



Analyse et optimisation multicritères d'un procédé de transfert thermique et de séchage pour une application en Afrique de l'Ouest

Michel Rivier

► To cite this version:

Michel Rivier. Analyse et optimisation multicritères d'un procédé de transfert thermique et de séchage pour une application en Afrique de l'Ouest. Ingénierie des aliments. Montpellier SupAgro, 2017. Français. NNT : 2017NSAM0003 . tel-01825705

HAL Id: tel-01825705

<https://theses.hal.science/tel-01825705>

Submitted on 28 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par l'**Institut national d'études supérieures
agronomiques de Montpellier**

Préparée au sein de l'école doctorale **GAIA**
et de l'unité mixte de recherche **Qualisud**

Spécialité : **APAB** (Agroressources, Procédés, Aliments,
Bioproduits)

Discipline : **Génie des Procédés**

Présentée par **Michel RIVIER**

Analyse et optimisation multicritères d'un
procédé de transfert thermique et de séchage
pour une application en Afrique de l'Ouest

Soutenue le 16 février 2017 devant le jury composé de

Mme Catherine Bonazzi, Directrice de Recherche, INRA

M. Jean François Boujut, Professeur, INP-ENSGI Grenoble

M. Hervé Jeanmart, Professeur, École Polytechnique de Louvain

M. Ludovic Montastruc, Maître de Conférences HDR, INP-LGC Toulouse

M. Antoine Collignan, Professeur, Montpellier SupAgro

M. Patrick Sébastien, Maître de Conférences HDR, Univ. Bordeaux

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Directeur

Co-Directeur



Thèse

Pour obtenir le grade de Docteur

Délivré par l'**Institut national d'études supérieures**

agronomiques de Montpellier

Préparée au sein de l'école doctorale **GAIA**

et de l'unité mixte de recherche **Qualisud**

Spécialité : **APAB** (Agroressources, Procédés, Aliments, Bioproduits)

Discipline : **Génie des Procédés**

Présentée par **Michel RIVIER**

**Analyse et optimisation multicritères d'un procédé
de transfert thermique et de séchage pour une
application en Afrique de l'Ouest**

Soutenue le 16 février 2017 devant le jury composé de

Mme Catherine Bonazzi, Directrice de Recherche, INRA	Rapporteur
M. Jean François Boujut, Professeur, INP-ENSGI Grenoble	Rapporteur
M. Hervé Jeanmart, Professeur, École Polytechnique de Louvain	Examineur
M. Ludovic Montastruc, Maître de Conférences HDR, INP-LGC Toulouse	Examineur
M. Antoine Collignan, Professeur, Montpellier SupAgro	Directeur
M. Patrick Sébastien, Maître de Conférences HDR, Univ. Bordeaux	Co-Directeur

RÉSUMÉ

Le renforcement du secteur de la transformation agroalimentaire est reconnu comme un élément moteur de développement des pays d'Afrique subsaharienne, face à une importante croissance démographique accompagnée d'un fort taux d'urbanisation. Si les entreprises agroalimentaires créent localement de la valeur ajoutée et dynamisent la production agricole, elles éprouvent des difficultés pour se doter d'équipements efficaces et assurer leur fourniture énergétique.

Les méthodes de conception et d'optimisation des procédés agroalimentaires sont encore peu développées, du fait de la complexité de ces systèmes (composition et propriétés de l'aliment, variabilité et évolution de sa qualité, ...) dont la modélisation n'est pas aisée car elle requiert des connaissances pluridisciplinaires.

Ce travail se propose de mettre en œuvre une méthode intégrée, déjà éprouvée dans d'autres domaines industriels, la méthode « Observation-Interprétation-Agrégation (O.I.A.) », et de l'appliquer à un procédé couplant une unité de conversion biomasse énergie à un séchoir de produits céréaliers. L'apport de bioénergie pour le séchage, opération très pratiquée en Afrique de l'Ouest mais énergivore constitue un enjeu pour les entreprises. La conception de ce procédé prend en compte des objectifs variés comme la qualité du produit séché, la fabrication locale et l'efficacité énergétique des équipements et ce, pour en garantir une meilleure durabilité.

Dans une première partie, les modèles de transfert de chaleur et de perte de pression associés à un turbulateur elliptique innovant sont créés. Cet élément s'insère dans les tubes d'un échangeur de chaleur et améliore nettement le transfert thermique. Dans un deuxième temps, les variables de conception et d'observation du procédé sont définies et justifiées. Les modèles de représentation des différentes opérations unitaires sont développés et assemblés dans un simulateur afin de prédire les performances du procédé. Dans une dernière partie, le simulateur est intégré dans un environnement d'optimisation multicritère apte à formaliser, interpréter puis agréger les préférences des utilisateurs finaux. Ce processus s'appuie sur un algorithme génétique. La pertinence des solutions de conception du procédé performantes produites révèle tout l'intérêt et la performance de la méthode O.I.A. Le concepteur dispose ainsi d'éléments objectifs pour faire des choix et aller vers la réalisation d'installations de séchage durables en Afrique de l'Ouest.

ABSTRACT

The reinforcement of the food processing sector is recognized as a driving factor for the development of sub-Saharan African countries, faced with considerable major demographic growth accompanied by a high rate of urbanization. While the agribusiness companies generate added value locally and boost agricultural production, they find difficulties in obtaining efficient equipment and securing their energy supply.

Agribusiness process design and optimization methods are still underdeveloped, due to the complexity of these systems (food composition and properties, variable and changing quality, etc.), modelling of which is not easy since it requires multidisciplinary knowledge.

This work proposes to implement an integrated method, already proven in other industrial fields, the “Observation-Interpretation-Aggregation” method (OIA), and apply it to a process coupling a biomass energy conversion unit to a cereal products dryer. The bioenergy supply for drying, a very common practice in West Africa despite being energy-intensive, represents a challenge for the companies. The design of this process takes into account the various objectives such as quality of the dried product, local manufacture and the energy efficiency of the equipment, in order to guarantee better sustainability.

First of all, the models for heat transfer and pressure loss associated with an innovative elliptic turbulator are created. This component is inserted into the tubes of a heat exchanger, and significantly improves heat transfer. Secondly, the process design and observation variables are defined and justified. The representation models of the various unit operations are developed and brought together in a simulator, in order to predict the process performances. Finally, the simulator is integrated into a multicriteria optimization environment able to formalize, interpret and then aggregate end user preferences. This procedure is based on a genetic algorithm. The relevance of the high-performance design solutions produced reveals the full benefit and performance of the OIA method. In this way, the designer obtains objective information on which to base their choices, and develop sustainable drying facilities for West Africa.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse Antoine Collignan et Patrick Sébastien. Antoine, cela doit faire 25 années que nous nous côtoyons. Nous avons réalisé de belles choses ensemble dans la transformation des produits animaux, toi chercheur, moi technicien projeteur. Tu as été un booster de ma carrière. C'est toi qui m'a poussé en 1997 quand j'ai repris des études d'ingénieur à Toulouse, après déjà 11 années passées au Cirad, puis en 2012 quand tu as accepté de diriger cette thèse. Merci pour la disponibilité, la pédagogie et la rigueur que tu as apportées lors de ces quatre années de thèse. C'est pour quand notre 3^{ème} marathon du Médoc ? Il n'y a que là que je peux espérer te battre ...

Patrick, ce ne sont pas seulement tes 2m04 qui m'impressionnent. Je dis « *respect* » pour la maîtrise de toutes les sciences que tu diffuses à tes élèves et à tes thésards. Et que dire de la patience dont tu as toujours fait preuve pour me dérouiller le cerveau ; jamais tu n'as eu l'air agacé, bien au contraire, tu n'as toujours eu que des mots d'encouragement et la positive attitude.

Je dois bien évidemment remercier le Cirad et mes supérieurs hiérarchiques successifs qui depuis 30 ans m'ont toujours fait confiance et appuyé pour en arriver à cette étape de ma carrière.

Je ne vais pas citer tous mes collègues et amis du « village gaulois » du B15, mais ils savent tous combien je les apprécie. Je tenais à leur redire puis à les remercier d'avoir supporté mes humeurs, mes propos râleurs et la pression que je sais souvent mettre. Une pensée particulière pour Claude, Jacquot et Pierrot qui nous ont quittés trop tôt ; pour Nadine « Tata chouquette » qui sait remonter le moral de tous ses petits, pour Jeff, mon grand copain (même s'il est du B16) et pour Thierry G., mon autre grand copain avec qui j'ai toujours pris plaisir à partager de bons moments et à qui je confie tous mes états d'âme. Je n'oublie pas Thierry F., le chef de village burkinabè et sa famille, avec qui la mienne a partagé de si bons moments au cours de 5 belles années d'expatriation au Burkina Faso. Pascale et Erik, mes potes de footing et de rigolade, j'espère revenir vite à vos côtés ...

Une pensée pour ma famille toujours attentionnée envers moi, et spécialement pour mon père qui est décédé cette année.

Claire, Sarah, Noémie et Lucas, ma petite famille, vous m'avez soutenu et supporté au cours de ces quatre années de thèse, période professionnelle un peu éprouvante et stressante pour moi, « *le stressé de la vie* ». Allez, j'espère vite reprendre plus de temps avec vous. Bises.

Ce travail a fait l'objet de trois publications et d'une communication.

Rivier, M., Sébastien, P., Goli, T., Raffray, G., Collignan, A., (2015). Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries. *Applied Thermal Engineering*, 81(0), 92-101.

Rivier, M., Collignan, A., Méot, J.M., Madoumier, M., Sébastien, P., (2016). Development of a process simulator with a view to multi-objective optimization. Application to a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (Soumis).

Rivier, M., Collignan, A., Madoumier, M., De Souza, J., Sébastien, P., (2016). Multi-objective optimization of a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (En attente de soumission).

Rivier, M., Méot, J.M., Sebastian, P., Collignan, A., (2013). Les bioénergies, opportunité pour le développement du secteur agroalimentaire : étude de la filière mangue séchée au Burkina Faso., *In : 4ème Conférence Internationale sur les biocarburants/bioénergies en Afrique. Quel bilan et quelles voies d'avenir pour les biocarburants et les bioénergies en Afrique.*, 21-23 novembre, Ouagadougou, Burkina Faso, 10 p.

Listes des figures

Listes des figures

Listes des figures du manuscrit

- Fig. 1. (a) Précuisson de fonio et (b) Cuisson/déshydratation de beurre de karité
- Fig. 2. (a) Étuvage de riz et (b) Torréfaction d'amandes de karité
- Fig. 3. Séchage - fumage de poissons
- Fig. 4. Unité de décortiqueurs de fonio actionnés par moteurs thermiques
- Fig. 5. Précuisson de fonio sur brûleur à gaz
- Fig. 6. Séchage solaire direct de fonio précuit dans une entreprise de Ouagadougou
- Fig. 7. Séchoir solaire direct type « tente » (a) ou « tunnel (b) » et séchoir solaire indirect type « coquillage » (c)
- Fig. 8. Séchoir à gaz « Atesta »
- Fig. 9. Unité de séchage de mangue en construction au Burkina Faso
- Fig. 10. Démarche de conception traditionnelle de type « essai-erreur »
- Fig. 11. Gamme d'équipements fabriqués (a) et mode de fabrication (b) chez un fabricant pré-industriel de Douala au Cameroun
- Fig. 12. Fabrication d'une râpe à manioc sur roue (a) et de sa tôle de râpage (b) chez un artisan de Bamenda au Cameroun
- Fig. 13. Site de production d'un artisan de Bafoussam au Cameroun
- Fig. 14. Schéma d'un séchoir CSec-L (a) et d'un séchoir CSec-T (b) dans une entreprise du Burkina Faso
- Fig. 15. Générateurs thermiques type « foyer ouvert » en fabrication (a) et sur site de production au Cameroun (b), (c)
- Fig. 16. Échangeurs de chaleur à courants parallèles (a), à contre courants (b) et à courants croisés (c)
- Fig. 17. Turbulateurs à insérer dans des tubes selon Promvonge (2008) (a) et Eiamsa-ard et Promvonge (2005) (b)
- Fig. 18. Turbulateurs sous forme de bagues à souder à l'intérieur de tubes selon Kongkaitpaiboon et al. (2010)
- Fig. 19. Échangeurs tubulaires dans une veine de séchoir de mangue au Cameroun (a) et en construction au Nigéria (b)

Fig. 20. Schéma de principe (a) et photo (b) d'un échangeur tubulaire couplé à un générateur thermique, en construction dans un atelier de Douala (Cameroun), pour le séchage de cossettes de manioc

Fig. 21. Représentation schématique du séchoir CSec-T

Fig. 22. Représentation de l'approche systématique de conception selon Pahl et al. (1996, 2007)

Fig. 23. Représentation d'un problème de conception monocritère

Fig. 24. Représentation d'un problème de conception multicritère

Fig. 25. Démarche de prise de décision en conception de produit

Fig. 26. Représentation schématique de la construction du simulateur du procédé selon la démarche « Model-Based Reasoning »

Fig. 27. Représentation 2D de solutions et d'un front de Pareto selon deux variables d'observation

Fig. 28. Fonctions de désirabilité appliquées à deux variables d'observation à maximiser (a) ou à minimiser (b)

Fig. 29. Exemple de description fonctionnelle d'un algorithme génétique

Fig. 30. Schéma de l'ontologie F.B.S. selon Gero et al. (2004)

Fig. 31. Représentation schématique de la méthode O.I.A.

Fig. 32. Vue d'ensemble du dispositif expérimental en représentation virtuelle CAO 3D PTC Creo®

Fig. 33. Bande d'ellipses avant pliage

Fig. 34. Positionnement de l'instrumentation sur le dispositif expérimental

Fig. 35. Séchoir CSec-T installé dans la halle agroalimentaire du Cirad/Qualisud (a) et claie du séchoir chargée de produit lors des expérimentations (b) (c)

Fig. 36. Instrumentation du séchoir CSec-T

Listes des figures des publications

Publications n°1

Fig. 1. Definition of turbulators

Fig. 2. 3D CAD PTC Creo® virtual representation of the experimental device and the various elements

Fig. 3. Schematic diagram of experimental device, with positioning of the instrumentation

Fig. 4. Relative surface-based dispersions

Fig. 5a. Variation of Nusselt number for experimental situations without surface-based dispersion

Fig. 5b. Variation of Nusselt number for the experimental situations with surface-based dispersions on Ø 53.0 mm tube and $\alpha = 45^\circ$

Fig. 6a. Variation of friction factor for all the experimental situations

Fig. 6b. Variation of friction factor for experimental situations without surface-based dispersion

Fig. 6c. Variation of friction factor for the experimental situations with surface-based dispersions on Ø 53.0 mm tube and $\alpha = 45^\circ$

Fig. 7. Predicted data of (a) Nusselt number and (b) Fanning friction factor versus experimental data

Publications n°2

Fig. 1. Schematic representation of the global installation

Fig. 2. Tubular heat exchanger fitted with an elliptical turbulator

Fig. 3. Schematic representation of the packed bed dryer CSec-T and its corresponding pilot

Fig. 4. Primary circuit duty point determination

Fig. 5. Heat exchanger tube bundle arrangement

Fig. 6. Secondary circuit duty point determination

Fig. 7. Experimental and predicted data of a drying cycle on the CSec-T dryer

Fig. 8. Process simulation running algorithm

Fig. 9. Schematic representation of the model-based reasoning

Publications n°3

Fig. 1. Schematic representation of the OIA method

Fig. 2. Schematic representation of the overall installation

Fig. 3. Desirability functions applied to the observation variables Y_3 and Y_1

Fig. 4. Functional description of genetic algorithm

Fig. 5. Genetic algorithm convergence

Listes des tableaux

Listes des tableaux

Listes des tableaux du manuscrit

Tableau 1. Typologie des activités individuelles agroalimentaires en Afrique subsaharienne selon Broutin et Bricas (2006)

Tableau 2. Indice de Développement Humain (IDH), Produit Intérieur Brut (PIB) et consommation d'énergies dans différents pays ou zones géographiques du Monde pour l'année 2014

Tableau 3. Classification des DTM proposée par Tomiyama (1997 ; 2006) et adaptée (mise à jour des références bibliographiques)

Tableau 4. Présentation de l'approche systématique de conception selon différents auteurs (Dupé, 2011)

Tableau 5. Exemple de caractérisation de fonctions selon l'Analyse Fonctionnelle

Tableau 6. Méthodes de formulation des préférences

Listes des tableaux des publications

Publications n°1

Table 1. Description of all of the experimental situations

Table 2. Evolution of the thermal performance factor for the experimental situations with angular surface-based dispersions on Ø 53.0 mm tube and $\alpha = 45^\circ$ or 60°

Publications n°2

Table 1. List of the design variables

Table 2. List and value of the control variables associated with the application context

Table 3. List of the observation variables

Table 4. Numerical parameters of smoke extractor performance curve

Table 5. Numerical parameters of drying air fan performance curve

Table 6. Numerical parameters for external Nusselt number calculation

Table 7. Presentation of the various solutions tested

Table 8. Observation variable values for each design situation tested

Publications n°3

Table 1. Design variables and their variation domain

Table 2. Observation variables and desirability functions

Table 3. Genetic algorithm settings

Table 4. Design variables of the high-performance design solutions for each optimization procedure

Table 5. Observation variables and satisfaction indexes of the high-performance design solutions for each optimization procedure

Nomenclature générale

A	heat transfer area, m^2
A_{OIA}	“Aggregation” O.I.A. method step
A_{tray}	tray area, m^2
C_p	heat capacity, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
d	tube diameter, mm
Eff	unit efficiency, %
f	Fanning friction factor
h	heat transfer coefficient, $W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$
I_{OIA}	“Interpretation” O.I.A. method step
j	axial gap, mm
L	length, mm
L_{ev}	latent heat of water evaporation, $J\ kg^{-1}$
I	width, mm
M	mass, kg
M_{exch}	heat exchanger mass, kg
MPw	fan mechanical power, kW
$\dot{m}$	mass flow rate, $kg\ s^{-1}$
$N_{b\ col}$	column number
$N_{b\ tray}$	tray number
$N_{b\ tube}$	tube number
N_L	tubes rows number
Nu	Nusselt number
NTU	number of transfer units
O_{OIA}	“Observation” O.I.A. method step
OF	global objective function value
Pr	Prandtl number
$Prod$	dried product flow, $kg\ h^{-1}$
R	fan impeller radius, m
Re	Reynolds number
RH	relative humidity, %
S	candidate design solution
S_{es}	specific exchange surface, $m^2\ m^{-3}$
S_D	diagonal pitch, m
S_T	transverse pitch, m
T	temperature, $^\circ C$
thk	layer thickness, m

U	mean axial velocity, m s^{-1}
U_{prod}	mean axial velocity across food product, m s^{-1}
$\dot{V}$	volume flow rate, $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
W_{db}	dry basis moisture content, kg of water kg^{-1} of dry matter
X	design variable
Y	observation variable
Z	satisfaction indices
Δa	angular dispersion, degree
Δd	diametral dispersion, mm
ΔP	pressure drop, Pa
ΔS	percentage sectional flow area left free by the turbulator, %
Greek symbols	
α	bending angle, degree
ε_c	cooling effectiveness
μ	dynamic viscosity, Pa s
ρ	density, kg m^{-3}
λ	thermal conductivity, $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
ω	fan angular velocity, rad s^{-1}
Subscripts	
a	angular
amb	ambient air
ai	air inlet
ao	air outlet
d	diametral
el	ellipse
ext	external
int	inner
ip	inlet primary circuit
is	inlet secondary circuit
med	medium
op	outlet primary circuit
os	outlet secondary circuit
p	primary circuit
$prod$	food product
s	secondary circuit
$trans$	transient
$tube$	tube
$turb$	turbulent
w	water

Tables des matières

Résumé	i
Remerciements	iii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	ix
Nomenclature générale	xii
Tables des matières	xiv
Introduction générale	1
Chapitre 1 : État de l'art	5
1.1. Contexte lié au développement d'unités de séchage de produits alimentaires en Afrique subsaharienne	6
1.1.1. Enjeux et contraintes de la transformation agroalimentaire pour les Pays en Développement.	6
1.1.1.1. Généralités	6
1.1.1.2. Enjeux et contraintes : les spécificités du contexte de la transformation agroalimentaire en Afrique subsaharienne	7
1.1.2. Transformation agroalimentaire et fourniture énergétique en Afrique subsaharienne	9
1.1.2.1. Contexte de l'énergie	9
1.1.2.2. Entreprises de transformation agroalimentaire et fourniture énergétique	11
1.1.2.3. Spécificités des équipements et de leur fourniture énergétique pour la transformation agroalimentaire	13
1.1.2.4. Bioénergies : opportunités pour le développement du secteur agroalimentaire	16
1.1.3. Séchage de produits alimentaires en Afrique subsaharienne	17
1.1.3.1. Séchage : généralités, contraintes et importance dans un contexte spécifique	17
1.1.3.2. Caractéristiques des équipements de séchage utilisés	18
1.1.4. Conception et fabrication locales d'équipements en Afrique subsaharienne	21
1.1.5. Procédé couplant une unité de conversion biomasse énergie à un séchoir de produits céréaliers en Afrique de l'Ouest	25
1.1.5.1. Justification du développement du procédé	25
1.1.5.2. Les différents modules du procédé	28
a) Générateurs thermiques	28
b) Échangeurs de chaleur	29
c) Séchoir de produit alimentaire	34
1.1.6. Conclusion	35
1.2. Conception, Outils d'aide à la décision et Optimisation de procédés	37
1.2.1. Généralités sur les théories et méthodologies de conception	37
1.2.2. Approche « systématique » pour la conception d'équipements	39
1.2.3. Analyse multicritère et aide à la décision en conception d'équipements	41
1.2.3.1. Objectifs de conception, fonctions et critères associés	42
1.2.3.2. Solutions de conception	44
1.2.3.3. Évaluation des solutions de conception	44
1.2.3.4. Sélection et classement de solutions de conception	46
1.2.4. De la formalisation des préférences à la résolution et l'optimisation de problèmes de conception multicritère	48
1.2.4.1. Formalisation des préférences par fonctions de valeur	48
1.2.4.2. Agrégation des indices de satisfaction	50
1.2.4.3. Résolution et optimisation de problèmes de conception multicritère	51
1.2.5. De la théorie de la conception à la formalisation d'une démarche intégrée de conception de procédés de transformation agroalimentaire	53
1.3. Conclusion et objectifs de l'étude	55

Chapitre 2 : Démarche générale et Dispositifs expérimentaux	57
2.1. Démarche générale	58
2.2. Dispositifs expérimentaux	61
2.2.1. Dispositif de caractérisation du transfert thermique et des pertes de charges sur une unité d'échangeur équipée de turbulateur	61
2.2.2. Séchoir de produits alimentaires CSec-T	64
Chapitre 3 : Résultats	65
3.1. Modélisation du transfert thermique et de la dégradation de l'énergie mécanique dans un échangeur air-air équipé de turbulateur. (Article n°1)	66
3.2. Élaboration d'un simulateur de procédé en vue d'une optimisation multiobjectif. Application au procédé de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie dans un contexte de pays en développement. (Article n°2)	93
3.3. Optimisation multiobjectif d'un procédé de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie dans un contexte des pays en développement. (Article n°3)	125
Chapitre 4 : Discussion générale	147
Conclusion générale et perspectives	155
Références bibliographiques	158
Annexes	172

Introduction générale

Introduction générale

Le développement d'outils numériques plus accessibles et performants a incité les ingénieurs et chercheurs à faire évoluer les méthodes de conception et d'optimisation de procédés et d'équipements. Dans le domaine de la transformation agroalimentaire, si la modélisation a pu faire l'objet de nombreuses études scientifiques, les démarches adoptées se limitent souvent à l'étude d'une opération unitaire et la considération d'un, voire deux critères de performance (qualité de l'aliment et/ou rendement du procédé). Elles se trouvent peu adaptées à de l'optimisation multiobjectif. Le fait que l'aliment, issu du vivant, soit variable (composition physico-chimique, propriétés rhéologiques, ...) et que l'évolution de sa qualité au cours du procédé nécessite des connaissances pluridisciplinaires (biochimie, physique, thermique, mécanique des fluides,...) explique en grande partie cette situation.

Des méthodologies concrètes comme l'approche systématique de la conception (Pahl et al. (1996), Dupé (2011)) proposent un processus de conception linéaire. Elles s'appuient sur des outils tels que l'analyse fonctionnelle et la recherche de concepts préalablement à la phase de conception elle-même. Mais, du fait de la complexité des systèmes alimentaires, le concepteur doit être appuyé de façon plus efficace dans sa démarche afin d'optimiser son procédé sur la base de critères de performance pertinents. En effet, le nombre de ces critères mais aussi celui des variables de conception sont des facteurs limitants rendant le raisonnement et le choix de solutions difficiles. Aussi, l'apport d'outils déjà utilisés dans d'autres domaines industriels pour l'exploration d'espaces de recherche complexes est à promouvoir.

Dans les pays d'Afrique subsaharienne à fortes croissance démographique et urbanisation, le renforcement du secteur agroalimentaire constitue un élément moteur majeur du développement. Cependant, l'essor de ce secteur est freiné par la faible disponibilité d'équipements efficaces en raison de leur coût souvent prohibitif et de la faible disponibilité de l'énergie. Dans ce contexte, le concepteur doit satisfaire des objectifs multiples, aussi variés que la qualité produit, l'efficacité énergétique, les performances de production mais encore la fabrication locale des équipements et le contexte social et culturel.

En Afrique de l'Ouest, le séchage de produits alimentaires a toujours été largement pratiqué au niveau familial. Les pertes post-récolte et l'ouverture de nouveaux marchés locaux ou à l'exportation pour des produits séchés suscitent un intérêt croissant de la part de petites et moyennes entreprises (PMEs) agroalimentaires. Cependant, les contraintes évoquées précédemment constituent des blocages majeurs à la mise en œuvre maîtrisée de cette opération au sein de ces PME. En effet, l'énergie solaire ne peut couvrir la demande en termes de puissance et les énergies conventionnelles sont, en Afrique, particulièrement

chères et de disponibilité aléatoire. Aussi, l'utilisation de biomasse comme combustible constitue une alternative énergétique fiable. C'est le cas de coproduits de la transformation agroalimentaire (noyaux, épluchures, tourteaux, coques..) qui ont été très peu valorisés jusqu'alors. Mais la valorisation de cette biomasse doit être accompagnée de systèmes performants et durables de combustion, de transfert de chaleur et de mise en contact de l'air chaud avec le produit alimentaire.

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse s'inscrivent dans le continuum d'activités de Recherche et de Développement conduites en appui au secteur agroalimentaire des Pays du Sud, particulièrement dans une démarche de conception de procédés de transformation durables. Pour cela, la méthode O.I.A., outil d'analyse et d'optimisation multicritères éprouvée dans d'autres domaines est ici adaptée et appliquée à la conception d'un procédé couplant une unité de conversion biomasse énergie à un séchoir de produits céréaliers. La démarche utilisée est structurée selon trois grandes étapes : i) la construction d'un simulateur du comportement du procédé sur la base de modèles de représentation des opérations unitaires, ii) l'interprétation des variables de performance du procédé selon les attentes et les préférences en lien avec les objectifs de conception et iii) l'évaluation de situation de conception sous la forme d'un indicateur de satisfaction global. Cet outil est ensuite intégré dans un processus d'optimisation du procédé.

Le manuscrit est organisé en différentes parties :

- Un premier chapitre précise, dans un premier temps, le contexte particulier du secteur agroalimentaire et des énergies en Afrique subsaharienne. Puis, le séchage et la typologie des unités mettant en œuvre cette opération unitaire sont présentés pour ensuite décrire le secteur de la conception et de la fabrication d'équipements. Le procédé traité au cours de la thèse et ses différents éléments sont ensuite présentés.

Une deuxième partie de ce chapitre aborde les outils méthodologiques de la conception d'équipements, d'analyse multicritère et d'aide à la décision. La formalisation des préférences et leur traitement pour engager l'optimisation de problèmes de conception par méthodes numériques sont exposés. En fin de chapitre, l'ontologie de la conception « Function-Behaviour-Structure » de John Gero est développée.

- Dans un deuxième chapitre, le cadre général du procédé objet de cette étude est expliqué puis la méthode O.I.A. est détaillée. Les dispositifs expérimentaux sur lesquels les modèles de représentation ont été construits ou validés sont ensuite présentés.

- Les trois publications scientifiques forment le troisième chapitre « Résultats » du manuscrit. Le premier article présente l'étude expérimentale qui a été menée pour évaluer les performances techniques d'un turbulateur elliptique conçu pour ces travaux. Le dispositif

et le plan expérimentaux sont précisés ainsi que les données qui ont abouti à la caractérisation des performances du turbulateur et à la construction des modèles de transfert thermique et de perte de pression. Le deuxième article explicite le simulateur du procédé, construit autour de différents modèles dont ceux présentés dans le premier article. Les propriétés de cohérence et de capacité de prédiction de ce simulateur sont démontrées lors de l'évaluation de six situations de conception du procédé. Enfin, le troisième article déploie, étape par étape, la méthode O.I.A. pour évaluer des situations de conception et proposer des solutions de conception d'intérêt.

- Une analyse critique du travail est apportée dans le dernier chapitre, ainsi que quelques pistes d'amélioration et perspectives d'utilisation de ce type d'outil.

Chapitre 1 : État de l'art

Chapitre 1 : État de l'art

1.1. Contexte lié au développement d'unités de séchage de produits alimentaires en Afrique subsaharienne

1.1.1. Enjeux et contraintes de la transformation agroalimentaire pour les Pays en Développement

1.1.1.1. Généralités

La transformation agroalimentaire consiste à transformer des matières premières agricoles en denrées stockables et utilisables ultérieurement. Cette activité, très ancienne, est apparue probablement il y a 11 000 ans en même temps que l'agriculture et la sédentarisation des populations (production de farines et de semoules de céréales, séchage et fumage de viandes et poissons) (Rastoin, 2012). Au XIX^{ème} siècle et avec la révolution industrielle, cette activité restée jusqu'alors artisanale, familiale et proche de la production agricole s'industrialise dans les pays du Nord. L'innovation technique ainsi que l'étude et l'amélioration des différentes opérations unitaires (stérilisation, séparation, cuisson, ...) ont permis ce changement d'échelle.

Selon Rastoin (2012), de grandes disparités entre continents et pays sont notées. En 2009, pour un chiffre d'affaire de près de 4000 milliards de dollars dégagé par les industries agroalimentaires mondiales, 64 %, 30 % et 6 % proviennent respectivement des pays à hauts revenus, des pays émergents et des pays en développement. Sachant que chacune de ces classes de pays représente respectivement 16 %, 52 % et 32 % de la population mondiale, il apparaît que la production des filières alimentaires par habitant est très faible pour les pays en développement, pays qui tirent la majeure partie de leur richesse de l'agriculture. Pourtant, dans un processus de croissance démographique, le secteur de la transformation agroalimentaire constitue un « *secteur de démarrage dont l'avantage est de mobiliser peu de capitaux et beaucoup de travail et d'accompagner, par la baisse relative des coûts de production des aliments, l'essor des autres biens de consommation* » (Rastoin, 2012). Mais les mesures prises par les gouvernements pour stimuler ce secteur sont largement insuffisantes et ce, particulièrement en Afrique Subsaharienne.

1.1.1.2. Enjeux et contraintes : les spécificités du contexte de la transformation agroalimentaire en Afrique subsaharienne

Le continent africain reste encore largement affecté par la pauvreté et l'insécurité alimentaire. Selon l'Indicateur de Développement Humain (IDH, année 2014) du PNUD et sur un classement de 190 pays, l'Afrique compte 40 des 50 pays les plus mal classés au monde.

En 2001, selon les statistiques des Nations Unies (2005), près de la moitié de la population d'Afrique subsaharienne disposait de moins de un dollar par jour et le tiers était sous-alimenté. En 2015, l'Afrique subsaharienne compte 35 % d'habitants vivant encore sous le seuil de pauvreté et concentre près de 50 % des « très pauvres » du monde.

L'Afrique poursuit, pour une durée estimée à encore une ou deux décennies, sa transition démographique : forte croissance démographique et cycle d'urbanisation. La population urbaine, qui représentait 15 % de la population totale en 1950, devrait atteindre les 50 % en 2030. Aussi, les pays de ce continent vont devoir relever dans les années futures un défi colossal pour pourvoir aux besoins alimentaires d'une population croissante et concentrée en zone urbaine.

De nos jours, l'économie de nombreux pays du continent africain et particulièrement de la sous-région ouest-africaine repose sur l'agriculture, basée avant tout sur les cultures vivrières et sur des petites exploitations familiales. Ce secteur emploie une majorité des actifs, contribue en grande partie à la formation du produit intérieur brut (PIB), aux revenus des ménages ruraux, à l'équilibre de la balance commerciale et à la sécurité alimentaire des populations (Blein et al., 2008). La production alimentaire de ces pays ne répond pas aux besoins alimentaires des populations. Cet état de fait est accentuée par le développement de cultures d'exportations comme par exemple le coton, le sésame, le karité, la noix de cajou ou encore la mangue, qui se développent au détriment des cultures vivrières, pourtant essentielles pour l'alimentation de la population. Ainsi, la dépendance de produits agricoles importés a de graves incidences sur la sécurité alimentaire de ces populations.

Selon Broutin et Bricas (2006), le faible appui fourni jusqu'alors par les états aux activités de transformation agroalimentaire qui mobilisent pourtant en Afrique saharienne des millions de femmes s'explique par le fait qu'en très grande majorité, elles sont menées à l'échelle individuelle, souvent à domicile, sur la base de savoir-faire domestique, et restent essentiellement dans le secteur informel. Ainsi, pour les États, elles ne sont pas considérées comme apportant une valeur ajoutée significative et donc dignes d'être considérées dans les politiques de développement.

Mais ce contexte est en train d'évoluer avec la création de petites entreprises mécanisées qui du coup font l'objet de « reconnaissance » et d'« attention » des services des États et

des programmes de développement. Ces petites entreprises et groupements élaborent des produits locaux étroitement liés aux habitudes alimentaires, alors que d'autres structures sont positionnées sur une transformation ciblée vers un marché à l'export (mangue séchée, beurre de karité). Dans tous les cas, par la création locale de valeur ajoutée et d'activités génératrices de revenus, le développement de ce secteur de la transformation agroalimentaire en Afrique est aujourd'hui reconnu comme essentiel pour garantir la sécurité alimentaire des populations futures (Alpha et al., 2013; Losch, 2012).

Malgré la présence de grandes entreprises comme les sucreries, les brasseries, les rizeries industrielles, souvent propriétés de groupes internationaux, la majorité des entreprises de transformation agroalimentaire rencontrées en Afrique de l'Ouest restent de taille modeste (quelques dizaines de kilogrammes à quelques tonnes de produits finis par jour). Pour appréhender la typologie et caractériser ces petites et moyennes entreprises (PME), différents critères sont proposés dans le tableau 1 (Broutin et Bricas, 2006), en les différenciant des micro entreprises familiales évoquées précédemment.

Tableau 1

Typologie des activités individuelles agroalimentaires en Afrique subsaharienne selon Broutin et Bricas (2006).

	Micro entreprise	Petite entreprise	Moyenne entreprise
Savoir-faire	Savoir-faire technique spécifique		
Type d'équipement	Utilisable pour la cuisine de grandes familles	Spécifique pour les activités de l'entreprise	
Capital financier de démarrage	Mobilisable sur épargne personnelle et réseau de proximité	Recours nécessaire à du crédit informel ou formel	
Local	Souvent local spécialisé à domicile ou sur un lieu fixe (milieu rural)	Local indépendant	
Employés	Auto-emploi + main-d'œuvre familiale ou apprentis	Patron + main-d'œuvre familiale + quelques employés permanents rémunérés + main-d'œuvre temporaire	Patron + personnel spécialisé + employés + main-d'œuvre temporaire
Organisation des activités	Le responsable assure toutes les fonctions	Distinction des fonctions entre employés	
Type de marché	Marché de proximité vente directe aux clients	Marchés distants, niches de marchés, vente via distributeurs	
Importance du revenu	Revenus pouvant assurer les besoins d'une famille entière	Revenus permettant des investissements dans l'entreprise	

Il est à noter que cette classification des PME en Afrique subsaharienne se démarque de celle définie par la Commission européenne (UE, 2015), par le chiffre d'affaire et le nombre de salariés. En effet :

- Une micro entreprise emploie moins de 10 personnes et son chiffre d'affaires annuel (montant d'argent perçu à une période donnée) ou son bilan (état des actifs et des passifs de la société) n'excède pas 2 millions d'euros.
- Une petite entreprise emploie moins de 50 personnes et son chiffre d'affaires ou son bilan n'excède pas 10 millions d'euros.
- Une moyenne entreprise emploie moins de 250 personnes et son chiffre d'affaires n'excède pas 50 millions d'euros ou son bilan n'excède pas 43 millions d'euros.

Parmi les contraintes qui freinent le développement des PME en Afrique subsaharienne, on peut relever la difficulté d'accès à l'information et aux équipements de transformation. L'offre en matériels n'est pas adaptée, trop limitée voire inexistante. On trouve généralement des matériels importés, quelques-uns fabriqués localement, le plus souvent sous forme de mauvaises copies et/ou adaptations de technologies introduites. De ce fait, ces équipements ne répondent que partiellement aux besoins réels. Leurs caractéristiques techniques sont souvent mal adaptées : non compatibilité des débits, difficulté d'assurer une continuité du flux de produit entre équipements, utilisation d'équipements pour d'autres opérations unitaires et/ou autres produits. On relève ainsi un impact fort sur les performances attendues : pertes de débit, de rendement, d'efficacité énergétique, autant de pertes économiques pour l'entreprise.

1.1.2. Transformation agroalimentaire et fourniture énergétique en Afrique subsaharienne

1.1.2.1. Contexte de l'énergie

L'accès à l'énergie est l'une des sources d'inégalités les plus importantes au monde (Bauby et Gerber, 1995; Leach, 1992) qui entrave le développement, en particulier le développement d'activités industrielles. À titre d'exemple, en 1999, Minvielle soulignait qu'un consommateur burkinabè utilise 500 fois moins d'énergie qu'un Nord-Américain et que la totalité de la consommation énergétique de son pays est inférieure à celle d'une commune américaine de 20.000 habitants. Une quinzaine d'années plus tard, cet écart de consommation s'est réduit mais reste important (Tableau 2). Ainsi, en 2014 (IEA, 2014; SEA, 2013), la consommation totale d'énergie primaire d'un habitant des États-Unis reste encore respectivement 10 ou 40 fois plus importante que celle d'un habitant de Côte d'Ivoire ou du Burkina Faso, deux pays d'Afrique de l'Ouest. Cet écart est encore plus marqué en ce qui concerne la consommation de la seule énergie électrique : 47 et 260 fois plus importante.

Tableau 2

Indice de Développement Humain (IDH), Produit Intérieur Brut (PIB) et consommation d'énergies dans différents pays ou zones géographiques du Monde pour l'année 2014 (construit d'après (IEA, 2014; SEA, 2013)).

	IDH	PIB (US \$ par habitant)	Consommation totale d'énergie par habitant (tep / habitant)	Consommation totale d'énergie par habitant (GJ / habitant)	Consommation d'électricité par habitant (kWh / habitant)	Consommation d'électricité par habitant (GJ / habitant)
Etats Unis	0,915	50 600	6,94	290,1	12 960	46,656
Europe (Etats membres)		34 300	3,08	128,7	5 910	21,276
France	0,888	41 250	3,67	153,4	6 950	25,020
Afrique (Continent)		1 920	0,67	28,0	570	2,052
Burkina Faso *	0,402	683	0,18	7,5	50	0,180
Cote d'Ivoire	0,462	1 409	0,63	26,3	280	1,008
Sénégal	0,466	1 015	0,27	11,3	220	0,792

* selon SEA (2013)

À cette inégalité Nord-Sud, se rajoute en Afrique subsaharienne une importante fracture énergétique entre milieu urbain et milieu rural : les taux d'électrification en milieu urbain sont respectivement de 90 %, 54 % et 42 % pour le Sénégal, le Burkina Faso et la Côte d'Ivoire et de 28 %, 2 % et 8 % en milieu rural (SEA, 2013).

Selon une étude de la FAO, la biomasse énergie et essentiellement le bois énergie, représente plus de 30 % de l'énergie consommée sur le continent africain et plus de 80 % en Afrique subsaharienne. C'est la source d'énergie prédominante au sein des ménages, pour la cuisson et chauffage des aliments. L'accès à l'énergie moderne (gaz) pour ces applications est très limité et se concentre dans les zones urbaines.

L'accès à l'énergie peut-il être considéré comme un facteur de développement socio-économique ?

En 2002, parmi les « Objectif de Développement du Millénaire », les Nations-Unis (UN, 2000) n'intégrait pas ce facteur pour atteindre les objectifs d'éradication de l'extrême pauvreté à travers le développement durable. Aujourd'hui, il est largement reconnu que l'accès à l'énergie est un facteur important permettant d'améliorer les conditions de vie des populations, et de garantir un développement socio-économique (Kebede et al., 2010).

Suite à cette récente prise de conscience, de nombreux auteurs, évoquent et analysent ce qu'ils considèrent comme une évolution majeure à poursuivre dans le secteur de l'énergie : la pauvreté énergétique. Selon Reddy et al. (2000), « *La pauvreté énergétique peut être définie comme l'absence d'un choix suffisant pour accéder aux services énergétiques adéquats, abordables, fiables, de qualité, sûres et respectueux de l'environnement pour soutenir le développement économique et humain* ». Dans son article, González-Eguino (2015) propose une vue d'ensemble pour qualifier et quantifier la pauvreté énergétique, et sur ses implications sociétales et économiques. Il expose notamment les points de vue de Martinez et Ebenhack (2008) et de Costantini et Monni (2008) qui soulignent que l'évolution

d'indicateurs macro-économiques classiques tels que le Développement Humain (IDH) et le Produit Intérieur Brut (PIB) est étroitement liée avec la consommation d'énergie. Cette analyse peut être renforcée par les informations apportées dans le tableau 2, particulièrement la comparaison entre les indicateurs de pays du Nord et ceux de pays d'Afrique subsaharienne. Cette analyse doit aussi être relativisée, avec le constat effectué dans certains pays en fort développement où, à partir d'un certain niveau de la consommation des énergies, les indicateurs de « bien-être » pour l'homme n'ont plus évolués aussi favorablement, voire se sont dégradés.

1.1.2.2. Entreprises de transformation agroalimentaire et fourniture énergétique

Si l'intérêt suscité par le développement des entreprises agroalimentaires en Afrique subsaharienne est réel et clairement exprimé dans un certain nombre d'études, il n'en demeure pas moins que les entrepreneurs de ces filières rencontrent des difficultés liées à l'accès à l'énergie pour leurs unités de transformation. Ceci constitue l'un des blocages majeurs au développement de ces unités (de Janvry et Sadoulet, 2000; DFID, 2002).

Ce secteur de la transformation mobilise des opérations unitaires souvent énergivores telles que le séchage ou la cuisson. En Afrique de l'Ouest par exemple, des puissances thermiques ou motrices comprises entre 5 et 250 kW sont nécessaires pour satisfaire la demande de la plupart des petites et moyennes entreprises (PMEs). Ces besoins ont pu être relevés lors de plusieurs études ou projets, en particulier sur les filières de transformation de céréales (Rivier et Cruz, 2007; Rivier et al., 2003; Rivier et Niang, 2004.a), de fruits (Rivier et al., 2009; Rivier et Niang, 2004.a), de produits animaux (Rivier et Blin, 2009; Rivier et al., 2010) et de karité (Blin et Rivier, 2009).

La population des états d'Afrique subsaharienne reste majoritairement dépendante d'un approvisionnement énergétique à partir de biomasse ligneuse. Celle-ci est largement utilisée dans certaines PME de transformation agroalimentaire pour des opérations unitaires thermiques telles que la précuisson / cuisson de produits céréaliers (Figure 1a) ou de beurre de karité (Figure 1b), l'étuvage de riz (Figure 2a), la torréfaction (soja, karité, Figure 2b) ou le séchage-fumage de poissons (Figure 3). Si les équipements associés à ces opérations unitaires (Figures 1 à 3) paraissent « rudimentaires », ils n'en sont pas moins très diffusés. Plusieurs d'entre eux peuvent être mis « côte à côte » et assurer une capacité de production importante ; ainsi, des puissances thermiques absorbées de 10 à 100 kW peuvent être atteintes. En zone sahélienne, l'utilisation massive de bois pour ces opérations engendre des problèmes de déforestation qui n'ont jusqu'ici pas été résolus malgré des politiques nationales incitant la substitution par d'autres sources d'énergie, notamment le gaz. De fait, des PME de séchage de fruits en Afrique de l'Ouest utilisent cette énergie dans leurs unités

où des puissances thermiques de 20 à 400 kW ont pu être relevées. Nous reviendrons, aux paragraphes 1.1.2.3. et 1.1.3., spécifiquement sur cette opération de séchage.



Fig. 1. (a) Précuisson de fonio et (b) Cuisson/déshydratation de beurre de karité (© M. Rivier, Cirad).



Fig. 2. (a) Étuvage de riz et (b) Torréfaction d'amandes de karité (© M. Rivier, Cirad).



Fig. 3. Séchage - fumage de poissons (© M. Rivier, Cirad).

L'énergie motrice, elle, est nécessaire pour des opérations unitaires telles que le nettoyage, le décortilage, le broyage ou la mouture. Elle peut être apportée par les arbres de sortie de moteurs thermiques à combustion de gazole (Figure 4) ou de moteurs électriques reliés à un réseau local.



Fig. 4. Unité de décortiqueurs de fonio actionnés par moteurs thermiques (© T. Ferré, Cirad).

Les puissances motrices relevées selon les équipements sont de l'ordre de 3 à 10 kW, à multiplier par les types et nombres d'équipements définis par la capacité de production de l'entreprise.

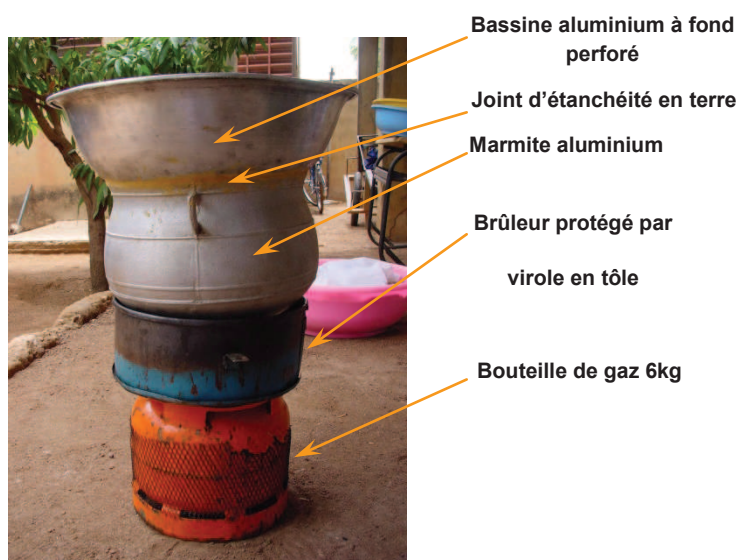
1.1.2.3. Spécificités des équipements et de leur fourniture énergétique pour la transformation agroalimentaire

L'émergence d'activités de transformation et de PME agroalimentaires en Afrique subsaharienne se trouve freinée, principalement par le coût des facteurs de production. Comme vu précédemment (paragraphe 1.1.1.2.), l'offre en matériels de transformation est limitée, et les solutions technologiques ne sont pas adaptées aux différentes opérations unitaires agroalimentaires et à la constitution de lignes de production. De plus, les équipements ne présentent pas une bonne efficacité énergétique et les sources d'énergie utilisées ne sont pas toujours disponibles localement et sont souvent coûteuses. Ainsi, des améliorations peuvent être facilement apportées. Ceci est illustré par les exemples ci-dessous :

- L'équipement de type Engelberg pour le décortilage est diffusé à des centaines d'exemplaires en Afrique de l'Ouest. Il est utilisé aussi bien pour le décortilage-blanchiment du riz que le dégermage du maïs. Les pièces mécaniques, utiles à l'usinage des grains, ne sont pas dimensionnées selon la taille et la forme des différents grains. Ainsi, les débits et rendements d'usinage en sont affectés. Il a ainsi pu être constaté des gains sur le rendement

d'usinage de maïs, celui-ci passant de 55 % à 60/65 % en substituant au décortiqueur Engelberg une dégermeuse à maïs importée du Brésil (Rivier et al., 2001). Le prix de revient du produit fini (gritz de brasserie) chute ainsi de plus de 10%. Ce gain de productivité intègre une baisse de 15 % de la consommation électrique, du fait d'une bonne adaptation de la puissance du moteur aux principes et débits de fonctionnement de la machine.

- L'opération de précuisson de fonio (Rivier et Cruz, 2007) pour laquelle une station de précuisson (Figure 1a) a été adaptée à un brûleur à combustion de gaz (Figure 5). La quantité d'énergie absorbée passe ainsi de 2800 kJ / kg de fonio à précuire en installation biomasse au « bois » à 660 kJ / kg de fonio à précuire en installation gaz, soit un rapport de 4 sur l'efficacité énergétique. Pourtant, certaines unités dont une unité de



transformation de fonio de Bamako, l'une des plus importantes d'Afrique de l'Ouest (60 tonnes de fonio précuit en filière export) continue à utiliser ses stations de précuisson avec alimentation énergétique au bois. Ceci montre que la diffusion d'innovations techniques, pourtant simples, n'est pas toujours facile.

Fig. 5. Précuisson de fonio sur brûleur à gaz (© M. Rivier, Cirad).

- L'opération de séchage est largement mise en œuvre en Afrique Subsaharienne, pour la déshydratation de fruits, de viande et poisson, ou de produits céréaliers agglomérés. Les technologies de séchage sont diverses : de simples claies posées à même le sol où le produit est soumis au rayonnement solaire jusqu'au séchoir à claies, à combustion de gaz et à convection naturelle de type « Atesta ». Une fois encore, la mauvaise adaptation des séchoirs aux caractéristiques des produits à sécher (tranches de mangue, granules de couscous) a pu être constatée (Rivier et al., 2003; Rivier et al., 2004.b), induisant une très mauvaise efficacité énergétique (moins de 25 % sur des séchoirs de type « Atesta »).

