

Estimation et Commande



PRINCIPE GÉNÉRAL
&
**ILLUSTRATION SUR UN PROCÉDÉ DE
CRISTALLISATION DE SUCRE DE
CANNE**

L. BOILLEREAUX

Démarche générale



1

- Etablir le modèle dynamique du procédé → Equations d'état

2

- Identifier les paramètres du modèle
 - Littérature
 - Analyse
 - Méthodes inverses

3

- Déterminer les grandeurs que l'on souhaite piloter
- Déterminer les entrées pertinentes
- Répertorier les sorties disponibles (observations)

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, p, t)$$
$$y = h(x, u, p, t)$$

Les grandeurs à piloter sont mesurées

Les grandeurs à piloter ne sont pas mesurées

7

- Analyse de commandabilité

8

- Mise en place de la commande

4

- Analyse de l'observabilité

5

- Ajout de « connaissances » (mesures ou pseudo mesures) si pb d'observabilité

6

- Mise en place de l'observateur

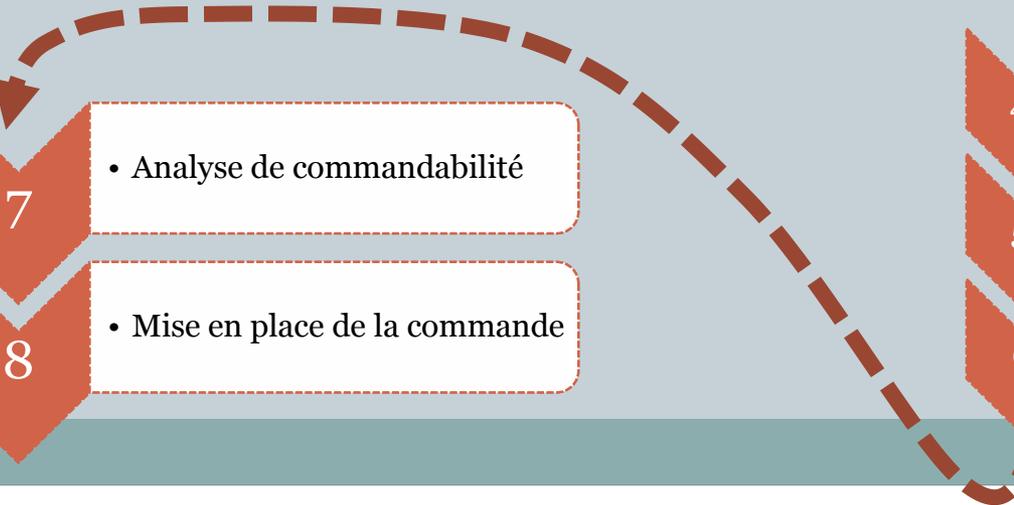


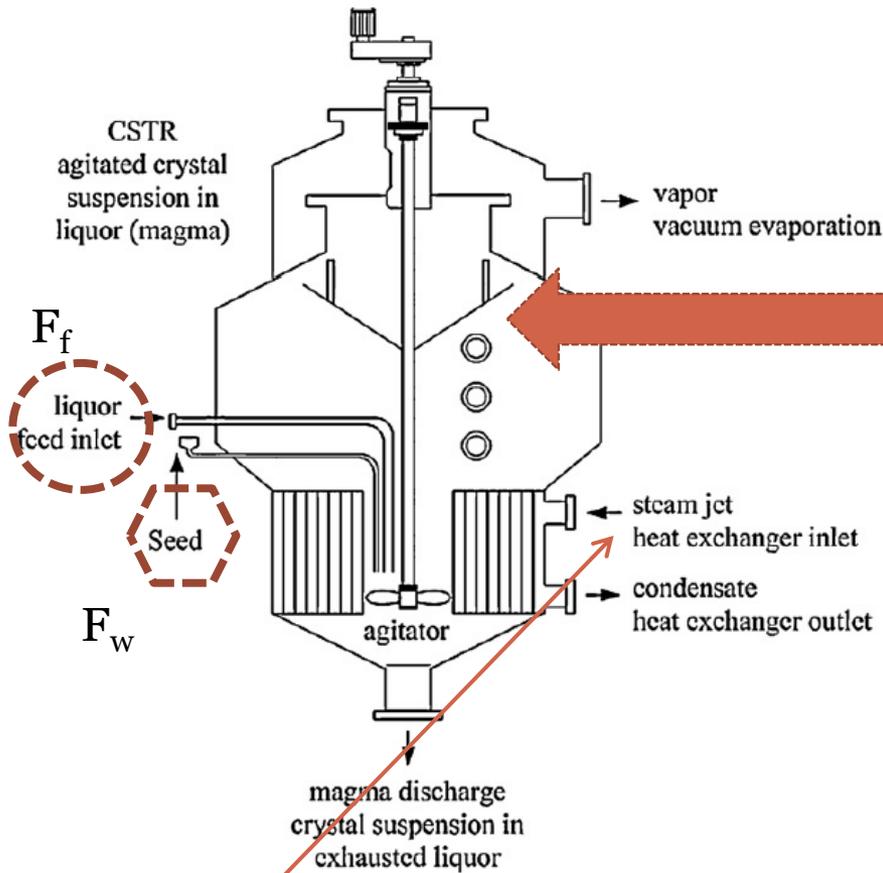
Illustration de la démarche sur un procédé de cristallisation de sucre de canne – Usine de Bois Rouge



