

# Programme Gaspard Monge pour l'Optimisation et la recherche opérationnelle

Groupe de Travail « Optimisation journalière,  
infra-journalière et coûts marginaux »

Description du problème

van Ackooij Wim, Doukopoulos Grace, Triboulet Thomas  
EDF R&D, département OSIRIS

# Table of Contents

1.	Context	4
2.	Introduction	4
3.	Global Constraints	5
3.1.	Coupling constraints	5
4.	Constraints on thermal Assets	5
4.1.	Level 1 constraints :	5
4.1.1.	Contraintes statiques	5
4.1.1.1.	Decision variables	5
4.1.1.2.	Feasible power levels	5
4.1.1.3.	Primary / Secondary production levels	6
4.1.1.4.	Low, high and intermediate levels	7
4.1.2.	Dynamic constraints	7
4.1.2.1.	Some Definitions	7
4.1.2.2.	Minimum running time	7
4.1.2.3.	Minimum offline time	7
4.1.2.4.	Gradient	8
4.1.2.5.	Modulation and stability	8
4.1.2.6.	Minimum « stable » state duration	10
4.1.2.7.	Stopping curves	10
4.1.2.8.	Starting curves	10
4.1.2.9.	Maximal number of starts	11
4.1.2.10.	Maximal number of modulations	11
4.2.	Level 2 Constraints	12
4.2.1.	Serious power output drop	12
4.2.2.	Additional system services state : R <sub>pmax</sub>	12
4.2.3.	Change of system services	12
4.2.4.	Minimum duration for system services	12
4.3.	The objective function	12
4.3.1.	Level 1 Constraints implied elements	12
4.3.1.1.	Fixed and proportional productions costs	12
4.3.1.2.	Starting costs	13
4.3.2.	Level 2 Constraint implied elements	13
4.3.2.1.	system services change costs	13
4.3.2.2.	Modulation costs	13
5.	Constraints on Hydro Assets	13
5.1.	Static constraints	14
5.1.1.1.	Decision variables	14
5.1.1.2.	Feasible power levels	14
5.1.1.3.	Volume bounds	15
5.2.	Dynamic constraints	15
5.2.1.	Flow constraints	15
5.2.2.	Production constraints	16
5.2.2.1.	Gradient	16
5.2.2.2.	Minimal delay	16
5.2.2.3.	Turbines/pumps constraints	16
5.3.	Cost function	17

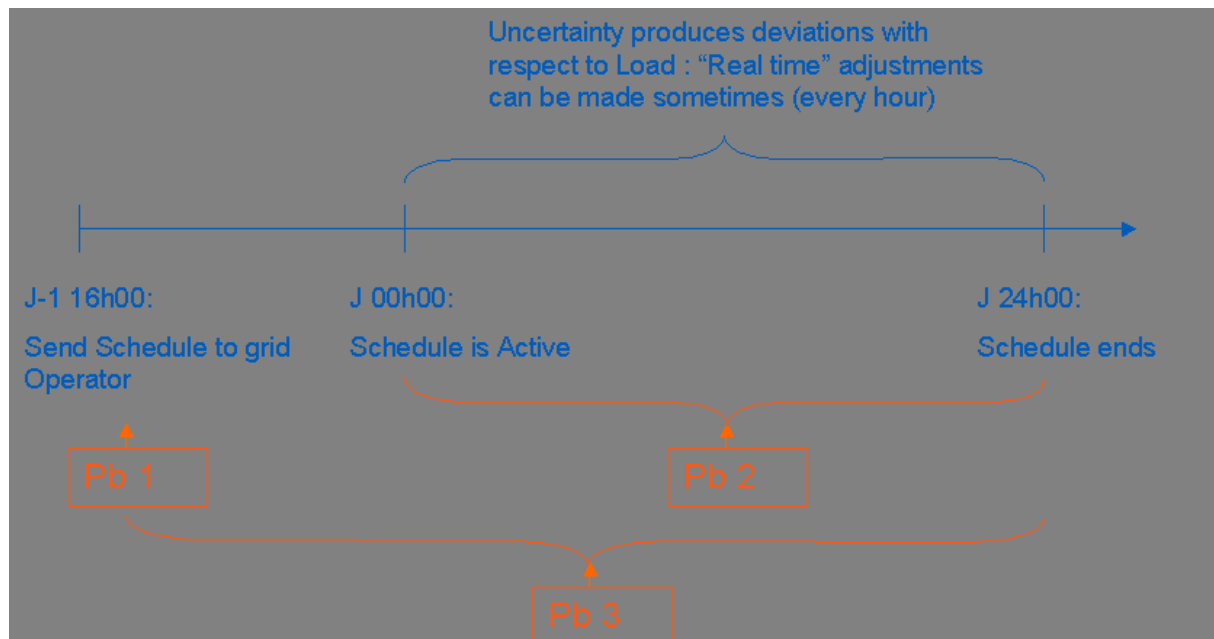
5.3.1.	Flow change cost	17
5.3.2.	Water values	17
6.	Contexte	18
7.	Introduction	19
8.	Contraintes Globales	19
8.1.	Contraintes Couplantes	19
9.	Les Contraintes des Actifs Thermiques	19
9.1.	Les contraintes de niveau 1 :	19
9.1.1.	Les Contraintes statiques	19
9.1.1.1.	Variables de décision	19
9.1.1.2.	Niveaux de puissance admissibles	20
9.1.1.3.	Niveaux de production primaire et secondaire	20
9.1.1.4.	Intervalles basse, intermédiaire, haute	21
9.1.2.	Contraintes dynamiques	22
9.1.2.1.	Définition de la durée de marche, durée d'arrêt	22
9.1.2.2.	Temps minimum de fonctionnement	22
9.1.2.3.	Temps minimum d'arrêt	22
9.1.2.4.	Gradient	22
9.1.2.5.	Modulation et palier	23
9.1.2.6.	Contrainte de durée min de palier	24
9.1.2.7.	Courbes d'arrêts	24
9.1.2.8.	Courbes de démarrages	24
9.1.2.9.	Nombre maximum de démarrages	25
9.1.2.10.	Nombre maximum de modulations	25
9.2.	Contraintes de niveau 2	26
9.2.1.	Nombre maximum de baisses profondes	26
9.2.2.	Etat de service système supplémentaire : R <sub>pmax</sub> .	26
9.2.3.	Changement de services systèmes	26
9.2.4.	Durée minimum d'état de services systèmes	26
9.3.	La fonction objectif	26
9.3.1.	éléments issues d'une modélisation de niveau 1	26
9.3.1.1.	Coût proportionnel et coût fixe	26
9.3.1.2.	Coût de démarrage fonction du temps d'arrêt	27
9.3.2.	éléments issues d'une modélisation de niveau 2	28
9.3.2.1.	Coûts service système	28
9.3.2.2.	Coût de modulations	28
10.	Les contraintes Hydrauliques	28
10.1.	Les contraintes statiques	28
10.1.1.1.	les variables de décision	28
10.1.1.2.	Les niveaux de puissance admissible	29
10.1.1.3.	Bornes sur les volumes	29
10.2.	Contraintes dynamiques	29
10.2.1.	Contraintes de flots	29
10.2.2.	Contraintes de production	30
10.2.2.1.	Gradient	30
10.2.2.2.	Temps minimum	31
10.2.2.3.	Contraintes de pompage / turbinage	31
10.3.	Fonction objectif	31
10.3.1.	Flow change cost	31
10.3.2.	Valeurs d'usages	31

# 1. Context

EDF wishes to reinvestigate its unit-commitment problems. The latter is actually "three" problems or can be seen as elements of a single problem.

- The traditional unit-commitment problem tries to determine the optimal production planning, that minimizes global costs (production and starting costs) while satisfying various loads. These loads include physical customer load, reserved capacity and system services. Operational constraints include constraints on thermal assets and hydraulic production. This problem can also be seen as the here-and-now decision variables in a recourse problem, i.e., we have to determine the reference planning.
- The intra daily unit-commitment problem consists of a variant of the previous problem. We have to determine a planning that minimally deviates from the reference planning but adapts to new forecasts (customer load, system services, etc...) Minimal deviation means that only a limited number of (groups of) units can be redeclared. This problem has to be solved approx. each hour. We can see this problem as the recourse-variables in a recourse problem.
- In reality, unit commitment is a recourse problem. First the reference planning has to be determined. Once this has been done, recourse decisions can be taken. Recourse can sometimes be costly and forecasts for the main uncertainty factors are available.

