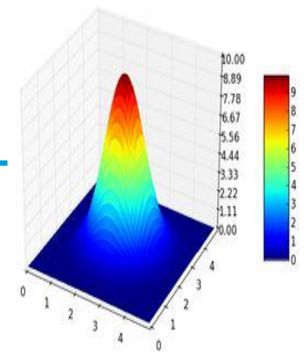
# THÈSE PAPRICA : ASSIMILATION DE DONNÉES ET PARAMÈTRES PRIMAIRES REP

**Utilisation d’une Méthode de Monte-Carlo**

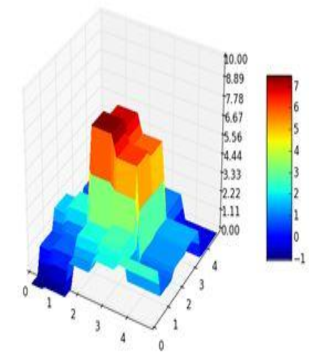
**pour utiliser un modèle physique**

**dans un cadre d’Assimilation de Données**

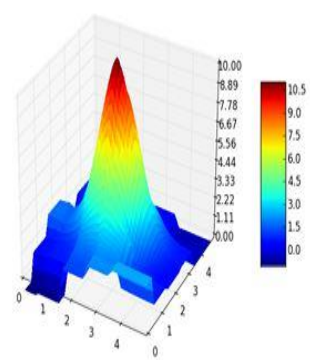
4 Avril 2014



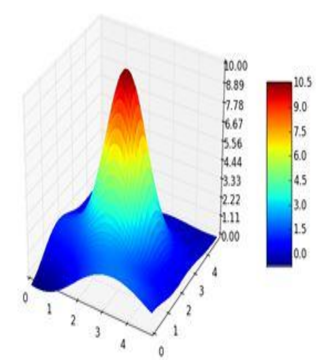
**Ebauche**



**Observation**



**Cressman**

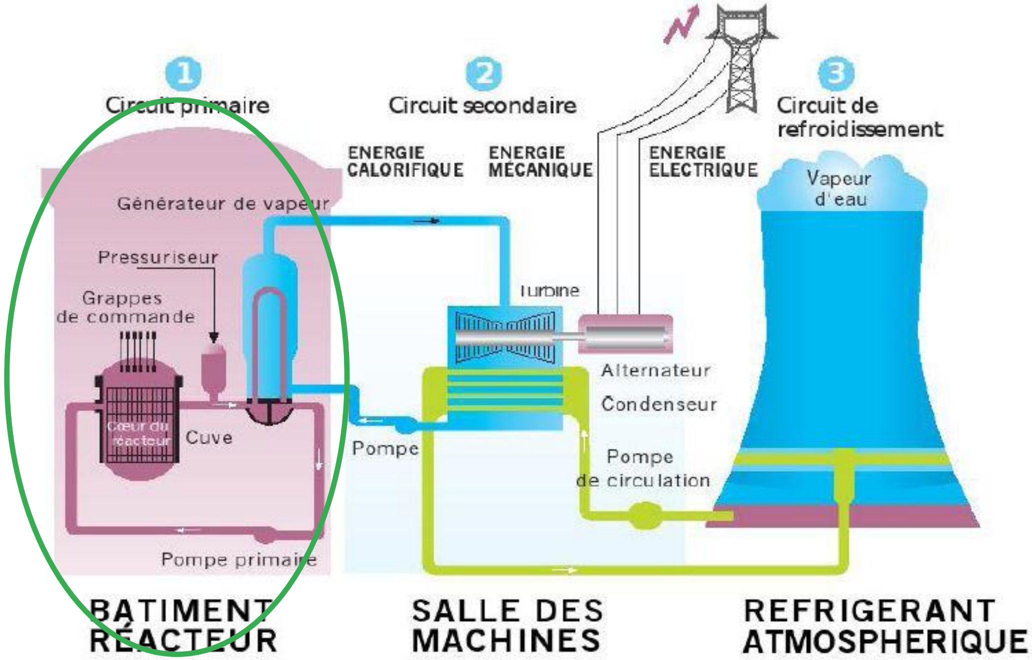


**BLUE**

# SOMMAIRE

# 1. PROBLÉMATIQUE PAPRICA

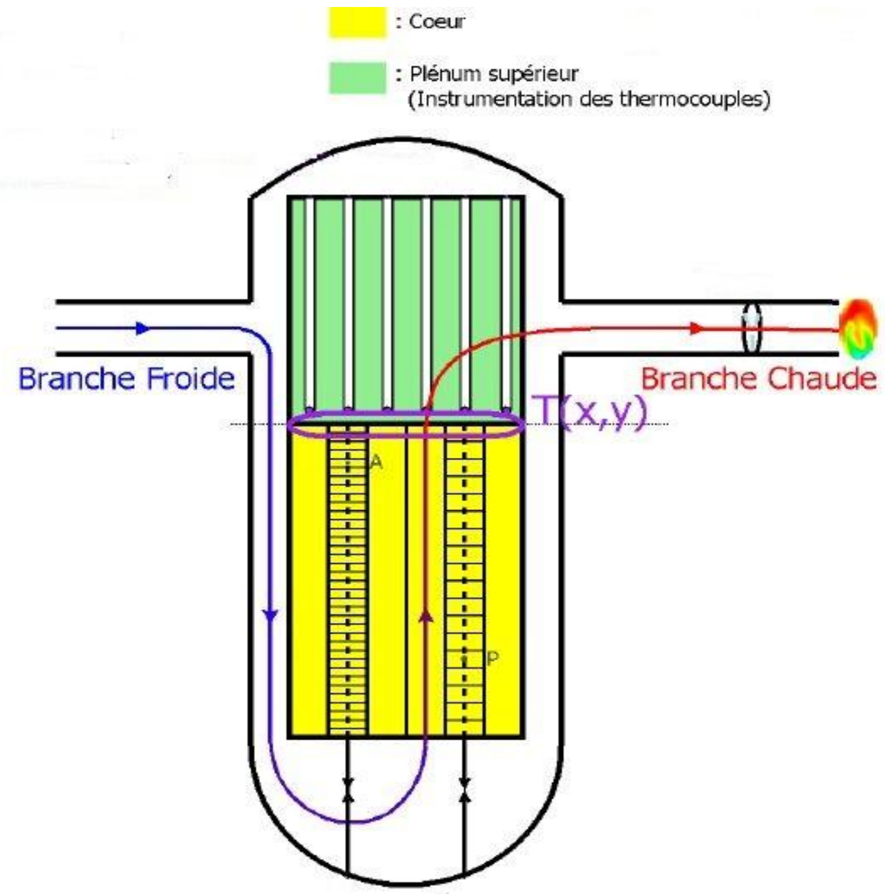
exPloiter les Améliorations pour la maîtrise du point de fonctionnement PRImaire par le CAlcul



# 1. PROBLÉMATIQUE PAPRICA

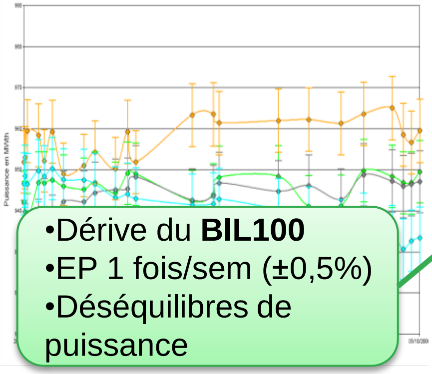
## a. Estimation du Point de Fonctionnement Primaire