**Résultats de Travaux effectués en
collaboration avec
C. damour, M. Benne, B. Grondin-Perez
& J.P. Chabriat (Université de la reunion)**

USINE DE BOIS ROUGE

Etape 1 – modèle



- Dernière étape d'extraction :
- Récupérer un max de cristaux qq soit la distribution de tailles
 - Avec un taux d'impuretés élevé

$$\frac{dm_c}{dt} = \alpha_{cryst} m_s$$

m_c : masse des cristaux
 α_{cryst}

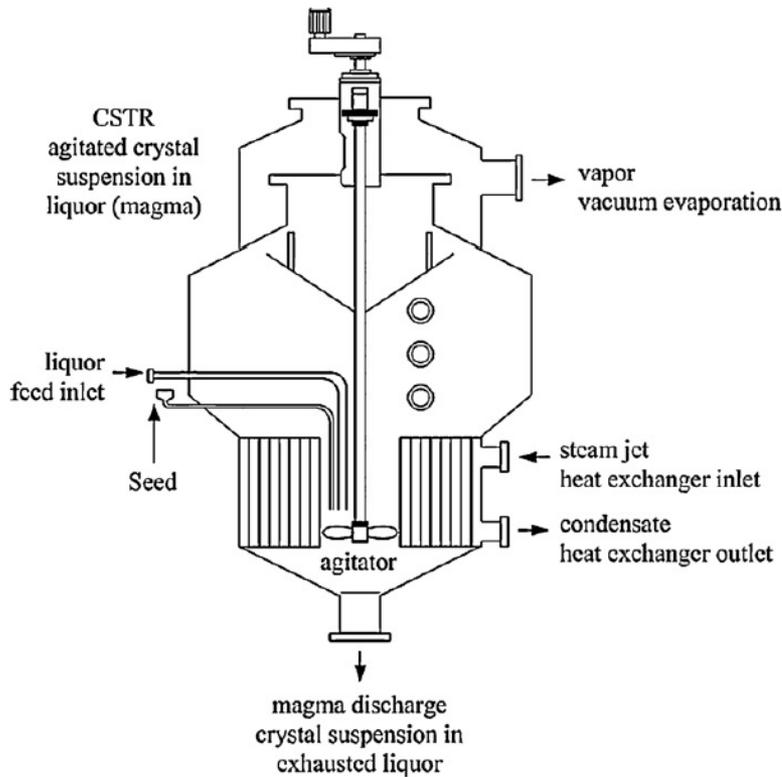
$$\frac{dm_s}{dt} = \rho_f F_f Bx_f Pte_f - \frac{dm_c}{dt}$$

$$\frac{dm_w}{dt} = \rho_f F_f (1 - Bx_f) + \rho_w F_w - \frac{dm_{vap}}{dt}$$

$$\frac{dm_i}{dt} = \rho_f Bx_f (1 - Pte_f) F_f$$

$$h_{vap} \frac{dm_{vap}}{dt} = \dot{Q} + \rho_f F_f h_f + \rho_w F_w h_w + \lambda_{cryst} \dot{m}_c - C_{p_{mg}} T_{mg} \frac{dm_{mg}}{dt}$$

Etape 2 (si nécessaire) – Identifier les paramètres inconnus



$$\frac{dm_c}{dt} = \underbrace{(\alpha_{cryst})}_{\text{méconnu}} m_s$$

On dispose des mesures suivantes :

