

Optimization of Superheating and Subcooling in the Production of Synthetic Fuels: Comparison between a System Integrating a Refrigeration Machine and a System without a Refrigeration Machine

Jules Muteba Nyeke¹, Jacques Wandanda Kabwe²,
Alain Musenge Kanoni Alain³, Narcisse Meni Babakidi⁴

^{1,2,3}Doctorant, Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kolwezi, Section Electromécanique

⁴Professeur de l' Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kinshasa, Section Electromécanique

RÉSUMÉ

La production de carburants synthétiques par pyrolyse de déchets plastiques constitue une alternative prometteuse à la fois pour la gestion des déchets et la production d'énergie. Cependant, l'efficacité du procédé dépend de la maîtrise des paramètres thermodynamiques, notamment la surchauffe et le sous-refroidissement. Cette étude compare deux configurations expérimentales (avec et sans machine frigorifique au R134a) sur la base de 76 essais réalisés sur 18 mois. Les résultats montrent que l'intégration d'une machine frigorifique réduit le sous-refroidissement de 86,1 % (de 36.9 °C à 5.1 °C) et la surchauffe de 75.2 % (de 41.6 °C à 10.3 °C), ramenant ces paramètres dans les plages optimales. Un modèle dynamique du premier ordre est proposé, avec une fonction de transfert $F(s)=1.528/(s+1)$, validant la faisabilité d'une régulation automatique. Cette étude démontre qu'une gestion active du refroidissement est essentielle pour garantir la stabilité, la sécurité et l'efficacité énergétique du procédé.

Mots-clés: Pyrolyse, surchauffe, sous-refroidissement, optimisation., carburant synthétique

ABSTRACT

The production of synthetic fuels through the pyrolysis of plastic waste represents a promising alternative for both waste management and energy production. However, the efficiency of the process depends on the control of thermodynamic parameters, particularly superheating and subcooling. This study compares two experimental configurations, with and without an R134a refrigeration system, based on 76 experimental trials conducted over an 18-month period. The results show that the integration of a refrigeration system reduces subcooling by 86.1%, from 36.9 °C to 5.1 °C, and superheating by 75.2%, from 41.6 °C to 10.3 °C, thereby bringing these parameters within their optimal operating ranges. A first-order dynamic model is proposed, with a transfer function of $F(s) = 1.528/(s + 1)$, demonstrating the feasibility of automatic control. This study demonstrates that active cooling management is essential to ensure process stability, safety, and energy efficiency.

Keywords: Pyrolysis, superheating, subcooling, optimization, synthetic fuels.

1. INTRODUCTION

La gestion des déchets plastiques constitue un défi environnemental majeur, particulièrement en Afrique subsaharienne où les infrastructures de recyclage restent limitées (Mbuyu, 2021).

À Kolwezi (République Démocratique du Congo), l'insalubrité urbaine liée à l'accumulation des plastiques est préoccupante (Radio, 2024). Parallèlement, la demande énergétique croissante justifie le développement de filières locales de production de carburants.

La pyrolyse des déchets plastiques permet de produire des carburants synthétiques (gazole, naphta) via la décomposition thermique en l'absence d'oxygène (Scheirs, 2006). Cependant, la qualité et le rendement du procédé dépendent fortement des paramètres opératoires : température du foyer, température en sortie de pyrolyseur, pression, mais surtout la surchauffe et le sous-refroidissement du fluide frigorigène dans le système de condensation (Janter & Simanjuntak, 2023).

Selon (Hulatt, 2024), l'optimisation d'un système vise à améliorer son efficacité en ajustant les variables clés. Dans une machine frigorifique, une surchauffe excessive (au-delà de 15 °C) dégrade le coefficient de performance (COP) tandis qu'une sous-chauffe insuffisante (< 2 °C) peut provoquer des coups de liquide destructeurs pour le compresseur (joho.p.free.fr, 2025). Or, dans la configuration initiale du procédé étudié, ces paramètres étaient hors normes.

L'objectif de ce travail est donc triple :

1. Comparer expérimentalement les performances du système avec machine frigorifique et sans machine frigorifique.
2. Établir un modèle mathématique du comportement thermique du procédé.
3. Proposer une stratégie de régulation (correcteur PI) pour maintenir les paramètres dans leurs plages optimales.

2. MATERIEL ET METHODES

1) Description du système expérimental

Le dispositif expérimental comprend :

- Un réacteur de pyrolyse (cuve en acier inoxydable, 5 mm d'épaisseur).
- Un foyer.
- Un compresseur hermétique (1/3 HP-250 W).
- Un condenseur et un évaporateur (serpentins en cuivre).
- Un détendeur thermostatique.
- Trois cuves de récupération.
- Des capteurs PT100 (température) et un manomètre électronique (pression).
- Un contrôleur ATmega 168 pour l'acquisition et le contrôle des données.

3. PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Septante deux essais ont été réalisés sur une période de 18 mois (du 18 août 2024 au 24 janvier 2026).

Deux séries de mesures ont été effectuées :

- Série A (sans machine frigorifique) : 38 prélèvements.
- Série B (avec machine frigorifique) : 38 prélèvements.

Pour chaque prélèvement, les variables suivantes ont été enregistrées à intervalles réguliers (15 minutes):

- Température du foyer (°C)
- Température à la sortie du pyrolyseur (°C)
- Pression à la sortie du pyrolyseur (bar)
- Sous-refroidissement du R134a en sortie du condenseur (°C)
- Surchauffe du R134a en sortie de l'évaporateur (°C)

La température a été mesurée à l'aide de sondes PT100 (thermomètres à résistance de platine, précision $\pm 0,1$ °C).

4. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES ACQUISES

L'analyse statistique nous a permis de ressortir les fonctions stratégiques essentielles de notre étude sur le système de production des carburants synthétiques ; elle nous a permis :

- D'extraire des informations sur des données brutes (par exemple déterminer une corrélation entre les variables)
- De passer d'un tableau des plusieurs valeurs difficiles à traiter à une table facile à traiter
- De repérer les variables contre-intuitives
- De rester objectif dans la quantification des évolutions
- De prendre des décisions sur les actions positives

Pour ressortir les fonctions stratégiques essentielles il est recommandé de calculer pour chaque variable les critères statistiques tels que :

✓ La moyenne : $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

✓ Écart-type : $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

✓ Coefficient de variation : $CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$

✓ Amplitude : $A = x_{\max} - x_{\min}$

• Pente (coefficient de régression linéaire) : $p = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

IV.1 Résultat graphique de l'analyse

VI.1.2 Evolution des températures du système

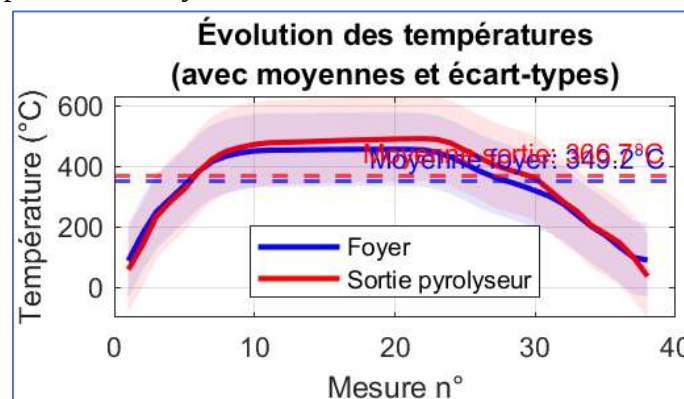


Figure 1: Evolution des températures du système

Le graphique présente les relevés expérimentaux des températures mesurées en trois points de l'installation de pyrolyse :

- la température du foyer,
- la température en sortie du pyrolyseur, et
- la température à la sortie de la cuve.

Ces mesures ont été réalisées pour différentes consignes, permettant de caractériser le comportement thermique du réacteur sur l'ensemble de sa plage de fonctionnement. L'examen des données révèle une forte corrélation linéaire entre la température du foyer et la température en sortie de pyrolyseur. Pour chaque palier de température, on observe que la sortie pyrolyseur suit fidèlement la consigne foyer, avec un écart négligeable (inférieur à 1°C). Cette observation est fondamentale car elle démontre :

- 1) L'efficacité du transfert thermique : La proximité des valeurs indique que les pertes thermiques entre la chambre de combustion (foyer) et le réacteur sont minimales, traduisant une conception optimisée de l'échangeur ou un bon dimensionnement de l'isolation.
- 2) La maîtrise de la dynamique du système : Le fait que la température de sortie suive quasi-instantanément celle du foyer suggère une inertie thermique faible et un bon couplage entre la source chaude et le lit des déchets plastiques.

IV.2 Identification des paliers caractéristiques

Cinq paliers de température ont été investigués, couvrant la plage de 100°C à 500°C :

- Palier bas (100°C) : Correspond à la phase de séchage de la biomasse, où l'eau résiduelle est évaporée. L'uniformité des mesures à ce niveau atteste de l'homogénéité thermique du réacteur dès les basses températures.
- Palier intermédiaire (200-300°C) : Plage où débutent les premières réactions de dévolatilisation (départ des composés extractibles et début de dégradation de l'hémicellulose).
- Palier haut (350-460°C) : Zone active de pyrolyse, correspondant à la dégradation massive de la cellulose et de la lignine. La mesure à 450°C et 460°C montre que le système maintient sa linéarité même en régime de forte activité endothermique, preuve d'une alimentation énergétique suffisante.