Ces quelques exemples illustrent la faible performance énergétique des procédés de transformation agroalimentaires en Afrique subsaharienne. L'utilisation fréquente du « bois énergie » sur les opérations unitaires thermiques, conduit à des efficacités énergétiques de

l'ordre de 10 %. À ce constat, s'ajoutent particulièrement en zone sahélienne, les incidences environnementales (déforestation), celles liées à la pénibilité de la collecte du bois, attribuée essentiellement aux femmes, au détriment d'autres activités productives ou de l'éducation (Kammen, 2006) et celles sur la santé des opérateurs avec les dégagements de fumées lors de la combustion.

Comme alternatives à l'utilisation de bois énergie, en activités familiales ou dans les PME, les productions hydroélectriques et les énergies renouvelables restent à ce jour marginales, plus encore dans la sous-région d'Afrique de l'Ouest. Aussi, pour les usages industriels tels le transport et la production d'électricité, les États dépendent des produits pétroliers dont les importations pèsent grandement sur leur balance commerciale, ce qui limite de fait le recours à ces énergies.

L'électricité est souvent produite par des centrales thermiques de très grosses puissances fonctionnant aux fuels lourds à l'échelle des villes et/ou des zones industrielles ou par des groupes électrogènes « individuels » (à essence ou gazole), pour l'habitat ou les PME « isolées ». Dans les deux cas, le prix du kWh représente un poste important dans le coût de production des PME africaines, ce qui le rend souvent dissuasif. Si l'on compare le prix du kWh en France (0.15 €) et au Burkina Faso (0.22 €, ce qui en fait l'une des électricités les plus chères du monde) ainsi que le salaire minimum (Smic / Smig) des deux pays, le coût de l'énergie électrique est perçu comme 30 fois supérieur pour un consommateur ou un entrepreneur burkinabè. À cela s'ajoute le problème d'accès et de disponibilité de l'électricité. En effet, les faibles niveaux techniques, de qualité et de maintenance du réseau de production et de distribution font que les entreprises disposent de trop faibles puissances et subissent des coupures récurrentes.

De ce fait, les entreprises à capacité de production importante d'Afrique de l'Ouest ayant besoin de fortes puissances (cuisson, séchage, étuvage, ...) se tournent souvent vers l'utilisation de gaz, essentiellement des bouteilles de butane de 6 ou 12,5 kg. Ceci s'explique par l'initiative de certains États ouest-africains, qui souhaitent limiter la déforestation liée à l'utilisation du « bois de feu » et subventionnent les importations de gaz. Même si le bois est encore majoritaire dans la consommation d'énergie totale, les quantités de gaz consommées se sont accrues et, par exemple, ont été multipliées par cinq entre 1993 et 2007 au Burkina Faso où la subvention couvrait (avant 2013) 50 % du prix au consommateur final. Cette volonté louable des États a malheureusement un impact sur leur budget. Aussi, après une telle croissance dans la consommation, certains États ont été obligés de limiter leur subvention, n'arrivant plus à assurer le règlement de leur facture d'importation énergétique. Ainsi, en avril 2013 au Burkina Faso, le prix de vente de la bouteille de gaz butane a été majoré de 25 %. Cette contrainte affecte la compétitivité des unités de transformation

agroalimentaire et leur développement sachant par exemple que dans la filière mangue séchée, l'énergie contribue à hauteur de 20% au prix de revient du produit fini.

1.1.2.4. Bioénergies : opportunités pour le développement du secteur agroalimentaire

Même si, en 2016, les cours du baril de pétrole restent à un bas niveau, l'augmentation de son prix est inéluctable et affectera l'activité des filières alimentaires des pays d'Afrique de l'Ouest (Hazell et Pachauri, 2006).

Pour ces pays à fortes croissances économique et démographique, la transition énergétique doit être en adéquation avec les préconisations de la 21^{ème} Conférence des Nations unies sur les changements climatiques (COP21) de Paris. Elle doit passer par le développement local d'énergies renouvelables, sans passer par l'étape de dépendance aux énergies fossiles, tout en améliorant l'efficacité énergétique dans les systèmes de transformation (Kyte et al., 2015).

La biomasse peut être utilisée de manière durable pour générer de l'énergie en grande quantité (chaleur, force motrice, électricité) et peut constituer une alternative fiable. Dans certains pays d'Afrique Centrale « forestière » comme le Sud Cameroun, une filière « bois énergie » durable commence à se développer à partir de déchets de scierie et/ou de biomasse issue d'entretien de plantations (hévées, palmiers, manguiers). Les co-produits générés lors de la transformation des matières premières agricoles (noyaux, épluchures, tourteaux, coques..) peuvent aussi constituer une alternative énergétique alors qu'ils sont très peu valorisés. Ceci est bien illustré par :

- La transformation des noix de karité en beurre de karité qui génère environ 1.2 kg de coque d'amande par kg de beurre de karité produit (USAID, 2006), soit environ l'équivalent de 23 500 kJ. Les besoins en énergie (essentiellement de la chaleur) pour le procédé de transformation du karité sont évalués à 37 500 kJ / kg de beurre dans les procédés traditionnels. La production annuelle de beurre de karité en Afrique de l'Ouest est estimée à 88 000 tonnes.
- La transformation du fruit de l'anacardier en noix de cajou sèche qui produit 0.7 kg de résidus sous forme de coques par kg de fruit, soit environ l'équivalent de 11 500 kJ. Les besoins énergétiques pour le procédé artisanal (chaleur) sont estimés à 9 500 kJ / kg de fruits en entrée dans les procédés traditionnels. La production de fruits de l'anacardier est de plus de 2 millions de tonnes (en 2013, source FAO) en Afrique de l'Ouest (soit près de 50 % de la production mondiale).

Aujourd'hui des procédés de valorisation énergétique de ces diverses biomasses, avec des puissances adaptées à la demande des PME africaines, apparaissent sur le marché. Ils pourraient ainsi permettre aux unités i) de résoudre leurs problèmes de gestion des déchets, ii) d'accéder à une certaine indépendance énergétique à un coût moindre et iii) de revendiquer l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable qui, de plus, donne accès à des labels de qualité ou au système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre (marché du CO₂).

Mais pour respecter les préconisations de la COP 21, la mise en œuvre de ces bioénergies dans les unités de transformation nécessite la conception d'équipements adaptés. Cet enjeu est particulièrement important dans le cas du séchage, opération de base pour la conservation des aliments dans les pays du Sud et qui requiert une quantité d'énergie élevée. C'est ainsi que par exemple, lors de la production de mangue séchée (Rivier et al., 2013), un outil de séchage adapté et un apport de bioénergie issue de la combustion des noyaux de mangue permettraient d'économiser près de 30 % de l'énergie consommée, ce qui baisserait ainsi de 10 % le prix du produit fini.

Dans le contexte décrit, les solutions « biomasse » constituent une alternative crédible aux énergies fossiles et s'inscrivent clairement dans les objectifs des grandes conventions internationales à la fois sur la sécurité alimentaire et sur le développement durable.

1.1.3. Séchage de produits alimentaires en Afrique subsaharienne

1.1.3.1. Séchage : généralités, contraintes et importance dans un contexte spécifique

Le séchage est l'un des plus anciens procédés de préservation des aliments, avec pour objectif principal de convertir des denrées périssables en produits stabilisés par enlèvement d'une partie de l'eau du produit par évaporation.

Il se produit un abaissement de l'activité de l'eau (a_w) du produit, limitant la prolifération des microorganismes et ralentissant la plupart des réactions chimiques ou enzymatiques.

Les raisons de sécher peuvent être regroupées en trois catégories principales (Bimbenet et al., 2002) :

- permettre ou faciliter la conservation des produits et amortir le caractère saisonnier de certaines activités agricoles ou industrielles.
- diminuer la masse et le volume des aliments, pour réduire leur encombrement et faciliter leur transport.

- donner une présentation, une structure ou une fonctionnalité particulière au produit.

Le séchage est une opération consommatrice d'énergie du fait de changement de phase de l'eau extraite du produit. Au niveau mondial, cette opération contribue à environ 60 % de la consommation d'énergie du secteur agroalimentaire. De plus, elle mobilise de fortes puissances nécessaires pour limiter les temps de séchage (Kerkhof et Coumans, 2002). Aussi, en pays du Sud, ces deux caractéristiques en font l'un des blocages majeurs à la mise en œuvre maîtrisée de cette opération, comme en Afrique subsaharienne, où les pertes post-récolte sont pourtant encore considérables (Affognon et al., 2015) et où la stabilisation de produits agricoles par séchage suscite un réel intérêt.

1.1.3.2. Caractéristiques des équipements de séchage utilisés

Les technologies rencontrées en pays du Nord sont quasi absentes des unités de transformation du Sud, en raison de leur prix (construite en matériaux « nobles » de type inox et avec des coûts de fabrication « Nord »), de leur niveau « technologique » (contrôle-commande) et des compétences à trouver pour le pilotage des séchoirs. De plus, aucun équipementier du Nord ne peut s'engager à assurer une maintenance de proximité.

Sur le continent africain, le séchage de produits alimentaires « à l'air libre » a toujours été pratiqué au niveau domestique. Les produits, fruits, légumes, viandes et poissons sont posés sur des nattes, à même le sol ou sur des claies, parfois surélevées. Cette pratique familiale



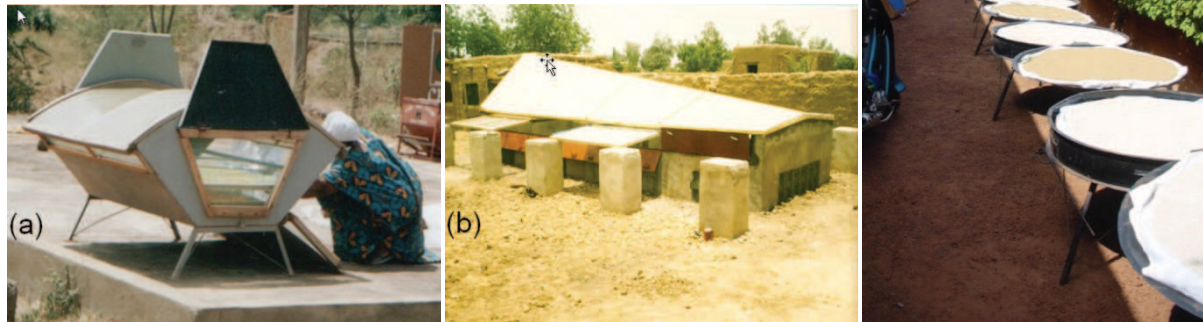
s'est reproduite et perdure encore dans beaucoup de PME ouest-africaines (Figure 6). Le produit est soumis au rayonnement solaire « direct », mais également aux poussières (périodes d'Harmattan) et autres contaminants de l'air ambiant.

Fig. 6. Séchage solaire direct de fonio précuit dans une entreprise de Ouagadougou (© M. Rivier, Cirad).

Une multitude de projets (ONGs, Écoles d'ingénieurs européennes, Instituts de recherche locaux) ont proposé et testé une large gamme de séchoirs essentiellement en apport énergétique solaire direct (séchoirs « tente » (Figure 7a), « tunnel » (Figure 7b), « serre ») ou indirect (préchauffage de l'air du séchoir sur corps noir, séchoir de type « coquillage, Figure 7c »). Bon nombre de ces séchoirs en sont restés au stade de prototype et sont

aujourd'hui peu diffusés. Ils ont fait néanmoins l'objet d'une multitude d'articles et de revues scientifiques (Murthy, 2009; Sharma et al., 2009).

Fig. 7. Séchoir solaire direct type « tente » (a) ou « tunnel » (b) et séchoir solaire indirect type « coquillage » (c) (© A. Niang, Eier (a) et (b) ; M. Rivier, Cirad (c)).



Boroze et al (2014) ont fait un recensement exhaustif (plus de 50 articles) des différents séchoirs présentés dans les articles scientifiques, séchoirs spécifiquement proposés pour le



contexte des Pays en Développement. Les enquêtes qu'ils ont ensuite menées auprès de 120 opérateurs dans trois pays d'Afrique de l'Ouest (Togo, Bénin, et Burkina Faso) les ont amenés à soulever le contraste entre le nombre des différents modèles de séchoirs, pour la plupart solaire, relevés dans la littérature et réellement présents sur le terrain. Les équipements de séchage rencontrés et utilisés restent ceux présentés ci-dessus en Figures 6 et 7 ainsi qu'un séchoir à claies, à convection naturelle et à combustion direct de gaz : le séchoir « Atesta » (Figure 8).

Fig. 8. Séchoir à gaz « Atesta » (© M. Rivier, Cirad).

Au Burkina Faso, quelques prototypes de séchoir de mangue, à combustion de gaz, ont pu être relevés par Rivier et al. (2004.b) mais ne sont que très peu ou pas du tout utilisés. La soixantaine d'unités de séchage de cette filière sont équipées de près de 350 séchoirs « Atesta » (Figure 8) tout comme plusieurs unités de transformation de céréales pour le séchage de produits granulés (couscous ou granules de bouillie) (Rivier et al., 2003).

L'abondante littérature ainsi que les différentes études réalisées sur le terrain permettent de dresser le bilan suivant :

- Les séchoirs solaires directs (selon quelques modèles) restent encore les séchoirs parmi les plus utilisés en Afrique subsaharienne.
- Le séchoir Atesta, construit à plusieurs centaines voire milliers d'exemplaires dans toute l'Afrique, est un modèle de séchoir à apport d'énergie autre que le solaire (combustion direct de gaz, convection naturelle) très présent dans les PME en Afrique.



- Pour atteindre des capacités de production importantes, le nombre de séchoirs croît avec la demande en produit séché (séchage solaire : Figure 7c et unité de séchage de mangue avec séchoirs Atesta : Figure 9)

Fig. 9. Unité de séchage de mangue en construction au Burkina Faso (nov. 2015). Vingt séchoirs « Atesta », capacité de production : 2000 kg de tranches de mangue « fraîche » (400 kg de mangue séchée) par 24 h. (© A. Delpech, Cirad).

- La capacité d'investissement des transformateurs est faible : l'accès aux crédits est difficile et les taux d'intérêt sont dissuasifs.
- En dehors des aspects liés aux coût et niveau technologique des séchoirs commercialisés au Nord, les difficultés d'accès à une information fiable et précise, les difficultés liées aux modalités d'acquisition (prises de contact, règlement, livraison) de séchoirs et de pièces détachés hors continent Afrique sont des obstacles réels pour les entrepreneurs. Ces derniers ont besoin d'être « rassurés » sur la capacité technique des équipements de transformation ; aussi, la proximité avec les équipementiers et le fait de pouvoir apprécier la présence et les performances des équipements sur d'autres sites sont jugés très importants selon Boroze et al. (2014).
- La capacité de séchage (masse de produit à sécher / cycle de séchage) par unité de surface de séchage des séchoirs solaires est faible. Aussi, pour atteindre une production importante, il faut avoir accès à des surfaces au sol importantes, ce qui peut présenter problème pour les unités installées en milieu urbain.
- Les vitesses de séchage sur les séchoirs solaires sont faibles, relative à la durée et à la puissance du rayonnement solaire ainsi qu'à l'humidité relative de l'air. En période de saison des pluies, en zone tropicale humide ou la nuit, cette capacité est d'autant plus affectée (en Afrique de l'Ouest, la saison de récolte et de transformation des mangues coïncide avec la saison des pluies). La qualité du produit peut être fortement affectée pour arriver jusqu'à une qualité non marchande (brunissement, fermentation, ...).

- Le processus de développement puis la diffusion du séchoir Atesta sont remarquables. Au Burkina Faso et au début des années 1980, devant l'abondance de la production et des pertes post-récolte de la mangue (plusieurs milliers de tonnes, près de 50 % de la production), l'ONG « Centre Écologique Albert Schweitzer (CEAS) » a été très active sur la recherche d'un marché de la mangue sèche à l'exportation vers l'Europe puis par la conception et la diffusion du séchoir Atesta. Les essais in situ, puis la formation d'un réseau d'équipementiers locaux ont été les éléments déterminants dans le développement de la filière et la dissémination des unités de séchage. Tous les matériaux constituant le séchoir sont disponibles localement et leur mise en œuvre est possible dans des ateliers sommairement équipés en machines-outils.

Le choix du gaz comme énergie sur le séchoir Atesta était alors cohérent avec sa promotion par les États (disponibilité et coût) et sa mise en œuvre (combustion directe possible, brûleur fabriqué localement). Cependant, après des années de croissance dans la diffusion du séchoir et des volumes transformés, les attentes concernant la qualité des produits séchés et le fort niveau de consommation d'énergie, deux indicateurs déterminant la rentabilité du procédé de séchage, poussent les transformateurs à voir évoluer leur technologie de séchage. Par exemple, sur la filière mangue séchée en Afrique de l'Ouest (Burkina Faso et Mali), ces derniers sont soutenus par des bailleurs internationaux (Banque Mondiale) afin de pouvoir disposer, au terme d'une actuelle phase de validation, de technologies de séchoirs ventilés fabriqués en Afrique du Sud.

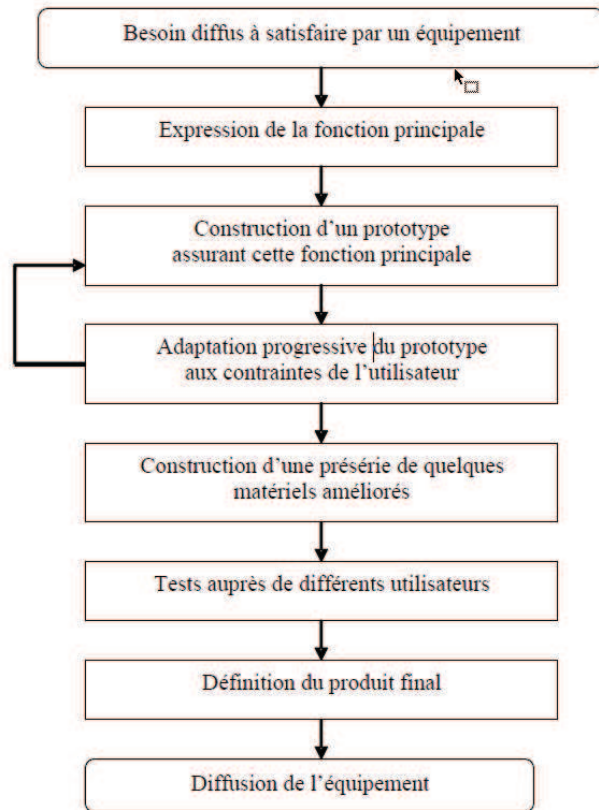
1.1.4. Conception et fabrication locales d'équipements en Afrique subsaharienne

Les concepteurs en Pays du Sud, ne maîtrisent et n'utilisent que rarement les outils méthodologiques développés en pays industrialisés. Dans un contexte socio-économique particulier, où le triangle "coût-délai-qualité" n'a pas de sens, où l'accès à la connaissance est difficile, ces outils ne répondent que très partiellement aux besoins de la majorité des concepteurs des pays d'Afrique de l'Ouest (Marouzé et Giroux, 2004).

Les rares équipes de conception qui ont pu avoir connaissance et/ou accès aux outils méthodologiques sont celles d'organismes nationaux de Recherche, souvent en collaboration menée avec des partenaires des Pays du Nord. Ces équipes pluridisciplinaires (génie industriel, génie des procédés, sciences des aliments, socio-économie) bénéficient plus facilement d'accès à l'information (disponibilité d'internet, centre de documentation). Toutefois, Bationo (2007) relève que la trajectoire de conception reste très linéaire et cloisonnée, où les socio-économistes identifient le besoin, les mécaniciens le traduisent et réalisent un prototype et les technologues appliquent en situation réelle auprès des

utilisateurs finaux. Cette approche affiche ses carences car le besoin est souvent mal perçu et/ou mal transmis au concepteur.

Aussi, et d'une façon générale, la conception d'équipements en Pays du Sud reste encore



très marquée par la méthode de type « essai-erreur » (Giroux et al., 1999), démarche de conception traditionnelle, longue et coûteuse pour des pays limités dans leur ressource (Figure 10).

Medah (2011) soutient que ces équipes de conception ont du mal à fonctionner, les différents acteurs (chercheurs, équipementiers, utilisateurs finaux) s'isolant du fait d'une méfiance réciproque et de revendications de la paternité des idées, ce qui les conduit à des équipements peu diffusés

Fig. 10. Démarche de conception traditionnelle de type « essai-erreur » selon Giroux et al. (1999).

Les équipementiers contribuent, eux-aussi à leur niveau, à la conception, réalisation et diffusion d'équipements de production agricole et de transformation. En s'appuyant sur les études de Bationo (2007) et de Rivier (Rivier, 2010) se dégage la classification suivante :

- Les fabricants industriels : ces derniers, publics ou privés, sont apparus dans les années 1980 souvent financées par la coopération internationale afin de construire et de diffuser à large échelle (jusqu'à 1000 unités par an) du matériel agricole de traction animale et d'hydraulique villageoise. Ces structures emploient des ingénieurs et techniciens dont l'activité principale tourne autour de la reproduction de matériels déjà vulgarisés. Les outils de production sont constitués de machines-outils (tour, fraiseuse, perceuse sur colonne) pour la fabrication des pièces mécaniques et de matériels de chaudronnerie (cisaille, plieuse, rouleuse), outils de production conventionnels généralement de « seconde main », importés d'Europe. Du petit matériel électroportatif (poste à souder, meuleuse, perceuse) complète ces outils de production.

Les évolutions économiques nationales et internationales, et les importations de matériels chinois sur le continent africain ont contribué à la réduction du nombre de ces fabricants industriels qui ont souvent diversifiés leur activité vers d'autres types de fabrication telles que la construction de menuiseries métalliques, de grosses pièces de chaudronnerie, ... Ces fabricants sont en capacité de produire d'autres équipements (moulin, décortiqueur) pour des projets spécifiques de développement ou pour des ONG. Évoluant dans le secteur formel, ces structures sont en capacité d'avoir accès à du matériel importé (moteurs, roulements, ...).

- Les fabricants pré-industriels sont souvent issus du secteur artisanal et évolue dans le secteur formel. Ce type de structure est de type familial, dirigée par un technicien ou un ingénieur mécanicien. Beaucoup moins importants que les fabricants industriels, en termes d'infrastructures et de nombre d'employés permanents, les fabricants pré-industriels produisent néanmoins les mêmes équipements (Figure 11) avec la même gamme d'outils de production.



Fig. 11. Gamme d'équipements fabriqués (a) et mode de fabrication (b) chez un fabricant pré-industriel de Douala au Cameroun (© M. Rivier, Cirad).

- Les soudeurs ou artisans métalliers travaillent essentiellement en milieu urbain, seuls ou avec quelques apprentis. La fabrication d'éléments de petite chaudronnerie et de métallerie (portes et fenêtres) constituent le « courant » de l'activité de ces artisans. Le cas échéant, pour la construction de matériels de petite mécanisation (agricole ou transformation) à l'unité ou en petites séries (Figure 12a), ils s'appuient sur des confrères (fabricants pré-industriels) pour l'usinage des pièces mécaniques. Les outils de production se composent d'outillage électroportatif voire manuel (marteau, burin) (Figure 12b) avec le poste à souder comme élément central dans la fabrication.



Fig. 12. Fabrication d'une râpe à manioc sur roue (a) et de sa tôle de râpage (b) chez un artisan de Bamenda au Cameroun (© M. Rivier, Cirad).

- **Les forgerons** : ces derniers pratiquent des activités très proches de celles des artisans métalliers, dans les mêmes conditions (infrastructure et outils) mais en milieu rural. Aussi, ils s'orientent plus sur la réalisation-copie-réparation du petit matériel des paysans (charrues) et maîtrisent parfois la fonderie artisanale pour certaines pièces.

Les soudeurs et les forgerons évoluent, pour la plupart, dans le secteur informel. Leur site d'activités peut être très sommaire (Figure 13). Ils s'approvisionnent autant que possible, pour des raisons de coût, sur les marchés locaux pour les pièces nobles (moteurs, paliers, disjoncteurs) ou pour des éléments de



tôlerie-chaudronnerie spécifiques (éléments en acier dur, tôles perforées, ...), toujours de « seconde main » ou de récupération (lame d'amortisseur de camion, dents d'engins de chantier, ...).

Fig. 13. Site de production d'un artisan de Bafoussam au Cameroun (© M. Rivier, Cirad).

Des éléments en bois peuvent constituer une partie des équipements (particulièrement les séchoirs). Aussi, les équipementiers sont équipés de machines à bois, fixes ou portatives, (fabricants industriels ou pré-industriels) ou s'appuient (tous types d'équipementiers) sur de la sous-traitance auprès de menuisiers. Il est à noter que bien peu d'équipementiers, quel que soit leur classification, ne maîtrise la technique de soudure en inox en Afrique de l'Ouest (particulièrement continentale) et du Centre.

Aussi, dans les faits, la conception d'équipement est essentiellement conduite par des acteurs « mécaniciens ». Ces derniers, souvent isolés, ne mettent pas en œuvre de techniques de créativité et d'outils de génie industriel, leur objectif premier étant de minimiser le futur coût d'acquisition de l'équipement. Ces derniers cherchent à mécaniser des gestes d'opérateurs, à les adapter au traitement des produits locaux mais sans aucune connaissance de la matière biologique à traiter et à obtenir, des normes de qualité et des principes de mise en œuvre d'opérations unitaires.

Certains équipements ou lignes de transformation agroalimentaires, conçues par des équipes du Nord, fabriquées ou importées sur le continent africain souffrent également de critiques. Les caractéristiques de l'aliment sont alors bien maîtrisées tout au long du procédé mais c'est dans ce cas la non prise en compte de critères socio-économiques et culturels locaux qui conduit à de nombreux échecs dans l'appropriation et la diffusion des équipements.

Aussi, la conception et la diffusion d'équipements de transformation agroalimentaire, plus encore dans le contexte des pays africains, peut difficilement se passer d'un processus de recherche-action multi-acteurs associant des équipes de Recherche en sciences techniques et sociales, des équipementiers, des transformateurs et des consommateurs.

1.1.5. Procédé couplant une unité de conversion biomasse énergie à un séchoir de produits céréaliers en Afrique de l'Ouest

1.1.5.1. Justification du développement du procédé

En Afrique de l'Ouest, malgré tous les problèmes évoqués précédemment, les entrepreneurs arrivent globalement à mettre en œuvre les nombreuses opérations unitaires agroalimentaires dans leurs unités de transformation. Les diagnostics réalisés sur différentes filières démontrent que de nombreuses tâches restent encore manuelles, le savoir-faire des opératrices permettant de pallier l'absence d'équipements de transformation. Pour certaines opérations, des équipements peuvent être proposés mais leur inefficience est souvent relevée.

Le séchage est présent dans presque tous les diagrammes de transformation de produits transformés au Sud. Cette opération constitue un verrou pour les entreprises face à la disponibilité des équipements, à leur efficacité énergétique, à la qualité des produits finis et globalement face aux aspects économiques (rentabilité des filières de transformation).

Les groupements de producteurs de mangue séchée du Burkina Faso ont vu leur volume à l'exportation divisé par trois entre les années 2007 et 2009, ceci pour le consommateur européen en raison de la qualité et du prix (Arnoldus et al., 2011).

Les unités de séchage de mangue au Mali et au Burkina sont toutes équipées de séchoirs Atesta, à combustion directe de gaz. L'activité est pratiquée en saison des pluies où le séchage solaire ne peut être envisagé.

Par ailleurs, la production de produits céréaliers, commercialisés sous forme couscous, à partir de céréales locales d'Afrique de l'Ouest (maïs, mil, sorgho, fonio) est en forte expansion. Le séchage reste pratiqué sur claies en séchage à l'air libre. Aussi, il a été noté une rupture de fabrication dans les PME au cours de la saison des pluies, et régulièrement tout au long de l'année des pertes de production importantes (fermentation de produit).

Des activités de Recherche menées en Afrique de l'Ouest par des équipementiers, des associations de transformateurs, des exportateurs (pour la mangue) et un centre de recherche ont abouti à la mise au point de deux technologies de séchoir à claies : le CSec-L (Rivier et al., 2009) pour des produits de faible épaisseur et grande surface d'échange (tranche de fruits, filet de poisson) et le CSec-T (Dramé et al., 2011; Méot et al., 2007) pour des produits solides de type granuleux comme les grains transformés (fonio précuit, sorgho germé...) ou les produits agglomérés (couscous, bouillie, dégué, moni, araw, thiakry...).

La mise en œuvre d'une convection forcée grâce à un ventilateur est essentielle pour :

- accroître l'échange de chaleur entre l'air et le produit ; et par conséquent augmenter la vitesse de séchage donc réduire le temps de séchage et limiter fortement les risques de brunissement et/ou le développement microbien (moisissures et flores de fermentation)
- homogénéiser les caractéristiques de l'air de séchage (vitesse, température et humidité) en tous points du séchoir pour produire des lots homogènes en termes de teneur en eau,
- éventuellement créer un recyclage d'une partie du flux d'air, garantissant une baisse de la consommation d'énergie.

Ainsi, la convection forcée influe à la fois sur la qualité du produit fini et sur la consommation d'énergie, deux indicateurs déterminants de la rentabilité du procédé.

Les deux séchoirs CSec-L (Figure 14a) et CSec-T (Figure 14b) sont conçus afin d'intégrer les contraintes économiques (matériaux, fabrication locale, ...) et ergonomiques (pas ou peu de permutation des claies de séchage, adapté à la typologie des unités existantes, ...). Ainsi, tous les matériaux peuvent être approvisionnés et assemblés localement : panneaux de

contreplaqué, grillage de claies type grillage de moustiquaire, ... un exemplaire de ventilateur a pu être réalisé localement. La capacité de production et en conséquence le nombre et la surface de claies ont été définis avec les transformateurs. Ainsi, le mode de fabrication, les dimensions et la capacité de chargement du séchoir CSec-L sont très proches de ceux du séchoir Atesta. De même, la capacité de chargement du séchoir CSec-T (nombre de colonnes et de claies de séchage) a été adaptée à la demande des transformateurs ouest-africains selon l'ergonomie de production de leur PME.



Fig. 14. Schéma d'un séchoir CSec-L (a) et d'un séchoir CSec-T (b) dans une entreprise du Burkina Faso (© T. Ferré, Cirad).

La fourniture énergétique de ces séchoirs est aujourd'hui assurée par la combustion de gaz pour les besoins thermiques (chauffage de l'air de séchage), représentant 90 % de l'énergie totale consommée, et l'électricité du réseau pour les ventilateurs assurant la convection forcée.

L'utilisation de biomasse locale pourrait constituer une alternative au gaz prometteuse et favoriser le développement de ces séchoirs.

Mais le transfert de l'énergie de combustion issue de cette biomasse doit se faire sans contact entre les fumées et l'air de séchage appliqué au produit alimentaire pour des raisons sanitaires (composés toxiques dans les fumées) et organoleptiques (odeur, couleur). Cette contrainte impose un organe interface à positionner entre le générateur thermique et le séchoir.

1.1.5.2. Les différents modules du procédé

a) Générateurs thermiques :

En fonction des applications, les besoins en énergie thermique sont différents, notamment en termes de température : i) basses températures (entre 20 et 70°C ; essentiellement pour le chauffage de bureaux, de serres agricoles), ii) moyennes températures (entre 70°C et 200°C pour des activités de séchage) et iii) hautes températures (supérieur à 200°C jusqu'à 1000°C pour des applications spécifiques en industrie chimique et agro-industrie).

Selon une étude de l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie (Ducros et al., 2010), le fluide caloporteur de la chaleur différencie deux types de générateurs thermiques : l'air pour les générateurs d'air chaud et l'eau dans les chaudières « classiques ».

Le générateur d'air chaud à partir de biomasse est constitué d'un foyer de combustion et d'une chambre de combustion, lieu de développement de la flamme, et en fonction des températures souhaitées, une chambre de dilution pour le refroidissement des gaz de combustion par apport d'air.

Les générateurs d'air chaud sont dits « directs » si l'air chaud est envoyé, avec ou sans dilution, directement dans le procédé et « indirects » pour les procédés nécessitant un air « propre », le transfert de l'énergie des fumées se faisant grâce à un échangeur.

En pays du Nord, les technologies de générateurs thermiques ont beaucoup évolué, se sont diversifiées (type de biomasse, puissance, gamme de prix) et peuvent atteindre des efficacités énergétiques remarquables (près de 90 %). En milieu industriel et pour de grosses puissances, on rencontre surtout des chaudières ; les générateurs d'air chaud se positionnant en chauffage domestique (poêle à bois ou à granulés).

En pays du Sud, certaines grosses industries agroalimentaires (sucrierie, huilerie) assurent leur autonomie énergétique grâce à des générateurs thermiques de haut niveau de puissance importés du Nord (300 kW à 30 MW, (Ducros et al., 2010)).

En PME de transformation agroalimentaire en Afrique, si quelques unités commencent à assurer leur fourniture énergétique à partir de biomasse, leur générateur thermique reste encore sous forme de foyers « ouverts » sans aucune maîtrise de la combustion (Figure 15). Ils sont caractérisés par une très mauvaise efficacité énergétique, une forte émission de particules nocives fines et des températures de fumées inférieures à 500°C.

Les technologies du Nord étant difficilement accessibles (coût, accès à l'information, circuits commerciaux), des Organisations Non Gouvernementales ou des associations essaient de promouvoir des générateurs plus efficaces que ceux disponibles localement. Ainsi, la

plateforme de transfert technologique « Planète Bois » (cf. <http://www.planetebois.org/>) a conçu et mis en situation réelle de fonctionnement un générateur d'air chaud (technologie CLIOp, Annexe 1) fabricable localement en Afrique de l'Ouest et de puissances adaptées à la demande des unités de transformation (de 10 à 100 kWth). La parfaite maîtrise de l'apport de l'air de combustion confère au générateur une très haute efficacité énergétique et un bon contrôle du débit des fumées permettant d'atteindre une température de 1000°C en régime permanent (800°C en entrée d'échangeur).

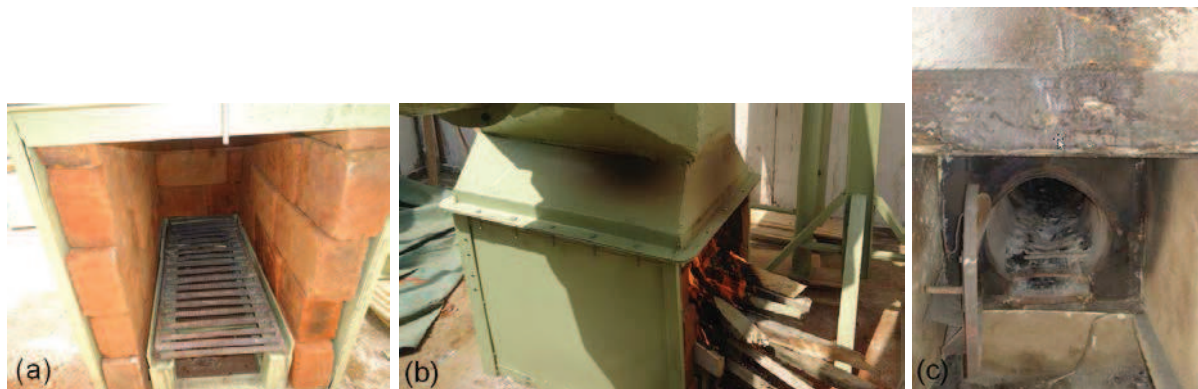


Fig. 15. Générateurs thermiques type « foyer ouvert » en fabrication (a) et sur site de production au Cameroun (b), (c) (© M. Rivier, Cirad).

b) Échangeurs de chaleur :

L'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute stratégie de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés (Bontemps et al., 1994).

L'échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer un flux de chaleur, d'un fluide chaud à un fluide froid, à travers une paroi (généralement métallique) sans contact direct entre les deux fluides. Généralement, l'objectif principal à atteindre pour le concepteur d'échangeur est l'efficacité énergétique, soit le rapport entre l'énergie apportée en entrée par le fluide chaud et l'énergie récupérée par le fluide froid. Le transfert résulte, le plus souvent, de la convection lors de la transmission fluide-paroi, et de la conduction dans l'épaisseur de la paroi. Le rayonnement n'intervient de manière sensible que s'il existe des gradients de températures très importants et est souvent négligé (Jannot et Moyne, 2016). Pour un générateur à air chaud indirect, l'échangeur permet de récupérer la chaleur contenue dans les fumées de combustion pour réchauffer un air « propre ».

Les échangeurs de chaleur sont classés selon la configuration d'écoulement des fluides et selon le type de conception.

Les différentes configurations d'écoulement sont :

- à courants parallèles (ou co-courants ou anti-méthodique) : les deux fluides sont disposés parallèlement et vont dans le même sens (Figure 16a).
- à contre-courants (ou méthodique) : les deux fluides sont disposés parallèlement et vont dans des sens opposés (Figure 16b).
- à courants croisés : les deux fluides sont positionnés perpendiculairement (Figure 16c).

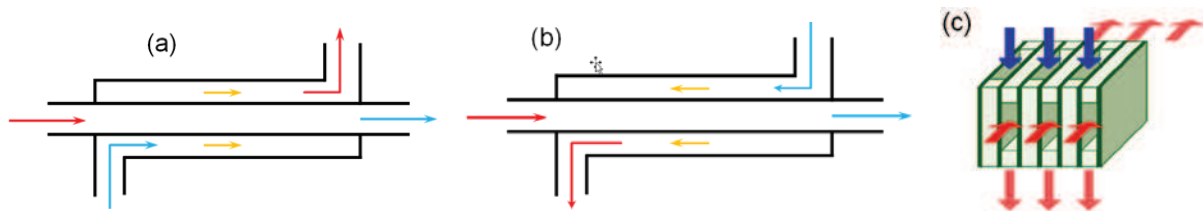


Fig. 16. Échangeurs de chaleur à courants parallèles (a), à contre-courants (b) et à courants croisés (c).

La configuration à contre-courants est l'une des plus favorables pour l'échange thermique, la surface d'échange nécessaire pour un même flux de chaleur sera plus faible qu'avec un échangeur à courants parallèles. Dans la pratique, les échangeurs à courants croisés sont souvent des échangeurs à plaques qui s'avèrent plus efficaces et moins coûteux (moins de matière utilisée à volume égal) que les échangeurs à contre-courants.

Les deux types de conception les plus courantes sont :

- les échangeurs tubulaires : de fabrication et de maintenance aisées et à faible coût, ils supportent des pressions et des températures élevées mais ils sont encombrants (la compacité, soit le rapport entre la surface d'échange et le volume occupé par cette surface d'échange, est faible typiquement de l'ordre de $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$).

On peut distinguer trois catégories, suivant le nombre de tubes et leur arrangement, caractéristiques toujours mises en œuvre pour avoir la meilleure efficacité possible lors d'une utilisation donnée : i) l'échangeur monotube, dans lequel le tube, généralement en forme de serpent, est placé à l'intérieur d'un réservoir ; ii) l'échangeur coaxial ; iii) l'échangeur multitubulaire qui se décline sous diverses formes (à tubes séparés, à tubes rapprochés, à tubes ailetés et/ou à tubes et calandre).

- les échangeurs à plaques : le transfert de chaleur entre les deux fluides se fait au travers d'un empilement de plaques métalliques séparées par un espace où circulent les fluides. Les plaques sont embouties afin de déformer leur surface initialement plane en un profil (ondulé,

à chevrons) plus favorable au transfert de chaleur. Elles peuvent être assemblées par serrage avec joints entre elles, par soudure ou par sertissage.

Les échangeurs à plaques sont appréciés pour leurs fortes compacités et efficacités, mais sont limités en cas de forte pression (ils génèrent eux-mêmes des pertes de charges importantes) ou de hautes températures de fluides (étanchéité entre plaques et durée de vie des joints).

En dehors du choix des matériaux (acier noir, acier inoxydable, aluminium, ...), le choix d'un échangeur doit aussi tenir compte d'autres paramètres : les propriétés physiques des fluides (risque de corrosion), les températures et pressions de service, l'encombrement, le coût de réalisation et la maintenance (périodicité, facilité et coût).

L'échangeur « tubulaire » se justifie, dans un contexte de fabrication locale en Afrique, pour sa construction plus « aisée » : les matériaux, même s'ils sont coûteux, sont disponibles sur place et les techniques de fabrication par chaudronnerie relativement maîtrisées. En ce qui concerne leur maintenance, les tubes de fumées peuvent être aisément nettoyables grâce à de simples outils de « ramonage » (hérissons, goupillons). Aussi, dans la suite de ce paragraphe, seuls les éléments liés à la conception d'échangeur de chaleur « tubulaire » seront développés.

Pour améliorer la compacité des échangeurs tubulaires, des tubes de petit diamètre sont utilisés ce qui les rend plus difficiles à fabriquer en chaudronnerie artisanal. En effet, chaque tube doit être assemblé à ses deux extrémités sur une plaque (généralement par soudage ou dudgeonnage). Améliorer la compacité dégrade ainsi la fabricabilité.

Selon la littérature, et pour un contexte de production au Nord, des concepts d'échangeurs de chaleur performants ont trouvé un développement réussi (Lestina et Serth, 2010). Dans le cas particulier d'échangeurs tubulaires, leur optimisation passe par une augmentation du coefficient de transfert thermique grâce à deux méthodes, « *active* » ou « *passive* », ou à leur combinaison (Bergles, 2000).

Les principes mis en œuvre pour la méthode active mobilisent une énergie « externe » comme un champ électrostatique ou une injection de fluide. Cela rend ces technologies complexes et aucune diffusion d'échangeur selon ce principe n'a pu être observée en pays du Sud.

Dans une revue bibliographique, Dewan et al. (2004) mettent en avant les intérêts des techniques passives. Ils présentent également différents modèles d'éléments mécaniques appelés « turbulateurs » qui, placés dans l'écoulement du fluide (fumées), assurent une amélioration des performances thermiques : modification de l'écoulement des fumées vers

un état « tourbillonnant » et rupture de la couche limite thermique en paroi intérieure des tubes (Durmuş et al., 2002; Guo et al., 2011). Certains de ces éléments (Figure 17) sont intéressants car ils peuvent être rapportés dans des installations existantes pour améliorer leur efficacité énergétique. Pour d'autres modèles (Figure 18), le montage de turbulateurs doit être prévu dès la fabrication de l'échangeur.

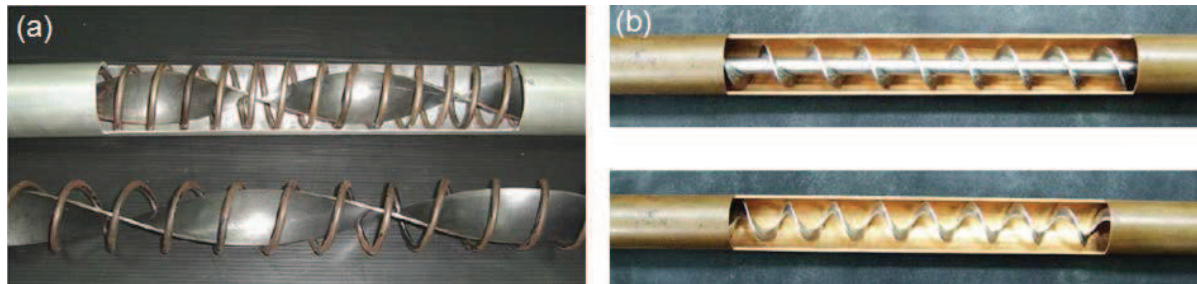


Fig. 17. Turbulateurs à insérer dans des tubes selon (Promvong, 2008) (a) et (Eiamsa-ard et Promvong, 2005) (b).

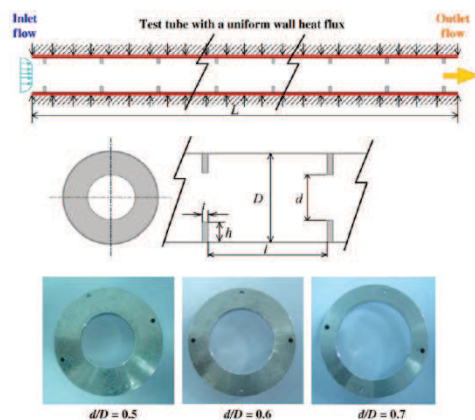


Fig. 18. Turbulateurs sous forme de bagues à souder à l'intérieur de tubes selon (Kongkaitpaiboon et al., 2010).

Les turbulateurs permettent ainsi de pallier la perte de compacité même avec de gros tubes en intensifiant les échanges thermiques dans les tubes. Leur montage dans un échangeur tubulaire permet d'accroître le transfert thermique (de 50 à 100 %, valeurs relevées dans la littérature). Par contre ils dégradent l'énergie cinétique ou mécanique (énergie de ventilation) contenue dans le fluide qui circule dans le tube. Aussi, ces pertes de charge peuvent nécessiter d'apporter un organe d'extraction du fluide (extracteur de fumée) sur l'installation. Améliorer le transfert thermique pour compenser une faible compacité dégrade de l'énergie de manière irréversible.

Un équilibre compensatoire entre ces deux contradictions doit être trouvé. Les solutions apportées dans la thèse doivent permettre de faire fonctionner un système échangeur tubulaire avec turbulateur à un coût de fonctionnement du système de ventilation nul (effet cheminée) tout en conservant une grande efficacité thermique et un faible encombrement.

Les modèles de transfert de chaleur et de perte de charge recensés dans la littérature (Shah et Bell, 2000; Suryanarayana, 2000) lient respectivement le nombre de Nusselt (Nu , nombre adimensionnel de caractérisation du transfert thermique) et le facteur de friction (f , nombre adimensionnel de caractérisation des pertes de charge) au nombre de Reynolds (Re , nombre adimensionnel de caractérisation de l'écoulement) selon Eqs. (1) et (2).

$$Nu = a \cdot Re^b \quad (1)$$

$$f = c \cdot Re^d \quad (2)$$

Les paramètres a , b , c et d dépendent des propriétés physiques des fluides et du dispositif de transfert thermique étudié : dimensions caractéristiques des tubes et, le cas échéant, des turbulateurs.

Lors du montage d'un turbulateur dans le tube échangeur, un indicateur global, le facteur de performance thermique η (Webb, 1981), agrège les valeurs du nombre de Nusselt et du facteur de friction, et selon Eq. (3), les indices « t » et « p » précisant respectivement la configuration du dispositif de transfert thermique, avec ou sans turbulateur :

$$\eta = \frac{\frac{Nu_t}{Nu_p}}{\left(\frac{f_t}{f_p}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

Dans les unités de transformation agroalimentaire d'Afrique, les échangeurs sont le plus souvent de conception « tubulaire » (Figures 19 et 20), non équipés de turbulateurs et positionnés directement sur le générateur d'air chaud (Figure 20). La circulation des fumées à l'intérieur des tubes et leur extraction après sortie de l'échangeur se font par convection naturelle (effet cheminée).

Face aux faibles efficacités thermiques de ces installations, également en raison du coût des matériaux et des énergies mobilisées, ces échangeurs tubulaires nécessiteraient d'être optimisés et le montage de turbulateurs y contribuerait. Toutefois, la plupart des turbulateurs relevés dans la littérature ne se prêtent pas à une fabrication locale et/ou leur montage dans des tubes peut s'avérer fastidieux. Ainsi, leur géométrie doit tenir compte des outils (marteau-burin, cisaille à main, meule) et techniques de fabrication (pliage manuel) disponibles localement, étant entendu que toute imprécision dans leur mise en œuvre induirait des « dispersions » susceptibles d'impacter les performances de l'échangeur thermique.



Fig. 19. Échangeurs tubulaires dans une veine de séchoir de mangue au Cameroun **(a)** et en construction au Nigéria **(b)** (© M. Rivier, Cirad (a) et A. Graffham, NRI (b)).

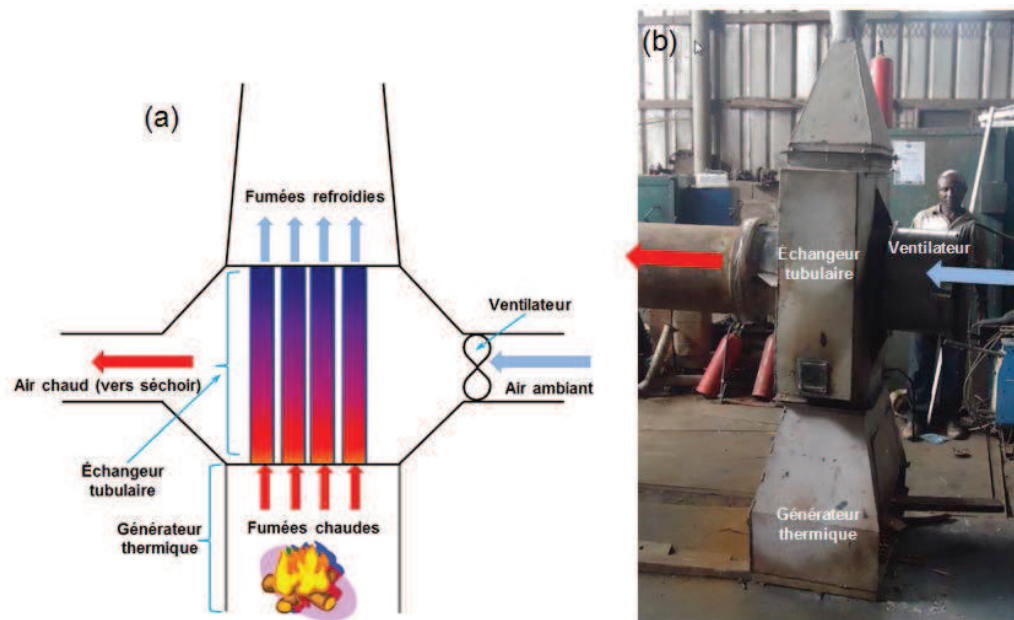


Fig. 20. Schéma de principe **(a)** et photo **(b)** d'un échangeur tubulaire couplé à un générateur thermique, en construction dans un atelier de Douala (Cameroun), pour le séchage de cossettes de manioc (© M. Rivier, Cirad).

c) Séchoir de produit alimentaire :

Le séchoir CSec-T a été présenté au paragraphe 1.1.5.1. Dans la configuration qui a été validée avec des transformateurs ouest-africains (trois colonnes et 4 niveaux de claies empilées, Figure 21), selon Dramé et al. (2011) il présente deux avantages principaux pour le séchage de produits granuleux : une bonne capacité de séchage (200 à 300 kg de fonio précuit à passer d'une teneur en eau de 35 %BH à 10 %BH en 10 heures) et une consommation en gaz inférieure à celle d'autres séchoirs à gaz (Atesta).

