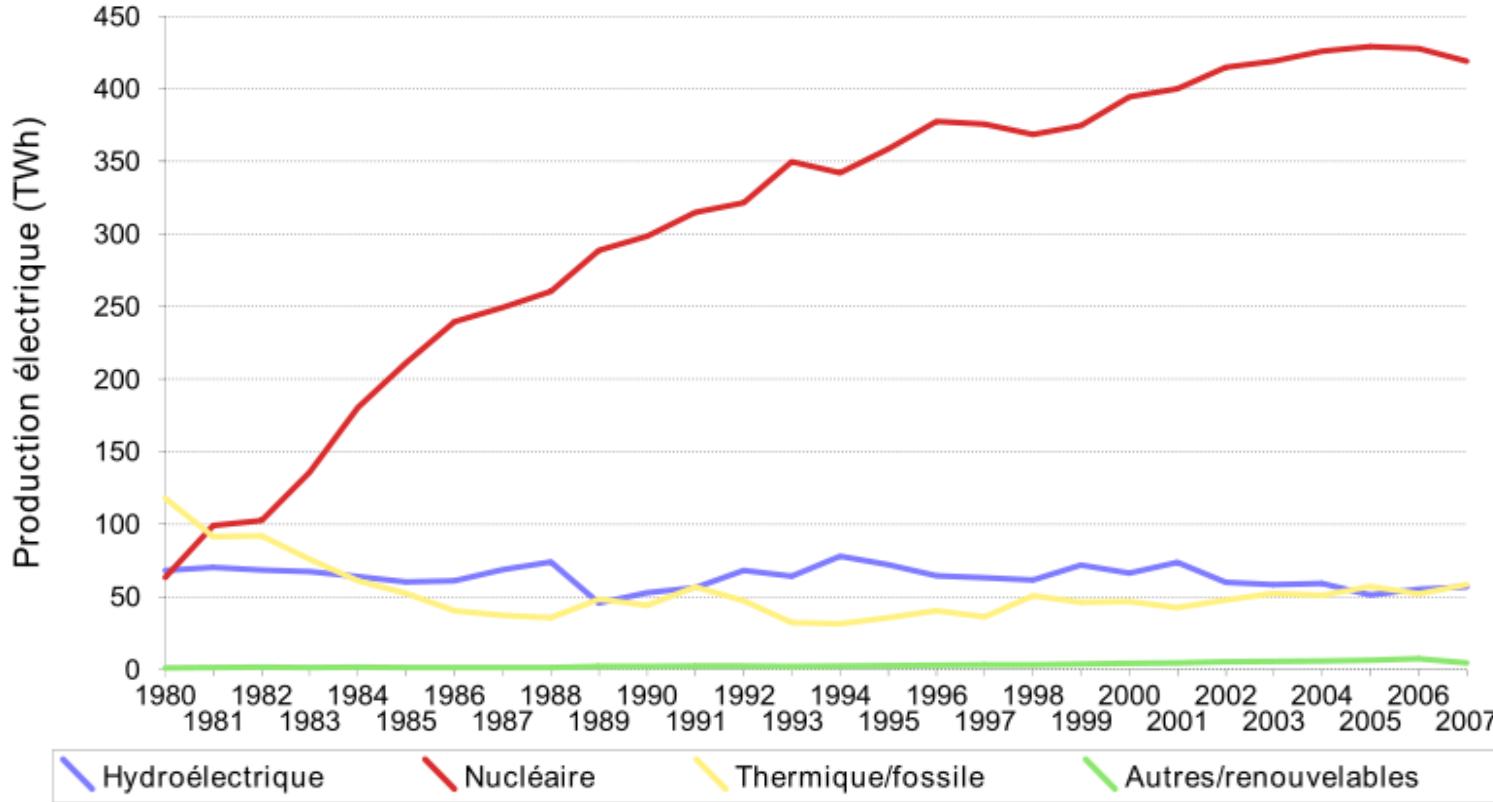
Importer de pays sans normes écologiques ?  
On ne veut pas intoxiquer les bébés chinois.

# France

- Plein de nucléaire
- Exportations
- Chauffage électrique  
(grosses pointes = imports)
- En 2013, achat charbon et renouvelable à l'Allemagne



## Répartition de la production électrique française par sources d'énergie



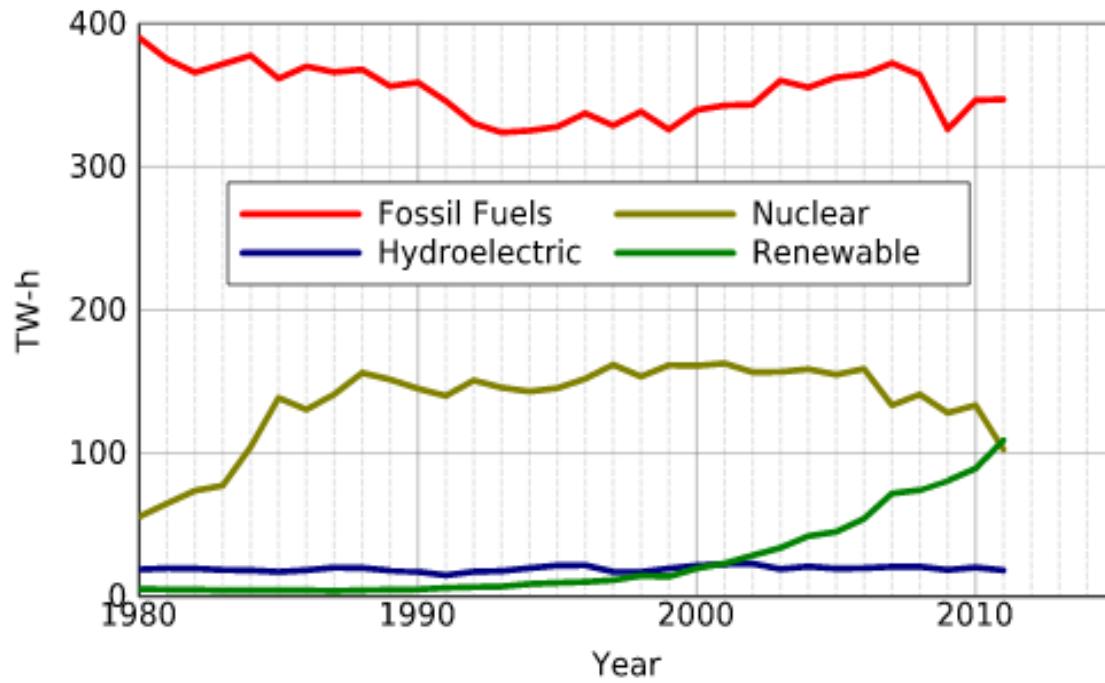
France

Plein de nucléaire.

Peu de CO<sub>2</sub> par habitant  
(aussi grâce au format des villes).

Risque-t-on un Fukushima à côté de Paris ?  
Risque terroriste ?