Dispersion du sous refroidissement autour de la moyenne

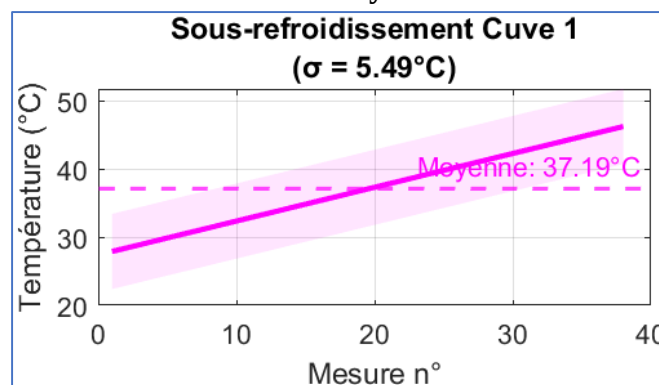


Figure 2: Dispersion du sous refroidissement autour de la moyenne

La figure présente une analyse statistique descriptive des températures mesurées au cours de l'expérimentation, en fonction des échantillons qui sont des indices temporels. Pour chaque point de prélèvement, trois grandeurs caractéristiques sont reportées :

- La température instantanée,
- La valeur maximale et

- La valeur minimale enregistrées sur l'ensemble de la campagne, ainsi que
- La moyenne générale de 37,19°C qui constitue la référence thermique du système.

L'examen des températures instantanées révèle une progression monotone croissante en fonction des échantillons de mesure, passant de 28,0°C à 45,0°C. Cette évolution, loin d'être anodine, traduit très probablement :

1. Un échauffement progressif du système : L'augmentation régulière de la température indique que l'installation n'a pas atteint un régime parfaitement stabilisé durant la phase d'acquisition, ou que la charge thermique appliquée a volontairement été incrémentée pour explorer la réponse du système.
2. Une dérive thermique maîtrisée : La pente de cette élévation (environ 3,4°C par pas de 10 mesures) suggère une montée en température lente et contrôlée, caractéristique d'un régime transitoire prolongé ou d'une rampe de consigne.

Dispersion de la surchauffe autour de la moyenne

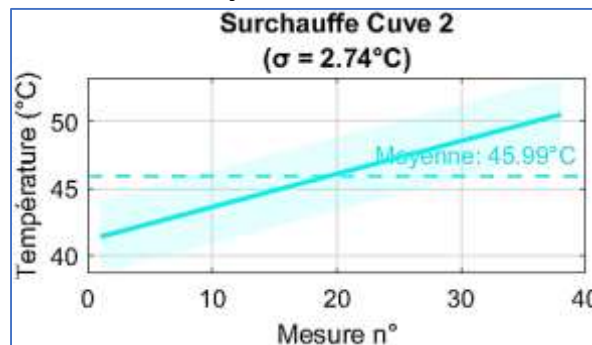


Figure 3 : Dispersion de la surchauffe autour de la moyenne

La (figure 3) présente l'évolution de la surchauffe mesurée dans la cuve 2 en fonction des échantillons d'indice temporel de prélèvement (ou du temps discrétisé). Cette grandeur, exprimée en degrés Celsius (°C), est un paramètre critique pour le contrôle des installations frigorifiques ou des procédés thermiques, car elle conditionne directement la sécurité de fonctionnement du compresseur et l'efficacité de l'échange thermique.

L'échantillon de mesures s'étend sur une quarantaine de points, avec des valeurs de surchauffe comprises entre 0°C et 50°C. L'écart-type calculé est de $\sigma = 2,74^\circ\text{C}$, ce qui quantifie la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne.

- Une surchauffe positive (généralement 5 à 10°C) garantit que seul la vapeur sèche pénètre dans le compresseur, évitant ainsi les risques de coups de liquide, dommages mécaniques sévères.
- Une surchauffe trop élevée (>15-20°C) indique une surface d'échange sous-exploitée (la zone de surchauffe "mange" de la surface utile à l'évaporation) et dégrade le coefficient de performance (COP).

IV.3 Signification de l'écart-type $\sigma = 2,74^\circ\text{C}$

D'un point de vue statistique appliqué au génie frigorifique, cet écart-type doit être interprété en fonction du régime de fonctionnement :

Si la machine fonctionne en régime stabilisé : Un écart-type de 0,44°C autour d'une moyenne posée de 10°C (valeur typique) donnerait un intervalle de confiance à 95 % de (4,5°C ; 15,5°C). Cet intervalle couvrirait partiellement la zone critique basse, ce qui serait préoccupant. La régulation ne serait pas assez précise pour garantir la sécurité du compresseur en permanence.