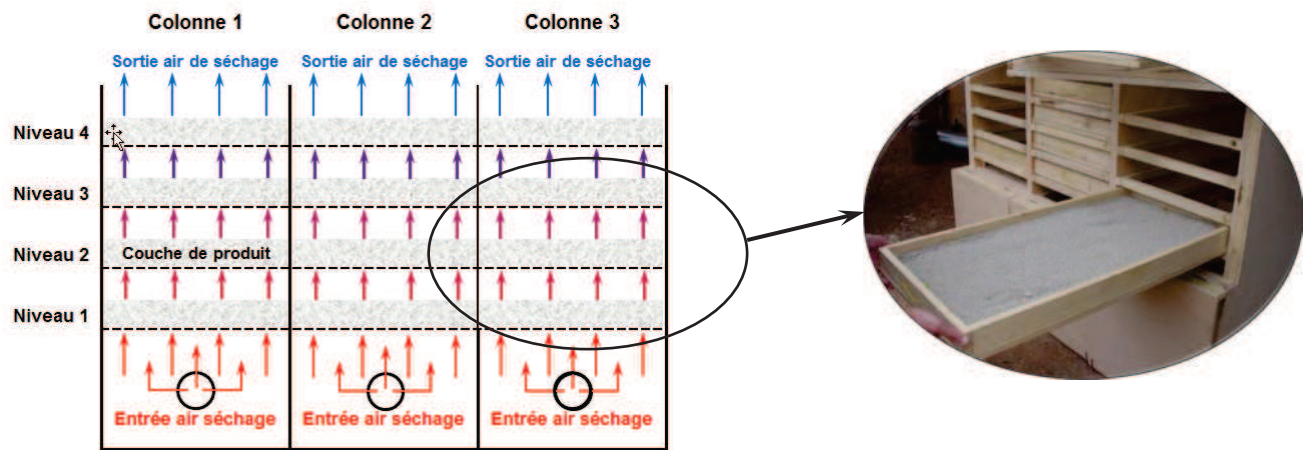


Fig. 21. Représentation schématique du séchoir CSec-T

Le séchoir est conçu sur le principe des séchoirs de type « flat bed » à convection forcée couramment utilisés en séchage de céréales brutes. Le produit est disposé en couches de quelques centimètres d'épaisseur sur chacune des claies empilées et le flux d'air chaud circule de bas en haut. Lorsque le produit de la claie inférieure est sec, celle-ci est retirée, puis les claies supérieures sont descendues d'un niveau ; une nouvelle claie supérieure est alors rechargée en produit humide. Le principe du séchoir et son ergonomie d'utilisation font, qu'en régime permanent, l'air est amené à saturation ou proche de la saturation en sortie de la quatrième claie. Ainsi, des efficacités énergétiques (rapport entre l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau du produit et l'énergie fournie) de plus de 60 % et jusqu'à 80 % ont pu être mesurées sur des cycles de séchage de produits granuleux en milieu réel. Ces valeurs correspondent à des consommations énergétiques massiques (Bimbenet et Bonazzi, 2003) de 2800 à 3700 kJ / kg eau (quantité de chaleur à fournir pour sécher 1 kg d'eau), valeurs attribuées généralement à des séchoirs par entraînement efficaces. Par comparaison, sur ce type de produits, l'efficacité d'un séchoir Atesta est de l'ordre de 20 % (11 400 kJ / kg eau).

1.1.6. Conclusion

Cette première partie a permis de préciser le contexte spécifique lié au développement d'unités de transformation agroalimentaire en Afrique subsaharienne, plus précisément d'unités de séchage. La disponibilité d'équipements adaptés, l'accès à une énergie sûre et diversifiée et la mise sur le marché de produits alimentaires de qualité à un prix compétitif demeurent les principales contraintes rencontrées par les transformateurs. Ainsi, la conception d'un procédé de transfert thermique et de séchage pour une application en Afrique de l'Ouest doit satisfaire des objectifs spécifiques, multiples et aussi variés que la qualité du produit transformé, l'efficacité énergétique du procédé, les performances de

production mais aussi la prise en compte des capacités locales de construction, de maintenance et d'utilisation des équipements ainsi que les habitudes des transformateurs et des consommateurs. Mais le nombre et la diversité des variables de conception et de performance du procédé en font un problème complexe à traiter dans un cadre méthodologique où l'analyse multicritère, la formalisation des préférences et l'aide à la décision dans le choix de solutions de conception doivent accompagner le concepteur.

1.2. Conception, Outils d'aide à la décision et Optimisation de procédés

Dans le secteur de la transformation agroalimentaire, les approches de conception de procédés classiquement adoptées se limitent généralement à la modélisation d'opérations unitaires (Banga et al., 2003; Trystram, 2012) ou la recherche de conditions opératoires performantes (García-Moreno et al., 2014; Gergely et al., 2003; Lespinard et al., 2015) en prenant en compte peu de critères et sans stratégie d'optimisation globale. Figueira et al. (2005) recensent, en analyse décisionnelle multicritères, de nombreux outils et méthodes ainsi que des applications dans les secteurs de la finance, des télécommunications ou de l'énergie. Mais dans la littérature, peu d'articles présentent une démarche dans le domaine de la conception de procédés, en particulier pour l'agroalimentaire.

1.2.1. Généralités sur les théories et méthodologies de conception

Le domaine des théories et méthodologies de la conception (*Design Theory and Methodology, DTM*) constitue un vaste champ d'études issues de travaux et d'expériences en processus de conception.

Les théories de la conception ont pour objet la description formelle et, si possible, universelle de l'activité de conception et des logiques de raisonnement intrinsèques des concepteurs.

Les méthodologies de conception, elles, proposent des procédures concrètes pour mener à bien l'activité de conception. Elles décrivent la progression de l'activité de conception selon une succession d'étapes.

Le tableau 3 inspiré de Tomiyama (1997, 2006) regroupe les travaux des vingt dernières années, conduits en théorie de la conception d'une part et en méthodologie de la conception d'autre part selon leur champ « d'applicabilité ».

Tableau 3

Classification des DTM proposée par Tomiyama (1997 ; 2006) et adaptée (mise à jour des références bibliographiques).

	Générale	Spécifique
Abstraite	<u><i>Théories de conception</i></u> Abstract Design Theory (ADT) (Kakuda et Kikuchi, 2001), General Design Theory (GDT) (Reich, 1995; Yoshikawa, 1989), Universal Design Theory (UDT) (Grabowski, 1998), Coupled Design Process (Braha et Reich, 2003), Infused Design (Shai et Reich, 2004), C-K theory (Hatchuel et Weil, 2009)	<u><i>Méthodes mathématiques</i></u> Axiomatic Design, Optimization, Taguchi method (Taguchi et al., 2005), Computer programs
Concrète	<u><i>Méthodologies de conception</i></u> Adaptable Design (Gu et al., 2004), Characteristics-Properties Modelling (CPM) (Weber, 2007), Contact et Channel Model (C&CM) (Albers et al., 2003), Design Structure Matrix (DSM) (Eppinger et Browning, 2012), Emergent Synthesis (Ueda et al., 2008; Ueda et al., 2001), (Ernst Eder, 2011), Integrated Product Development (Andreasen et Hein, 2000), (Pahl et Beitz, 1996; Pahl et al., 2007), TRIZ (Ilevbare et al., 2013; Savransky, 2000), Ullman (Ullman et al., 1988), Ulrich (Ulrich, 2003), Dynamic Product Development (Ottosson, 2004) <u><i>Méthodologies pour atteindre un but concret</i></u> Axiomatic Design (AD) (Kulak et al., 2010; Suh, 1997), Design for X (Huang, 1996), Design Decision-Making Methods (Lewis et al., 2006), Failure mode and Effects Analysis (FMEA) (McDermott et al., 1996), Quality Function Deployment (QFD) (Chan et Wu, 2002), Total Design (Pugh, 1991) <u><i>Méthodologies dédiées à la production</i></u> Concurrent Engineering (Sapuan et Mansor, 2014)	

1.2.2. Approche « systématique » pour la conception d'équipements

Parmi les méthodologies de conception dite « concrète », Pahl et al. (1996, 2007) proposent un processus de conception linéaire (Figure 22) : l'« *approche « systématique »* de la conception avec une succession de grandes phases dans le processus de conception d'un produit, ceci dans des domaines très variés (matériel, logiciel, processus, service).

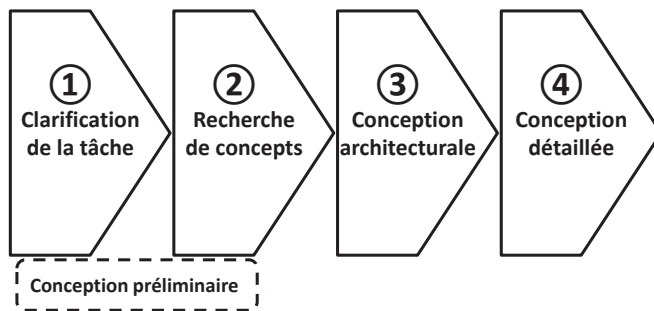


Fig. 22. Représentation de l'approche systématique de conception selon Pahl et al. (1996, 2007).

Cette approche semble aujourd'hui être adoptée et utilisée internationalement. Selon Dupé (2011), la structuration varie en fonction de certains auteurs (Tableau 4).

Tableau 4

Présentation de l'approche systématique de conception selon différents auteurs (Dupé, 2011).

Pahl et Beitz	Priest	Pugh	Ullman	Ulrich et Eppinger
1. Clarification de la tâche	1. Définition du besoin	1. Marketing	1. Définition des spécifications	1. Besoin du client
2. Recherche de concepts	2. Recherche de concepts	2. Spécifications	2. Recherche de concepts	2. Spécifications du produit
3. Conception architecturale	3. Conception détaillée	3. Recherche de concepts	3. Conception du produit	3. Génération de concepts
4. Conception détaillée	4. Évaluation et tests	4. Fabrication	4. Fabrication	4. Sélection de concepts
	5. Fabrication et support	5. Vente	5. Service	5. Architecture du produit
			6. Recyclage du produit	6. Conception industrielle
				7. Prototype

Cependant, le processus de conception s'articule toujours autour des phases suivantes de « *définition du besoin* », d'« *analyse conceptuelle et de créativité* », de « *conception architecturale* », de « *conception détaillée* » et de « *fabrication* ».

Le découpage en quatre phases (Figure 22) est explicité ci-dessous. Les termes employés dans la suite de ce document seront adaptés à la conception d'équipement (ou de procédé) de transformation comme produit.

La phase 1 d'« Expression du besoin » (ou de définition du besoin ou d'analyse fonctionnelle) consiste à exprimer les attentes vis-à-vis de l'équipement à concevoir, de définir et de caractériser ses actions sur son environnement : les fonctions de service attendues de l'équipement, et les fonctions contraintes imposées par des éléments de l'environnement à l'équipement. Pour cela, l'Analyse Fonctionnelle du besoin est une démarche normalisée (AFNOR, 1991) adaptée, qui s'applique à « *rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions de l'équipement attendues par l'utilisateur* ». L'ensemble des informations sont spécifiées dans un document appelé cahier des charges fonctionnel.

La phase 2 de « Recherche de concepts » (ou de créativité) est une phase de recherche, d'analyse et sélection de principes aptes à remplir une ou des fonctions attendues de l'équipement. Elle peut s'appuyer sur l'utilisation de bases de données scientifiques et techniques pour aider le concepteur dans sa recherche de solutions, ou sur une approche de type TRIZ (Ilevbare et al., 2013; Savransky, 2000), qui conduit à considérer des solutions génériques et des outils éprouvés dans différents domaines d'activité.

La phase 3 de « Conception architecturale ». Les principes sont traduits et assemblés pour former la structure du futur équipement. C'est au cours de cette phase que les dimensions du système et des matériaux sont précisées et les composants choisis. Ainsi, dans la continuité des deux premières phases et particulièrement pour satisfaire les exigences du cahier des charges fonctionnel, la conception architecturale amène, au final, à fournir une ou des solutions de conception. La conception architecturale est considérée comme la phase qui joue le rôle le plus important dans l'élaboration du coût de développement de l'équipement mais aussi jusqu'à 70% des coûts lié au cycle de vie du produit (Berlineer et Brimson, 1988).

La phase 4 de « Conception détaillée » au cours de laquelle les plans et les spécifications détaillés seront produits et le cycle de fabrication et de contrôle de l'équipement mis en place.

1.2.3. Analyse multicritère et aide à la décision en conception d'équipements

Dans le cas d'un problème de conception monocritère, la question d'aide au choix ne se pose pas. En effet, l'équipement à concevoir devra remplir, selon les termes de l'Analyse Fonctionnelle, une fonction unique associée à un critère d'appréciation unique. Ainsi, l'analyse d'un seul critère produit par deux ou plusieurs solutions de conception amène à proposer une solution qui tend à maximiser (ou minimiser) la valeur (le niveau) du critère (Figure 23).

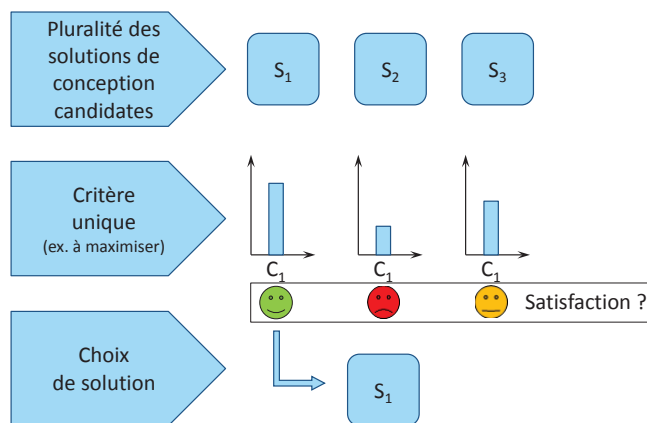


Fig. 23. Représentation d'un problème de conception monocritère.

Mais, dans la très grande majorité des cas de conception, le concepteur traite des problèmes multicritères car, pour une solution de conception d'équipement recherchée, les fonctions attendues de l'équipement sont généralement multiples et chacune d'elles peut être évaluée selon plusieurs critères. Ces derniers peuvent être contradictoires ce qui amène à la question du choix pour l'une ou l'autre des solutions de conception (Figure 24).

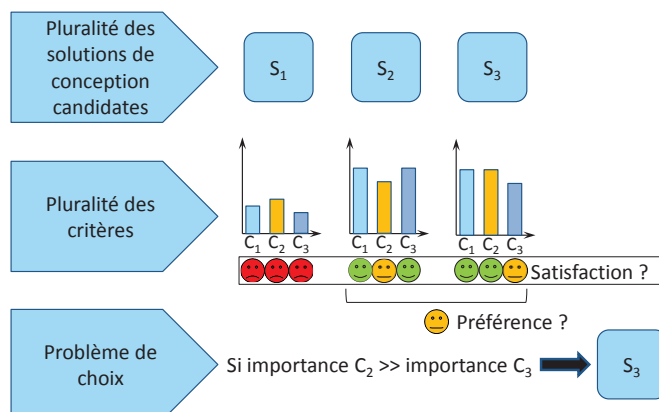


Fig. 24. Représentation d'un problème de conception multicritère.

Dans ce contexte, des outils ont été développés pour aider le concepteur dans ses prises de décision et garantir les meilleurs choix parmi les solutions de conception.

Ainsi Finger et Dixon (1989 b) soulignent l'importance de développer des outils d'analyse spécifiques dès les phases préliminaires de conception. Dans leurs travaux, Tomiyama et al. (2009) abordent ce qu'ils nomment la « *Prise de décision en conception* ». Les méthodes d'aide à la décision préconisées mettent en avant une démarche linéaire selon la figure 25.

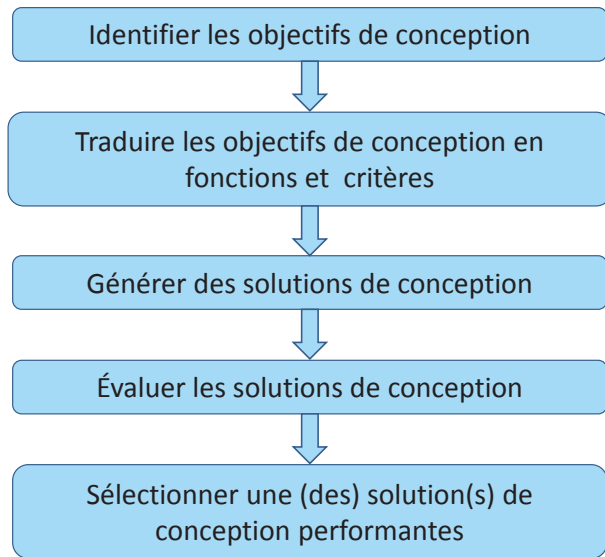


Fig. 25. Démarche de prise de décision en conception de produit.

Dans la suite de ce paragraphe, nous revenons sur les différentes étapes de cette démarche, afin de les détailler et d'introduire le vocabulaire qui sera utilisé dans la suite du document.

1.2.3.1. Objectifs de conception, fonctions et critères associés

En conception d'équipement et/ou de procédé de transformation, un objectif de conception est associé à une qualité attendue du procédé et/ou de l'équipement à dimensionner, soit par exemple : être durable d'un point de vue environnemental, être robuste vis-à-vis de la fabrication locale, répondre à des normes de qualité alimentaire en vue d'une exportation des produits, ... L'agrégation de l'ensemble des objectifs de conception forme un objectif global. Atteindre un niveau de satisfaction élevé pour cet objectif global est donc lié au niveau de satisfaction que pourra atteindre chacun des objectifs de conception.

Une démarche comme l'Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFNOR, 1991) peut guider le concepteur. Chacun des objectifs de conception peut se décliner en une ou plusieurs

fonctions attendues du procédé. Sont différenciées deux types de fonction. Les fonctions de type « de service » (fonctions principales à atteindre) ou « contrainte » (imposées comme contrainte par l'environnement du procédé). Chaque fonction est formulée par un « verbe d'action » (sécher le produit, séparer les sous-produits, utiliser les énergies disponibles, ...). Selon cette démarche, à chacune des fonctions sont associés des critères d'appréciation eux-mêmes qualifiés par des niveaux. À titre d'illustration de cette démarche, le tableau 5 présente une telle analyse du besoin pour le procédé objet de ce travail de thèse.

Tableau 5

Exemple de caractérisation de fonctions selon l'Analyse Fonctionnelle.

	Fonction	Critère d'appréciation	Niveau (seuil)
Procédé de couplage d'une unité de conversion biomasse-énergie à un séchoir de produits céréaliers granulés	Sécher le produit alimentaire	• Débit de séchage • Non brunissement du produit sec	• 20 kg pdt sec / h • Indices LAB
	Être fabricable en Afrique de l'Ouest	• Disponibilité matériaux • Savoir-faire local	
	Être adapté aux énergies disponibles localement	• Disponibilité alimentation électrique • Biomasse disponible	• Ampérage 6A maxi • PCI = 14000 kJ/kg • 1800 kg / jour dispo
		•	•

Ces critères indiquent les performances du comportement du procédé. Certains d'entre eux peuvent apparaître comme contradictoires et il va falloir, dans ce cas, tenter de les satisfaire simultanément par la recherche de solutions de conception présentant le meilleur compromis possible. Dans la littérature, ils prennent le nom de « *critères* » (Jones et al., 2002), « *attributs* » (Scott, 1998), « *critères de performance* » (Sebastian et al., 2010) (terme plus généralement employé en Génie des Procédés) ou « *variables d'observation* » (Collignan, 2011) notées « *Y* ». Leurs unités de mesure et leurs niveaux de valeur peuvent être aussi différents que les objectifs peuvent être divers et contradictoires. Tous ces termes sont proches pour ce qu'ils veulent désigner, mais n'intègrent pas tous le même nombre d'informations. Ainsi, par analogie avec la démarche de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin, le critère d'appréciation serait la variable à observer (un débit, un coût) selon Collignan (2011). En relation avec un objectif global de performance, le critère de performance selon Sébastien (2010) est l'agrégation d'une variable observée, d'une fonction mathématique appliqué à cette variable (>, <, =) et d'un seuil (le niveau exprimé en analyse fonctionnelle du besoin).

1.2.3.2. Solutions de conception

La configuration du procédé, qui correspond à une « *solution de conception* », est défini par un ensemble de « *variables de conception* », qui sont des « variables de dimensionnement géométrique » (type de matériaux, dimensions, formes) ou des « variables de pilotage » (température, durée, pression, ...). Ces variables impactent le dimensionnement et le comportement du procédé dans son environnement spécifique de fabrication puis d'utilisation.

Avec la recherche de solutions de conception performantes, chaque variable de conception (notée « *X* ») peut évoluer au sein d'un « *domaine de variation* », un intervalle ou une séquence de valeurs. L'ensemble des variables de conception et leurs domaines de variation définissent ainsi l'« *espace de recherche* » de solutions de conception dites « *solutions candidates* » (Sebastian et al., 2010).

Le choix des variables de conception ainsi que leurs domaines de variation sont établis en s'appuyant sur l'expertise des concepteurs et des utilisateurs du procédé.

1.2.3.3. Évaluation des solutions de conception

Le concepteur se trouve face à un environnement multidimensionnel et complexe du fait : i) du très grand nombre de solutions de conception générées par la combinaison des valeurs des variables de conception, valeurs prises dans le domaine de variation discrétisé, ii) du nombre de variables d'observation évaluant la performance des solutions de conception et iii) des unités de mesure et des niveaux de valeur des variables d'observation.

Ainsi, la résolution d'un tel problème multicritère présente comme difficultés (Jones et al., 2002) de devoir satisfaire des objectifs différents et généralement contradictoires.

La résolution de problème de conception multicritère peut être appuyée, selon Saridakis et Dentsoras (2008) par deux types de raisonnement :

- à partir de cas (« *Case-Based Reasoning* »), où les solutions apportées sont issues de travaux antérieurs, de projets d'études présentant une certaine analogie et très souvent extraites de bases de données.
- à partir de modèles (« *Model-Based Reasoning* »).

Cette dernière approche de modélisation, proposée à l'interface des phases de recherche de concepts (phase 2 de l'approche systématique de la conception) et de conception architecturale (phase 3), présente plusieurs intérêts. Elle oblige à la description et la compréhension poussées du système étudié. De plus, elle pourra être couplée à une

démarche d'optimisation pour la recherche de solutions de conception du procédé performantes. Pour cela, une modélisation décomposée par opération unitaire peut être mise en œuvre. Dès lors, les variables de conception et d'observation définies préalablement, constituent respectivement les variables d'entrée et de sortie des modèles.

Les modèles des opérations unitaires sont assemblés (Figure 26) et forment le « *simulateur* » global du procédé.

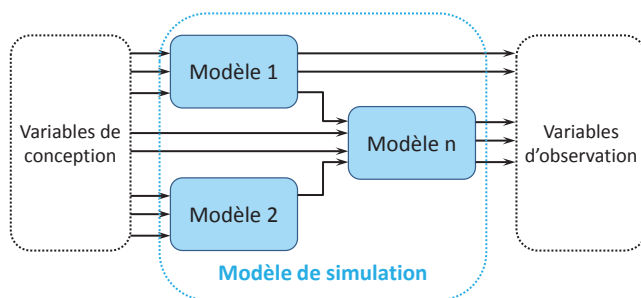


Fig. 26. Représentation schématique de la construction du simulateur du procédé selon la démarche « Model-Based Reasoning ».

Ce simulateur du procédé sera amené à être au cœur d'un processus d'optimisation. Aussi, les modèles qui le composent doivent être adaptés à cet objectif d'optimisation et pour cela, présenter certaines propriétés. En Génie Industriel, Vernat et al. (2010) proposent une grille d'analyse autour de quatre propriétés :

- Parcimonie, qui renvoie à une notion de simplicité et de facilité d'exécution du modèle.
- Exactitude, pour la distance entre les valeurs issues des modèles et les valeurs réelles qui pourraient être observées pour le procédé.
- Précision des valeurs issues des modèles.
- Généricité, pour l'aptitude du modèle à étendre son champ d'application à d'autres domaines

Vernat et al. précisent notamment que les modèles, construits dans un objectif d'optimisation, sont souvent simplifiés (réduction de modèle) car l'ensemble des informations véhiculées par des modèles plus sophistiqués n'est pas nécessairement pertinent pour répondre à cet objectif. La réduction de modèle requiert bien entendu une bonne expertise du procédé afin que la perte d'informations qu'elle induit n'ait pas de conséquence négative sur la phase d'optimisation. Ce compromis à trouver commence d'ailleurs à faire l'objet de travaux de recherche spécifiques (Romdhana et al., 2016).

1.2.3.4. Sélection et classement de solutions de conception

Lors de la résolution d'un problème multicritère, et après leur évaluation, les solutions de conception peuvent être représentées dans l'espace des variables d'observation. Comme exemple, la figure 27 représente graphiquement les solutions de conception S_i d'un problème multicritère selon les valeurs de deux variables d'observation V_{obs1} et V_{obs2} .

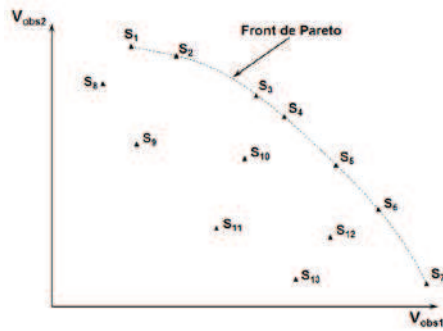


Fig. 27. Représentation 2D de solutions et d'un front de Pareto selon deux variables d'observation.

Si les valeurs des deux variables V_{obs1} et V_{obs2} sont à maximiser, un certain nombre de solutions (S_1 à S_7) sont dites dominantes si l'une de leurs deux valeurs de V_{obs1} ou V_{obs2} est strictement plus élevée que pour toute autre solution (Figure 27). Ces solutions dominantes, « *Pareto-optimales* » forme le « *front de Pareto* ». La capture et le « traitement » de ce front de Pareto font l'objet d'activités de recherche depuis de nombreuses années (Benki, 2014; Kim et De Weck, 2005). Les méthodes développées sont classées en « *Scalarization Methods* » ou « *Non Scalarization Methods* » (Ehrgott et Wiecek, 2005).

Dans tous les cas, la sélection et la « visualisation » des solutions de conception « *Pareto-optimales* » est intéressante pour identifier des solutions d'intérêt. Il n'en demeure pas moins, particulièrement pour des problèmes de conception multicritères au-delà de deux dimensions, que le concepteur doit être appuyé dans son choix pour décider d'une solution à privilégier parmi plusieurs solutions candidates possibles. Cette aide à la décision passe par la formalisation et la modélisation des préférences du concepteur au sein de l'espace des fonctions et critères du problème de conception. Selon Marler et Arora (2004), la plupart des approches pour la formulation des préférences des décideurs se classent en deux grandes familles de méthodes : « *a priori* » ou « *a posteriori* ». D'autres méthodes classés comme « *mixtes* » ou « *interactives* » sont également soulignées dans la bibliographie (Korhonen, 2005). Le tableau 6 recense quelques méthodes parmi les trois grandes familles citées ci-dessus.

Tableau 6

Méthodes de formulation des préférences.

Formulation des préférences	Méthodes
a priori	- Weighted Global Criterion method and its extensions (Miettinen, 1998; Wierzbicki, 1982) - Weighted Sum method (Athan et Papalambros, 1996; Kim et De Weck, 2006; Steuer, 1986) - Weighted Min-Max method (or Tchebycheff method) (Messac et al., 2000a; Messac et al., 2000b; Miettinen, 1998) - Exponential Weighted method (Athan et Papalambros, 1996) - Lexicographic method (Martinez-Legaz, 1988) - Goal Programming method (Charnes et Cooper, 1977; Tamiz et al., 1998) - Bounded objective method (ϵ-constraint approach) (Engau et Wiecek, 2007)
interactive	- Bi-reference Procedure (Michalowski et Szapiro, 1992) - Light Beam Search (Jaszkiewicz et Słowiński, 1999) - Visual Approach (Korhonen et Laakso, 1986) - Implicit Value Function (Steuer et Choo, 1983; Zionts et Wallenius, 1976)
a posteriori	- Physical Programming (Messac et Mattson, 2002) - Normal Boundary Intersection method (Benki, 2014; Das et Dennis, 1998) - Normal Constraint method (Benki, 2014; Messac et al., 2003)

Les méthodes basées sur une articulation « *a priori* » des préférences des décideurs / concepteurs nécessitent de leur part une très bonne connaissance du problème de conception dans son contexte, et l'aptitude des outils à la modélisation de ces préférences dès le début de la conception. Ainsi, ces préférences peuvent s'exprimer sous forme de compromis entre les objectifs ou de priorisation de certains critères (importance) avec la spécification de paramètres dans les modèles de préférence comme des coefficients (poids) ou des exposants. L'expression des préférences et leur traitement permet ainsi de pouvoir passer d'un problème multiobjectif à un objectif unique.

Les méthodes basées sur une articulation des préférences « *a posteriori* » sont utilisées lorsque le contexte est complexe, qu'il est difficile d'exprimer formellement les préférences. Dans ce cas, les méthodes sont associées à des algorithmes de génération de solutions Pareto-optimales et de techniques de visualisation. Le but est de proposer ces solutions au décideur pour qu'il puisse sélectionner la solution qu'il juge la plus satisfaisante. Cependant,

ces méthodes sont peu pertinentes pour des problèmes de conception à plus de trois critères.

Enfin, les méthodes « *mixtes* » ou « *interactives* » sont prévues pour que le concepteur puisse ajuster des solutions pertinentes en fonction de ses préférences, ceci, tout au long du processus d'optimisation.

Dans un environnement multidimensionnel et complexe, propre au développement de procédé de transformation, et dans la mesure où l'expertise de l'équipe de conception peut recenser, traduire, hiérarchiser les attentes et les préférences des demandeurs préalablement à la phase de conception, les méthodes basées sur une articulation « *a priori* » sont particulièrement adaptées.

1.2.4. De la formalisation des préférences à la résolution et l'optimisation de problèmes de conception multicritère

La résolution de problème de conception, amène à considérer des variables de performance dont le nombre peut être important (souvent au-delà de cinq variables). Ceci rend difficile la comparaison de solutions de conception et le choix de certaines d'entre elles.

De façon à préciser au mieux son espace de recherche, le concepteur doit formaliser des préférences. La formalisation des préférences constitue un moyen d'injecter de la connaissance (analyse fonctionnelle, expertise de l'équipe de conception, bases de données expertes, valeurs d'échange) en affectant les variables d'observation de niveaux de satisfaction appelées « *indices de satisfaction* » qui sont aussi des indicateurs de performance. Dans une stratégie d'aide à la décision (classement de solutions de conception candidates) ou d'optimisation, ces indices sont ensuite agrégés en un indicateur unique global.

1.2.4.1. Formalisation des préférences par fonctions de valeur

L'ensemble des variables d'observation permettent d'apprécier une solution de conception candidate et doivent être prises en compte simultanément dans le processus de décision. Comme leurs unités de mesure et leurs niveaux de valeur sont très différents, les préférences du concepteur sont formalisées à travers des fonctions de valeur sous une forme adimensionnelle et sur une même échelle afin qu'elles puissent être comparées.

Parmi les fonctions de valeur, on relèvera les « *fonctions d'appartenance* » (Wood et Antonsson, 1989), les « *fonctions d'utilité* » (Ullman et Spiegel, 2006) et les « *fonctions de*

désirabilité ». Ces dernières sont reconnues pour leur simplicité de paramétrage et d'utilisation et sont largement utilisées (Pasandideh et Niaki, 2006). Les plus fréquemment citées sont celles de Harrington (1965) et de Derringer (1980), introduites en ingénierie de la qualité.

En particulier, Raffray et al (2015) proposent la fonction de désirabilité sigmoïde selon (4) :

$$Z_k(Y_k) = \frac{1}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\tan((Z_k^+ - 0.5) \cdot \pi) \cdot \frac{Y_k - Y_k^m}{Y_k^+ - Y_k^m} \right) + 0.5 \quad (4)$$

avec

$$Y_k^m = \frac{Y_k^+ + Y_k^-}{2}$$

Cette fonction propose d'adimensionner la valeur d'une variable d'observation Y_k en un « *indice de satisfaction ou de désirabilité* » (ou « *variable d'interprétation* ») noté « Z_k », sur une échelle normalisée de valeurs comprises entre 0 et 1 ; 1 étant le niveau de satisfaction le plus élevé. Elle présente les avantages suivants, tel que présenté sur la figure 28. Elle peut être croissante (a) lorsqu'elle est appliquée à une variable d'observation Y_a à maximiser ou décroissante (b) pour une variable d'observation Y_b à minimiser. Elle est centrée, symétrique et strictement monotone. Par ailleurs, sa valeur proche de 0 ou de 1 converge suffisamment lentement pour pouvoir discriminer numériquement des niveaux de désirabilité sur un large domaine de valeurs de Y_k .

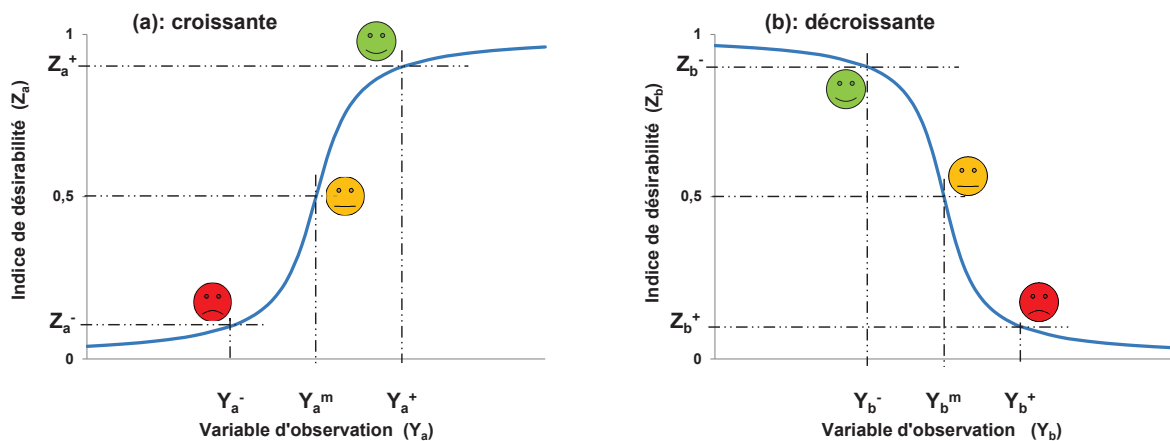


Fig. 28. Fonctions de désirabilité appliquées à deux variables d'observation à maximiser (a) ou à minimiser (b).

Ces fonctions sont paramétrées par deux « *valeurs seuils* », inférieure (Y_k^-) et supérieure (Y_k^+), qui traduisent la zone de valeurs et le niveau de satisfaction exprimés par les décideurs (concepteur, utilisateur final) et correspondent à des indices de satisfaction Z_k de 0,1 ou 0,9.

1.2.4.2. Agrégation des indices de satisfaction

L'agrégation de multiples indices de satisfaction, intégrant les préférences du concepteur, permet de transformer un problème de conception multiobjectif en un problème monoobjectif. Ainsi, une solution de conception candidate peut être directement évaluée selon un unique « *indicateur global noté OF* ». En 1998, Scott et Antonsson (1998) proposent huit méthodes d'agrégation de variables d'interprétation dont les plus fréquemment citées et/ou utilisées sont la « *somme pondérée* » (ou moyenne arithmétique pondérée, Eq. (5)), le « *produit pondéré* » (ou moyenne géométrique pondérée, Eq. (6)) ou encore l'« *agrégation par minimum* » selon Eq.(7).

$$\text{Moyenne arithmétique pondérée : } OF = \sum_{j=1}^{n_i} Z_j \cdot \frac{v_j}{\sum v_j} \quad (5)$$

$$\text{Moyenne géométrique pondérée : } OF = \prod_{j=1}^{n_i} Z_j^{v_j / \sum v_j} \quad (6)$$

$$\text{Minimum } OF = \min(Z_j) \quad (7)$$

Avec OF : valeur de la fonction objectif unique

n_i : nombre de variable d'observation

Z_j : valeur de l'indice de satisfaction de la $j^{\text{ème}}$ variable d'observation

v_j : poids attribué à la valeur de l'indice de satisfaction de la $j^{\text{ème}}$ variable d'observation

La méthode d'agrégation par moyenne géométrique pondérée (Eq. 6), a été proposée par Derringer (1980, 1994). Elle présente l'intérêt d'assurer une valeur nulle à l'indicateur global si l'un des indices de satisfaction est nul, ce qui n'est pas le cas pour la moyenne arithmétique pondérée (Eq. 5).

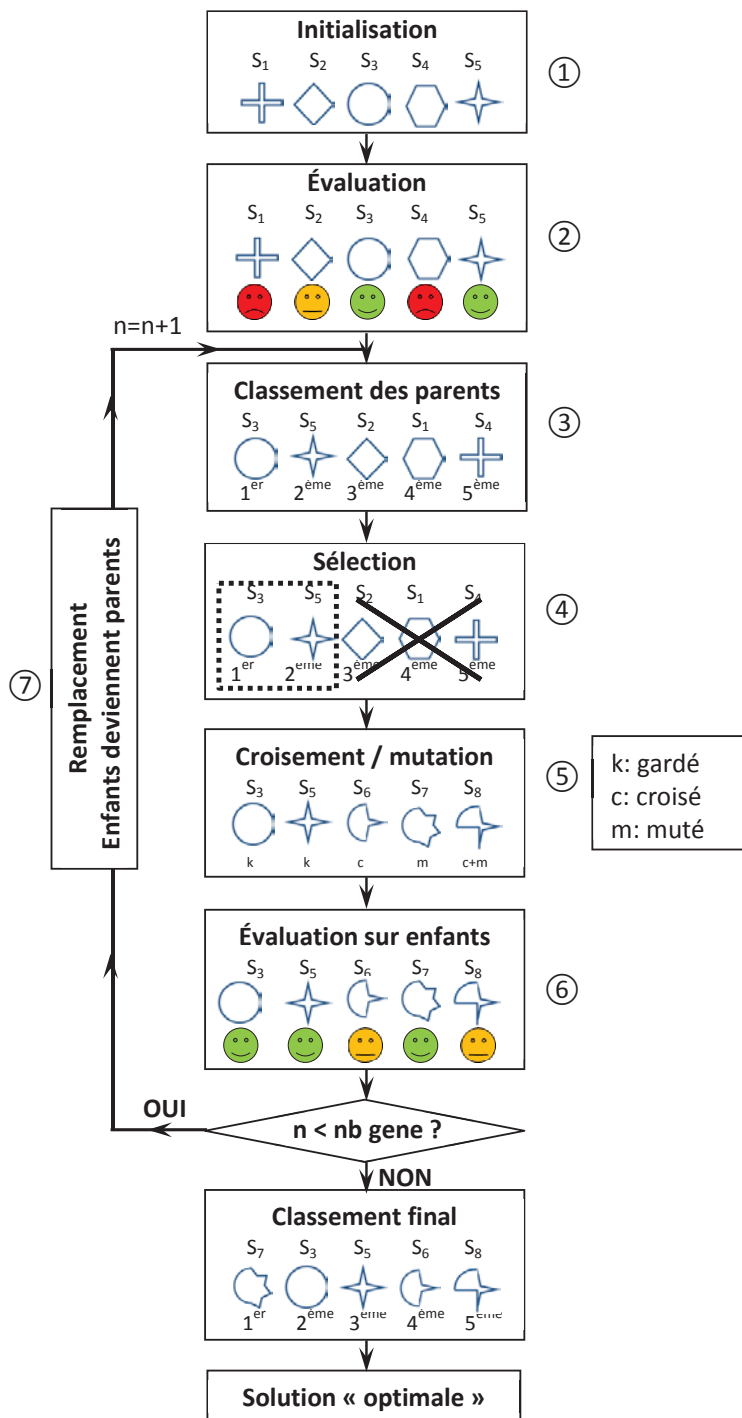
La difficulté pour l'une ou l'autre de ces deux méthodes est d'affecter objectivement un poids aux indices de satisfaction des variables d'observation. Aussi, Scott et Antonsson (1998) proposent un « principe de précaution », décliné par Kim et Lin (2006, 2000) qui ont élaboré une règle d'agrégation par minimisation (Eq. 7). Dans ce cas, la valeur OF est la plus petite valeur parmi les indices de satisfaction des variables d'observation. Cette règle est particulièrement bien adaptée lorsque les apports des experts, des utilisateurs et des décideurs amènent à un choix pertinent de variables d'observation et de leurs valeurs seuils de satisfaction. Aucune variable d'observation ne doit être observée si elle n'est pas

associée à une relation de satisfaction d'importance jugée équivalente aux autres. Une variable observée au travers d'un critère jugé « sans importance » relativement aux autres et pourtant très pénalisant serait d'un effet catastrophique pour un principe de précaution.

1.2.4.3. Résolution et optimisation de problèmes de conception multicritère

Après avoir recensé les outils et méthodes d'évaluation, de sélection et de classement des solutions de conception, il faut, du fait du nombre important de combinaisons possibles entre variables, mettre en œuvre une stratégie de recherche de solutions performantes dans l'espace des solutions candidates. À cette fin, différentes méthodes numériques peuvent être utilisées.

On distingue deux grandes classes. L'une d'elles regroupe les méthodes « *déterministes* ». Elles consistent à trouver la solution optimale à l'aide de méthodes numériques qui n'utilisent pas le hasard, telles que la méthode de Newton ou du gradient conjugué. Cependant ces méthodes ne peuvent être utilisées que lorsque le problème étudié est linéaire et qu'il ne présente qu'un seul optimum. La seconde classe de méthodes est moins restrictive quant aux conditions d'utilisation : il s'agit des méthodes « *stochastiques* ». Celles-ci s'appuient sur des méthodes itératives dont l'évolution au sein de l'espace de recherche est orchestrée par des fonctions de probabilité et des tirages aléatoires. Cette évolution permet de converger assez rapidement vers une solution dite optimale. Cependant, il est impossible de garantir mathématiquement que la « meilleure » solution soit extraite de l'espace de recherche. Parmi les méthodes stochastiques, les algorithmes « *évolutionnaires* », apparus dans les années 60 (Fogel, 1966), sont un sous-ensemble dont les algorithmes « *génétiques* » font partie. Ces derniers furent introduits en 1975 par Holland (1975). Leur utilisation pour résoudre des problèmes multiobjectif en conception de procédés a fait ses preuves (Bingul, 2007; Gupta et Garg, 2013). L'algorithme génétique est basé sur la théorie de l'évolution formulée par Darwin. Il nécessite l'usage d'un vocabulaire particulier. Ainsi, une solution candidate sera appelée un « *individu* », un ensemble d'individus une « *population* » et une population générée au cours d'une même itération est appelée une « *génération* ».



Un exemple d'algorithme génétique, schématiquement présentée en Figure 29, s'appuie dans un premier temps sur l'initialisation aléatoire (①) d'une génération. Ces individus seront ensuite évalués (②) puis classés (③). Une partie des individus est ensuite sélectionnée (④) à l'aide d'une fonction de probabilité favorisant les individus les mieux classés. Puis les opérateurs d'évolution (croisement et mutation) sont appliqués aux individus sélectionnés (⑤). Cette évolution est contrôlée à l'aide de fonctions de probabilité dont les paramètres sont définis a priori. Cette nouvelle génération d'enfants est à son tour évaluée (⑥) puis les individus deviennent parents (⑦). La boucle est répétée jusqu'à ce que le nombre de générations maximum choisi soit atteint.

Fig. 29. Exemple de description fonctionnelle d'un algorithme génétique.

L'algorithme génétique, proposé ci-dessus, est conçu pour intégrer dans son architecture un « simulateur numérique d'évaluation du procédé » (② et ⑥), construit à partir de modèles (Model-Based Reasoning)», comme présenté au paragraphe 1.2.3.3.

L'enjeu d'une telle phase d'optimisation avec un algorithme génétique, consiste à réduire le temps de calcul nécessaire pour que le code converge vers une solution performante, tout en conservant une certaine diversité de population et en garantissant une exploration étendue de l'espace de recherche. Ainsi, que ce soit pour les modèles, le simulateur du

procédé ou l'algorithme lui-même, il faut s'attacher à garantir une bonne capacité de prédiction du processus d'optimisation dans des temps de calcul raisonnables.

1.2.5. De la théorie de la conception à la formalisation d'une démarche intégrée de conception de procédés de transformation agroalimentaire

En 1981, Yoshikawa et al. (1981, 1985, 1989) proposent une théorie abstraite de la conception, la « *General Design Theory (G.D.T.)* ». Elle se base sur le fait que le processus de conception peut être formulé mathématiquement par la modélisation des connaissances et le raisonnement du concepteur. Cette théorie a suscité beaucoup d'intérêts et de débats parmi les chercheurs (Reich, 1995; Tomiyama et Yoshikawa, 1986). À partir du cadre conceptuel de la G.D.T., John Gero développe l'ontologie « *Function-Behaviour-Structure (F.B.S.)* » (Gero, 1990; Gero et Kannengiesser, 2004) représentée schématiquement en

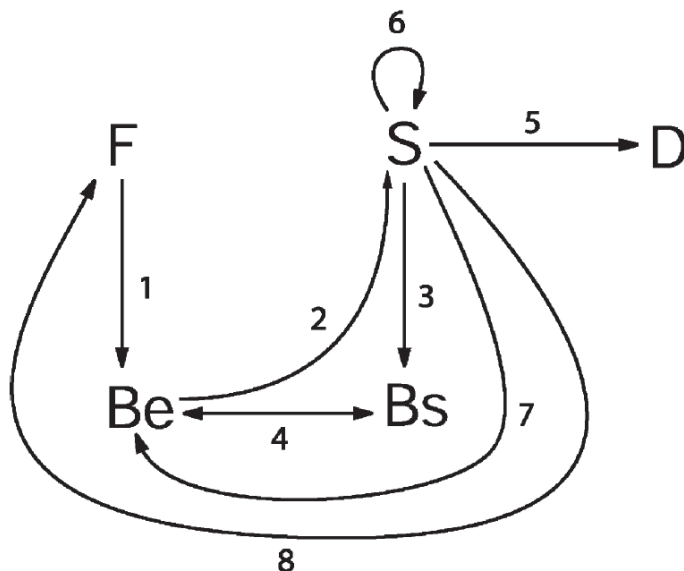


Figure 30. Elle intègre particulièrement l'interaction entre le concepteur, la structure et l'environnement du produit à concevoir. Ainsi, la « *Fonction, F* » correspond à l'agrégation des exigences fonctionnelles du problème de conception.

Fig. 30. Schéma de l'ontologie F.B.S. selon Gero et al. (2004).

Selon Gero, l'étape de « *Formulation, 1* » vise à transformer les exigences de conception, exprimées par la fonction *F*, en un « *Comportement Attendu, Be* ». L'étape de « *Synthèse, 2* » transforme ce Comportement *Be* en une « *Structure, S* » amenée à assurer la réalisation des exigences de conception. L'étape d'« *Analyse, 3* » apporte les éléments liés au « *Comportement Réel, Bs* » (ou effectif) de la Structure. Les Comportements Attendu *Be* et Réel *Bs* sont comparés au cours de l'étape d'« *Évaluation, 4* », afin de décider si la solution de conception est « acceptable ». Si tel est le cas, les documents nécessaires à la fabrication de la Structure sont produits lors de l'étape « *Documentation, 5* ». Dans le cas contraire, des étapes de « *Reformulation, 6, 7, 8* » sont définies afin de modifier des variables aux niveaux de la Structure (« *6* »), du Comportement Attendu (« *7* ») ou de la Fonction elle-même (« *8* »).

Gero propose ainsi de définir des relations formelles entre la Structure physique d’un produit, son Comportement Réel, et une Fonction objectif qui traduit les attentes du concepteur selon un Comportement Attendu.

Aussi, le cadre de cette ontologie F.B.S. a été repris pour le développement d’une méthode intégrée et originale, la méthode « *Observation-Interprétation-Agrégation (O.I.A.)* », principalement appliquée en Génie Industriel, en industries aéronautique (Collignan, 2011), dans l’énergie renouvelable (Semassou et al., 2013) puis dernièrement en Génie des procédés alimentaires (Raffray et al., 2015). Bénéficiant de la facilité d’accès aux outils informatiques de plus en plus performants, la méthode O.I.A. s’appuie sur la formalisation et la modélisation du comportement du procédé à concevoir, en prenant en compte et en modélisant les préférences et connaissances (objective et subjective) du concepteur. Associée à un algorithme d’optimisation, la méthode O.I.A. se trouve adaptée pour traiter des problèmes de conception à objectifs multiples de plus en plus complexes comme les procédés de transformation agroalimentaire.

1.3. Conclusion et objectifs de l'étude

L'état de l'art proposé en partie 1.1. précise le contexte spécifique de développement des unités de transformation agroalimentaires en Afrique subsaharienne et met en relief le fait que de nombreux facteurs freinent le développement de ce secteur.

Les Petites et Moyennes Entreprises (PMEs) agroalimentaires évoluent dans un environnement difficile où les aides des États sont limitées, l'accès à l'information et à la fourniture d'équipements de transformation trop succinct et les énergies trop peu disponibles. Ainsi, l'appui au développement de ces PMEs constitue l'une des priorités pour l'Afrique, continent qui reste encore très affecté par la pauvreté et l'insécurité alimentaire.

Cet appui doit notamment passer par la mise à disposition d'équipements efficaces pour les transformateurs. Or, force est de constater que les équipes de conception et/ou les équipementiers locaux conçoivent, fabriquent et/ou adaptent des équipements dont les performances sont médiocres. L'importation d'équipements est très limitée en raison de leur coût et de leur logistique d'approvisionnement.

De plus, sur un continent où le bois constitue l'énergie la plus utilisée, une diversification des sources de combustibles est nécessaire. Elle peut s'appuyer sur les co-produits issus des filières de transformation qui garantiraient aux PMEs une fourniture de biomasse régulière et de qualité.