### **Electricity Production in Germany (including former East and West)**



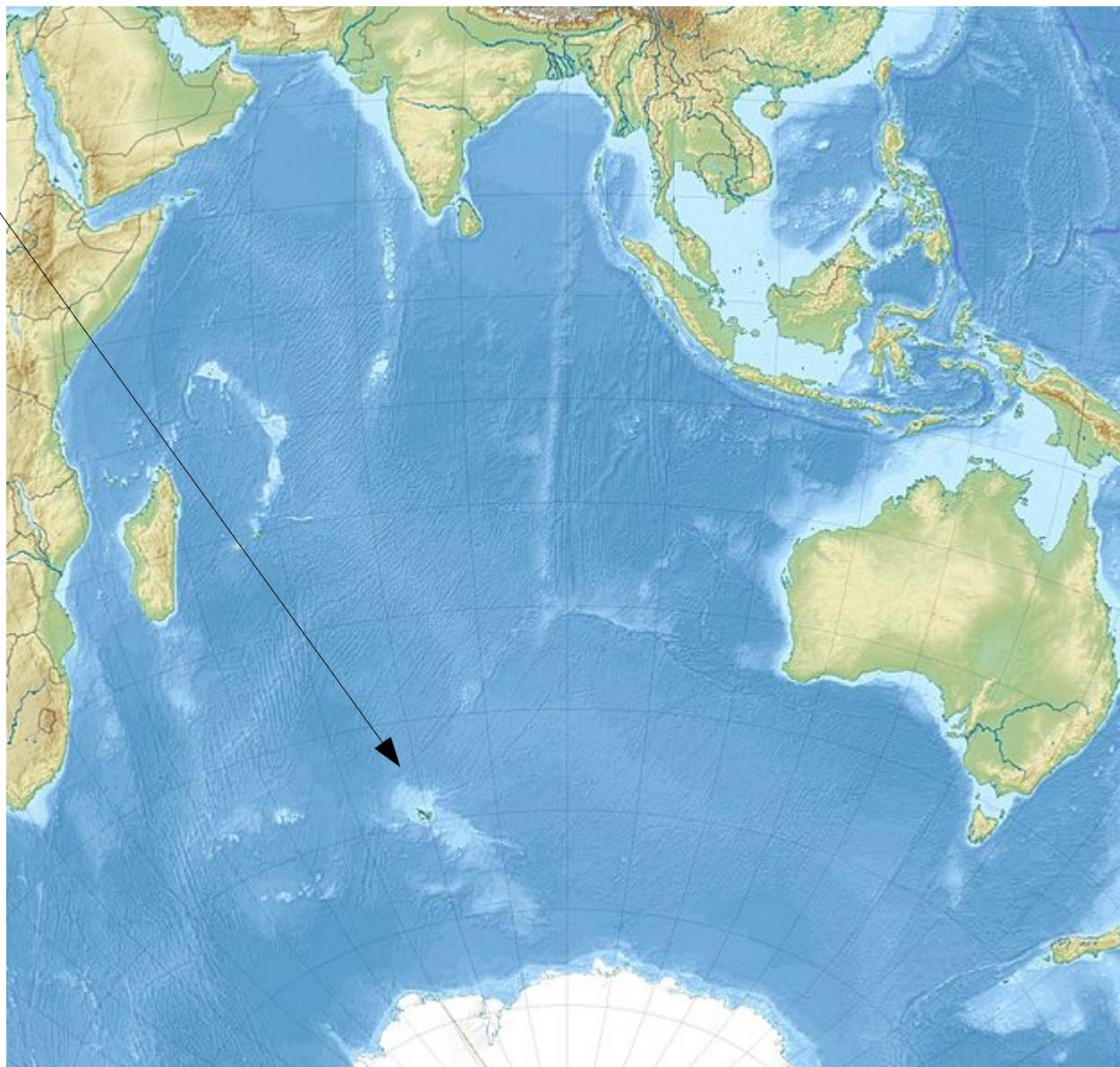
# Allemagne

**==> arrêt progressif  
du nucléaire**

**==> échanges avec la France**

**==> 9.6 t CO2 par an et par hab. (> France)**

Là !



# Kerguélen: soyons fous ?

Grande surface.

Vent 35 km/h fréquent,  
150 km/h courant,  
parfois 200 km/h.

Idéal pour éoliennes.

Mais rien aux alentours pour consommer.

Fabriquer du carburant de synthèse ?

Réserve naturelle.



# Groënland: encore plus fou ?



Couvrir les côtes d'éoliennes ?  
Connecter aux Amériques et à l'Europe ?  
(décalage des heures de pointe)

# Scandinavie



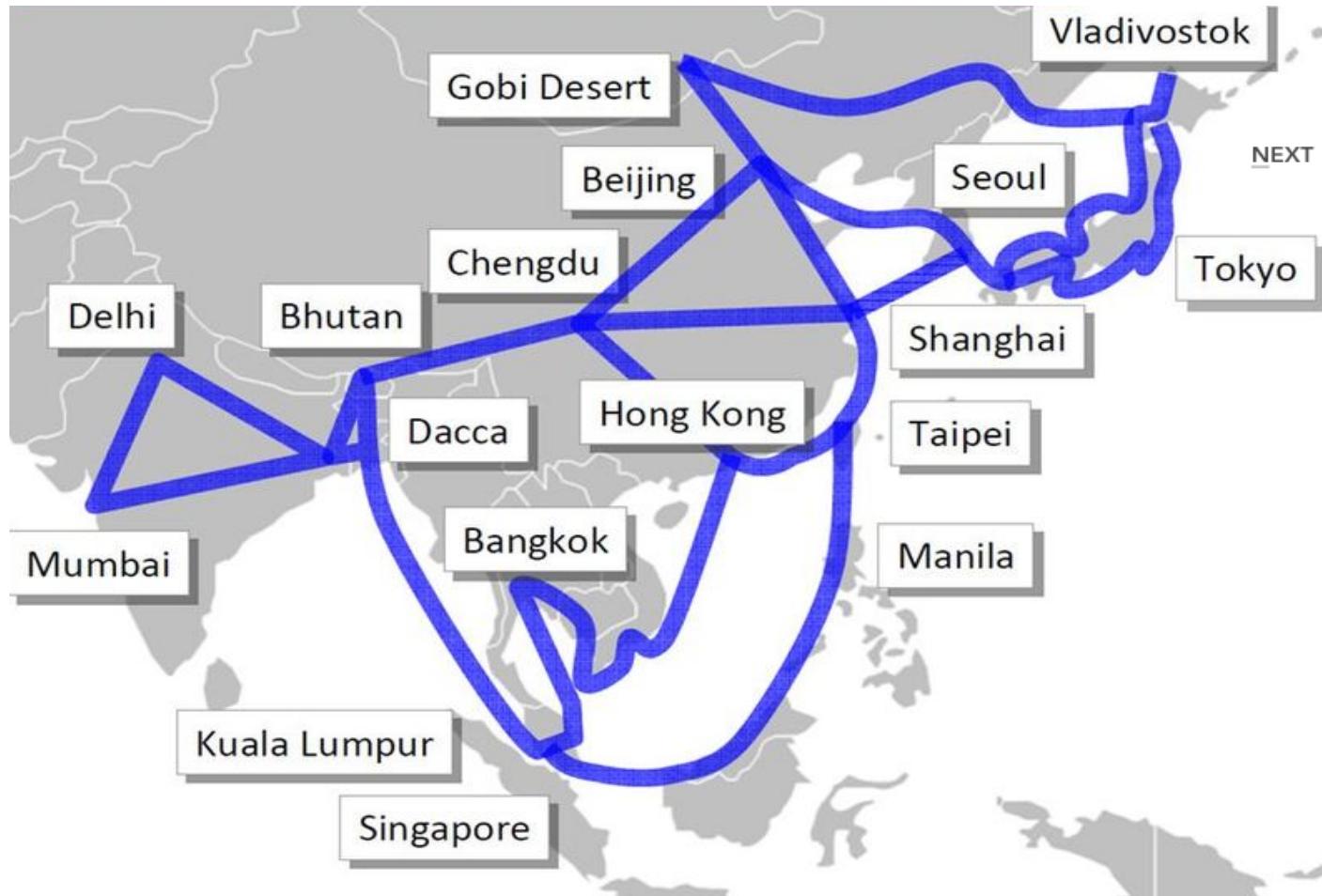
En France on n'a plus  
la place pour mettre  
de l'hydroélectrique;  
en Scandinavie on peut.

On tire des câbles ?

Le stockage hydro est pratique pour “lisser” les  
renouvelables.

Ou stockage dihydrogène ?

Asie (pas pour demain!):  
impliquerait une très bonne entente.  
==> Centrales dépendantes les unes des autres.



# Optimisation & énergie

- I. La question la plus importante de l'univers
- II. Exemples à suivre ou ne pas suivre
- III. Le problème (technique): ce qu'on ne sait pas**
- IV. Alors, comment on fait ?

# On ne sait pas

La météo <== mais on sait estimer la probabilité de telle ou telle météo.

Le photovoltaïque dans 30 ans <== alors là par contre on ne sait pas grand chose.

L'économie d'énergie dans 30 ans.

La prise de conscience écologique dans 30 ans <== on prend les paris ?

...

# Probabilités et autres incertitudes

Quand on a des probabilités, on peut discuter:

- La solution la meilleure en moyenne ?
- La solution la meilleure avec proba 95% ?

Mais décider face à des aléas sans probas ?

# Plusieurs scénarios: le solaire décolle, ou le stockage s'améliore ?

- Demain = aujourd'hui ? (pas très réaliste...)
- La solution au pire cas ? (Wald)  
Pire cas = trop pessimiste, peu satisfaisant
- La solution de moindre regret ? (Savage)
  - Dieu = omniscient ==> décision parfaite
  - Regret = pire perte par rapport à Dieu

choix=  $\operatorname{argmin}_{\text{choix}} \max_{\text{cas}} \text{coût}(\text{choix}, \text{cas}) - \text{coûtDieu}(\text{cas})$

# Et si on s'autorise des solutions stochastiques ?

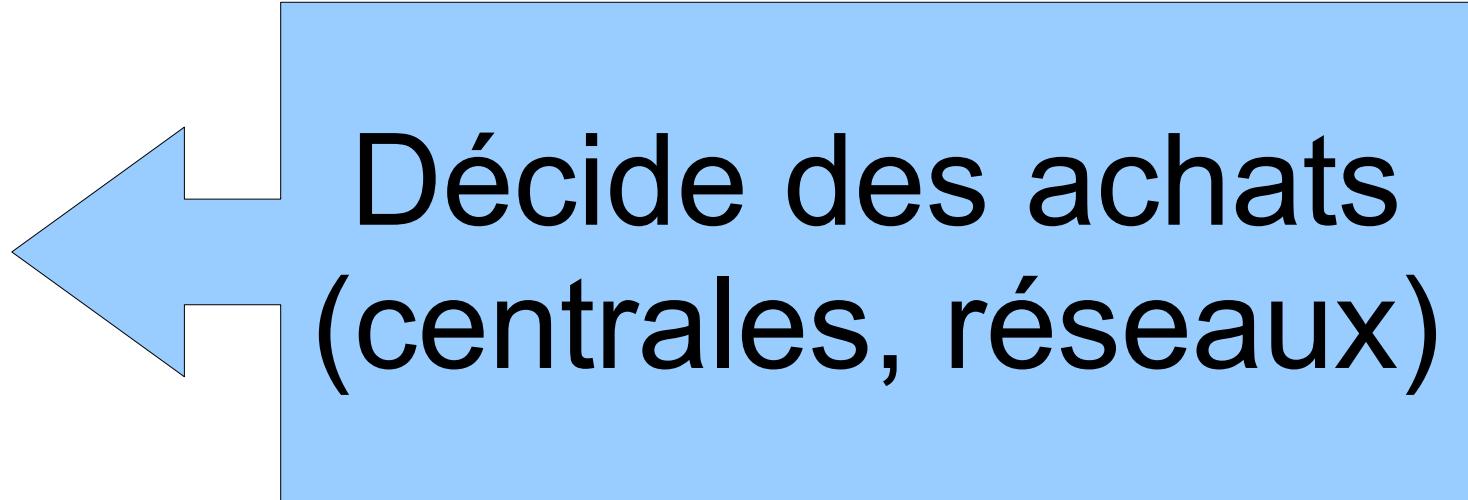
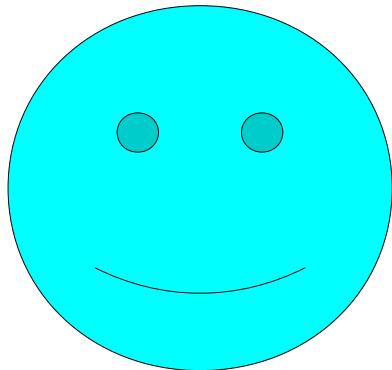
choix= argmin<sub>choix</sub> max<sub>cas</sub> coût(choix,cas) – coûtDieu(cas)

- Optimiser Wald ou Savage *en autorisant des stratégies stochastiques* améliore le critère
- Un peu comme dans pierre/feuille/ciseaux (au pire cas sur l'adversaire, je joue aléatoire)
- Proposer aux japonais de construire une centrale nucléaire *avec probabilité 23%* ?