- Brix de la liqueur mère
- Brix du magma

$$CC_{experimental} = \frac{Bx_{mg} - Bx_{lm}}{1 - Bx_{lm}}$$

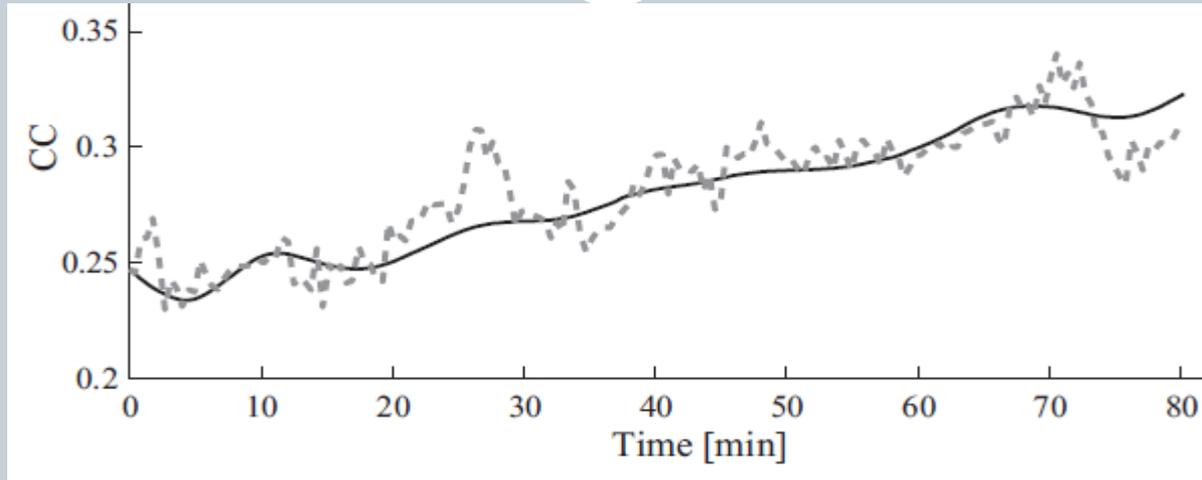
$$CC_{model} = \frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}$$

Méthode inverse

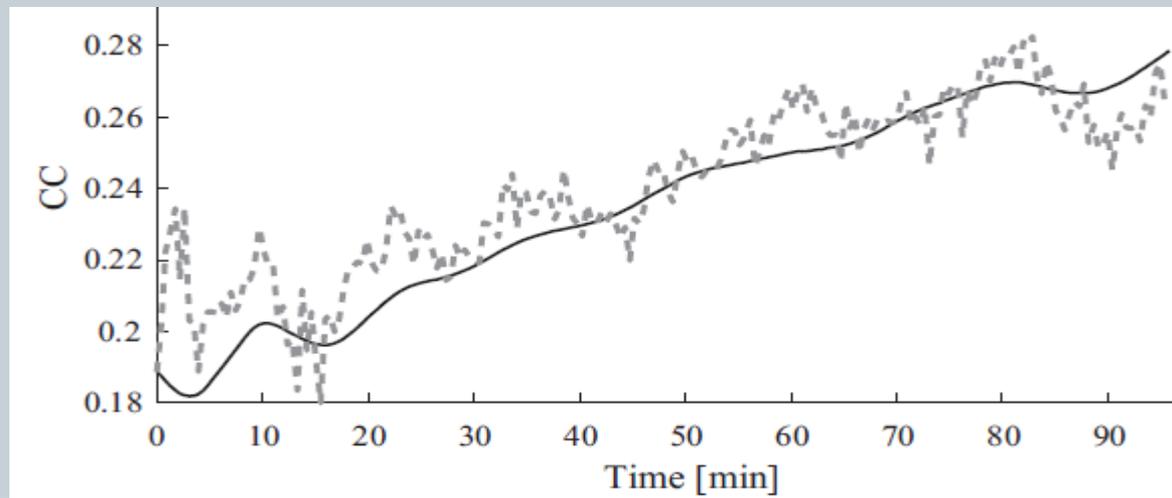
$$\alpha_{cryst} = \arg \min \frac{1}{2} \sum_i (CC_{experimental}^i - CC_{model}^i)^2$$