- Ordres de grandeur pour l'écoulement dans le cœur du réacteur:
  - Température : 290°C (entrée) à 330°C (sortie)
  - Pression : 155 bar
  - Vitesse : 1 seconde pour 4m de hauteur
  - Reynolds ≈ $10^7$ → écoulement turbulent
  - Irradiation extrême → capteurs détériorés
- **Limites de sûreté imposées pour les débits, températures et puissances thermiques**
- **Incertitudes sur chaque grandeur → marges importantes restreignant le pilotage du réacteur**
- **Difficulté d'ajouter des points de mesures in situ : nécessité de travailler avec l'instrumentation existante**

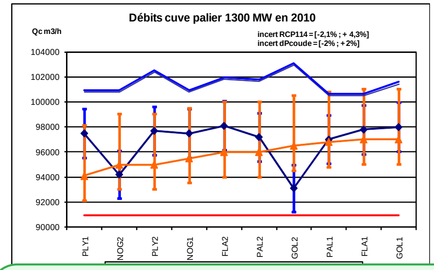


# 1. PROBLÉMATIQUE PAPRICA

## a. Estimation du Point de Fonctionnement Primaire

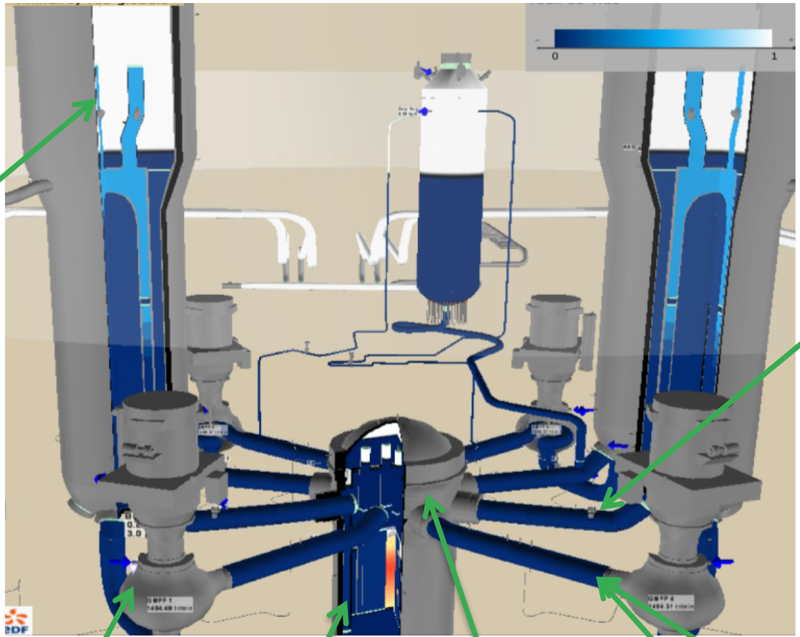


- Dérive du **BIL100**
- EP 1 fois/sem (±0,5%)
- Déséquilibres de puissance



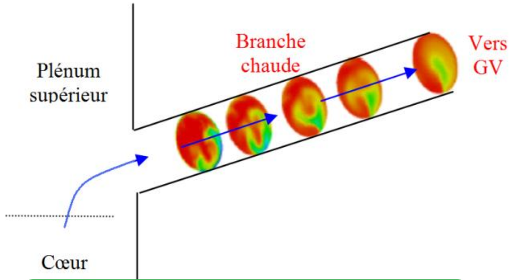

- Débit primaire par **RCP114**
- Incertitude élevée (limite haute)
- 1 fois par cycle seulement

± 3,9% (900) (boucle)
[-3% ; +5,3%] (1300)
[-3,6% ; +3,2%] (N4)



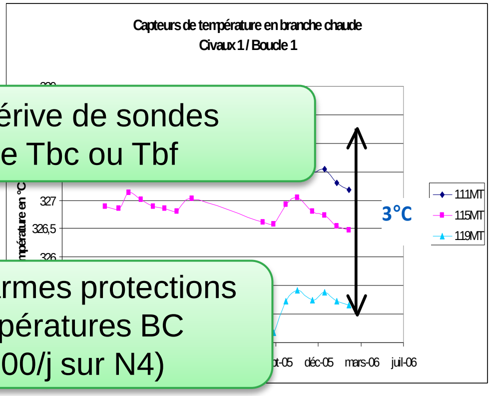

Validation des prédictions codes 3D

**TC RIC** : dérives, biais, incertitudes élevées




- Hétérogénéité de Tbc
- Incertitude Tbc ±1,1°C

± 0,5°C (900)
[-1°C ; +0,5°C] (1300)
± 0,2°C (N4)

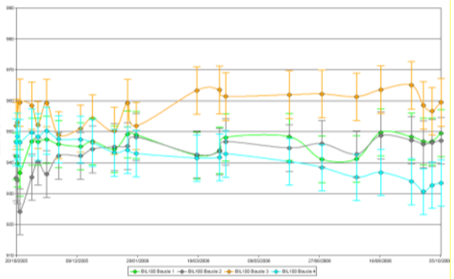



Dérive de sondes
- de Tbc ou Tbf

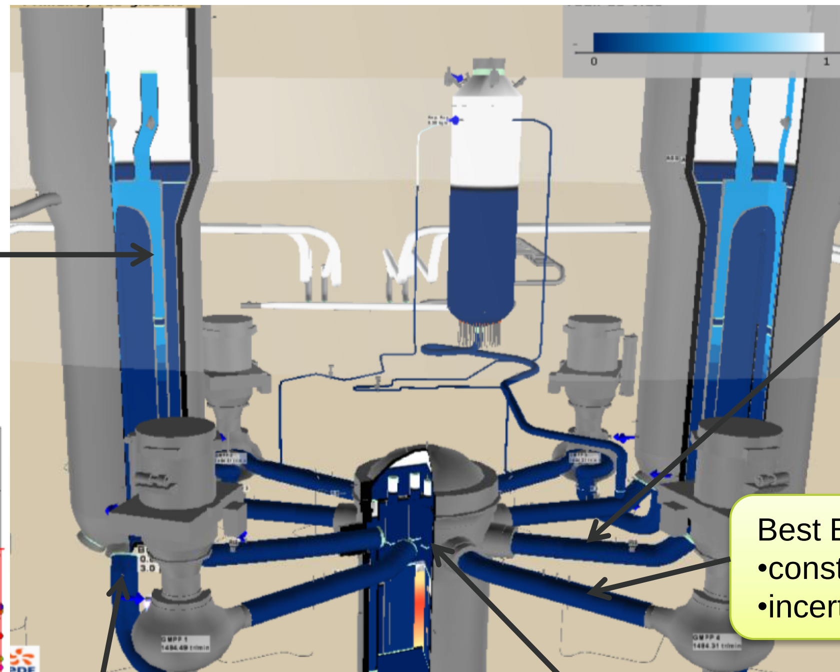
- Alarmes protections températures BC
- (1000/j sur N4)