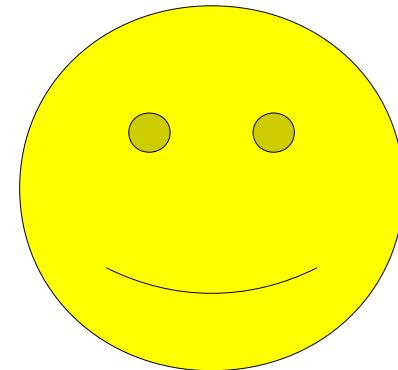
# Optimisation & énergie

- I. La question la plus importante de l'univers
- II. Exemples à suivre ou ne pas suivre
- III. Le problème: ce qu'on ne sait pas
- IV. Alors, comment on fait ?**

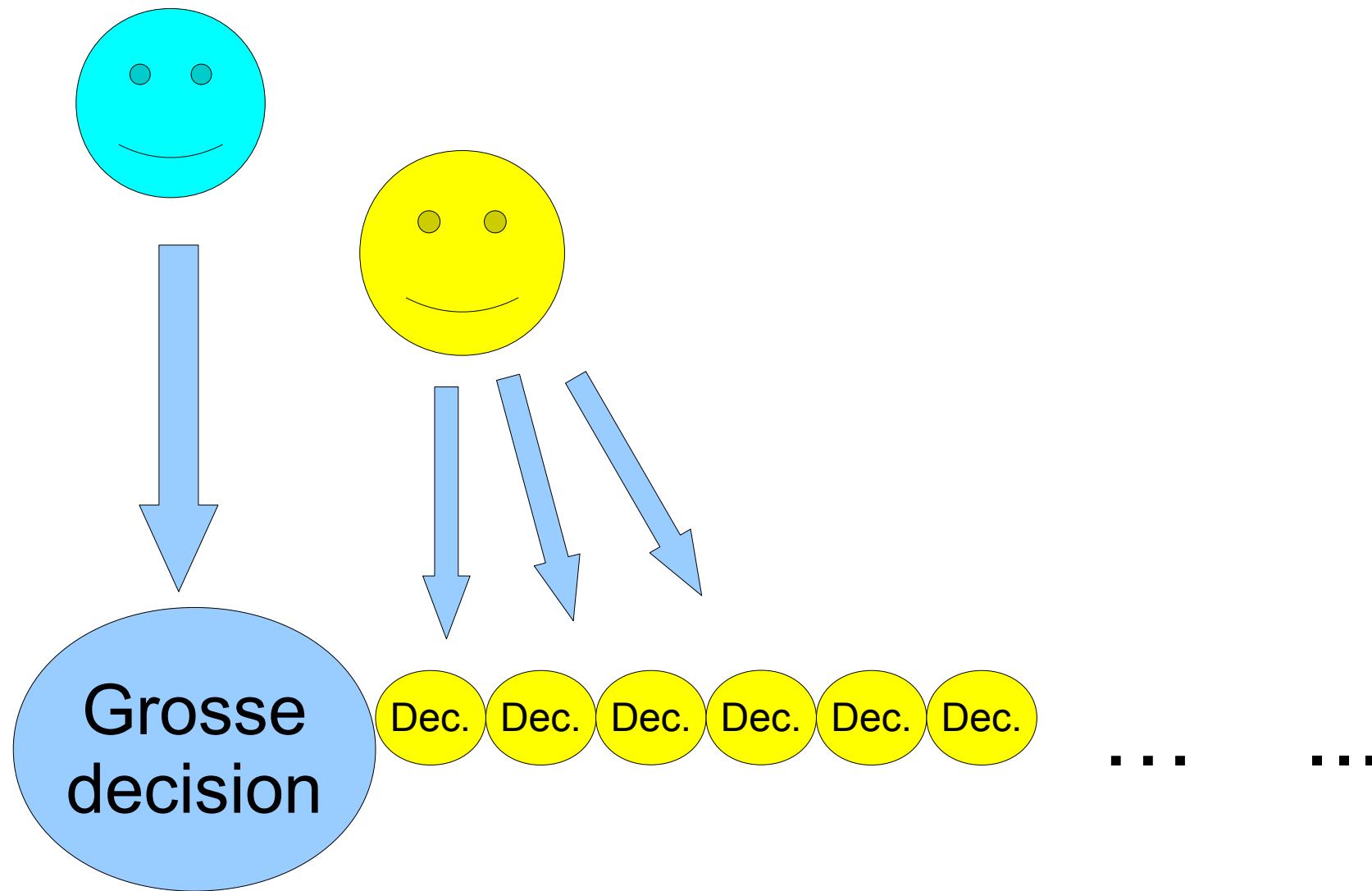
# L'investissement et la gestion



Gère les  
centrales

A large blue arrow points from the text "Gère les centrales" to the yellow smiley face.

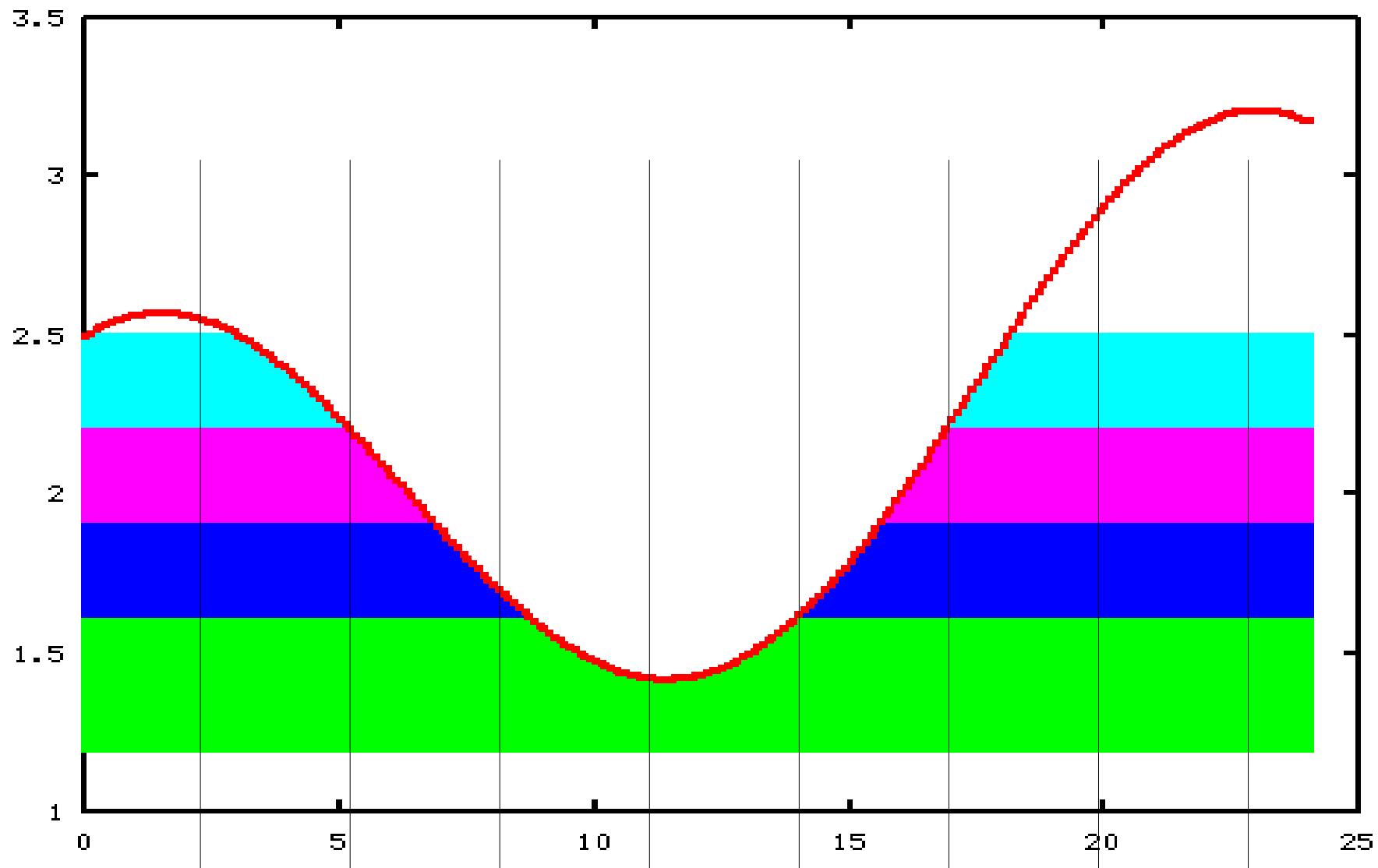
# Décision stratégique puis décisions tactiques



# Décisions tactiques

- Regardons déjà la partie tactique.
- Les centrales sont là, comment les gère-t-on ?