L'analyse bibliographique et les relevés des études de terrain consignées dans des rapports techniques font clairement ressortir ces besoins pour l'opération unitaire de séchage très pratiquée en Afrique de l'Ouest pour la stabilisation de produits destinés au marché local et à l'exportation.

Dans une deuxième partie (1.2) sont présentées les nombreuses stratégies développées pour l'analyse et l'aide à la décision en conception de systèmes visant à atteindre des objectifs multiples et parfois contradictoires.

Pour répondre aux attentes des filières de produits séchés ouest-africains, ce travail de thèse se propose d'utiliser un cadre méthodologique adapté à la résolution d'un problème de conception multicritère et de l'appliquer à l'optimisation d'un procédé de séchage. Le contexte nécessitera une adaptation du procédé afin qu'il puisse utiliser la biomasse disponible à des fins énergétiques, qu'il soit fabriquable et utilisable localement et respecte la qualité des produits séchés attendue. Pour cela, une méthode intégrée, particulièrement adaptée à la conception et l'optimisation de procédés, mais jusqu'alors peu utilisée en agroalimentaire, sera adoptée.

Les différentes parties consignées dans ce manuscrit concernent :

- i. Le développement de l'ensemble des modèles de représentation des opérations unitaires du procédé.
- ii. L'élaboration d'un simulateur du procédé capable de prédire, avec cohérence, justesse et dans des temps de calcul adaptés pour l'optimisation, les performances du procédé.
- iii. L'intégration du simulateur dans un environnement d'optimisation multicritère apte à formaliser et à agréger les préférences des utilisateurs finaux, et à générer des solutions de conception du procédé performantes.
- iv. L'analyse critique de ce travail et en particulier les pistes d'amélioration de ce type d'outils pour la conception de procédés agroalimentaires.

Chapitre 2 : Démarche générale **et Dispositifs expérimentaux**

Chapitre 2 : Démarche générale et dispositifs expérimentaux

2.1. Démarche générale

Les travaux de cette thèse font suite à ceux engagés depuis une dizaine d'années à Qualisud sur le développement de séchoirs de produits alimentaires en Afrique de l'Ouest. Le CSec-T (Cirad Séchoir à flux Traversant) a ainsi été conçu sur la base d'un séchoir à lit traversant, dont le principe a été choisi pour répondre aux particularités des produits à sécher : produits granuleux ou grains en couche. Le séchoir, dans son intégralité, peut être fabriqué par des artisans locaux, avec des matériaux et composants disponibles localement. L'implication de différents acteurs (transformateurs, équipementiers et équipes de recherche locales), ont conduit à la mise en place de plusieurs dispositifs et la validation du séchoir CSec-T : au Bénin, au Burkina Faso, au Mali et au Sénégal. Dans chacun de ces pays, les équipementiers ont été formés et sensibilisés au respect du dimensionnement et du montage selon les plans qui leur ont été fournis. La mise en situation réelle de production dans des unités de transformation a amené à la formation des opérateurs à la conduite du séchoir. Ces travaux ont autorisé le recueil d'un grand nombre d'informations relatives aux attentes des transformateurs (débit de production, qualité des produits, ergonomie d'utilisation, disponibilité des énergies, ...), aux pratiques et aux contraintes des équipementiers (moyens et coûts de production, approvisionnement des matériaux, ...). Toutes ces informations alimentent une expertise nécessaire à la poursuite de l'optimisation du Csec-T et des autres modèles de séchoirs.

De la même façon, sur des actions pilotes menées en Afrique, des générateurs d'air chaud et des maquettes d'échangeurs tubulaires ont été fabriquées, notamment au Cameroun (Figure 15, 19 et 20, paragraphe 1.1.5.2.), avant d'être testées.

Il s'avère que cette pratique de conception relève typiquement d'une démarche de type « essai-erreur », en particulier sur les échangeurs de chaleur, considérant i) que les performances thermiques sont non satisfaisantes et ii) la difficulté à recueillir les indicateurs de ces performances. Aussi, la fabrication de nouveaux prototypes ne pouvait plus être ainsi poursuivie face aux coûts et aux délais de réalisation.

Dès lors, avec comme finalité le développement en Afrique de l'Ouest d'un procédé de transfert thermique et de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie, une démarche de conception et d'optimisation multiobjective de procédés, la méthode « Observation-Interprétation-Agrégation (O.I.A) » a été déployée. Elle trouve son origine

dans la description fonctionnelle « Function-Behaviour-Structure (FBS) » de l'ontologie de la conception proposée par John Gero (paragraphe 1.2.5.).

Selon la description fonctionnelle de Gero (2004), la structure « S » (qui correspond pour nous au procédé) est défini par un ensemble de variables de conception « X ». Le comportement réel (Bs) du procédé est représenté par des modèles physiques de chacune des opérations unitaires du procédé (modèles d'observation). Les variables de conception « X » constituent les variables d'entrée des modèles et les variables d'observation « Y », celles de sortie permettant d'apprécier la performance du procédé. Cette évaluation du comportement du procédé constitue l'étape d' « Observation ».

L'expertise détenue par l'équipe de conception permet de choisir et d'affecter à chacune des variables d'observation, un domaine de satisfaction. Ainsi, le comportement attendu (Be selon Gero) du procédé est précisé. Les variables d'observation sont caractérisées par des fonctions de désirabilité, étape d' « Interprétation », permettant d'attribuer un indice de satisfaction « Z » à chacune des variables « Y ». L'agrégation de ces derniers indices en un indicateur unique « OF » constitue la dernière étape d' « Agrégation » de la méthode O.I.A. schématiquement représentée ci-dessous en Figure 31.

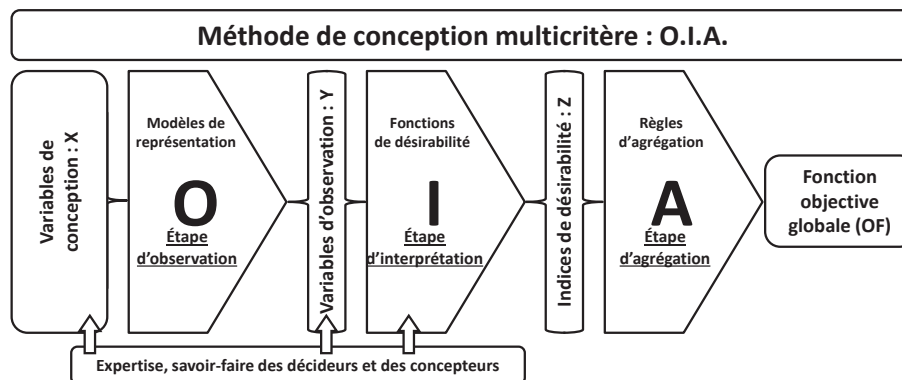


Fig. 31. Représentation schématique de la méthode O.I.A.

Les variables de conception peuvent prendre différentes valeurs issues des domaines de variation qui leur sont assignés constituant ainsi le domaine expérimental, espace de recherche de situations de conception. La recherche de solutions de conception performantes n'est pas aisée du fait du nombre de variables et de l'étendue de leur domaine de variation. Aussi, une stratégie d'optimisation doit être mise en place. Pour cela, un algorithme génétique intégrant l'outil O.I.A. dans son architecture, permet l'évaluation des situations de conception pour rechercher la ou les solutions de conception les plus performantes dans l'espace de recherche. Cet algorithme s'appuie sur une méthode itérative, dont l'évolution au sein de l'espace de recherche est organisée par des fonctions

de probabilité et des tirages aléatoires, et qui permet de converger assez rapidement vers une solution performante.

Les étapes de cette thèse sont organisées selon le déroulement de la méthode O.I.A. et du processus d'optimisation. Elles sont ici appliquées à la conception d'un procédé de transfert thermique et de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie.

En première partie, les performances d'un turbulateur, élément à insérer dans les tubes d'un échangeur de chaleur pour améliorer le transfert thermique, sont évaluées expérimentalement puis modélisées. Réalisés à partir de formes elliptiques, le turbulateur a été spécifiquement conçu pour une réalisation en pays en développement. Sur la base d'exemplaires réalisés au Cameroun, des dispersions géométriques de fabrication ont été notées. L'étude est menée sur un dispositif expérimental (présenté au paragraphe 2.2) permettant de faire varier les valeurs de variables de conception du tube, du turbulateur et de ses dispersions géométriques de fabrication. Le domaine expérimental couvert par l'étude, peu exploré par la communauté scientifique, est restreint à de faibles valeurs du nombre de Reynolds afin de se rapprocher le plus possible des conditions aérauliques réelles d'installations. Des modèles de transfert thermique et de pertes de pression sont établis et présentés dans un premier article.

Dans une seconde partie, l'étape « Observation » de la méthode O.I.A. est développée. Des modèles de représentation de l'ensemble des opérations unitaires du procédé sont construits. Ils précisent les transferts de masse, de chaleur et de perte de pression et sont intégrés dans un outil de simulation global du procédé. Le simulateur met en relation les huit variables d'observation, indicateurs de performances du procédé, à un jeu de huit variables de conception qui définissent chaque situation de conception du procédé. Les capacités affichées par le simulateur lors de l'analyse critique de plusieurs situations de conception démontrent son aptitude à être intégré dans l'environnement d'un processus d'optimisation du procédé. Ces travaux sont détaillés dans un deuxième article.

Dans un dernier temps, l'ensemble de la méthode O.I.A. est mise en œuvre, appliquée au procédé objet de l'étude. Le simulateur du procédé est intégré dans un environnement d'optimisation avec l'interprétation, par fonction de désirabilité, des indicateurs de performance en indices de satisfaction, puis leur agrégation en un indicateur unique. Un algorithme génétique propose des solutions de conception du procédé performantes dont le niveau de satisfaction présente un bon compromis entre les différents objectifs de conception retenus. Le concepteur dispose ainsi d'éléments objectifs pour faire des choix et aller vers la réalisation d'installations de séchage en Afrique de l'Ouest. Cette dernière partie fait l'objet d'un troisième article.

2.2. Dispositifs expérimentaux

2.2.1. Dispositif de caractérisation du transfert thermique et des pertes de charges sur une unité d'échangeur équipée de turbulateur

Un dispositif a été mis en place afin de générer des données de transfert thermique et de pertes de pression propres à un échangeur tubulaire équipé de turbulateurs. Une étude expérimentale permettra de quantifier le coefficient d'échange thermique par convection et les pertes de charge, en fonction des dimensions caractéristiques des tubes et des caractéristiques géométriques des turbulateurs. L'impact des dispersions géométriques, dues à la fabrication des turbulateurs, sur les performances de l'échangeur sera évalué.

Les fonctions à remplir par le dispositif expérimental sont les suivantes :

- ✓ Transmettre l'énergie thermique d'un fluide chaud circulant à l'intérieur d'une unité d'échangeur, soit un seul tube, à un fluide froid extérieur au tube. Les caractéristiques du fluide chaud sont les suivantes :
 - ✓ température ambiante (20/30°C) à température maximum de 800°C (température des fumées issues du générateur),
 - ✓ vitesse de l'air chaud en entrée du tube échangeur : de 1 à 3 m/s.
- ✓ Recevoir des tubes ronds de différents diamètres : 1"1/4 (Ø 42,4 mm ext., ép. 3,25), 2" (Ø 60,3 mm ext., ép. 3,65) et 2"1/2 (Ø 76,1 mm ext., ép. 3,65). Ces tubes sont parmi les plus disponibles chez des fournisseurs en Afrique.
- ✓ Permettre le montage de turbulateurs pour chaque diamètre de tubes.
- ✓ Permettre de faire des expérimentations sur différentes longueurs d'échange.
- ✓ Accueillir toute l'instrumentation nécessaire à la caractérisation de l'échange thermique et de dégradation de l'énergie.

Pour le chauffage de l'air de séchage, le transfert de l'énergie thermique est prévu entre des fumées issues de combustion de biomasse (fluide chaud) circulant à l'intérieur de tubes ronds et l'air de séchage (fluide froid), air ambiant forcé par un ventilateur et captant l'énergie thermique par échange avec l'extérieur des tubes. Mais pour l'étude expérimentale du comportement du turbulateur, de l'eau froide est maintenue à une température constante de 15°C dans une cuve ; celle-ci est traversée par le tube dans lequel circule le fluide chaud, fluide dont les température et vitesse sont variables.

Conception du dispositif de caractérisation du transfert thermique et des pertes de charges (Figure 32)

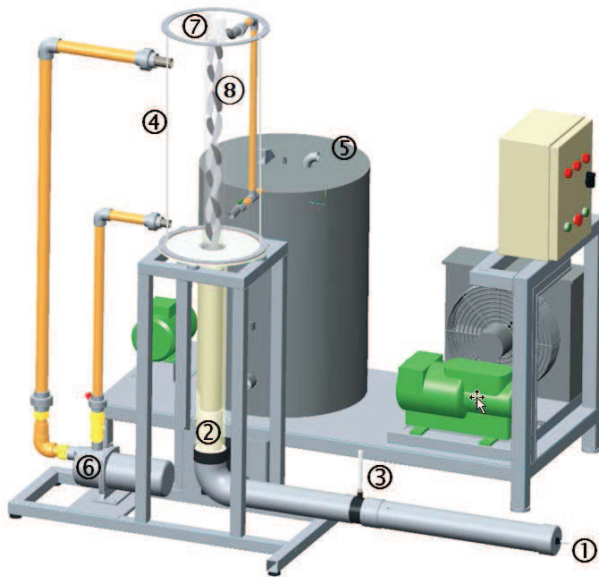


Fig. 32. Vue d'ensemble du dispositif expérimental de caractérisation du transfert thermique et des pertes de charges en représentation virtuelle CAO 3D PTC Creo®.

- ✓ La convection de l'air est générée par un débit d'air comprimé (1), réglable, sous une pression constante de 6 bars et permettant d'assurer le débit massique d'air chaud sous contrainte de fortes pertes de charge.
- ✓ La température de chauffage de l'air est obtenue par un réchauffeur d'air (2) (type « Skorpion 3kW » / « Osram Sylvania ») assisté d'un régulateur qui assure une consigne à $\pm 1^{\circ}\text{C}$.
- ✓ En amont du réchauffeur, une conduite horizontale en tube PVC « pression » de $\varnothing 80$ mm supporte un anémomètre à hélice (3). Cette conduite est dimensionnée pour que i / les longueurs des parties droites en amont et en aval de l'anémomètre respectent les préconisations du constructeur de l'anémomètre et ii / son diamètre ($\varnothing 80$ mm) corresponde au diamètre de tête de l'anémomètre afin d'y faire passer l'intégralité du flux d'air ; ceci pour pouvoir calculer le débit d'air avec précision. Un bloc de paille de fer est rapporté en amont de l'anémomètre afin de garantir la répartition du flux d'air sur toute la section du tube.
- ✓ Une cuve en acier inoxydable (4) reçoit les tubes des différents diamètres à tester. La liaison « cuve »-« tube » est démontable. Le diamètre intérieur de la cuve (300 mm) a été dimensionné pour que le volume d'eau soit suffisamment important pour assurer une bonne dissipation de l'énergie thermique reçue du tube.

- ✓ Un groupe froid ⑤ (unité de refroidissement d'eau, armoire de régulation et pompe de transfert) est connecté à la cuve. Il assure la consigne de température de l'eau. Pour garantir celle-ci, quel que soit l'endroit de la cuve, un brassage de l'eau est mis en place par une pompe ⑥.
- ✓ Les tubes échangeurs ⑦ sont bridés par boulonnage sur la cuve.
- ✓ Les turbulateurs ⑧ sont fabriqués à partir d'un ensemble d'ellipses découpées par technique « jet d'eau » dans de la tôle en « acier électro-zingué » (Figure 33). Les bandes d'ellipses sont ensuite pliées à l'aide de gabarits.

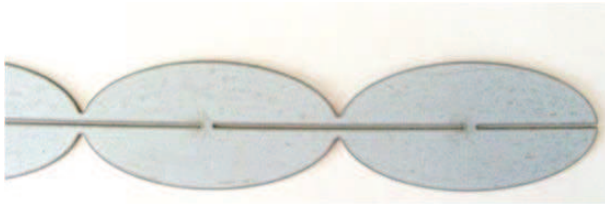


Fig. 33. Bande d'ellipses avant pliage.

L'instrumentation implantée sur le dispositif expérimental (Figure 34) relève les valeurs des variables opératoires, température T_{ai} et vitesse d'air U_{amb} et la pression statique ΔP en entrée de tube échangeur, la température d'eau de la cuve T_w et la température d'air en sortie de tube T_{ao} .

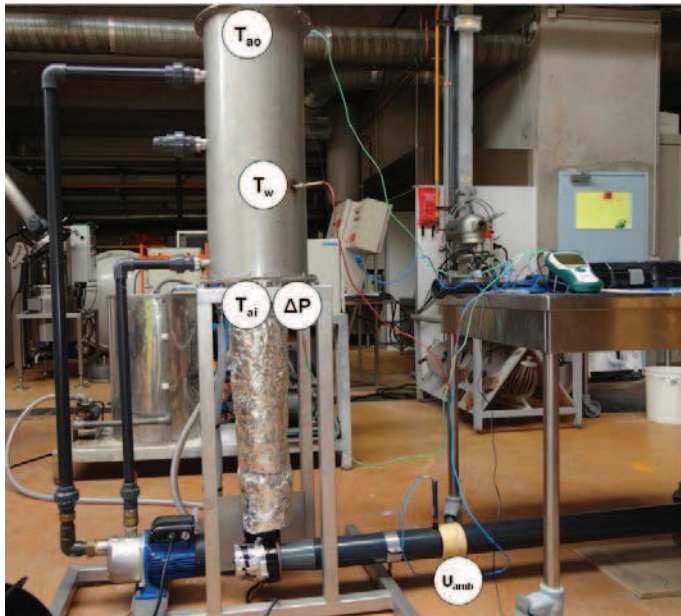


Fig. 34. Positionnement de l'instrumentation sur le dispositif de caractérisation du transfert thermique et des pertes de charges.

2.2.2. Séchoir de produits alimentaires CSec-T

Un séchoir CSec-T (Figure 35), présenté aux paragraphes 1.1.5.1. et 1.1.5.2.c., a été mis en place et instrumenté afin d'identifier :

- ✓ les pertes de charges induites par le produit (couscous de blé dur) tout au long d'un cycle de séchage (Eq. 8 de l'article n°2).
- ✓ le terme $h \cdot S_{se}$ (h : coefficient de transfert de chaleur par convection et S_{se} : surface d'échange spécifique) de la corrélation (Eq. 18 de l'article n°2) qualifiant le transfert thermique entre l'air de séchage et les agglomérats d'une couche de couscous.

et de valider expérimentalement le modèle de séchage d'agglomérats de couscous disposés en couches sur des claies empilées (Figure 7 de l'article n°2).

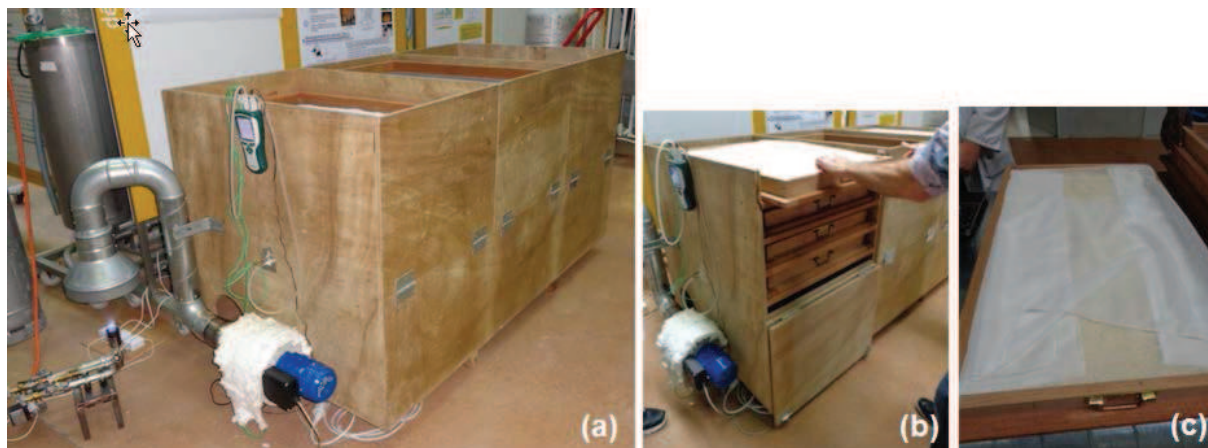


Fig. 35. Séchoir CSec-T installé dans la halle agroalimentaire du Cirad/Qualisud (a) et claie du séchoir chargée de produit lors des expérimentations (b) (c).

L'instrumentation implantée sur le séchoir (Figure 36) relève les valeurs des températures d'air ambiant et en attaque du produit, l'humidité relative de l'air ambiant et la pression statique sous la pile de claies.



Fig. 36. Instrumentation du séchoir CSec-T.

Chapitre 3 : Résultats

3.1. Modélisation du transfert thermique et de la dégradation de l'énergie mécanique dans un échangeur air-air équipé de turbulateur. (Article n°1).

Pour récupérer l'énergie contenue dans des fumées issues de la combustion de biomasse et la transférer à un air prévu pour le séchage de produits alimentaires, le choix d'un échangeur de chaleur tubulaire se justifie en raison de sa simplicité de fabrication, qualité particulièrement recherchée dans des ateliers de construction mécanique en Afrique Subsaharienne. De même, réduire autant que faire se peut la quantité de matière nécessaire à la construction de cet échangeur, permet d'en diminuer le coût. Pour améliorer l'efficacité du transfert thermique, des turbulateurs peuvent être insérés dans les tubes. Cependant, ces derniers induisent des pertes de pression dans le circuit aéraulique. De nombreux turbulateurs sont présentés dans la littérature mais leur géométrie ne se prête pas à de la construction locale. De plus, les plans expérimentaux de caractérisation de leurs performances ont été réalisés sous des régimes d'écoulement qui sont bien supérieurs au domaine d'application de la présente étude.

Des tests de fabrication d'un turbulateur de forme « elliptique » spécialement conçu pour l'étude ont été entrepris dans deux ateliers du Cameroun. Des informations, telles que les temps de fabrication, leur prix de revient, les techniques employées pour la découpe et la mise en forme, ont été relevées. Le contrôle des côtes de fabrication a mis en évidence des dispersions géométriques dans la découpe des formes et dans leur pliage.

Pour toutes les raisons évoquées précédemment, les performances de plusieurs exemplaires du turbulateur « elliptique », dans leur configuration nominale ou affectés des dispersions constatées sur le terrain, ont été évaluées sur un dispositif expérimental.

Le plan expérimental a permis de produire des modèles de transfert thermique et de perte de pression engendrée par le turbulateur. Ces modèles sont présentés dans l'article qui suit intitulé « *Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries* » publié dans le journal « *Applied Thermal Engineering* ».

L'originalité de ce travail réside dans le fait que l'incidence des techniques de fabrication sur les performances d'un turbulateur a pu être appréhendée, et intégrée dans les modèles avec les différentes variables de dimensionnement du turbulateur. L'utilisation de ces modèles guidera le concepteur dans ses choix de conception de l'échangeur de chaleur, et plus largement, du procédé.



Contents lists available at ScienceDirect

Applied Thermal Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apthermeng

Research paper

Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries

Michel Rivier ^{a,*}, Patrick Sébastien ^b, Thierry Goli ^a, Guilhem Raffray ^a, Antoine Collignan ^c^a Cirad, UMR Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, TA B-95/15, 73, rue JF Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France^b Université de Bordeaux, I2M, UMR CNRS 5295, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence cedex, France^c Montpellier SupAgro, UMR Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, 1101 avenue Agropolis, CS 24501, 34093 Montpellier cedex 5, France

HIGHLIGHTS

- In developing countries, manufacture dispersions impact heat exchanger efficiency.
- Effects of turbulator design variables on heat transfer and pressure drop are studied.
- Nusselt number is predicted as a function of turbulator design variables.
- Fanning friction factor is also predicted through the same design variables.
- Surface-based dispersion was found to have the most impact on exchanger performance.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 November 2014

Accepted 30 January 2015

Available online 12 February 2015

Keywords:

Heat transfer

Tubular heat exchanger

Elliptic shape turbulator

Local manufacture

Developing countries

ABSTRACT

Energy availability, heat conversion and transfer still represent an impediment to the food processing sector in developing countries. Optimisation of tubular heat exchangers remains a concern for equipment designers and manufacturers. This work assesses the performances of a turbulator in terms of heat transfer and fluid friction characteristics in a heat exchanger tube. The turbulator is designed based on an elliptic shape suited to be made locally. The geometric dispersions caused by this kind of manufacturing process were surveyed, and then considered in the study. Hence 26 turbulators, manufactured with or without geometric dispersions, and with 45° or 60° ellipses, were tested in three tubes of different diameters. To ensure the closest possible resemblance to actual applications, the tests were carried out using air as a working fluid, with a low range of Reynolds number (1700–8000 for heat transfer and 3000 to 16,000 for friction factor). The heat transfer rate in a tube fitted with a turbulator may be increased up to 900%, in turbulent flow and with a curve angle of 45°. On the flip side, there is a very big pressure drop. However, a surface-based dispersion of 30% which could be generated by local manufacturing leads to a 50% reduction in the friction factor, but only a 20% reduction in the Nusselt number. The models obtained will enable a multi-criteria analysis for heat exchanger optimisation in a context specific to developing countries.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The economies of many developing countries are largely reliant on agriculture. Faced with food insecurity and population growth [1], the development of the agricultural product processing sector is now recognized as a driving factor.

* Corresponding author. Cirad, UMR Qualisud, 73, rue Jean François Breton, TA B-95/15, 34398 Montpellier cedex 5, France. Tel.: +33 467 61 5719.

E-mail address: michel.rivier@cirad.fr (M. Rivier).

Food processing techniques generally combine several unit operations. One of them, drying, is the most common way of preserving and storing products. Many dryer models have been developed or optimised over the last twenty years [2] using various energy sources [3] including solar energy [4], in particular in developing countries. Yet drying is an operation classified as energy-intensive. Indeed, it calls on a large quantity of energy for the quantity of dried product and requires high power. Hence one of the major obstacles in terms of managing drying operations, in developing countries, remains energy access [5–7]. Among the energy alternatives, use of biomass as a fuel represents a reliable

Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries.

Michel Rivier ^{a,*}, Patrick Sébastien ^b, Thierry Goli ^a, Guilhem Raffray ^a, Antoine Collignan ^c

^a Cirad, UMR Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, TA B-95/15, 73, rue JF Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France

^b Université de Bordeaux, I2M, UMR CNRS 5295, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence cedex, France

^c Montpellier SupAgro, UMR Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, 1101 avenue Agropolis, CS 24501, 34093 Montpellier cedex 5, France

* Corresponding author.

Address: Cirad, UMR Qualisud, 73, rue Jean François Breton, TA B-95/15, 34398 Montpellier cedex 5, France, Tel.: + 33 467 61 5719

E-mail address: michel.rivier@cirad.fr (M. Rivier)

Abstract

Energy availability, heat conversion and transfer still represent an impediment to the food processing sector in developing countries. Optimisation of tubular heat exchangers remains a concern for equipment designers and manufacturers. This work assesses the performances of a turbulator in terms of heat transfer and fluid friction characteristics in a heat exchanger tube. The turbulator is designed based on an elliptic shape suited to be made locally. The geometric dispersions caused by this kind of manufacturing process were surveyed, and then considered in the study. Hence 26 turbulators, manufactured with or without geometric dispersions, and with 45° or 60° ellipses, were tested in three tubes of different diameters. To ensure the closest possible resemblance to actual applications, the tests were carried out using air as a working fluid, with a low range of Reynolds number (1700 to 8000 for heat transfer and 3000 to 16,000 for friction factor). The heat transfer rate in a tube fitted with a turbulator may be increased up to 900 %, in turbulent flow and with a curve angle of 45°. On the flip side, there is a very big pressure drop. However, a surface-based dispersion of 30% which could be generated by local manufacturing leads to a 50% reduction in the friction factor, but only a 20% reduction in the Nusselt number. The models obtained will enable a multi-criteria analysis for heat exchanger optimisation in a context specific to developing countries.

Keywords

Heat transfer
Tubular heat exchanger
Elliptic shape turbulator
Local manufacture
Developing countries

Highlights

- In developing countries, manufacture dispersions impact heat exchanger efficiency
- Effects of turbulator design variables on heat transfer and pressure drop are studied
- Nusselt number is predicted as a function of turbulator design variables
- Fanning friction factor is also predicted through the same design variables
- Surface-based dispersion was found to have the most impact on exchanger performance

1. Introduction

The economies of many developing countries are largely reliant on agriculture. Faced with food insecurity and population growth (Jacquet et al., 2012), the development of the agricultural product processing sector is now recognized as a driving factor.

Food processing techniques generally combine several unit operations. One of them, drying, is the most common way of preserving and storing products. Many dryer models have been developed or optimised over the last twenty years (Sharma et al., 2009) using various energy sources (Madhlopa and Ngwalo, 2007) including solar energy (Murthy, 2009), in particular in developing countries. Yet drying is an operation classified as energy-intensive. Indeed, it calls on a large quantity of energy for the quantity of dried product and requires high power. Hence one of the major obstacles in terms of managing drying operations, in developing countries, remains energy access (Dabat et al., 2010; de Janvry and Sadoulet, 2000; Hazell and Pachauri, 2006). Among the energy alternatives, use of biomass as a fuel represents a reliable alternative (Demirbas and Demirbas, 2007). For optimum conversion of this bioenergy, the interface between the biomass generator and the dryer proves to be an essential factor. To this end, a gas-air heat exchanger is most commonly used. In developing countries exchangers, most often tubular, are installed on drying units. They are easier to manufacture since the materials, although costly, are available in-situ and the local sheet metal working techniques are relatively well mastered. However, in the face of the low thermal efficiency generally found with these installations, and because of the cost of the materials and energies called for, these tubular exchangers need to be optimised.

The literature is teeming with concepts for high-performance heat exchangers which have been successfully developed in a Western production context (Lestina and Serth, 2010). In the particular case of tubular exchangers, they are optimised through increasing the heat transfer coefficient by means of passive or active methods, or a combination of the two (Bergles, 2000).

Active methods require sophisticated external power sources such as electrostatic fields, fluid injection, and jet impingement (Bergles, 2000), which explains why they are not widespread in developing countries.

In a review on passive techniques, Dewan et al. (2004) specify their advantages, before surveying various heat transfer enhancement tools, in particular inserts or turbulators used in the flow passage. Thus, passive techniques are advantageous because inserts can be employed in an existing exchanger. As Durmus et al. (2002) or Guo et al. (2011) point out in their articles, these elements create a swirling flow and a thermal boundary layer disruption, favourable to thermal performance enhancement. Conversely, they lead to big pressure drops, which require use of additional pumping power. Various works investigate the

decaying swirl flow type, where the swirling flow effect is generated by components (short twisted tapes, snails (Durmuş et al., 2002), axial vanes (Ahmadvand et al., 2010; Saraç and Bali, 2007)) placed in the tube inlet. This type is considered useful and economic, since heat transfer increases without causing excessive pressure losses (respectively 50% and 100% according to Durmuş et al. (2002)). In the non-decaying flow type, the swirling flow effect is generated by components placed continuously or discontinuously in the tube. Promvonge and Eiamsa-ard (2006) tested a combination of the two principles: conical turbulator in the tube with a snail entrance.

In the last few years, many works have been conducted to study the effect on heat transfer and on flow friction of various turbulator models with a non-decaying flow type. To date, inserts such circular-ring, helical or twisted tapes and wire coils have been widely studied. Durmuş (2004) studied the effect of angle of eight cut-out conical turbulators on the heat transfer rate and friction factor in a tube, while Promvonge studied it with the insertion of conical nozzle turbulators (Promvonge and Eiamsa-ard, 2007) or inclined horseshoe baffles (Promvonge et al., 2015) in a circular tube. In other works, the influence of various shapes, such as helical screw tape with or without a rod (Eiamsa-ard and Promvonge, 2005; Şahin et al., 2013; Sivashanmugam and Nagarajan, 2007; Sivashanmugam and Suresh, 2007), circular-ring (Kongkaitpaiboon et al., 2010; Promvonge et al., 2014), twisted tapes (Eiamsa-ard et al., 2013a; Eiamsa-ard et al., 2010; Eiamsa-ard et al., 2013b), and a combination thereof (Promvonge, 2008) on the heat transfer and friction factor characteristics has been examined. Generally, the studies were processed experimentally, but sometimes also numerically (Guo et al., 2011; Şahin et al., 2013). Liu and Sakr (2013) reviews numerous works produced since 2004 on the various passive techniques listed above. He notes that the contribution of twisted tape inserts on heat transfer efficiency is better in laminar flow than in turbulent flow, unlike other techniques. In a review study, Hasanpour (Hasanpour et al., 2014) points out that twisted tape inserts are the most widely used type for improving thermal transfer on exchangers. He presents their characteristics and associated performances for a number of models. To make the enhancement comparable between various enhancement devices, the thermal performance factor (Webb, 2005) is used.

In the context of developing countries, this type of device or turbulator is not used, because most of the geometries do not lend themselves to local manufacturing, and installing them in tubes may prove difficult. Generally, manufacturing methods such as bending machines, water jet or laser cutting techniques are not available. Conversely, the craftsmen are expert in the use of manual cutting, manual and bending, and possibly manufacturing jigs. These manufacturing methods are suited to the very low investment capacities of the craftsmen, as well as the low-revenue consumer market. However, it must be noted that the manufacture dispersions resulting from these manufacturing methods are high, which consequently

affects the performance of the heat exchanger. The turbulator models available in the literature do not refer to this type of dispersion, since Western manufacturing conditions are much more refined.

Hence, the development of an optimised turbulator, whose geometry lends itself to local manufacture in developing countries, which implies countries with low available revenue among the economic players, represents an original work and one crucial for improving the performance of drying processes. An ellipse-based turbulator geometry, which can be cut and bent under artisanal conditions, was adopted for our study. To validate this choice, turbulator prototypes were made in two workshops in developing countries (Cameroon), to verify the feasibility of this geometry. It was possible to make the turbulators from sheet metal available on the local market, using the following tools: hammer, chisel, hand shears, metal saw, and portable grinder. In this way, the manufacture dispersions inherent in the manufacturing processes were detected. These dispersions were subsequently reproduced in Europe, in the manufacture of the turbulators for our study, in order to be able to characterise their impact on the performance of a heat exchanger.

The objective of this publication is to experimentally assess, and then model, the technical performance of this type of turbulator, in order to consequently size and optimise the heat exchangers. To ensure sufficiently generic models, we designed an experimental device able to vary the tube diameter, the bend angle of the turbulators and to apply the geometric dispersions.

2. Materials and methods

Based on an elliptic geometry, a turbulator model was outlined as per the definition drawing in Figures 1a and b. The turbulator's elliptic strip was cut from sheet steel using the water jet technique (Northern context), or by manual shearing and grinding in Southern workshops, and then bent. On the turbulator made in developing countries, some major geometric dispersions were observed: several mm for all the dimensions of the cut ellipses, and up to 15° for the bend angle. They were reproduced on the turbulator model by geometric dispersions, both diametral (Δd ; Fig. 1c) and angular (Δa ; Fig. 1d).

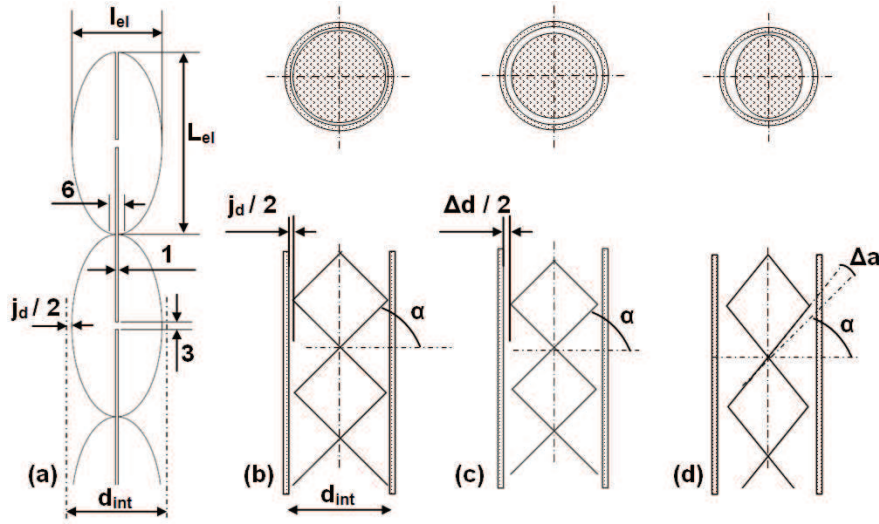


Fig. 1. Definition of turbulators.

It can be observed that the dimensions of the ellipses (l_{el} and L_{el}) are related to the internal diameter of the exchanger tube d_{int} , to the nominal bend angle α and the nominal diametral gap j_d via Eqs. (1) and (2):

$$l_{el} = d_{int} - j_d \quad (1)$$

$$L_{el} = \frac{l_{el}}{\cos \alpha} \quad (2)$$

The turbulator's performance was assessed by characterising the heat transfer and the pressure drop induced by its insertion into an exchanger tube. An original experimental device as shown in Figure 2 was set up. This system incorporated an elementary unit of the exchanger, i.e. a single tube, subject to well-controlled thermal and air flow conditions. The functions to be performed by the device for the purposes of the study were defined as follows:

- transmit the thermal energy from a hot fluid (air at variable temperature and speed) circulating inside a tube to a cold fluid (water at regulated temperature T_w of $15^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$).
- house round tubes of various diameters, inside which turbulators would be installed.

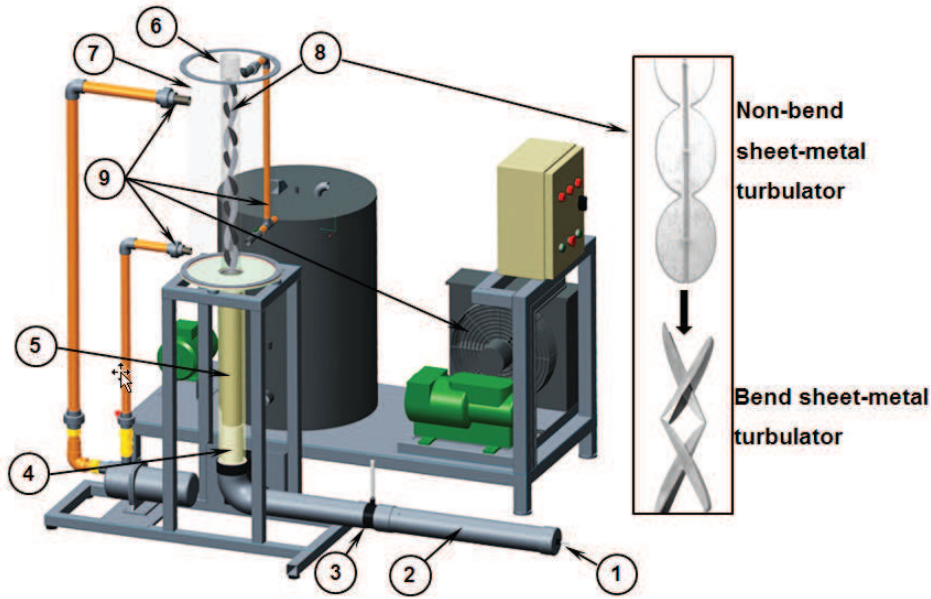


Fig. 2. 3D CAD PTC Creo© virtual representation of the experimental device and the various elements.

The air circuit is the circuit in which the hot fluid was generated, and then extracted after heat exchange. The air flow was created by compressed air fed into the circuit inlet (①). A steel wool block (②) distributed the air flow throughout the cross-section of the horizontal inlet tube. The lengths of the straight sections of the tube upstream and downstream of the speed measuring anemometer (③) were defined to ensure a laminar flow in the tube, and guarantee the precision of the air speed measurements. The air was heated using an air heater (④) (« SkorpionTM 3kW » / Osram Sylvania »), equipped with a temperature measurement and control system. A vertical steel pipe (⑤) enabled the air heater outlet to be connected to the exchanger tube (⑥). It was clad in a “high-temperature” insulant. The steel exchanger tube (⑥) was flange-mounted onto a steel tank (⑦), where it was immersed in the cold fluid (cold water) over a height of 700 mm. The turbulator (⑧) was inserted into the exchanger tube.

The tank (⑦) was equipped with taps for mixing & cooling, and draining off the water. A refrigeration unit, a transfer pump, a mixing pump and a network of pipes formed the mixing and cooling circuit (⑨). This had the function of dissipating the energy transmitted by the exchanger tube to the water in the tank, and keeping the water at a constant temperature T_w of $15^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Figure 3 shows the instrumented system, with sensors which read data relevant for characterising the turbulator performance, where:

- T_{amb} : air temperature at the air circuit inlet (T sensor; $-250/400^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)
- T_{ai} : air temperature at the exchanger tube inlet (K sensor; $-100/1100^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)

- T_{ao} : air temperature at the exchanger tube outlet (K sensor; $-100/1100^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)
- T_w : water temperature in tank (Pt 100 sensor; $-70 \text{ à } +500^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$)
- U_{amb} : air speed at the air circuit inlet. The sensor is a vane anemometer (range $0.2\text{-}20 \text{ m s}^{-1} \pm 5\%$), chosen so that its head diameter was the same as the inlet tube diameter. The air speed U_{ai} at the exchanger tube inlet was thereby calculated.
- ΔP : absolute pressure difference between the exchanger tube and atmospheric pressure; the sensor was connected to a differential pressure connector ($\pm 1250 \text{ Pa} \pm 3\%$).

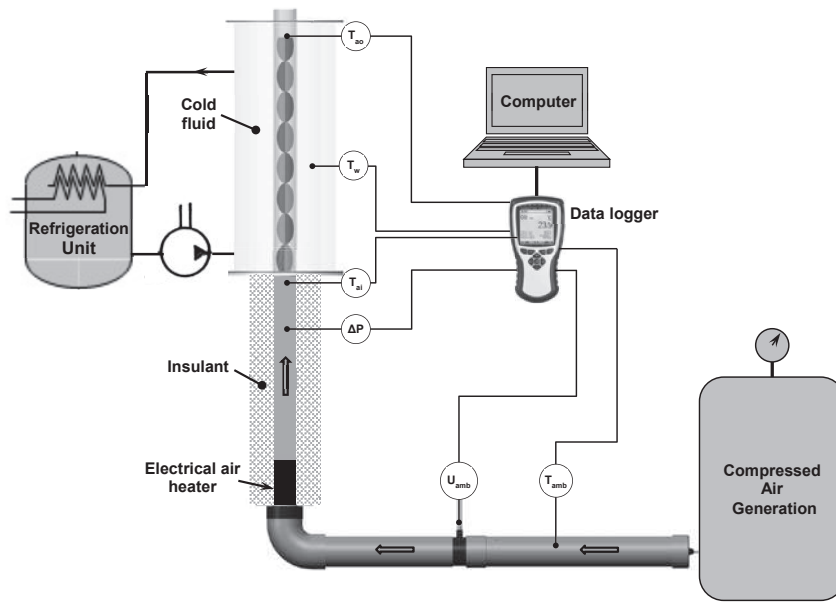


Fig. 3. Schematic diagram of experimental device, with positioning of the instrumentation.

The study consisted in two experimental campaigns characterising the heat transfer and the pressure losses. For each of these two campaigns, sets of experiments were implemented to study the influence of two factors, namely the exchanger tube diameter and the turbulator bend angle. We opted to vary the tube diameter, contrary to the practice generally found in the literature, because the geometric dispersions may in principle introduce effects not complying with the flow similarity. Three different exchanger tube diameters were selected, corresponding to the three tube profiles most commonly used in developing countries, especially in West Africa and Central Africa, with internal diameter values d_{int} (hydraulic flow diameter): 35.9, 53.0 or 68.8 mm. Two nominal bend angles α of 45° and 60° (Fig. 1) were selected for the turbulator ellipses. The value of 45° corresponds to an angle below which it is difficult to perform bending manually. The value of 60° corresponds to an angle easily formed by manual bending.

The sets of experiments were extended to experimental situations in order to take into account geometric dispersions due to manufacture.

The nominal diametral gap j_d , deemed to be the minimum diametral dispersion Δd for fitting the turbulator in the tube, was 0.5 mm (Fig. 1b). To simulate diametral dispersion, as was observed on the turbulators made in developing countries, the dimensions of the ellipses (L_{el} and l_{el}) were calculated to take this dispersion, after the manufacture and bending of the turbulators, from a value of 0.5 mm to Δd values of 1.5 mm and 3 mm, as shown in Figure 1c.

Similarly, to simulate angular dispersion, the nominal bend angle values were thereby modified by Δa values of $+5^\circ$, $+10^\circ$ and $+15^\circ$, as shown in Figure 1d.

Table 1 surveys the experimental situations implemented. They do not cover all possible combinations, since their number made the experimental campaigns too cumbersome and difficult to implement. However, they are necessary and sufficient for developing the predictive model. Hence a turbulator was manufactured for each of these experimental situations. Furthermore, all of the measurements relating to these situations were repeated once, at an interval of three months for the heat transfer campaign, and the measurements of two experimental situations deemed to be central points were tripled for the pressure drop campaign.

Table1

Description of all of the experimental situations.

Experimental situation index	Tube inner diameter d_{int} (mm)	Nominal angle α ($^\circ$)	Angular dispersion Δa ($^\circ$)	Diametral dispersion Δd (mm)	Surface-based dispersion ΔS (%)
1	35.9	45°	0°	0.5	2.8
2			+5°	0.5	11.9
3			+10°	0.5	21.6
4			+15°	0.5	32.1
5			0°	0.5	2.8
6		60°	+5°	0.5	18.2
7			+10°	0.5	34.3
8			+15°	0.5	51.0
9			0°	0.5	1.9
10	53.0	45°	+5°	0.5	11.0
11			+10°	0.5	20.8
12			+15°	0.5	31.2
13			0°	1.5	5.6
14			0°	3.0	11.0
15		60°	0°	0.5	1.9
16			+5°	0.5	17.3
17			+10°	0.5	33.5
18			+15°	0.5	50.1
19			0°	0.5	1.4
20	68.8	45°	+5°	0.5	10.5
21			+10°	0.5	20.3
22			+15°	0.5	30.7
23			0°	0.5	1.4
24			+5°	0.5	16.9
25		60°	+10°	0.5	33.0
26			+15°	0.5	49.7

Combinations of values of operating parameters U_{ai} (0.2 to 2.3 m.s⁻¹) and T_{ai} (20, 100, 200 and 400°C) were chosen to scan for Reynolds number (Re) values over an experimental region of 1700 to 8000 for the heat transfer characterisation campaign, and from 1700 to 16,000 for the pressure losses characterisation campaign. These low air flow states have received little coverage in the literature. Yet the values were specifically chosen since they are of the order of magnitude that can be found on installations to be optimised or designed in developing countries.

The heat transfer and pressure drop models found in the literature (Shah and Bell, 2000; Suryanarayana, 2000) respectively link the Nusselt number (Nu, e.g. Sieder and Tate or Dittus correlations) and friction factor (f, e.g. Moody or Blasius correlations) to the Reynolds number (Re) as per Eqs. (3) and (4):

$$Nu = a \cdot Re^b \quad (3)$$

$$f = c \cdot Re^d \quad (4)$$

Parameters a, b, c and d depend on the physical properties of the fluids and the thermal transfer device studied. These models would be tested in our study, varying the tube internal diameter d_{int} , the nominal bend angle of the turbulator ellipses α , and the geometric dispersion values Δd and Δa .

Parameters a, b, c and d were identified using Matlab® R2012b software (MathWorks Inc. USA). Parameters a and c were then expressed, as a function of the physical variables, by multiple regression using Statistica® 9.1 software (Statsoft Inc. USA). The two polynomial regression models linking parameters a or c to the physical variables of the thermal transfer system are expressed as follows, Eq. (5):

$$a \text{ or } c = c_0 + \sum_i c_i X_i + \sum_i c_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j} c_{ij} X_i X_j + \sum_{i,j,k} c_{ijk} X_i X_j X_k$$

$$\text{with } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} d_{int} \\ \alpha \\ \Delta S \end{bmatrix} \quad (5)$$

The models were then simplified using the descending exclusion method, retaining only the Y-intercept, and the terms contributing very significantly to the variability of response. The adopted terms were those for which the p value (i.e. probability that they are equal to zero) is

less than 0.05. The quality of the regression model in terms of prediction was assessed by the value of the coefficient of determination R^2 .

Using differential logarithmic transformation, an uncertainty analysis was conducted on the following dimensionless experimental values: Reynolds number, Nusselt number and Fanning friction factor. The respective maximum uncertainties were $\pm 5\%$, $\pm 8.3\%$ and 7.7% .

3. Data reduction

The heat transfer rate was evaluated, in the case of an exchanger (for our study, a single tube, the exchanger elementary unit) with isothermal surface (Rohsenow et al., 1985), by calculating the pair cooling effectiveness (ε_c) and number of transfer units (NTU), in Eqs. (6) and (7).

$$\varepsilon_c = \frac{T_{ai} - T_{ao}}{T_{ai} - T_w} \quad (6)$$

$$NTU = \ln\left(\frac{1}{1 - \varepsilon_c}\right) \quad (7)$$

The heat transfer coefficient (h_{tube}), the Nusselt number (Nu) and the Reynolds number (Re) were calculated as follows:

$$h_{tube} = \frac{NTU \cdot \dot{m}_{ai} \cdot c_{pai}}{A_{tube}} \quad (8)$$

$$Nu = \frac{h_{tube} \cdot d_{int}}{\lambda_{ai}} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho_{ai} \cdot U_{ai} \cdot d_{int}}{\mu_{ai}} \quad (10)$$

The properties of the fluid (air) were calculated at the exchanger tube inlet.