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [m_s \ m_c \ m_w \ m_i]^T$$

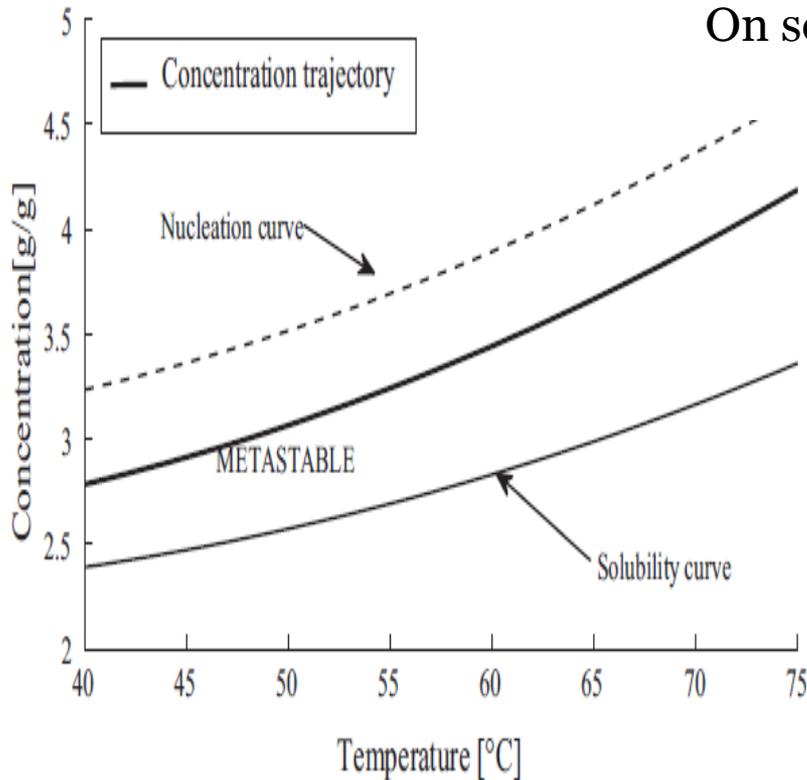
Etape 2 (si nécessaire) – Identifier les paramètres inconnus



--- expérience
— modèle



Etape 3 – approche « classique » : maintien de la solution en sursaturation



On souhaite maintenir la solution en sursaturation :
contrôle de la concentration $s = x_1/x_3$

En général, la conductivité électrique du magma est mesurée et liée empiriquement à la concentration

Un régulateur PID est utilisé pour maintenir la solution en sursaturation

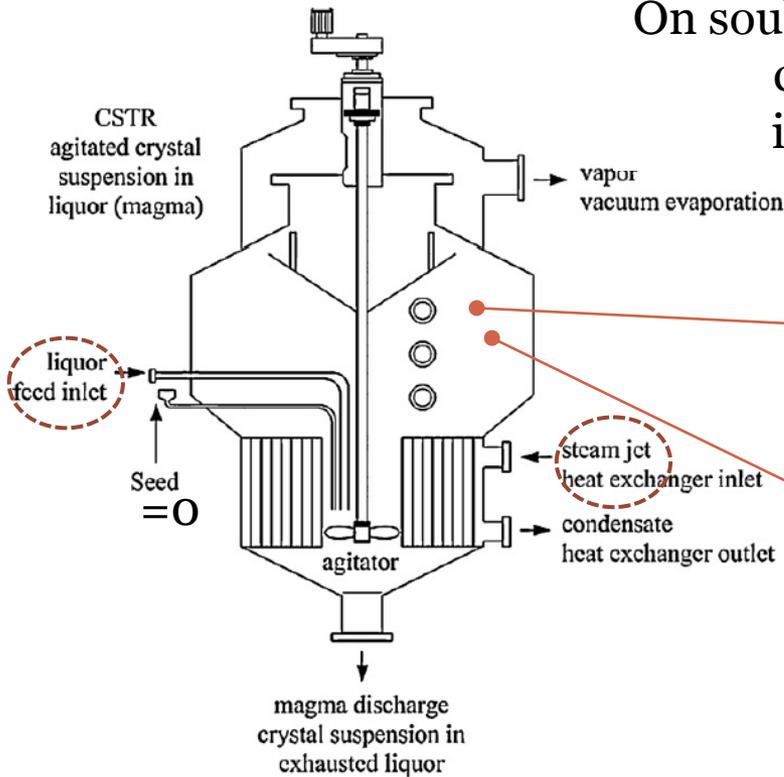
m_c augmente « librement »

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} m_s & m_c & m_w & m_i \end{bmatrix}^T$$

Etape 3 – nouvelle approche : maintien de la solution en sursaturation et suivi de trajectoire pour la masse des cristaux

On souhaite :

contrôle de la concentration x_1/x_3
imposer à x_2 une trajectoire de croissance linéaire



réfractomètre

$$Bx_{lm} = \frac{x_1 + x_4}{x_1 + x_3 + x_4}$$

Système micro-onde

$$Bx_{mg} = \frac{x_1 + x_2 + x_4}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}$$

