

# **Projet de Fin de Module**

## Évaporation et Cristallisation

Conception et Simulation d'une Unité Intégrée  
d'Évaporation à Multiples Effets et de Cristallisation

Filière Procédés et Ingénierie Chimique (PIC)  
3ème Année - Cycle d'Ingénieur  
Université Hassan 1 - FST Settat

Année Universitaire 2024-2025  
Durée du projet : 15 jours

# Table des matières

<b>1 Contexte Industriel</b>	<b>3</b>
<b>2 Objectifs Pédagogiques</b>	<b>3</b>
<b>3 Description du Procédé</b>	<b>3</b>
3.1 Alimentation . . . . .	3
3.2 Spécifications du Produit Final . . . . .	3
<b>4 Travail Demandé</b>	<b>4</b>
4.1 Partie 1 : Évaporation à Multiples Effets (40 points) . . . . .	4
4.1.1 Modélisation Thermodynamique (15 points) . . . . .	4
4.1.2 Optimisation Énergétique (10 points) . . . . .	4
4.1.3 Analyse de Sensibilité (15 points) . . . . .	4
4.2 Partie 2 : Cristallisation (40 points) . . . . .	5
4.2.1 Modélisation de la Cinétique (20 points) . . . . .	5
4.2.2 Stratégie de Refroidissement (10 points) . . . . .	5
4.2.3 Dimensionnement du Cristalliseur (10 points) . . . . .	6
4.3 Partie 3 : Intégration et Optimisation Globale (20 points) . . . . .	6
4.3.1 Intégration Énergétique (10 points) . . . . .	6
4.3.2 Analyse Technico-Économique (10 points) . . . . .	6
<b>5 Livrables Attendus</b>	<b>6</b>
5.1 Code Python (40%) . . . . .	6
5.2 Rapport Technique (40%) . . . . .	7
5.3 Présentation Orale (20%) . . . . .	7
<b>6 Contraintes et Recommandations</b>	<b>7</b>
6.1 Bibliothèques Python Requises . . . . .	7
6.2 Critères d'Évaluation . . . . .	8
6.3 Conseils Méthodologiques . . . . .	8
<b>7 Ressources Disponibles</b>	<b>8</b>
7.1 Documentation Technique . . . . .	8
7.2 Données Physico-Chimiques . . . . .	8
<b>8 Modalités de Rendu</b>	<b>9</b>
8.1 Format de Soumission . . . . .	9
8.2 Date Limite . . . . .	9
8.3 Travail en Équipe . . . . .	9

# 1 Contexte Industriel

Une société agroalimentaire marocaine souhaite moderniser son unité de production de sucre cristallisé à partir de jus de canne à sucre. L'objectif est de concevoir une installation complète comprenant :

- Un système d'évaporation à multiples effets pour concentrer le jus
- Une unité de cristallisation avec contrôle de la sursaturation
- Un système de récupération énergétique optimisé
- Une analyse technico-économique complète

## 2 Objectifs Pédagogiques

À l'issue de ce projet, vous devez être capable de :

1. Dimensionner un évaporateur à multiples effets avec calculs thermodynamiques rigoureux
2. Modéliser la cinétique de cristallisation et la distribution de taille des cristaux
3. Utiliser les bibliothèques thermodynamiques Python (CoolProp, thermo, scipy)
4. Optimiser un procédé industriel sous contraintes multiples
5. Réaliser une analyse de sensibilité paramétrique
6. Présenter des résultats techniques de manière professionnelle

## 3 Description du Procédé

### 3.1 Alimentation

Le jus de canne à sucre clarifié entre dans le système avec les caractéristiques suivantes :

Paramètre	Valeur	Unité
Débit massique	20 000	kg/h
Concentration en saccharose	15	% massique
Température d'entrée	85	°C
Pression	1.5	bar (abs)

TABLE 1 – Caractéristiques de l'alimentation

### 3.2 Spécifications du Produit Final

Paramètre	Valeur	Unité
Concentration sortie évaporateurs	65	% massique
Taille moyenne des cristaux	450	µm
Coefficient de variation (CV)	< 30	%
Pureté cristalline	> 99.5	%

TABLE 2 – Spécifications produit

## 4 Travail Demandé

### 4.1 Partie 1 : Évaporation à Multiples Effets (40 points)

#### 4.1.1 Modélisation Thermodynamique (15 points)

Développez un simulateur Python complet pour un système d'évaporation à **triple effet** en co-courant :

a) **Bilans de matière :**

- Établir les équations de bilan global et par composant pour chaque effet
- Prendre en compte l'élévation du point d'ébullition (EPE) du saccharose
- Utiliser la corrélation de Dühring pour l'EPE

b) **Bilans énergétiques :**

- Calculer les enthalpies avec CoolProp/thermo
- Inclure les pertes thermiques (3% de la chaleur transférée par effet)
- Modéliser les condenseurs et les échangeurs

c) **Transfert de chaleur :**

- Calculer les coefficients globaux de transfert  $U$  pour chaque effet
- Dimensionner les surfaces d'échange requises
- Prendre en compte l'enrassement ( $R_f = 0.0002 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ )

**Données complémentaires :**

- Vapeur de chauffe disponible : 3.5 bar (abs), surchauffe 10°C
- Pression au condenseur final : 0.15 bar (abs)
- Coefficients de transfert estimés :  $U_1 = 2500$ ,  $U_2 = 2200$ ,  $U_3 = 1800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

#### 4.1.2 Optimisation Énergétique (10 points)

- a) Calculer l'économie de vapeur du système (kg vapeur produite / kg vapeur consommée)
- b) Étudier l'impact du nombre d'effets (2, 3, 4, 5 effets) sur :
  - La consommation spécifique de vapeur
  - La surface totale d'échange
  - Le coût total annualisé (investissement + exploitation)
- c) Proposer une configuration optimale justifiée économiquement

#### 4.1.3 Analyse de Sensibilité (15 points)

Réalisez une étude paramétrique complète en faisant varier :

- La pression de vapeur de chauffe (2.5 à 4.5 bar)
- La concentration finale visée (60 à 70%)
- Le débit d'alimentation ( $\pm 20\%$ )
- La température d'alimentation (75 à 95°C)

Pour chaque paramètre, tracez l'évolution de :

- La consommation de vapeur
- Les surfaces d'échange
- La température dans chaque effet

## 4.2 Partie 2 : Cristallisation (40 points)

### 4.2.1 Modélisation de la Cinétique (20 points)

Développez un modèle dynamique de cristallisoir batch refroidi :

a) **Solubilité du saccharose :**

Utilisez la corrélation empirique :

$$C^* = 64.18 + 0.1337T + 5.52 \times 10^{-3}T^2 - 9.73 \times 10^{-6}T^3 \quad (1)$$

où  $C^*$  est en g saccharose/100g solution et  $T$  en °C.

b) **Sursaturation relative :**

$$S = \frac{C - C^*}{C^*} \quad (2)$$

c) **Cinétique de nucléation :**

Loi de puissance :

$$B = k_b S^b m_T^j \quad (3)$$

avec  $k_b = 1.5 \times 10^{10}$  noyaux/(m<sup>3</sup>·s),  $b = 2.5$ ,  $j = 0.5$

d) **Cinétique de croissance :**

Modèle d'intégration de surface :

$$G = k_g S^g \exp\left(-\frac{E_g}{RT}\right) \quad (4)$$

avec  $k_g = 2.8 \times 10^{-7}$  m/s,  $g = 1.5$ ,  $E_g = 45$  kJ/mol

e) **Bilan de population :**

Résolvez l'équation de population pour la distribution de taille :

$$\frac{\partial n(L, t)}{\partial t} + G \frac{\partial n(L, t)}{\partial L} = 0 \quad (5)$$

avec condition limite :  $n(0, t) = B/G$

### 4.2.2 Stratégie de Refroidissement (10 points)

Comparez trois profils de refroidissement sur 4 heures (de 70°C à 35°C) :

1. **Linéaire** :  $T(t) = T_0 - \alpha t$

2. **Exponentiel** :  $T(t) = T_f + (T_0 - T_f)e^{-\beta t}$

3. **Contrôle optimal** : Maintenir sursaturation constante  $S = 0.05$

Pour chaque profil, calculez et comparez :

- La distribution de taille finale (DTG)
- La taille moyenne  $L_{50}$
- Le coefficient de variation CV
- Le rendement massique

#### 4.2.3 Dimensionnement du Cristalliseur (10 points)

- Calculez le volume requis du cristalliseur pour traiter 5000 kg/batch de sirop
- Dimensionnez le système d'agitation (puissance requise)
- Calculez la surface d'échange du serpentin de refroidissement
- Estimez le temps de résidence hydraulique optimal

### 4.3 Partie 3 : Intégration et Optimisation Globale (20 points)

#### 4.3.1 Intégration Énergétique (10 points)

- Proposez un schéma de récupération de chaleur entre les condensats et l'alimentation
- Utilisez les vapeurs du dernier effet pour préchauffer le sirop avant cristallisation
- Calculez l'économie énergétique totale réalisée
- Établissez les courbes composées (pinch analysis)

#### 4.3.2 Analyse Technico-Économique (10 points)

Réalisez une évaluation économique simplifiée :