The Darcy-Weisbach equation was used to calculate the energy dissipation in the pipe. This dissipation was characterised by the Fanning friction factor f using Eq. (11):

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{4 \cdot L_{tube} \cdot \rho_{ai} \cdot U_{ai}^2}{d_{int}}} \quad (11)$$

The thermal performance factor (η) is defined as follows:

$$\eta = \frac{\frac{Nu_t}{Nu_p}}{\left(\frac{f_t}{f_p}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (12)$$

The angular geometric dispersion Δa and diametral geometric dispersion Δd were reduced thanks to the concept of relative surface-based dispersion ΔS . This surface-based dispersion ΔS is defined as the percentage sectional flow area left free by the turbulator due to the two dispersions, angular and diametral. As shown in Figure 4, the angular and diametral dispersions tend to reduce the apparent surface of the turbulator in the plane perpendicular to the fluid flow. The angular dispersion leads to an apparently elliptic-shaped turbulator. Similarly, the diametral dispersion reduces the apparent diameter of the turbulator. The combination of these two dispersions satisfies Eqs. (13), (14) and (15). These three surface-based dispersions are defined relative to the tube sectional area.

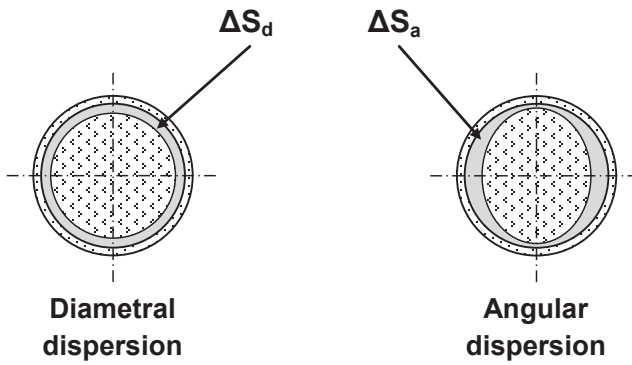


Fig. 4. Relative surface-based dispersions.

$$\Delta S_d = \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta d}{d_{int}} \right)^2 \right] \cdot 100 \quad (13)$$

$$\Delta S_a = \left[1 - \frac{\cos(\alpha + \Delta a)}{\cos \alpha} \right] \cdot 100 \quad (14)$$

$$\Delta S = \Delta S_d + \Delta S_a \quad (15)$$

The relative surface-based dispersion values ΔS , for each of the experimental situations, are set out in Table 1.

4. Results, modelling and discussion

4.1. Heat transfer: results and modelling

Figures 5a and b set out the experimental results for heat transfer on a logarithmic scale in the form of evolution of Nusselt number as a function of Reynolds number. Figure 5a sets out the results of the experimental situations of the three tube diameters, and for both the nominal bend angles (minimum surface-based dispersions ΔS). Figure 5b sets out the evolution of the Nusselt number for each of the six surface-based dispersion values ΔS applied to the 45° turbulator for the 53.0 mm tube.

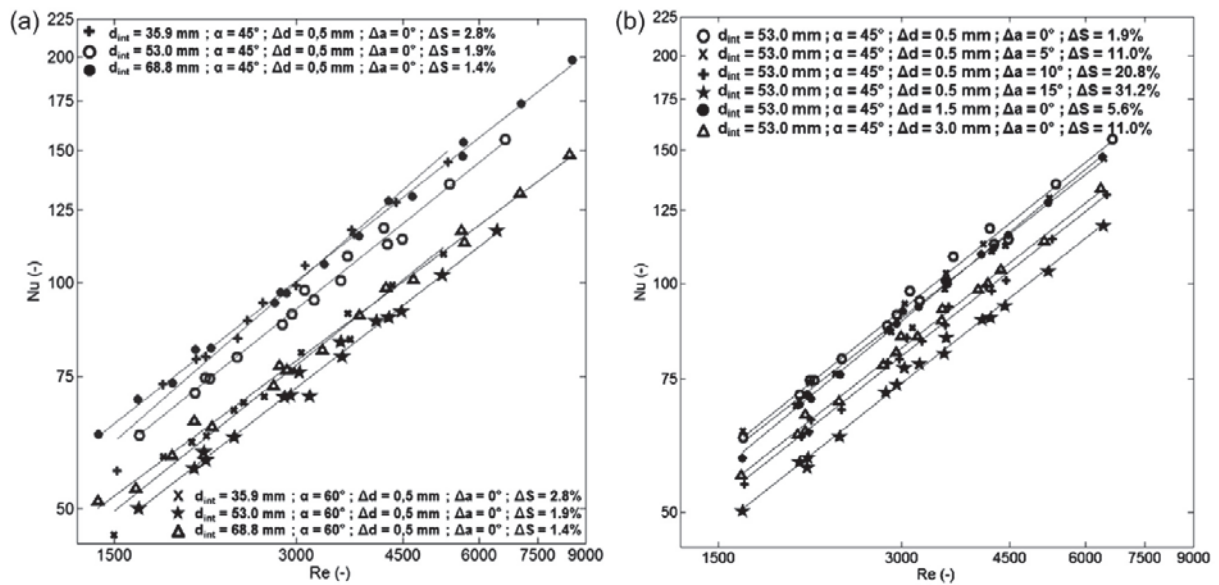


Fig. 5. a. Variation of Nusselt number for experimental situations without surface-based dispersion. b. Variation of Nusselt number for the experimental situations with surface-based dispersions on Ø 53.0 mm tube and $\alpha = 45^\circ$.

Figures 5a and b only set out a few experimental situations, for the sake of clarity. However, in the experimental region of Reynolds number values, all representations of the experimental situations and their repetitions reveal a bundle of straight lines, with gradient values of the same order of magnitude. Only one special flow state was observed. The linearity of the curves makes it possible to suggest a correlation as per Eq. (3); their parallelism confirms that parameter b is independent from the physical variables, that it is constant, leading it to be averaged to a value of 0.611.

Correlation for the Nusselt number is written as Eq. (16). Parameter a is expressed using Eq. (5); $R^2 = 0.96$.

for $(Re, d_{int}, \alpha, \Delta S) \in [1700; 8000] \times [35.9; 68.8] \times [45; 60] \times [1.4; 50.1]$:

$$Nu = a \cdot Re^{0.611} \quad (16)$$

with

$$a = 1.915 - 2.420 \cdot 10^{-02} \cdot d_{int} + 2.264 \cdot 10^{-04} \cdot d_{int}^2 - 1.227 \cdot 10^{-02} \cdot \alpha \\ - 2.228 \cdot 10^{-04} \cdot d_{int} \cdot \Delta S + 2.943 \cdot 10^{-06} \cdot d_{int} \cdot \alpha \cdot \Delta S$$

4.2. Pressure drop: results and modelling

The evolution of the Fanning friction factor as a function of Reynolds number, for all the 26 experimental situations and their repetitions, is represented on a logarithmic scale in Figure 6a. For clarity's sake, Figure 6b sets out only the results of the experimental situations of the three tube diameters, and for both nominal bend angles (minimum surface-based dispersions ΔS).

Figure 6c sets out the evolution of the Fanning friction factor for each of the six surface-based dispersion values ΔS applied to the 45° turbulator for the 53.0 mm tube.

Three separate particular flow states were observed (Fig. 6a), for all the experimental situations: laminar for $Re < 3000$, transient for $3000 < Re < 5000$ and turbulent for $Re > 5000$. The curves are straight lines, with gradient values of the same order of magnitude for each of the states, except for the four experimental situations corresponding to the large diameter tube (68.8 mm) and the 60° bend angle (with or without surface-based dispersion), for which the gradients are different.

Thereafter, the friction factor characteristics study was restricted to Reynolds values greater than 3000. Indeed, we assumed that for lower values (laminar state), the results obtained are difficult to process: the limits of the experimental device are reached, with the pressure losses too low, less than 10 Pa. The same goes for experimental situations corresponding to the 60° turbulators (and for all its surface-based dispersions) of the 68.8 mm tube.

In line with the same comments as for heat transfer, the parameter d is independent from the physical variables, i.e. constant for each of the transient and turbulent states. It can be averaged to values of 0.490 for transient flow and 0.147 for turbulent flow.

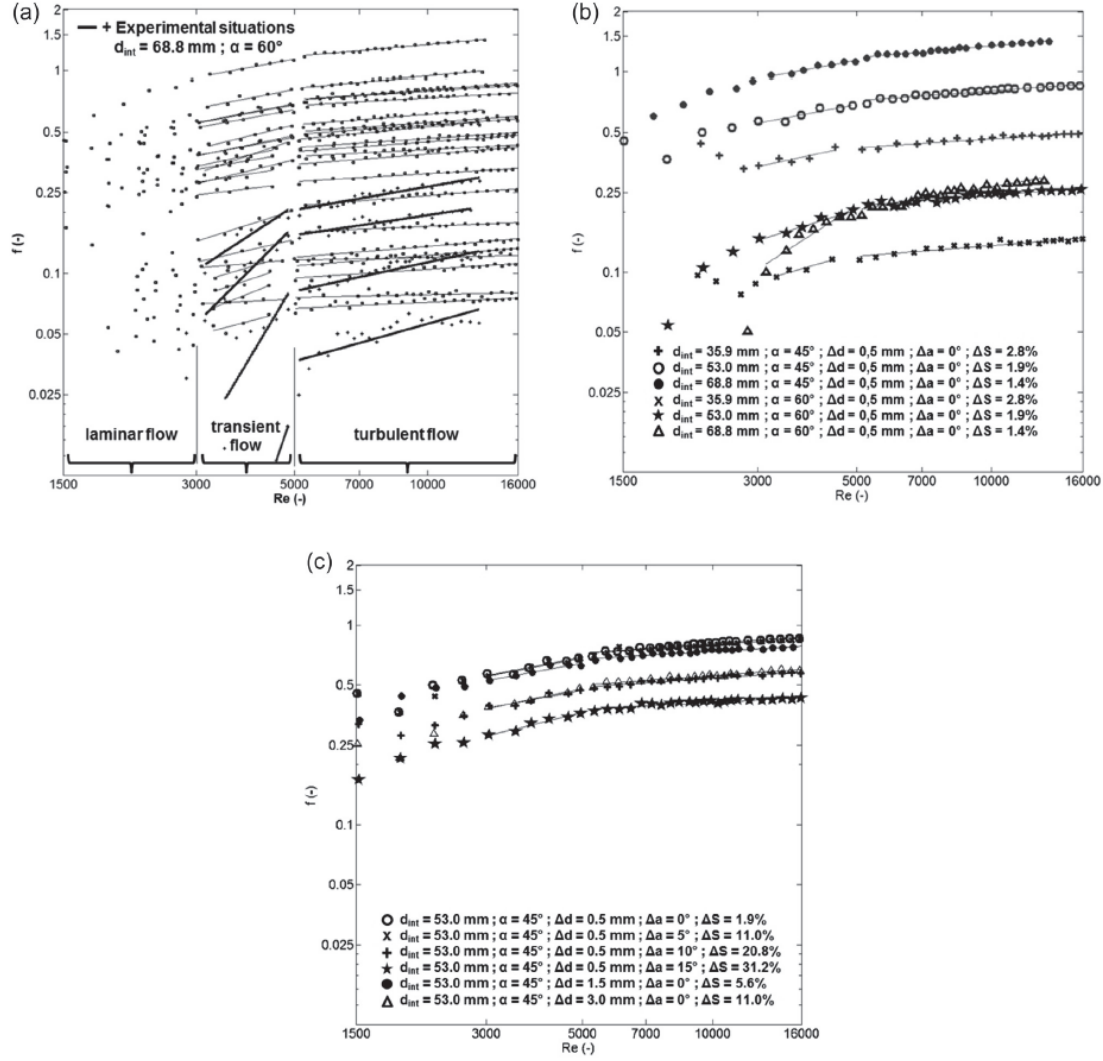


Fig. 6. a. Variation of friction factor for all the experimental situations. b. Variation of friction factor for experimental situations without surface-based dispersion. c. Variation of friction factor for the experimental situations with surface-based dispersions on $\varnothing 53.0 \text{ mm}$ tube and $\alpha = 45^\circ$.

Correlations for the Fanning friction factors $f^{(trans)}$ and $f^{(turb)}$ are written as Eqs. (17) and (18). Parameters $c^{(trans)}$ and $c^{(turb)}$ are expressed using Eq. (5); $R^2 = 0.97$.

$$\text{for } (d_{int}, \alpha, \Delta S) \in [35.9; 53.0] \times [45; 60] \times [1.4; 50.1] \\ \text{and for } (d_{int}, \alpha, \Delta S) \in [68.8] \times [45] \times [1.4; 30.7]$$

$$f^{(trans)} = c^{(trans)} \cdot Re^{0.490} \text{ for } 3000 < Re < 5000 \quad (17)$$

with

$$c^{(trans)} = -2.868 \cdot 10^{-03} + 7.508 \cdot 10^{-04} \cdot d_{int} - 1.059 \cdot 10^{-05} \cdot d_{int} \cdot \alpha \\ - 1.552 \cdot 10^{-05} \cdot d_{int} \cdot \Delta S + 1.983 \cdot 10^{-07} \cdot d_{int} \cdot \alpha \cdot \Delta S + 1.415 \cdot 10^{-04} \cdot \Delta S$$

$$f^{(turb)} = c^{(turb)} \cdot Re^{0.147} \text{ for } 5000 < Re < 16000 \quad (18)$$

with

$$c^{(turb)} = -6.810 \cdot 10^{-02} + 1.441 \cdot 10^{-02} \cdot d_{int} - 1.976 \cdot 10^{-04} \cdot d_{int} \cdot \alpha - 2.945 \cdot 10^{-04} \cdot d_{int} \cdot \Delta S + 3.622 \cdot 10^{-06} \cdot d_{int} \cdot \alpha \cdot \Delta S + 2.955 \cdot 10^{-03} \cdot \Delta S$$

4.3. Thermal performance factor: results

Table 2 surveys the evolution of the thermal performance factor (η) for each of the four angular surface-based dispersion values ΔS applied to the 45° and 60° turbulator for the 53.0 mm tube. The thermal performance factor values η_{3100} and η_{7000} are given for Reynolds numbers of 3100 (low value in transient state), and for 7000 in turbulent state.

Table 2

Evolution of the thermal performance factor for the experimental situations with angular surface-based dispersions on Ø 53.0 mm tube and $\alpha = 45^\circ$ or 60° .

Experimental situations	η_{3100}	η_{7000}
dint 53 mm; $\alpha=45^\circ$; $\Delta S=1.9\%$	3.30	1.60
dint 53 mm; $\alpha=45^\circ$; $\Delta S=11.0\%$	3.29	1.60
dint 53 mm; $\alpha=45^\circ$; $\Delta S=20.8\%$	3.32	1.61
dint 53 mm; $\alpha=45^\circ$; $\Delta S=31.2\%$	3.42	1.67
dint 53 mm; $\alpha=60^\circ$; $\Delta S=1.9\%$	3.76	1.79
dint 53 mm; $\alpha=60^\circ$; $\Delta S=17.3\%$	3.84	1.84
dint 53 mm; $\alpha=60^\circ$; $\Delta S=33.5\%$	4.06	1.99
dint 53 mm; $\alpha=60^\circ$; $\Delta S=50.1\%$	4.76	2.56

4.4. Performance of models

The plot of the Nusselt number predicted by Eq. (16) and the plot of the Fanning friction factor number predicted by Eqs. (17) and (18) as a function of the measured data are set out in Figures 7a and b respectively.

In Figure 7a, 94% of the 770 measurement data values are below the $\pm 10\%$ deviation for the predicted Nusselt number. Under 2% are in excess of $\pm 15\%$, but remain less than $\pm 21\%$.

In Figure 7b, 62% of the 770 measurement data values are below the $\pm 10\%$ deviation for the predicted friction factor. 15% of the values are found to be between $\pm 10\%$ and $\pm 15\%$, 6% between $\pm 15\%$ and $\pm 20\%$. Only 7% of the values are in excess of $\pm 40\%$ (close-up A, Fig. 8b); they all concern low friction factor values of between 0.05 et 0.084. We can also note

deviations of between $\pm 20\%$ and $\pm 30\%$ (close-up B, Fig. 8b) for 4% of the values, which correspond to the experimental situation where the diametral dispersion Δd is highest. Although the model provides a correct approximation of friction factor, it will need to be improved for these above-mentioned experimental situations.

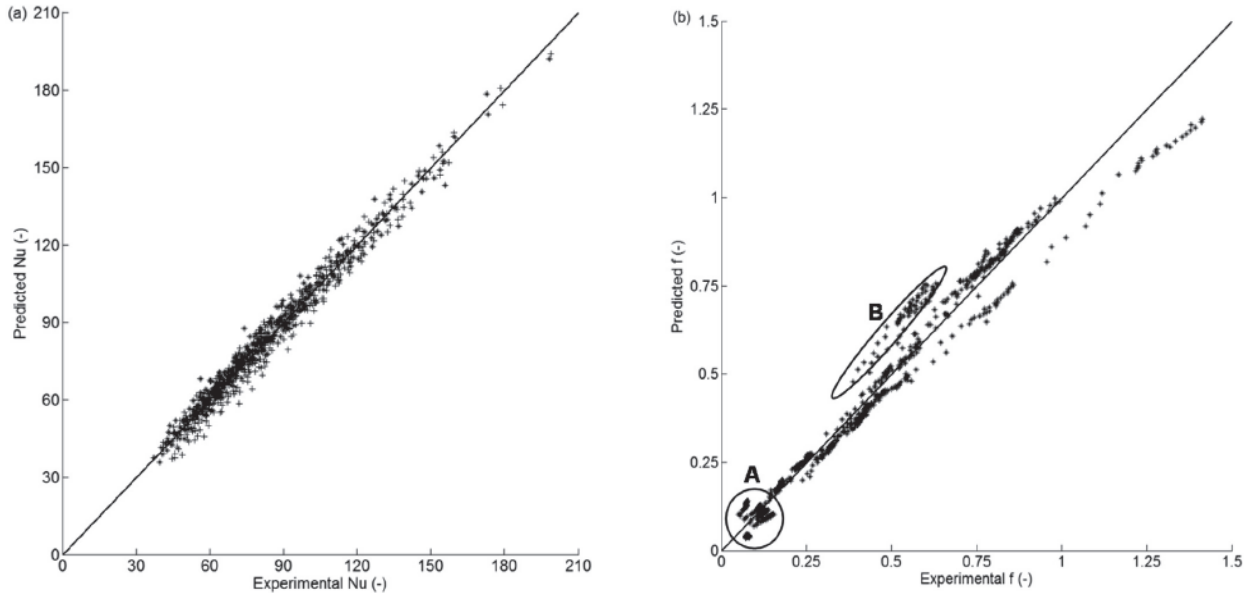


Fig. 7. Predicted data of (a) Nusselt number and (b) Fanning friction factor versus experimental data

4.5. Discussion on effect of turbulators

The effects of inserting turbulators into tubes, on heat transfer and pressure drop, are set out in Figures 5 and 6, and then modelled by the correlations in Eqs. (16), (17) and (18). We observed a non-negligible effect of the tube internal diameter on the Nusselt and Fanning number values. This effect is probably due to the introduction of geometric dispersions into our models, and to our inability to determine a variable achieving compliance with flow similarity. Nonetheless, using ΔS avoids the distinction between angular and diametral dispersion. Over the experimental region of the study, high Nusselt number levels were observed for a tube equipped with the ellipse-based turbulator. This compares to the values derived from correlations characterising plain tubes. For a Reynolds number of 3100 (low value in transient state), the Nusselt number estimate would be respectively around 10 for a plain tube, 80 and 100 for turbulators with a nominal bend angle of 60° and 45° . For a Reynolds number of 7000 in turbulent state, these Nusselt number values are 22, 125 and 160. Hence, depending on the flow states and the turbulator bend angle, the Nusselt number increases by 450 to 900%. These values are also high (around 1.3 to 2 times more) if they are compared with those found in the literature (Eiamsa-ard et al., 2013a; Eiamsa-ard et al.,

2010; Kongkaitpaiboon et al., 2010; Promvonge, 2008; Promvonge et al., 2014) on twisted tape or wire coil turbulators. In view of these results, we can contemplate the idea that the specific profile of the bent ellipses greatly intensifies the turbulence effects in the tube, whether in the centre or near the walls. This point is still to be verified experimentally or numerically. This phenomenon is intensified with the ellipse bend at a low angle α of close to 45° : indeed a 25 to 30% increase in the Nusselt number can be observed between two turbulators, with a 60° or 45° bend angle.

The geometric dispersions of manufacture lead to a fall in these Nusselt numbers of around 20 to 25% (for a ΔS value of 30%).

In Figures 6b and c, the Fanning friction factor values can be appraised. For experimental situations with no geometric dispersion, they are high; around 2 to 3 times greater than those in the literature (Eiamsa-ard et al., 2013a; Eiamsa-ard et al., 2010; Kongkaitpaiboon et al., 2010; Promvonge, 2008; Promvonge et al., 2014). These Fanning friction factor values provide significant indications to be exploited in the design or enhancement of heat exchangers in developing countries, where the use of additional pumping power may represent a technological barrier.

It is remarkable to note that the effect exerted by the surface-based dispersion on the friction factor is much greater than that exerted on the Nusselt number. By way of example, for the 53 mm tube, regardless of the turbulator bend angle or the operating state, an increase of 2 to 30% in the surface-based dispersion ΔS causes a 50% fall in the friction factor value, and of only 20% in the Nusselt number value.

The various thermal performance factor values that we can see in Table 2 are particularly high (3.3-4.7) in transient state ($Re=3100$). In turbulent state ($Re=7000$), these values (1.6–2.5) are close to those found in the literature (Hasanpour et al., 2014; Liu and Sakr, 2013). The turbulator with a bend angle of 60° is characterised by a better thermal performance factor. The geometric dispersions contribute to increasing this factor, regardless of the bend angle or state.

Hence the geometric dispersions, the consequences of lower-precision turbulator manufacture in developing countries, showed us that in future, deliberate introduction of a gap independent of the geometric dispersions could ultimately improve the performance of the exchanger. Thus the gap would become a performance adjustment variable.

5. Conclusions

An experimental study was conducted to assess the technical performance of a turbulator specifically designed for applications in developing countries. Based on elliptic shapes cut from sheet steel, the turbulators were installed in the round tubes of an experimental device to extract data and model heat transfer and air flow friction. The region covered by the study was deliberately restricted to low Reynolds number values (1700 to 8000 for heat transfer; 3000 to 16,000 for pressure drop) in order to ensure the closest possible resemblance to the air flow conditions of installations to be improved or designed in developing countries.

The best performing turbulators provide a big heat transfer enhancement in the tube (up to 900% for $Re = 7000$), but also big pressure drops. However, the impact study of the geometric dispersions due to the local manufacture in developing countries, applied to the various turbulators, could lead to less strict manufacturing tolerances being contemplated. Indeed, in view of the evolution of pressure drops as a function of heat transfer, the exchanger configurations, though with a slightly worse thermal performance, would be appropriate in developing countries, where the use of additional pumping power may prove complex and expensive.

Based on these models, a multicriteria analysis, taking into account the physical, technical, and economic aspects specific to developing countries will be conducted to guide the choices in the optimisation of heat exchangers and complete drying installations based on biomass combustion.

Acknowledgements

The authors would like to thank P. Thaunay and J.P. Fleuriot for designing and manufacturing the experimental device, H. Jeanmart, J.M. Meot and A. Briffaz for their relevant and constructive remarks about the present work.

Nomenclature	
<i>A</i>	heat transfer area, m ²
<i>a</i>	numerical parameter of Nusselt number correlation
<i>b</i>	numerical parameter of Nusselt number correlation
<i>C_p</i>	heat capacity, J kg ⁻¹ °C ⁻¹
<i>c</i>	numerical parameter of Fanning friction factor correlation
<i>d</i>	numerical parameter of Fanning friction factor correlation
<i>d_{int}</i>	internal diameter, mm
<i>f</i>	Fanning friction factor
<i>h</i>	heat transfer coefficient, W m ⁻² °C ⁻¹
<i>j</i>	axial gap, mm
<i>L</i>	length, mm
<i>l</i>	width, mm
<i>m</i>	mass flow rate, kg s ⁻¹
<i>Nu</i>	Nusselt number
NTU	number of transfer units
<i>Re</i>	Reynolds number
<i>T</i>	temperature, °C
<i>U</i>	mean axial velocity, m s ⁻¹
<i>X</i>	vector of physical variables of the thermal transfer system
<i>Δa</i>	angular dispersion, degree
<i>Δd</i>	diametral dispersion, mm
<i>ΔP</i>	pressure drop, Pa
<i>ΔS</i>	surface-based dispersion (%)
<i>Greek symbols</i>	
<i>α</i>	bending angle, degree
<i>ε_c</i>	cooling effectiveness
<i>μ</i>	dynamic viscosity, Pa s
<i>ρ</i>	density, kg m ⁻³
<i>λ</i>	thermal conductivity, W m ⁻¹ °C ⁻¹
<i>Subscripts</i>	
<i>a</i>	angular
<i>amb</i>	ambient air
<i>ai</i>	air inlet
<i>ao</i>	air outlet
<i>d</i>	diametral
<i>el</i>	ellipse
<i>p</i>	plain tube
<i>t</i>	turbulator
<i>trans</i>	transient

<i>tube</i>	tube
<i>turb</i>	turbulent
<i>w</i>	water

References

- Ahmadvand, M., Najafi, A.F., Shahidinejad, S., (2010). An experimental study and CFD analysis towards heat transfer and fluid flow characteristics of decaying swirl pipe flow generated by axial vanes. *Meccanica* 45(1), 111-129.
- Bergles, A.E., (2000). 4.15 Heat Transfer Enhancement, in: Kreith, F. (Ed.), *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press, USA, p. 408.
- Dabat, M.H., Blin, J., Rivier, M., (2010). Facing the challenge of energy and food in Burkina Faso, *Proceeding of the Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food Symposium, Montpellier, France*, p. 7.
- de Janvry, A., Sadoulet, E., (2000). Rural poverty in Latin America: Determinants and exit paths. *Food Policy* 25(4), 389-409.
- Demirbas, A.H., Demirbas, I., (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management* 48(8), 2386-2398.
- Dewan, A., Mahanta, P., Raju, K.S., Kumar, P.S., (2004). Review of passive heat transfer augmentation techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 218(7), 509-527.
- Durmuş, A., (2004). Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators. *Energy Conversion and Management* 45(5), 785-796.
- Durmuş, A., Durmuş, A., Esen, M., (2002). Investigation of heat transfer and pressure drop in a concentric heat exchanger with snail entrance. *Applied Thermal Engineering* 22(3), 321-332.
- Eiamsa-ard, S., Nanan, K., Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., (2013a). Thermal Performance Evaluation of Heat Exchanger Tubes Equipped with Coupling Twisted Tapes. *Experimental Heat Transfer* 26(5), 413-430.
- Eiamsa-ard, S., Promvonge, P., (2005). Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy* 78(4), 483-494.
- Eiamsa-ard, S., Seemawute, P., Wongcharee, K., (2010). Influences of peripherally-cut twisted tape insert on heat transfer and thermal performance characteristics in laminar and turbulent tube flows. *Experimental Thermal and Fluid Science* 34(6), 711-719.
- Eiamsa-ard, S., Somkleang, P., Nuntadusit, C., Thianpong, C., (2013b). Heat transfer enhancement in tube by inserting uniform/non-uniform twisted-tapes with alternate axes: Effect of rotated-axis length. *Applied Thermal Engineering* 54(1), 289-309.
- Guo, J., Fan, A., Zhang, X., Liu, W., (2011). A numerical study on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow in a circular tube fitted with center-cleared twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences* 50(7), 1263-1270.
- Hasanpour, A., Farhadi, M., Sedighi, K., (2014). A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 55(0), 53-62.

Hazell, P., Pachauri, R., (2006). *Bioenergy and agriculture: promises and challenges*. IFPRI Washington, DC.

Jacquet, P., Pachauri, R.K., Tubiana, L., (2012). *Regards sur la Terre: Développement, alimentation, environnement : changer l'agriculture ?* Armand Colin.

Kongkaitpaiboon, V., Nanan, K., Eiamsa-ard, S., (2010). Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37(5), 568-574.

Lestina, T., Serth, R.W., (2010). *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb*. Elsevier Science.

Liu, S., Sakr, M., (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19(0), 64-81.

Madhlopa, A., Ngwalo, G., (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. *Solar Energy* 81(4), 449-462.

Murthy, M.V.R., (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(4), 835-844.

Promvongse, P., (2008). Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators. *Energy Conversion and Management* 49(11), 2949-2955.

Promvongse, P., Eiamsa-ard, S., (2006). Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator. *Energy Conversion and Management* 47(18–19), 2867-2882.

Promvongse, P., Eiamsa-ard, S., (2007). Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34(1), 72-82.

Promvongse, P., Koolnapadol, N., Pimsarn, M., Thianpong, C., (2014). Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings. *Applied Thermal Engineering* 62(1), 285-292.

Promvongse, P., Tamna, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., (2015). Thermal characterization in a circular tube fitted with inclined horseshoe baffles. *Applied Thermal Engineering* 75(0), 1147-1155.

Quirante, T., (2012). Modelling and numerical optimization methods for decision support in robust embodiment design of products and processes. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.

Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Ganić, E.N., (1985). *Handbook of heat transfer fundamentals*. McGraw-Hill.

Şahin, H.M., Baysal, E., Dal, A.R., (2013). Experimental and numerical investigation of thermal characteristics of a novel concentric type tube heat exchanger with turbulators. *International Journal of Energy Research* 37(9), 1088-1102.

Saraç, B.A., Bali, T., (2007). An experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of decaying swirl flow through a circular pipe with a vortex generator. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32(1), 158-165.

Shah, R.K., Bell, K.J., (2000). 4.3 Heat Exchangers, in: Kreith, F. (Ed.), *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press, USA, p. 50.

Sharma, A., Chen, C.R., Vu Lan, N., (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6–7), 1185-1210.

Sivashanmugam, P., Nagarajan, P.K., (2007). Studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with right and left helical screw-tape inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32(1), 192-197.

Sivashanmugam, P., Suresh, S., (2007). Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science* 31(4), 301-308.

Suryanarayana, N.E., (2000). 3.2.3 Forced Convection-Internal Flows, in: Kreith, F. (Ed.), *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press, USA, p. 47.

Webb, R.L., (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer*. Taylor & Francis.

La qualité de prédiction des modèles de transfert thermique et de perte de pression a été évaluée dans l'article n°1. Dans les deux cas, les modèles de régression sont appréciés par de hautes valeurs du coefficient de détermination R^2 , respectivement à 0.96 et 0.97.

Les valeurs du coefficient de transfert de chaleur par convection du fluide à l'intérieur du tube et celle du facteur de friction (lié aux pertes de charge) sont bien identifiées. Ainsi, pour un exemplaire de turbulateur défini, la valeur de perte de charge imposée au circuit des fumées est calculée. Elle constitue un des premiers indicateurs de performance du procédé qui détermine si l'évacuation des fumées peut se conduire en convection naturelle (effet cheminée) ou si elle nécessite un extracteur de fumée.

Les expérimentations font apparaître une forte intensité du transfert thermique mais aussi des pertes de charge importantes avec des configurations nominales des turbulateurs (jeu minimal entre le turbulateur et l'intérieur du tube). Par contre, un accroissement des dispersions géométriques (augmentation du jeu entre turbulateur et face interne du tube) amène une diminution conséquente des pertes de charge sans impacter en proportion la qualité du transfert thermique. Cette évolution est exprimée en Tableau 2 de l'article n°1 avec l'agrégation des deux indicateurs de performance en un indicateur unique, le facteur de performance thermique. Cet indicateur prend, pour des dispersions importantes, des valeurs remarquables comparativement avec celles rencontrées dans la bibliographie. Ce constat ouvre des perspectives intéressantes pour l'optimisation multicritère du procédé. En fonction des objectifs affichés (efficacité énergétique, fabrication locale, ...), ce qui a été évalué en termes de dispersions géométriques pourrait être traduit en termes de tolérances géométriques de fabrication ; celles-ci seraient maîtrisées par le concepteur en termes d'incidence sur les performances du procédé, en lien avec ses connaissances du secteur équipementier.

3.2. Élaboration d'un simulateur de procédé en vue d'une optimisation multiobjectif. Application au procédé de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie dans un contexte de pays en développement. (Article n°2).

Au cours du travail précédent (Article n°1), des modèles de transfert de chaleur et de pertes de pression ont été construits au niveau de l'échangeur tubulaire sur la base d'une étude expérimentale. Ces modèles sont associés à de nouveaux modèles afin d'élaborer un simulateur global du procédé couplant l'échangeur de chaleur au séchoir à produits granulaires.

Les nouveaux modèles intégrés dans le simulateur, sont présentés dans cet article. Certaines corrélations proviennent de publications ou d'ouvrages qui font référence dans le domaine. Certains autres modèles ont été construits à partir de la littérature et adaptés au code numérique du simulateur : numérisation et traitement de courbes pour les calculs de flux thermique et de perte de pression au niveau de l'échangeur sur le circuit de l'air de séchage, exploitation des données d'un constructeur de ventilateur pour relier débit volumique d'air (ou de fumées) et pression admissible sur un ventilateur selon ses variables de dimensionnement, ...

De nouvelles expérimentations ont été menées sur le séchoir pilote CSec-T, spécialement mis en place pour cette étude, afin de construire et de valider les modèles de pertes de charge et de séchage du produit « réel » disposé sur claies.

Le simulateur permet d'étudier l'impact des variables d'entrée (variables de conception) sur le comportement du procédé. Huit variables de conception et leur domaine de variation sont retenus. Les performances du procédé sont traduites par huit variables d'observation.

Le développement de ce simulateur et son aptitude à générer des solutions de conception performantes sont proposés dans l'article qui suit « *Development of a process simulator with a view to multi-objective optimization. Application to a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy* » et soumis au journal « *Innovative Food Science and Emerging Technologies* ».

Manuscript Details

Manuscript number	IFSET_2016_161
Title	Development of a process simulator with a view to multi-objective optimization. Application to a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy.
Article type	Research Paper

Abstract

This work describes the development of a comprehensive process simulator, as an integral part of an original design-optimization approach for a food industry process. This process is based on coupling a biomass energy conversion unit to a cereal-based products dryer. Models of heat & mass transfer and pressure losses, derived from previous studies or specially developed for this one, are built into a comprehensive simulation tool. This is able to consistently, accurately and predict the behavior of a heat exchanger, with computation times suitable for optimization purposes, as well as to simulate drying of agglomerated products. The process performance is quantified by means of indicators known as observation variables, based on which six design situations are assessed. In this way, the usefulness of this sort of simulator as a decision-making assistance tool is demonstrated. It will be integratable into a multi-objective optimization environment, for the purpose of designing a process tailored to the context of developing countries.

Keywords Food process simulator; Food process design; Multi-objective analysis; Cereal-based products drying; Biomass energy; Developing countries

Corresponding Author Michel RIVIER

Order of Authors Michel RIVIER, Antoine Collignan, Jean Michel Méot, Martial Madoumier, Patrick Sébastien

Submission Files Included in this PDF

File Name [File Type]

Cover Letter.docx [Cover Letter]
 Rivier et al.docx [Manuscript File]
 List of figure captions.docx [Figure]
 Figure 1.pptx [Figure]
 Figure 2.pptx [Figure]
 Figure 3.pptx [Figure]
 Figure 4.pptx [Figure]
 Figure 5.docx [Figure]
 Figure 6.pptx [Figure]
 Figure 7.pptx [Figure]
 Figure 8.docx [Figure]
 Figure 9.pptx [Figure]
 Highlights.docx [Highlights]

To view all the submission files, including those not included in the PDF, click on the manuscript title on your EVISE Homepage, then click 'Download zip file'.

**Development of a process simulator with a view to multi-objective optimization.
Application to a process for drying cereal-based products in developing
countries using bioenergy.**

Michel Rivier ^{a,*}, Antoine Collignan ^b, Jean-Michel Méot ^a, Martial Madoumier ^b, Patrick Sébastien ^c

^a *Cirad, UMR 95 Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, TA B-95/15, 73, rue JF Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France*

^b *Montpellier SupAgro, UMR 95 Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, 1101 avenue Agropolis, CS 24501, 34093 Montpellier cedex 5, France*

^c *Université de Bordeaux, I2M, UMR CNRS 5295, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence cedex, France*

* Corresponding author.

Address: Cirad, UMR 95 Qualisud, 73, rue Jean François Breton, TA B-95/15, 34398 Montpellier cedex 5, France, Tel.: + 33 467 61 5719

E-mail address: michel.rivier@cirad.fr (M. Rivier)

This research did not receive any specific grants from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Abstract

This work describes the development of a comprehensive process simulator, as an integral part of an original design-optimization approach for a food industry process. This process is based on coupling a biomass energy conversion unit to a cereal-based products dryer. Models of heat & mass transfer and pressure losses, derived from previous studies or specially developed for this one, are built into a comprehensive simulation tool. This is able to consistently, accurately and predict the behavior of a heat exchanger, with computation times suitable for optimization purposes, as well as to simulate drying of agglomerated products. The process performance is quantified by means of indicators known as observation variables, based on which six design situations are assessed. In this way, the usefulness of this sort of simulator as a decision-making assistance tool is demonstrated. It will be integratable into a multi-objective optimization environment, for the purpose of designing a process tailored to the context of developing countries.

Keywords

Food process simulator
Food process design
Multi-objective analysis
Cereal-based products drying
Biomass energy
Developing countries

Highlights

- Simulation tool appropriate for testing design situations is assessed
- Process combines thermal power generation and a dryer
- Models of heat & mass transfer and pressure losses are developed
- Simulation tool provides performance indicators
- Simulation tool is ready to use for multi-objective optimization

1. Introduction

In the industrial food processing sector, the process design approaches conventionally adopted are generally limited to modeling unit operations (Banga et al., 2003; Trystram, 2012) or seeking high-performance operating conditions (García-Moreno et al., 2014; Gergely et al., 2003; Lespinard et al., 2015), taking few criteria into consideration and with no comprehensive optimization strategy. Indeed, besides food quality or process efficiency, they neglect to consider even essential criteria such as habits of processors and consumers, energy availability, and contexts of local manufacturing and use of equipment.

Hence to achieve the sustainability objectives for food processes, a stringent scientific and technical design approach must be adopted. Figueira et al. (Figueira et al., 2005) use multi-criteria decision analysis to survey numerous tools and methods, as well as applications in the sectors of finance, telecommunications or energy. Yet in the literature, there are only very few articles which have an approach in the field of process design, in particular for the food industry. More recently, an integrated, original and innovative method, particularly tailored to product and process design and multi-objective optimization, the “Observation-Interpretation-Aggregation” method (OIA), has been put together progressively via various research activities. It has mainly been applied in industrial engineering, and the fields of aeronautics (Collignan, 2011), renewable energy (Semassou et al., 2013) and most recently in food process engineering (Raffray et al., 2015), though without being sufficiently explicit in the latter field. With the benefit of ease of access to increasingly high-performance IT tools, the OIA method is able to address increasingly complex multiple objective design problems. It has a three-step structure: “Observation” of the process behavior using models, “Interpretation” of the model output variables (performance variables) in the form of satisfaction indexes and finally “Aggregation” of these indexes into a single indicator in order to optimize the process.

Furthermore, the unit operations that make up the food industry processes use substantial material and energy resources, and generate pollution, which hinders the sustainable development objectives of the industries. These problems are particularly weighty in the context of developing countries, where access to water, energy and raw materials, as well as equipment manufacture and maintenance, are no easy matter, and represent major obstacles to the development of these countries (Dabat et al., 2010; de Janvry and Sadoulet, 2000).

Recently, the environmental efficiency of processing systems took on particular importance during the 2015 Paris Climate Conference. Thus increased generation capacity of renewable energies and energy savings in processes are becoming priorities (Kyte et al., 2015).

This issue can be illustrated perfectly by the need to design a process coupling a biomass energy conversion unit to a cereal-based products dryer in a context of development in Sub-Saharan Africa. In this region where cereal production and consumption (Kearney, 2010), as well as postharvest losses (Affognon et al., 2015) are high, the development of drying units is a booming field. Yet the dryers available are characterized by low energy efficiency (Boroze et al., 2014), though this operation is classified as the most energy-intensive of this food processing sector (Kerkhof and Coumans, 2002). Similarly, the facilities encountered for converting biomass into usable energy also exhibit limitations (low efficiency of the heat generators and heat exchangers).

The present study also sets out to implement the “Observation-Interpretation-Aggregation” (OIA) method in the process of coupling a biomass energy conversion unit to a cereal-based products dryer, initially focusing on the Observation step. This article firstly presents the process and its functions. It then explains the design and control variables (model input variables) and the performance variables (model output variables), which are necessary with a view to process design. Then the models developed to be integrated into a comprehensive simulation process simulation tool are presented. A programming organigram is proposed, and a simulator is developed in order to assess the performance of various design situations. The suitability of this simulation tool for use with a view to optimization purposes is assessed. Finally, the critical analysis of several design situations shows the usefulness of this sort of simulator as a design assistance tool for industrial food processes.

2. Functional description of process

The process combining a biomass energy conversion operation with a dryer is presented in Fig. 1.

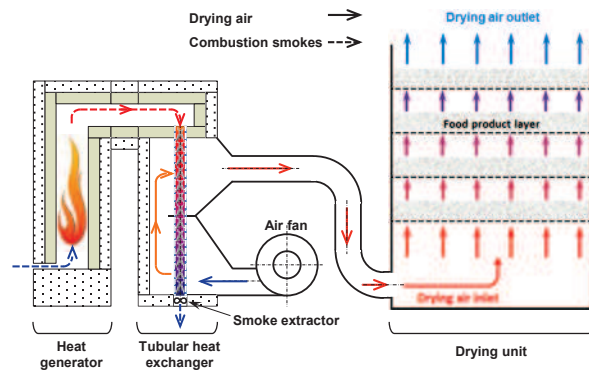


Fig. 1. Schematic representation of the global installation.

Three modules perform the main functions of heat generation, heat transfer and drying:

The heat generator, based on combustion of locally available biomass, generates thermal energy in the form of combustion smoke. The temperature value of the smoke covers a wide domain, in order to take into account the diversity of the generators encountered.

The tubular heat exchanger (Fig. 2) transfers the thermal energy from the combustion smoke to a second fluid (air flow for the dryer). The principle of a tubular gas-air heat exchanger was favored for application in developing countries. This type of heat exchanger is easier to manufacture, as the materials are available and there is good command of the manufacturing techniques locally. Round tubes (①) form the exchange surface separating the two fluids, in order to prevent any contact between the smoke and food product.

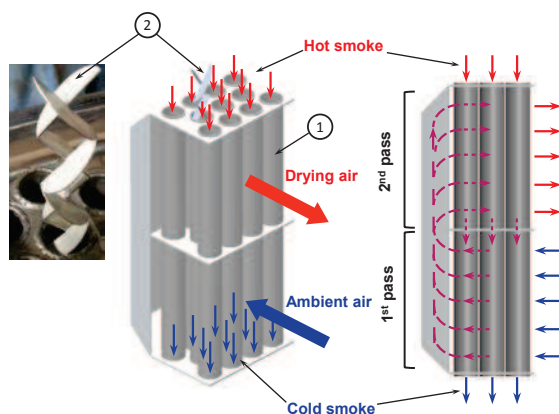


Fig. 2. Tubular heat exchanger fitted with an elliptical turbulator.

Three different diameters were selected, corresponding to the three tube profiles most commonly used in West and Central Africa. Turbulators (②) can be installed in each of the tubes. Indeed, the installation of turbulators in heat exchanger tubes has been proven to contribute to improving thermal performance (Dewan et al., 2004). In addition to conventional performance factors of heat exchangers (heat transfer and flow friction) (Webb, 1981; Webb, 2005), the design of a turbulator for developing countries must take into account the host of highly specific constraints. These relate to local availability of materials, local techniques and manufacturing tooling. Hence Rivier et al. (2015) proposed and characterized an original turbulator profile (②), based on an elliptical shape.

The combustion smoke enters in the upper part of the tubes, at the outlet of the biomass generator. It flows through the heat exchanger tubes, before being evacuated in the lower part, either via a stack effect or with the assistance of a smoke extractor. This smoke circuit represents the “primary” circuit.

The “secondary” circuit is the one where the ambient air enters the lower part of the heat exchanger with the assistance of an air fan. The air flow is heated by contact with the outer surface of the tube bundle in two successive passes (in the lower part and then the upper part). The heated air (drying air) is then sent to the bottom part of the dryer.

This is considered a counterflow heat exchanger.

The semi-continuous packed bed dryer receives from the heat exchanger the hot air flow, which dries the products by passing through the various layers. The evaporating capacity of this air is harnessed to dehydrate the product until it reaches a stable water content. The CSec-T dryer (Fig. 3) was developed specifically for drying processed agglomerated products (Méot et al., 2007). Its optimization is still ongoing, and the present work contributes to this objective.

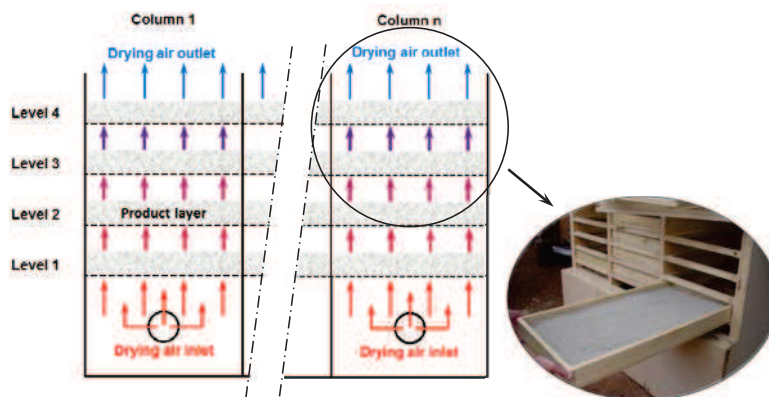


Fig. 3. Schematic representation of the packed bed dryer CSec-T and its corresponding pilot.

The dryer design is based on the principle of flat-bed dryers, forced convection dryers commonly used for drying raw cereals (Proctor, 1994). The product is arranged in layers a few centimeters thick, on stacked trays. The hot air flow arriving from the heat exchanger passes through the trays from bottom to top. When the product in the bottom tray is dry, the tray is removed, and then the trays above are lowered by one level; and a new top tray is then reloaded with wet product.

Preliminary validation tests have led to a dryer configuration with four stacked trays. Indeed, in steady state, the air becomes saturated or near-saturated at the outlet of the fourth tray. Also, the product in any additional trays would not dry, since it would encounter air saturated with water, and also provide conditions favorable for microbial development (molds and fermentation flora).

The number of columns is determined by the desired production capacity. A three-column dryer configuration, suited to the characteristics of units in West Africa, was adopted for our study.

Coupling the biomass energy conversion unit to the dryer encompasses the process as a whole, combining three unit operations (heat generation, heat exchange and drying). These operations are controlled by a host of variables, and their performance is assessed based on several criteria. Hence, given the complexity of the system, the modeling tool appears necessary in order to construct a simulator able to assess the performances of the process as a whole.

3. Modeling the process

In this paragraph, the design variables and control variables of the process are presented, as well as the performance variables, also known as observation variables. Then, the physical models associated with each unit operation are developed.

3.1. Design variables, control variables and domains

The design and control variables presented in Tables 1 and 2 are those affecting the process sizing and behavior in a specific context of manufacture (locally made) and use in a developing country (West Africa). The choice of these variables, as well as their variation domain, was set and limited based on the expertise of the designers and users. Together, these domains define the process design situation search space.

Table 1

List of the design variables.

Design variables	Unit	Variation domain	Consequences if outside domain
Tube external diameter (d)	mm	{42.4; 60.3; 76.1}	Heat exchanger cannot be manufactured locally
Length of tubes (L_{tube})	m	[0.5; 1.2]	Exchange surface area insufficient (<0.5) Geometric inconsistency with the generator (>1.2)
Number of tubes ($N_{b\ tube}$)	-	[3; 25]	Exchange surface area insufficient (<3) Heat exchanger overweight (>25)
Bend angle of turbulator (α)	degree	{45; 60}	Pressure drop excessive, and hard to manufacture locally (<45) Heat transfer insufficient (>60)
Free sectional flow between turbulator and tube (ΔS)	%	[10; 50]	Cannot be manufactured locally (<10) Heat transfer insufficient (>50)
Smoke temperature (T_{ip})	°C	[400; 800]	Low heat transfer (< 400) Deterioration of heat exchanger materials (> 800)
Radius of smoke extractor impeller (R_p)	m	[0.025; 0.05]	Flow insufficient, and hard to manufacture (<0.025) Oversized (>0.05)
Radius of fan impeller (R_s)	m	[0.05; 0.15]	Flow insufficient, and hard to manufacture (<0.05) Oversized (>0.15)

The process of combining the biomass energy conversion with the dryer was designed for manufacture and use in developing countries. This specific context required consideration of highly specific design variables, such as the dimensions of the tubes selected for manufacturing the heat exchanger. The selected diameters ($d = 42.4, 60.3$ and 76.1 mm) are those most commonly used in West Africa. Their length (L_{tube}) provides a sufficient exchange surface area (> 0.5 m), without exceeding 1.2 m, so that the heat generator and heat exchanger can be associated in the same module. The lowest number of tubes ($N_{b\ tube}$) is also determined by obtaining a minimum exchange surface area, and the highest number by estimating the maximum allowable weight, to ensure that the heat exchanger is transportable and affordable.

Two variables characterize the elliptic turbulators and have a major impact on exchanger performance: α , the ellipse bend angle and ΔS , the free sectional flow between turbulator and tube due to the manufacturing geometrical dispersions (Rivier et al., 2015). For an angle of less than 45° , it is very difficult to bend the sheet, and the pressure drop is high. Above 60° , the heat transfer rate is excessively impaired. Measurements made on turbulators manufactured in developing countries showed that the geometric manufacturing tolerances

to obtain a ΔS value of less than 10% are too strict, and cannot be achieved with local manufacturing tools and techniques. Above 50%, the heat transfer rate is excessively impaired.

The smoke temperature range at the heat exchanger inlet takes into account the diversity of the biomass heat generators. Below 400°C, biomass combustion is considered poor, and above 800°C the heat exchanger may be damaged (expansion, damage to welds, etc.).

The fan impeller radii domain values were selected for ease of local manufacture and the ability to generate fluid flows in accordance with the requirements of the dryers defined by the experts.

The process control variables were also set (Table 2) according to the production conditions in developing countries. Hence, the temperature (T_{is}) and relative humidity of the ambient air (HR_{is}) were set respectively at 25°C and 50%. The initial dry based moisture content (W_{db_init}) of the agglomerated product was 0.82 kg/kg. The angular velocity (ω) of the electric motors fitted on the fans was 298.5 rad/s (2850 rpm), which corresponds to the most commonly available motors in developing countries.

