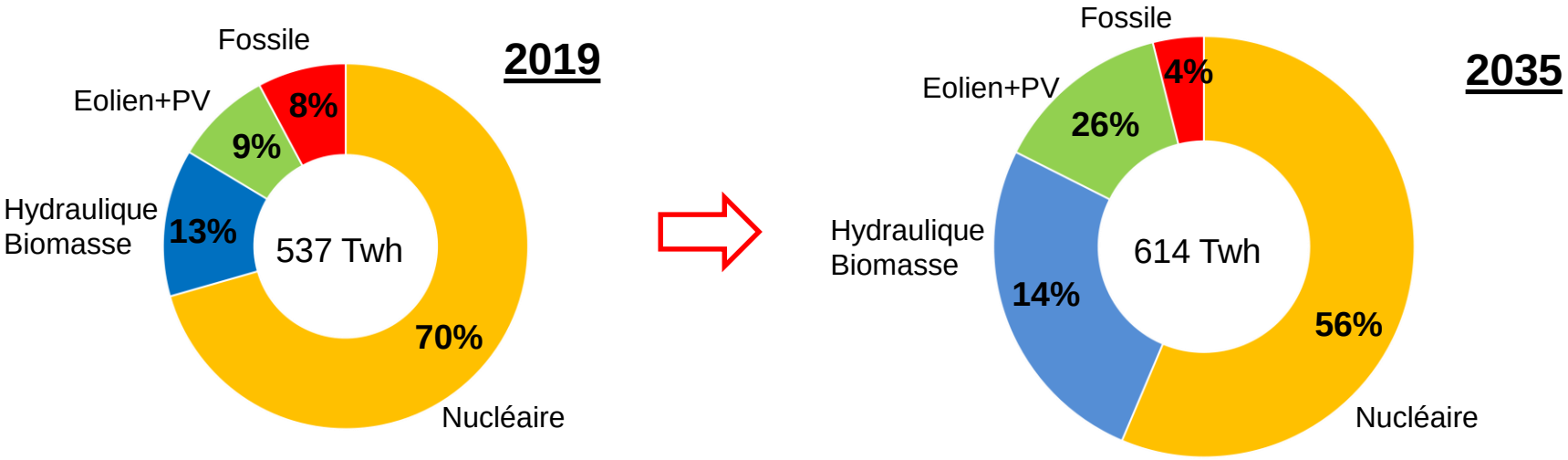
TRANSITION ENERGETIQUE / GAIN DE FLEXIBILITE DU MIX ENERGETIQUE GRACE A LA MANOEUVRABILITE DES REACTEURS NUCLEAIRES

Jean-Michel Do (CEA/DES/SERMA), V.Drouet, M. Muniglia, S. Vérel(ULCO/LISIC), Jean-Charles Le Pallec (CEA/DES)



Scénario VOLT (RTE-BP 2017) - **enveloppe de la loi PPE (2020)**

- Fermeture de 9 réacteurs de 900 MW (hors Fessenheim)
- Par rapport à 2019, la production EL et PV est multiplié par 3 (mix 40% ENR ⇐ 2035).
- Pas de nouvelles unités gaz.

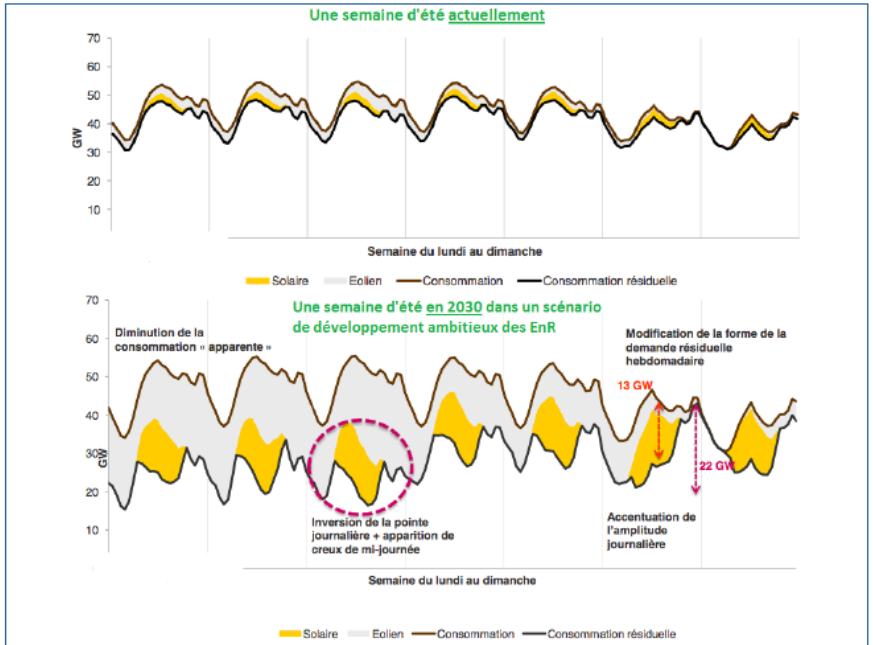
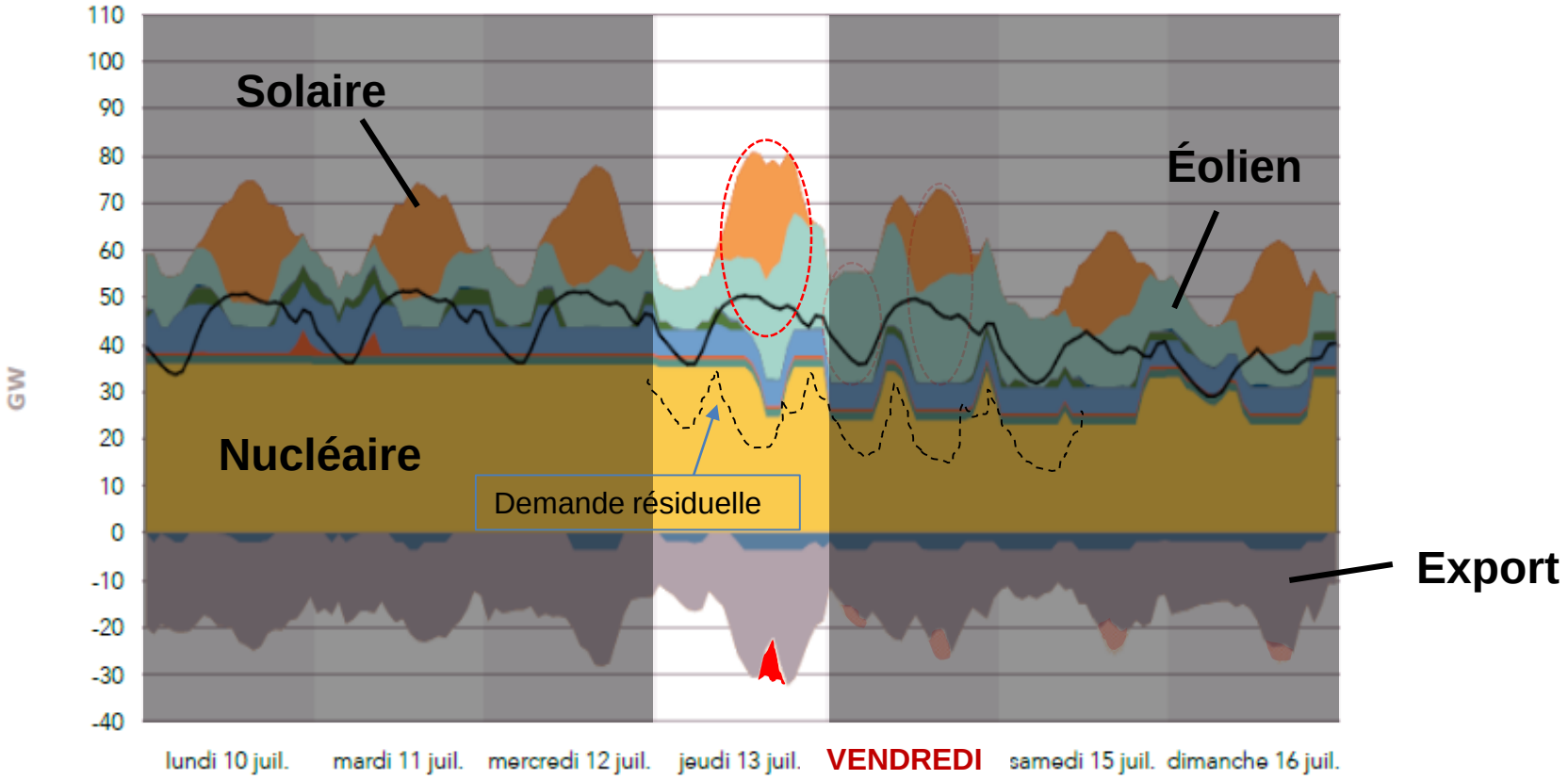


Figure 66 : Illustration de la variabilité de la demande électrique et de la demande résiduelle aujourd'hui et dans un scénario de fort développement d'EnR en 2030 - Source : RTE, 2015

Demande résiduelle = Demande – (EL+PV)
Insertion de capacités non pilotables EL+PV
(P installée 2030 de 86GW / P installée totale 2018 de 101 GW)
⇒ **Modification profonde de la demande résiduelle**

- Inversion de la pointe journalière
- Apparition de creux à la mi-journée
- ↗ Amplitude journalière de la demande résiduelle

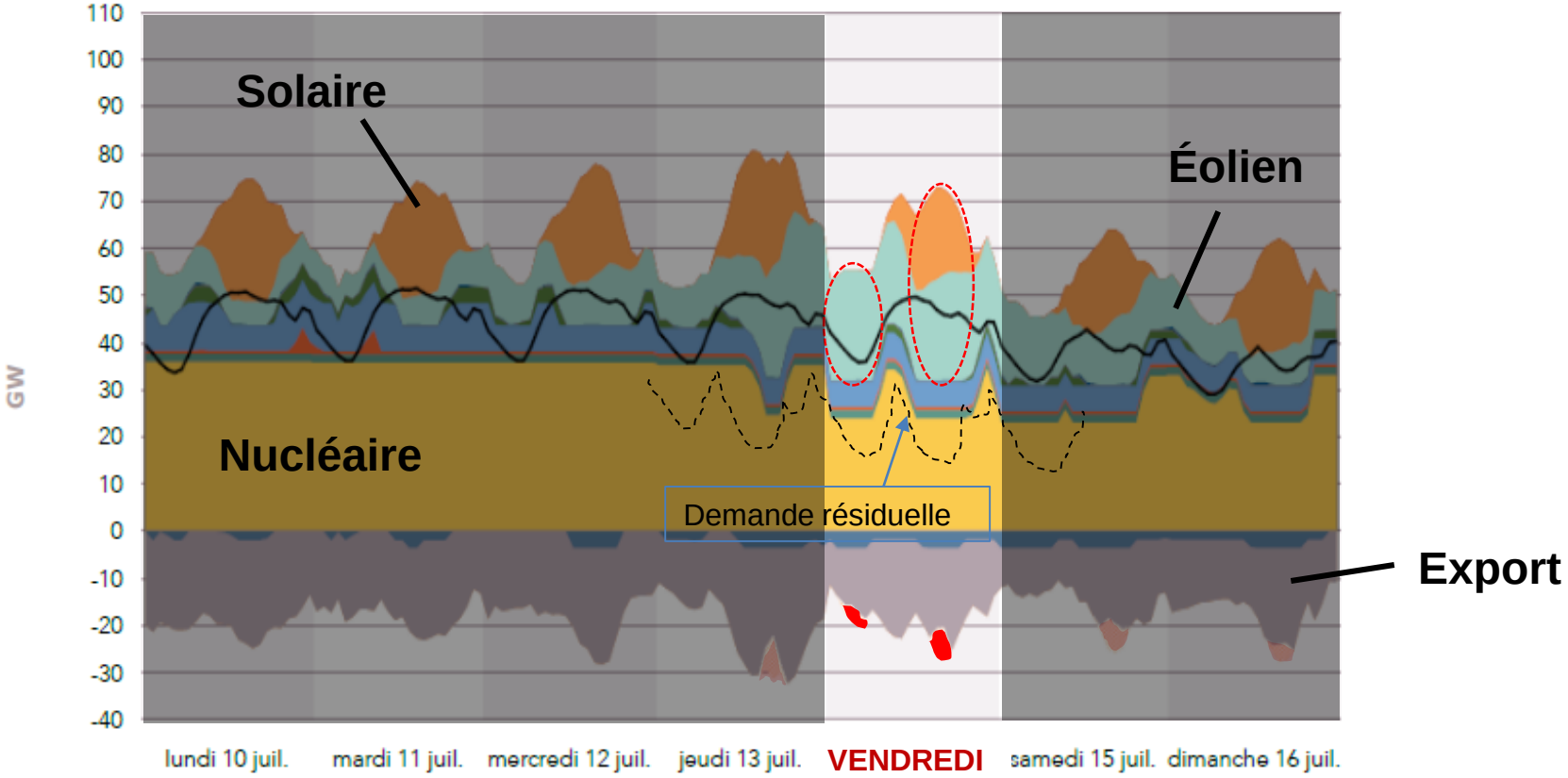
⇒↗ variabilité de la forme de la demande résiduelle à l'échelle de la semaine