The following operational time line shows how the "three" unit commitment problems link together :



Throughout this document the monetary unit will be "electrum pieces", a fictitious monetary unit. We will adopt the symbol  $\wp$  for it.

# 2. Introduction

This document details the constraints of the optimization problem. We will distinguish constraints by level. The level of the constraints indicates its priority. As such, level 1 constraints have to be taken into account. Level 2 constraints are for advanced modelling, etc...

### 3. Global Constraints

We recall that we consider a time horizon of 96 time steps, each time step being identical to 30 minutes.

#### 3.1. Coupling constraints

- Offer-demand equilibrium constraint : At each time step, the sum of production of each production unit (thermal or hydro) and some penalized slacks should be equal to customer load at that time step.
- Primary equilibrium constraint : At each time step the sum of reserved capacity for primary production (hydro or thermal) and some penalized slacks should be superior or equal to primary load at that time step
- Secondary equilibrium constraint : At each time step the sum of reserved capacity for secondary production (hydro or thermal) and some penalized slacks should be superior or equal to secondary load at that time step

Alternative formulations here could be that the absolute difference between the sum of production and customer load should remain smaller than some threshold. Slacks with respect to this constraint could be penalized.

### 4. Constraints on thermal Assets

Static constraints are all constraints valid on a single time step. Dynamic constraints are all constraints linking adjacent time steps.

#### 4.1. Level 1 constraints :

##### 4.1.1. Contraintes statiques

###### 4.1.1.1. Decision variables

Each thermal asset contributes to the global offer-demand equilibrium by means of 3 variables:

- produced power (MW) : contributes to satisfy global offer-demand equilibrium with customer load
- primary production level (MW) : reserved capacity for primary production
- secondary production level (MW) : reserved capacity for secondary production

Primary and secondary levels constitute system services.

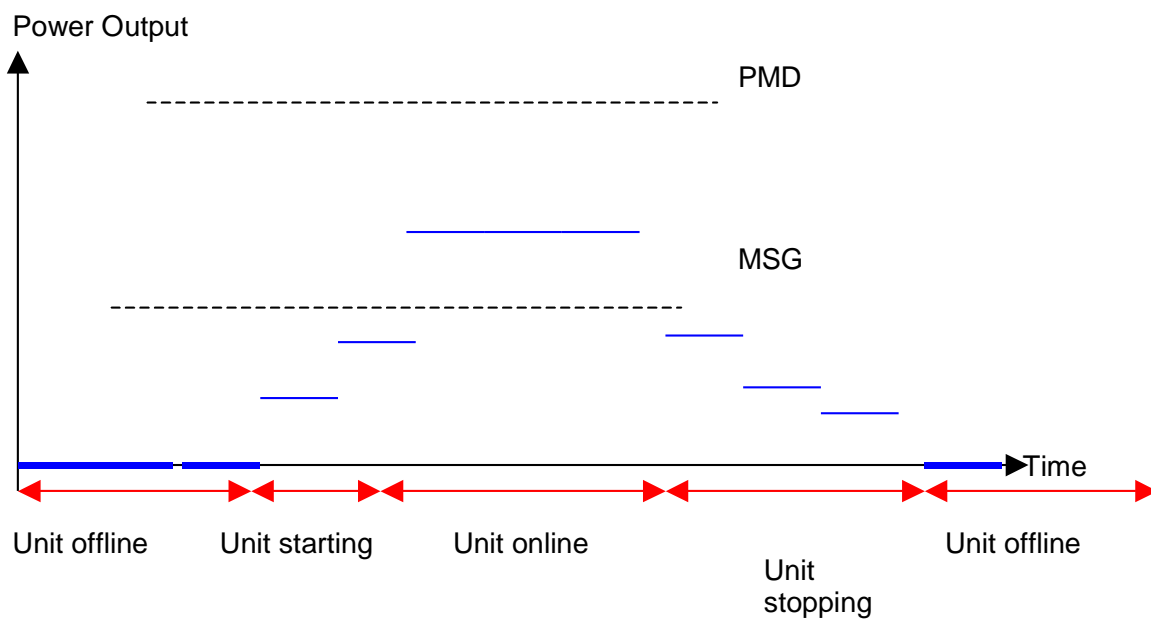
###### 4.1.1.2. Feasible power levels

A unit can have any of the following 4 states as power output is concerned

- When offline : The power levels are below or equal to zero. Power levels when offline are problem data and is less than or equal to zero. One level per unit is given.
- When online : Power output is between MSG (minimal stable generation) and some value PMD. Both values are assumed bigger than or equal to zero.
- When starting or stopping : these states are detailed later and assure the transition between offline and online. Predefined starting/stopping curves have to be used.

**Data:**

- MSG (MW) (MT in French)
- PMD (MW)
- Offline Power (MW)



Remark : For some units, offline power is strictly negative.

**4.1.1.3. Primary / Secondary production levels**

A unit can only contribute to system services when online. When a group is online:

- Primary production can be 0 or Primax (discrete set)
- Secondary production can be 0 or Telmax (discrete set)
- Secondary production can be non zero only if primary is non zero
- The sum of production, primary and secondary has to be below PMD.
- Production reduced by primary and secondary has to be bigger than MSG.

A unit can therefore not contribute to system services, contribute to primary only, or do both primary and secondary.

**Data :**

- Primax (MW)
- Telmax (MW)

#### 4.1.1.4. Low, high and intermediate levels

We split the power domain [MSG, PMD] in three intervals:

- The low interval is [MSG ; MSG + Primax + Telmax ]
- The intermediate intervals [MSG + Primax + Telmax ; PMD – Primax – Telmax]
- The high interval is [PMD-Primax-Telmax ; PMD]

Additional constraints are:

- Whenever in the high interval, the sum of power, primary and secondary has to be equal to PMD
- Whenever in the low interval, the production is equal to MSG + primary + secondary

In the special case that these intervals overlap, the constraints are not active. Power output is free of the above additional constraints.

### 4.1.2. Dynamic constraints

#### 4.1.2.1. Some Definitions

Online duration : The total amount of time during which the unit is online, i.e., the number of time steps times the time step duration

Offline duration: The total amount of time during which the unit is offline, i.e., the number of time steps times the time step duration.

#### Data:

- The initial state (online or offline) is available. Units are always online or offline as an initial state and can't be stopping or starting
- The duration of that state (offline duration or online duration in minutes)

#### 4.1.2.2. Minimum running time

Online duration of a unit has to be bigger than or equal to some minimum duration.

Remark: Whenever MSG equals zero, then unit producing zero could be considered online. Such time steps can contribute to the above constraint. The consistency of the above constraint in that case can be the subject of a debate.

#### Data:

- Minimum online duration (mn), some multiple of the time step duration.

#### 4.1.2.3. Minimum offline time

Offline duration has to be bigger than or equal to some minimal offline duration.

**Data:**

- Minimum offline duration (mn), some multiple of the time step duration.

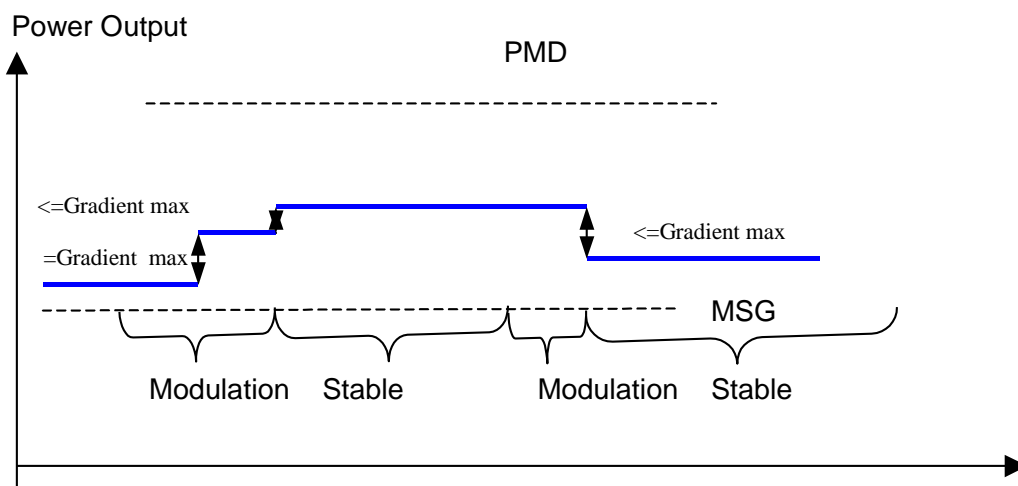
#### 4.1.2.4. Gradient

When a unit is online, power variations have to respect gradient constraints. Power variations are defined as the differential of power output in adjacent time steps. Power variations have to be less than or equal to a gradient of increase times the time step duration. Power variations have to be bigger than or equal to a  $-1 \times$  gradient of decrease times the time step duration

**Data:**

- Gradient of increase (MW / mn )  $> 0$
- Gradient of decrease (MW / mn )  $> 0$

#### 4.1.2.5. Modulation and stability



These constraints only apply on units that are online.