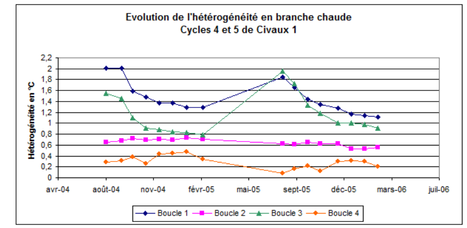
# 1. PROBLÉMATIQUE PAPRICA

## a. Estimation du Point de Fonctionnement Primaire



- BIL(orli) quasi-continu
- toutes les 20 min
- ± 0,8%
- Suivi puissances boucle

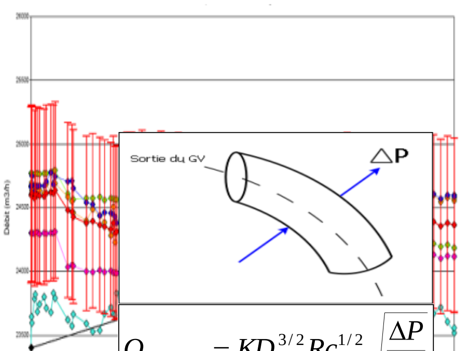





Estimation et suivi de l'hétérogénéité BC

$$T_{BE} = \sigma_{BE}^{\,*}\left(\frac{1}{\sigma_W^2}T_{enthalpique} + \frac{1}{\sigma_{mes}^2}T_{mesure} + \frac{1}{\sigma_{CFM}^2}T_{CFM}\right)$$

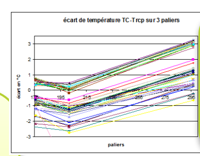
Best Estimate Tbc
- construit avec 3 estimateurs indépendants
- incertitude réduite à ±0,6°C (contre ±1,1°C)



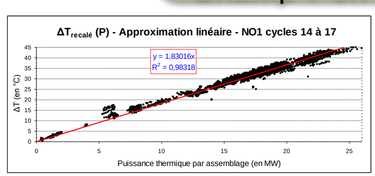

$$Q_{\Delta Pcoude} = KD^{3/2}Rc^{1/2}\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

- **ΔPcoude** (en continu)
- Incertitude réduite (ΔPcoude)
- RCP114(orli) en continu
- Implanté sur EPR (essais démarrage)