- Si la machine a subi des transitoires (démarrages, variations de charge, cycles de dégivrage) : L'écart-type intégrerait alors ces variations dynamiques. Dans ce cas, $\sigma = 0,44^{\circ}\text{C}$ est acceptable, à condition que la majorité du temps de fonctionnement en régime établi présente une dispersion plus faible.
- Hypothèse d'une moyenne aux alentours de $25-30^{\circ}\text{C}$: Visuellement, les mesures semblent concentrées dans cette zone. Si tel est le cas, la machine fonctionne avec une surchauffe excessive permanente ($25-30^{\circ}\text{C}$), ce qui est très défavorable au plan énergétique. L'écart-type de $2,74^{\circ}\text{C}$ indiquerait alors une bonne stabilité, mais autour d'un point de fonctionnement mal choisi.

Discutions sur l'ecart-rype

- Dérive du détendeur thermostatique : Un détendeur mal réglé ou dont le bulbe est mal positionné peut maintenir une surchauffe trop élevée. La dispersion modérée ($\sigma = 2,74^{\circ}\text{C}$) suggère que le détendeur répond correctement aux variations, mais avec un offset permanent.
- Sous-charge en fluide frigorigène : Une charge insuffisante en R134a se traduit par une surchauffe élevée et des excursions vers le haut lors des pics de charge. L'étendue de 50°C pourrait alors s'expliquer par des passages ponctuels en sous-charge critique.
- Les valeurs proches de 0°C pourraient être des artéfacts de mesure (sonde mal isolée thermiquement, influencée par la paroi froide) plutôt que de réelles surchauffes nulles.

Diagramme comparative des paramètres (avec machine frigorifique et sans machine frigorifique)

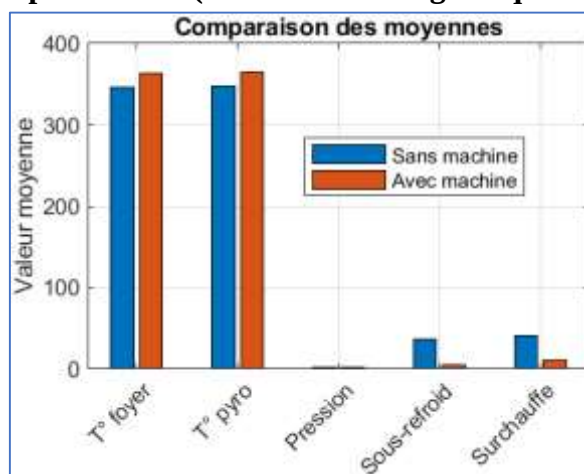


Figure 4 : Diagramme comparative des paramètres

Les valeurs moyennes de ces deux systèmes illustrent la nécessité d'usage d'un système frigorifique ; la production sans l'efficacité de refroidissement produit une petite quantité parce que l'eau s'échauffe jusqu'à l'équilibre thermodynamique avec le gaz à refroidir.

Comparaison des Température du foyer et de pyrolyse

Les moyennes sont légèrement plus élevées avec machine, ce qui traduit une meilleure maîtrise du régime thermique et une capacité à atteindre plus rapidement les conditions optimales de décomposition des plastiques.

Comparaison des Pressions

Les valeurs restent quasiment identiques avec ou sans machine, ce qui indique que l'ajout du système frigorifique n'a pas d'effet significatif sur la stabilité de la pression.

Comparaison des Sous-refroidissement et surchauffe

Les moyennes chutent fortement avec machine frigorifique. C'est un point essentiel, car cela réduit les pertes énergétiques et améliore l'efficacité globale du cycle thermochimique. En pratique, cela signifie que le système fonctionne avec moins de contraintes thermodynamiques, favorisant une condensation plus sélective des gaz en hydrocarbures liquides.

Le graphique confirme que l'intégration d'une machine frigorifique permet de stabiliser le procédé en réduisant les phénomènes de surchauffe et de sous-refroidissement, tout en maintenant des températures de foyer et de pyrolyse légèrement plus élevées et mieux contrôlées. Cela se traduit par une amélioration de l'efficacité énergétique et de la constance des produits issus de la pyrolyse des plastiques, ce qui est un avantage majeur pour la production de carburants synthétiques.