Source : RTE - BP2017

Prévisions RTE pour une semaine type de l'été 2035 (Scénario VOLT)

CONTEXTE ET OBJECTIFS : scénario VOLT



Source : RTE - BP2017

Prévisions RTE pour une semaine type de l'été 2035 (Scénario VOLT)

Scénario nouveau mix VOLT 2035

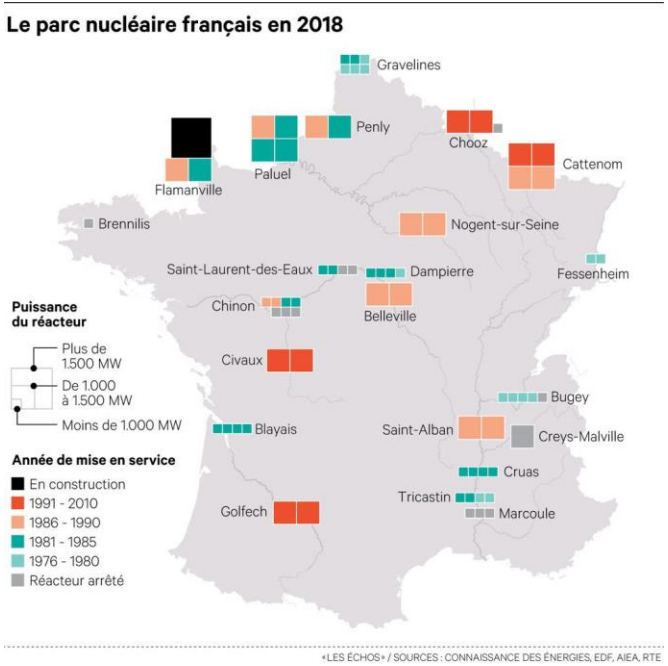
Augmentation de la part d'énergies renouvelables PV + Éolien

Intermittence

3 GWh d'énergie déversée

Déséquilibre potentiel entre la consommation et la production

- Flexibilité (RTE)
- Smart Grids (gestion locale)
- Manœuvrabilité des Réacteurs nucléaires
- Stockage



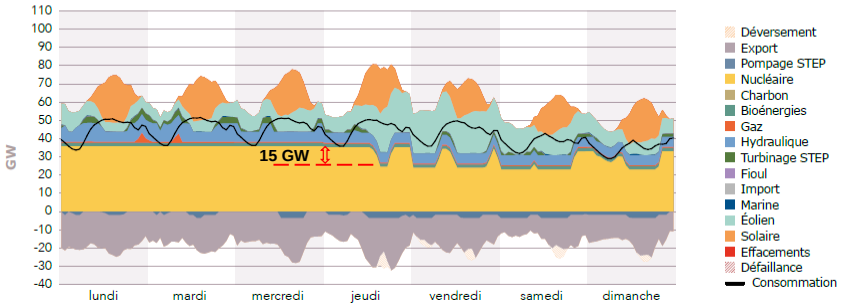
Evolution en 2035 :

23 paliers 900MW, 21/23 ont été construit entre 1974 et 1985.

- Indisponibilité grandissante (arrêt rechargement ou fortuit, visite décennale)
- usure de la cuve du réacteur, (cyclage thermique, fluence)
  ⇒ Modulation de puissance limitée

4 paliers 1450MW, mais fonctionne en base du fait de leur mode de pilotage non adapté

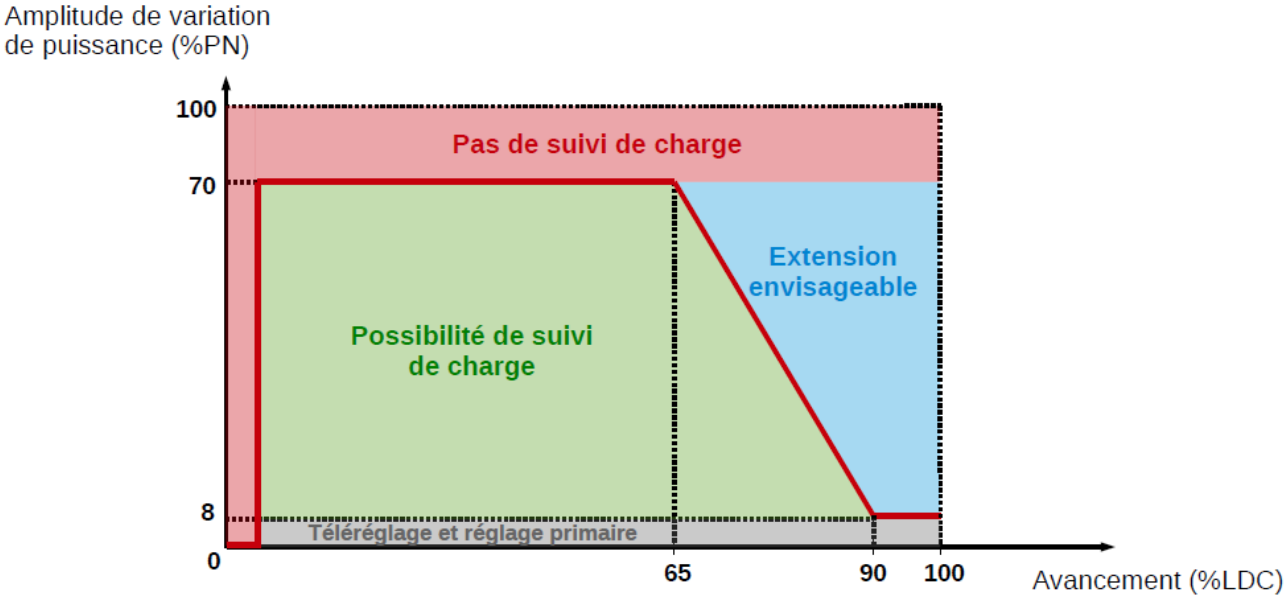
Figure 8.24 Illustration de la production sur une semaine estivale – *2035 – scénario Volt*



⇒ Effort de modulation de 15 GW reposera sur les 20 paliers 1300MW plus récents (1985-1994).

Améliorations possibles de la manœuvrabilité des réacteurs :

- Augmentation des **vitesses de variation de puissance** admissibles
- Augmentation et allongement des **phases d'arrêt réacteur**
- Augmentation de la **disponibilité en cours de campagne**



Modèle

- Modélisation d'un réacteur 1300 MW avec échange boucle primaire-secondaire.
- Construction d'une stratégie de contrôle du réacteur
- [Validation du modèle].

Pré-optimisation

- Définition du problème d'optimisation.
- Étude du paysage de fitness.

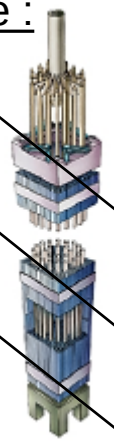
Optimisation

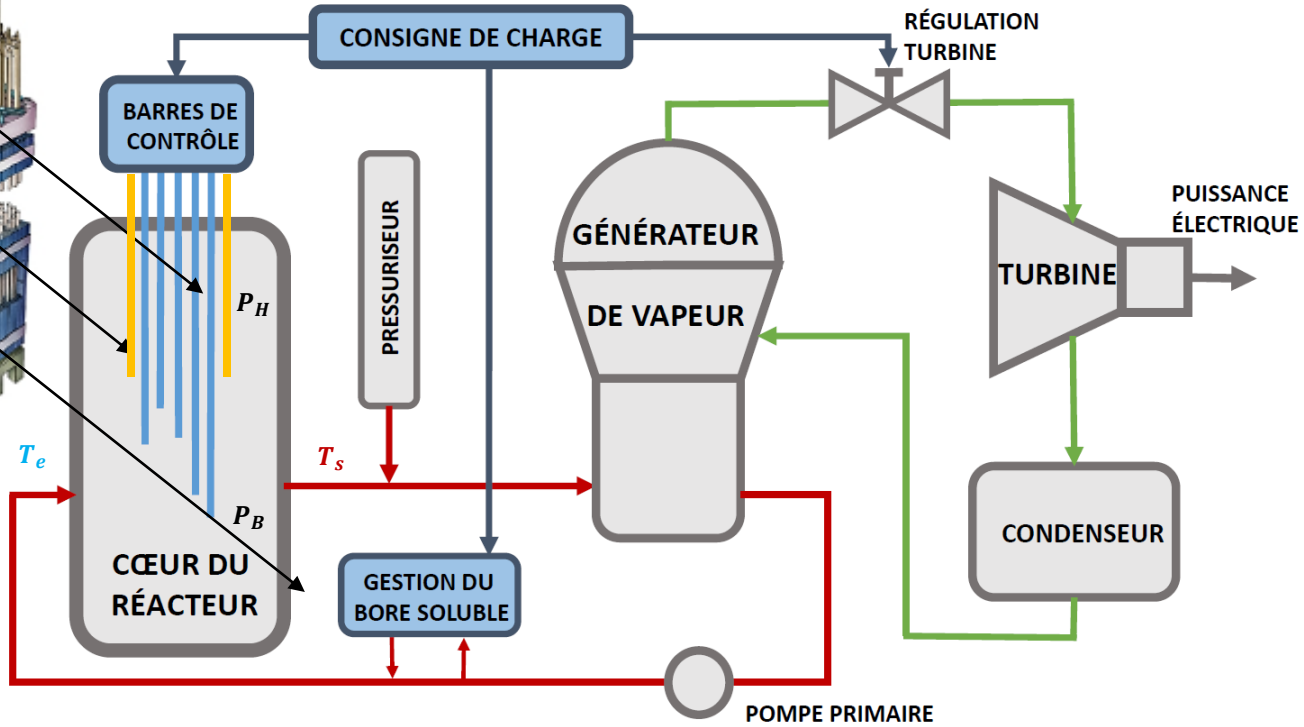
- Optimisation du suivi de charge à différents avancements
- Étude du cycle complet.
- Analyse qualitative des résulats

PARTIE 1 : MODÈLES

Trois moyens de contrôle :

- Groupe de compensation de puissance
- Groupe de régulation de température
- Bore soluble





Deux objectifs :

- Température :

$$T_m = \frac{T_s + T_e}{2}$$

- Déséquilibre axial de puissance:

$$DPAX = \frac{P_H - P_B}{P_{nom}}$$

MODÉLISATION : Réacteur + Système + Contrôle

Modèle physique du réacteur

Modèle du cœur du réacteur APOLLO3®

Température d'entrée

Puissance thermique Température de sortie

Modèle des circuits primaires et secondaires

Pilotage du réacteur

Déplacement des barres de contrôle

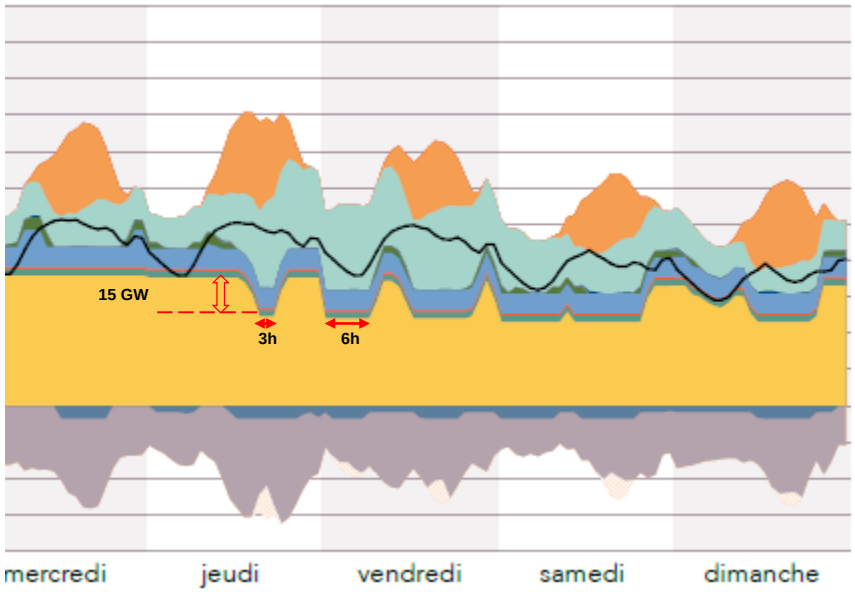
Variation de la concentration en bore

PARTIE 2 :