A unit that is online can be in two possible states, modulation or stable.

- A unit is in modulation at time t :
  - o If the power output changes interval between time steps t and t + delta T
  - o If the power output changes in the intermediate level I between time steps t and t + delta T
- A unit is "stable" at time t if :
  - o If the power output remains in the same interval between time steps t and t + delta T
  - o If the power output remains stable in the intermediate level (zero change) between time steps t and t + delta T



Remark : We will assume that stability and modulation are identical states for the last time step in the time horizon.

Additional constraints on modulation:

A unit can modulate its power on several adjacent time steps. This will be accounted for as a single modulation. However during such a modulation the following constraints apply

- Power variations have to have the same sign (only power increases or decreases)
- Power variations have to be strictly equal to power gradients, except for the last time step in a modulation.

#### 4.1.2.6. Minimum « stable » state duration

A unit that is in the stable state (defined in § 3.1.2.9) has to remain in such a state for a minimal duration.

##### Data :

- minimum “stable” state duration (mn), some multiple of the time step duration

Remark : If this minimal “stable” state duration is equal to zero, the unit can execute several modulations. These can have all power variations.

#### 4.1.2.7. Stopping curves

In order to stop a unit and move from the state online to the state offline, a unit has to follow a specific stopping curve, i.e., a curve of decreasing power output values.

- Power output has to equal each point of this curve except the first one.
- The first point of the curve has a power greater than MSG. For the last time step when the unit is online the production has to be between MSG and this first point
- The last point of the curve is equal to the power production level when offline (this can be negative for some units). This is the first time step when the unit is offline

##### Data:

- The number of points on each curve. There is one curve per unit. There are at least two points.
- For each point, the power output level (MW). These levels decrease from more than MSG to the offline production level.

#### 4.1.2.8. Starting curves

In order to change stop a unit and move from the state offline to the state online, a unit has to follow a specific starting curve, i.e., a curve of increasing power output values.

- Power output has to equal each point of this curve except the last one.
- The last point of the curve has a power level greater than MSG. For the first time step when the unit is online the production has to be between MSG and this last point
- The first point of the curve is equal to the power production level when offline (this can be negative for some units). This is the last time step when the unit is offline

As a matter of fact there are several starting curves. The choice of which depends on the offline duration. Each curve is linked to a minimal offline duration after which it can be used. We need to choose that curve for which that minimal duration is exceeded by the least amount the offline duration.

##### Data:

- The number of starting curves
- For each curve the minimal offline duration after which that curve can be used (mn), some multiply of the time step duration
- For each curve, the number of points on the curve. A minimum of two points per curve
- For each point on the curve, a power level (MW). The first point is equal to the offline production level and the last point is greater to MSG.

#### **4.1.2.9. Maximal number of starts**

Thermal units can have two types of constraints:

- A maximum number of starts over periods of 24 hours. This constraint applies for all time steps between  $[t, t + 24 \text{ hours}]$  for all  $t$ . This constraint applies to non-nuclear production units
- A maximum number of starts over the whole time horizon. This constraint applies to nuclear units.

#### **Data:**

- Maximum number of starts per 24 hours

#### **4.1.2.10. Maximal number of modulations**

The number of modulations (definition in § 3.1.29) is limited for periods of 24 hours. This constraint applies for all time steps between  $[t, t + 24 \text{ hours}]$  for all  $t$ .

#### **Data:**

- Maximal number of modulations per 24 hours

## 4.2. Level 2 Constraints

### 4.2.1. Serious power output drop

This constraint only impacts units that are online. We begin by defining a threshold (MW). Whenever power output at time  $t$  is strictly above that threshold and strictly below that threshold at time  $t + \Delta T$ , we will speak of a serious power output drop.

The number of such drops is limited on a time horizon of 24 hours. This constraint applies for all time steps between  $[t, t + 24 \text{ hours}]$  for all  $t$ .

#### Data:

- Maximum number of serious output drops
- Threshold of serious power output drop (MW)

### 4.2.2. Additional system services state : R<sub>pm</sub>

Each unit has a type "N" or "C". This constraint only applies to units of type "N". These units can have an additional state of system services and produce Primax+Telmax for primary system services and 0 for secondary system services.

#### Data:

- type of a unit "N" or "C"

### 4.2.3. Change of system services

We will speak of a change of system services between time step  $t$  and  $t + \Delta T$  if and only if either:

- the value of primary production changes between these time steps
- the value of secondary production changes between these time steps

A cost is attributed to such a change, except when it occurs on the last step of a modulation.

### 4.2.4. Minimum duration for system services

- When a unit changes system services at time  $t$ , no subsequent change of system services can occur before  $t + \text{minimal duration}$
- When a unit modules at time  $t$ , no change of system services can occur before  $t + \text{minimal duration}$

#### Data :

- minimum duration for system services (mn), some multiple of the time step duration

## 4.3. The objective function

The cost induced by the thermal assets are detailed in this section. We will distinguish between level 1 and level 2 induced costs.

### 4.3.1. Level 1 Constraints implied elements

#### 4.3.1.1. Fixed and proportional productions costs

- A unit that is offline has zero costs, even if produced power is strictly negative
- A unit that is online induces a proportional cost for each MWh produced, as well as a fixed cost for each hour online

**Data :**

- proportional cost of the unit ( $\varphi$ /MWh)
- fixed cost of functioning ( $\varphi$ /h)

#### 4.3.1.2. Starting costs

The starting costs depend on the offline duration of the unit. This cost can be expressed as a function of that duration according to the following formula.

- $\text{cost}(h) = C_1 + C_2 \ln( h / C_3 )$ , where h is the offline duration
- 

**Data:**

- 
- Coefficients  $C_1$ ,  $C_2$  and  $C_3$  of which the units are  $\varphi$ ,  $\varphi$  and minutes respectively

### 4.3.2. Level 2 Constraint implied elements

#### 4.3.2.1. system services change costs

A cost is attributed to a change in system services

**Data:**

- A fixed cost of a change in system services ( $\varphi$ )

#### 4.3.2.2. Modulation costs

For each modulation decreasing the power output, a fixed cost of decrease is added to the objective function.

**Data:**

- fixed cost of decrease ( $\varphi$ )

## 5. Constraints on Hydro Assets

A hydro-plant consists of a set of turbines that discharge water from its upstream reservoir into its downstream one. The reverse is also possible for some plants equipped with pumping units.

Unlike thermal or nuclear units, the production of a hydro-plant can't be computed individually. It is rather optimized in a more global entity, a hydro-valley, that depicts the interaction between a set of hydro-plants and the reservoirs connecting them.

## 5.1. Static constraints

### 5.1.1.1. Decision variables

The optimization problem corresponding to a hydro-valley has two types of variables :

- reservoir volumes
- hydro-plants' production output

Each hydro-plant contributes to the global offer-demand equilibrium by means of 3 variables:

- produced power (MW) : contributes to satisfy global offer-demand equilibrium with customer load
- primary production level (MW) : reserved capacity for primary production
- secondary production level (MW) : reserved capacity for secondary production

Primary and secondary levels constitute system services.