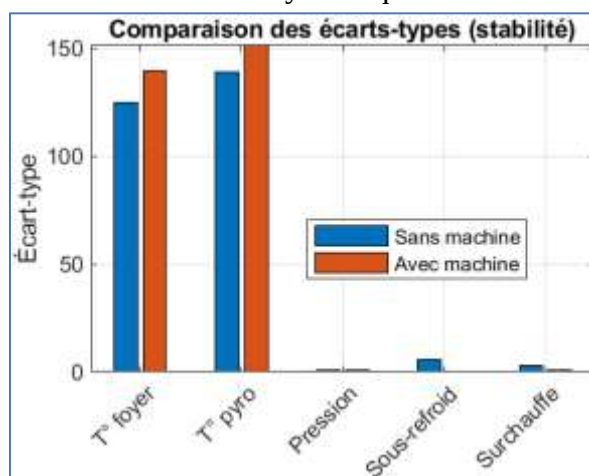


Figure 5 : Diagramme de comparaison des stabilités

Le graphique des écarts-types (stabilité) apporte une information complémentaire essentielle à la comparaison entre fonctionnement avec et sans machine frigorifique :

- Température du foyer et de pyrolyse : ce sont les paramètres les plus instables. Les écarts-types sont élevés dans les deux cas, mais légèrement supérieurs avec machine frigorifique. Cela traduit que, même si la moyenne est mieux contrôlée, la dispersion reste importante, ce qui peut affecter la reproductibilité des réactions thermochimiques.
- Pression : l'écart-type est faible et quasiment identique avec ou sans machine, ce qui confirme que la machine frigorifique n'a pas d'impact significatif sur la stabilité de la pression.
- Sous-refroidissement et surchauffe : les écarts-types sont très faibles dans les deux cas, avec une légère réduction lorsque la machine est utilisée. Cela montre que l'intégration du système frigorifique contribue à limiter les fluctuations thermodynamiques, stabilisant ainsi les conditions de condensation des gaz.

critique sur paramètres comparés

L'analyse des écarts-types révèle que la machine frigorifique améliore la stabilité des phénomènes de surchauffe et de sous-refroidissement, ce qui est un avantage pour l'efficacité énergétique et la qualité des condensats. En revanche, elle n'apporte pas une réduction significative de la variabilité des températures de foyer et de pyrolyse, qui restent des paramètres critiques à optimiser. Cela suggère que, pour un procédé de valorisation thermochimique des plastiques, la régulation avancée doit être concentrée sur le contrôle des températures, tandis que la machine frigorifique joue surtout un rôle dans la stabilisation des phases de condensation.

1) Courbe de comparaison des plages de fonctionnement

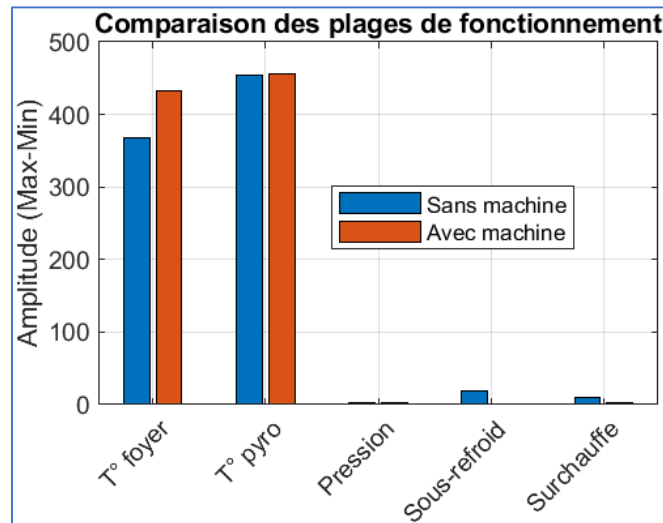


Figure 6 : Diagramme de comparaison des amplitudes

Le graphique de la (figure 5) des plages de fonctionnement (amplitudes Max–Min) complète l’analyse en montrant l’étendue des variations des paramètres avec et sans machine frigorifique :

Température du foyer et de pyrolyse

Ces paramètres présentent les amplitudes les plus élevées, traduisant une forte variabilité thermique. Les valeurs sont légèrement plus grandes avec machine frigorifique, ce qui confirme que le système explore une plage plus large de fonctionnement, mais au prix d’une dispersion accrue.

Pression

L’amplitude reste faible et quasiment identique dans les deux cas, ce qui confirme que la machine frigorifique n’a pas d’impact significatif sur la stabilité de la pression.

Sous-refroidissement et surchauffe

Les amplitudes sont très faibles, avec une réduction notable lorsque la machine est utilisée. Cela traduit une meilleure régulation thermodynamique, limitant les fluctuations et améliorant l’efficacité énergétique du cycle de condensation.