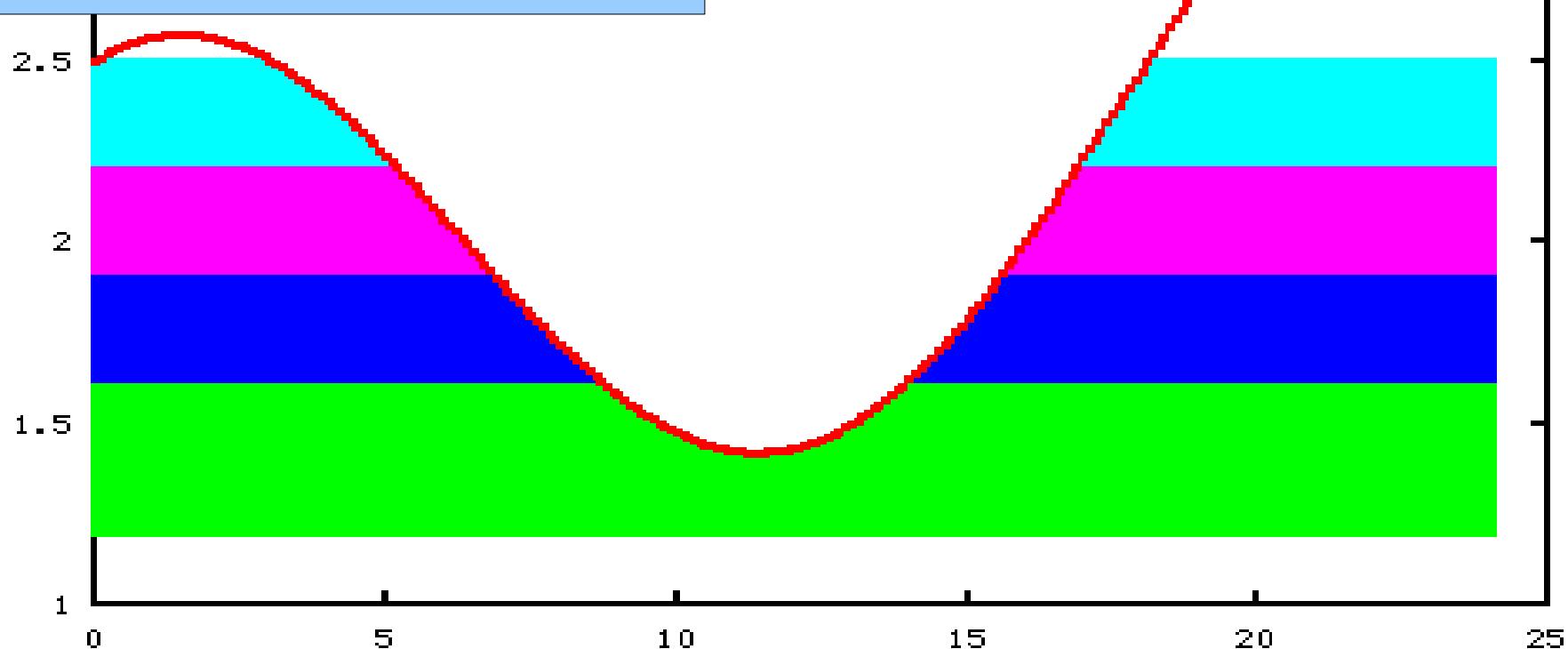
Pour chaque heure, pour chaque centrale, décider puissance



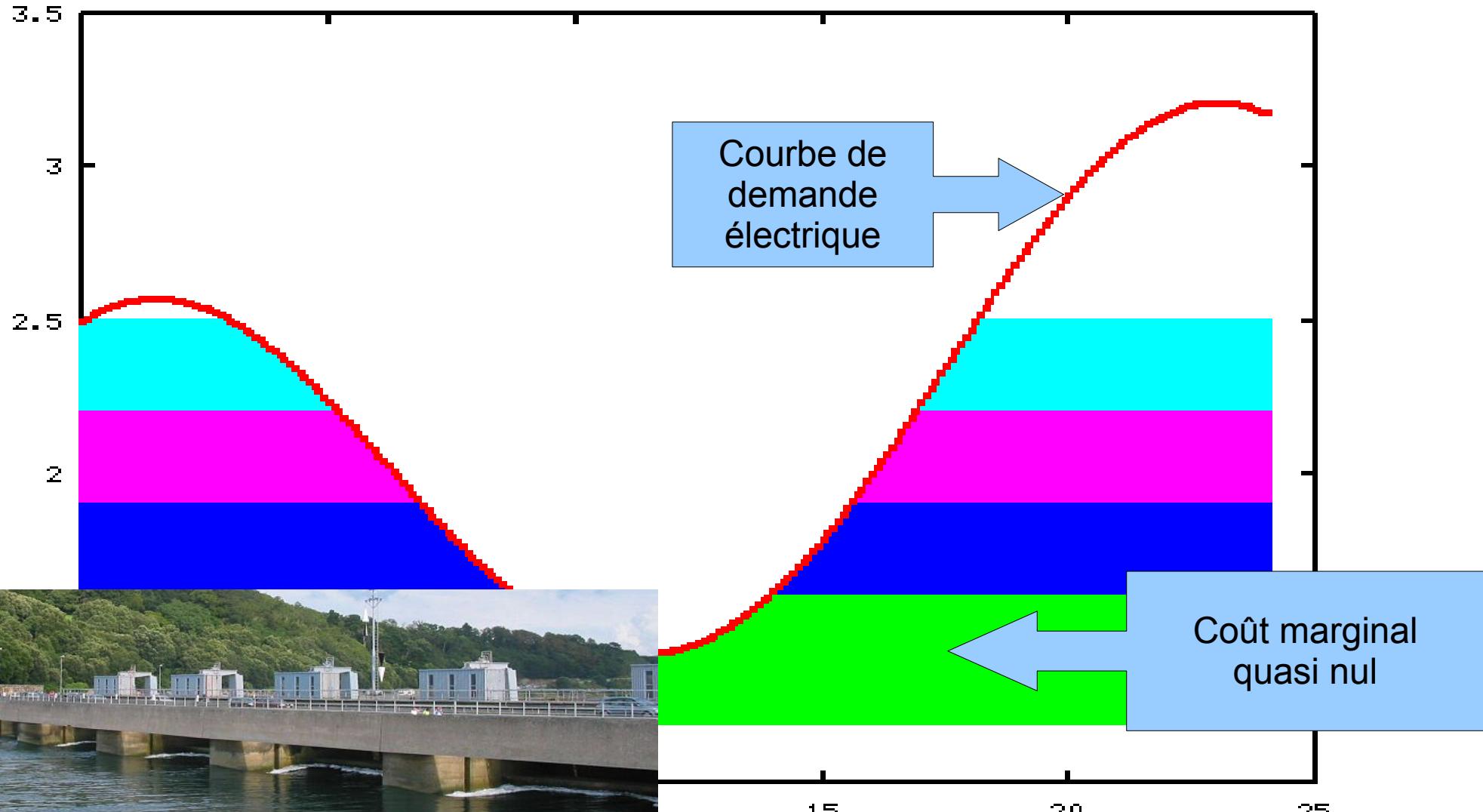
# Version simple

Ici, on ne regarde pas les prix de construction; les centrales sont déjà là, on regarde le coût d'utilisation.