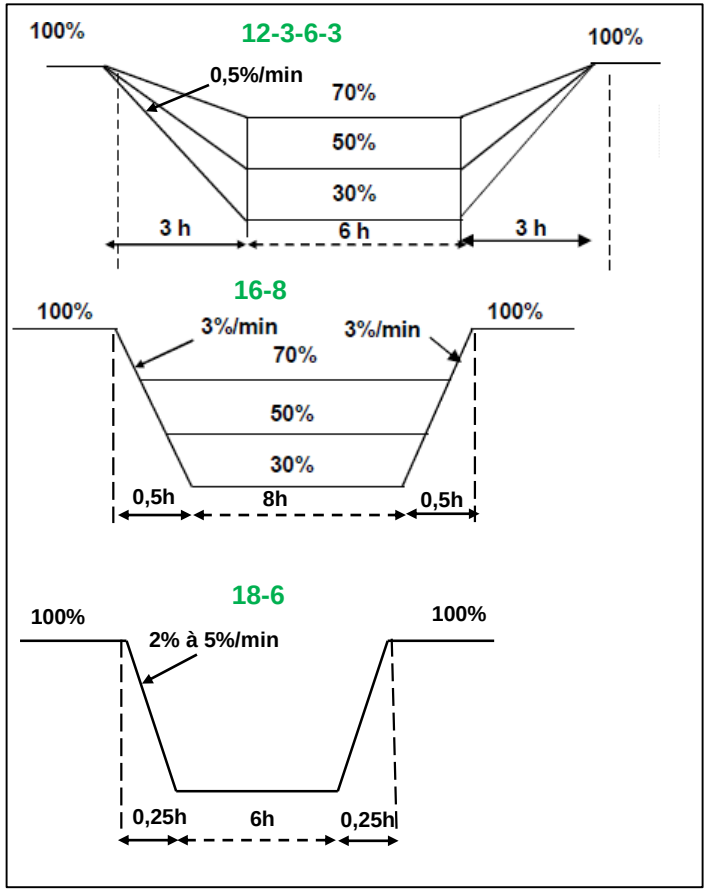
PRÉ-OPTIMISATION DU PILOTAGE

Définition du problème d’optimisation

DÉFINITION DU SUIVI DE CHARGE À OPTIMISER



+



- Amplitude de la variation de P
- Intervalle court entre les cycles de suivi de charge

⇒ Transitoire dynamique type 18-6 à 5%PN/min

Mouvement de barres de contrôle
⇒ perturbations axiales et radiales

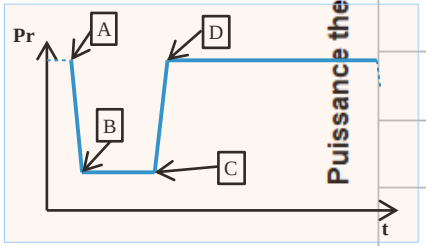
Objectif : réduction des perturbations axiales

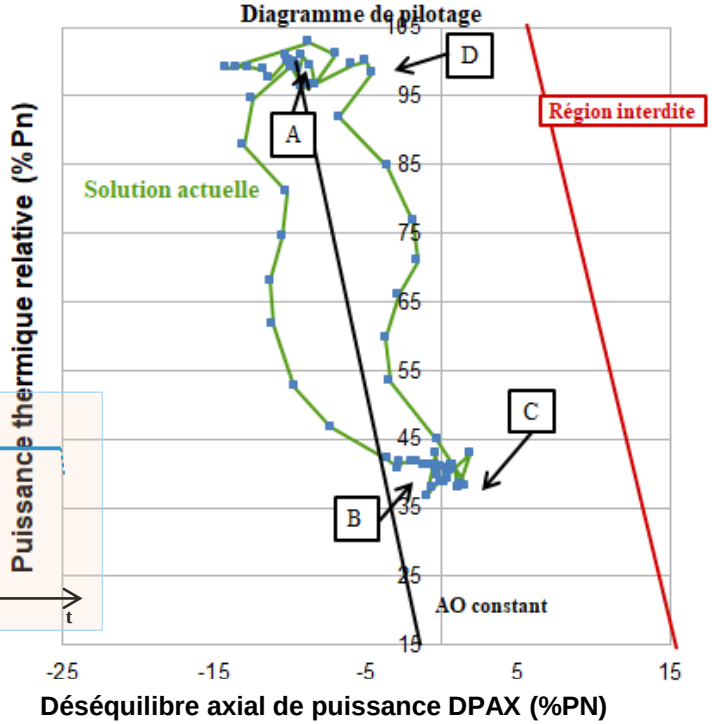
Utilisation du bore soluble
⇒ production d'effluents

Objectif : réduction du volume d'effluents

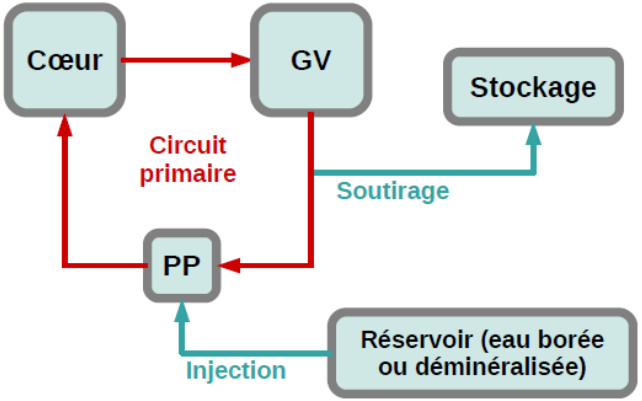
Aire de pilotage

DPAX=AO.Prel
où AO = PH-PB/P

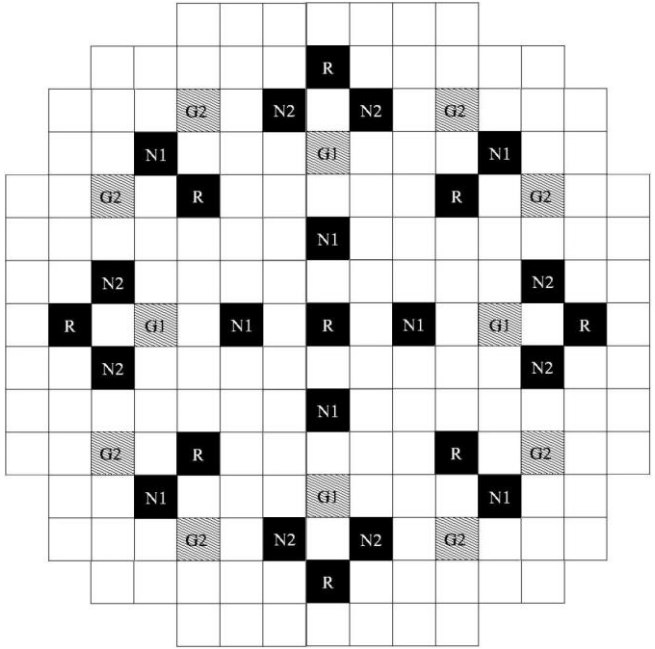




Veff



Réacteur : Palier 1300MWe (3800MW Pth)



Carte des groupes de grappes d'absorbant

Mode pilotage : G Mode

AUTOMATIQUE

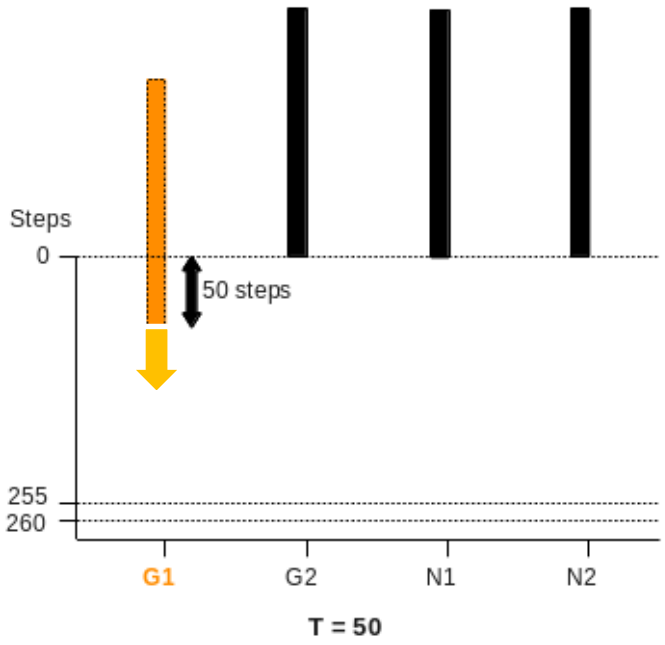
Groupe de Compensation de Puissance: G1 G2 N1 N2
-> vitesse des groupes, recouvrements

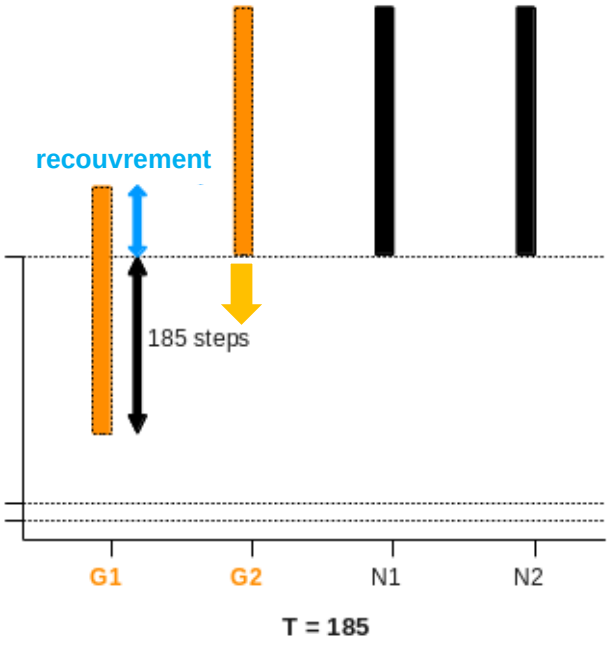
Groupe de régulation de Température: R
-> vmin et vmax, largeur de BM, bm Tmoy

MANUEL

Bore soluble:
-> Régulation de la Tm, régulation de l'AOP, …

Recouvrement entre groupes d'absorbants G1/G2





Déplacement du GCP à recouvrements constants

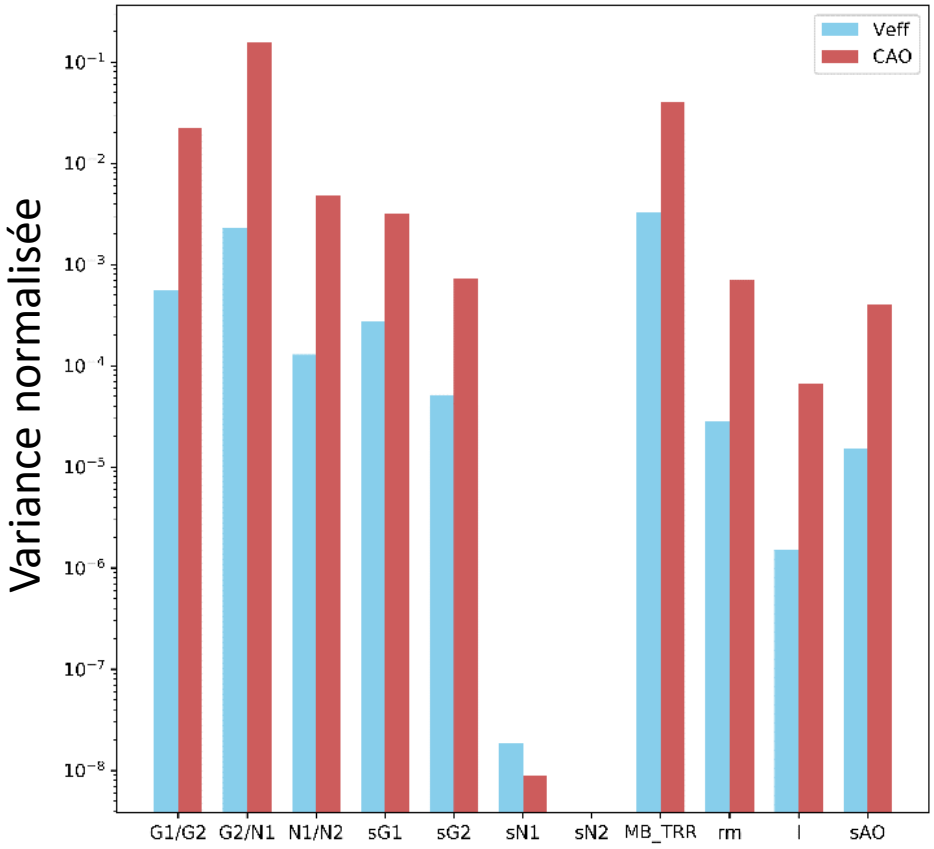
Étude du paysage de fitness

Définition :