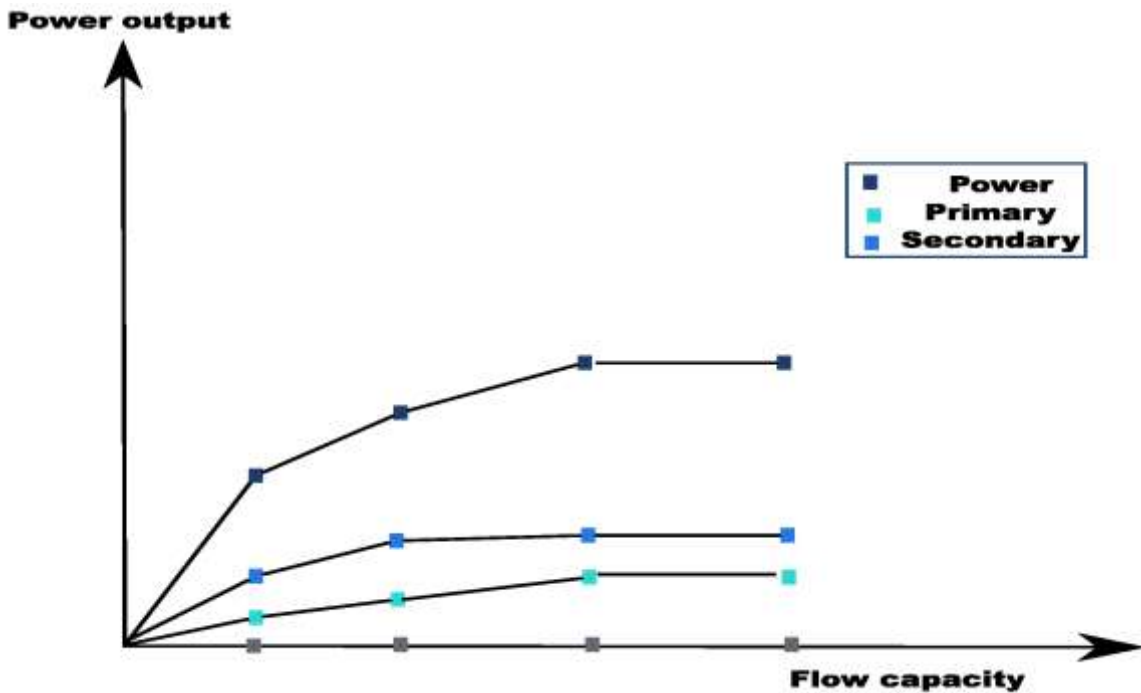
### 5.1.1.2. Feasible power levels

The production delivered by a hydro-plant of E type can take only a finite number of values. These values correspond to the power, primary and secondary levels produced by its turbines that are switched on successively. Since the time period is short, the considered turbines' rates are fixed, just because the water level in the upstream reservoir is considered as constant. Moreover, whether a unit contributes to the system services is chosen beforehand. As such, power levels are actually a quadruplets (Released water, Power, Primary , Secondary). The units of which are ( $m^3 / s$ , MW, MW, MW) respectively.

For a hydro-plant of F type every point between two consecutive quadruplets is feasible.

#### Data :

- A flow rate / Power efficiency curve, linking flow capacity in  $m^3 / s$  to a power output in MW. This curve is actually provided as a piecewise linear function.
- Type of unit : F or E
- Bounds on each variable



### 5.1.1.3. Volume bounds

Reservoir levels have to remain within bounds at each time step. These bounds can depend on time.

## 5.2. Dynamic constraints

### 5.2.1. Flow constraints

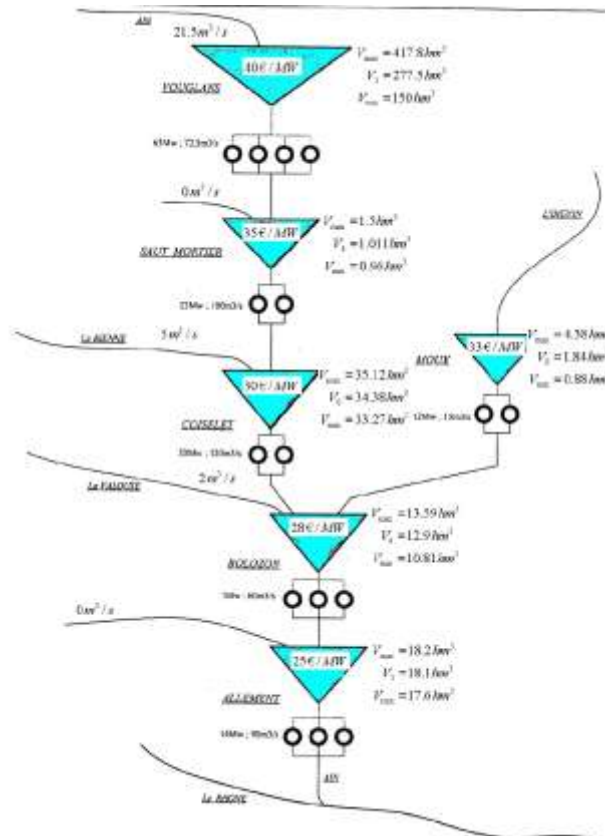
In addition to the flows induced by pumping or turbinning, a reservoir is subject to outer water inputs due to rain, snow or spillage. Hence, through the time period, the volume of a reservoir is governed by an equilibrium flow constraint that rules these factors.

A hydro valley can be seen as a graph, where reservoirs are connected by pumps or turbines. Each reservoir can have several parents or children. A flow delay has to be taken into account as well, in the otherwise trivial flow constraints. Indeed when water is released by a turbine a delay occurs before this water enters into the next reservoir.

#### Data :

- Inflows for each reservoir and time step ( $\text{m}^3 / \text{s}$ )
- Flow delays for each unit to the next reservoir (mn), some multiple of the time step duration
- 
- Connection of each pump / turbine to a reservoir

The following example shows a typical (but small) valley



## 5.2.2. Production constraints

### 5.2.2.1. Gradient

The flow variation of a hydro-plant is subject to upper and lower bound constraints. The flow variation is defined as the differential of flow capacity running through the hydro-plant for two consecutive time steps. This variation must be less or equal to a gradient of increase times the times step duration, and larger or equal to a  $-1$ \* gradient of decrease times the times step duration.

#### Data :

- Gradient of increase ( $m^3/s / mn$ )  $> 0$
- Gradient of decrease ( $m^3/s / mn$ )  $> 0$

### 5.2.2.2. Minimal delay

A minimal delay of one hour is imposed between two flow variations of opposite nature for units of type E.

### 5.2.2.3. Turbines/pumps constraints

When two reservoirs are connected with both turbinning and pumping plants, simultaneous pumping and turbinning is forbidden, and a minimal halt of thirty minutes (1 time step) before switching from pumping into turbinning (and vice versa) is imposed.



## 5.3. Cost function

### 5.3.1. Flow change cost

A cost is attributed for a change in flow for each unit of type E.

Data :

- flow change cost ( $\varphi$ )

### 5.3.2. Water values

Each reservoir has water values that depend on the volume. The differential between the final volume and the initial volume is valued with the help of these water values.

**Data:**

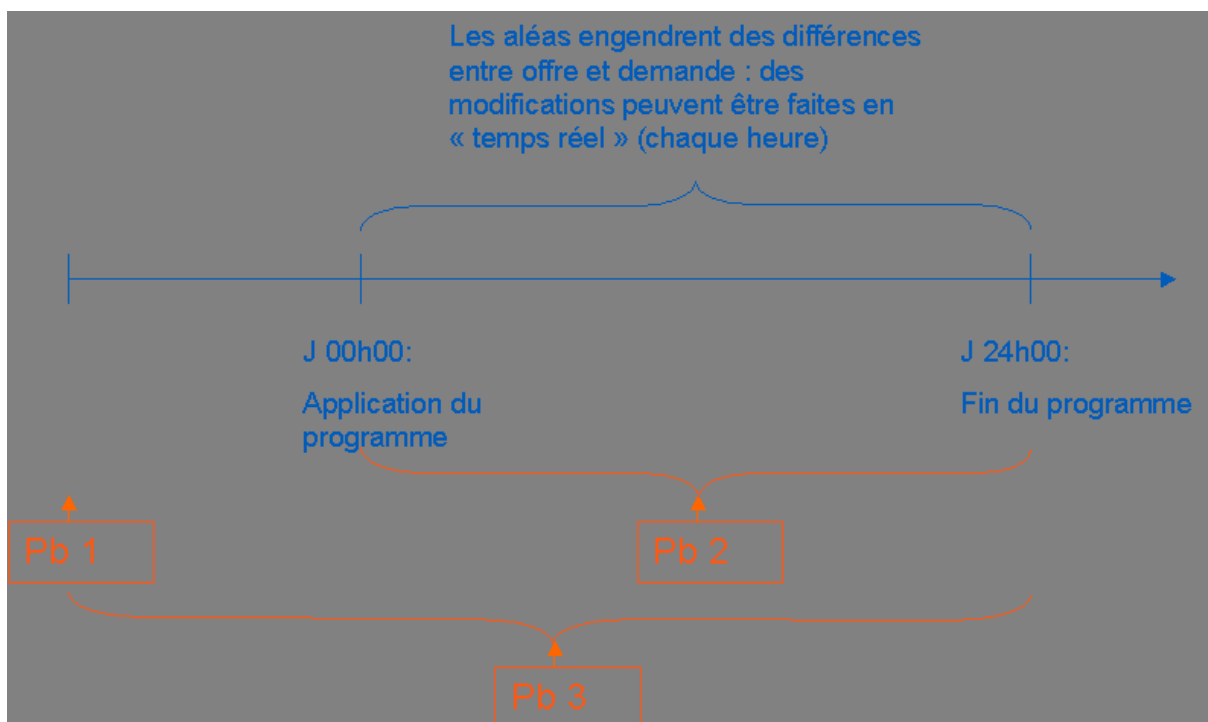
- A partition of global volume (there may be only a unique element in the partition)
- A water value associated to each element of the partition ( $\varphi / \text{m}^3$ )

## 6. Contexte

EDF souhaite revisiter ces problèmes de gestion de la production court terme. Ce dernier fait référence, non pas à un unique problème, mais plutôt à trois problèmes, ou des éléments d'un seul problème.