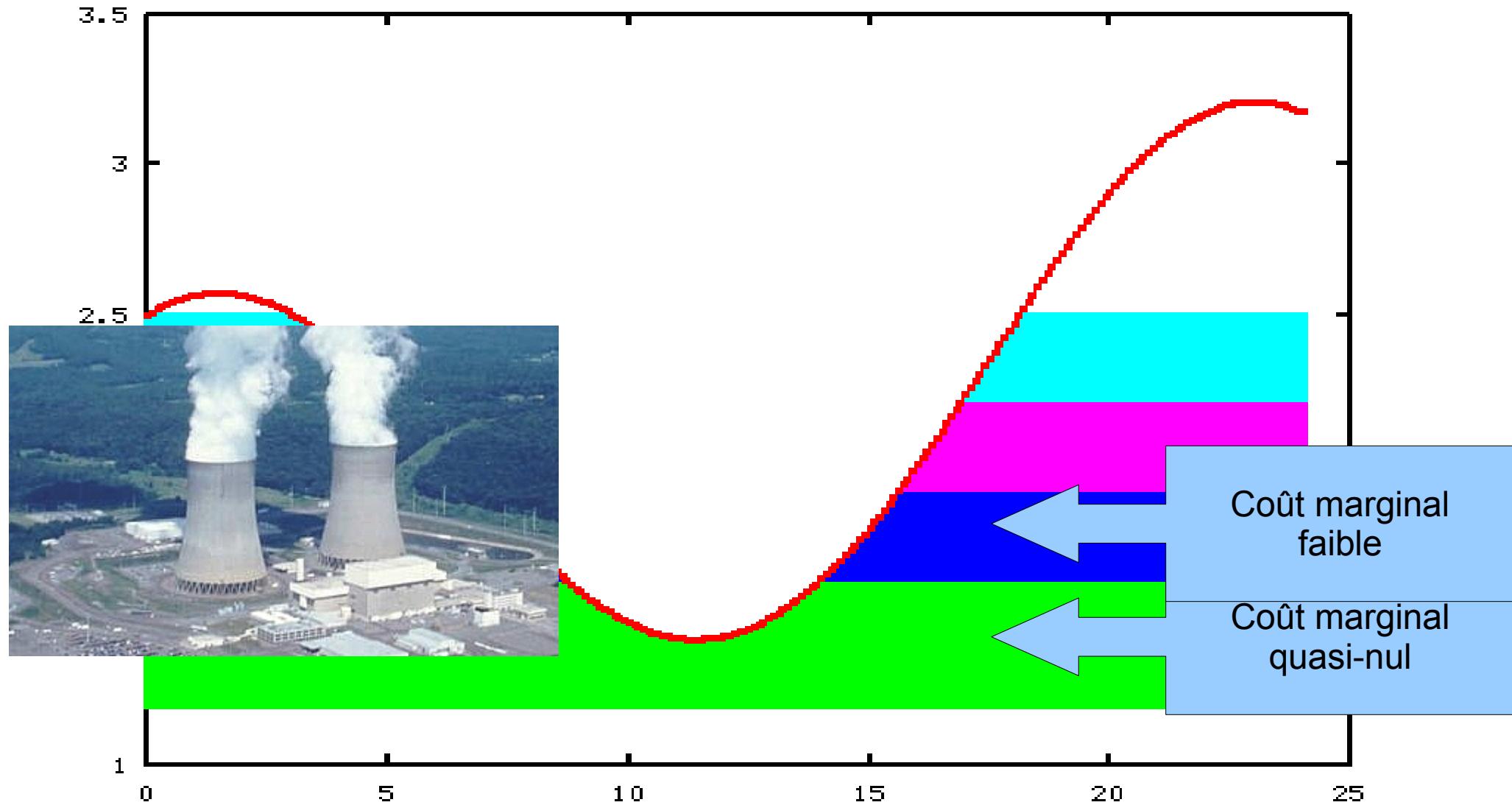
Courbe de demande électrique



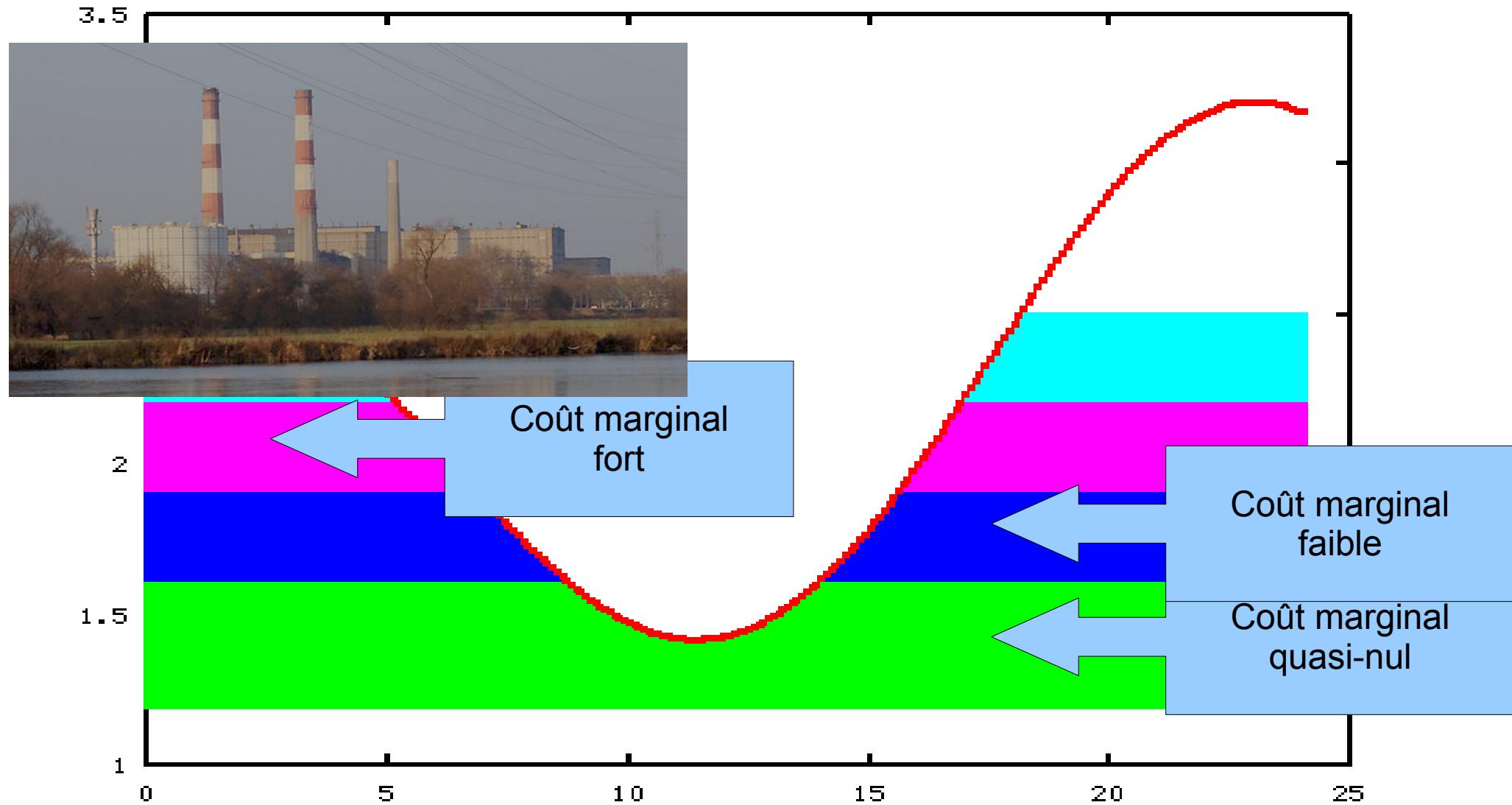
# Version simple



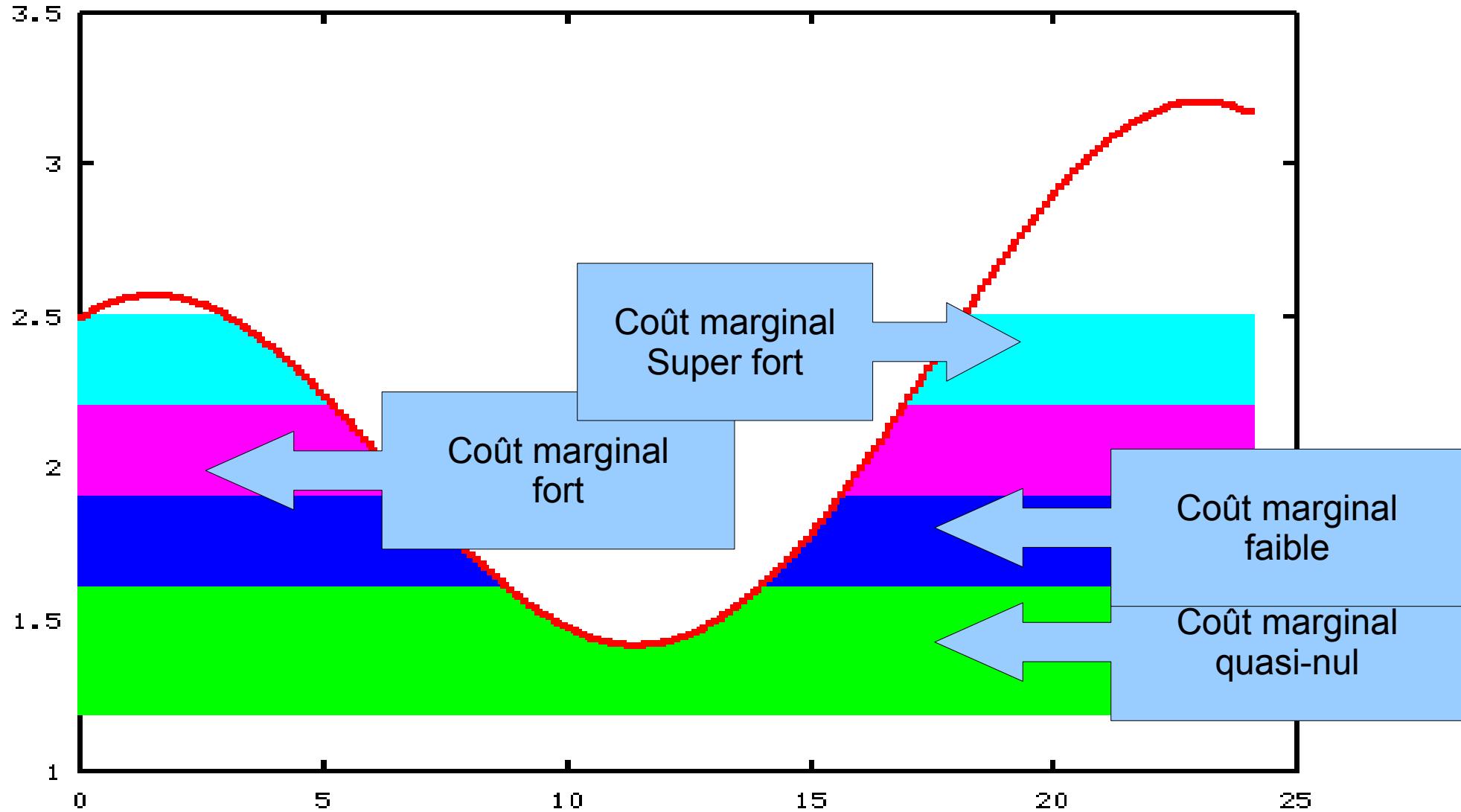
# Version simple



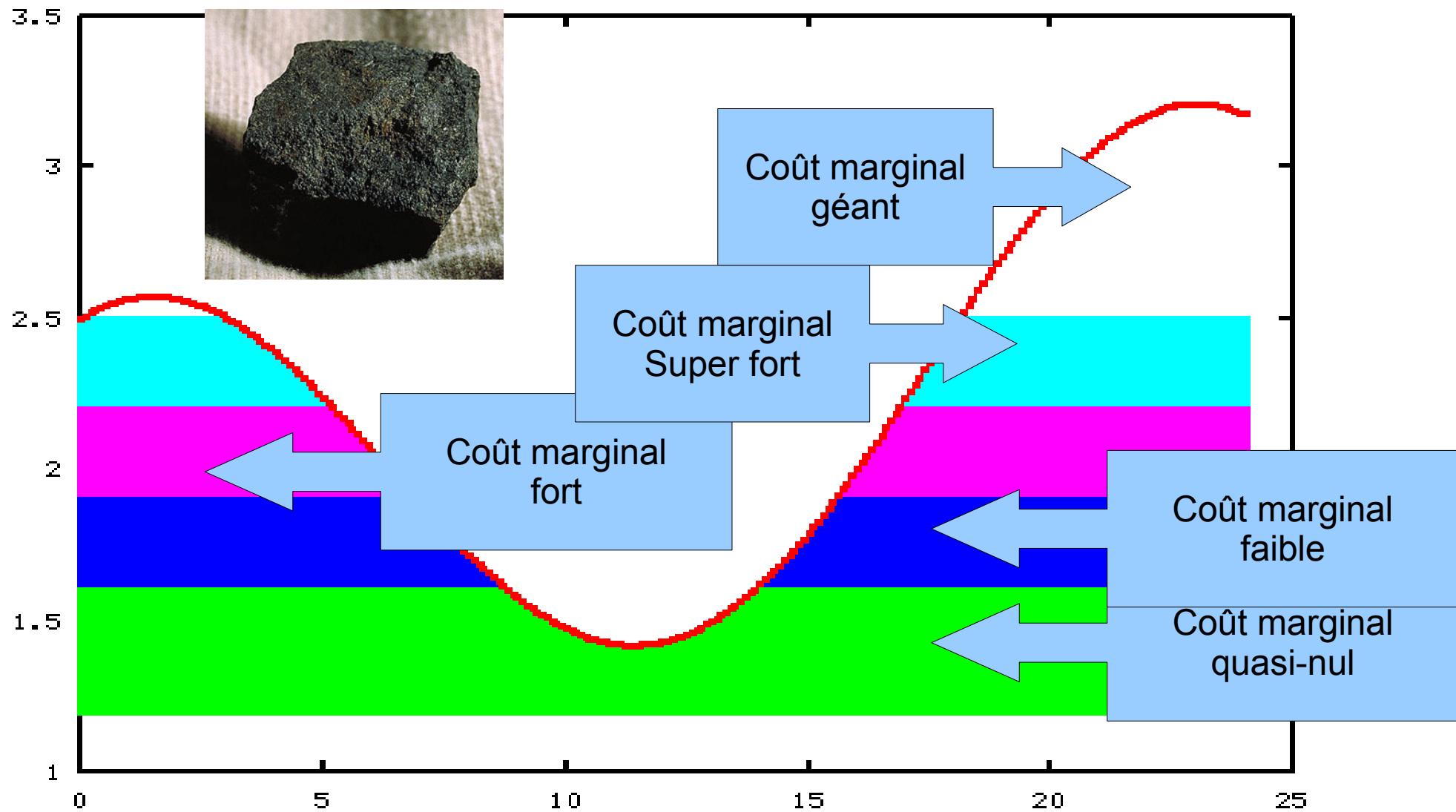
# Version simple



# Version simple



# Version simple (si on pénalise le charbon...)



# Cet exemple était 100% fictif

- On a fait comme si le charbon était le plus cher.
- En fait à l'échelle mondiale on met le paquet sur le charbon.
- Parce qu'il y en a encore beaucoup et que c'est pas cher.

# Alors comment on fait ?

- Version très très très simplifiée ( tri,  $N \log(N)$  ):
  - Je connais la demande (courbe rouge)
  - J'allume “pile” pour la satisfaire, dans l'ordre des coûts croissants ==> chaque pas de temps géré séparément
- Version moins simplifiée (non séparée)
  - Je prends en compte les coûts/vitesse d'allumage
  - J'ajoute plein de contraintes des centrales
  - J'écris  $f(x) = \text{coût total si décision } x$
  - Je cherche “argmin f”, le  $x$  qui minimise  $f(x)$

# Malheureusement c'est (encore) plus compliqué que ça!

- Tout ça est aléatoire