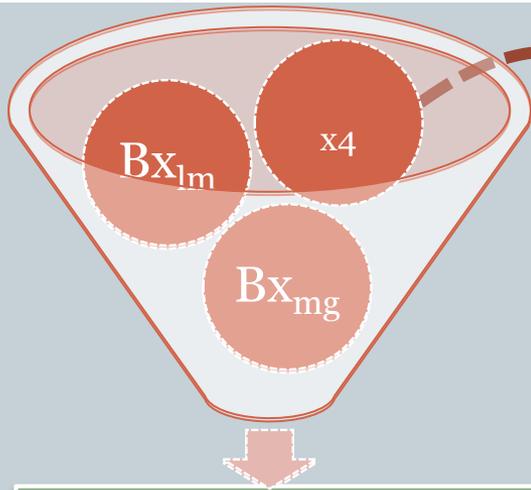
NOUS DEVONS ESTIMER x_1 , x_2 ET x_3

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} m_s & m_c & m_w & m_i \end{bmatrix}^T$$

Etapes 4 & 5 – Etude d'observabilité



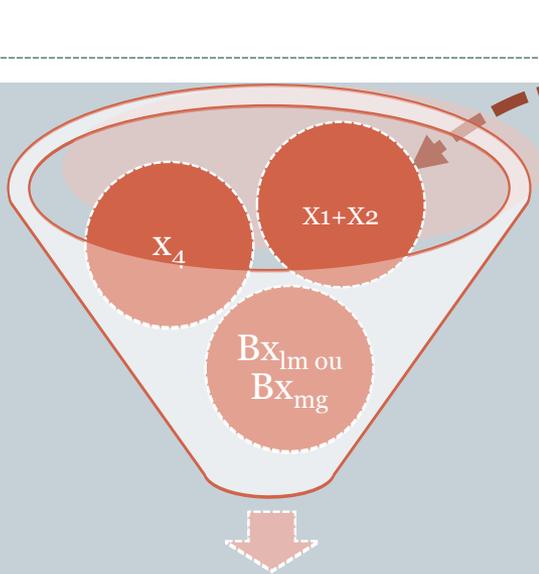
La masse d'impuretés (x_4) peut être connue à tout moment



Observable

Il faut ajouter de la « connaissance »