- Le problème de gestion de la production court-terme classique cherche à minimiser le coût global (production et démarrages) de sorte à ce que la production satisfasse la demande. Ces demandes incluent la demande physique des clients, des capacités réservés et les services systèmes. Les contraintes opérationnelles incluent les contraintes sur la production thermique et hydraulique. Ce problème peut être vu comme une la première étape d'un problème avec recours. En effet, nous devons calculer le programme de référence.
- Le problème de gestion de production infra-journalier est une variante du premier problème. Nous devons déterminer un programme de production qui dévie de façon minimale du programme de référence, mais qui s'adapte mieux à des nouvelles prévisions des aléas (la demande, services systèmes, etc...) La déviation minimale veut dire que le nombre d'unités modifiant leur production doit rester limité. Ce problème doit être résolu chaque heure. Il s'agit de la partie « recours » d'un problème de recours.
- En réalité, le problème de gestion de la production court-terme est un problème avec recours. Dans un premier temps, un programme de référence doit être calculé. Une fois cela fait, nous pouvons prendre des décisions de recours. Parfois le recours est coûteux, mais des prévisions des aléas principales sont disponibles.

Le schéma suivant montre comment ces problèmes s'emboîtent :



Dans ce document nous utilisons comme unité monétaire l' « electrum pieces », une unité monétaire artificielle. Nous utilisons le symbol  $\wp$  pour le dénominer.

## 7. Introduction

Ce document décrit l'ensemble des contraintes du problème d'optimisation. Nous distinguons les contraintes par niveau. Le niveau de la contrainte indique sa priorité. Ainsi, une contrainte de niveau 1 doit être prise en compte. Les contraintes de niveau 2 sont des contraintes pour une modélisation avancée.

## 8. Contraintes Globales

Nous rappelons que nous considérons un horizon de temps de 96 pas de temps. Chaque pas de temps a une durée de 30 minutes.

### 8.1. Contraintes Couplantes

- Contrainte d'équilibre offre-demande en puissance : Pour chaque pas de temps, la somme de la production de toutes les entités de production, thermique ou hydraulique, plus d'éventuels termes d'écart pénalisés, doit être égale à la demande en puissance du pas de temps.
- Contrainte d'équilibre offre-demande en primaire : Pour chaque pas de temps, la somme de la fourniture en primaire de toutes les entités de production, thermique ou hydraulique, plus d'éventuels termes d'écart pénalisés, doit être supérieure ou égale à la demande en primaire du pas de temps.
- Contrainte d'équilibre offre-demande en secondaire : Pour chaque pas de temps, la somme de la fourniture en secondaire de toutes les entités de production, thermique ou hydraulique, plus d'éventuels termes d'écart pénalisés, doit être supérieure ou égale à la demande en secondaire du pas de temps.

Une formulation alternative de ces contraintes est d'imposer que la valeur absolue de la différence entre la somme de la production et la demande doit être plus petit qu'un seuil. Un écart éventuelle à cette contrainte peut être pénalisé.

## 9. Les Contraintes des Actifs Thermiques

Static constraints are all constraints valid on a single time step. Dynamic constraints are all constraints linking adjacent time steps.

### 9.1. Les contraintes de niveau 1 :

#### 9.1.1. Les Contraintes statiques

##### 9.1.1.1. Variables de décision

Chaque groupe thermique contribue à l'équilibre production-demande sur l'ensemble de parc de production pour chaque pas de temps par 3 valeurs :

- la puissance fournie (MW) : contribue à satisfaire la contrainte de demande en puissance
- le primaire (MW) : contribue à satisfaire la contrainte de demande en primaire
- le télé-régulation (MW) : contribue à satisfaire la contrainte de demande en secondaire

Le primaire et le secondaire constituent ce qu'on appelle les services systèmes.

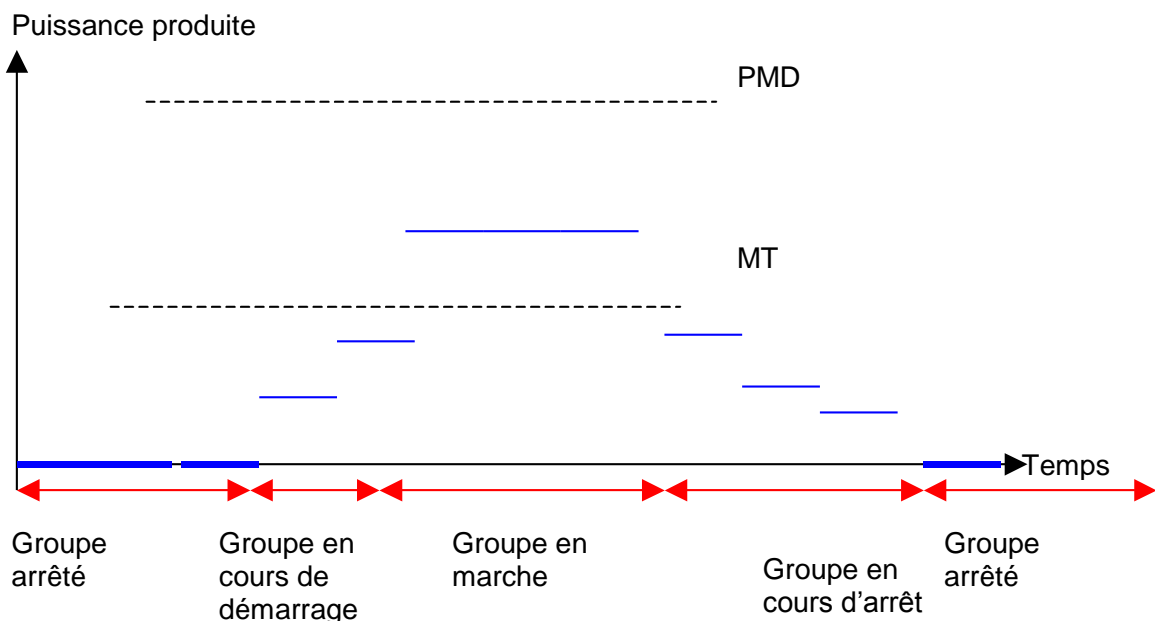
### 9.1.1.2. Niveaux de puissance admissibles

Un groupe peut se trouver dans 4 états de puissance possibles :

- en arrêt : sa puissance est inférieure ou égale à 0. La puissance à l'arrêt des groupes est une donnée du problème, et est inférieure ou égale à 0.
- en marche : sa puissance est une valeur comprise entre une valeur MT (Minimum technique) et une valeur PMD. On suppose MT et PMD supérieures ou égales à 0.
- en cours de démarrage ou d'arrêt : ces 2 états sont détaillés plus loin et correspondent aux transitions entre arrêt et marche. Ils utilisent des courbes prédéfinies.

**Données utilisées :**

- MT (MW)
- PMD (MW)
- Puissance à l'arrêt (MW)



**Remarque :**

Pour certains groupes, la donnée de puissance à l'arrêt est négative.

### 9.1.1.3. Niveaux de production primaire et secondaire

Un groupe ne peut fournir que du primaire et du secondaire que si elle est en marche.