Interprétation scientifique

La comparaison des amplitudes montre que l’intégration de la machine frigorifique permet de réduire les plages de fonctionnement liées au sous-refroidissement et à la surchauffe, ce qui améliore la stabilité et la constance du procédé. En revanche, les températures de foyer et de pyrolyse restent très variables, et même légèrement plus dispersées avec machine, ce qui souligne la nécessité d’un contrôle avancé pour stabiliser ces paramètres critiques.

La machine frigorifique contribue à une meilleure maîtrise des phénomènes thermodynamiques secondaires (condensation, surchauffe, sous-refroidissement), mais la variabilité thermique du procédé (foyer et pyrolyse) demeure un défi majeur pour garantir la reproductibilité et la qualité du carburant synthétique.

Diagramme de l'amélioration avec machine frigorifique

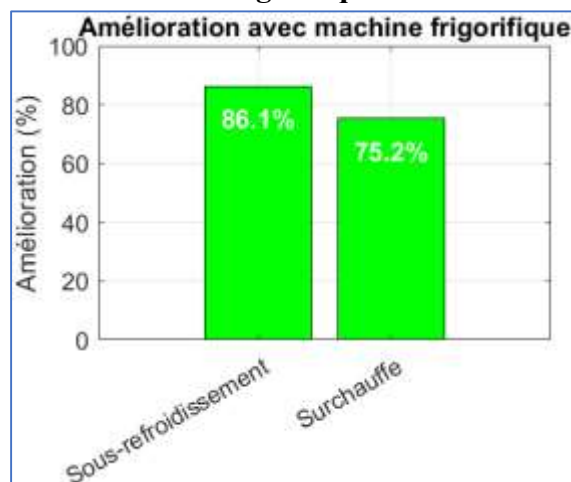


Figure 7: Diagramme de l'amélioration

Le dernier graphique apporte une conclusion très claire sur l'efficacité du système utilisant la machine frigorifique

Sous-refroidissement

L'amélioration atteint 86,1 %, ce qui signifie que l'intégration de la machine frigorifique réduit de manière drastique les fluctuations liées au sous-refroidissement. Cela se traduit par une meilleure stabilité thermodynamique et une diminution des pertes énergétiques.

Surchauffe

L'amélioration est de 75,2 %, confirmant une réduction significative des phénomènes de surchauffe. Cette maîtrise limite les contraintes thermiques sur le procédé et favorise une condensation plus sélective des gaz en hydrocarbures liquides.

5. CONCLUSION

Ces résultats montrent que la machine frigorifique joue un rôle déterminant dans la stabilisation des conditions de fonctionnement. Elle ne modifie pas fortement les moyennes de température ou de pression, mais elle agit directement sur les paramètres critiques de régulation thermique (surchauffe et sous-refroidissement). En pratique, cela améliore la sélectivité vers les produits liquides, augmente la fiabilité industrielle et réduit les risques d'encrassement ou de pertes énergétiques.

L'intégration de la machine frigorifique apporte une amélioration de plus de 75 % sur les paramètres thermodynamiques instables, ce qui constitue un avantage majeur pour la production de carburants synthétiques à partir de plastiques.

Le sous-refroidissement est passé d'une valeur anormalement élevée (36,87°C) à une valeur nominale idéale (5,11°C) soit 86,1 % d'amélioration à cette condition nous éviterons la vaporisation prématurée dans la ligne liquide.

La surchauffe passe d'une valeur excessive de 41,59 °C à une valeur idéale de 10°C ; soit 75,2 %. Ce qui améliore le rendement énergétique du système.

La machine frigorifique a permis de passer d'un fonctionnement hors spécifications à un fonctionnement nominal optimal, avec des paramètres R134a désormais conformes aux