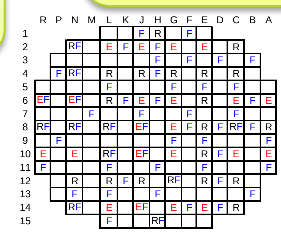
± 2,8% *(boucle)*




- TC RIC recalés voire étalonnés in-situ
- Incertitude réduite
- Champ T en BC




Détection précoce et précise :
- de dérives de sondes
- de biais



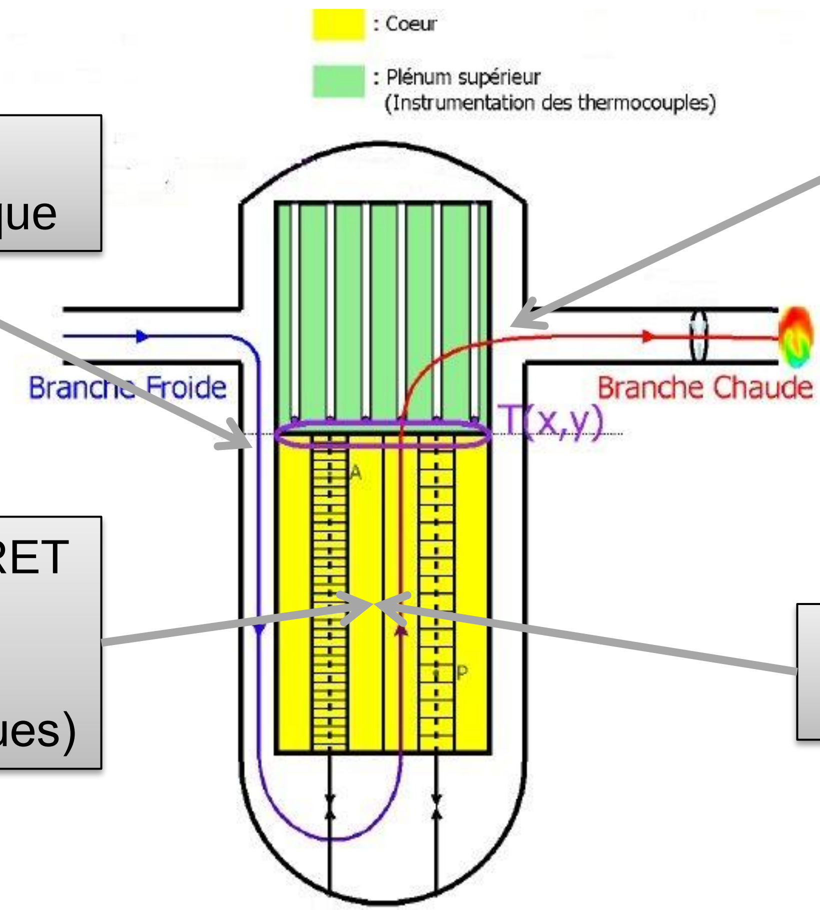
# 1. PROBLÉMATIQUE PAPRICA

## b. Modèles et Mesures existantes

MODELICA / DYMOLA

SATURNE : CFD

THYC : Thermohydraulique

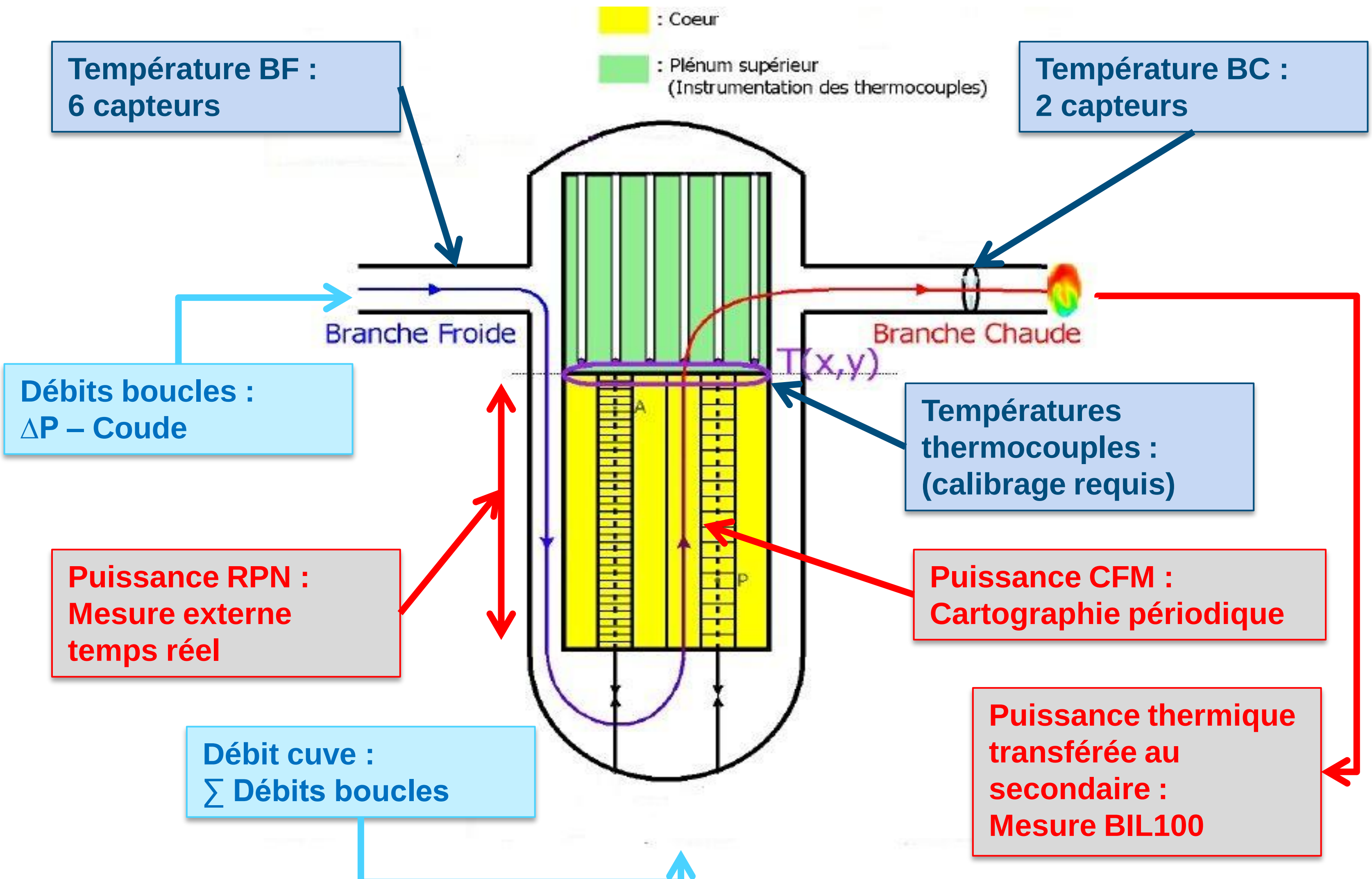



CABRI + CAMARET (puissances intégrées lors d'essais périodiques)

COCCINELLE : Neutronique

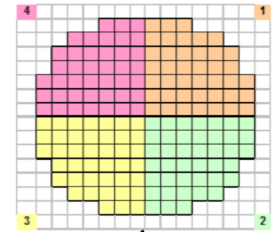
# 1. PROBLÉMATIQUE PAPRICA

## b. Modèles et Mesures existantes



# 1. PROBLÉMATIQUE PAPRICA

## b. Modèles et Mesures existantes

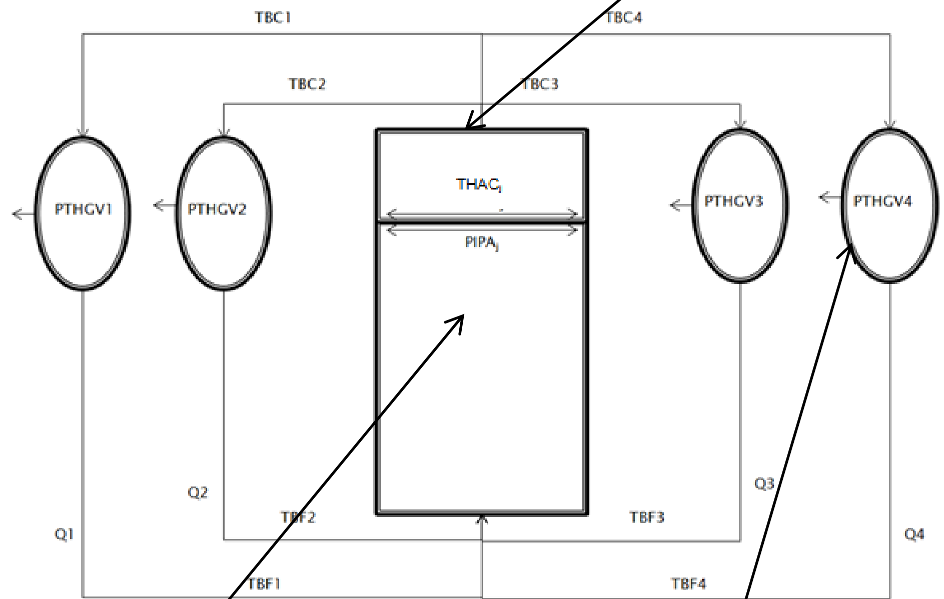


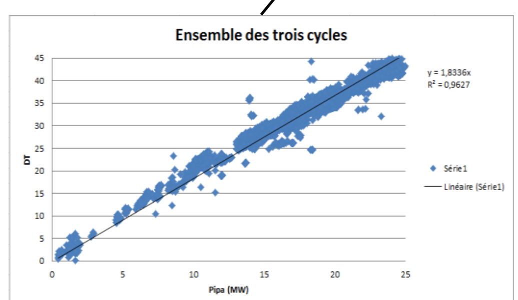

- Nombreux logiciels et codes de calcul existants, plus ou moins complexes et accessibles :
  - méthodologie capable de travailler avec des « boîtes noires »
  - possibilité d'interchanger des modèles
  - choisir le niveau de modélisation le plus adapté à la précision finale souhaitée

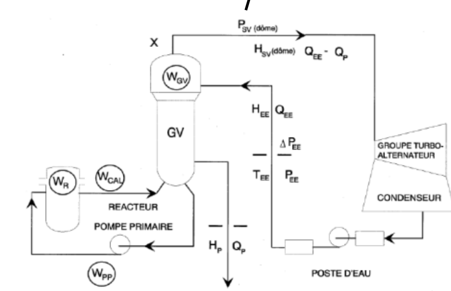
- Nombreux instruments ou méthodes de mesures, à bien calibrer et valider par ailleurs (« *Garbage In, Garbage Out* »)

- **On souhaite utiliser le maximum de mesures en association avec un modèle → ASSIMILATION DE DONNEES**

- Dans un premier temps, modèle simplifié (thermodynamique 0D + formules semi-empiriques)