As specified in paragraph 2, for the drying unit, the number of columns (N_{b_col}) and trays per column (N_{b_tray}) were 3 and 4 respectively. The tray dimensions, length and width, were defined to aid handling and adhere to a standard format for the processors: 900 x 600 mm (external dimensions) i.e. an active surface area of approximately 0.45 m² (A_{tray}). They weighed 3 kg. According to French standard NF X 35-109 (2011), the carrying load limit for an operator is 10 or 12.5 kg, depending on age. The wet product mass per tray (M_{prod}) was therefore set at 7 kg, i.e. with a product layer thickness of 28 mm.

Table 2

List and value of the control variables associated with the application context.

Context variables	Unit	Value
Ambient air temperature (T_{is})	°C	25
Ambient air relative humidity (HR_{is})	%	50
Initial dry basis moisture content (W_{db_init})	kg/kg	0.82
Fan angular velocity (ω)	(rad/s)	298.5
Number of columns (N_{b_col})	-	3
Number of trays per column (N_{b_tray})	-	4
Product mass per tray (M_{prod})	kg	7
Tray area (A_{tray})	m ²	0.45

3.2. Observation variables

The observation variables presented in detail in Table 3 are the process performance indicators. For each one, a desirable domain is specified, with the predicted impacts in case of non-compliance.

Table 3

List of the observation variables.

Design objectives	Observation variables	Desirable domain	Consequences if outside domain
Product quality	Drying air temperature (T_{os})	Below 60°C	Damage to product
Non-fluidized bed	Air velocity through product (U_{prod})	Below 0.3 m s ⁻¹	Product disturbed (fluidization)
Energy performance (constraint)	Primary circuit pressure drop (ΔP_p)	Below 80 Pa	High-tech smoke extractor
Energy performance (constraint)	Mechanical power of secondary circuit fan (MPw)	Below 1 kW	Electrical energy unavailable
Energy performance (functional)	Unit efficiency (Eff)	Above 36%	High biomass consumption
Production performance (functional)	Productivity (Prod)	Above 20 kg h ⁻¹	Not suited to company characteristics
Anti-fouling and equipment service life	Smoke outlet temperature (T_{op})	Above 120°C	Condensation
Equipment service life	Smoke outlet temperature (T_{op})	Below 220°C	Damage to smoke extractor
Local manufacture in developing countries	Exchanger steel mass (M_{exch})	Below 50 kg	Cost of heat exchanger. Hard to transport

The first two variables concern the food product itself. The drying air temperature (T_{os}) must not exceed 60°C, in order to prevent starch gelatinization and color alteration (browning). In addition, this type of agglomerated product must not be subjected to an air velocity (U_{prod}) of more than 0.3 m/s. Above that, the product bed becomes fluidized, with preferential openings and air passages created in the layer.

The primary circuit pressure drop (ΔP_p) range led us to propose stack effect or forced convection technical solutions.

The mechanical power (MPw) required for the secondary circuit fan must be less than 1 kW, in order to ensure power availability on the local power network, i.e. a current of less than 6A at a voltage of 220V.

The process efficiency (Eff) was evaluated at steady state for duration Δt , as the ratio between the energy required to evaporate the water in the product and the energy supplied. According to Boroze et al. (2014), the highest energy efficiency found on a direct gas combustion dryer in West Africa is 36%. The minimum objective was to achieve this value for the process as a whole.

The dried product flow (Prod) must be at least 20 kg/h, in order to match local production capacities.

To prevent a condensation phenomenon, the smoke temperature at the primary circuit outlet (T_{op}) must be at least 120°C. It must not exceed 220°C, to avoid damaging the smoke extractor.

For price and handling reasons, the mass of the heat exchanger (M_{exch}) must not exceed 50 kg.

3.3. Tubular heat exchanger: pressure losses and heat transfer models

The intensity of heat transfer between the two circuits, primary and secondary, is dependent on: (i) the air flows generated respectively by the smoke extractor and the drying air fan; and (ii) the configuration of the circuits. Hence for each of the two circuits, a “flow rate / pressure” curve characterized the fan, and an energy dissipation curve represents the pressure drop induced by the circuit configuration as a function of volume flow rate. Hence a circuit duty point, the intersection between these two curves, was sought for each of these two circuits.

Based on information supplied by a fan manufacturer (“Sodeca” Co.), for each fan, a polynomial regression model linking the allowable pressure drop ΔP as a function of the fluid volume flow rate $\dot{V}$ to the design variables, radius R and impeller angular velocity ω is expressed as follows:

$$\Psi = a \cdot \varphi^3 + b \cdot \varphi^2 + c \cdot \varphi + d$$

with

$$\Psi = \frac{\Delta P}{\omega^2 \cdot R^2} \quad \text{and} \quad \varphi = \frac{\dot{V}}{\omega \cdot R^3} \tag{1}$$

Hence both the fan performance curves were obtained for values of the variables R and ω specific to each of the two fans; a, b, c and d (Tables 4 and 5) being the numerical parameters of the curve correlations, specific for each of the two fan models (smoke extractor and drying air fan).

Primary circuit

The numerical parameters a_p , b_p , c_p and d_p of the smoke extractor performance curve are presented in Table 4.

Table 4

Numerical parameters of smoke extractor performance curve.

	a_p	b_p	c_p	d_p
Smoke extractor	$-8.75 \cdot 10^{-2}$	$1.34 \cdot 10^{-1}$	$-1.49 \cdot 10^{-1}$	$9.05 \cdot 10^{-1}$

The energy dissipation induced by installing elliptic shaped turbulators in the heat exchanger tubes was characterized by the friction factor calculated from a previous model (Rivier et al., 2015) then, the pressure drop is calculated using the Darcy-Weisbach equation. Ultimately, the value of this pressure drop on the primary circuit is dependent on the smoke volume flow rate and the following design variables: tube diameter d_{int} , tube length L_{tube} and number of tubes $N_{b\ tube}$, ellipse turbulator bend angle α and the percentage ΔS .

Hence according to the design variables (smoke extractor and turbulator) specific to each design situation, the primary circuit duty point, the intersection between the smoke extractor performance curve and the primary circuit energy dissipation curve, can be calculated. An example is presented in Fig. 4:

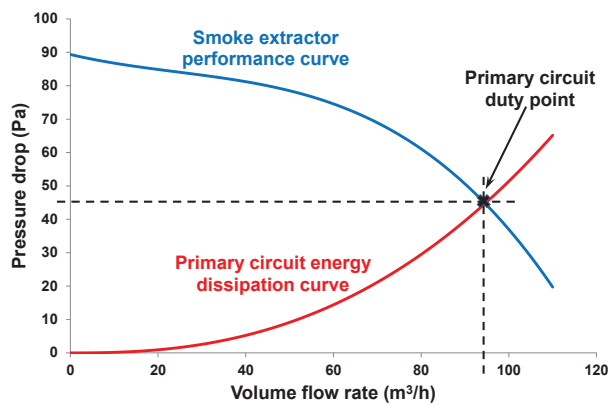


Fig. 4. Primary circuit duty point determination.

Hence, the smoke volume flow rate was determined in order to be able to evaluate the internal heat transfer coefficient h_{int} :

$$h_{int} = \frac{Nu_p \cdot \lambda_{ip}}{d_{int}} \quad (2)$$

Nu_p is calculated from a previous model (Rivier et al., 2015).

Secondary circuit

The numerical parameters a_s , b_s , c_s and d_s of the drying air fan performance curve are presented in Table 5.

Table 5

Numerical parameters of drying air fan performance curve.

	a_s	b_s	c_s	d_s
Drying air fan	$-5.40 \cdot 10^{-3}$	$-4.78 \cdot 10^{-2}$	$-1.99 \cdot 10^{-1}$	1.61

The energy dissipation is associated with flow across the tube bundle of the heat exchanger and the food product positioned on the dryer trays.

The selected geometric configuration (Fig. 5) for the heat exchanger was a staggered tube bundle arrangement in the form of an equilateral triangle.

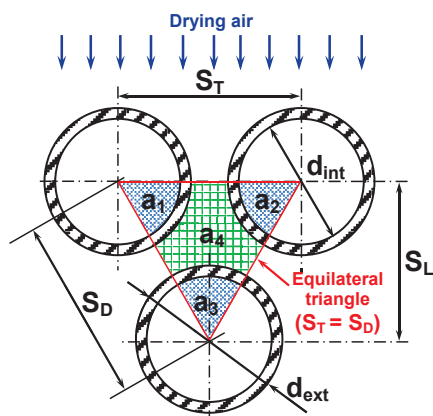


Fig. 5. Heat exchanger tube bundle arrangement.

According to a manufacturing rule conventionally used in heat exchanger design, surface areas a_1 , a_2 , a_3 and a_4 are linked by Eq. (3) such that the sum of the smoke passage surface areas a_1 , a_2 and a_3 is the same as the drying air passage surface area a_4 .

$$a_4 = a_1 + a_2 + a_3 \quad (3)$$

This equality led to the following equation defining S_T :

$$S_T = S_D = \sqrt{\frac{\pi \cdot (d_{ext}^2 + d_{int}^2)}{2 \cdot \sqrt{3}}} \quad (4)$$

According to the literature (Bergman et al., 2011), the pressure drop generated by the air flow (of density ρ_s) across the tube bundle (N_L rows of tubes) is expressed as follows:

$$\Delta P_{bundle} = N_L \cdot \left(\frac{\rho_s \cdot U_{max}^2}{2} \right) \cdot f_s \quad (5)$$

with

$$U_{max} = \frac{S_T}{S_T - d_{ext}} \cdot U \quad (6)$$

U_{max} : maximum velocity occurring within the tube bundle

U : mean velocity at the heat exchanger pass inlet section

f_s : friction factor

According to Bergman et al. (2011), the friction factor values f_s are expressed as a function of the Reynolds number (Re_{max}). The curve corresponding to the ratio S_T/d_{ext} of our configuration was digitized, and expressed as follows:

$$\log f_s = 0.12 \cdot x^3 - 2.11 \cdot x^2 + 14.39 \cdot x + 85.62 \cdot x^{-1} - 68.94 \cdot x^{-2} + 21.46 \cdot x^{-3} - 49.12 \quad (7)$$

with

$$x = \log Re_{max}$$

For the total pressure drop calculation, the value calculated in Eq.(5) was multiplied by two, to take into account the two exchanger passes (see Fig. 2).

The pressure drop across the food product layer depends on the air flow, as per Eq.(8) calculated experimentally:

$$\Delta P_{layer} = 2.29 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{is}}{3} \right)^2 + 1.37 \cdot 10^{-1} \cdot \left(\frac{\dot{V}_{is}}{3} \right) - 3.4 \quad (8)$$

with $\dot{V}_{is}$ = total secondary circuit volume flow rate

Experience tells us that this is constant over time. During drying, the increase in pressure drop is offset by the settling of the product bed.

Hence, according to the design variables (drying air fan and tube bundle) specific to each design situation, the secondary circuit duty point, the intersection between the drying air fan performance curve and the secondary circuit energy dissipation curve, can be calculated. An example is presented in Fig.6:

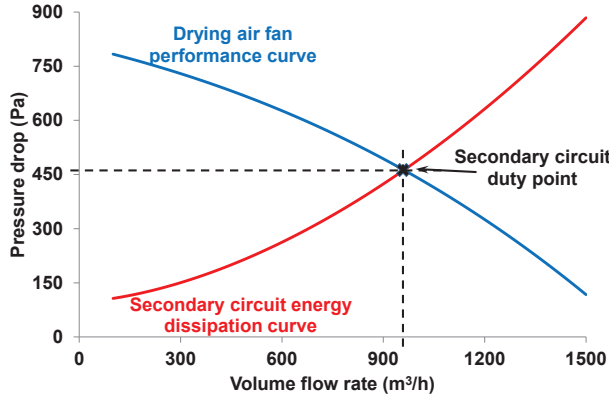


Fig. 6. Secondary circuit duty point determination.

Hence the Re_{max} was determined based on the drying air volume flow rate, and then the Nusselt number Nu_s as a correlation from the literature (Bergman et al., 2011):

$$Nu_s = C_1 \cdot Re_{max}^m \cdot Pr^{0.36} \cdot C_2 \quad (9)$$

Parameters C_1 and m depend on the Reynolds Re_{max} as per Table 6.

Table 6

Numerical parameters for external Nusselt number calculation.

Re_{max}	C_1	m
$10 - 10^2$	0.90	0.40
$10^2 - 10^3$	1.15	0.50
$10^3 - 2 \cdot 10^5$	$0.35 \cdot (S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
$2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	0.022	0.84

The coefficient C_2 depends on the number of rows of tubes N_L . It is equal to 1 if N_L is equal to or greater than 20. Otherwise, we use Eq.(10) put together from the data from Bergman et al. (2011):

$$C_2 = 1 - \frac{1.02 \cdot 10^{-3}}{N_L} - \frac{3.85}{N_L^2} + \frac{11.1}{N_L^3} - \frac{13.75}{N_L^4} + \frac{6.14}{N_L^5} \quad (10)$$

Then the external heat transfer coefficient h_{ext} was expressed as follows:

$$h_{ext} = \frac{Nu_s \cdot \lambda_{is}}{d_{ext}} \quad (11)$$

Global heat transfer

The global heat transfer coefficient h_{glob} , the heat capacity ratio R_c , the Number of Transfer Units NUT , the effectiveness ε , the smoke outlet temperature T_{op} and air drying temperature T_{os} were calculated as follows:

$$h_{glob} = \frac{1}{(\pi \cdot d_{med} \cdot L_{tube}) \cdot \left(\frac{1}{\pi \cdot d_{int} \cdot L_{tube} \cdot h_{int}} + \frac{\ln\left(d_{ext}/d_{int}\right)}{\lambda_{iron}} + \frac{1}{\pi \cdot d_{ext} \cdot L_{tube} \cdot h_{ext}} \right)} \quad (12)$$

$$R_c = \frac{\dot{m}_p \cdot C_{p,p}}{\dot{m}_s \cdot C_{p,s}} \quad (13)$$

$$NUT = \frac{h_{glob} \cdot 4 \cdot L_{tube}}{U_{tube} \cdot d_{int} \cdot \rho_{ip} \cdot C_{p,p}} \quad (14)$$

$$\varepsilon = \frac{e^{(1-R) \cdot NUT} - 1}{e^{(1-R) \cdot NUT} - R_c} \quad (15)$$

$$T_{op} = T_{ip} - \varepsilon \cdot (T_{ip} - T_{is}) \quad (16)$$

$$T_{os} = T_{is} + [R_c \cdot \varepsilon \cdot (T_{ip} - T_{is})] \quad (17)$$

3.4. Packed bed dryer: heat and mass transfer model

A simple physical model of heat and mass transfer for agglomerated products drying was developed specially for this study.

The cereal-based products to be dried possess a highly marked open porosity (Hafsa et al., 2014). They are agglomerated flour particles with a diameter of around 125 microns. Hence for low drying air velocity (< 0.3 m/s), which is the case for our study, we expressed the hypothesis that internal water transport within the agglomerates was not limiting throughout drying. Under these circumstances, it was the external transfer conditions which determined the drying kinetics. Drying was considered as isenthalpic. Eq.(18) describes the heat transfer between the air and the agglomerates in a couscous layer of thickness e_{prod} .

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot S_{se} \cdot e_{prod} \cdot A_{tray} \cdot (T_a - T_{ah}) \quad (18)$$

h : convective heat transfer coefficient

S_{se} : specific exchange surface area

e_{prod} : product layer thickness

A_{tray} : tray area

T_a : dry air temperature

T_{ah} : wet bulb temperature

The only remaining unknown was $h \cdot S_{se}$, which was identified experimentally on the CSec-T dryer.

Hence we deduced the evaporation water flow:

$$\frac{dM_w}{dt} = \frac{dQ/dt}{L_{ev}} \quad (19)$$

L_{ev} : latent heat of water evaporation

The rate of drying was expressed as follows:

$$\frac{dW_{db}}{dt} = \frac{1}{e_{prod} \cdot A_{tray} \cdot \frac{\rho_{prod}}{W_{db\ init} + 1}} \cdot \frac{dM_w}{dt} \quad (20)$$

ρ_{prod} : initial wet matter bulk density of agglomerated product

W_{db_init} : initial dry basis moisture content of agglomerated product

Figure 7 presents the experimental drying kinetics, and those derived from the four stacked trays model, under conventional drying conditions for this type of product. We can observe a good match between the experimental and predicted values (difference less than 5%).

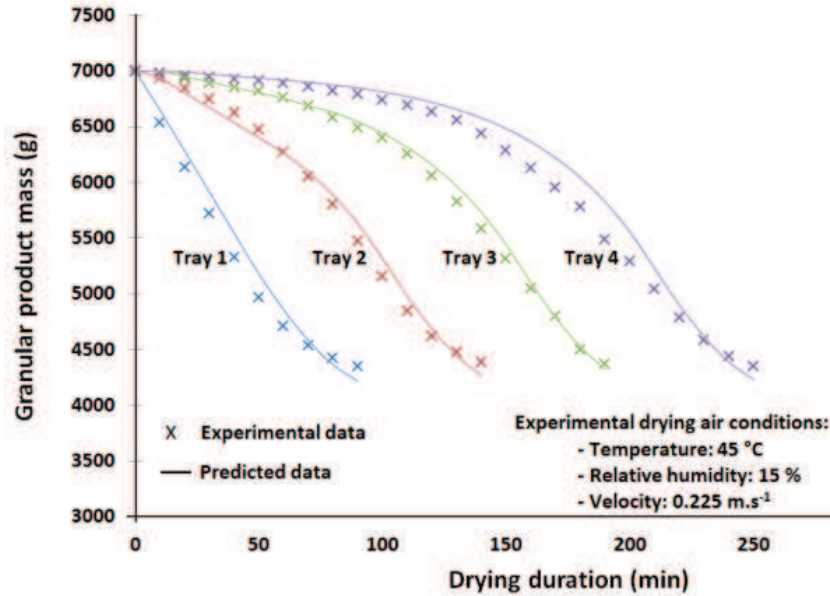


Fig. 7. Experimental and predicted data of a drying cycle on the CSec-T dryer.

In addition, it was verified that the drier reaches steady state from tray 3. Hence the time measured between removing tray 3 and tray 4 corresponds to the removal frequency of the following trays. These various points were factored into the simulation tool.

4. Comprehensive process simulation tool

The numerical simulation tool for the process as a whole was developed using Matlab[®] R2012b software (MathWorks Inc. USA), using the functional algorithm presented in Fig. 8. It comprises two main structural parts. The first relates to the exchanger, and defines its geometric configuration, the duty point for each circuit, primary and secondary, and the heat exchanger performance indicators. The second part concerns the dryer, and calculates the evolution of product water loss over time.

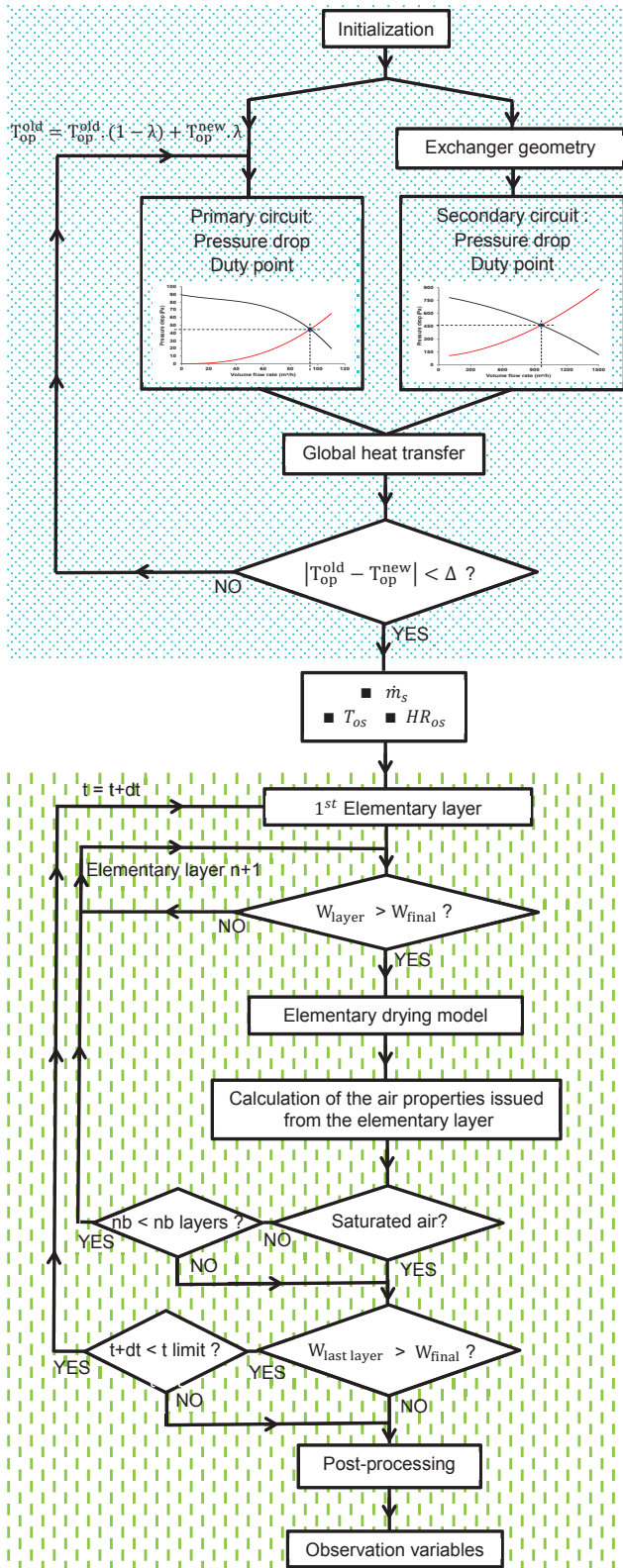


Fig. 8. Process simulation running algorithm.

In terms of the exchanger, the first step consists in initializing the values of the eight design variables (Table 1). Similarly, the smoke temperature value at the primary circuit outlet (T_{op}) had to be attributed in order to determine the duty point of the primary circuit. A new value of T_{op} was obtained after global heat transfer simulation. An iterative calculation, using a relaxation method, was used to ensure convergence toward the final value of T_{op} . Thus properties $\dot{m}_s$, T_{os} and HR_{os} , of the air from the secondary circuit, are produced, and correspond to the initial conditions of the drying air.

To calculate the drying part (a time-dependent phase), the product layer is broken down into an array of nb_{layers} elementary layers of thickness e_{prod} . At $t = 0$, for a duration dt , the initial conditions of the drying air are applied at the inlet of the first elementary layer of the product, with initial water content W_{db_init} (0.82 kg/kg). So, the heat and mass transfer drying model is able to calculate (i) the new water content of the elementary layer product after the drying air pass, and (ii) the new drying air properties upon exiting this layer. The evaporating capacity of the air is evaluated in order to verify whether it is in a condition fit to dry the following layers. If this is the case, this air is used until the total number of layers is reached. If the air is saturated or if all the

elementary product layers have been treated, the product water content in the final layer is evaluated. If it is greater than the target water content (i.e. 0.11 kg/kg for stability purposes), drying is continued and a new calculation cycle is engaged at $t+dt$. If the final product layer is dry, the drying simulation is interrupted.

For each time step dt , the water content values of all the elementary layers are stored in a matrix. Post-processing of these values is employed in order to assess the process performances via the production of observation variable values. A time convergence (dt) and space convergence (e_{prod}) study was conducted on the water content values. Time values dt of 1 s and mesh values of 1 mm were deemed optimal in terms of simulation tool precision and calculation time.

5. Assessing the suitability of the simulator for multi-criteria optimization of the process

The process design is based on using models, assembled in series or in parallel to form a comprehensive simulator presented as per figure 9. According to this “model-based reasoning” approach (Saridakis and Dentsoras, 2008), the description and comprehension of the system studied, broken down into unit operations, must be tailored to the processing process design.

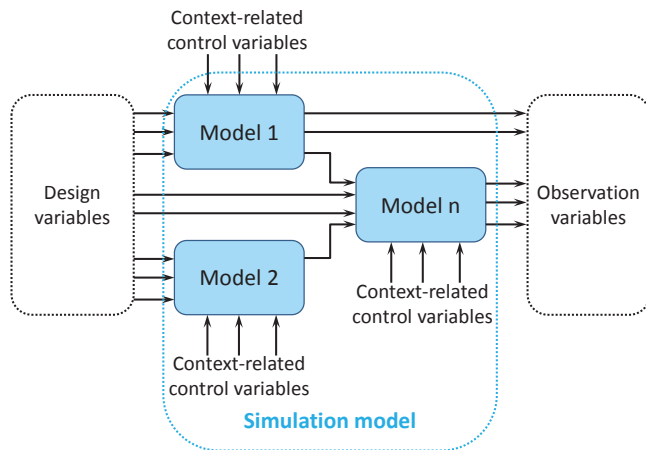


Fig. 9. Schematic representation of the model-based reasoning.

In our case, the simulator developed in the observation step of the OIA method is central to the optimization process. Also, its constituent models must be tailored to an objective of optimization, and for that reason, meet certain criteria. In the field of industrial engineering, Vernat et al. (2010) propose an analysis grid based on four criteria. They specify in particular that the models, constructed with a view to optimization, can be simplified (model reduction), since not all the information conveyed by more sophisticated models is necessarily relevant for meeting this objective. Model reduction of course requires good process expertise, so that the information loss it causes does not adversely affect the optimization phase. This

compromise to attain is now becoming the subject of specific research works (Romdhana et al., 2016).

We are basing our assessment of the relevance of the simulator in optimizing the process on previous works (Vernat et al., 2010), and henceforth will use three criteria. “*Consistency with expertise*” of the behavior of the simulated process is the first performance criterion. This consistency can be defined as the overall comprehensibility of the information generated and the compliance of the behavior with the expert knowledge of the process. The “*prediction capacity*” (accuracy of the observation variables value) and “*simulation times*” are the other two selected criteria.

“*Reliability*”, the ability of the numerical simulator to systematically produce output information (observation variables) from randomly chosen design solution tests, is also a performance assessment criterion for the simulator. Lack of simulator reliability, a recurrent problem in the development of numerical tools, was not observed in this study. The calculations, performed during combination tests of design variable values in the process design situation search space, thus always converged toward a solution. Hence the simulator is considered reliable, and we will not review this criterion.

The next part of this work presents the simulator performance assessment under the three criteria stated above. This assessment is based on the simulation results of six process design situations.

5.1. Presentation of the design situations tested and their performances

The choice of the six design situations had to shed some initial light on the performance of the biomass energy exchanger for drying cereal-based products. Hence, the simulator was designed so that the design situations could be assessed, whether or not the turbulators were present in the exchanger. The exchanger’s capacities are characterized by heat transfer (Nusselt number) and pressure drop (friction factor). Table 7 presents six design situations to be assessed in terms of performance. For each one, the diameter (d), length (L_{tube}) and number of tubes ($N_{\text{b tube}}$) are set respectively at 60.3 mm, 0.7 m and 8 tubes. The smoke temperature at the primary circuit inlet (T_{ip}) is set at 640°C, and the radius of the fan impeller (R_s) at 75 mm. In solution S1 the tubes are not equipped with a turbulator; a “wire coil turbulator” profile (Eiamsa-Ard et al., 2011) was chosen for solution S2, while solutions S3 to S6 employ different elliptical turbulator variants (by angle (α) and free sectional flow between turbulator and tube (ΔS)). The radius of the smoke extractor impeller (R_p) is defined so that the six solutions are compared based on the same power supplied by the generator.

Table 7

Presentation of the various solutions tested.

Design variables	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	Plain tube	Wire coil	Elliptical	Elliptical	Elliptical	Elliptical
d	60.3 mm	60.3 mm	60.3 mm	60.3 mm	60.3 mm	60.3 mm
L_{tube}	0.7 m	0.7 m	0.7 m	0.7 m	0.7 m	0.7 m
$N_{b\ tube}$	8	8	8	8	8	8
α	---	---	45°	45°	45°	60°
ΔS	---	---	10 %	30 %	50 %	15 %
T_{ip}	640 °C	640 °C	640 °C	640 °C	640 °C	640 °C
R_p	0.0425 m	0.0425 m	0.0365 m	0.0365 m	0.0365 m	0.0365 m
R_s	0.075 m	0.075 m	0.075 m	0.075 m	0.075 m	0.075 m

Table 8 presents the results provided by the simulation tool in terms of observation variables, and provides an indication of the performance in the proposed design situations.

Table 8

Observation variable values for each design situation tested.

Observation variables	S1	S2	S3	S4	S5	S6
	Plain tube	Wire coil	Elliptical	Elliptical	Elliptical	Elliptical
T_{os}	38.0 °C	44.2 °C	59.9 °C	59.5 °C	58.3 °C	58.5 °C
U_{prod}	0.210 m.s ⁻¹	0.215 m.s ⁻¹	0.225 m.s ⁻¹	0.225 m.s ⁻¹	0.224 m.s ⁻¹	0.224 m.s ⁻¹
ΔP_p	11 Pa	61 Pa	41 Pa	11 Pa	6 Pa	12 Pa
MPw	805 W	805 W	805 W	805 W	805 W	805 W
Eff	21.4 %	29.2 %	46.8 %	44.5 %	42.2 %	43 %
Prod	11.1 kg.h ⁻¹	14.2 kg.h ⁻¹	22.3 kg.h ⁻¹	22.0 kg.h ⁻¹	21.4 kg.h ⁻¹	21.5 kg.h ⁻¹
T_{op}	478 °C	384 °C	165 °C	188 °C	216 °C	209 °C
M_{exch}	28.5 kg	30.9 kg	32.4 kg	32.0 kg	31.6 kg	31.7 kg

5.2. Consistency of process simulator

Table 8 shows that, for the design situations proposed, the values obtained for each of the observation variables follow an easily understandable pattern, which agrees with experience. Hence we can observe that for an exchanger built with the same diameter ($d = 60.3$ mm), length ($L_{tube} = 0.7$ m) and number of tubes ($N_{b\ tube} = 8$), the contribution of elliptical turbulators (situation S3) favorably affects the expected performances in terms of heat transfer (values of observation variables T_{os} , Eff , $Prod$, T_{op}), but causes a big increase in the pressure drop (ΔP_p) in the primary circuit. Conversely, situations S4, S5 and S6 show that the increased percentage sectional flow (ΔS) considerably reduces ΔP_p without proportionally affecting the heat transfer. This is in perfect agreement with the results of the previous study by Rivier et al. (2015).

For the six design situations, the drying air speed values (U_{prod}) are very similar (as for the fan mechanical power (MPw)), due to the configuration of the secondary circuit having been set (same fan and tube bundle). The slight variation in U_{prod} can readily be explained by the variation in air density as a function of the drying temperature (T_{os}).

These drying air temperatures (T_{os}) are significantly different. While in every case the values comply with the chosen desirability domain ($T_{os} < 60^{\circ}\text{C}$) and the integrity of the food product, the presence of a turbulator has a remarkable effect on these values: from 38°C (situation S1 without a turbulator) to nearly 60°C with an elliptical turbulator (situation S3 to S6). This observation of course agrees with the one stated above (effect of elliptical turbulators on heat transfer): the lower the values of α and ΔS , the higher the drying temperature (T_{os}). The same goes for evolution of production capacity ($Prod$) and energy efficiency (Eff), which change significantly, from $11 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ and 21.4% respectively (situation S1 without turbulator) to more than $22 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ and 46.8% (situation S3).

In conclusion, the values adopted by the performance indicators in the six design situations signify good consistency of the process simulator with regard to the design team's expertise.

5.3. Prediction capacity of the process simulator

The prediction capacity of the simulator can be assessed by the quality of its various constituent models.

Regarding the exchanger primary circuit, the correlations used (Nusselt number and Fanning friction factor) were built on experimental data presented in a previous study (Rivier, et al., 2015). In both cases, the quality of the polynomial regression models in terms of prediction was assessed by a high value of the coefficient of determination R^2 , at 0.96 and 0.97 respectively.

For the secondary circuit, the empirical correlations adopted are derived from benchmark articles or works in the field. Their good prediction capacity was assessed in previous studies (Bergman, et al., 2011).

The drying model (heat and mass transfer) proposed in paragraph 3.4 was simplified, by assuming that only external transfers were limiting throughout the drying process. Comparison of this model with several experimental kinetics shows a difference of less than 5% between the predicted and experimental values, which enables us to confirm this hypothesis.

In order to verify the simulator's overall prediction capacity, the performances predicted by the simulator should be compared with those measured on the process combining the three modules, which cannot be done in this design phase.

5.4. Simulation time

As presented in paragraph 4, a convergence study was conducted on the water content values, and the time values dt (1 s) and space values e_{prod} (1 mm) were chosen so as to reduce the calculation times while retaining the model's good prediction capacity.

Hence, with this discretization in time (dt) and space (e_{prod}), the simulation time on a "conventional" computer (Intel Xeon X5550, 2.67 GHz processor, 4 GB RAM, Microsoft Windows 7 Pro 64bit OS) varies from 8 to 17 mins, between the six design situations. The various simulations show that at least 98% of the simulation time is derived from the product water loss calculation over time.

These simulation times remain completely acceptable. Indeed, in an optimization process and by way of example, discretization of the variation domains of the eight process design variables would lead to the definition of 145 million design situations (candidate solutions). By using a genetic algorithm, an estimated simulation time of 5 to 10 days would be necessary for process optimization, with the hypothesis of convergence of the algorithm after processing 700 situations. This time could in particular be reduced by using higher-performance processors.

5.5. Comparative analysis of the six design situations studied

Having assessed the simulator's prediction capacity, we will now analyze the relevance of the six adopted design situations.

The readings (Table 8) for situation S1 confirm the poor performances of the process without the contribution of turbulators in the exchanger tubes: a small pressure drop (ΔP_p) but poor energy efficiency (Eff) and production capacity ($Prod$). For situation S2 (wire coil turbulator), the performances Eff and $Prod$ are better, but at the expense of the pressure drop value (ΔP_p). For both these situations, bringing the performances up to standard would involve significantly increasing the number of tubes, the volume and the exchanger mass (M_{ech}). Our analysis will give no further consideration to these situations.

Situations S3 to S6 show that elliptical turbulators intensify heat transfer and are able to achieve high value levels, both for energy efficiency (Eff , between 43 and 47 %) and production capacity ($Prod$, around 22 kg.h⁻¹). These performances are set out in Table 8.

We can observe that for the elliptical turbulator situations (S3, S4 and S5), where the bend $\alpha = 45^\circ$, the increase in ΔS greatly limits the pressure drop (ΔP_p) in the primary circuit (from 41 to 6 Pa), without proportionally affecting the heat transfer: the other indicators Eff , $Prod$, T_{op} and M_{exch} see little change. We can also note that with an elliptical turbulator where the bend $\alpha = 60^\circ$ and $\Delta S = 15\%$ (situation S6), the performance indicators ΔP_p , Eff , $Prod$, T_{op}

and M_{exch} remain roughly the same as for situations S4 ($\alpha = 45^\circ$ and $\Delta S = 30\%$) and S5 ($\alpha = 45^\circ$ and $\Delta S = 50\%$). In addition, in the knowledge that shaping an elliptical turbulator is much easier with 60° than 45° , these findings are interesting, since the geometric manufacture tolerances of a turbulator could therefore be less strict, thereby favoring the manufacturing capacities in developing countries.

The low pressure drop values ($\Delta P_p < 20 \text{ Pa}$) observed in situations S4, S5 and S6 are interesting, since stack effect smoke extraction becomes viable. For the latter three situations, as well as for situation S3, the smoke temperature levels at the primary circuit outlet (T_{op}) remain low (from 165 to 216°C), enabling local manufacture of an extractor.

Thus, analysis of the performances of these initial design situations provides highly relevant information on future management and sizing of the process. It shows that there are degrees of freedom in the quest for optimum design solutions. Yet the number of variables and the extent of their variation domain reveal the complexity of the system. Thus, an optimization strategy must be implemented based on this simulator.

6. Conclusion

In this study, the observation step in the OIA method is developed. A simulator of the process of coupling a biomass energy conversion unit to a cereal-based products dryer is proposed. It compares the performances of the process against management variables and a set of design variables which define a process design situation. Thus, eight design variables associated with a variation domain are chosen for their effect on the process performances. Eight observation variables define the performance indicators, covering objectives such as food product quality, economic and energy performances, manufacture and use in a developing countries context. Models are used to specify the mass & heat transfer and pressure loss, and to shape the simulator. The consistency and prediction capacity of this simulator were demonstrated by assessing six design situations, tested within calculation times deemed reasonable.

Analysis of the performance indicators for these six design situations generates information relevant for development of the process in developing countries. Insofar as heat energy is produced by a high-performance generator, coupling an exchanger equipped with elliptical turbulators with a CSec-T dryer could achieve the stated objectives highly satisfactorily.

As part of an optimization strategy, a forthcoming study will propose the following steps in the OIA method, of interpretation and aggregation. Therefore a genetic algorithm will be used to explore the design situations search space, and converge toward high-performance solutions for the process design.

Nomenclature	
A_{tray}	tray area (m ²)
C_p	heat capacity (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)
d	tube diameter (mm)
f	Friction factor
h	heat transfer coefficient (W m ⁻² °C ⁻¹)
L_{ev}	latent heat of water evaporation (J kg ⁻¹)
L_{tube}	tube length (m)
M	mass (kg)
$\dot{m}$	mass flow rate (kg s ⁻¹)
$N_{b\ col}$	column number
$N_{b\ tray}$	tray number
$N_{b\ tube}$	tube number
N_L	tubes rows number
Nu	Nusselt number
NTU	number of transfer units
Pr	Prandtl number
R	fan impeller radius (m)
R_c	heat capacity ratio
Re	Reynolds number
RH	relative humidity (%)
S_{es}	specific exchange surface (m ² m ⁻³)
S_D	diagonal pitch (m)
S_T	transverse pitch (m)
T	temperature (°C)
thk	layer thickness (m)
U	mean axial velocity (m s ⁻¹)
$\dot{V}$	volume flow rate (m ³ h ⁻¹)
W_{db}	dry basis moisture content (kg of water kg ⁻¹ of dry matter)
ΔP	pressure drop (Pa)
ΔS	percentage sectional flow area left free by the turbulator (%)
<i>Greek symbols</i>	
α	bending angle (degree)
ε	effectiveness
ρ	density (kg m ⁻³)
λ	thermal conductivity (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
ω	fan angular velocity (rad s ⁻¹)
<i>Subscripts</i>	
<i>ext</i>	external
<i>int</i>	internal

<i>ip</i>	inlet primary circuit
<i>is</i>	inlet secondary circuit
<i>med</i>	medium
<i>op</i>	outlet primary circuit
<i>os</i>	outlet secondary circuit
<i>p</i>	primary circuit
<i>prod</i>	food product
<i>s</i>	secondary circuit
<i>w</i>	water

References

- Affognon, H., Mutungi, C., Sanginga, P., Borgemeister, C., (2015). Unpacking Postharvest Losses in Sub-Saharan Africa: A Meta-Analysis. *World Development* 66, 49-68.
- Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Moles, C.G., Alonso, A.A., (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology* 14(4), 131-144.
- Bergman, T.L., Incropera, F.P., Lavine, A.S., (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Boroze, T., Desmorieux, H., Méot, J.-M., Marouzé, C., Azouma, Y., Napo, K., (2014). Inventory and comparative characteristics of dryers used in the sub-Saharan zone: Criteria influencing dryer choice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40(0), 1240-1259.
- Collignan, A., (2011). *Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique: application à une structure aéronautique*. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- Dabat, M.H., Blin, J., Rivier, M., (2010). Facing the challenge of energy and food in Burkina Faso, *Proceeding of the Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food Symposium, Montpellier, France*, p. 7.
- de Janvry, A., Sadoulet, E., (2000). Rural poverty in Latin America: Determinants and exit paths. *Food Policy* 25(4), 389-409.
- Dewan, A., Mahanta, P., Raju, K.S., Kumar, P.S., (2004). Review of passive heat transfer augmentation techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 218(7), 509-527.
- Eiamsa-Ard, S., Kongkaitpaiboon, V., Promvong, P., (2011). Thermal Performance Assessment of Turbulent Tube Flow Through Wire Coil Turbulators. *Heat Transfer Engineering* 32(11-12), 957-967.
- Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M., (2005). *Multiple criteria decision analysis*. Springer's International series.
- García-Moreno, P.J., Morales-Medina, R., Pérez-Gálvez, R., Bandarra, N.M., Guadix, A., Guadix, E.M., (2014). Optimisation of oil extraction from sardine (*Sardina pilchardus*) by hydraulic pressing. *International Journal of Food Science & Technology* 49(10), 2167-2175.
- Gergely, S., Bekassy-Molnar, E., Vatai, G., (2003). The use of multiobjective optimization to improve wine filtration. *Journal of Food Engineering* 58(4), 311-316.
- Hafsa, I., Cuq, B., Kim, S.J., Le Bail, A., Ruiz, T., Chevallier, S., (2014). Description of internal microstructure of agglomerated cereal powders using X-ray microtomography to study of process–structure relationships. *Powder Technology* 256, 512-521.
- Kearney, J., (2010). Food consumption trends and drivers. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences* 365(1554), 2793-2807.

Kerkhof, P.J.A.M., Coumans, W.J., (2002). Drying: a fascinating unit operation. *Chemical Engineering Journal* 86(1–2), 1-2.

Kyte, R., Clos, J., Amin, A.Z., Marangoly George, A., (2015). Sustainable energy. *UN Chronicle* L II No 3.

Lespinard, A.R., Arballo, J.R., Taus, F.J., Mascheroni, R.H., (2015). Multi-Objective Optimization of the Pasteurization Process of Pumpkin Cubes Packaged in Glass Jars. *International Journal of Food Engineering* 11(5), 679-689.

Méot, J.M., Marouzé, C., Rivier, M., (2007). CSec-T : un séchoir pour les produits granulés. Principe et méthode de dimensionnement., *Réseau de chercheurs « Génie des Procédés Appliqué à l'Agroalimentaire »*. Agence Universitaire de la Francophonie, Dakar, Sénégal.

NF, (2011). X 35-109 Ergonomie. Manutention manuelle de charge pour soulever, déplacer et pousser/tirer. Méthodologie d'analyse et valeurs seuils. Norme française homologuée NF X, 35-109.

Proctor, D., (1994). *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries*. Food & Agriculture Org.

Raffray, G., Collignan, A., Sebastian, P., (2015). Multiobjective optimization of the preliminary design of an innovative hot-smoking process. *Journal of Food Engineering* 158, 94-103.

Rivier, M., Sébastien, P., Goli, T., Raffray, G., Collignan, A., (2015). Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries. *Applied Thermal Engineering* 81(0), 92-101.

Romdhana, H., Lambert, C., Goujot, D., Courtois, F., (2016). Model reduction technique for faster simulation of drying of spherical solid foods. *Journal of Food Engineering* 170, 125-135.

Saridakis, K.M., Dentsoras, A.J., (2008). Soft computing in engineering design—A review. *Advanced Engineering Informatics* 22(2), 202-221.

Semassou, C., Nadeau, J., Sebastian, P., Pailhès, J., Vianou, A., (2013). Optimisation multicritère en conception de système photovoltaïque pour des maisons individuelles en contexte africain. *Revue des Energies Renouvelables* 16(2), 225-246.

Trystram, G., (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering* 110(2), 269-277.

Vernat, Y., Nadeau, J.-P., Sébastien, P., (2010). Formalization and qualification of models adapted to preliminary design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 4(1), 11-24.

Webb, R.L., (1981). Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24(4), 715-726.

Webb, R.L., (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer*. Taylor & Francis.

L'outil de simulation, développé dans ce travail, prédit le comportement du procédé de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie. Des situations de conception ont été testées et appréciées par des indicateurs de performance, les variables d'observation. L'analyse de ces variables d'observation a permis d'évaluer les propriétés du simulateur, en termes de « cohérence avec l'expertise » et de « capacité de prédiction » dans des « temps de simulation » raisonnables. Ces propriétés sont bien en accord avec un objectif d'optimisation du procédé.

Les premiers résultats obtenus confirment les performances accrues par l'insertion de turbulateurs elliptiques dans les tubes de l'échangeur tubulaire.

Le simulateur est alors prêt pour être intégré dans une démarche globale d'optimisation du procédé en adoptant la méthode O.I.A. Pour cela, les étapes suivantes d'Interprétation et d'Agrégation de la méthode sont développées dans les travaux qui suivent. Les préférences des décideurs sont prises en compte afin de proposer, à l'issue du processus d'optimisation, des solutions de conception du procédé performantes.

3.3. Optimisation multiobjectif d'un procédé de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie dans un contexte de pays en développement. (Article n°3).

Ce dernier article utilise la méthode « Observation-Interprétation-Agrégation (O.I.A.) » pour l'appliquer à l'optimisation du procédé de séchage de produits céréaliers à partir de bioénergie. L'étape d'Observation développée et présentée dans l'article n°2, permet de relier les variables de conception aux variables d'observation, indicateurs de performance du procédé. Ces indicateurs sont produits à l'aide du simulateur et permettent d'évaluer une situation de conception décrite par les variables de conception du procédé. Le présent article s'attache à exposer les étapes d'Interprétation des variables d'observation puis d'Agrégation. Les objectifs de conception du procédé, tels que la qualité du produit alimentaire, l'efficacité énergétique, la productivité et le contexte de fabrication et d'utilisation en Afrique Subsaharienne sont pris en compte, et les préférences attachées aux variables d'observation sont exprimées par des seuils de satisfaction. La définition de ces seuils est issue de l'expertise et du savoir-faire des différents acteurs impliqués dans la conception du procédé, ainsi que de données de la littérature (articles scientifiques, documents techniques ou comparaison avec des procédés similaires du domaine agroalimentaire ou d'autres domaines). Ces seuils permettent de paramétrer des fonctions de désirabilité traduisant les indices de satisfaction des objectifs de conception. Au cours de l'étape d'Agrégation, les indices sont agrégés en une fonction objectif unique à partir de laquelle une situation de conception optimale sera recherchée en s'appuyant sur la « règle de minimisation ».

Le processus d'optimisation, intégrant la démarche O.I.A., utilise un algorithme génétique. Cette démarche adaptée à la recherche de situations de conception dans un espace de recherche de grande dimension doit aboutir à la convergence de l'algorithme vers des solutions de conception du procédé performantes.

L'article qui suit, intitulé « Multi-objective optimization of a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy » reprend toutes les étapes précédemment décrites.

Multi-objective optimization of a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy.

Michel Rivier ^{a,*}, Antoine Collignan ^b, Martial Madoumier ^b, Jocelyn De Souza ^c, Patrick Sébastien ^c

^a Cirad, UMR 95 Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, TA B-95/15, 73, rue JF Breton, 34398 Montpellier cedex 5, France

^b Montpellier SupAgro, UMR 95 Qualisud, Food Process Engineering Research Unit, 1101 avenue Agropolis, CS 24501, 34093 Montpellier cedex 5, France

^c Université de Bordeaux, I2M, UMR CNRS 5295, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence cedex, France

* Corresponding author.

Address: Cirad, UMR 95 Qualisud, 73, rue Jean François Breton, TA B-95/15, 34398 Montpellier cedex 5, France, Tel.: + 33 467 61 57 19

E-mail address: michel.rivier@cirad.fr (M. Rivier)

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Abstract

This work proposes an original food industry process optimization approach, based on the Observation-Interpretation-Aggregation (OIA) method. It is applied to a process coupling a biomass energy conversion unit to a cereal-based products dryer. A process simulator developed in a previous study compares the process design variables and the performance variables (observation model). The latter relate to the product quality, energy efficiency and also the possibility of local manufacture in developing countries, thereby representing the multiple objectives to be achieved for a sustainable process design. Satisfaction indexes are assigned to each of the performance variables using a desirability function (interpretation). They are then aggregated into a single indicator (aggregation), which undergoes maximization. The various phases of the OIA method are then integrated into an optimization program. A genetic algorithm metaheuristic is used to resolve this problem of optimizing a process made complex because of the large number of design variables and performance variables. Lastly, design solutions are proposed and analyzed.

Keywords

Food process design
OIA integrated method
Multi-objective optimization
Developing countries

Highlights

- Proposing an original and integrated food process design method
- Process optimization meeting multiple objectives
- Optimization based on aggregation of satisfaction indexes
- Genetic algorithm developed to derive high-performance design solutions

1. Introduction

The development of more accessible and better-performing numerical tools has encouraged engineers and researchers to develop process and equipment design methods. However, they are still under-developed in the food processing sector, with only few publications to be found on this subject (Banga et al., 2003; Trystram, 2012). The fact that the food product, originating from living tissue, is variable (physico-chemical composition, rheological properties, etc.) and that enhancing its quality through the process requires multi-disciplinary knowledge (biochemistry, physics, thermics, fluid mechanics, etc.) make it a complex system, which in large part explains this situation.

In developing countries, building up the industrial food sector is recognized as a major factor in addressing food security problems. However, access to water, energy and agricultural raw materials represent major brakes to the progress of this sector (Dabat et al., 2010; de Janvry and Sadoulet, 2000). Hence in this particular context, the process designer must satisfy specific, multiple objectives which are as varied as the quality of the processed product, process energy efficiency, production performances but also consideration of local capacity for manufacture, maintenance and operation of the equipment used.

In the food sector, process sizing or optimization methods (Diefes et al., 2000; Maroulis and Saravacos, 2003) are based on simulation models (García-Moreno et al., 2014; Lespinard et al., 2015), which are generally limited to a unit operation scale. These models take into account the transfer mechanisms (mass and heat), and possibly the reaction mechanisms to predict the food quality, in order to optimize the operating conditions most often based on a single criterion. Works aimed at optimization (Sendín et al., 2010) often take into account only one or two performance criteria, and rarely incorporate tools providing assistance in selecting an optimal solution. Ultimately, it is down to the designer to validate a compromise solution through successive testing.