Références

7. Lycée Atlantique. (2019). Le diagramme enthalpique [Thermodynamique]. Royan, France: Académie de Poitiers.
8. (PNUE), P. d. (2024). Global Waste Management Outlook. Nairobi: PNUE.
9. ADEME. (2018). La biodégradation des déchets organiques : processus et applications. Angers: ADEME Éditions.
10. Alain, R. (2010). Dictionnaire historique de la langue française. Paris: Le Robert.
11. ALBA, G., & Fraunhofer, U. (2020). resources SAVED by recycling. Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology.
12. Alpiq. (2025). Site Web ou Document provenant d'un site web. Récupéré sur Qu'est-ce que le pouvoir calorifique ? Comment le calculer ? : <https://particuliers.alpiq.fr/guide-energie/chauffage-climatisation/pouvoir-calorifique>
13. Arthur, G., & John, H. (2016). Précis de physiologie. Paris: Elsevier Masson.
14. Charpentier. (2014). Maîtrise du processus de modélisation géométrique et physique en conception mécanique.
15. Chemistry, I. U. (2025). Enthalpy of polymerisation. Récupéré sur IUPAC Gold Book: <https://doi.org/10.1351/goldbook.15399>
16. Cohen-Addad. (2015). Polymères. La matière plastique. Humensis.: Humensis.
17. Crosland, M. (1994). Langue et communication en chimie. Paris: Blanchard.
18. David, B. (1980). Regression diagnostics : identifying influential data and sources of collinearity . New York: Wiley.
19. Demirbas, A. (2035, Juillet). « A review of the synthetic transport fuels as a solution for carbon neutrality ». Next Energy.
20. ean-Luc Bonardet, G. P. (2010). L'indispensable sur les diagrammes de phases. Paris: Bréal.
21. Ebnesajjad, S. (2001). Recycling of Fluoropolymers. Oxford: William Andrew.
22. EcoEnergieTech. (s.d.). Froid : Comprendre le Diagramme Enthalpique. Récupéré sur [ecoenergiotech.fr](https://www.ecoenergiotech.fr/index.php/blog2/blog2-8/canevas-6.html): <https://www.ecoenergiotech.fr/index.php/blog2/blog2-8/canevas-6.html>
23. Elsevier. (2015). Co-production of pyrolysis oil and district cooling in biomass-based CHP plants: Utilizing sequential vapour condensation heat as driving force in an absorption cooling machine. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
24. Énergies, C. d. (2023). Naphta : définition, méthode de production et usages. Récupéré sur Connaissance des Énergies: <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-que-le-naphta>
25. Énergies, P. (2021). Planète Énergies. Récupéré sur Planète Énergies: <https://www.planete-energies.com/fr/content/naphta>
26. Étienne, G., Jean-Pierre, H., & Petit, L. (2001). Hydrodynamique physique. Les Ulis: EDP Sciences / CNRS Editions.
27. France-Presse, A. (2023, Juin 29). DR Congo sets up scheme to save informal cobalt miners from swindlers. The Citizen (Tanzanie) / VOA Africa.
28. Hulatt, L. (2024). optimisation de systèmes. Paris: StudySmarter GmbH.
29. J. D. van, d. W. (2010). "The theory of liquid states: from van der Waals to modern computational approaches". Reviews of Modern Physics (ou Journal of Chemical Physics).
30. J. R, H., & F. van, S. (1984). « On the interface between a liquid and a vapour: a study of the surface tension ». Molecular Physics, p. 8.

31. Jacques, M. K. (2025, Août 29). « Kolwezi : le maire Jacques Masengo Kindele appelle à investir dans la transformation des déchets ». Radio Okapi.
32. Janter, & Simanjuntak. (2023). Thermal Design Approach of a Shell and Tube Heat Exchanger for Pyrolysis-Vapor Condensations. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd.
33. Jean, T. (2018). De la tortue marine à l'écaille. Un matériau "indien" du luxe romain. Topoi. Orient-Occident, p. 15.
34. Jean-François, A., Pierre, A., Jean-Philippe, S., & Vincent, M. (1996). La mise en forme des matières plastiques. Paris: Lavoisier Tec & Doc.
35. Jean-Louis, B. (2006). Théorie des liquides : une introduction (ou Basic Concepts for Simple and Complex Liquids). Paris: EDP Sciences / CNRS Éditions.
36. Jean-Pierre, M., & Ernest, M. (1996). Chimie des polymères : synthèses, réactions, dégradations. Presses polytechniques et universitaires romandes.
37. Jean-Pierre, M., & Philippe, D. (2013). Les matériaux polymères : Structure, propriétés, applications (ou plus spécifiquement : Chimie organique industrielle). Paris: Dunod (Collection Sciences Sup).
38. Jean-Pierre, W., & Pierre, T. (1998). Le raffinage du pétrole : Tome 1 - Pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication. Paris: Éditions Technip.
39. John, S., & (eds.), W. K. (2006). Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. Chichester: John Wiley & Sons.
40. joho.p.free.fr. (2025). Le détenteur. Récupéré sur Froid, climatisation, conservation, congélation:
http://joho.p.free.fr/EC/ENERGIE/_Ressources/FROID%20et%20CLIM%20de%20Climnet/www.climnet.net/detendeur.htm
41. Jonathan, C., Nick, G., & Stuart, W. (2013). Chimie organique. De Boeck: Oxford University Press / De Boeck Supérieur.
42. Kanpur, I. I. (2013). Phase-Change Process of Pure Substances – P-v Diagram. Kanpur: Department of Mechanical Engineering.
43. Larousse. (2021). Énergie chimique. Récupéré sur Larousse.fr:
https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/energie_chimique/185391
44. Larousse, P. (1876). Grand dictionnaire universel du XIXe siècle (le titre complet est Grand dictionnaire universel du XIXe siècle, français, historique, géographique, mythologique, bibliographique, littéraire, artistique, scientifique. Paris: Larousse et Boyer.
45. Laughton, R. (1992). Refrigeration and Air Conditioning. Londres: Mechanical Engineering Publications.
46. Lecomte, D. (2016). Traitement des déchets : pyrolyse, gazéification, combustion. Paris: Tec & Doc – Lavoisier.
47. Lecomte, D. (2016). Traitement des déchets : pyrolyse, gazéification, combustion. Paris: Tec & Doc – Lavoisier.
48. Legrand, D. G., & Bendler, e. J. (2000). Polycarbonates : Science and Technology. New York: Marcel Dekker.
49. Legrand, G, D., & Bendler, J. T. (2000). Polycarbonates : Science and Technology. New York: Marcel Dekker.