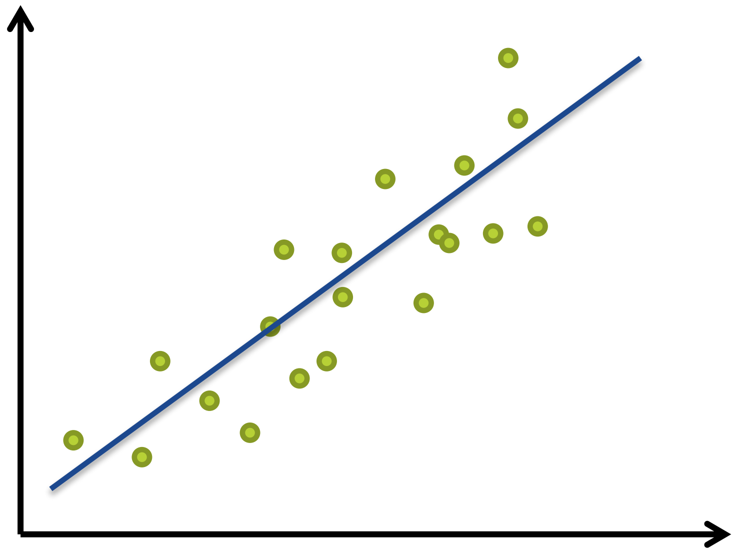


# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

Principes et algorithmes principaux

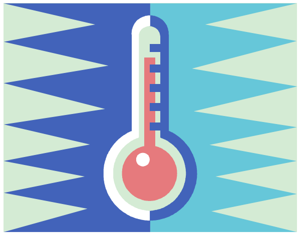


# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

## a. Concilier Modèle et Observations

**Modèle**

**Observation**



**T ?**

**$T_1 \pm \sigma_1$ °C**

**$T_2 \pm \sigma_2$ °C**

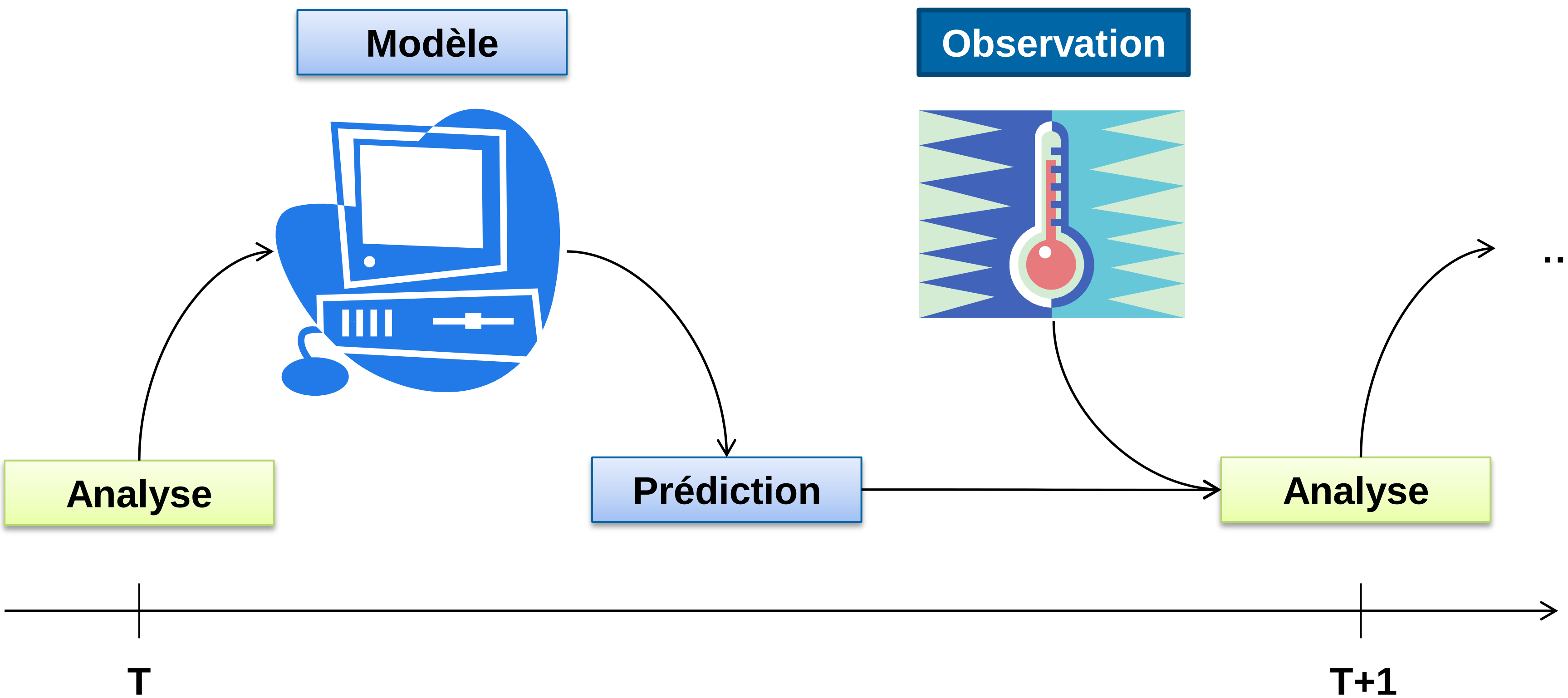
$$\boxed{T = kT_1 + (1-k)\,T_2}$$

$$\boxed{k = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2+\sigma_2^2}}$$

**Analyse**

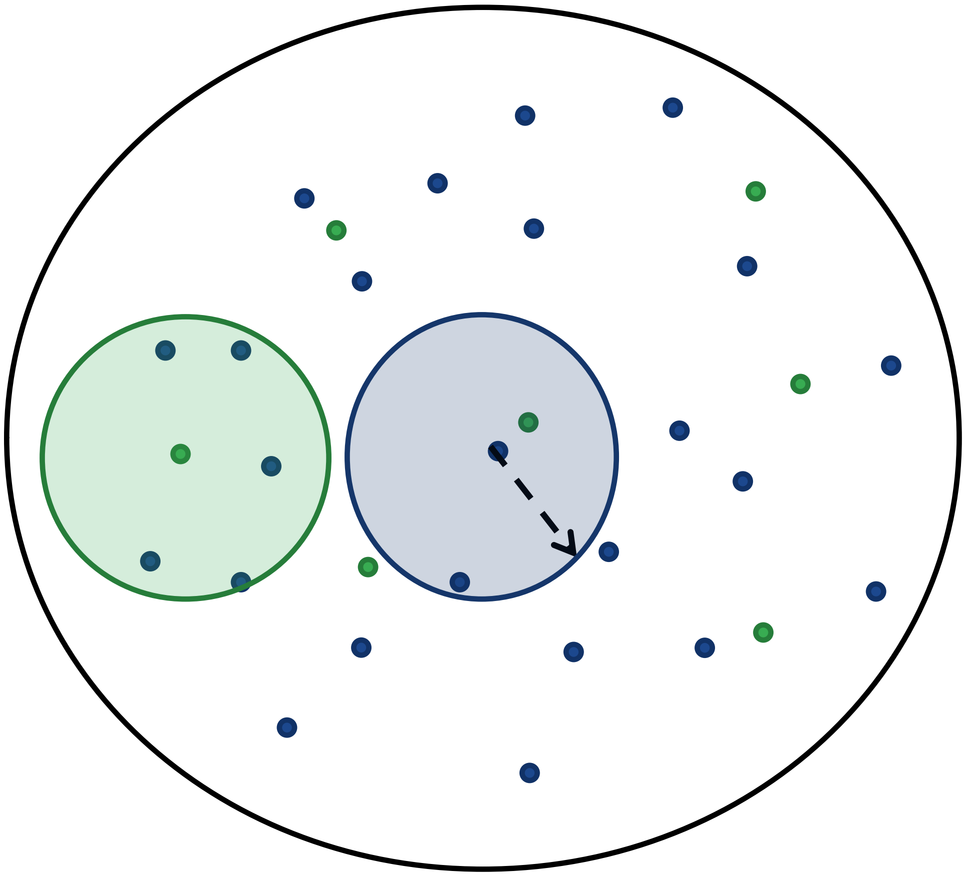
# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