Coûts d'investissement	Formule
Évaporateurs (par effet)	$C_{evap} = 15000 \times A^{0.65}$ (€)
Cristalliseur	$C_{crist} = 25000 \times V^{0.6}$ (€)
Échangeurs de chaleur	$C_{ech} = 8000 \times A^{0.7}$ (€)

Coûts d'exploitation	Valeur
Vapeur 3.5 bar	25 €/tonne
Eau de refroidissement	0.15 €/m³
Électricité	0.12 €/kWh
Main d'œuvre	35 €/h·opérateur

Calculez :

- Le coût total d'investissement (TCI)
- Les coûts d'exploitation annuels (OPEX)
- Le coût de production par tonne de sucre cristallisé
- Le temps de retour sur investissement (ROI)

## 5 Livrables Attendus

### 5.1 Code Python (40%)

Fournir un code Python bien structuré et documenté comprenant :

- Un module `évaporateurs.py` pour la simulation des évaporateurs

- Un module `cristallisation.py` pour la cinétique et le bilan de population
- Un module `thermodynamique.py` utilisant CoolProp/thermo
- Un module `optimisation.py` pour les analyses paramétriques
- Un script principal `main.py` orchestrant l'ensemble
- Un fichier `requirements.txt` listant les dépendances

**Exigences de qualité du code :**

- Documentation style docstring pour chaque fonction
- Gestion des erreurs et validations d'entrée
- Utilisation de classes pour encapsuler les modèles
- Tests unitaires pour les fonctions critiques

## 5.2 Rapport Technique (40%)

Rapport LaTeX (10 pages) structuré

## 5.3 Présentation Orale (20%)

Soutenance de 10 minutes

# 6 Contraintes et Recommandations

## 6.1 Bibliothèques Python Requises

```

1 # Obligatoires
2 numpy >=1.21.0
3 scipy >=1.7.0
4 matplotlib >=3.4.0
5 CoolProp >=6.4.1
6 thermo >=0.2.0
7
8 # Recommandées
9 pandas >=1.3.0
10 seaborn >=0.11.0
11 plotly >=5.0.0 # pour visualisations interactives
12 pytest >=6.2.0 # pour tests unitaires

```

## 6.2 Critères d'Évaluation

Critère	Points
Rigueur des modèles thermodynamiques	15
Qualité du code Python	15
Analyse critique des résultats	15
Justesse des calculs	15
Qualité du rapport LaTeX	15
Originalité et créativité	10
Présentation orale	10
Travail d'équipe	5
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

## 6.3 Conseils Méthodologiques

1. **Semaine 1** : Modélisation et validation des évaporateurs
2. **Semaine 2 (jours 1-3)** : Modélisation cristallisation et bilan de population
3. **Semaine 2 (jours 4-5)** : Intégration, optimisation et analyses
4. **Semaine 3 (jours 1-3)** : Rédaction rapport et préparation présentation

### Points de vigilance :

- Validez chaque module indépendamment avant intégration
- Utilisez le versioning (Git) pour le travail collaboratif
- Documentez vos hypothèses et sources de données
- Testez la convergence numérique des algorithmes
- Vérifiez la cohérence physique des résultats (bilans fermés)

## 7 Ressources Disponibles

### 7.1 Documentation Technique

- Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th ed.) - Chapitres 11 et 18
- Mullin, J.W. "Crystallization" (4th ed.)
- Documentation CoolProp : <http://www.coolprop.org>
- Documentation thermo : <https://thermo.readthedocs.io>

### 7.2 Données Physico-Chimiques

Vous pouvez utiliser CoolProp pour obtenir les propriétés de l'eau et de la vapeur :

```
1 from CoolProp.CoolProp import PropsSI
2
3 # Enthalpie vapeur satur e      3.5 bar
4 h_vap = PropsSI('H', 'P', 3.5e5, 'Q', 1, 'Water')
5
```

```
6 # Chaleur latente
7 h_liq = PropsSI('H', 'P', 3.5e5, 'Q', 0, 'Water')
8 L_vap = h_vap - h_liq
```

## 8 Modalités de Rendu

### 8.1 Format de Soumission

Créez une archive ZIP contenant :

```
projet_NOM1_NOM2_NOM3.zip
  code/
    main.py
    evaporateurs.py
    cristallisation.py
    thermodynamique.py
    optimisation.py
    requirements.txt
    README.md
  rapport/
    rapport.tex
    rapport.pdf
    figures/
  presentation/
    soutenance.pptx
  resultats/
    donnees_calcul.xlsx
    graphiques/
```

### 8.2 Date Limite

Date de rendu : 15/12/2025

### 8.3 Travail en Équipe

- Groupes de 2 étudiants maximum
- Répartition claire des tâches (à préciser dans le rapport)
- Évaluation individuelle possible lors de la soutenance