1. Tirage d'un point aléatoire
2. Jusqu'à ce que tous les paramètres aient été modifiés 2 fois :
   a. Tirage d'un paramètre à modifier
   b. Tirage de la nouvelle valeur dans une bande définie (loi uniforme)
   c. Calcul du nouveau point

- 3 valeurs de la plage de mutation
- ~ 5000 points évalués

OPTIMISATION : VARIATION DES GRANDEURS D'INTÉRÊT



GCP
G1 et G2 : barres grises
N1 et N2 : barres noires

GRT
R : barres noires

Deux paramètres principaux :

- **Recouvrement entre G2 et N1**
- **Bande de manœuvre du GRT**

Problème d'optimisation

Paramètres :

- GCP : 3 recouvrements et deux vitesses
- GRT : bande de manœuvre

Taille : 10^{12}

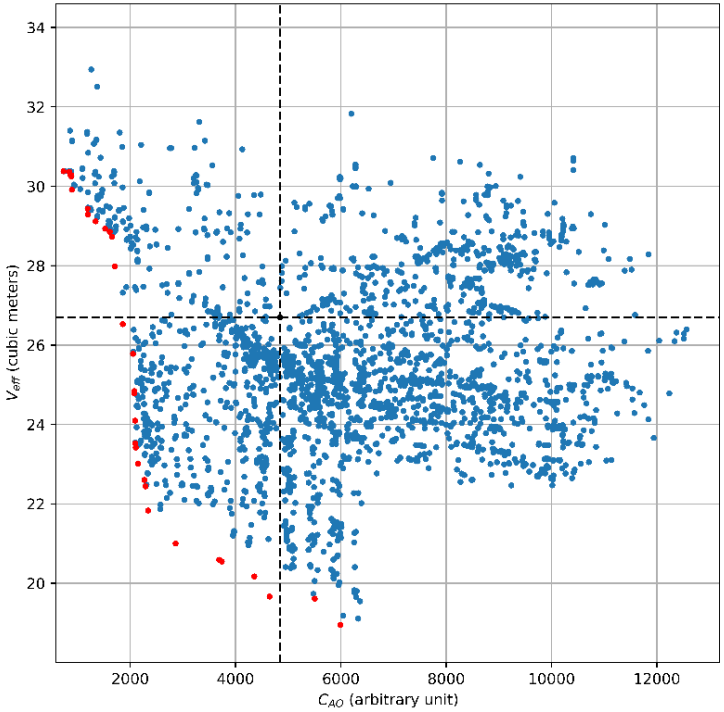
Objectifs :

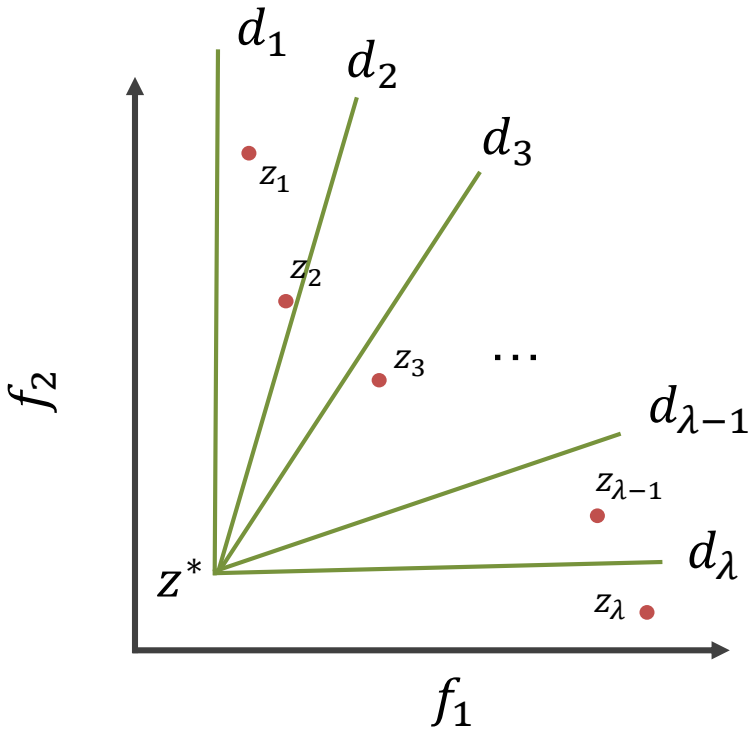
- Volume d'effluents v
- Stabilité axiale i

Contraintes :

- Puissance linéique max
- Marge d'arrêt

Marche aléatoire sur 9 paramètres



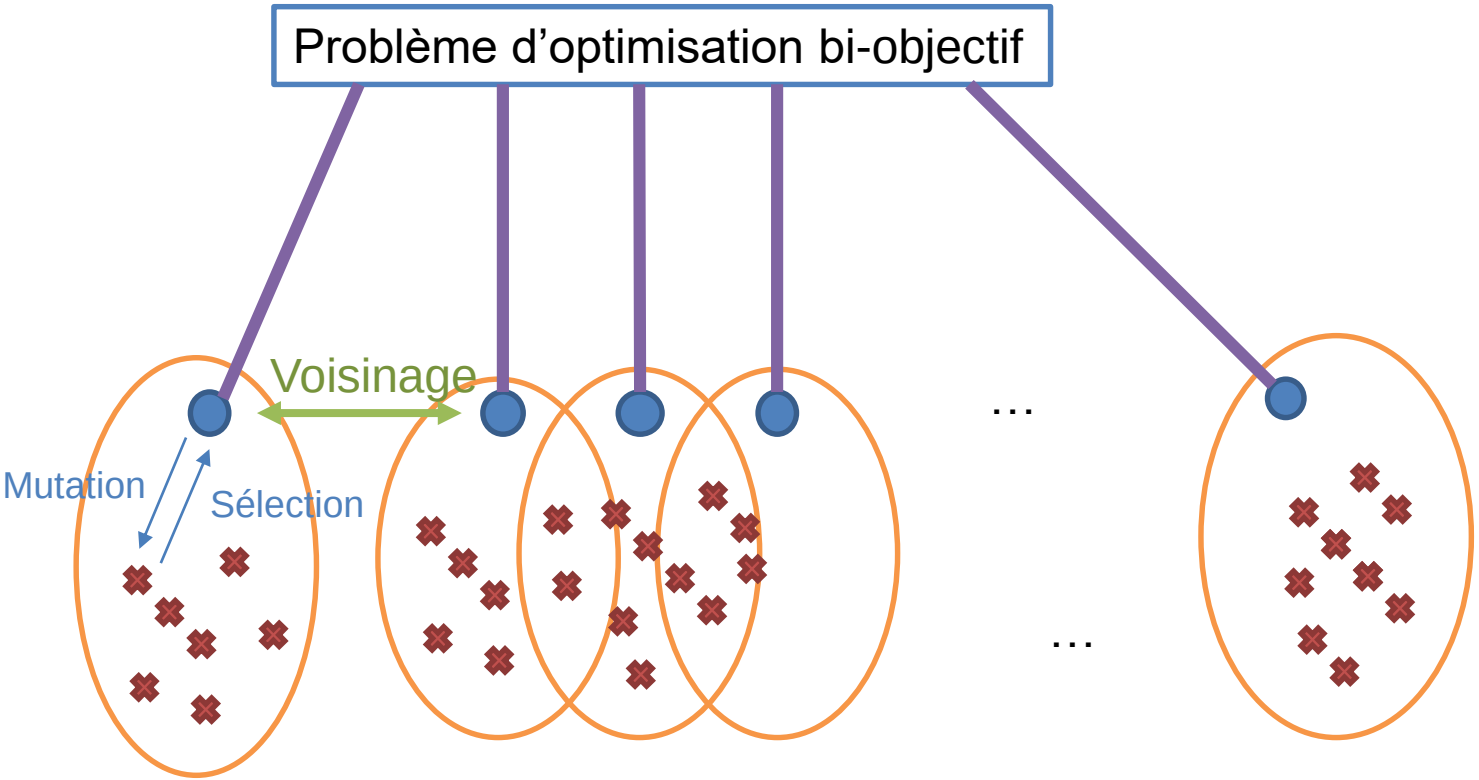


Découpage de l'espace objectif

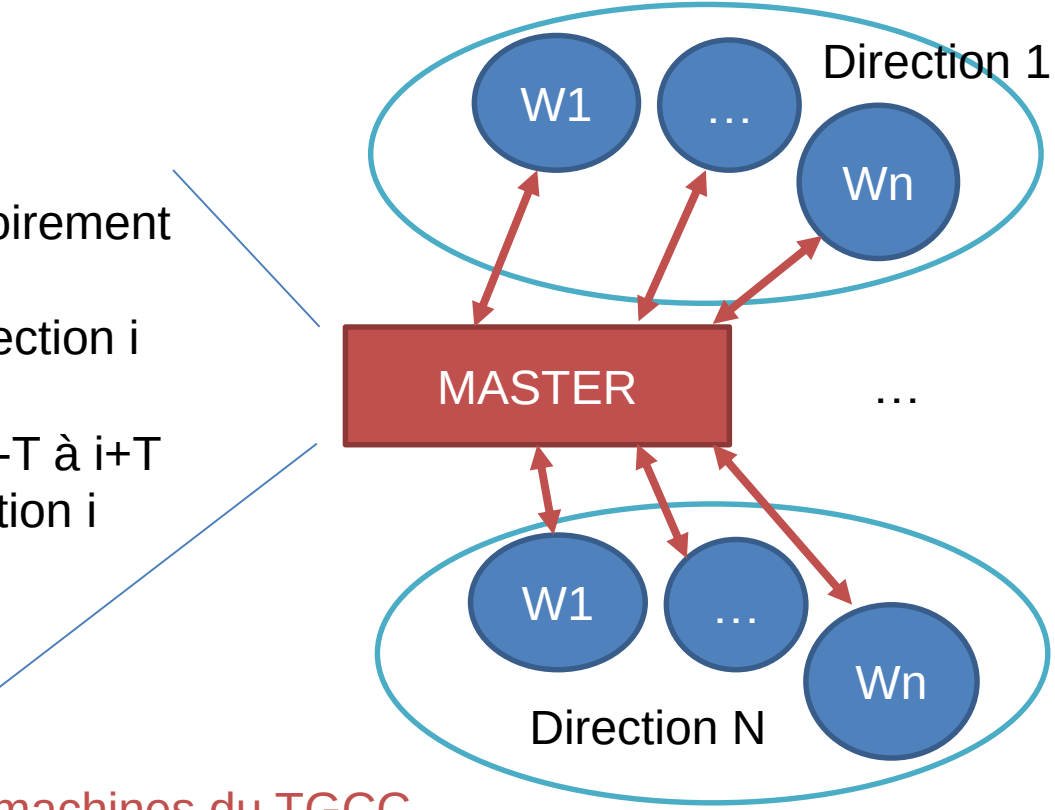
Directions

Solutions
Mono objectif

Exploration



1. Initialise chaque direction aléatoirement
2. While t<tmax :
    1. Reçoit un individu de la direction i
    2. Compare à la direction i
    3. Compare au voisinage de i-T à i+T
    4. Mute la solution de la direction i
    5. Renvoie le mutant



-> Implémenté en python sur les machines du TGCC.