Etape 4– Etude d'observabilité

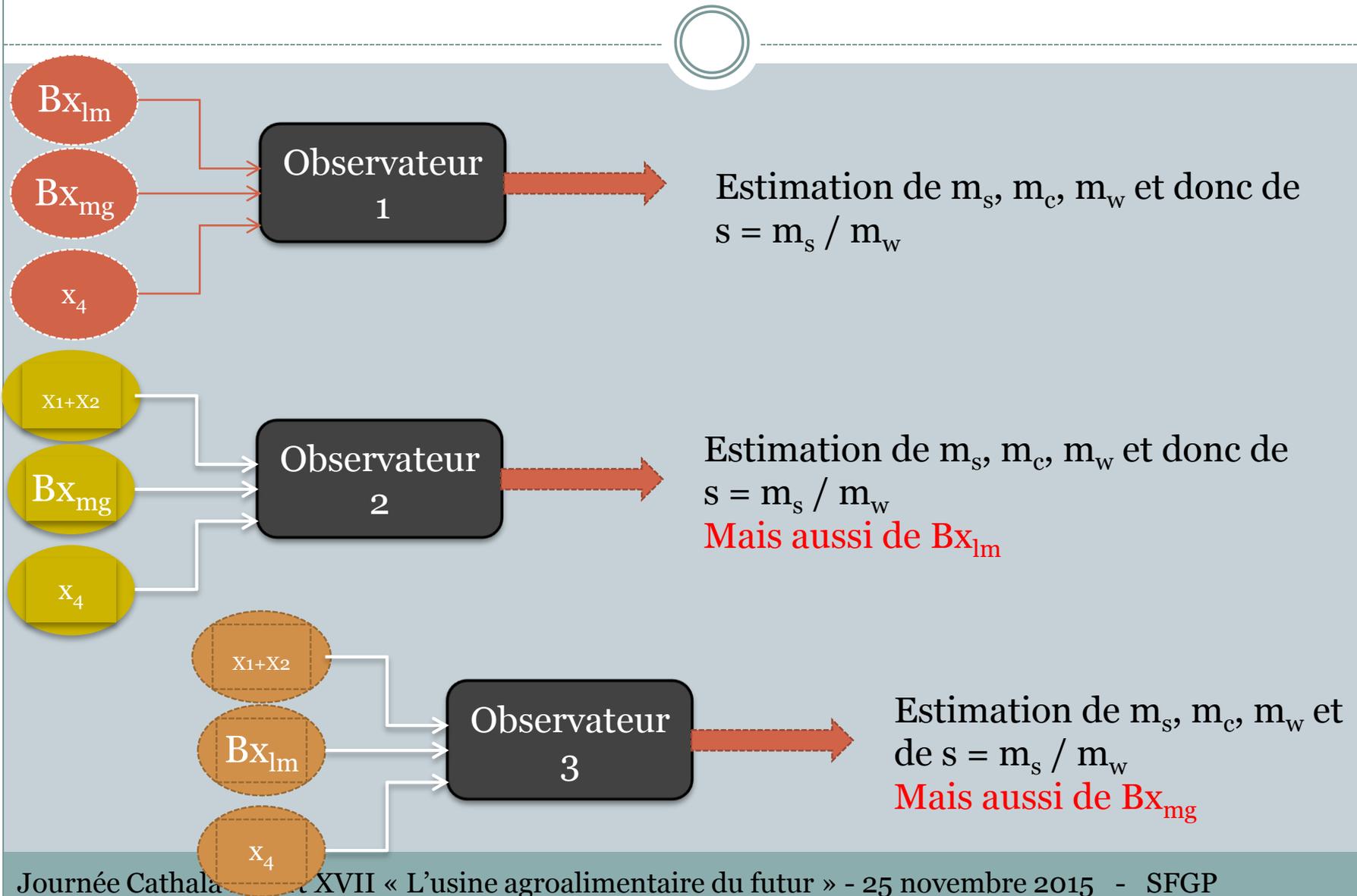


La masse de sucre total ($x_1 + x_2$)
peut être connue à tout moment

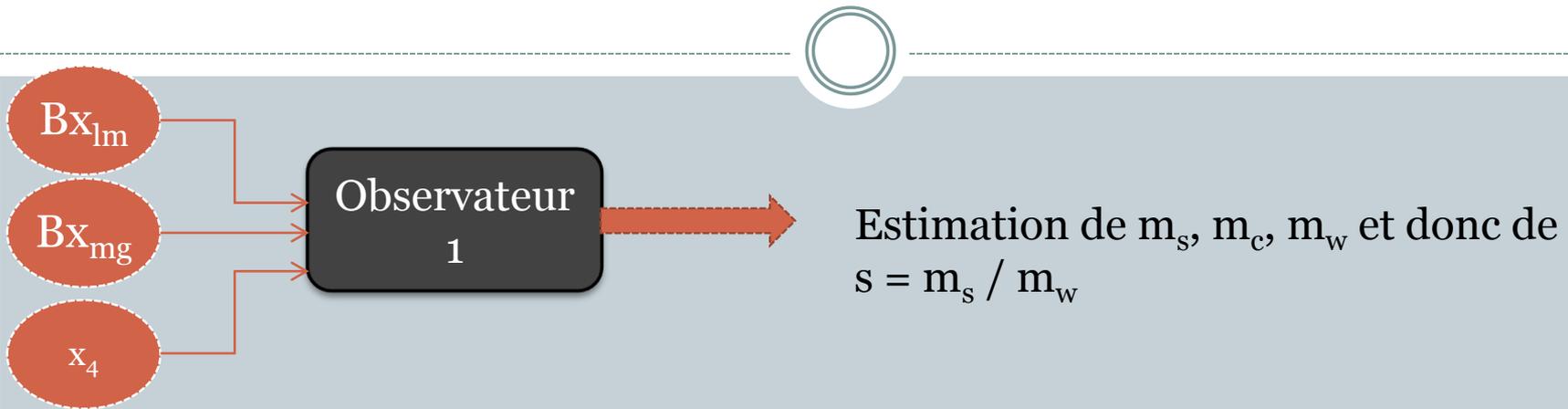
Observable

Il faut ajouter de la « connaissance »