Si le groupe est en marche :

- Le primaire vaut soit 0 soit Primax. (état discrétisé).
- Le télé réglage vaut soit 0 soit Telmax. (état discrétisé).
- Le télé réglage ne peut être non nul que si le primaire est non nul.
- La somme de la puissance, du télé réglage et du primaire est inférieure ou égale à la PMD.
- La puissance moins le primaire et moins le télé réglage est inférieure ou égale au MT.

**Remarque :** Il y a au plus 3 états de services systèmes possibles : rien, primaire seul, primaire plus télé réglage.

**Données utilisées :**

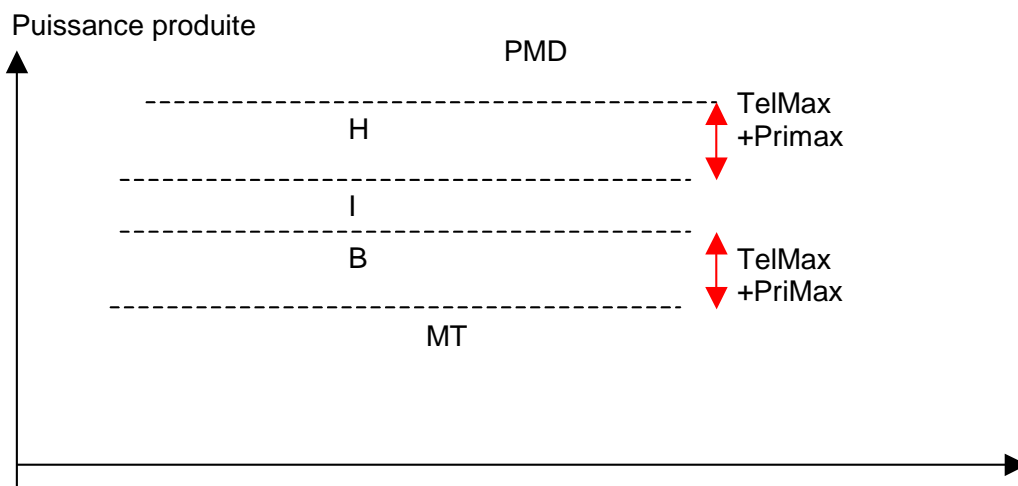
- Primax (MW)
- Telmax (MW)

#### 9.1.1.4. Intervalles basse, intermédiaire, haute

**Notion**

On découpe le domaine de puissance en marche [MT,PMD] en trois intervalles :

- L'intervalle basse est [MT ;MT+PriMax+TelMax ;]
- L'intervalle intermédiaire est [MT+PriMax+TelMax ; PMD-PriMax-TelMax]
- L'intervalle haute [ PMD-PriMax-TelMax ;PMD]



Contraintes supplémentaires :

- Dans l'intervalle haute, la somme de la puissance, du télé réglage et du primaire est égale à la PMD
- Dans l'intervalle basse, la puissance moins le télé réglage, moins le primaire est égale au MT.

**Cas particulier**

En cas de recouvrement de ces zones : le modèle peut se placer dans la zone qu'il souhaite : si par exemple  $MT+PriMax+TelMax$  est plus grand que  $PMD-PriMax-TelMax$ , le modèle peut se trouver en B, en I ou H entre  $MT+PriMax+TelMax$  et  $PMD-PriMax-TelMax$ .

## 9.1.2. Contraintes dynamiques

### 9.1.2.1. Définition de la durée de marche, durée d'arrêt

**Convention** La durée de marche d'un groupe correspond au nombre de pas de temps durant lequel un groupe est en marche \* la durée d'un pas de temps.

**Convention** La durée d'arrêt d'un groupe correspond au nombre de pas de temps durant lequel un groupe est à l'arrêt \* la durée d'un pas de temps.

Ce calcul est complété par une donnée donnant depuis combien de temps on est en marche

#### Donnée utilisée :

- état initial : marche ou arrêt. L'état en cours démarrage ou en cours d'arrêt n'est pas possible au pas de temps initial.
- durée de l'état initial en mn, multiple de la durée d'un pas de temps.

### 9.1.2.2. Temps minimum de fonctionnement

La durée de marche d'un groupe est supérieure ou égale à une durée minimum de marche.

Attention, dans le cas où MT vaut zéro, il est possible que l'outil décide qu'un groupe est en marche alors que sa puissance est nulle, simplement pour pouvoir honorer la contrainte de durée min de marche. La pertinence d'une telle contrainte dans ce cas peut être discutée.

#### Donnée utilisée :

- durée min de marche (mn), multiple de la durée d'un pas de temps.

### 9.1.2.3. Temps minimum d'arrêt

La durée d'arrêt d'un groupe est supérieure ou égale à la durée minimum d'arrêt.

#### Donnée utilisée :

- durée d'arrêt (mn), multiple de la durée d'un pas de temps.

### 9.1.2.4. Gradient

Quand un groupe est en marche, toute variation de puissance doit respecter le gradient de hausse ou le gradient de baisse.

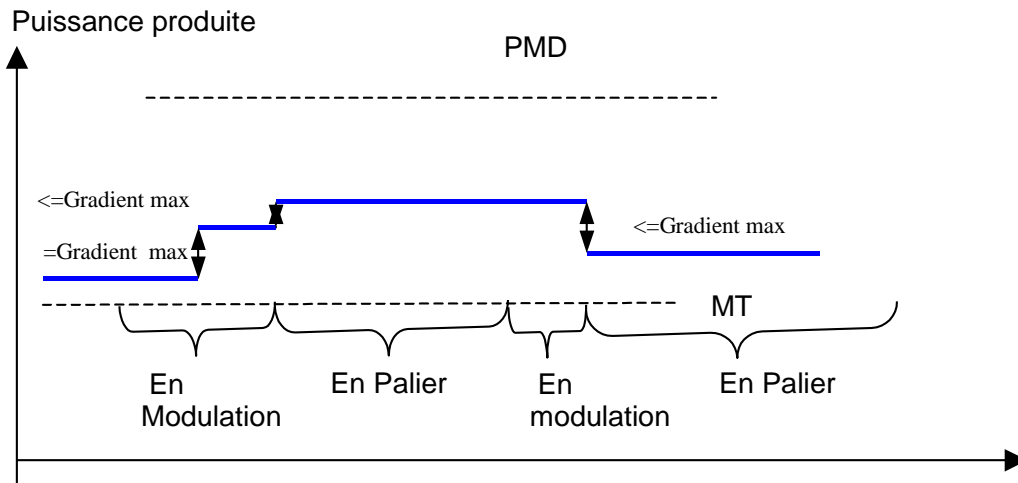
La différence entre la puissance au pas de temps  $t+1$  et le pas de temps  $t$  est inférieure ou égale au gradient de hausse fois la durée du pas de temps.

La différence entre la puissance au pas de temps  $t+1$  et le pas de temps  $t$  est supérieure ou égale au à l'opposé du gradient de baisse fois la durée du pas de temps.

#### Donnée utilisée :

- gradient hausse : (MW/mn)  $>0$
- gradient baisse : (MW/mn)  $>0$

### 9.1.2.5. Modulation et palier



La notion de modulation ou de palier ne s'appliquent qu'aux groupes démarrés.

Un groupe démarré est dans 2 états possibles, en modulation ou en palier:

- En modulation au pas de temps t:
  - o Si la puissance change de niveau (B, I, ou H) entre le pas de temps t et le pas de temps t+1;
  - o Si la puissance est au niveau intermédiaire et qu'elle change entre le pas de temps t et le pas de temps t+1.
- Par symétrie, il y a palier au pas de temps t :
  - o Si la puissance reste au même niveau (H,I ou B) entre le pas de temps t et le pas de temps t+1;
  - o Au niveau intermédiaire, il faut en plus vérifier qu'elle est constante entre le pas de temps t et le pas de temps t+1.

#### Convention :

- Pour le dernier pas de temps démarré, l'état du groupe en modulation ou en palier est indifféremment en palier ou en modulation. (En effet, au pas de temps t+1 , le groupe n'est plus démarré).

#### Notion de modulation

Un groupe peut être EN modulation sur plusieurs pas de temps consécutif. Cet ensemble compte alors pour UNE modulation.

Pendant UNE modulation durant plusieurs pas de temps consécutif, les variations de puissance doivent être :

- de même sens pour tous les pas de temps de la modulation (hausse ou baisse)
- égale au gradient de hausse\* la durée du pas de temps pour une modulation à la hausse sauf au dernier pas de temps de la modulation, où elle est comprise entre 0 et le gradient de hausse.
- Egale au gradient de baisse\* la durée du pas de temps pour une modulation à la baisse, sauf

au dernier pas de temps de la modulation, où elle est comprise entre moins le gradient de baisse et 0.