PARTIE 2 :

OPTIMISATION DU PILOTAGE

Optimisation pour un avancement du cycle donné

OPTIMISATION : PROBLÈME POUR UN AVANCEMENT DONNÉ

Paramètres

Groupe de compensation de puissance :

- Recouvrements (x3)
- Vitesses max de G1 et G2

Groupe de régulation de température :

- Bande de manœuvre (x1)

Grandeurs d'intérêt

Stabilité : i

Intégrale de l'écart en DPAX

Coût : v

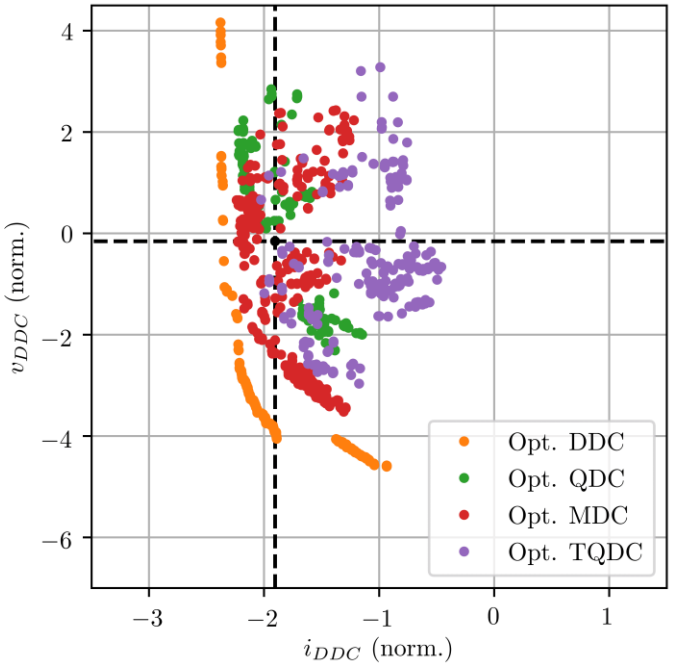
Volume d'effluents total

Sûreté :

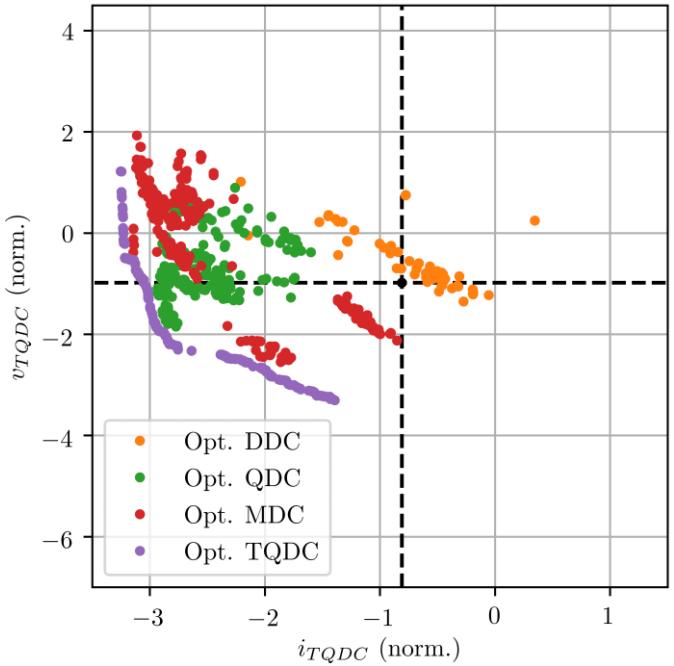
Contrainte sur la puissance linéique max

Contrainte sur la marge d'arrêt

Début du cycle d'exploitation…



… fin du cycle d'exploitation.



avec x(norm) = $x-\mu_{MA} / \sigma_{MA}$

Optimisation combinée cycle complet

Paramètres

Groupe de compensation de puissance:

- Recouvrements (x3)
- Vitesses max de G1 et G2

Groupe de régulation de température :

- Bande de manœuvre (x1)

Grandeurs d'intérêt

Stabilité : I

$$I = \max_{bu} i(bu)$$

i = intégrale de l'écart en DPAX

Coût : V

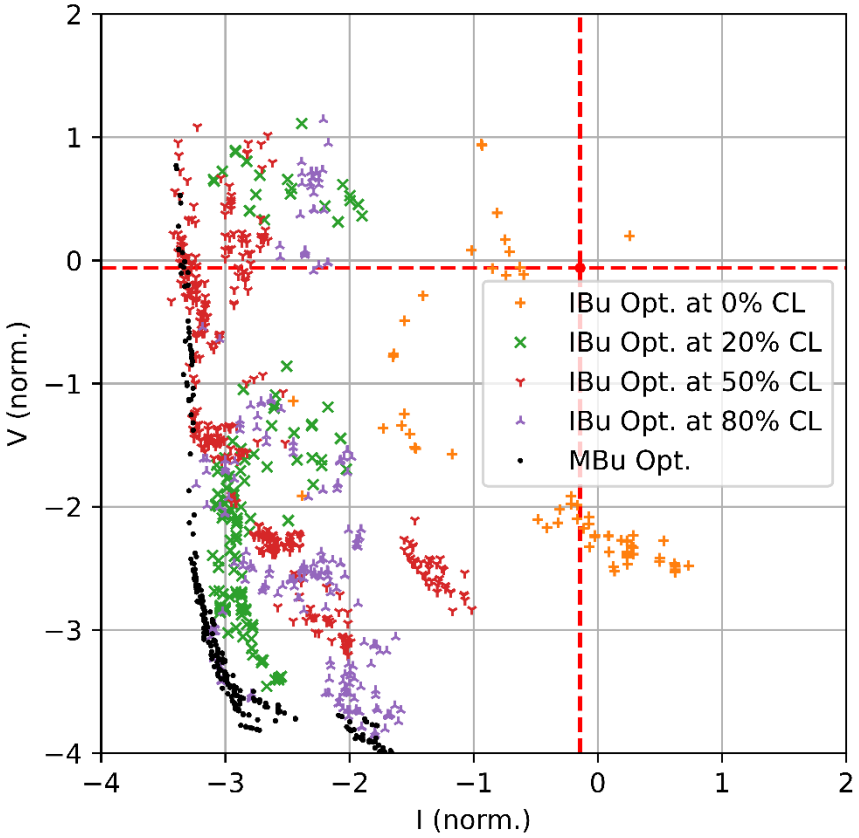
$$V = \frac{1}{\sum 1/v_{ref}(bu)} \sum_{bu} \frac{v(bu)}{v_{ref}(bu)}$$

Sûreté :

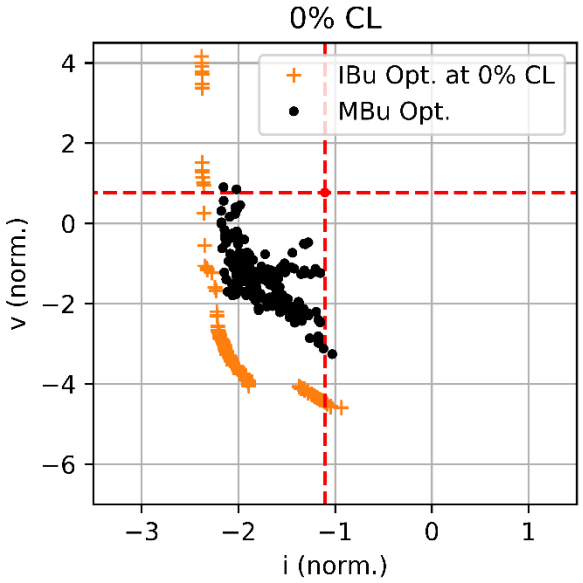
Contrainte sur la puissance linéique max