  - Pannes
  - Météo
  - Consommation
  - ...
- Et il y a des stockages (actions supplémentaires possibles)
- Et je peux demander à des entreprises de consommer moins (arrangements économiques)

# Optimiser des décisions

10h: j'allume certaines centrales, je les règle

10h15: j'observe météo et consommation

10h30: je rerègle mes centrales

10h45: j'observe météo et consommation

11h00: je rerègle mes centrales

11h15: j'observe

= ...j'agis, j'observe, j'agis, j'observe...

Après avoir simulé 3 ans j'observe mes coûts.

# Optimiser des décisions

= ...j'agis, j'observe, j'agis, j'observe...

= je joue, mon adversaire joue,  
je joue, mon adversaire joue,

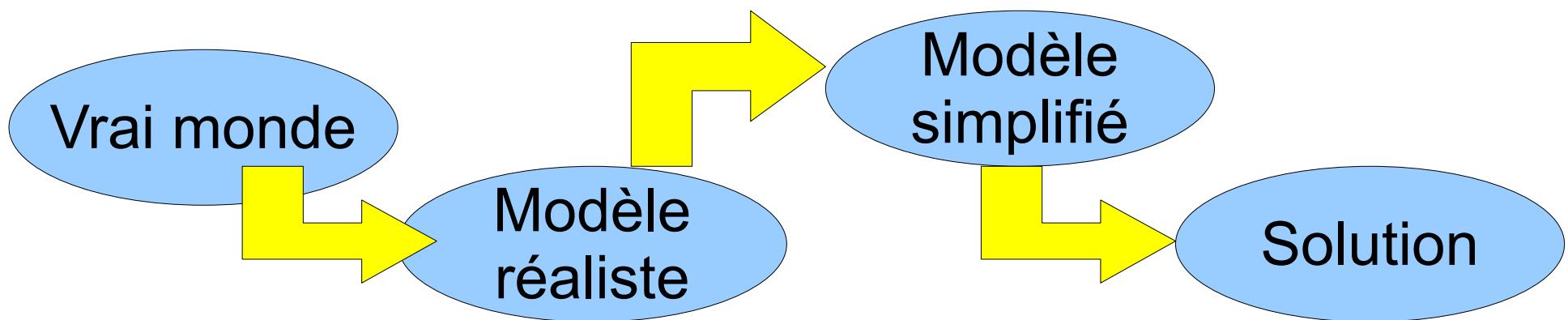
**Jeu de Go**

que pour les jeux  
et le contrôle!pensez Bellman,  
DPS, SDP, SDDP

# Ok, les décisions tactiques sont compliquées

... et on prend des outils comme dans les jeux.

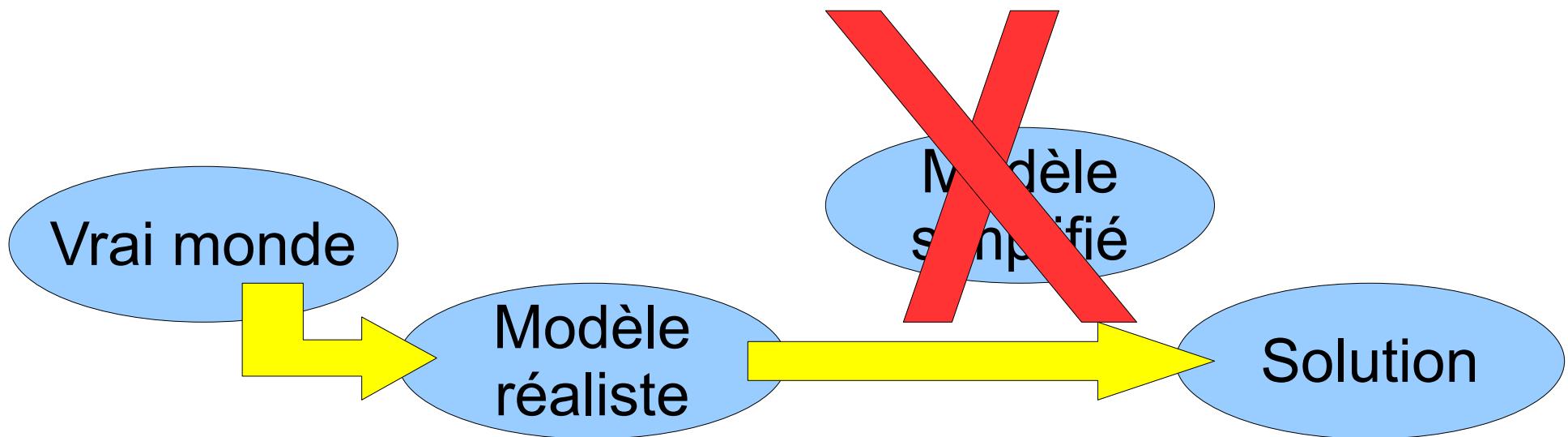
Spécificités de nos travaux:  
très peu contraindre le modèle;



# Ok, les décisions tactiques sont compliquées

... et on prend des outils comme dans les jeux.