## a. Concilier Modèle et Observations



# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

## a. Concilier Modèle et Observations



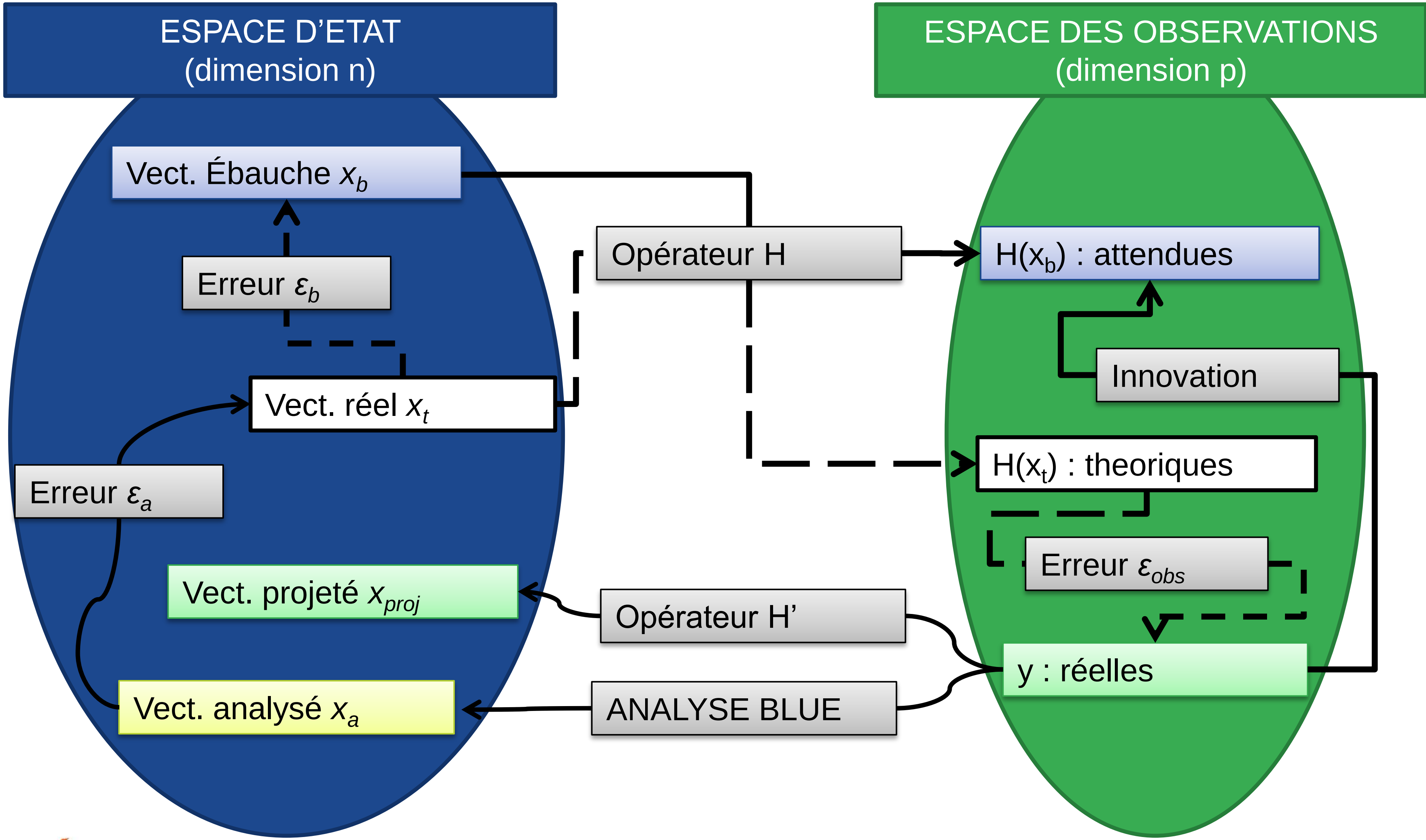
$$T_a(i) = T_b(i) + \sum_{j=1}^{p} k_{i,j}\left(T_{obs}(j) - T_b(i)\right)$$

$$k_{i,j} = \frac{\omega_{i,j}}{\sum_{j=1}^{p} \omega_{i,j}}$$

**Observations** pondérées selon leur proximité au **point du maillage** considéré (opérateur projection) ; opération inverse permet de prévoir les observations en fonction de l'état du système (**opérateur observation**)

# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

b. Le BLUE : *Best Linear Unbiased Estimator*



# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

## b. Le BLUE : *Best Linear Unbiased Estimator*

- Hypothèses :
  - *Best* : on cherche la meilleure estimation $\mathbf{x_a}$, meilleure au sens où l'erreur est d'espérance nulle et de variance minimale
  - *Linear* : on cherche $\mathbf{x_a}$ comme combinaison linéaire de $\mathbf{x_b}$ et de **y**, et on fait l'hypothèse que l'opérateur d'observation **H** est linéaire
  - *Unbiased* : l'estimation doit être non biaisée (espérance nulle), et on fait l'hypothèse que les erreurs d'ébauche et d'observations sont également non biaisées (gaussiennes centrées)

- **Formulation Bayésienne : $x_a$ est le vecteur d'état le plus probable étant donné l'ensemble des informations données (i.e. $x_b$ et y)**
- **Possibilité de calculer l'incertitude associée à notre analyse (matrice de covariance A)**
- **Estimateur des moindres carrés = formulation variationnelle (3DVAR), équivalente sous certaines hypothèses :**

$$J(x) = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + (y_{obs} - H[x])^T R^{-1} (y_{obs} - H[x])$$

**THEOREME :**
**Sous ces hypothèses, $x_a$ existe et est unique :**

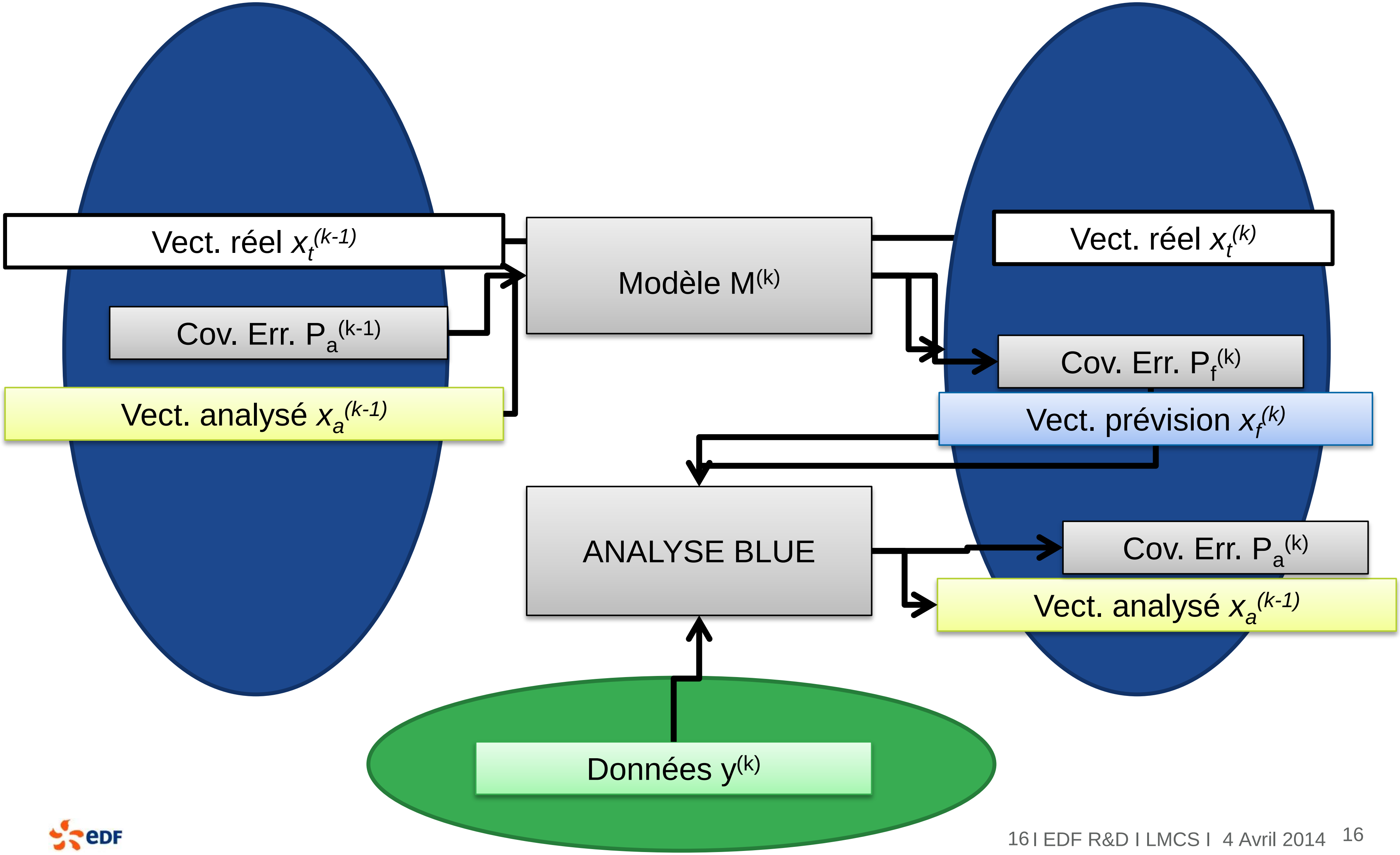
$$\begin{aligned} x_a &= x_b + K^\star \cdot (y_{obs} - H \cdot x_t) \\ avec\ K^\star &= BH^T \left(R + HBH^T\right)^{-1} \end{aligned}$$