Etape 6 - De nombreuses configurations d'observateurs



Etape 6 – construction de l'observateur



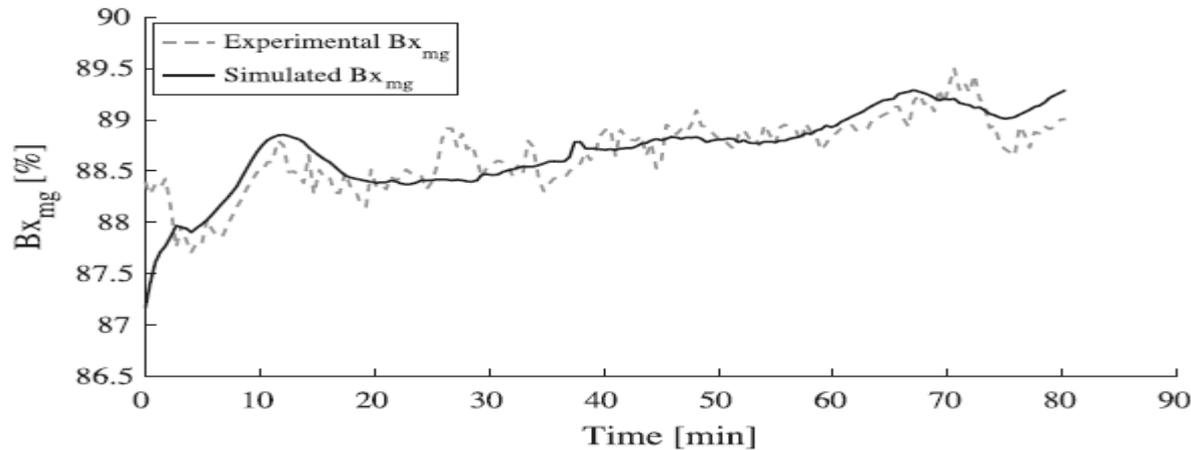
$$\frac{d\hat{m}_c}{dt} = \alpha_{cryst} \hat{m}_s + k_{11}(Bx_{lm} - \hat{B}x_{lm}) + k_{12}(Bx_{mg} - \hat{B}x_{mg})$$

$$\frac{d\hat{m}_s}{dt} = \rho_f F_f Bx_f Pte_f - \frac{d\hat{m}_c}{dt} + k_{21}(Bx_{lm} - \hat{B}x_{lm}) + k_{22}(Bx_{mg} - \hat{B}x_{mg})$$

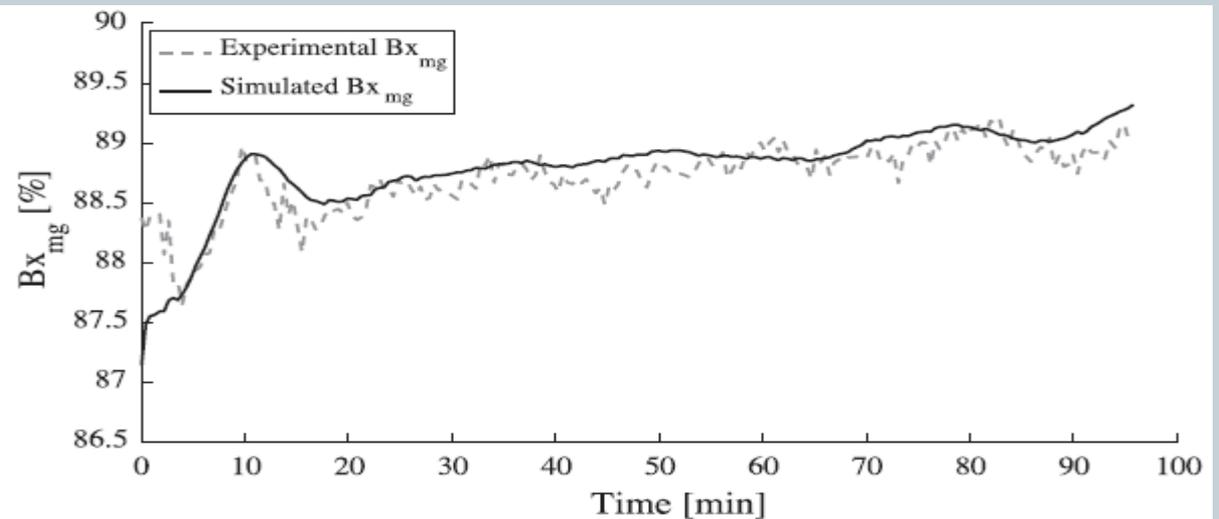
$$\frac{d\hat{m}_w}{dt} = \rho_f F_f (1 - Bx_f) + \rho_w F_w - \frac{d\hat{m}_{vap}}{dt} + k_{31}(Bx_{lm} - \hat{B}x_{lm}) + k_{32}(Bx_{mg} - \hat{B}x_{mg})$$

Les paramètres sont « fournis » par l'observateur : Luenberger, Filtre de Kalman, ...