Spécificités de nos travaux:  
très peu contraindre le modèle;



# Passons aux décision stratégiques.

Bonne décision

= décision minimisant les coûts

Mais comment calculer les coûts ?

# Décision stratégique

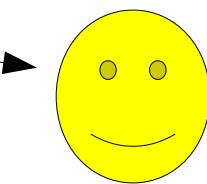
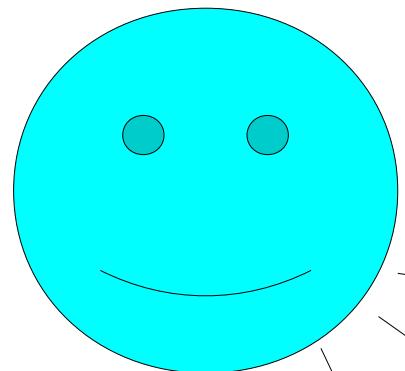
Bonne décision

= décision minimisant les coûts

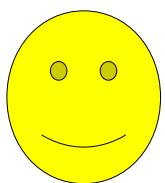
Mais comment calculer les coûts ? Dépendent de:

- La météo (modèle aléatoire) ==> moyenne
- La politique (les pénalisations)
- ... et les décisions tactiques!

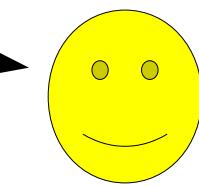
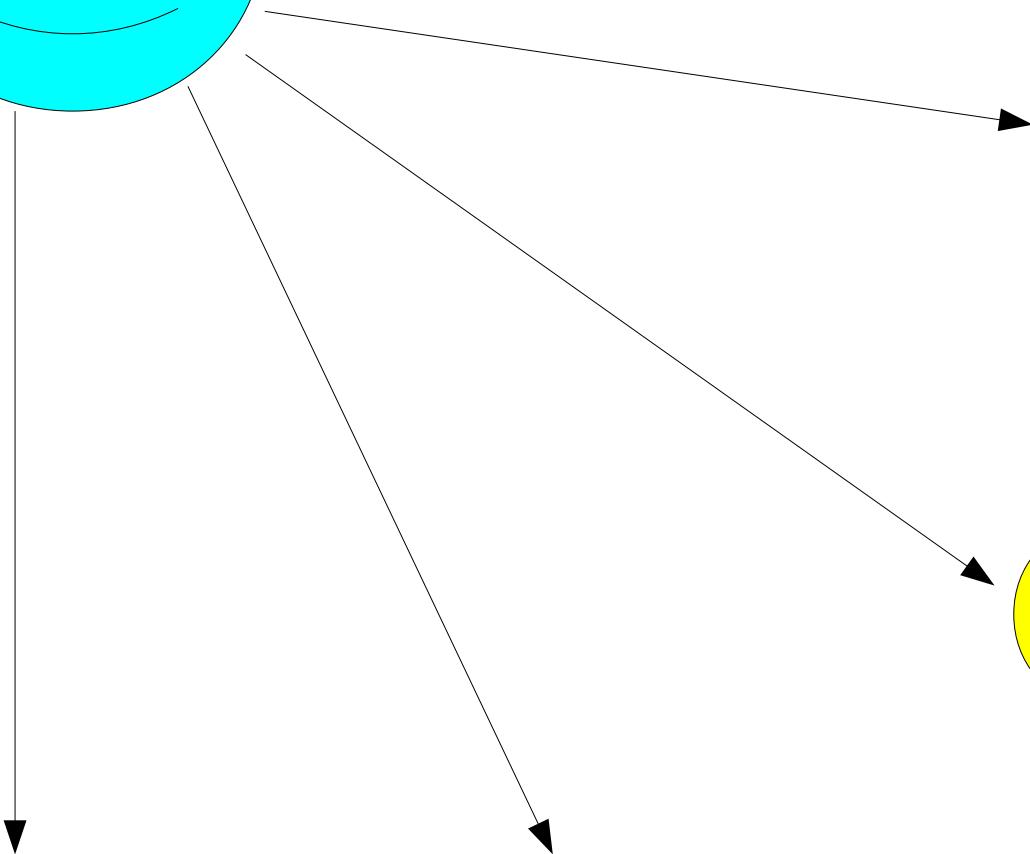
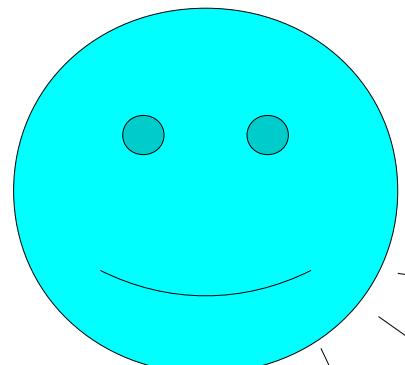
# Décision stratégique



Simule le cas où on ne construit rien de neuf



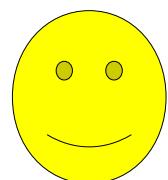
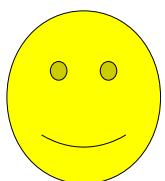
# Décision stratégique



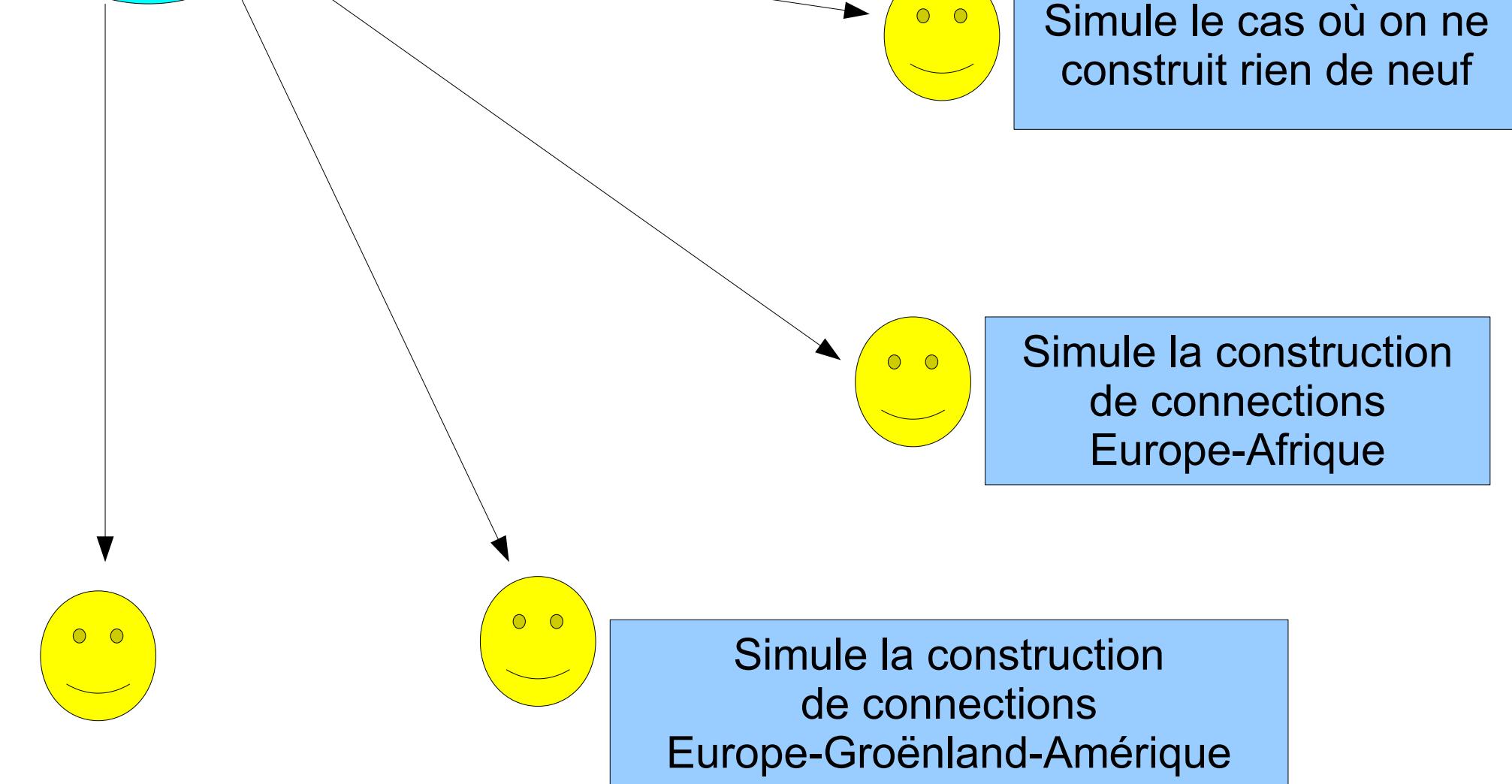
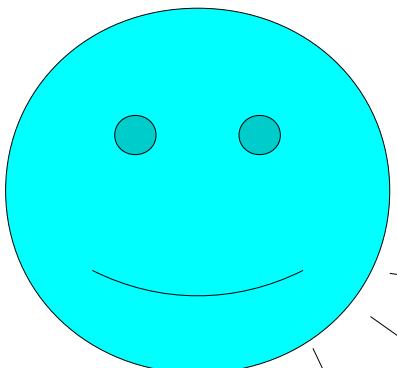
Simule le cas où on ne construit rien de neuf