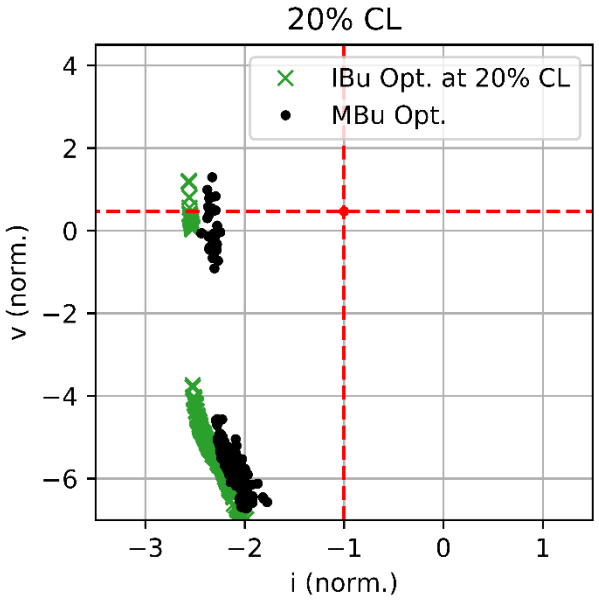
Contrainte sur la marge d'arrêt

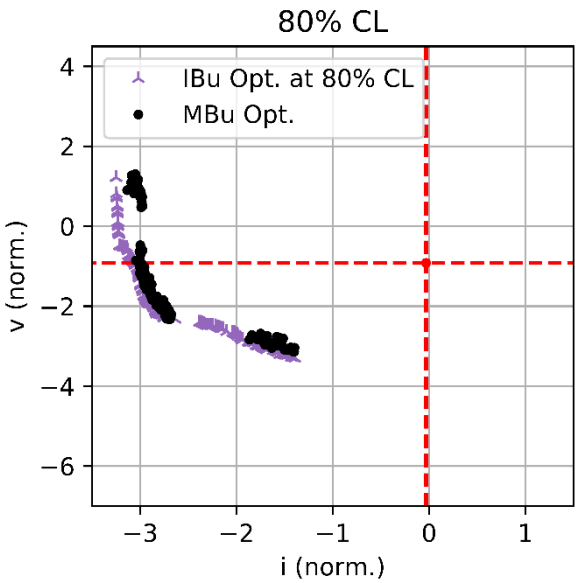
RESULTATS



CL= Avancement dans le cycle

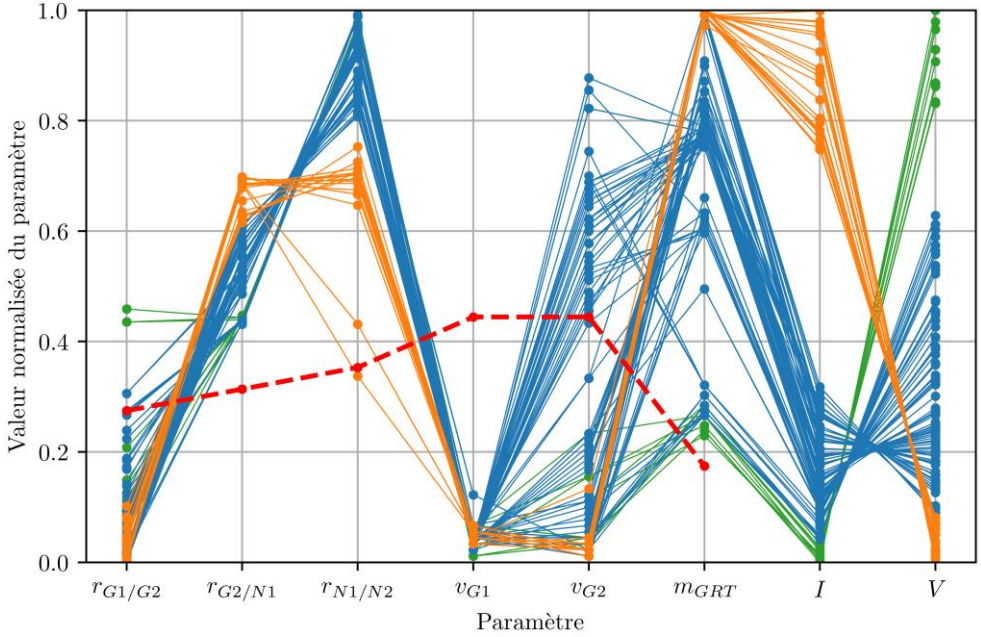




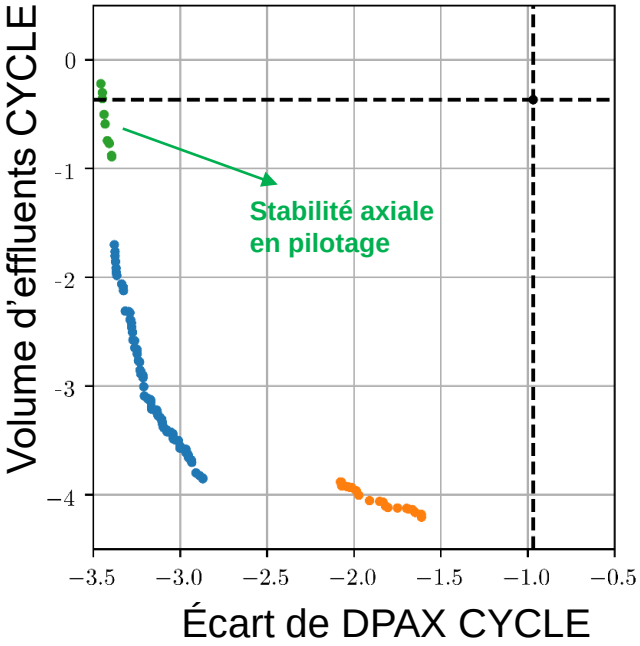


avec $x(\text{norm}) = x - \mu_{MA} / \sigma_{MA}$

Espace de recherche

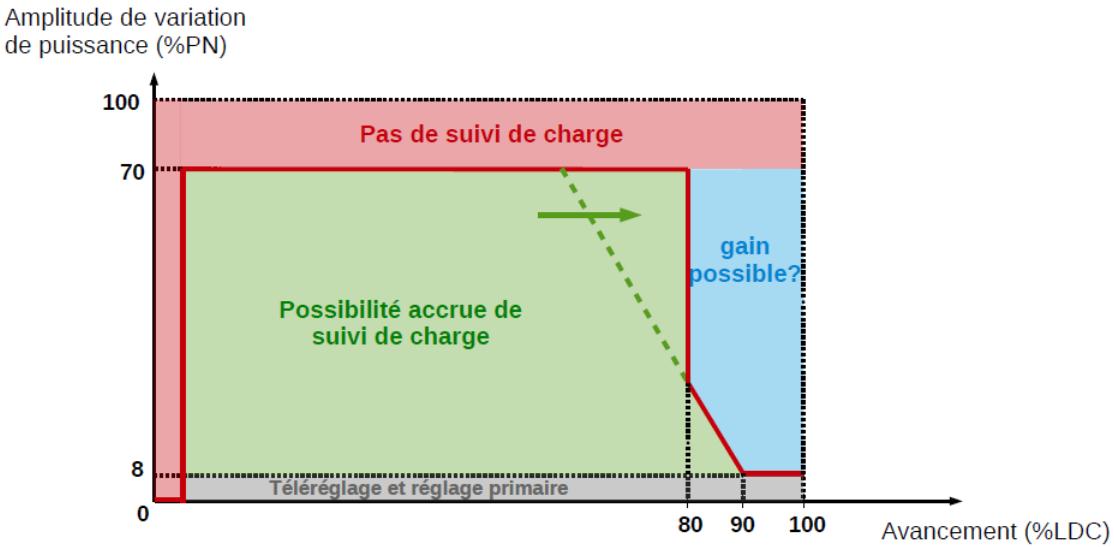


Espace objectif



CONCLUSION

- Existence de leviers de pilotage optimisés (**<u>en mode G</u>**) pour tous les avancements du cycle, qui produisent moins d'effluents et sont plus stables du point de vue de la distribution axiale de puissance.
- Possibilité d'extension de la capacité de suivi de charge pour un réacteur donné
- Possibilité d'avoir plus de capacité de suivi charge mobilisable dans les cas de la semaine estivale su scénario VOLT => <u>possible évitement de l'épisode d'énergie déversée</u>



Travaux réalisés (thèses 2014-2017):

- Mise en place d'un simulateur de pilotage de réacteur simplifié
- Une méthode pour améliorer l'efficacité du suivi de charge
- Résultats concrets sur les paramètres de barres
- Étude d'autres transitoires de puissance pour trouver des gestions applicable en exploitation

Travaux en cours (thèse 2020) :

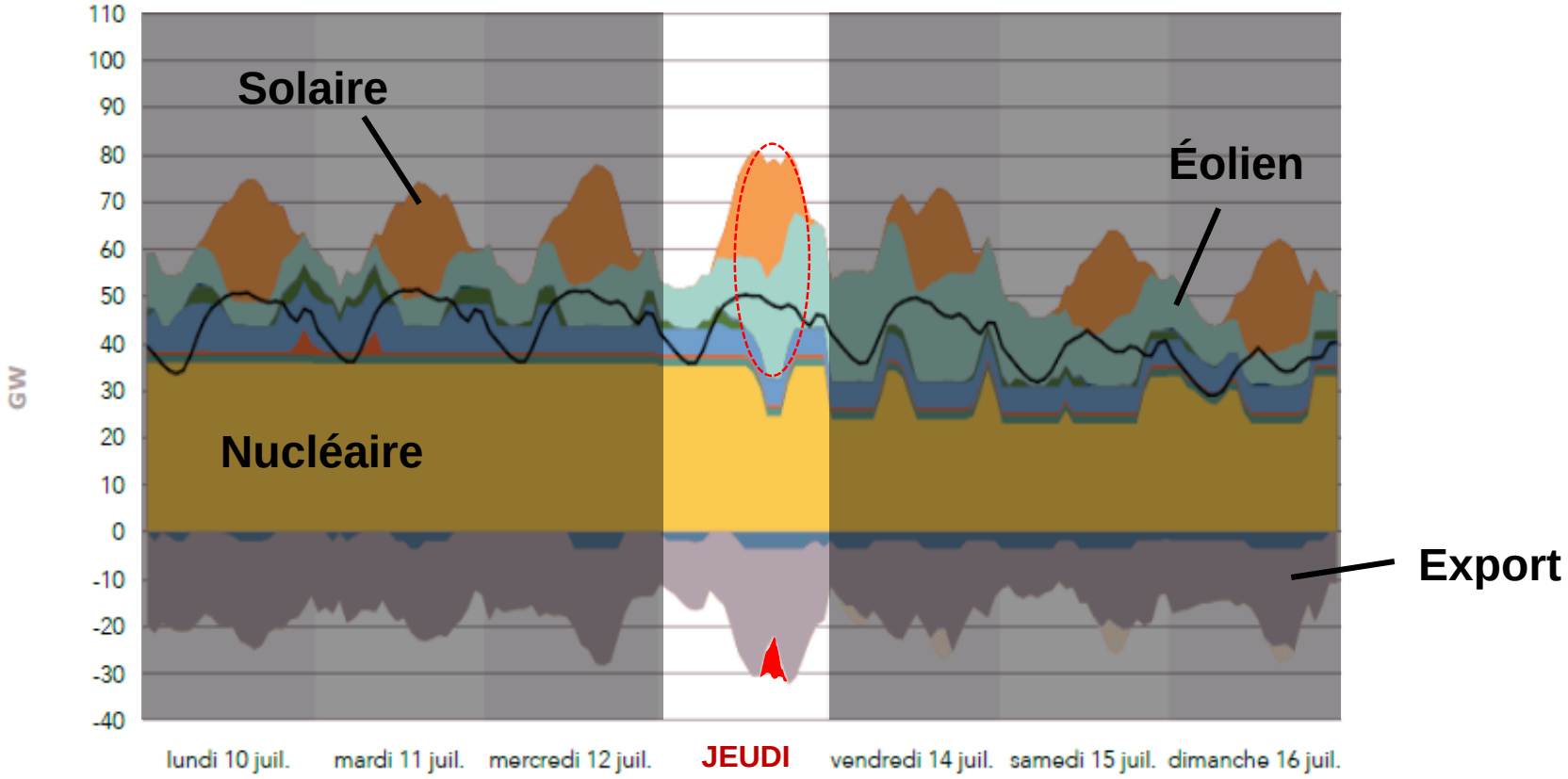
- Optimisation sur suivi de charge chainé
- Nouveau réacteurs, 900MW, 1300MW Mox (prise en compte des études de scenario)
- Optimisation sur un ensemble de clusters de réacteurs

References

1) RTE, *Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*, (2018).
2) H Golfier et al., *APOLLO3: a common project of CEA, AREVA and EDF for the development of a new deterministic multi-purpose code for core physics analysis*, M&C Saratoga Springs, May 3-7 2009.
3) H. Grard, "**Physique, fonctionnement et sûreté des REP** – Le réacteur en production", INSTN/EDP Sciences (2014)
4) Q. Zhang and H. Li "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition" in IEEE Transactions on evolutionary computation, volume 11, pp. 712-731 (2007)

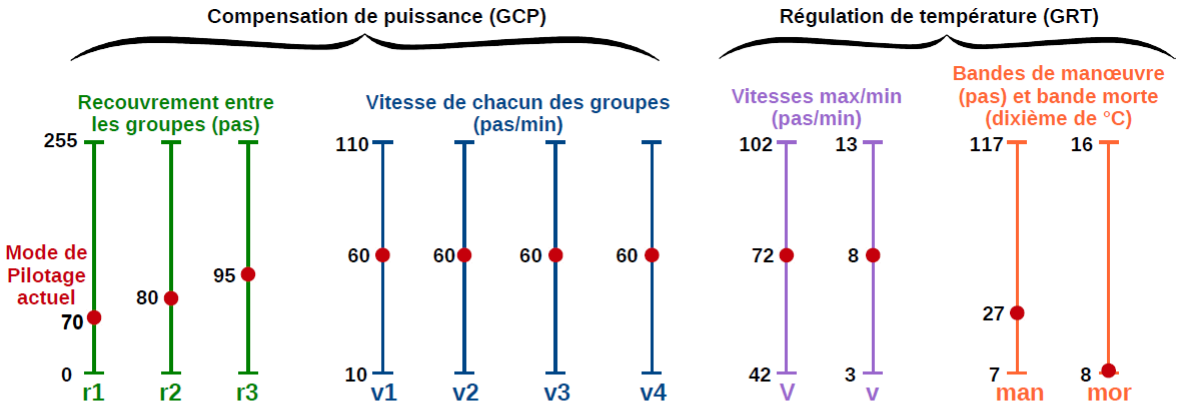
ANNEXES

CONTEXTE ET OBJECTIFS : scénario VOLT



Source : RTE - BP2017

Prévisions RTE pour une semaine type de l'été 2035 (Scénario VOLT)



- Choix de leviers **discrets** permettant de rester **proche du mode de pilotage actuel**
- Intégration des **contraintes logiques et technologiques**
- Très grand nombre de solutions potentielles (≈ $8*10^{20}$)
- Résolution par **essai/erreur** :
  - **Avis d'expert** intuitif (long et nécessite une bonne connaissance de l'objet)
  - Automatisé par un **algorithme de recherche** (générique et parallélisable)

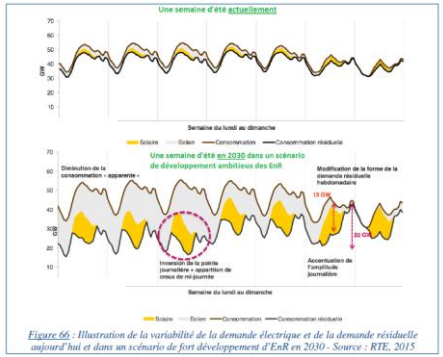


Figure 66 : Illustration de la variabilité de la demande électrique et de la demande résiduelle aujourd'hui et dans un scénario de fort développement d'EnR en 2030 - Source : RTE, 2015

+

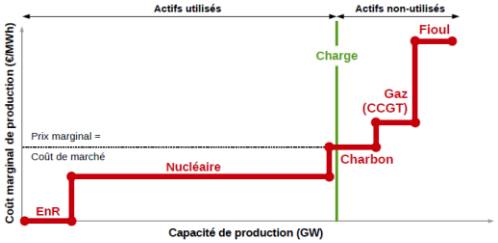
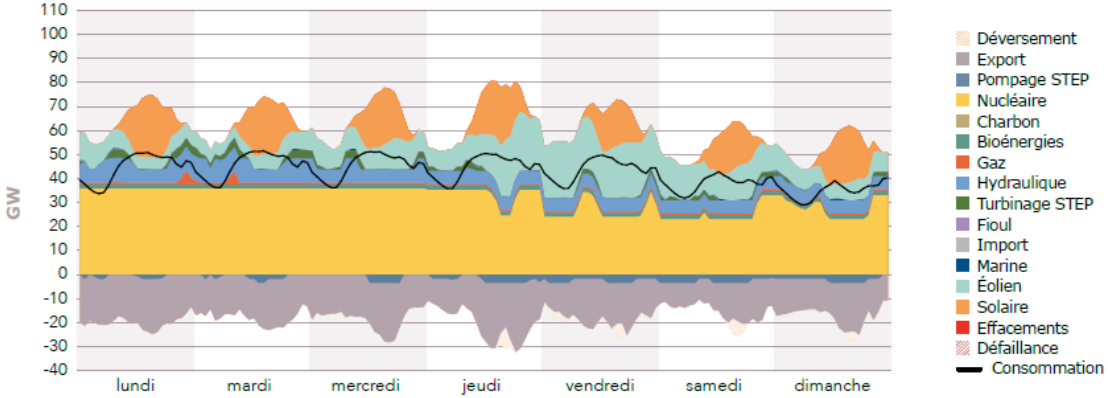


FIGURE 1.7 – Principe de l'ordre de mérite des actifs de production, et détermination du coût de l'électricité.