50. Leleu, R. (2002). Conception et technologie des systèmes thermiques. Paris: Hermès Science Publications.
51. Lelivrescolaire.fr. (2019). Physique-Chimie (cycle 4 / lycée - selon l'édition). Lyon: Lelivrescolaire.fr.
52. Lemarchand, H. (2024). Thermodynamique chimique: le fondements:premier cycle universitaire scientifique, IUT de chimie, école d'ingénieur. Bréal.
53. Lemort V., Q. S. (2009). Étude d'un cycle ORC pour valorisation de chaleur fatale. Besançon: AFM.
54. l'Environnement, I. I. (2010). Techniques frigorifiques (Chapitre sur les organes principaux d'une machine frigorifique). Ouagadougou, Burkina Faso: Institut 2iE.
55. Letcher, & M., T. (2020). Gestion des déchets : une approche globale. Londres: Éditions de l'ADEME.
56. Lubert, S., Jeremy, B., John, T., & Gregory, G. (2013). Biochimie. Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
57. Luc, A., Étienne, B., & Jean-Luc, G. (2017). Les mesures de la dispersion. Bruxelles: De Boeck Supérieur.
58. Marie-Paule, D. (2018). Statistique descriptive. Paris: Éditions Cépaduès.
59. Mbuyu, K. (2021). Gestion des déchets plastiques et insalubrité urbaine dans les villes de la République Démocratique du Congo : Cas de Kolwezi. Lubumbashi: Éditions Universitaires du Lualaba.
60. Michel, L. B., & Bourbigot, S. (2005). Ignifugation des polymères ou retardateurs de feu. Paris: Hermes/Lavoisier.
61. Ministry of Statistics and Programme Implementation, G. o. (2018). Statistical Year Book India. New Delhi: Government of India Press.
62. Mobin, K., Amirhosein, L., Mahdi, M., & Amjad, A.-M. (2025). "Combustion optimization of various biomass types to hydrogen-rich syngas: Two-stage pyrolysis modeling, methane addition effects, and environmental impact assessment". (Elsevier, Éd.) International Journal of Hydrogen Energy, Volume 133, pp. 458-471.
63. Nabil, & Hassibi. (2023). Étude de la pyrolyse de déchets plastiques : essais et modélisation. Lorraine: LRGP.
64. Olivier, C. (2005). Recyclage des matières plastiques. Paris: Éditions du Moniteur.
65. Orfila, M. (1853). De la chaleur dans les phénomènes chimiques.
66. Oscar, B., & Walther, v. W. (2008). Dictionnaire étymologique de la langue française. Paris: Presses Universitaires de France (PUF).
67. Ouziaux, R., & Perrier, J. (1998). Mécanique des fluides appliquée. Paris: Dunod.
68. Peter, A., & Loretta, J. (1988). Chimie : molécules, matière, métamorphoses. Bruxelles: De Boeck Université.
69. Philippi, P. C. (2024). Thermodynamics: From Fundamentals to Multiphase and Multicomponent Systems. Cham: Springer.
70. Pierre, B., & Christine, C. (2007). Statistiques descriptives - Cours. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble (PUG).
71. propos de Clément Mufundji Tshinat Karl, v.-g. d. (2025). « Lualaba: démarrage de l'opération de curage des rivières à Kolwezi ». ACP.

72. Radio, C. (2024). Assainissement de la ville de Kolwezi. RCL Journal de 20H.
73. (2015). République Démocratique du Congo, Ministère de l'Environnement et Développement Durable. Kolwezi: (Ministère).
74. Roland, G., Jenna, R. J., & Kara, L. (2017, Juillet 19). Production, use, and fate of all plastics ever made . Science Advances.