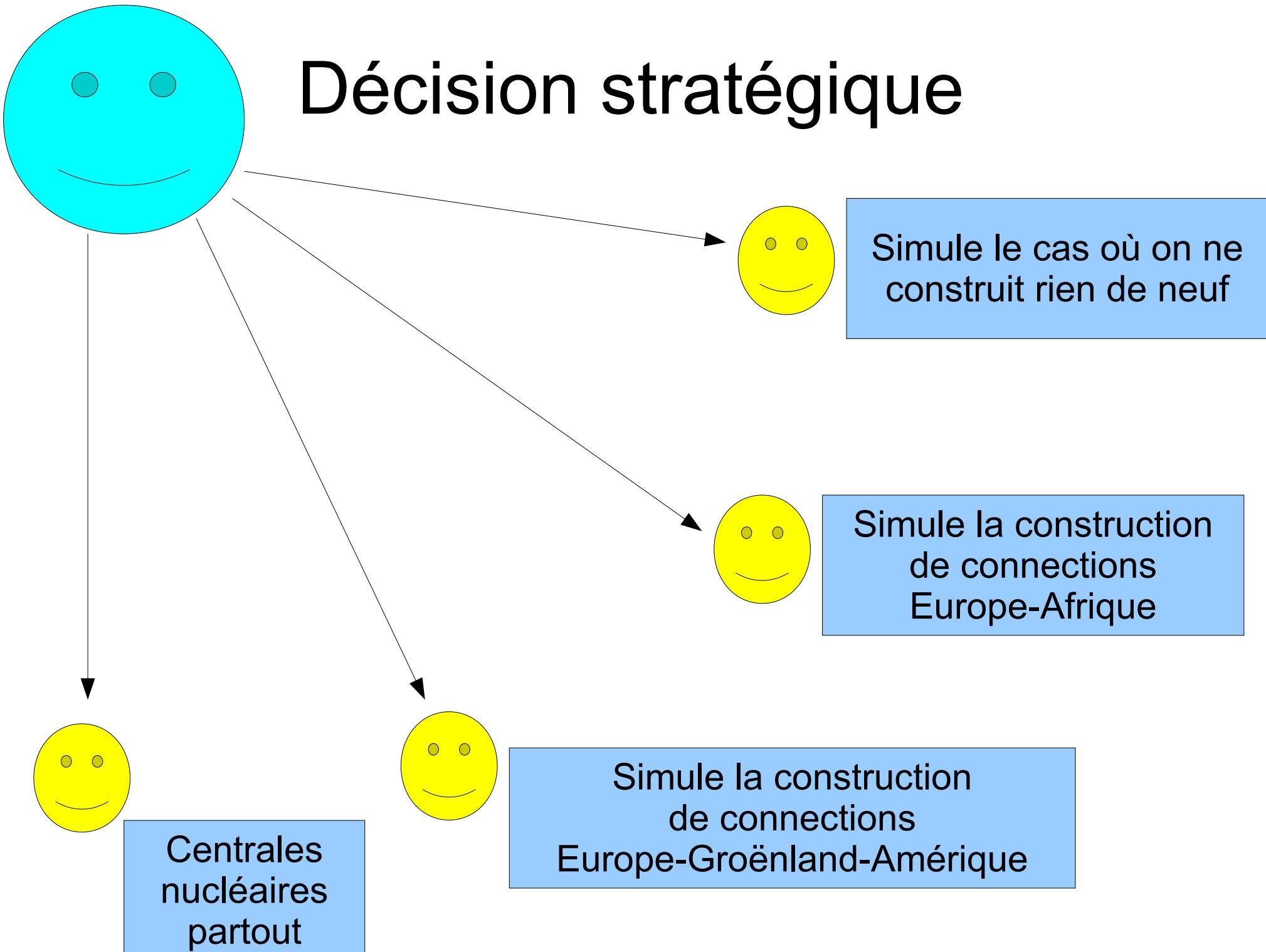
Simule la construction de connections Europe-Afrique



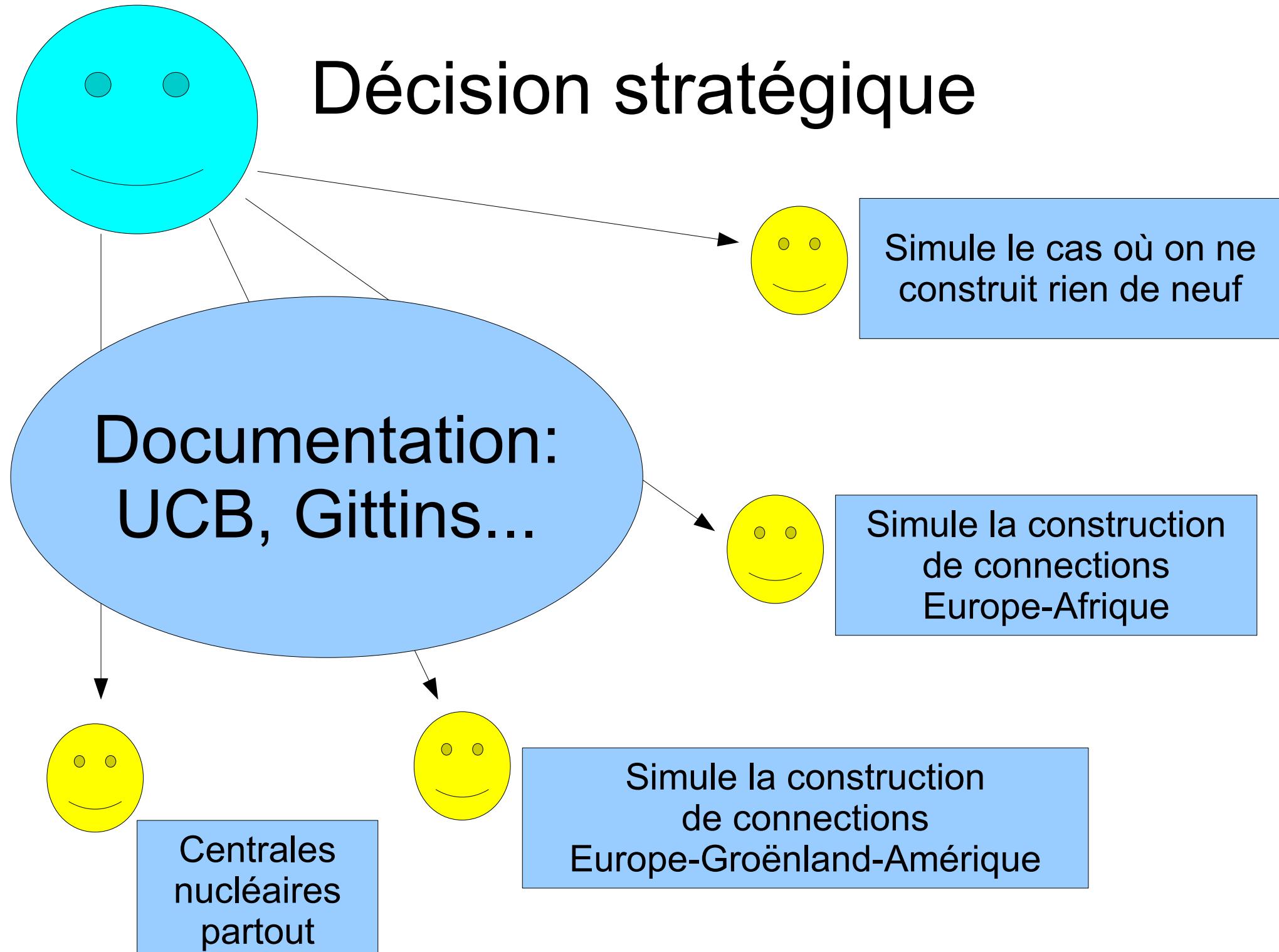
# Décision stratégique



# Décision stratégique



# Décision stratégique



# Conclusion

- Nos algos: un mélange de SDP/DPS/MPC + quantifier l'erreur de modèle
- Est-il utile de faire plein de maths pour travailler sur ça ?
- 

-  
-  
-

# Conclusion

- Nos algos: un mélange de SDP/DPS/MPC + concept d'erreur de modèle
- Est-il utile de faire plein de maths pour travailler sur ça ?
- Définitivement oui:
  - Trop d'approximations dans beaucoup de travaux
  - Concept d'erreur de modèle (convexité, markovianité, ...)
  - Compréhension de la contrainte de Markovianité

- Les grandes décisions dans l'énergie sont politiques ==> rôle des chercheurs ?
- Politique/citoyen: que pénaliser, de combien ?  
Quel niveau de fiabilité ?
- Recherche / industrie: simuler / prédire