Figure 8.24 Illustration de la production sur une semaine estivale – *2035 – scénario Volt*



Forte sollicitation des moyens pilotables :

P hydraulique et **P nucléaire** ↗ **et** ↘

<u>Pas suffisant pour empêcher du déversement…</u>

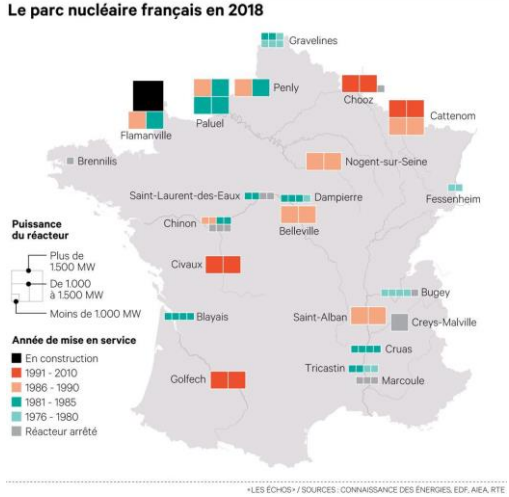
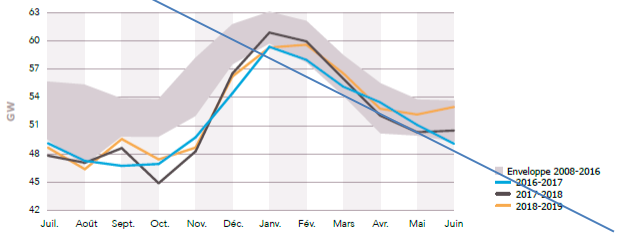


Figure 3.12 Disponibilité du parc nucléaire considérant uniquement les arrêts programmés hors visites décennales (2008-2019)



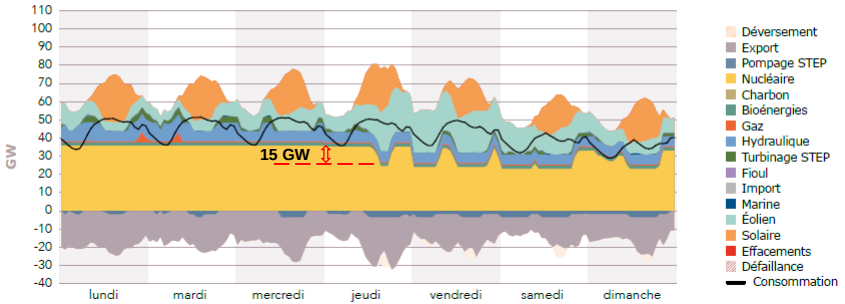
Evolution en 2035 :

23 paliers 900MW, 21/23 ont été construit entre 1974 et 1985.

- Indisponibilité grandissante (arrêt rechargement ou fortuit, visite décennale)
- Modulation de puissance limitée ⇐ usure de la cuve du réacteur, (cyclage thermique, fluence)

8 paliers 1450MW, mais fonctionne en base du fait de leur mode de pilotage non adapté

Figure 8.24 Illustration de la production sur une semaine estivale – *2035 – scénario Volt*

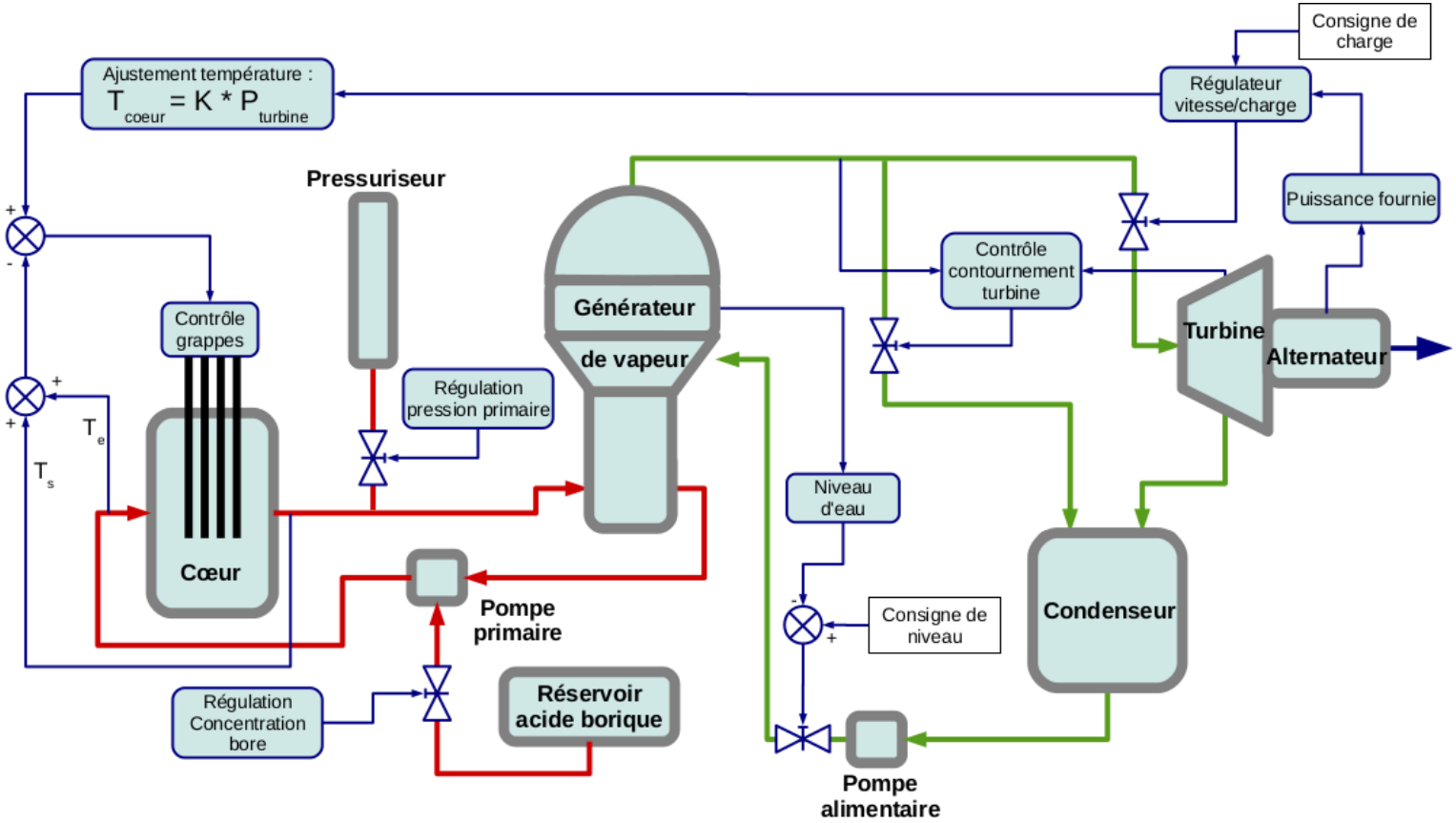


⇒ Effort de modulation de 15 GW reposera sur les 20 paliers 1300MW plus récents (1985-1994).

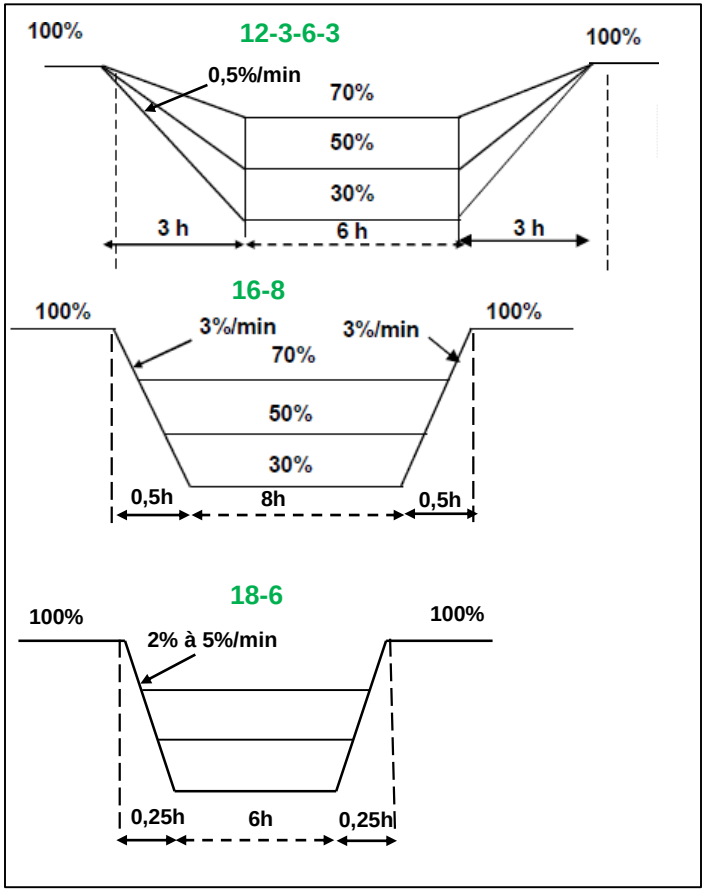
Parc français

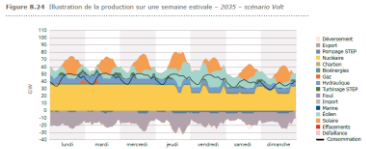
Palier	Puissance électrique	Gestion combustible		Mode de pilotage
CP0 (6)	900MW	Cyclades (1/3, 4,2%, 15 mois)		A
CP1, CP2 (28)	900MW	1/4, 3,7%, 12 mois (8)	Hybride MOX (20)	G
P4, P'4 (20)	1300MW	Gemmes (1/3, 4% + Gd, 18 mois)		G
N4 (4)	1450MW	Standard (1/4, 3,4%, 12 mois)		A