Illustration de résultats pour l'observateur 3



Observateurs de Luenberger étendus



Etape 6 – Analyse de commandabilité et mise en place d'une commande par linéarisation entrée sortie

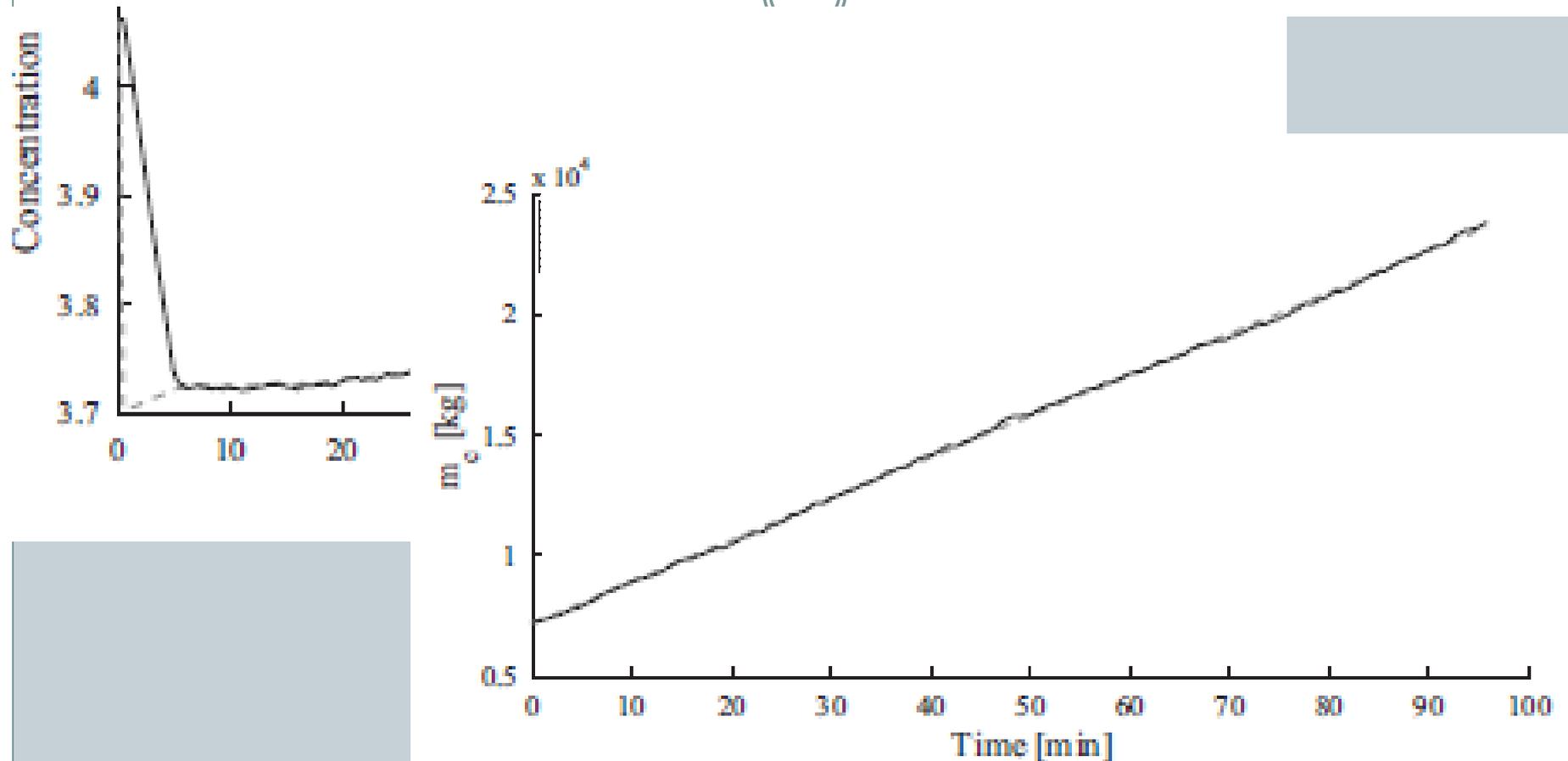


Fig. 7. Crystal mass setpoint tracking.

Conclusion



Amélioration significative de la productivité de l'extraction

Suivant les capteurs disponibles, possibilités d'utiliser plusieurs observateurs permettant aussi le diagnostic de défaut

Possibilité d'étudier les consignes afin d'obtenir un optimum énergétique et de productivité

	Sugar mill	180 kg min ⁻¹	200 kg min ⁻¹	220 kg min ⁻¹	240 kg min ⁻¹
Volume of liquor [m ³]	45.67	29.41	32.02	26.00	33.89
Energy [10 ¹⁰]	2.19	1.98	2.04	1.92	2.10