However, in fields other than the food sector, there are tools for supporting the design of complex systems based on several criteria (Chen and Hwang, 1992; Figueira et al., 2005). Hence our study proposes to implement an integrated original method, the “Observation-Interpretation-Aggregation” method (OIA), which is particularly suited to multi-criterion process design and optimization. It is applied in this case to a process coupling a biomass energy conversion unit to a cereal-based products dryer in West Africa. Recent works (Rivier et al., 2016; Rivier et al., 2015) have concentrated on developing a process simulator combining the biomass energy conversion operation with drying cereal-based products. This simulator predicts heat transfer and pressure loss in a heat exchanger equipped with elliptical turbulators, as well as the mass losses when drying couscous in stacked layers. Its

prediction capacity, within a reasonable calculation time, was validated via the evaluation of six design situations (Rivier et al., 2016).

This article initially presents the various steps in the OIA method, which as part of an optimization strategy are then applied to the process under study. Hence the simulator developed in the previous study is integrated into the environment of this procedure. Performance indicators associated with design objectives such as food product quality, energy efficiency, productivity or the manufacturing and operating context in Sub-Saharan Africa are specified. Then desirability functions are defined, in order to transcribe the values of these performance indicators into satisfaction indexes, before aggregating them into a single overall objective function.

A genetic algorithm, used to investigate the search space of the candidate design situations, is then set out. Finally, high-performance design situations derived from the optimization procedure are presented and commented on.

2. Presentation of the “Observation-Interpretation-Aggregation” method (OIA)

The multi-objective design and optimization method “Observation-Interpretation-Aggregation” (OIA) originates from the “Function-Behaviour-Structure (FBS)” functional description of design ontology, proposed by John Gero (Gero and Kannengiesser, 2004, 2007). It has been applied mainly in industrial engineering, in aeronautics (Collignan, 2011), in renewable energies (Semassou et al., 2013) and latterly in food process engineering (Raffray et al., 2015).

According to Gero and in terms of functional analysis, the expected functions of a process are modeled, in order to predict the behavior of the process, and compare it with the desired design objective in order to work toward a high-performance process design solution.

The OIA method relies at various levels of the procedure on the expert know-how of designers & decision makers.

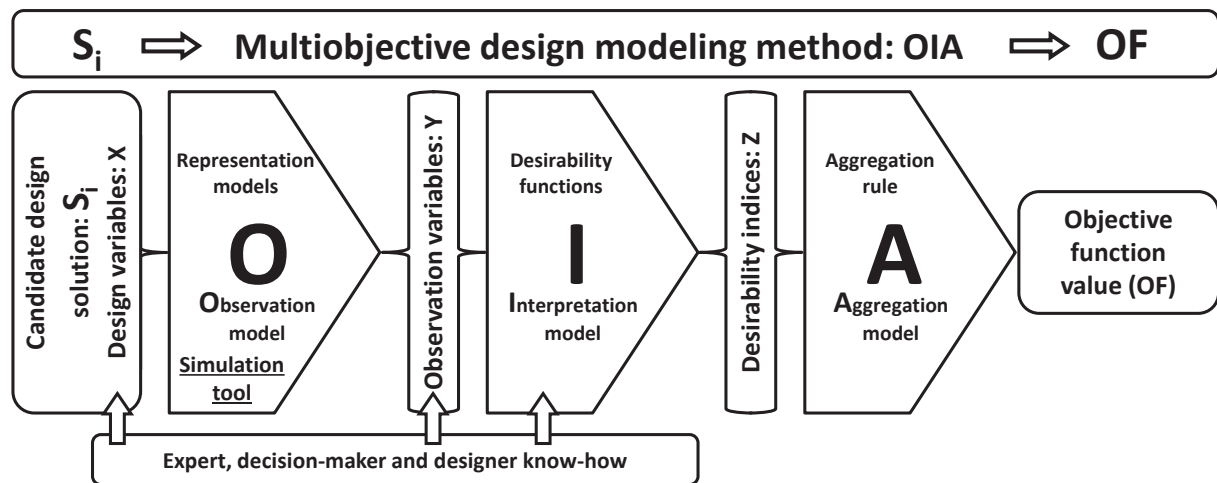


Fig. 1. Schematic representation of the OIA method.

Figure 1 presents this method schematically. In the first step “observation” (O), a process simulator is built from models representing the unit operations. The design situations are defined by a set of “*design variables*” X: geometric sizing variables (material type, dimensions, shapes) and control variables (temperature, duration, pressure, etc.) relating to the application context. Once defined, these variables form a “*candidate design solution*” S_i . The numerical simulator evaluates this solution by generating a result in the form of performance indicators, also known as “*performance or observation variables*” Y. The designer’s expertise is called on when identifying the design variables affecting the process

performances, but also for identifying the observation variables, which must provide a relevant expression of the various performance objectives.

All the observation variables helping assess the candidate design solution S_i must be taken into account simultaneously in the decision-making procedure. Yet their units of measurement and their value levels are as different as the objectives may be diverse and contradictory. Hence the designer is supported in their solution validation approach by an interpretation of the observation variable values in dimensionless form so that i / they are comparable; and ii / the satisfaction level can be expressed on an identical scale. To do so, a second step, known as “interpretation” (I), employs mathematical functions known as “*desirability functions*”. The most frequently mentioned and/or used are those of Harrington (1965) and Derringer (1980), introduced in quality engineering. These functions are parameterized by two domain threshold values, lower and upper, for the observation variables. They express the end user’s level of satisfaction with each of the performance indicators, and are derived from information collection: context of use, comparison with similar systems and expert know-how. In this way, a “*satisfaction index*” (or “*interpretation variable*”) Z , of between 0 and 1 (1 being the highest satisfaction level), is attributed to each observation variable.

Last of all comes the so-called “aggregation” step (A), in which the value of an overall objective function (OF) is generated. To this end, aggregation rules such as the weighted geometric average (Derringer, 1980) may be used. So the difficulty is to objectively allocate a weight to the satisfaction indexes of the observation variables. Hence for design applications, Scott et Antonsson (1998) propose a “precautionary principle”, refined by Kim and Lin (2006; 2000) who developed a *minimization aggregation rule*. In this case, the OF value is the smallest value among the observation variable satisfaction indexes. This rule is particularly highly appropriate when contributions by experts, users and decision-makers lead to a relevant choice of observation variables and of their threshold satisfaction values. Conversely, it does not make it possible to rank the criteria and/or guide optimization toward a specific performance objective.

In their quest for an optimum, the designer will let the design variables evolve within a realistic variation domain, and monitor variations in the observation variables in terms of satisfaction. This domain is determined based on good knowledge of the operating context of the process, and of the impact of variable variations on its performances. Thus due to the possible combinations between variables, there may be a considerable number (tens of millions) of candidate design solutions, and we need to seek best-performing. Given our inability to process and then rank all the solutions, a numerical method of finding high-performance solutions in the candidate solutions space is therefore required. To this end, use of a genetic algorithm is often proposed, and is justified in the field of multi-objective

design. Indeed, this tool is able to converge, within reasonable calculation times, toward a high-performance solution. It is presented in the following part of the article.

3. Application of the OIA method to evaluate design solutions for the process of coupling the biomass energy conversion unit to the food products dryer

3.1. “Observation” step: linking the design variables to the observation variables

The functional description of the process (Fig. 2) combining a biomass energy conversion operation with an agglomerated cereal-based products dryer was developed in a previous study (Rivier et al., 2016). Three modules, the thermal generator, heat exchanger and dryer respectively, ensure the main functions of heat generation, heat transfer and drying functions.

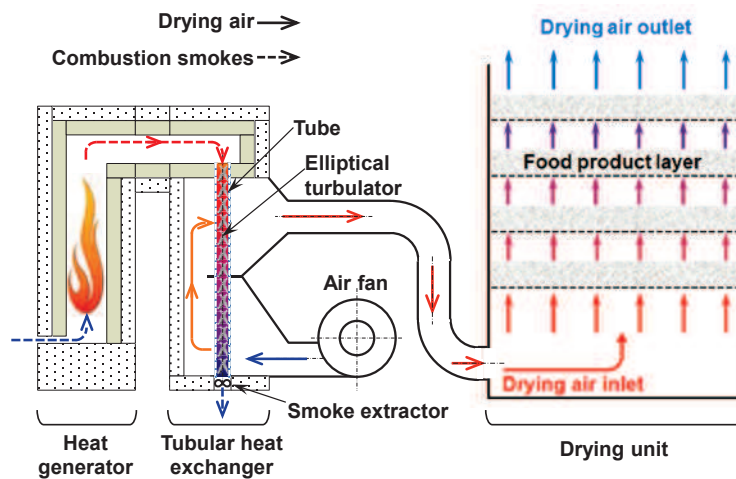


Fig. 2. Schematic representation of the overall installation (Rivier et al., 2016).

Pressure loss and (mass and heat) transfer simulation models were developed. They were used to predict the behavior of the heat exchanger equipped with elliptical turbulators and to simulate water loss from cereal-based products in a thick-layer dryer (Rivier et al., 2016; Rivier et al., 2015). The input variables for these models were the eight design variables denoted X_j presented in Table 1. These were the ones affecting the sizing and behavior of the process in a specific context of manufacture and operation in a developing country. The variables X_1 , X_2 , and X_3 characterize the tubes (diameter (d), length (L_{tube}) and number (N_{tube})) for the heat exchanger manufacture, X_4 and X_5 the profile of the elliptical turbulator (bend angle (α) and the free sectional flow between tube and turbulator (ΔS)), X_6 the combustion smoke temperature at the thermal generator outlet (T_{ip}), and finally X_7 and X_8 the impeller radii, of the smoke extractor (R_p) and drying circuit fan (R_s), respectively.

Table 1

Design variables and their variation domain.

Design variables			Variation domain		
X_j	Name	Unit	Interval or sequence	Step	Number n_j of possible values
X_1	Tube external diameter (d)	mm	{42.4; 60.3; 76.1}	-	3
X_2	Tube length (L_{tube})	m	[0.5; 1.2]	0.1	8
X_3	Number of tubes ($N_{b\ tube}$)	-	[3; 25]	1	23
X_4	Bend angle of turbulator (α)	degree	{45; 60}	-	2
X_5	Free sectional flow between turbulator and tube (ΔS)	%	[10; 50]	5	9
X_6	Smoke temperature (T_{ip})	°C	[400; 800]	25	17
X_7	Radius of smoke extractor impeller (R_p)	m	[0.025; 0.05]	0.00125	21
X_8	Radius of fan impeller (R_s)	m	[0.05; 0.15]	0.0025	41
Number m of candidate design solutions S_i					145,433,232

The values of other variables, more linked to the operating context of the process, were fixed. This was the case with the temperature and relative humidity of the ambient air, the initial water content of the product to be dried, and the rotation speed of the fan motors. The characteristics of the dryer, numbers of columns and racks per column, as well as the dimensions of the racks, were validated in trials carried out by West African companies. The description and values of these variables were presented by Rivier et al. (2016).

To begin the process optimization phase, each design variable would be able to evolve within its variation domain, defined as an interval or sequence of values (Table 1), and justified by Rivier et al. (2016). Thus, the domain of each of the p design variables X_j was discretized with a step dependent on the sensitivity of its variation to the system's performances. This discretization resulted in a number of elements n_j being considered.

A candidate design solution, denoted S_i , was built from a set of values chosen for each of the design variables. Thus, the number m of candidate design solutions would be calculated using Eq.(1), giving 145,433,232 possibilities for the process studied.

$$m = \prod_{j=1}^p n_j \quad (1)$$

A candidate design solution was evaluated by the numerical simulator developed by Rivier et al (2016), with the production of the target performance indicators: the observation variable values Y . These variables and their interpretation in the form of a satisfaction index Z are presented in the following paragraph.

3.2. “Interpretation” step: the observation variables, their satisfaction domain and processing by desirability function

The observation variables, the process performance indicators, are presented in Table 2.

Table 2

Observation variables and desirability functions.

Observation variables			Desirability functions				
Y_k	Name	Unit	Lower threshold (Y_k^-)	Assigned satisfaction indexes (Z_k^-)	Upper threshold (Y_k^+)	Assigned satisfaction indexes (Z_k^+)	Function type
Y_1	Drying air temperature (T_{os})	°C	58	0.9	62	0.1	Decreasing
Y_2	Air speed through the product (U_{prod})	$m\ s^{-1}$	0.28	0.9	0.30	0.1	Decreasing
Y_3	Unit efficiency (Eff)	%	36	0.1	60	0.9	Increasing
Y_4	Productivity (Prod)	$kg\ h^{-1}$	20	0.1	30	0.9	Increasing
Y_5	Primary circuit pressure drop (ΔP_p)	Pa	10	0.9	80	0.1	Decreasing
Y_6	Mechanical power of secondary circuit fan (MPw)	kW	0.5	0.9	1	0.1	Decreasing
Y_7	Smoke outlet temperature (T_{op})	°C	150	0.9	220	0.1	Decreasing
Y_8	Exchanger steel mass (M_{exch})	kg	40	0.9	50	0.1	Decreasing
Y_9	Smoke outlet temperature (T_{op})	°C	120	0.1	150	0.9	Increasing

The first two variables Y_1 and Y_2 were linked to an objective of food product quality. They relate to the drying air, namely its temperature T_{os} (Y_1) and its speed U_{prod} (Y_2) at the product layer inlet, two characteristics which govern the form of the drying kinetics. Furthermore, to prevent starch gelatinization, as well as product friability and browning phenomena, the temperature T_{os} must not exceed 60/65°C. In addition, the air speed U_{prod} must be no more than 0.3 m/s, in order to prevent product fluidization, which would lead to preferential air

passages and significant heterogeneity in the drying. However, the two lower threshold values of T_{os} and U_{prod} must not be too low, since excessively slow drying would lead to microbial development inside the product.

The energy efficiency Eff (Y_3), calculated as the ratio between the bare minimum energy required to evaporate the water in the product and the energy supplied by combustion of the biomass (i.e. to the process as a whole) must be at least 36%. This efficiency value is the highest encountered (Boroze et al., 2014) on a direct gas combustion dryer in Sub-Saharan Africa. The value of 60% is generally considered to be a good performance for a food product dryer. This higher value, allocated to the process as a whole, may appear ambitious, but the energy performances of the selected dryer should make it achievable.

The dried product flow $Prod$ (Y_4) was evaluated to match the processing capacities of the majority of local companies. This objective of process productivity in particular observes the technical and social organization of its facilities, often on a family basis. The duration of the prior unit operations (hulling, crushing, agglomeration and cooking) involves the operators starting the drying operation after midday. To avoid the working day being extended past 20:00, the dried product flow must be between 20 and 30 kg/h.

The observation variables Y_5 (ΔP_p), Y_6 (MPw), Y_7 (T_{op}) and Y_8 (M_{exch}) were constrained by the objectives of manufacturing and process operation in Sub-Saharan Africa.

The pressure drop ΔP_p (Y_5) encountered in the combustion smoke circuit was due to the installation and to the profile of the elliptical turbulators. For ΔP_p values of less than 20 Pa, smoke evacuation may be contemplated by natural convection, via a stack effect. Above this value, assistance by a smoke extractor is vital. In this case, given the difficulties of importing such a component, local manufacture needed to be ensured. To avoid exceeding an extractor motor power level of tens of watts, a pressure drop of less than 80 Pa was stipulated. In addition, the maximum smoke temperature threshold T_{op} (Y_7) was set at 220°C, to ensure the motor availability and limit the manufacturing complexity of the extractor ("high temperature" motor, remote motor).

The mechanical power MPw (Y_6) on the shaft end of the drying air circuit fan motor must be less than 1 kW. For this level of mechanical power, the electrical power input is approximately 1.25 kW, i.e. a current of around 6 A at a voltage of 220 V. The availability of motors of this sort of power poses no problem. Conversely, for many companies, a current level greater than 6 A for an electrical installation is difficult to guarantee.

For price reasons, the exchanger steel mass M_{exch} (Y_8) must not exceed 50 kg. Unlike in a Northern context, where the cost of labor might lead to the price of materials being disregarded in the cost price composition of sheet metal equipment, in Sub-Saharan Africa this is not the case. Surveys of labor costs and materials prices in Burkina Faso and Cameroon enabled us to calculate a manufacture cost for the exchanger. We take the view

that this amount must not exceed 10% of the total price of the installation, equating to a material weight of less than 50 kg. Thus, this observation variable takes into consideration the objectives of both economy and manufacturing constraints in developing countries.

To guarantee good corrosion resistance of the installation, steam condensation in the circuit outlet smoke must be prevented. The smoke temperature T_{op} (Y_9) deemed to be critical is 120°C, below which the satisfaction level is low. It should be noted that T_{op} is expressed via two antagonistic observation variables (Y_7 and Y_9).

In order to produce satisfaction indexes Z , for each observation variable, a desirability function was configured using Eq.(2):

$$Z_k(Y_k) = \frac{1}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\tan((Z_k^+ - 0.5) \cdot \pi) \cdot \frac{Y_k - Y_k^m}{Y_k^+ - Y_k^m} \right) + 0.5 \quad (2)$$

with

$$Y_k^m = \frac{Y_k^+ + Y_k^-}{2}$$

This sigmoid function proposed by Raffray et al. (2015) presents the following advantages. It is centered, symmetrical and strictly monotonic. Furthermore, its value near 0 or 1 converges sufficiently slowly to be able to numerically discriminate desirability levels over a wide domain of Y values. The desirability function may be increasing (a) or decreasing (b), as presented in Figure 3 for the observation variables Eff (Y_3) and T_{os} (Y_1) respectively.

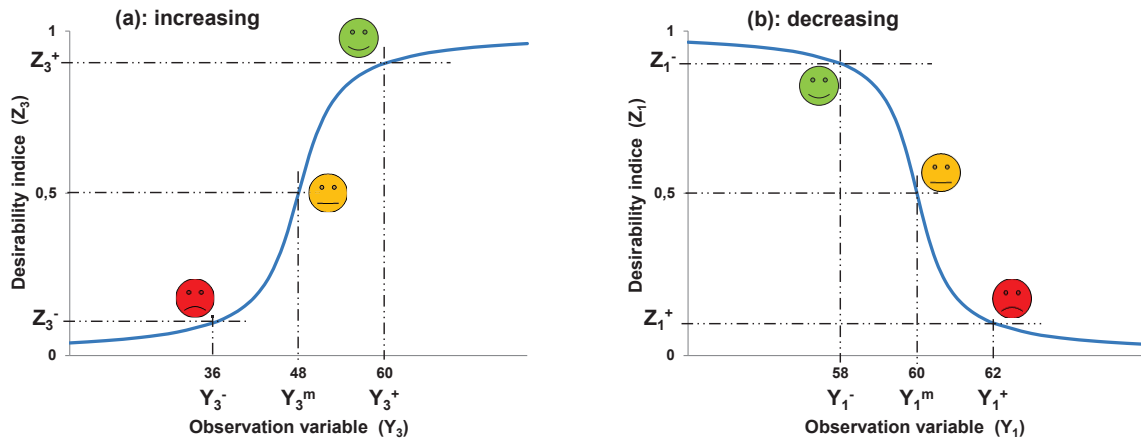
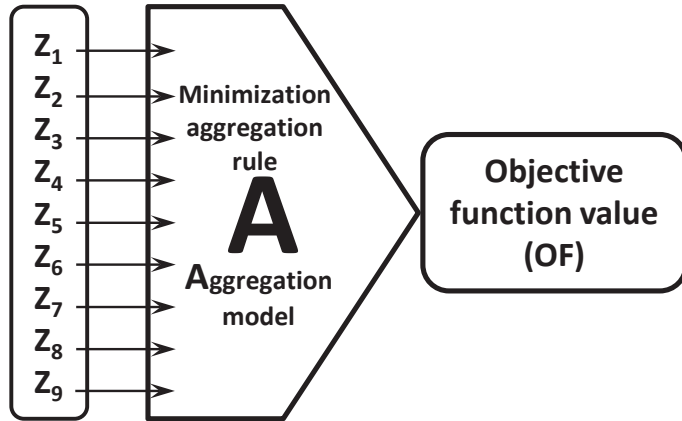


Fig. 3. Desirability functions applied to the observation variables Y_3 and Y_1 .

3.3. “Aggregation” step for scoring/ranking a candidate solution



We saw previously that for a candidate design solution S_i , the simulation tool produces satisfaction indexes Z_k for each of the observation variables Y_k . In the last step of the OIA method, the problem of multi-objective design was thereby reduced to a value OF_i associated with a single objective function. According to the precautionary principle proposed by

Scott et Antonsson (1998), the minimization aggregation rule proposed by Kim and Lin (2006; 2000) was used. Thus, the OF value was expressed using Eq.(3):

$$OF = \min(Z_k) \quad (3)$$

This function corresponds to a precautionary principle insofar as it evaluates a candidate solution as a whole via the most prejudicial criterion for this solution.

4. Genetic algorithm for process optimization

The OIA method is designed to be integrated into a process optimization procedure. Hence, an algorithm was set up to seek the best-performing design solution(s) in the candidate solutions space. The optimization of our multi-objective problem was based on an iterative method whose evolution within the search space was orchestrated by probability functions and random number selection. This evolution makes it possible to converge fairly rapidly toward a high-performance solution. However, it is not possible to mathematically guarantee that the best-performing solution will be derived from the search space. The genetic algorithm built as per this method is justified, for our study, since it has been used successfully for resolving multi-objective problems in design (Bingul, 2007; Deb et al., 2002; Gupta and Garg, 2013; Raffray et al., 2015). The algorithm developed for this study is presented schematically in Figure 4.

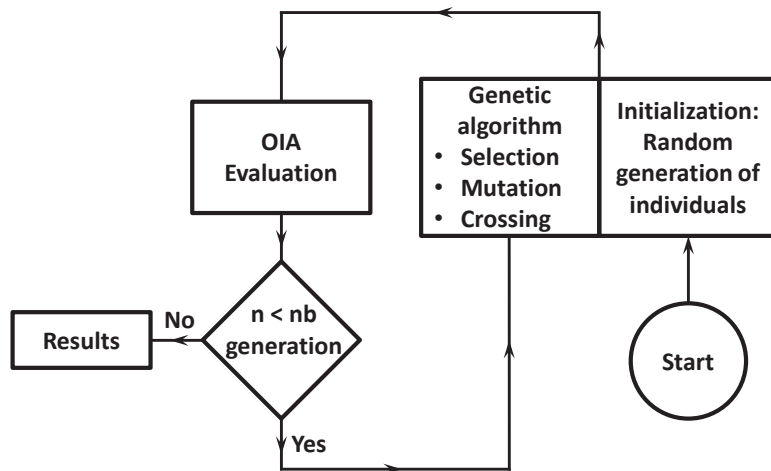


Fig. 4. Functional description of genetic algorithm.

This algorithm integrates the OIA tool in its architecture for evaluating the design solutions (set of values adopted by the eight design variables).

First of all, 70 design solutions, known as individuals, were chosen at random, to form the first generation to initiate the optimization procedure (Fig.4). Then an iterative evolution of the individuals was based on the selection, mutation and crossing functions, until the maximum number of generations chosen was reached.

To avoid evaluating the same individual more than once (clone), a register was created in order to retain the design, observation and interpretation variables of the individuals already simulated. Thus, if a clone appeared, the algorithm called up the register, and did not evaluate its already known OF value.

The probability functions used by the genetic algorithm needed to be configured beforehand. The challenge was to reduce the calculation time required for the code to converge toward a high-performance solution, while retaining some population diversity and guaranteeing extensive exploration of the search space.

Thus, the parameters of the algorithm developed for our study were set at the values presented in Table 3.

Table 3

Genetic algorithm settings.

Parameters	Values
Number of individuals	70
Number of generations	500
Crossing probability	70%
Mutation probability	35%

In the optimization procedure, it was important to minimize the calculation times while maintaining a good model prediction capacity. To this end, the OIA tool simulator was structured in two main parts (Rivier et al., 2016). The first produced, practically instantly (less than 2% of the total calculation time for a solution), the observation variables of the exchanger (Y_5 to Y_9), as well as those linked to the drying air (Y_1 and Y_2). In the second part, product layer drying was simulated with a calculation time of around two minutes, depending on the candidate solution (on a “conventional” Intel Xeon X5550 computer, 2.67 GHz , 4 Gb RAM, Microsoft Windows 7 Pro 64bit OS). Thus, if the interpretation of the observation variables derived from the first part produced at least one unsatisfactory satisfaction index Z (value < 0.2), the drying simulation was not executed. This strategy shortened by a factor of 10 the calculation time required for the optimization procedure as a whole.

5. Optimization procedure

5.1. Convergence of the genetic algorithm

The genetic algorithm was used over 500 generations of 70 individuals (Table 3). Several optimization procedures were used to validate these parameters. By way of example, Figure 5 describes the genetic algorithm convergence speed in generating a candidate solution. We can distinguish a steeply rising phase in the OF value (first 100 iterations), followed by a plateau phase. Convergence appears to take effect after 300 iterations. The procedure calculation time was around 120 hours on a computer configured as specified above.

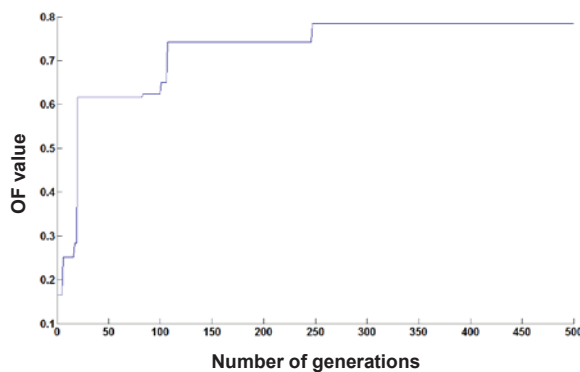


Fig. 5. Genetic algorithm convergence.

5.2. Presentation and analysis of optimization solutions

After the algorithm parameterization phase, several optimization procedures (Init.) were conducted; on completion, they converged toward the same results.

Thus the first row of Table 4 presents the design variable values associated with the candidate design solution deemed to be the best-performing, i.e. which obtained the best OF value in these “initial” optimization procedures (Init.). Similarly, the first row of Table 5 provides the observation variables and their satisfaction index corresponding to this Init. procedure. The satisfaction index determining the OF value is shown in bold type.

The best-performing candidate design solution derived from the Init. optimization procedure is built with a fairly small tube diameter of 42.4 mm (X_1). However, during the development of the process simulator (Rivier et al., 2016), design solutions based on larger diameter tubes of 60.3 mm (X_1) were able to be tested, and exhibited good performances. Hence, it was decided to repeat three optimization procedures (A, B and C), but with for each one, the value of the variable X_1 fixed at one of the three tube diameter values: 42.4, 60.3 or 76.1 mm respectively.

The following rows of Tables 4 and 5 present the variable values (X in Table 4; Y and Z in Table 5) corresponding to the best-performing optimization solution for each procedure A, B and C.

Table 4

Design variables of the high-performance design solutions for each optimization procedure.

		Design variables								
		OF	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
		value	d (mm)	L _{tube} (m)	N _{b_tube} (-)	α (degree)	ΔS (%)	T _{ip} (°C)	R _p (m)	R _s (m)
Procedures	Ini t	0.784	42.4	0.6	12	60	20	700	0.035	0.095
	A	0.790	42.4	0.6	11	60	10	725	0.035	0.095
	B	0.750	60.3	1.0	7	60	15	750	0.035	0.080
	C	0.385	76.1	0.9	7	60	15	650	0.03625	0.080

Table 5

Observation variables and satisfaction indexes of the high-performance design solutions for each optimization procedure.

		Observation variables and satisfaction indexes									
		OF	Y ₁ / Z ₁	Y ₂ / Z ₂	Y ₃ / Z ₃	Y ₄ / Z ₄	Y ₅ / Z ₅	Y ₆ / Z ₆	Y ₇ / Z ₇	Y ₈ / Z ₈	Y ₉ / Z ₉
		value	T _{os} (°C)	U _{prod} (m s ⁻¹)	Eff (%)	Prod (kg h ⁻¹)	ΔP _p (Pa)	MPw (kW)	T _{op} (°C)	M _{exch} (kg)	T _{op} (°C)
Procedures	Init	0.784	59.0 / 0.815	0.282 / 0.882	62.3 / 0.915	27.0 / 0.784	19.5 / 0.867	342 / 0.937	142.0 / 0.918	25.3 / 0.974	142.0 / 0.805
	A	0.790	59.1 / 0.796	0.282 / 0.881	62.0 / 0.914	27.1 / 0.790	21.3 / 0.858	342 / 0.937	149.5 / 0.901	23.2 / 0.976	149.5 / 0.897
	B	0.750	58.7 / 0.853	0.279 / 0.907	61.1 / 0.908	26.6 / 0.750	21.4 / 0.857	169.3 / 0.956	165.1 / 0.835	39.6 / 0.907	165.1 / 0.949
	C	0.385	53.7 / 0.967	0.287 / 0.742	57.3 / 0.874	24.4 / 0.395	8.0 / 0.905	167.1 / 0.956	188.9 / 0.394	45.6 / 0.385	188.9 / 0.971

The best-performing design solution for the Init. procedure, has an allocated OF value of 0.784. Its associated values (X, Y and Z) provide significant indications in terms of the process sizing, as described below.

A generator producing smoke temperatures of around 700 to 750°C (X_6), thus demonstrating good energy efficiency, must therefore be recommended. The heat exchanger configuration is based on 12 tubes (X_3) of the smallest diameter ($X_1 = \varnothing 42.4 \text{ mm}$) proposed, and 0.6 m in length (X_2). The elliptical turbulator is shaped with a bend angle (X_4) of 60°, and percentage ΔS free section flow between the tube and turbulator (X_5) of 20%. The impeller diameters of the smoke extractor (X_7) and of the drying fan (X_8) are 70 mm and 190 mm, respectively.

The OF value is high. It will be noted that it is the productivity variable (Y_4) which determines this value. However this remains high (27 kg/h).

The characteristics of the drying air, temperature values (Y_1) and air speed values (Y_2) remain below the stipulated limits ($Y_1 < 62^{\circ}\text{C}$ and $Y_2 < 0.3 \text{ m s}^{-1}$) for safeguarding product quality while retaining a good drying speed. Thus they represent a very good compromise between food product integrity during drying, and productivity.

The energy efficiency (Y_3) is remarkably high, which can be explained by a high smoke temperature level (X_6) at the exchanger inlet, by the performance of the cross-flow bed dryer and by the contribution of elliptical turbulators in the exchanger tubes. A compromise is also observed between the two antagonistic variables of smoke temperature at the primary circuit outlet (Y_7 and Y_9), for which local manufacture and service life of the smoke extractor may be reconciled with limiting the risk of smoke condensation.

The indexes of the other variables Y_5 (pressure loss in the primary circuit), Y_6 (mechanical power on the drying air fan motor shaft) and Y_8 (exchanger steel mass) present a good satisfaction level. However, the pressure loss (Y_5), very close to 20 Pa, rules out smoke extraction by natural convection (stack effect).

Lastly, we can note good consistency with the relevant process design guidelines for these results produced by the Init. optimization procedure.

The following lines of Tables 4 and 5 present the results of these procedures A, B, and C, in order to compare them with the best-performing solution from the Init. optimization procedure (first row).

Optimization procedure A (variable X_1 fixed at $\varnothing$ 42.4 mm) proposed a design solution with configuration (X variables), performances (Y variables and Z indexes) and OF value (= 0.790) very close to those found for the best-performing solution from the initial procedure.

Optimization procedure B (variable X_1 fixed at $\varnothing$ 60.3 mm) reveals a design solution with an OF value of 0.750, i.e. presenting a higher satisfaction level.

Optimization procedure C generated a low OF value (0.385), showing that heat exchanger manufacture using a tube diameter of 76.1 mm should be avoided.

Thus, analysis of these results was able to validate that the best-performing design solution for the process is indeed that proposed by the initial optimization procedure, which confirms the good prediction capacity of the optimization procedure.

However, the values derived from procedure B (X_1 fixed at $\varnothing$ 60.3 mm) might intervene. Indeed, the proposed design solution has a high allocated satisfaction level (0.750). In addition, this solution presents an advantage in terms of local manufacture and sheet metal working practicalities: fewer tubes (7 instead of 11) and a bigger diameter, facilitating in particular the welding operation.

Hence, the algorithm does not pose any problems in itself, insofar as we were able to verify its capacity to produce a high-performance solution; even though due to its stochastic aspect, we can only assert that this is the “optimum” solution. In addition, we were able to demonstrate the relevance of favoring interaction between the numerical tool and its user, to investigate particular zones of the search space (value of the variable X_1 fixed in procedures A, B and C). This “to-and-fro” between user and tool is necessary in order to introduce diversity into the choice of high-performance solutions.

However, this “manual” intervention carried out on the tool demonstrates the limits of using a genetic algorithm such as the one developed for this study. Indeed, generating a set of design solutions similar in terms of performance and diversified is not an automatic process. Thus, a finer search space exploration and analysis tool, introducing for example this notion of diversity, could be integrated into the algorithm architecture.

Ultimately, the optimization algorithm proposed for this study must be regarded as an interactive design assistance tool, rather than as a program providing a single procedure for converging toward the optimum solution.

6. Conclusion

This article proposes an original integrated “Observation-Interpretation-Aggregation” (OIA) method for process optimization. The optimization phase using a genetic algorithm was used to propose high-performance solutions. These solutions represent a very good compromise between all the design objectives selected. Ultimately, the designer obtains objective elements for assessing process performances, making decisions and working toward creating drying installations in West Africa with a biomass combustion energy supply

The originality of the OIA method lies in being able to help the designer in their process configuration choices, thanks to formalization of these preferences and the contribution of desirability functions, their parameterization, and the production of satisfaction indexes. This interpretation step nonetheless requires good expertise in order to specify the satisfaction levels of each of the observation variables, and to realistically and relevantly define the desirability functions parameterization thresholds.

If this interpretation step is conducted correctly, the rule adopted for the satisfaction indexes of minimization aggregation into a single objective function seems expedient. Indeed the design solutions derived from the optimization and maximization procedure of this objective function have a good satisfaction level, and offer a compromise between all the design objectives.

This method, applied to our case study of the process of coupling a biomass energy conversion unit to a dryer, has proven to be extremely useful in processing a complex problem, of optimizing a process comprising a succession of unit operations pursuing multiple objectives. However, use of a genetic algorithm metaheuristic must not lead us to forget that not all of the solutions space is investigated, with the risk of disregarding solutions of interest. Hence, the quest for other optimization algorithms and complementary tools, providing a better grasp of the search space, represents a major direction of work for the future.

Nomenclature	
<i>A</i>	“aggregation” OIA method step
<i>d</i>	external tube diameter (mm)
<i>Eff</i>	unit efficiency (%)
<i>I</i>	“interpretation” OIA method step
<i>L_{tube}</i>	tube length (m)
<i>M_{exch}</i>	heat exchanger mass (kg)
<i>MPw</i>	fan mechanical power (kW)
<i>N_{b tube}</i>	tube number (-)
<i>O</i>	“observation” OIA method step
<i>OF</i>	global objective function value (-)
<i>Prod</i>	dried product flow (kg h ⁻¹)
<i>R</i>	fan impeller radius (m)
<i>S</i>	candidate design solution
<i>T</i>	temperature (°C)
<i>U_{prod}</i>	mean axial velocity across food product (m s ⁻¹)
<i>X</i>	design variable
<i>Y</i>	observation variable
<i>Z</i>	satisfaction indices
<i>ΔP</i>	pressure drop (Pa)
<i>ΔS</i>	percentage sectional flow area left free by the turbulator (%)
<i>Greek symbols</i>	
<i>α</i>	bending angle (degree)
<i>Subscripts</i>	
<i>ip</i>	inlet primary circuit
<i>op</i>	outlet primary circuit
<i>os</i>	outlet secondary circuit
<i>p</i>	primary circuit
<i>s</i>	secondary circuit

References

- Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Moles, C.G., Alonso, A.A., (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology* 14(4), 131-144.
- Bingul, Z., (2007). Adaptive genetic algorithms applied to dynamic multiobjective problems. *Applied Soft Computing* 7(3), 791-799.
- Boroze, T., Desmorieux, H., Méot, J.-M., Marouzé, C., Azouma, Y., Napo, K., (2014). Inventory and comparative characteristics of dryers used in the sub-Saharan zone: Criteria influencing dryer choice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40(0), 1240-1259.
- Chen, S.-J., Hwang, C.-L., (1992). Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 289-486.
- Collignan, A., (2011). Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique: application à une structure aéronautique. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- Dabat, M.H., Blin, J., Rivier, M., (2010). Facing the challenge of energy and food in Burkina Faso, *Proceeding of the Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food Symposium, Montpellier, France*, p. 7.
- de Janvry, A., Sadoulet, E., (2000). Rural poverty in Latin America: Determinants and exit paths. *Food Policy* 25(4), 389-409.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6(2), 182-197.
- Derringer, G., (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of quality technology* 12, 214-219.
- Diefes, H., Okos, M., Morgan, M., (2000). Computer-aided process design using food operations oriented design system block library. *Journal of Food Engineering* 46(2), 99-108.
- Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M., (2005). Multiple criteria decision analysis. Springer's International series.
- García-Moreno, P.J., Morales-Medina, R., Pérez-Gálvez, R., Bandarra, N.M., Guadix, A., Guadix, E.M., (2014). Optimisation of oil extraction from sardine (*Sardina pilchardus*) by hydraulic pressing. *International Journal of Food Science & Technology* 49(10), 2167-2175.
- Gero, J.S., Kannengiesser, U., (2004). The situated function–behaviour–structure framework. *Design Studies* 25(4), 373-391.
- Gero, J.S., Kannengiesser, U., (2007). A function–behavior–structure ontology of processes. *AI EDAM* 21(04), 379-391.
- Gupta, S.K., Garg, S., (2013). Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithm. *Control and Optimisation of Process Systems* 43, 205.
- Harrington, E., (1965). The desirability function. *Industrial quality control* 21(10), 494-498.

- Kim, K.-J., Lin, D.K.J., (2006). Optimization of multiple responses considering both location and dispersion effects. *European Journal of Operational Research* 169(1), 133-145.
- Kim, K.J., Lin, D.K.J., (2000). Simultaneous optimization of mechanical properties of steel by maximizing exponential desirability functions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C: Applied Statistics* 49(3), 311-325.
- Lespinard, A.R., Arballo, J.R., Taus, F.J., Mascheroni, R.H., (2015). Multi-Objective Optimization of the Pasteurization Process of Pumpkin Cubes Packaged in Glass Jars. *International Journal of Food Engineering* 11(5), 679-689.
- Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D., (2003). *Food process design*. CRC Press.
- Raffray, G., Collignan, A., Sebastian, P., (2015). Multiobjective optimization of the preliminary design of an innovative hot-smoking process. *Journal of Food Engineering* 158, 94-103.
- Rivier, M., Collignan, A., Méot, J.M., Madoumier, M., Sébastien, P., (2016). Development of a process simulator with a view to multi-objective optimization. Application to a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy. Submitted to *Innovative Food Science and Emerging Technologies*.
- Rivier, M., Sébastien, P., Goli, T., Raffray, G., Collignan, A., (2015). Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries. *Applied Thermal Engineering* 81(0), 92-101.
- Scott, M.J., Antonsson, E.K., (1998). Aggregation functions for engineering design trade-offs. *Fuzzy Sets and Systems* 99(3), 253-264.
- Semassou, C., Nadeau, J., Sebastian, P., Pailhès, J., Vianou, A., (2013). Optimisation multicritère en conception de système photovoltaïque pour des maisons individuelles en contexte africain. *Revue des Energies Renouvelables* 16(2), 225-246.
- Sendín, J.O.H., Alonso, A.A., Banga, J.R., (2010). Efficient and robust multi-objective optimization of food processing: A novel approach with application to thermal sterilization. *Journal of Food Engineering* 98(3), 317-324.
- Trystram, G., (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering* 110(2), 269-277.

Chapitre 4 : Discussion générale

Discussion générale

La définition de ce travail de thèse s'appuie sur une vingtaine d'années de missions et d'expertises en Afrique de l'Ouest et du Centre dans le domaine des procédés et équipement agroalimentaires. L'immersion dans le secteur de la transformation agroalimentaire locale réalisée dans le cadre de projets de recherche-développement a permis de récolter des informations techniques conséquentes et d'enrichir au fil des ans une base de données en « Génie mécanique » et « conception d'équipements ».

Le contexte des pays d'Afrique subsaharienne reste complexe car ces derniers subissent une grande mutation économique et sociale et doivent s'adapter à des enjeux mondiaux en lien notamment avec les changements climatiques. Plus qu'ailleurs, le développement de ces pays repose toujours aujourd'hui sur les filières agricoles et alimentaires. Ces pays, à forte croissance démographique et importante urbanisation, devront plus qu'ailleurs intégrer dans leur évolution des systèmes résilients et durables pour faire face à ces changements majeurs.

La partie bibliographique de ce travail présente le contexte actuel du secteur de la transformation agroalimentaire qui est encore majoritairement constitué de petites productions artisanales, dépassant tout juste l'échelle familiale. Toutefois l'émergence de Petites et Moyennes Entreprises (PMEs) est soulignée. Elles allient savoir-faire pour l'élaboration de produits traditionnels associés à des modes de consommation ancrés dans la culture locale, et dynamisme en réponse à la demande des consommateurs urbains ou à des produits de niches à l'exportation. Ce dynamisme est malheureusement freiné par le manque d'outils de production et d'énergies adaptés au contexte local.

La conception et la fabrication locales d'équipements agroalimentaires en Afrique de l'Ouest restent anecdotiques. Peu d'équipes de conception se sont constituées et celles qui existent, restent trop cloisonnées, malgré les bonnes compétences qu'elles regroupent.

Les PME qui se sont engagées dans la production de produits séchés en Afrique de l'Ouest rencontrent à elles seules l'ensemble des problèmes évoqués ci-dessus. Les paragraphes 1.1.3 et 1.1.5 de la partie bibliographique amènent à constater que l'énergie solaire et la convection naturelle restent prédominantes sur les équipements de séchage de fruits, de produits céréaliers et animaux. Il est remarquable de recenser un nombre aussi important de prototypes de séchoirs, conçus par « essai-erreur » dans le cadre de projets nationaux ou internationaux.

Fort de tous ces constats, notre conviction est que des actions peuvent et doivent être entreprises. Dans le cadre de ce travail, l'activité de séchage de produits alimentaires en Afrique de l'Ouest a été choisie car elle constitue un cadre idéal pour mener une étude de

conception et d'optimisation. Le choix s'est porté sur un procédé couplant une unité de conversion biomasse énergie à un séchoir de produits céréaliers et a été justifié au paragraphe 1.1.5. Le séchoir CSec-T, déjà conçu au début des travaux de thèse, n'a pas fait l'objet d'une optimisation particulière de son principe ou de sa configuration dans la mesure où cet équipement a été fabriqué localement et commence à se diffuser sur plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest. Ainsi, les grandeurs caractéristiques du séchoir (nombre de colonne, nombre et surface de claies), sont fixées car correspondent à un contexte d'application du séchoir clairement défini. Par contre, l'optimisation des conditions d'air de séchage fait partie intégrante de ce travail.

Une des contraintes majeures au développement de cet équipement restait le coût énergétique de l'opération. L'efficacité énergétique du séchoir n'étant pas remise en cause car clairement démontrée, la baisse du coût de cette opération peut être obtenue par l'utilisation de bioénergie. De ce fait, l'utilisation d'un échangeur de chaleur permettant le transfert de l'énergie des fumées, issues de la combustion de coproduits (noyaux ou coques), vers l'air de séchage prend tout son sens (paragraphe 1.1.5.2).

Du premier article (« *Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries* »), il ressort l'importance d'optimiser ces échangeurs en choisissant des échangeurs à tubes avec turbulateurs.

Le turbulateur elliptique conçu dans ce travail est innovant à plus d'un titre. Sa conception tient compte à la fois i) d'un développé (Figure 33, chapitre 2) facilement « traçable » à partir d'un gabarit sur une plaque de tôle, ii) d'une découpe et d'une mise en forme aisées dans un atelier en Afrique et enfin, iii) d'une géométrie finale qui a pour effet attendu, d'accentuer fortement les effets de turbulence dans le tube, que ce soit au centre ou à proximité des parois. Le profil particulier de ce turbulateur et ses futures applications pour la conversion de biomasse en énergie utilisable en séchage ont nécessité une étude spécifique. C'est l'objectif de la première publication. Le travail présenté dans celle-ci se démarque des travaux généralement conduits par un bon nombre d'auteurs dans la mesure où le régime d'écoulement recherché est bien plus faible que ceux étudiés dans ces publications (souvent au-delà de 5 000). En effet, pour tester leur matériel, les auteurs se situent dans des régimes d'écoulement turbulent importants et bien éloignés de nos domaines d'application. Aussi, le dispositif expérimental présenté au chapitre 2 est conçu pour mimer les conditions réelles d'application du procédé de couplage de l'unité de conversion biomasse énergie au séchoir. L'étude a, en particulier, permis d'intégrer les dispersions de fabrication mesurées lors de la réalisation de turbulateurs « prototypes » en Afrique. Ces dispersions sont reproduites sur les turbulateurs elliptiques utilisés.

Des modèles de représentation du nombre de Nusselt et du facteur de friction ont été élaborés sur la base de près de 800 valeurs expérimentales. Il ressort des campagnes expérimentales que les performances du turbulateur elliptique sont assez remarquables. Ainsi, selon les régimes d'écoulement et selon le profil du turbulateur, la valeur du nombre de Nusselt est multipliée par un coefficient de 4 à 9 comparativement à une configuration d'échange tubulaire sans turbulateur. Mais ce n'est pas sans conséquence sur les pertes de charge puisque le facteur de friction, pour des régimes d'écoulement proches de ceux relevés dans la littérature, est de 2 à 3 fois plus importants.

Ceci dit, pour de basses valeurs du régime d'écoulement approchant les valeurs des futures situations d'application, le nombre de Nusselt reste élevé proportionnellement à la chute de pression qui elle, décroît fortement pour certaines variantes du turbulateur. Effectivement, le travail montre l'effet bénéfique des dispersions géométriques induites par une construction locale qui maintiennent une bonne performance thermique (nombre de Nusselt) sans induire de pertes de charges excessives. D'ailleurs, dans certaines conditions de fonctionnement, une évacuation de fumées par convection naturelle pourrait même être envisageable.

Le travail préliminaire de modélisation, effectué sur l'échangeur tubulaire avec turbulateur et valorisé dans le premier article de la thèse, montre des comportements en termes de transfert thermique et de perte de pression très différents en fonction des variables de conception de l'unité d'échange (diamètre des tubes, profil des turbulateurs, ...).

Aussi, l'étape suivante a consisté à dimensionner et optimiser le procédé de transfert d'énergie et de séchage dans sa globalité. Ainsi, les variables à observer comprennent les deux critères (Nusselt et facteur de friction) liés à l'unité d'échange, la qualité de l'aliment traité, les performances de production, les performances énergétiques ainsi que l'adaptabilité à la fabrication et l'utilisation locales. Dès lors, avec la multiplicité de ces variables d'observation, le problème de conception du procédé devenant complexe, une méthodologie de conception déjà éprouvée a été déployée : la méthode Observation, Interprétation et Agrégation (O.I.A.). Celle-ci est présentée dans les articles 2 et 3 de la thèse, avec le développement de la phase « Observation » dans le deuxième article et celui des phases suivantes « Interprétation » et « Agrégation » dans le troisième article.

Le simulateur de procédé, qui est décrit dans le deuxième article, est construit autour de modèles de perte de pression et de transfert de masse et de chaleur, pour former le modèle d'observation du procédé. L'unité de transfert thermique équipée de turbulateurs est ainsi mise en situation pour au final discriminer des situations de conception sur la base de critères divers et contextualisés, autres que ceux rencontrés habituellement dans la littérature.

Le simulateur est codé dans un environnement Matlab[®]. Sa construction et celle des modèles qui le constituent, est en adéquation avec l'objectif attendu, à savoir s'intégrer dans un processus d'optimisation du procédé. Cela a exigé d'évaluer les propriétés du simulateur en termes de « *capacité de prédiction* », de « *cohérence avec l'expertise* », de « *temps de simulation* » et de « *fiabilité* ». Ces propriétés sont détaillées et justifiées dans l'article n°2.

L'adaptation du simulateur à un objectif d'optimisation a ainsi pu être soulignée. En particulier, la bonne capacité de prédiction du simulateur s'explique par le fait qu'il a été construit sur un important jeu de données expérimentales, générées lors d'essais pilotes en conditions parfaitement maîtrisées. La qualité des dispositifs expérimentaux (chapitre 2.2) utilisée dans le cadre de cette thèse a été déterminante pour garantir cette propriété.

Les résultats générés par le simulateur à partir des six différentes situations de conception testées ont été jugés comme cohérents par les ingénieurs de recherche de l'équipe présentant une expertise dans le domaine.

Le simulateur a été conçu afin de pouvoir limiter les temps de calcul. Ainsi, son architecture se scinde en deux parties afin que les variables d'observation produites à l'issue de la première partie puissent être évaluées, et qu'en fonction de leur niveau de désirabilité la simulation des performances d'une situation de conception soit interrompue si les indices de désirabilité ne sont pas satisfaisants. Cette stratégie est associée à la simplification de plusieurs modèles, celui de caractérisation des pertes de charges induites par le produit au cours du séchage et surtout le modèle de séchage du produit disposé en couches sur lequel repose la quasi-totalité des temps de calcul. Cette réduction de modèles s'est réalisée dans le respect de leur capacité de prédiction qui a été validée par confrontation avec l'expérience. La validation du simulateur est réalisée sur la base de l'évaluation des six situations de conception présentée dans l'article n°2. Sa fiabilité, à savoir son aptitude à converger systématiquement vers une solution (production des variables d'observation), a été constatée lors de nombreux tests de situations de conception.

Une fois les performances du simulateur évaluées, et du fait de la complexité de l'espace de conception étudié, une démarche de conception (troisième article) s'appuyant sur les phases « *Interprétation* » et « *Agrégation* » de la méthode O.I.A., est mise en œuvre. Elle prend notamment en compte l'expertise de l'équipe de conception, par la définition des domaines de variation des variables de conception et le pas de discrétisation de ces domaines. L'expertise du concepteur lui permet également, par sa connaissance de l'environnement de fabrication et d'utilisation du procédé, d'injecter de la connaissance par la définition réaliste des préférences attendues en affectant les variables d'observation de seuils de satisfaction et ainsi interpréter leurs valeurs par les fonctions de désirabilité.