**Les paramètres sont les matrices H, R et B**
**La matrice de covariance de $\varepsilon_a$ est obtenue par :**

$$A = (Id - K^\star H)B.$$

# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

## c. Le Filtre de Kalman, version dynamique du BLUE



# 2. ASSIMILATION DE DONNÉES

## c. Le Filtre de Kalman, version dynamique du BLUE

- **Kalman = Modèle d'évolution + succession de BLUE**
- **Propagation de la matrice de covariance d'erreur**
- **Recalage itératif d'une trajectoire temporelle**

- Variantes nombreuses :
  - *4DVAR,* équivalent variationnel
  - *Lisseur de Kalman,* assimilation de toutes les observations (présentes, passées ou futures) dans une fenêtre temporelle donnée
  - *Filtres étendus,* pour prendre en compte certaines non-linéarités
  - *Méthodes d'Ensemble,* qui ne propagent pas l'incertitude sous la forme d'une matrice de covariance mais d'un ensemble de vecteurs « particules » représentant la dispersion statistique

**Prévision :**

$$\begin{cases} x_f(t^{(k)}) = M^{(k-1)} \cdot x_a^{(k-1)} \\ P_f^{(k)} = M^{(k-1)} P_a^{(k-1)} (M^{(k-1)})^T + Q^{(k-1)} \end{cases}$$

**Calcul du gain :**

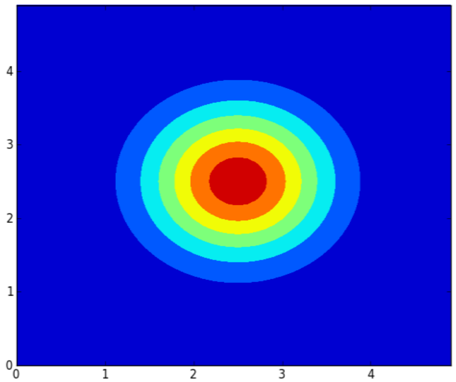
$$K^{(k)} = P_f^{(k)} H^{(k)} \left[ R^k + H^{(k)} P_f^{(k)} (H^{(k)})^T \right]^{-1}$$

**Analyse :**

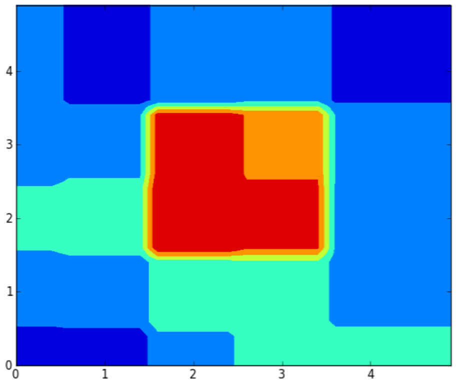
$$\begin{cases} x_a(t^{(k)}) = x_f(t^{(k)}) + K^{(k)} \left[ y^{(k)} - H^{(k)} \cdot x_f^{(k)} \right] \\ P_a^{(k)} = \left[ Id - K^{(k)} H^{(k)} \right] P_f^k \end{cases}$$

# 3. MISE EN APPLICATION

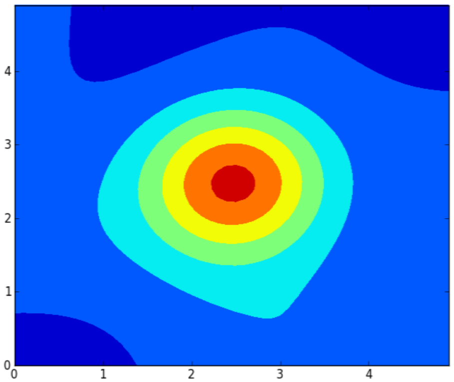
Exemple de méthode d'utilisation et d'expérimentation