#### **9.1.2.6. Contrainte de durée min de palier**

Un groupe en palier doit le rester pendant une durée minimum dans l'état en palier.

##### **Convention :**

Un groupe avec une durée minimum de palier de 60 minutes doit rester 2 pas de temps consécutif dans l'état en palier.

##### **Remarque :**

Il est tout à fait possible d'avoir 2 modulations consécutives, si la durée minimale de palier est égale à 0. Des modulations successives peuvent être de même sens ou de sens différent.

##### **Donnée utilisée :**

-durée minimum de palier (mn), multiple de la durée d'un pas de temps.

#### **9.1.2.7. Courbes d'arrêts**

Pour passer d'un état en marche, à un état arrêté, un groupe doit utiliser une courbe d'arrêt, qui est une succession de valeurs de puissance décroissante.

Pour passer de l'état démarré à l'état arrêté, le modèle doit se placer successivement sur tous les points de la courbe.

Le premier point de la courbe est égal au MT. Il correspond au dernier point où le groupe est en marche..

Le dernier point de la courbe est égal à la puissance à l'arrêt du groupe. Il correspond au premier point où le groupe est arrêté.

##### **Donnée utilisée :**

-le nombre de point de la courbe d'arrêt. Il y a une courbe d'arrêt par groupe.

-pour chaque point, la puissance associée, en MW. Ces points sont décroissants, de MT à la puissance d'arrêt. Il y a au moins 2 points.

#### **9.1.2.8. Courbes de démarrages**

Pour passer d'un état arrêté, à un état démarré, un groupe doit utiliser une courbe de démarrage, qui est une succession de valeurs de puissance croissante.

Le modèle doit alors se placer successivement sur tous les points de la courbe.

Le premier point de la courbe est égal à la puissance d'arrêt. Il correspond au dernier point où le groupe est à l'arrêt.

Le dernier point de la courbe est égal à la puissance au MT du groupe. Il correspond au premier point où le groupe est en marche.

##### **Choix de la courbe de démarrage :**

Plusieurs courbes de démarrage existent. Le choix de la courbe de démarrage est fait en fonction du temps d'arrêt qui précède. Celui-ci est mesuré en cumulant les durées des pas de temps où le groupe est à l'arrêt.

Chaque courbe est donc associée à une durée minimum d'arrêt à partir de laquelle la courbe peut être utilisée. Parmi les courbes ayant une durée minimum d'arrêt inférieure ou égale à la durée de l'arrêt du groupe, on doit choisir celle ayant la durée minimum d'arrêt la plus grande.

##### **Données utilisées :**



- nombre de courbes de démarrage
- pour chaque courbe durée minimum d'arrêt correspondant (mn, multiple de la durée d'arrêt).
- pour chaque courbe, nombre de points de la courbe
- pour chaque point de la courbe, puissance associée (MW). Le premier point de la courbe vaut la puissance d'arrêt du groupe. Le dernier point vaut le MT du groupe.

#### **9.1.2.9. Nombre maximum de démarrages**

Dans le cas d'un groupe classique, le nombre maximal de démarrages est appliqué sur les périodes glissantes de durée un jour

Dans le cas d'un groupe nucléaire, le nombre maximal de démarrages est appliqué sur toute la période d'étude.

##### **Donnée utilisée :**

- nombre max de démarrage par jour

#### **9.1.2.10. Nombre maximum de modulations**

Le nombre de modulations (définition au paragraphe 3.1.2.10) est appliqué sur les périodes glissantes de durée un jour.

##### **Donnée utilisée :**

- nombre max de modulations par jour

## 9.2. Contraintes de niveau 2

### 9.2.1. Nombre maximum de baisses profondes

La notion de baisse profonde concerne les groupes en marche. On définit un seuil de baisse profonde (MW). Il y a une baisse profonde au pas de temps  $t$  si la puissance produite est strictement supérieure au seuil de baisse profonde au pas de temps  $t$  et strictement inférieure au pas de temps  $t+1$ .

On définit un nombre maximum de baisses profondes à respecter, sur un horizon de 24h glissant.

### 9.2.2. Etat de service système supplémentaire : R<sub>pmax</sub>.

On distingue 2 types de groupes, nommés 'N' et nommés 'C'.

Pour les groupes de type 'N', on définit un quatrième état possible de services systèmes, nommé R<sub>pmax</sub>.

Il correspond à un état dans lequel le primaire fourni vaut Primax+ Telmax, et le télé réglage fourni vaut 0.

**Donnée utilisée :**

- type de groupe 'C' ou 'N'

### 9.2.3. Changement de services systèmes

Il y a changement de services système entre le pas de temps  $t$  et le pas de temps  $t+1$  si et seulement si :

- la valeur de primaire fournie entre le pas de temps  $t$  et le pas de temps  $t+1$  change.
- la valeur de secondaire fournie entre le pas de temps  $t$  et le pas de temps  $t+1$  change.

L'outil associe un coût au changement de services systèmes, s'il ne sont pas concomitants du dernier pas de temps d'une modulation.

### 9.2.4. Durée minimum d'état de services systèmes

- Si un groupe fait un changement de services système en  $t$ , elle ne peut pas faire d'autre changement de services systèmes avant  $t$ +durée min de services systèmes.
- Si un groupe est en modulation en  $t$  elle ne peut pas faire, de changement de services systèmes avant  $t$ + durée min de services systèmes

**Donnée utilisée :**

- durée minimum de services systèmes (mn , multiple de la durée d'un pas de temps)

## 9.3. La fonction objectif

The cost induced by the thermal assets are detailed in this section. We will distinguish between level 1 and level 2 induced costs.

### 9.3.1. éléments issues d'une modélisation de niveau 1

#### 9.3.1.1. Coût proportionnel et coût fixe

- Une tranche à l'arrêt a coût nul, même si sa puissance à l'arrêt est strictement négative.
- Une tranche en cours de démarrage, en marche ou en cours d'arrêt paye un coût proportionnel à l'énergie produite sur un pas de temps donné : c'est à dire le coût proportionnel \* la puissance produite sur le pas de temps \* la durée du pas de temps.
- Une tranche en marche doit payer un coût fixe par heure de fonctionnement : c'est à dire pour un pas de temps donné, le coût fixe \* la durée du pas de temps.

**Données utilisées :**

- coût proportionnel de la tranche ( $\varphi$ /MWh)
- coût fixe en fonctionnement de la tranche ( $\varphi$ /h)

**9.3.1.2. Coût de démarrage fonction du temps d'arrêt**

Le coût de démarrage dépend du temps d'arrêt qui le précède selon une fonction définie dans les données. Le coût de démarrage d'un groupe se calcule avec la formule suivante :

- $C1 + C2 \ln(\text{durée d'arrêt}/C3)$

**Données utilisées :**

- 
- coefficients C1, C2, C3 respectivement en  $\varphi$ ,  $\varphi$  et minutes.

## 9.3.2. éléments issues d'une modélisation de niveau 2

### 9.3.2.1. Coûts service système

L'outil associe un coût au changement de services systèmes.

**Donnée utilisée :**

- coût fixe de changement de services systèmes en  $\phi$

### 9.3.2.2. Coût de modulations

A chaque modulation à la baisse est associée un coût fixe de baisse ainsi qu'un coût proportionnel. Ce coût est proportionnel à la différence entre la puissance au début de la modulation et la puissance à la fin de la modulation.

**Donnée utilisée :**

- coût fixe de baisse en  $\phi$
- coût proportionnel de baisse en  $\phi/\text{MWh}$

## 10. Les contraintes Hydrauliques

Une unité hydraulique est constitué d'un ensemble de turbines qui peuvent relâcher de l'eau des réservoirs amonts vers les réservoirs aval. L'inverse est également possible pour les unités équipés de pompes.

Contrairement aux unités thermiques, la production hydraulique n'est pas comptabilisé unité par unité, mais plutôt en tant qu'unité global, appelé vallée hydraulique. Ce dernier représente l'interaction entre un ensemble d'unité hydrauliques et les différent réservoirs connectés les uns aux autres.