L'agrégation des indices de satisfaction selon la règle de minimisation se justifie encore par le choix des variables d'observation, jugée selon l'expertise, d'importance équivalente les unes aux autres selon un principe de précaution.

Au final, la production de solutions de conception performantes est générée par un algorithme génétique, choisi pour sa qualité de convergence. On peut relever que la méthode d'évolution au sein de l'espace de recherche n'est pas très rapide et pourrait constituer une piste d'amélioration. Par ailleurs, l'aspect stochastique de l'algorithme ne garantit pas que la solution la plus performante soit extraite.

À l'issue du processus d'optimisation, la solution de conception retenue est affectée d'un indice de désirabilité élevé qui traduit un bon compromis entre préservation de l'intégrité du produit alimentaire, productivité et efficacité énergétique globale. En effet, les caractéristiques de l'air de séchage restent en deçà des limites imposées pour préserver la qualité du produit tout en garantissant une bonne vitesse de séchage. Le haut niveau de l'efficacité énergétique s'explique par la performance du séchoir à lit traversant et par la performance des turbulateurs elliptiques dans les tubes de l'échangeur. La perte de pression sur le circuit des fumées est toutefois légèrement trop élevée pour envisager une extraction de fumée par convection naturelle.

L'analyse des valeurs de variables de conception de la solution de conception montre que pour atteindre un bon niveau de performance du procédé, il faut pouvoir disposer d'un générateur thermique délivrant des fumées à hautes températures. De plus, les valeurs de l'angle de pliage et de dispersion surfacique du turbulateur sont tout à fait adaptées à une fabrication locale.

Si les résultats obtenus ci-dessus montrent bien tout l'intérêt de la méthodologie mise en œuvre au cours de ce travail, il n'en demeure pas moins que certains points peuvent être discutés et doivent être améliorés.

En premier lieu, il est important de rappeler l'objectif principal d'une telle démarche pour la conception de procédés agroalimentaires. Nous nous intéressons à un système complexe, intégrant plusieurs opérations unitaires et des variables de conception qui définissent un large espace de recherche conduisant à un grand nombre de solutions candidates. Même si l'on souhaite se démarquer d'une démarche « essai-erreur », la méthode O.I.A. et le processus d'optimisation qui en découle sont avant tout conçus pour aider le concepteur dans ses choix de solutions, aussi performantes que possible ce qui nécessite des allers-retours entre l'outil et le concepteur. Et au final, seule une mise en situation réelle (procédé pilote) permettra de valider ces choix ou, le cas échéant, nécessitera un retour à la phase de conception. Aussi, l'utilisation du terme « optimisation » peut porter à confusion ou

générer une certaine ambiguïté, dès lors que ce terme est perçu comme étant un processus de recherche d'un optimum dans la minimisation ou maximisation d'une fonction unique. On peut relever une ambiguïté sur l'utilisation du terme « optimisation » d'un point de vue mathématique et dans le domaine de la conception. L'optimisation en conception vise à explorer des domaines de solutions, à les interpréter pour en déduire des pistes de modifications du procédé et éventuellement réitérer le processus. Aussi, nous pourrions proposer de parler de processus d'aide à la décision en conception de procédé plutôt que de processus d'optimisation de procédé.

Cela nous amène à discuter de deux propriétés attendues du simulateur dans un tel processus.

La capacité de prédiction représente la capacité de calculer, à partir du modèle d'observation global, les variables d'observation avec une précision adaptée au besoin. Ceci malgré l'imprécision inhérente aux modèles physiques en raison des incertitudes propres aux variables contextuelles et aux variables de conception de ces modèles. Dans un processus d'aide à la décision, une bonne capacité de prédiction peut être revendiquée sous couvert d'avis d'experts qui jugent de l'adéquation entre adaptation au besoin dans l'aide à la décision et le niveau d'exigence de la précision et de la sensibilité des modèles d'observation. Cette adaptation rejoint des problématiques de robustesse (Quirante, 2012). Selon Quirante, lors de la mise en œuvre de la méthode O.I.A., la robustesse physique des modèles d'observation s'étend également aux modèles d'interprétation et d'agrégation (robustesse décisionnelle). En aide à la décision, si les seuils de désirabilité (paramétrage des fonctions de désirabilité) et les indices de pondération (le cas échéant pour l'étape d'agrégation) sont justifiés par des avis d'experts, la capacité de prédiction pourra ainsi être étendue et adaptée au besoin décisionnel.

Le temps de calcul du simulateur est un élément clé à considérer car dans un processus d'optimisation, ce temps sera à multiplier par autant d'itérations nécessaires à la convergence de l'algorithme. Cela peut représenter plusieurs jours de calcul pour un seul processus d'optimisation. Ainsi, un compromis doit être trouvé entre une rapidité d'exécution et une bonne capacité de prédiction du simulateur. Les modèles comportant des phases de calcul itératif affectent particulièrement le temps de simulation. Une des orientations possibles pour limiter ce temps dû à de tels modèles est de les simplifier autant que possible, tout en s'assurant d'une précision, adaptée au besoin, des variables d'observation.

Dans ce travail, les variables d'observation retenues semblent traduire de façon pertinente les différents objectifs de conception. Cependant, il serait peut-être judicieux d'œuvrer à la

construction de variables plus « sophistiquées » agrégeant plusieurs niveaux d'informations (comme cela est le cas en analyse de cycle de vie), pour définir des critères plus génériques comme des indicateurs environnementaux, (macro)économiques ou sociaux. Ils pourraient à terme être utilisés par la communauté scientifique et rendre les systèmes comparables dans la mesure où ils seraient analysés sur la même base. Dans un contexte de développement de procédés agroalimentaires au Sud, des apports en termes de construction d'indicateurs de désirabilité, associés à des variables d'observation adaptées au contexte, présentent un intérêt car ils permettraient d'appuyer les équipes de conception dans la détermination des seuils de désirabilité et de leur capacité décisionnelle.

Le simulateur élaboré dans ce travail pourrait être ouvert à d'autres situations de séchage. Certes, le modèle de séchage n'est pas très générique mais il est bien adapté à un objectif d'optimisation. La diffusivité de l'eau intra produit (non limitante dans notre application) pourrait être intégrée dans le modèle, afin d'étendre son application à tout autre produit comme des grains entiers précuits (niébé, fonio, ...). Mais l'impact d'un tel apport sur le temps de calcul du simulateur et sur la capacité de prédiction des variables de sortie du modèle pourrait poser problème.

L'utilisation de la méthode d'agrégation selon la règle de minimisation amène plusieurs commentaires. Différentes autres méthodes existent (cf. état de l'art) qui s'appuient sur la pondération des critères. Celles-ci présentent un intérêt dans la mesure où l'on souhaite simuler différents scénarii orientés vers un objectif précis. Or, la maîtrise des poids à attribuer à chacune des variables demande un niveau d'expertise difficile à atteindre et de fait amène à prendre des risques. Ces poids pourraient être appréciés par des techniques d'enquêtes et/ou en s'appuyant sur des outils complémentaires comme la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Une réflexion doit être conduite sur la pertinence de ces différents outils.

Enfin, l'aspect stochastique de l'algorithme génétique (article n°3) fait que l'exploration de l'hyper-espace de recherche de solutions n'est pas parfaite. D'autres algorithmes pourraient être explorés. À titre de piste future, l'élaboration de « systèmes interface » au sein desquels la représentation de solutions serait plus sophistiquées avec par exemple la visualisation intermédiaire des indicateurs de performance permettrait au concepteur d'être inséré dans la boucle d'aide à la décision afin d'appréhender de façon plus complète l'espace de recherche.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

En introduction de ce travail, le contexte particulier auquel sont confrontées les petites et moyennes entreprises (PMEs) agroalimentaires d'Afrique subsaharienne a été présenté. Les difficultés d'accès à la fourniture d'équipements efficaces, dont la conception et la maintenance seraient maîtrisées localement, s'ajoutent au manque de disponibilité des énergies. Les PME qui se sont spécialisées dans le séchage de produits alimentaires saisissent les opportunités qui se créent pour des marchés locaux ou à l'exportation, mais le mauvais rapport qualité / prix du produit sec est souvent dénoncé par les consommateurs. Ces PME ont besoin d'être accompagnées dans la définition puis dans l'offre de séchoirs adaptés au contexte local. L'apport de bioénergie devrait rendre les produits plus compétitifs.

Les équipes de conception du Sud n'ont à l'heure actuelle, ni les moyens, ni toutes les compétences pluridisciplinaires pour appuyer avec efficacité les équipementiers œuvrant dans le domaine de la transformation alimentaire au Sud. Pourtant, des méthodologies éprouvées dans d'autres domaines industriels existent et peuvent être adaptées et déployées pour concevoir des outils d'aide à la conception de procédés, aptes à formaliser l'expertise et les préférences des professionnels. Pour cela, le décloisonnement des différents maillons de la chaîne de conception constitue un préalable.

La méthode O.I.A. a été ici appliquée pour l'optimisation d'un procédé couplant une unité de conversion biomasse énergie à un séchoir de produits céréaliers. Les critères d'évaluation de situations de conception ont été définis et répondent à des objectifs de qualité produit, de productivité, d'efficacité énergétique et de fabrication locale. L'optimisation du procédé a été réalisée avec comme finalité, la satisfaction de tous ces objectifs.

Après avoir modélisé l'échangeur de chaleur et apprécié ses performances par intégration d'un turbulateur elliptique innovant, les modèles de représentation des pertes de pression et de transferts de masse et de chaleur à l'échelle de l'ensemble du procédé ont été développés et assemblés dans un simulateur. Huit variables de conception et huit variables d'observation en constituent respectivement les variables d'entrée et de sortie. Les propriétés de cohérence et de capacité de prédiction de ce simulateur ont pu être démontrées lors de l'évaluation de six situations de conception du procédé, testées dans des temps de calcul jugés raisonnables.

Le simulateur a ensuite été intégré dans un environnement d'optimisation multicritère. Des domaines de désirabilité, prenant en compte l'expertise des concepteurs, ont été attribués aux variables d'observation. Ces variables ont été agrégées en un indicateur unique. Une

note est ainsi attribuée aux situations de conception de l'espace de recherche. La règle d'agrégation (par le minimum) a été choisie par « principe de précaution » et dans la mesure où chaque variable est associée à un niveau de satisfaction jugé équivalent aux autres. L'espace de recherche des situations de conception a été exploré par un algorithme génétique qui a permis de proposer des solutions de conception jugées performantes, car présentant un bon compromis entre les différents objectifs de conception retenus.

Les perspectives à donner à ce travail concernent la poursuite de l'appropriation de la méthode O.I.A. pour la conception de procédés de transformation agroalimentaire. En premier lieu, il serait nécessaire de préciser plus clairement les propriétés attendues des modèles dans un objectif d'optimisation. Des premières propositions de critères ont été faites dans le cadre de ce travail mais restent discutables et doivent être revisitées si l'on veut, à terme, acquérir une grille d'évaluation des performances souhaitées pour le simulateur du procédé. La méthode O.I.A. et l'algorithme génétique constituent des outils interactifs qui permettent de (pré)visualiser les performances de situations de conception. Mais comme cela a pu être constaté lors des processus d'optimisation, il est possible de passer à côté de solutions d'intérêt. Aussi, la modification de l'algorithme génétique utilisé ou bien la recherche d'autres algorithmes d'optimisation doit également constituer un axe de travail.

Le travail réalisé dans le cadre de la thèse sera mis à profit pour la réingénierie de procédés de séchage en Afrique de l'Ouest. Des démarches ont d'ores et déjà été entreprises auprès de bailleurs internationaux pour le financement d'activités, autour de la valorisation de la biomasse, pour le développement d'unités de production.

Ces démarches de conception doivent être poursuivies sur de nouveaux projets financés (Bénin et Colombie) au cours de l'année 2017. L'un concernera la précuisson et le séchage de légumineuses où une importance particulière sera accordée à la prise en compte de critères sensoriels, nutritionnels voire même sociaux. Par ailleurs, les activités du deuxième projet (changement d'échelle d'un séchoir « flash » de grains d'amidon de manioc) se concentreront sur la recherche de critères techniques et socio-économiques dans un objectif de dissémination d'équipements.

Dans les deux cas de figure, les indicateurs de performance doivent être co-construits avec les différentes parties prenantes (transformateurs, consommateurs, équipementiers, chercheurs, ...).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Affognon, H., Mutungi, C., Sanginga, P., Borgemeister, C., (2015). Unpacking Postharvest Losses in Sub-Saharan Africa: A Meta-Analysis. *World Development* 66, 49-68.
- AFNOR, N., (1991). X 50-151. Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle-Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel.
- Ahmadvand, M., Najafi, A.F., Shahidinejad, S., (2010). An experimental study and CFD analysis towards heat transfer and fluid flow characteristics of decaying swirl pipe flow generated by axial vanes. *Meccanica* 45(1), 111-129.
- Albers, A., Matthiesen, S., Ohmer, M., (2003). An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems, *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*.
- Alpha, A., Bricas, N., Fouilleux, E., (2013). La difficile mise en œuvre d'une action publique intersectorielle en matière de sécurité alimentaire et de nutrition en Afrique., *First International Conference in Developing Countries: new approaches to an old challenge., Grenoble, France, Juin 2013*.
- Andreasen, M.M., Hein, L., (2000). Integrated product development.
- Arnoldus, M., van der Pol, F., Ravry, C., Audet-Bélanger, G., (2011). *Affaire juteuse ou déception amère: quel est l'avenir des produits dérivés de la mangue au Burkina Faso et au Mali?: perspectives et stratégies pour la production et commercialisation de la mangue séchée, de la pulpe et du jus de mangue*. KIT.
- Athan, T.W., Papalambros, P.Y., (1996). A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization. *Engineering Optimization* 27(2), 155-176.
- Banga, J.R., Balsa-Canto, E., Moles, C.G., Alonso, A.A., (2003). Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology* 14(4), 131-144.
- Bationo, F., (2007). Prise en compte du réseau sociotechnique de maintenance dans la conception d'équipements. Cas des petites unités de transformation agroalimentaire des Pays d'Afrique de l'Ouest., *G-SCOP*. Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- Bauby, P., Gerber, T., (1995). Prendre en compte l'ensemble des interactions entre énergies et sociétés pour refonder la légitimité des systèmes énergétiques. UNESCO: Energie et société—Publisud. Paris.
- Benki, A., (2014). Méthodes efficaces de capture de front de pareto en conception mécanique multicritère: applications industrielles. Université Nice Sophia Antipolis.
- Bergles, A.E., (2000). 4.15 Heat Transfer Enhancement, in: Kreith, F. (Ed.), *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press, USA, p. 408.
- Bergman, T.L., Incropera, F.P., Lavine, A.S., (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Wiley.

- Berlineer, C., Brimson, J., (1988). Cost Management for Today's Advanced Manufacturing. Boston, Harvard Business School Press.
- Bimbenet, J.-J., Duquenoy, A., Trystram, G., (2002). *Génie des procédés alimentaires: Des bases aux applications*. Dunod.
- Bimbenet, J., Bonazzi, C., (2003). Séchage des produits alimentaires. Principes. Techniques de l'ingénieur [F 3000].
- Bingul, Z., (2007). Adaptive genetic algorithms applied to dynamic multiobjective problems. *Applied Soft Computing* 7(3), 791-799.
- Blein, R., Soulé, B.G., Faivre Dupaigre, B., Yérima, B., (2008). Les potentialités agricoles de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), Fondation pour l'agriculture et la ruralité dans le monde(FARM), p. 116.
- Blin, J., Rivier, M., (2009). Etude et action pilote "Transformation du karité en région Est et Sahel" ; Intégration d'une composante "économie d'énergie", *Programme d'appui au développement de l'agriculture du Burkina Faso*. Cirad.
- Bontemps, A., Garrigue, A., Goubier, C., Huetz, J., Marvillet, C., Mercier, P., Vidil, R., (1994). Echangeurs de chaleur. Définitions et architecture générale. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique(B2340).
- Boroze, T., Desmorieux, H., Méot, J.-M., Marouzé, C., Azouma, Y., Napo, K., (2014). Inventory and comparative characteristics of dryers used in the sub-Saharan zone: Criteria influencing dryer choice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40(0), 1240-1259.
- Braha, D., Reich, Y., (2003). Topological structures for modeling engineering design processes. *Research in Engineering Design* 14(4), 185-199.
- Broutin, C., Bricas, N., (2006). Agroalimentaire et lutte contre la pauvreté en Afrique subsaharienne. Paris: Editions du Gret.
- Chan, L.-K., Wu, M.-L., (2002). Quality function deployment: A literature review. *European Journal of Operational Research* 143(3), 463-497.
- Charnes, A., Cooper, W.W., (1977). Goal programming and multiple objective optimizations: Part 1. *European Journal of Operational Research* 1(1), 39-54.
- Chen, S.-J., Hwang, C.-L., (1992). Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 289-486.
- Collignan, A., (2011). Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique: application à une structure aéronautique. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- Costantini, V., Monni, S., (2008). Environment, human development and economic growth. *Ecological Economics* 64(4), 867-880.

- Dabat, M.H., Blin, J., Rivier, M., (2010). Facing the challenge of energy and food in Burkina Faso, *Proceeding of the Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food Symposium, Montpellier, France*, p. 7.
- Das, I., Dennis, J.E., (1998). Normal-boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. *SIAM Journal on Optimization* 8(3), 631-657.
- de Janvry, A., Sadoulet, E., (2000). Rural poverty in Latin America: Determinants and exit paths. *Food Policy* 25(4), 389-409.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* 6(2), 182-197.
- Demirbas, A.H., Demirbas, I., (2007). Importance of rural bioenergy for developing countries. *Energy Conversion and Management* 48(8), 2386-2398.
- Derringer, G., (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of quality technology* 12, 214-219.
- Derringer, G.C., (1994). A balancing act-optimizing a products properties. *Quality Progress* 27(6), 51-58.
- Dewan, A., Mahanta, P., Raju, K.S., Kumar, P.S., (2004). Review of passive heat transfer augmentation techniques. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 218(7), 509-527.
- DFID, (2002). Energy for the poor. Underpinning the Millennium Development Goals. ISBN 978-92-79-45327-4. Department for International Development, London.
- Diefes, H., Okos, M., Morgan, M., (2000). Computer-aided process design using food operations oriented design system block library. *Journal of Food Engineering* 46(2), 99-108.
- Dramé, D., Cruz, J.-F., Béavogui, F., (2011). *Le fonio, une céréale africaine*. Editions Quae. ISBN 9782759210398.
- Ducros, S., Masson, E., Rogaume, Y., (2010). État de l'art de la technologie générateur d'air chaud à partir de biomasse. Rapport final. Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, p. 60.
- Dupé, V., (2011). Conception multidisciplinaire de microsystèmes autonomes. Thèse de doctorat en Electronique. Université de Bordeaux I - France.
- Durmuş, A., (2004). Heat transfer and exergy loss in cut out conical turbulators. *Energy Conversion and Management* 45(5), 785-796.
- Durmuş, A., Durmuş, A., Esen, M., (2002). Investigation of heat transfer and pressure drop in a concentric heat exchanger with snail entrance. *Applied Thermal Engineering* 22(3), 321-332.
- Ehrgott, M., Wiecek, M.M., (2005). Multiobjective Programming, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer New York, New York, NY, pp. 667-708.

- Eiamsa-Ard, S., Kongkaiatpaiboon, V., Promvonge, P., (2011). Thermal Performance Assessment of Turbulent Tube Flow Through Wire Coil Turbulators. *Heat Transfer Engineering* 32(11-12), 957-967.
- Eiamsa-ard, S., Nanan, K., Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., (2013a). Thermal Performance Evaluation of Heat Exchanger Tubes Equipped with Coupling Twisted Tapes. *Experimental Heat Transfer* 26(5), 413-430.
- Eiamsa-ard, S., Promvonge, P., (2005). Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy* 78(4), 483-494.
- Eiamsa-ard, S., Seemawute, P., Wongcharee, K., (2010). Influences of peripherally-cut twisted tape insert on heat transfer and thermal performance characteristics in laminar and turbulent tube flows. *Experimental Thermal and Fluid Science* 34(6), 711-719.
- Eiamsa-ard, S., Somkleang, P., Nuntadusit, C., Thianpong, C., (2013b). Heat transfer enhancement in tube by inserting uniform/non-uniform twisted-tapes with alternate axes: Effect of rotated-axis length. *Applied Thermal Engineering* 54(1), 289-309.
- Engau, A., Wiecek, M.M., (2007). Generating ϵ -efficient solutions in multiobjective programming. *European Journal of Operational Research* 177(3), 1566-1579.
- Eppinger, S.D., Browning, T.R., (2012). *Design structure matrix methods and applications*. MIT press.
- Ernst Eder, W., (2011). Engineering design science and theory of technical systems: legacy of Vladimir Hubka. *Journal of Engineering Design* 22(5), 361-385.
- Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M., (2005). Multiple criteria decision analysis. Springer's International series.
- Fogel, L.J., (1966). *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*. [By] Lawrence J. Fogel... Alvin J. Owens... Michael J. Walsh. John Wiley & Sons.
- García-Moreno, P.J., Morales-Medina, R., Pérez-Gálvez, R., Bandarra, N.M., Guadix, A., Guadix, E.M., (2014). Optimisation of oil extraction from sardine (*Sardina pilchardus*) by hydraulic pressing. *International Journal of Food Science & Technology* 49(10), 2167-2175.
- Gergely, S., Bekassy-Molnar, E., Vatai, G., (2003). The use of multiobjective optimization to improve wine filtration. *Journal of Food Engineering* 58(4), 311-316.
- Gero, J.S., (1990). Design prototypes: a knowledge representation schema for design. *AI magazine* 11(4), 26.
- Gero, J.S., Kannengiesser, U., (2004). The situated function–behaviour–structure framework. *Design Studies* 25(4), 373-391.
- Gero, J.S., Kannengiesser, U., (2007). A function–behavior–structure ontology of processes. *AI EDAM* 21(04), 379-391.
- Giroux, F., Gueye, M., Marouzé, C., (1999). Conception intégrée au service de l'innovation produit dans les pays en développement, *3e Congrès International de Génie Industriel*, Montréal - Canada.

- González-Eguino, M., (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47, 377-385.
- Grabowski, H., (1998). *Universal design theory: Preface*. Shaker Verlag GmbH, Aachen.
- Gu, P., Hashemian, M., Nee, A., (2004). Adaptable design. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 53(2), 539-557.
- Guo, J., Fan, A., Zhang, X., Liu, W., (2011). A numerical study on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow in a circular tube fitted with center-cleared twisted tape. *International Journal of Thermal Sciences* 50(7), 1263-1270.
- Gupta, S.K., Garg, S., (2013). Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithm. *Control and Optimisation of Process Systems* 43, 205.
- Hafsa, I., Cuq, B., Kim, S.J., Le Bail, A., Ruiz, T., Chevallier, S., (2014). Description of internal microstructure of agglomerated cereal powders using X-ray microtomography to study of process–structure relationships. *Powder Technology* 256, 512-521.
- Harrington, E., (1965). The desirability function. *Industrial quality control* 21(10), 494-498.
- Hasanpour, A., Farhadi, M., Sedighi, K., (2014). A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 55(0), 53-62.
- Hatchuel, A., Weil, B., (2009). CK design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design* 19(4), 181-192.
- Hazell, P., Pachauri, R., (2006). *Bioenergy and agriculture: promises and challenges*. IFPRI Washington, DC.
- Holland, J.H., (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- Huang, G.Q., (1996). Developing design for X tools, *Design for X*. Springer, pp. 107-129.
- IEA, (2014). World Indicators. International Energy Agency. <https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/>.
- Ilevbare, I.M., Probert, D., Phaal, R., (2013). A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice. *Technovation* 33(2), 30-37.
- Jacquet, P., Pachauri, R.K., Tubiana, L., (2012). *Regards sur la Terre: Développement, alimentation, environnement : changer l'agriculture ?* Armand Colin.
- Jannot, Y., Moyne, C., (2016). *Transferts thermiques*. Editions Edilivre. ISBN 9782332836991.
- Jaszkiewicz, A., Słowiński, R., (1999). The 'Light Beam Search' approach—an overview of methodology applications. *European Journal of Operational Research* 113(2), 300-314.
- Jones, D.F., Mirrazavi, S.K., Tamiz, M., (2002). Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research* 137(1), 1-9.

- Kakuda, Y., Kikuchi, M., (2001). Abstract design theory. *Annals of the Japan Association for Philosophy of Science* 10(3), 109-125.
- Kammen, D.M., (2006). Bioenergy in developing countries: experiences and prospects. In: Hazell, P., Pachauri, R.K. (Eds.), *Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges*. Focus, 14. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C. 10 of 12.
- Kearney, J., (2010). Food consumption trends and drivers. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences* 365(1554), 2793-2807.
- Kebede, E., Kagochi, J., Jolly, C.M., (2010). Energy consumption and economic development in Sub-Sahara Africa. *Energy Economics* 32(3), 532-537.
- Kerkhof, P.J.A.M., Coumans, W.J., (2002). Drying: a fascinating unit operation. *Chemical Engineering Journal* 86(1-2), 1-2.
- Kim, I.Y., De Weck, O., (2005). Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation. *Structural and multidisciplinary optimization* 29(2), 149-158.
- Kim, I.Y., De Weck, O., (2006). Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: a new method for Pareto front generation. *Structural and multidisciplinary optimization* 31(2), 105-116.
- Kim, K.-J., Lin, D.K.J., (2006). Optimization of multiple responses considering both location and dispersion effects. *European Journal of Operational Research* 169(1), 133-145.
- Kim, K.J., Lin, D.K.J., (2000). Simultaneous optimization of mechanical properties of steel by maximizing exponential desirability functions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C: Applied Statistics* 49(3), 311-325.
- Kongkaitpaiboon, V., Nanan, K., Eiamsa-ard, S., (2010). Experimental investigation of convective heat transfer and pressure loss in a round tube fitted with circular-ring turbulators. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37(5), 568-574.
- Korhonen, P., (2005). Interactive methods. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 78. Springer, New York.
- Korhonen, P.J., Laakso, J., (1986). A visual interactive method for solving the multiple criteria problem. *European Journal of Operational Research* 24(2), 277-287.
- Kulak, O., Cebi, S., Kahraman, C., (2010). Applications of axiomatic design principles: A literature review. *Expert Systems with Applications* 37(9), 6705-6717.
- Kyte, R., Clos, J., Amin, A.Z., Marangoly George, A., (2015). Sustainable energy. *UN Chronicle* L II No 3.
- Leach, G., (1992). The energy transition. *Energy Policy* 20(2), 116-123.
- Lepinard, A.R., Arballo, J.R., Taus, F.J., Mascheroni, R.H., (2015). Multi-Objective Optimization of the Pasteurization Process of Pumpkin Cubes Packaged in Glass Jars. *International Journal of Food Engineering* 11(5), 679-689.

- Lestina, T., Serth, R.W., (2010). *Process Heat Transfer: Principles, Applications and Rules of Thumb*. Elsevier Science.
- Lewis, K.E., Chen, W., Schmidt, L.C., (2006). *Decision making in engineering design*. ASME Press New York.
- Liu, S., Sakr, M., (2013). A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19(0), 64-81.
- Losch, B., (2012). Agriculture et transition à l'heure de la mondialisation, in *Jacquet P., Pachauri R. et Tubiana L. ed. Regards sur la terre. Développement, alimentation, environnement: Changer l'agriculture*. Armand Colin. ISBN : 9782200275280, Paris, pp. 169-178.
- Madhlopa, A., Ngwalo, G., (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. *Solar Energy* 81(4), 449-462.
- Marler, R.T., Arora, J.S., (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization* 26(6), 369-395.
- Maroulis, Z.B., Saravacos, G.D., (2003). *Food process design*. CRC Press.
- Marouzé, C., Giroux, F., (2004). Design method in the context of developing countries: Application to small-scale food processing units, *CIRP Design Seminar*, Cairo - Egypt, pp. 16-18.
- Martinez-Legaz, J.E., (1988). Lexicographical order and duality in multiobjective programming. *European Journal of Operational Research* 33(3), 342-348.
- Martinez, D.M., Ebenhack, B.W., (2008). Understanding the role of energy consumption in human development through the use of saturation phenomena. *Energy Policy* 36(4), 1430-1435.
- McDermott, R., Mikulak, R.J., Beauregard, M., (1996). *The basics of FMEA*. SteinerBooks.
- Medah, I., (2011). Les dynamiques sociales de collaboration, de confiance et de reconnaissance au coeur des processus de conception d'agroéquipements en Afrique de l'Ouest. Le cas du Burkina Faso., *Laboratoire Pacte*. Université de Grenoble, Grenoble.
- Méot, J.M., Marouzé, C., Rivier, M., (2007). CSec-T : un séchoir pour les produits granulés. Principe et méthode de dimensionnement., *Réseau de chercheurs « Génie des Procédés Appliqué à l'Agroalimentaire »*. Agence Universitaire de la Francophonie, Dakar, Sénégal.
- Messac, A., Ismail-Yahaya, A., Mattson, C.A., (2003). The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. *Structural and multidisciplinary optimization* 25(2), 86-98.
- Messac, A., Mattson, C.A., (2002). Generating well-distributed sets of Pareto points for engineering design using physical programming. *Optimization and Engineering* 3(4), 431-450.

- Messac, A., Puemi-Sukam, C., Melachrinoudis, E., (2000a). Aggregate objective functions and Pareto frontiers: required relationships and practical implications. *Optimization and Engineering* 1(2), 171-188.
- Messac, A., Sundararaj, G.J., Tappeta, R.V., Renaud, J.E., (2000b). Ability of objective functions to generate points on nonconvex Pareto frontiers. *AIAA journal* 38(6), 1084-1091.
- Michalowski, W., Szapiro, T., (1992). A bi-reference procedure for interactive multiple criteria programming. *Operations Research* 40(2), 247-258.
- Miettinen, K., (1998). A Priori Methods, *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Springer, pp. 115-129.
- Minvielle, J.-P., (1999). *La question énergétique au Sahel*. KARTHALA Editions.
- Murthy, M.V.R., (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(4), 835-844.
- Norme, N., (2011). X 35-109 Ergonomie. Manutention manuelle de charge pour soulever, déplacer et pousser/tirer. Méthodologie d'analyse et valeurs seuils. Norme française homologuée NF X, 35-109.
- Ottosson, S., (2004). Dynamic product development—DPD. *Technovation* 24(3), 207-217.
- Pahl, G., Beitz, W., (1996). *Engineering design: A systematic approach* (edited by Ken Wallace and translated by Ken Wallace, Lucienne Blessing, and Frank Bauert). Springer.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K., (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach Third Edition*. Berlin, Springer Science+ Business Media Deutschland GmbH, 2007. 632.
- Pasandideh, S.H.R., Niaki, S.T.A., (2006). Multi-response simulation optimization using genetic algorithm within desirability function framework. *Applied Mathematics and Computation* 175(1), 366-382.
- Proctor, D., (1994). *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries*. Food & Agriculture Org.
- Promvongse, P., (2008). Thermal augmentation in circular tube with twisted tape and wire coil turbulators. *Energy Conversion and Management* 49(11), 2949-2955.
- Promvongse, P., Eiamsa-ard, S., (2006). Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator. *Energy Conversion and Management* 47(18–19), 2867-2882.
- Promvongse, P., Eiamsa-ard, S., (2007). Heat transfer and turbulent flow friction in a circular tube fitted with conical-nozzle turbulators. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 34(1), 72-82.
- Promvongse, P., Koolnapadol, N., Pimsarn, M., Thianpong, C., (2014). Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings. *Applied Thermal Engineering* 62(1), 285-292.

- Promvonge, P., Tamna, S., Pimsarn, M., Thianpong, C., (2015). Thermal characterization in a circular tube fitted with inclined horseshoe baffles. *Applied Thermal Engineering* 75(0), 1147-1155.
- Pugh, S., (1991). *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Addison-Wesley Wokingham.
- Quirante, T., (2012). Modelling and numerical optimization methods for decision support in robust embodiment design of products and processes. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- Raffray, G., Collignan, A., Sebastian, P., (2015). Multiobjective optimization of the preliminary design of an innovative hot-smoking process. *Journal of Food Engineering* 158, 94-103.
- Rastoin, J.L., (2012). L'industrie agroalimentaire au coeur du système alimentaire mondial, *in Jacquet P., Pachauri R. et Tubiana L. ed. Regards sur la terre. Développement, alimentation, environnement: Changer l'agriculture*. Armand Colin. ISBN : 9782200275280, Paris, pp. 275-285.
- Reddy, A.K., Annecke, W., Blok, K., Bloom, D., Boardman, B., Eberhard, A., Ramakrishna, J., (2000). Energy and social issues. *World Energy Assessment*, 39-60.
- Reich, Y., (1995). A critical review of general design theory. *Research in Engineering Design* 7(1), 1-18.
- Rivier, M., (2010). Annexes au rapport final. Annexe 3 : diagnostic des équipementiers camerounais, *Eude de promotion de la transformation du manioc au Cameroun*. Banque Mondiale - Cirad.
- Rivier, M., Blin, J., (2009). Etude et action pilote "Transformation du poisson en région Est et Sahel" ; Intégration d'une composante "économie d'énergie", *Programme d'appui au développement de l'agriculture du Burkina Faso*. Cirad.
- Rivier, M., Collignan, A., Méot, J.M., Madoumier, M., Sébastien, P., (2016). Development of a process simulator with a view to multi-objective optimization. Application to a process for drying cereal-based products in developing countries using bioenergy. Submitted to *Innovative Food Science and Emerging Technologies*.
- Rivier, M., Cruz, J.F., (2007). Étude de la précuisson du fonio au sein de petites entreprises de transformation à Bamako (Mali) et à Ouagadougou (Burkina Faso) In : Amélioration de la qualité et de la compétitivité de la filière fonio en Afrique de l'Ouest (J.-F. Cruz, éd.), [CD-Rom], Cirad, Montpellier, 38 p.
- Rivier, M., Dabat, M.H., Cruz, J.F., (2001). Introduction d'un matériel de dégermage du maïs au sein d'une entreprise de transformation du Burkina. Rapport final, Cirad-amis DOC n° 86/01.
- Rivier, M., Ferré, T., Méot, J.M., Briard, M., (2009). *Le séchage des mangues*. Editions Quae. ISBN 2759203417.

- Rivier, M., Kebe, F., Sambou, V., Ayessou, N., Azoumah, Y., Goli, T., (2010). Fumage de poissons en Afrique de l'Ouest pour les marchés locaux et d'exportation. Rapport final. Cirad - UCAD-2IE-AUF, p. 59.
- Rivier, M., Medah, I., Djibougou, B., Hien, T., Namata, H., (2003). Diagnostic technique des entreprises de transformation des céréales au Burkina Faso (mil, maïs, sorgho, fonio, riz). Rapport d'étude, Projet EIDév, Chambre de Commerce et d'Industrie du Burkina Faso. Cirad - CNRST / IRSAT- 2IE.
- Rivier, M., Méot, J.M., Reggad, H., Coulibaly, Y., Namata, A., (2004.b). Étude de différents types de séchoirs : Bilans matière et énergétique. Rapport intermédiaire n°1, Cirad-amis DOC n° 34/04.
- Rivier, M., Méot, J.M., Sebastian, P., Collignan, A., (2013). Les bioénergies, opportunité pour le développement du secteur agroalimentaire : étude de la filière mangue séchée au Burkina Faso., *In : 4ème Conférence Internationale sur les biocarburants/bioénergies en Afrique. Quel bilan et quelles voies d'avenir pour les biocarburants et les bioénergies en Afrique.*, 21-23 novembre, Ouagadougou, Burkina Faso, 10 p.
- Rivier, M., Niang, I., (2004.a). Appui au développement de la Recherche au Burkina Faso. "Utilisation d'énergies renouvelables et amélioration de la qualité des produits agroalimentaires séchés au Burkina Faso". Activité 1 : Analyse du besoin par filière et type de procédé. Rapport de fin d'étude, Cirad-amis DOC n° 16/06.
- Rivier, M., Sébastien, P., Goli, T., Raffray, G., Collignan, A., (2015). Heat transfer enhancement of a circular tube heat exchanger fitted with an elliptic shaped turbulator designed in the context of developing countries. *Applied Thermal Engineering* 81(0), 92-101.
- Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., Ganić, E.N., (1985). *Handbook of heat transfer fundamentals*. McGraw-Hill.
- Romdhana, H., Lambert, C., Goujot, D., Courtois, F., (2016). Model reduction technique for faster simulation of drying of spherical solid foods. *Journal of Food Engineering* 170, 125-135.
- Şahin, H.M., Baysal, E., Dal, A.R., (2013). Experimental and numerical investigation of thermal characteristics of a novel concentric type tube heat exchanger with turbulators. *International Journal of Energy Research* 37(9), 1088-1102.
- Sapuan, S., Mansor, M.R., (2014). Concurrent engineering approach in the development of composite products: a review. *Materials & Design* 58, 161-167.
- Saraç, B.A., Bali, T., (2007). An experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of decaying swirl flow through a circular pipe with a vortex generator. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32(1), 158-165.
- Saridakis, K.M., Dentsoras, A.J., (2008). Soft computing in engineering design—A review. *Advanced Engineering Informatics* 22(2), 202-221.
- Savransky, S.D., (2000). *Engineering of creativity: Introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving*. CRC Press.

- Scott, M.J., (1998). Formalizing negotiation in engineering design. California Institute of Technology.
- Scott, M.J., Antonsson, E.K., (1998). Aggregation functions for engineering design trade-offs. *Fuzzy Sets and Systems* 99(3), 253-264.
- SEA, (2013). Sustainable Energy for All. [Burkina Faso]: Evaluation rapide et analyse d'écart. http://www.se4all.org/sites/default/files/Burkina_Faso_RAGA_FR_Released.pdf.
- Sebastian, P., Quirante, T., Ho Kon Tiat, V., Ledoux, Y., (2010). Multi-objective optimization of the design of two-stage flash evaporators: Part 2. Multi-objective optimization. *International Journal of Thermal Sciences* 49(12), 2459-2466.
- Semassou, C., Nadeau, J., Sebastian, P., Pailhès, J., Vianou, A., (2013). Optimisation multicritère en conception de système photovoltaïque pour des maisons individuelles en contexte africain. *Revue des Energies Renouvelables* 16(2), 225-246.
- Sendín, J.O.H., Alonso, A.A., Banga, J.R., (2010). Efficient and robust multi-objective optimization of food processing: A novel approach with application to thermal sterilization. *Journal of Food Engineering* 98(3), 317-324.
- Shah, R.K., Bell, K.J., (2000). 4.3 Heat Exchangers, in: Kreith, F. (Ed.), *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press, USA, p. 50.
- Shai, O., Reich, Y., (2004). Infused design. I. Theory. *Research in Engineering Design* 15(2), 93-107.
- Sharma, A., Chen, C.R., Vu Lan, N., (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(6–7), 1185-1210.
- Sivashanmugam, P., Nagarajan, P.K., (2007). Studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with right and left helical screw-tape inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32(1), 192-197.
- Sivashanmugam, P., Suresh, S., (2007). Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow through a circular tube fitted with regularly spaced helical screw-tape inserts. *Experimental Thermal and Fluid Science* 31(4), 301-308.
- Steuer, R.E., (1986). *Multiple criteria optimization: theory, computation, and applications*. Wiley.
- Steuer, R.E., Choo, E.-U., (1983). An interactive weighted Tchebycheff procedure for multiple objective programming. *Mathematical programming* 26(3), 326-344.
- Suh, N.P., (1997). Design of systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 46(1), 75-80.
- Suryanarayana, N.E., (2000). 3.2.3 Forced Convection-Internal Flows, in: Kreith, F. (Ed.), *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press, USA, p. 47.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y., (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. 2005. Jhon Wiley & Sons Inc.

- Tamiz, M., Jones, D., Romero, C., (1998). Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research* 111(3), 569-581.
- Tomiyama, T., (1997). A note on research directions of design studies. *Schriftenreihe WDK*, 29-34.
- Tomiyama, T., (2006). A classification of design theories and methodologies, *ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers, pp. 43-51.
- Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., Kimura, F., (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 58(2), 543-565.
- Tomiyama, T., Yoshikawa, H., (1986). Extended general design theory. Department of Computer Science [CS](R 8604), 1-29.
- Trystram, G., (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering* 110(2), 269-277.
- UE, (2015). Guide de l'utilisateur pour la définition des PME. ISBN 978-92-79-45327-4. Commission Union Européenne, Luxembourg.
- Ueda, K., Kito, T., Takenaka, T., (2008). Modelling of value creation based on Emergent Synthesis. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 57(1), 473-476.
- Ueda, K., Markus, A., Monostori, L., Kals, H., Arai, T., (2001). Emergent synthesis methodologies for manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 50(2), 535-551.
- Ullman, D.G., Dietterich, T.G., Stauffer, L.A., (1988). A model of the mechanical design process based on empirical data. *Artificial Intelligence for Engineering, Design, analysis and manufacturing* 2(01), 33-52.
- Ullman, D.G., Spiegel, B.P., (2006). Trade studies with uncertain information, *Proceeding of the Sixteenth Annual International Symposium of the International Council On Systems Engineering (INCOSE)*.
- Ulrich, K.T., (2003). *Product design and development*. Tata McGraw-Hill Education.
- UN, (2000). United Nations Millennium Declaration, RES/55/2. NewYork, United Nations. <http://www.un.org/millennium/declaration/ares552e.htm>.
- USAID, (2006). Etude sur la collecte et la transformation du karité en guinée, http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnadj155.pdf.
- Vernat, Y., Nadeau, J.-P., Sébastien, P., (2010). Formalization and qualification of models adapted to preliminary design. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 4(1), 11-24.
- Webb, R.L., (1981). Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24(4), 715-726.

- Webb, R.L., (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer*. Taylor & Francis.
- Weber, C., (2007). Looking at “DFX” and “Product Maturity” from the perspective of a new approach to modelling product and product development processes, *The Future of Product Development*. Springer, pp. 85-104.
- Wierzbicki, A.P., (1982). A mathematical basis for satisficing decision making. *Mathematical modelling* 3(5), 391-405.
- Wood, K.L., Antonsson, E.K., (1989). Computations with imprecise parameters in engineering design: background and theory. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design* 111(4), 616-625.
- Yoshikawa, H., (1981). General design theory and a CAD system. *Man-Machine communication in CAD/CAM*.
- Yoshikawa, H., (1989). Design philosophy: the state of the art. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 38(2), 579-586.
- Yoshikawa, H., Uehara, K., (1985). Design theory for CAD/CAM integration. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 34(1), 173-178.
- Zionts, S., Wallenius, J., (1976). An interactive programming method for solving the multiple criteria problem. *Management science* 22(6), 652-663.

Annexes

Annexe 1

Technologie HPEE et principe CLIOp

Les équipements proposés par Planète Bois s'inscrivent dans une catégorie dénommée technologie « *Haute Performance Énergétique et Environnementale, HPEE* ».

Pour les équipements à combustion de biomasse sèche cela signifie que les rendements énergétiques sont très hauts, généralement au-dessus de 80% mais aussi qu'une attention particulière est portée à la réalisation d'une combustion propre non polluante.

L'autre caractéristique est la valorisation autant que possible des ressources locales, matérielles et humaines (matériaux, savoir-faire, type d'unités de production, de réseaux de distribution/installation/maintenance, ...).

Planète Bois a fait le choix d'introduire dans les pays du Sud cette technologie de foyers très performants dans la gamme de puissances de 5 à 50 kW. Planète Bois est détenteur d'une innovation (Figure A1) dans la conception des chambres de pyrolyse pour réduire le temps de transfert des gaz avant combustion dans la chambre de développement des flammes e principe CLIOp (Combustion Latérale Inférieure Optimisée).

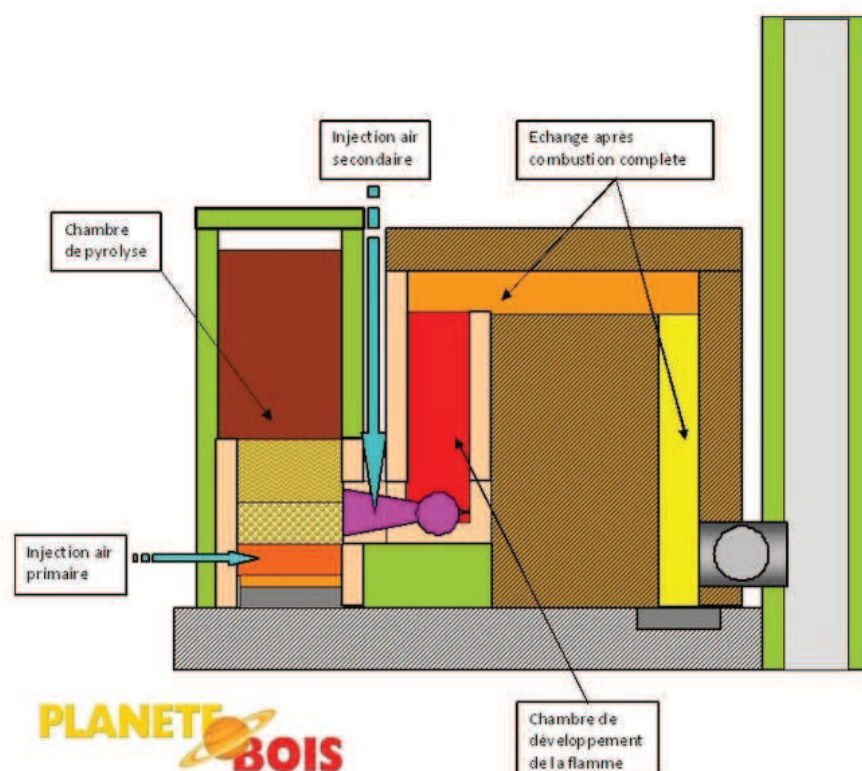


Fig. A1. Schéma de principe d'un générateur thermique CLIOp

Théorie

Le bois en tant que tel ne brûle pas mais ce sont ses produits de dégradation qui seuls sont combustibles.

La combustion du bois que l'on veut rendre optimale est, à la base, une réaction d'oxydation par l'oxygène de l'air qui va dans un premier temps décomposer les molécules complexes (longues chaînes moléculaires) du bois (cellulose, hémicellulose, lignine), pour ensuite brûler des molécules simples de type hydrocarbures combustibles (C_mH_n), mais aussi de l'hydrogène (H_2) et du monoxyde de carbone (CO). Et quand tout se passe de manière idéale (haute température, mélange parfait avec l'oxygène de l'air), la combustion ne produit que de l'eau, du gaz carbonique et de la chaleur.

Deux types de combustion vont interférer ; l'une lente, la combustion du charbon de bois (les braises) et l'autre rapide, celle des gaz combustibles dégagés dès que le bois atteint une certaine température, autour de 300 °C.

Les phénomènes en jeu, plus ou moins simultanés, peuvent être distingués selon trois phases.

i) Le chauffage - séchage :

C'est un séchage : les braises et les parois rayonnant fortement, les gaz environnants à haute température transmettant rapidement la chaleur au bois. On suppose que tant que l'eau est présente en surface (maintien à 100°C), aucun gaz combustible ne peut donc s'échapper.

ii) La pyrolyse-gazéification :

Une fois que les températures s'élèvent dans le bois, des gaz combustibles se dégagent quelles que soient les conditions de l'atmosphère environnante (plus ou moins oxydante).

La température du bois ne dépasse pas les 800 °C tant que la pyrolyse se maintient.

Cette phase produit autour de 85% de matières volatiles et 15% de charbon de bois. La nature du bois et les conditions de montée en température influent sur ces ratios. On sait par exemple que la lignine donne plus de charbon que la cellulose, que plus la montée en température est rapide, plus le volume de gaz produits est important.

iii) Les combustions :

La combustion des *gaz produits*

La qualité de la combustion des gaz produits dépend fortement des conditions environnantes (haute température, temps de brassage suffisant avec l'oxygène,...). Dans les conditions

optimales, la température de flamme peut se situer aux alentours de 1300°C. La température de flamme est un indicateur fondamental d'une combustion propre.

La combustion du résidu charbonneux : les braises

L'oxydation du carbone contenu dans les braises va alors augmenter les températures de celles-ci autour de 1000°C. On aura essentiellement un dégagement de CO₂ et de CO.

Pratique

On ne peut pas contrôler aisément deux types de combustion très différentes dans une même enceinte, les conditions environnantes optimales ne sont pas compatibles. La meilleure solution dans la pratique reste de séparer physiquement ces deux réactions. Ceci explique pourquoi les foyers très performants sur les plans énergétique et environnemental possèdent deux chambres de combustion différentes.

Il s'agit d'une première chambre de pyrolyse-gazéification dans laquelle la combustion contrôlée du résidu charbonneux permet le dégagement régulier des matières volatiles. Au fur et à mesure que le combustible est enfourné, les gaz combustibles sont produits et le charbon est brûlé. À cette première chambre est accolée une seconde chambre dédiée exclusivement à la combustion performante des gaz combustibles.

Pour simplifier, la première chambre est l'« usine à gaz », la seconde le véritable « brûleur » à gaz.

On parle d'air primaire injecté dans la première chambre pour consommer le résidu charbonneux et d'air secondaire généralement en excès et préchauffé pour permettre une combustion la plus complète possible des gaz produits (haute température, temps de contact avec l'oxygène nécessaire le plus long possible).

Les règles de conception qui ont été retenues peuvent être listées comme suit :

- ne pas dépasser une température de flamme de 1000°C pour pouvoir utiliser des matériaux réfractaires à coût abordable produits localement (on estime en combustion bois qu'à partir de 900°C, on obtient une très bonne qualité environnementale avec un très faible taux de poussières et d'imbrûlés).
- un contrôle simple de l'air primaire et secondaire autour d'une puissance nominale (position tout ou rien), l'air secondaire étant de préférence préchauffé avant son injection dans le bas de la chambre de développement des flammes.
- ne pas réaliser d'échange avec les gaz de combustion avant un développement suffisant des flammes.
- pour s'assurer d'une combustion la plus complète possible, un excès d'air autour de 1,75 a été défini

- un tirage assuré de préférence par assistance mécanique (fiabilité, faible coût d'installation, faible consommation électrique de quelques watts, ..) avec une conception d'extracteur performant constructible localement
- une construction respectant les savoir-faire locaux (assemblage, matériaux, ...) qui peut être facilement standardisée avec une recherche du coût final le plus bas possible sans sacrifier à la qualité finale et à la durabilité.