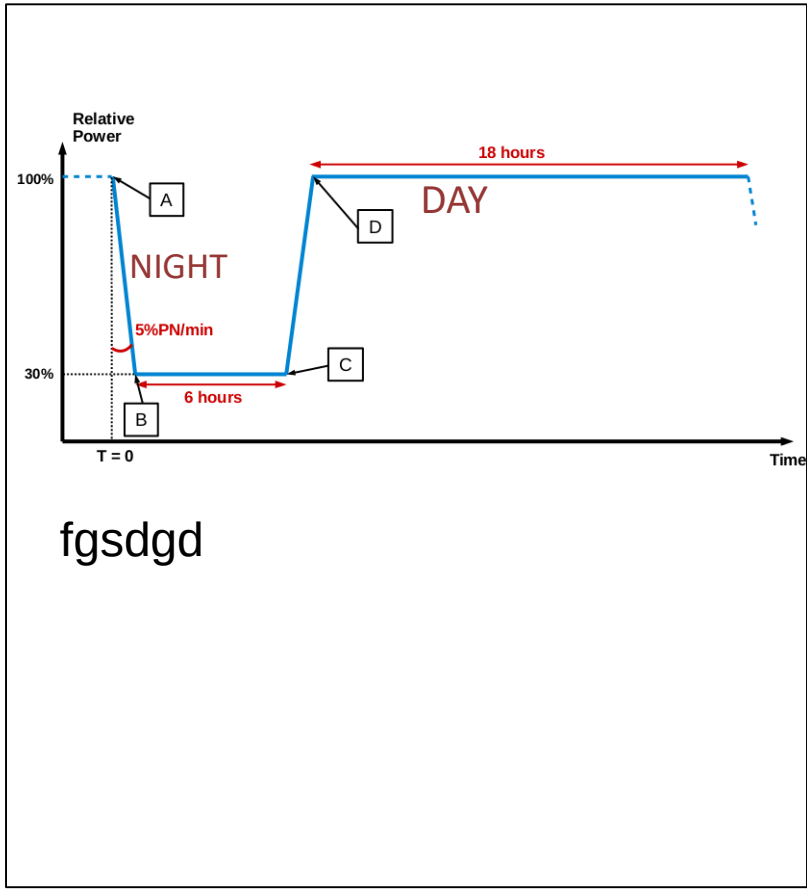
MODÉLE : CADRE GENERAL



CAS D'ÉTUDE: SCÉNARIO DE SUIVI DE CHARGE







PLAN

1. Contexte et objectifs

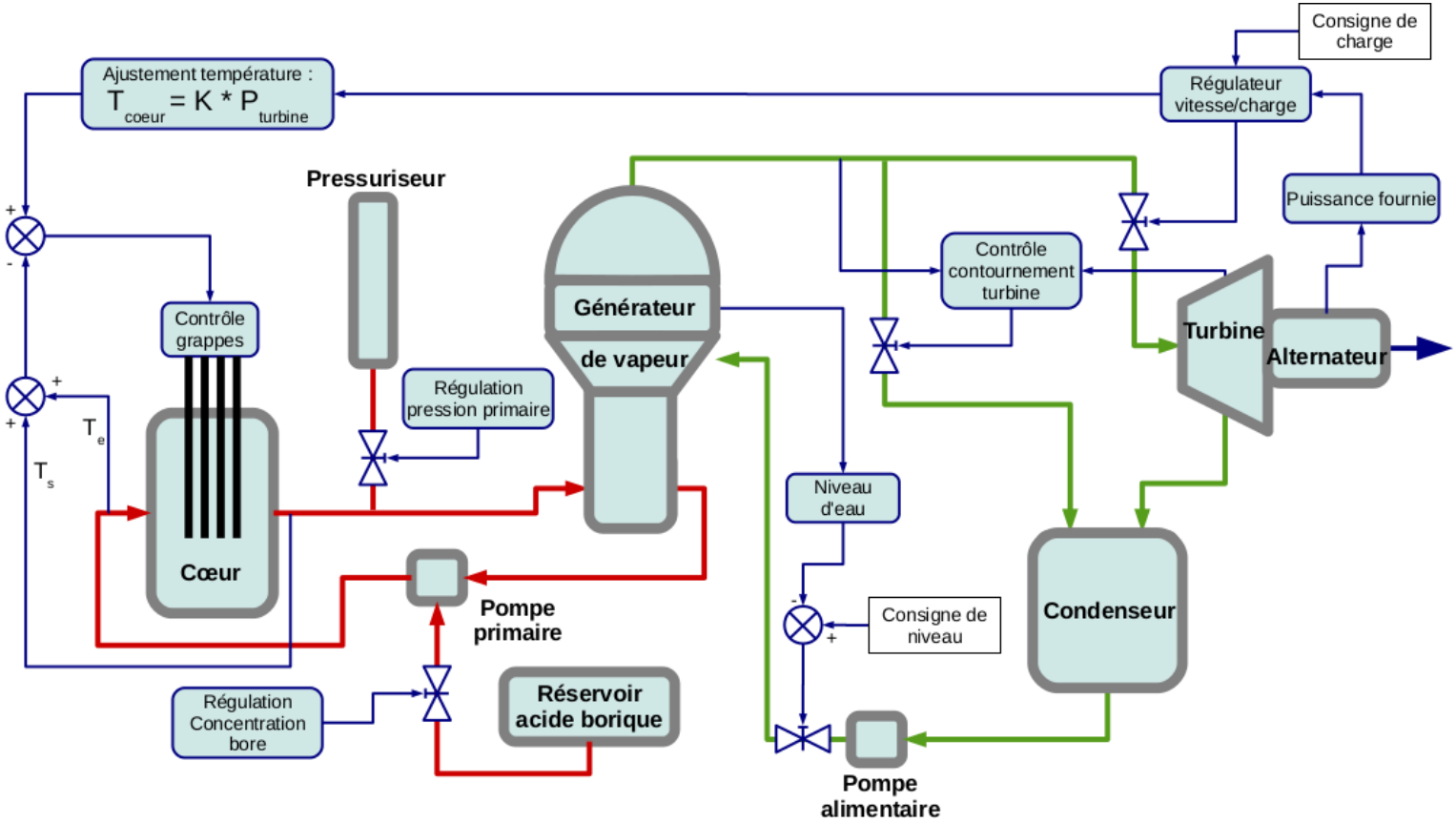
MODÈLE

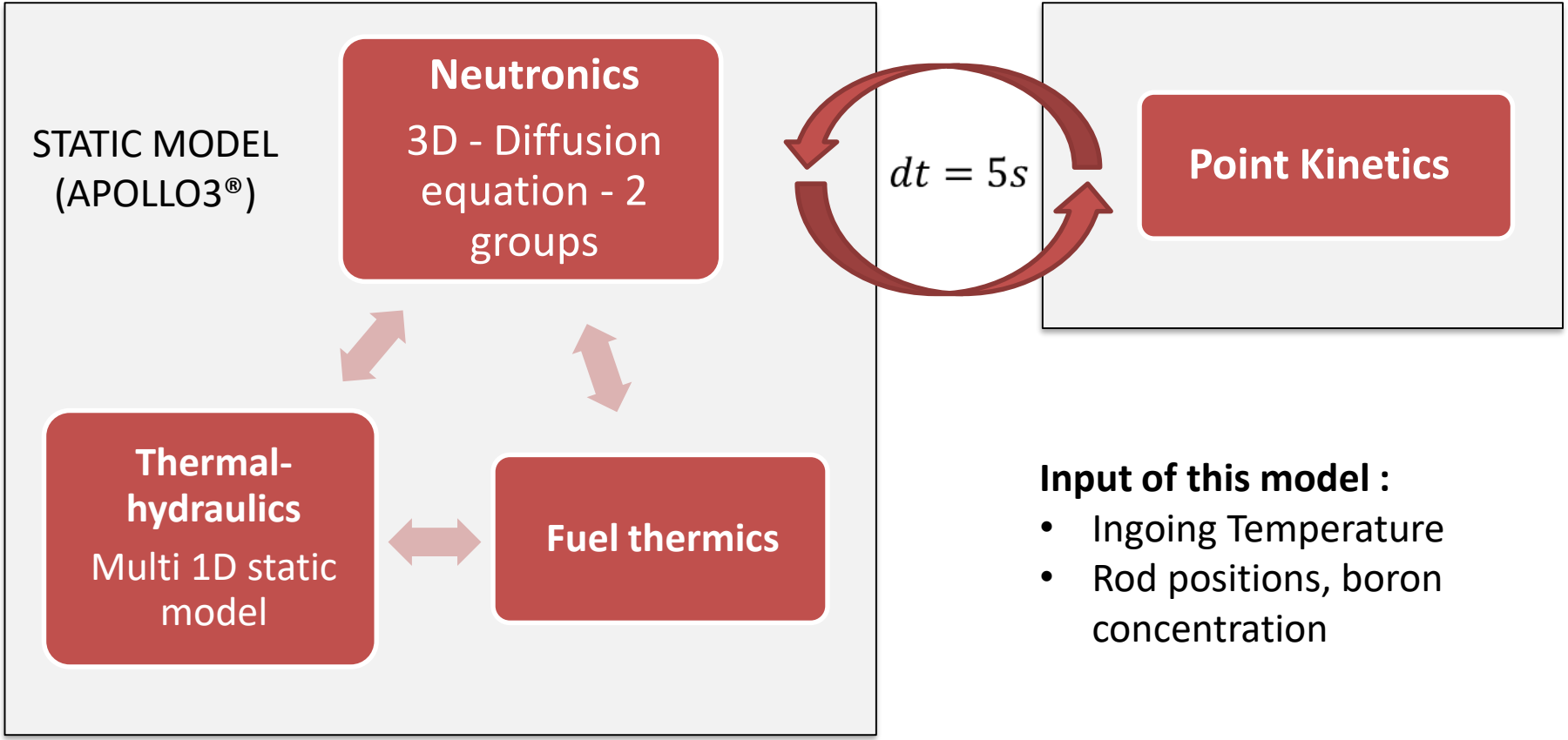
2. Cas d'étude
3. Modèle de réacteur

OPTIM.

4. Problème d'optimisation
5. Optimisation par l'algorithme AMW-MOEA/D
6. Prise en compte du cycle complet

MODÉLISATION : CADRE





Input of this model :

- Ingoing Temperature
- Rod positions, boron concentration

Electrical Power (Pe)

On-site measured data

Steam flow calculation $$Q_s = \frac{P_e}{\eta(h_s - h_i)}$$

Steam temperature calculation $$\Delta\rho = (Q_{prod} - Q_s)\frac{\Delta t}{V_{SG}}$$

Core Model

Temperature

Power

Steam Generator Power $$P_{SG} = H_s(P_{th})(T_m - T^{sat})$$

Power Balance : $$\Delta T_i = \frac{1}{mC_p}(P_{th} + P_p - P_l - P_{SG})\Delta t$$

Sens utilisé durant la phase de calib

Cœur

3D - Diffusion equation - 2 groups – Point kinetics

APOLLO3®

Secondaire

Modèles 0D de la boucle primaire et des GV

Modèle d'opérateur

Consignes barres et bore

V. Drouet, J.M. Do, S. Verel « Design of a simulator oriented PWR model and optimization of load-follow operations », ICAPP 2019

	intDT	fqMax	plinMax	Veff	pasGRT	IPG	intDPAX
intDT	1.0	0.81	-0.52	-0.19	0.61	0.08	0.48
fqMax	0.81	1.0	-0.31	0.0	0.29	-0.09	0.67
plinMax	-0.52	-0.31	1.0	-0.09	-0.26	0.17	0.23
Veff	-0.19	0.0	-0.09	1.0	-0.8	-0.89	-0.03
pasGRT	0.61	0.29	-0.26	-0.8	1.0	0.73	0.16
IPG	0.08	-0.09	0.17	-0.89	0.73	1.0	-0.13
intDPAX	0.48	0.67	0.23	-0.03	0.16	-0.13	1.0

TABLE 4 – Corrélations de Spearman entre les objectifs

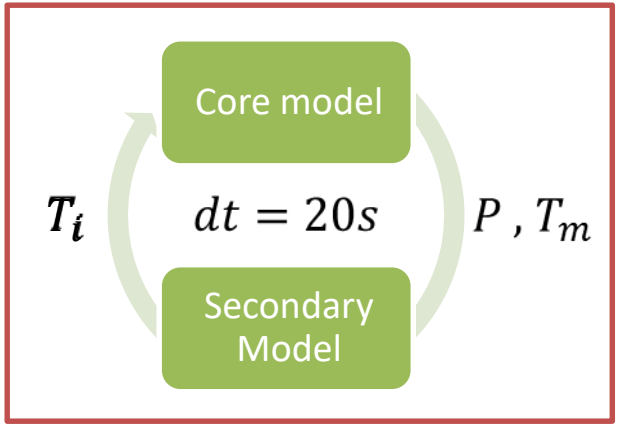
- Veff et GRT sont anti-corrélés
- Critère IPG et Veff sont anti-corrélés
- Critère IPG et pas GRT sont corrélés
- intDPAX et fqMax sont corrélés positivement

$\Rightarrow$ Deux groupes d'objectifs indépendants

- (pasGRT, IPG) autour du Veff, noté $\boldsymbol{v}$
- (intDT, fqMax, Plinmax) autour du critère axial intDPAX, noté $\boldsymbol{i}$

while $t < t_{max}$:

1. Update electrical power
2. Update poisons (Xe, Sm)
3. Update control rods and soluble borons
4. Compute new core state :



5. Compute objectives and constraints

Développement d'une stratégie de pilotage

Machine Irene du TGCC, Nœud SKL : Intel Xeon 8168 2:7GHz CPU

Optim IBu : 5 runs / 3024 procs / 12h => 750 000 h cpu et 200 000 évaluations / run

Optim MBu : 5 runs / 1024 procs / 10h => 50 000 h cpu et 30 000 évaluations /run