**Ebauche**



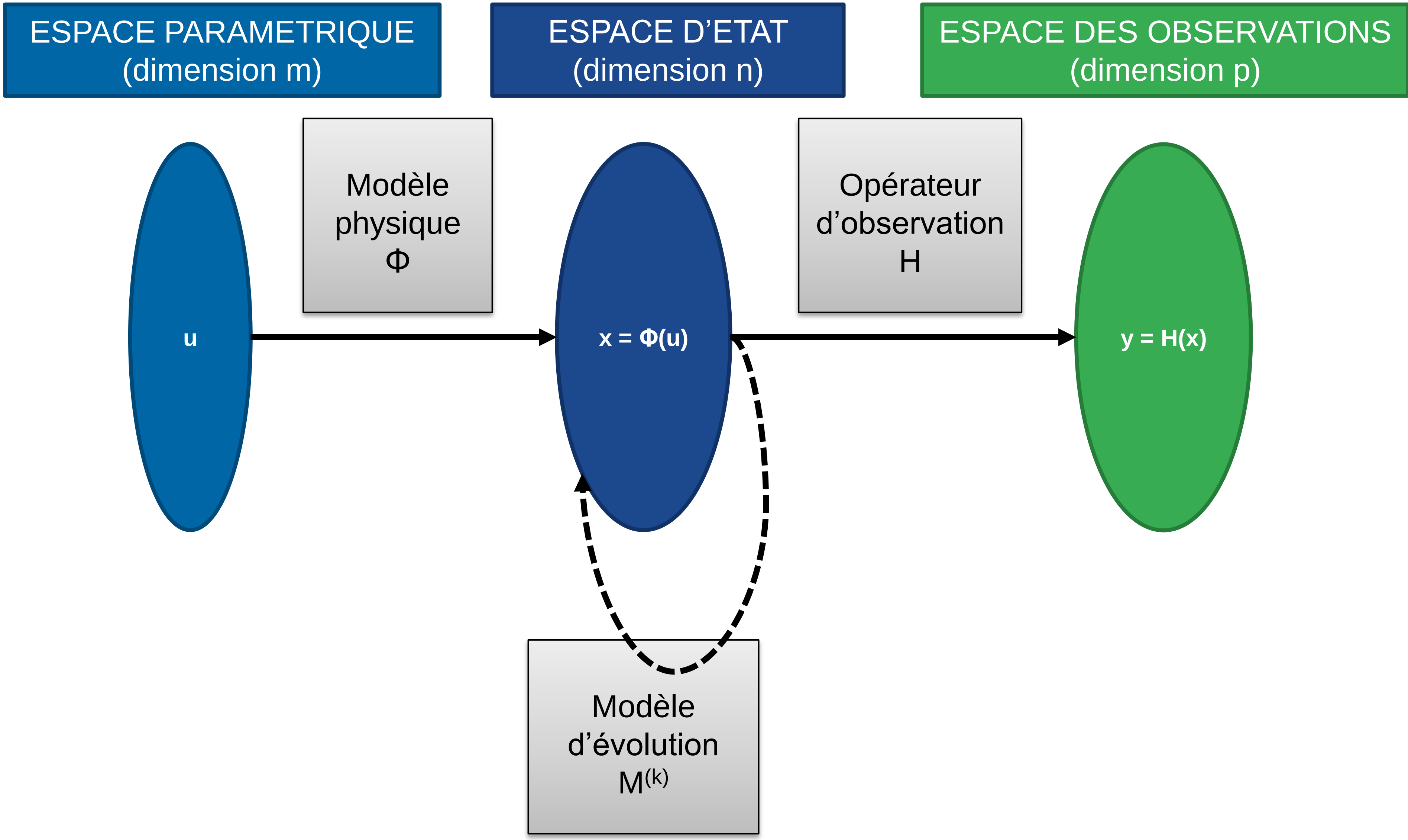

**Observation**




**BLUE**

# 3. MISE EN APPLICATION

## a. Choix des espaces et construction des opérateurs



# 3. MISE EN APPLICATION

## a. Choix des espaces et construction des opérateurs

**ESPACE PARAMETRIQUE** (dim = 202)

**ESPACE D'ETAT** (dimension 210)

**ESPACE DES OBSERVATIONS** (dimension 293)

Modèle Simple PAPRICA $\Phi$

Opérateur d'observation H

**u** → **$x = \Phi(u)$** → **$y = H(x)$**

$u = (Q_i$, $TBF_i$, $PIPA_{norm,j}$, PTHREAC)

*Loi PIPA*
+
*Moyenne ¼ cœur*
+
*Bilan enthalpique GV au primaire*
+
*Fit de bypass*

$x = (Q_i$, $TBF_i$, $TBC_i$, $THAC_j$, $PTHGV_i$, $\varepsilon_{bypass})$

*Matrice*

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ & & \dots & & \\ & & \dots & & \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

y = ( ΔP-Coude, T°RCP TC RIC, PIPA CFM BIL100)

# 3. MISE EN APPLICATION

## b. Obtention des termes d'ébauche par Monte-Carlo

- L'ébauche $\mathbf{x_b}$ et sa matrice d'erreur associée **B** :
  - Représentent la connaissance qu'on a du système sans la moindre observation
  - $\mathbf{x_b}$ contient les valeurs de conception et **B** leur variabilité potentielle (termes diagonaux) et les corrélations entre variables (termes non diagonaux)
  - *Unbiased* : l'estimation doit être non biaisée (espérance nulle), et on fait l'hypothèse que les erreurs d'ébauche et d'observations sont également non biaisées (gaussiennes centrées)

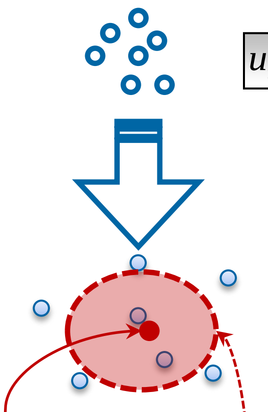
- Comment contrôler les hypothèses cachées dans les termes d'ébauche ?
- Méthode inspirée des méthodes d'ensemble :

**1) Simulation d'un échantillon d'inputs *u***

**2) Calcul des vecteurs d'états correspondants**

**3) Etude de la statistique de l'ensemble simulé : $\mathbf{x_b}$ = moment d'ordre 1, B = moment d'ordre 2**

$$u_t = NG(u_0, S)$$



$$x_t = \Phi(u_t)$$

$$x_b = \frac{1}{N}\sum x_i \qquad B = \frac{1}{N-1}\sum (x_i - x_b)(x_i - x_b)^T$$

- Finalement, l'ébauche consiste en l'approximation :

$$x_t = NG(x_b, B)$$

- Si Φ est linéaire, alors ce n'est pas une approximation et on a

$$x_b = \Phi u_0 \qquad B = \Phi S \Phi^T$$

# 3. MISE EN APPLICATION

## c. Expériences Jumelles

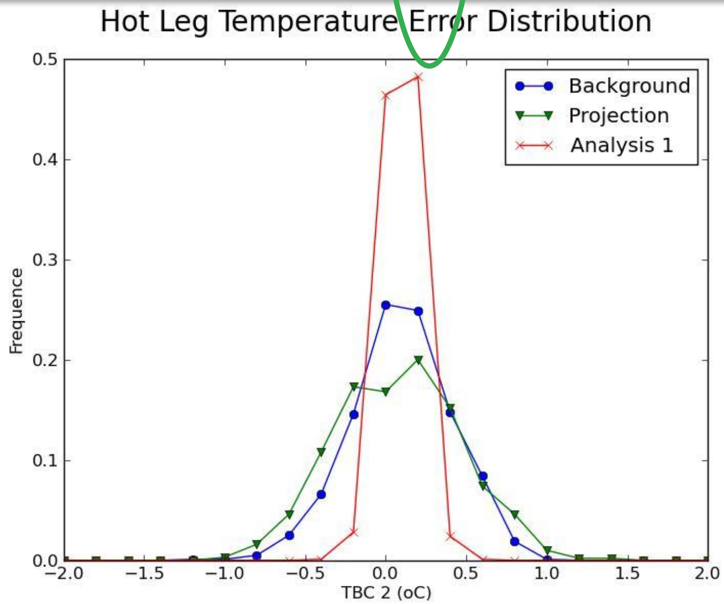
- Objectif : évaluer la performance d'une approche d'AD
- Problème : avec des données réelles, le vecteur d'état réel xt est inaccessible → impossible de calculer les erreurs commises

- Expériences jumelles :
  - Simulation de données (vecteurs d'état et observations associées) pseudo-réelles
  - Application de la méthodologie aux données pseudo-réelles
  - Postulat : les résultats obtenus avec les données simulées sont extensibles aux données réelles

- Nécessité d'avoir éprouvé par ailleurs le modèle physique permettant la simulation de données
- Données réelles proches du cadre d'AD (recalées pour être non-biaisées, etc.)

- Quatre estimateurs :
  - Ebauche (modèle seul)
  - Projection (observations seules)
  - Analyse 1 (espace d'état et espace d'observations AVEC les termes in-core (THAC, PIPA, TC RIC))
  - Analyse 2 (espace d'état et espace d'observations SANS les termes in-core)

| | Débit ($m^3/s$) | Débit (%QN) | TBF (°C) | TBC (°C) | THAC (°C) | PTHGV (°C) | PTHGV (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Val. types | 5,0 | 100% | 290 | 325 | 326 | 984 | 100% |
| Ebauche | +/- 0,10 | +/- 2,0% | +/- 2,00 | +/- 1,27 | +/- 3,82 | +/- 54,06 | +/-5,5% |
| Projection | +/- 0,12 | +/- 2,4% | +/- 0,82 | +/- 1,73 | +/- 3,17 | +/- 6,25 | +/- 0,63% |
| Analyse 1 | +/- 0,06 | +/- 1,2% | +/- 0,54 | +/- 0,29 | +/- 2,24 | +/- 6,04 | +/- 0,61% |
| Analyse 2 | +/- 0,07 | +/- 1,4% | +/- 0,62 | +/- 0,48 | NC | +/- 6,11 | +/- 0,62% |



# CONCLUSION

- L'Assimilation de Données permet de combiner Modèle et Observations pour produire une estimation plus fiable

- Le BLUE est une « moyenne pondérée par les variances » : les données les plus fiables ont un poids plus important.

- Par une méthode de type Monte-Carlo, on peut utiliser un modèle physique pour obtenir les termes d'ébauche nécessaires pour implémenter les algorithmes d'Assimilation de Données

# MERCI