### 10.1. Les contraintes statiques

#### 10.1.1.1. les variables de décision

Le problème d'optimisation correspondant à une vallée hydraulique a deux types de variables :

- les volumes des réservoirs
- la production des unités hydrauliques

Chaque unité hydraulique contribue à l'équilibre offre-demande globale à travers trois variables :

- la puissance fournie (MW) : contribue à satisfaire la contrainte de demande en puissance
- le primaire (MW) : contribue à satisfaire la contrainte de demande en primaire
- le téléajustage (MW) : contribue à satisfaire la contrainte de demande en secondaire

Le primaire et le secondaire constituent ce qu'on appelle les services systèmes.

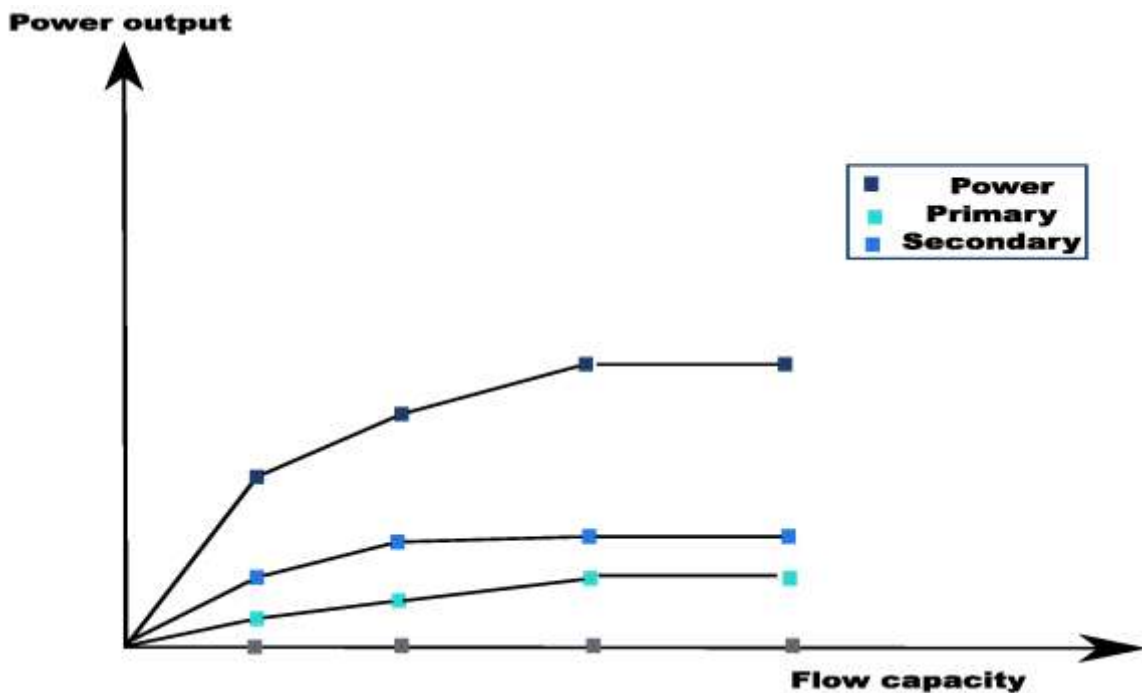
### 10.1.1.2. Les niveaux de puissance admissible

La production des unités hydraulique de type E ne peut que prendre un nombre fini de valeurs. Ces valeurs correspondent à des niveaux de puissance, primaire et télé réglage engendrés par les turbines utilisés dans un ordre spécifique. Nous supposons que les rendements sont fixes, parce que l'horizon de temps est court. Les commandes sont donc des quadruplets (débit, puissance produite, primaire, télé réglage) à choisir parmi un ensemble prédéfinis. Les unités physique sont respectivement ( $m^3 / s$ , MW, MW, MW).

Pour une unité hydraulique de type F, n'importe quel interpolation des quadruplets est admissible.

#### Données :

- Une courbe débit / puissance, liant un débit en  $m^3 / s$  à une puissance produite en MW. Cette courbe est en réalité spécifié en tant que courbe affine par morceaux
- Le type de chaque unité hydraulique, F ou E.
- Bornes sur chaque variable



### 10.1.1.3. Bornes sur les volumes

Les niveaux des reservoirs doivent rester dans des bornes à chaque pas de temps. Ces bornes peuvent dépendre du temps.

## 10.2. Contraintes dynamiques

### 10.2.1. Contraintes de flots

En plus des contraintes de flots induits par le pompage et le turbinage, un réservoir est assujéti à des aléas d'apports (fonte de neige, pluie) impactant ce même bilan de flots. Les bilan des flots intègre donc l'ensemble de ces éléments.

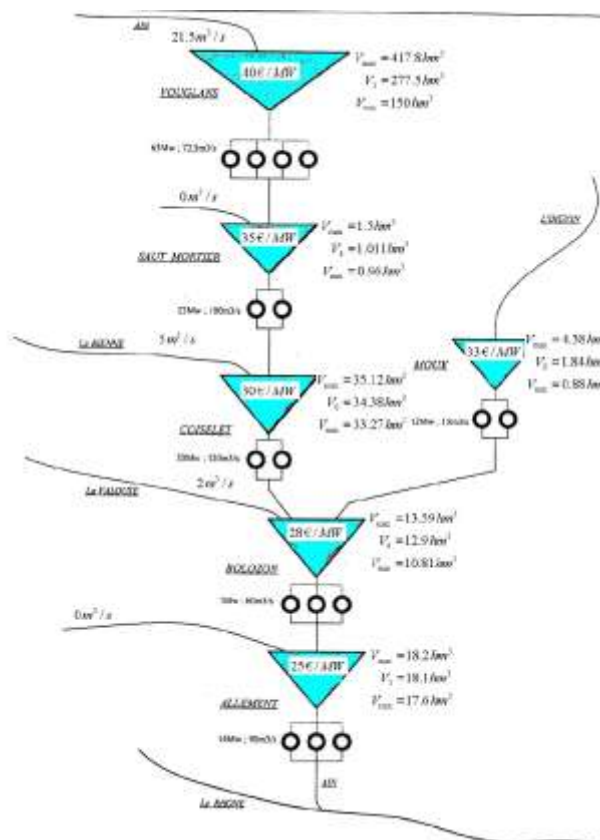
Une vallée hydraulique peut donc être vue comme un graphe, dans lequel les réservoirs sont connectés par des turbines ou des pompes. Chaque réservoir peut avoir plusieurs parents comme fils.

Un délai de flots doit être intégré dans l'équation de flots. En effet, quand l'eau est relâché par une turbine, il se passe un certain délai avant que cet eau impact le bilan du réservoir aval.

**Données :**

- Les apports pour chaque reservoir et pas de temps ( $m^3 / s$ )
- Les délais de flots de chaque unité vers son réservoir aval (mn), un multiple de la durée du pas de temps
- 
- 
- Le lien entre pompes, turbines et réservoirs

Le diagramme suivant montre une vallée typique, mais petite :



**10.2.2. Contraintes de production**

**10.2.2.1. Gradient**

La variation de débit d'une unité hydraulique doit respecter une borne supérieure et inférieure. La variation de débit est défini comme le différentiel de débit entre deux pas de temps consécutives. Cette variation doit être plus petite ou égale à un gradient de montée fois la durée du pas de temps. Simultanément, cette variation doit être plus grande ou égale à un gradient de descente fois la durée du pas de temps.

**Données:**

- Gradient de montée ( $\text{m}^3/\text{s} / \text{mn}$ )  $> 0$
- Gradient de descente ( $\text{m}^3/\text{s} / \text{mn}$ )  $> 0$

**10.2.2.2. Temps minimum**

Une durée minimale d'une heure doit être respecté entre deux variations de débit de signe opposée.

**10.2.2.3. Contraintes de pompage / turbinage**

Lorsque deux réservoirs sont connectées par des turbines et des pompes, le pompage et turbinage simultané est interdit. Deuxième un délai d'un demi-heure doit être respecté entre le moment où on turbine et on pompe.

**10.3. Fonction objectif****10.3.1. Flow change cost**

A cost is attributed for a change in flow for each unit of type E.

Data :

- flow change cost ( $\varphi$ )

**10.3.2. Valeurs d'usages**

Chaque réservoir dispose d'une valeur d'usage qui dépend du volume dans le réservoir. Le différentiel entre le volume final et initial est valorisé à l'aide des valeurs d'usages.

**Données:**

- Une partition du volume global (Cette partition peut contenir un unique segment)
- Une valeur d'usage associé à chaque segment ( $\varphi / \text{m}^3$ )