

Séchage en tambour : développement de modèles prédictifs visant l'optimisation des consommations d'énergie.

Face aux impératifs énergétiques actuels, la réduction de la consommation énergétique est cruciale, notamment dans le secteur du pressing où une utilisation intensive des séchoirs joue souvent un rôle prépondérant.

Cette étude explore les opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique et de la productivité du séchage, à travers un ajustement précis des paramètres opérationnels qui définissent les conditions de séchage. En analysant des variables telles que la charge textile, le taux d'humidité initial et les conditions de séchage, des modèles prédictifs ont pu être élaborés afin de mettre en évidence les possibilités d'optimisation des consommations d'énergie tout en maintenant une productivité suffisante. Il s'agit de modèles expérimentaux, obtenus à partir d'essais, selon la technique analytique des plans d'expérience.

↳ Équipements et conditions d'essais

L'étude a été réalisée sur un séchoir appartenant au CTTN : MIELE PT 8337, d'une capacité nominale de 11.2 kg.

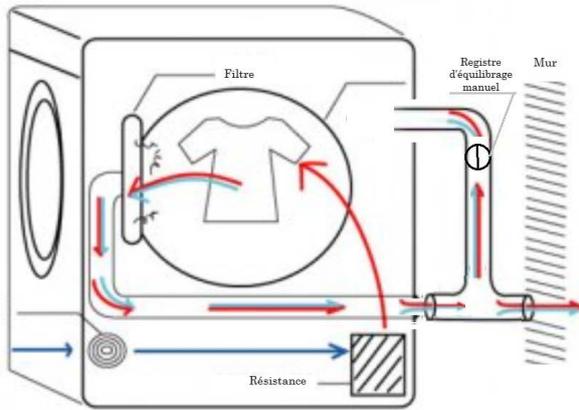
Les textiles utilisés, exclusivement des tabliers en coton, ont été lavés dans une laveuse-essoreuse professionnelle, à basse température, sans ajout de détergent, à l'aide d'un cycle de lavage court. Il s'agissait uniquement de mouiller le linge. Par contre, la vitesse d'essorage a varié entre 660 et 1075 tours par minute, en étant ajustée selon le taux de chargement et selon le taux d'humidité souhaité en vue des essais de séchage.

Un système permettant d'aménager un recyclage de l'air a été installé via un registre de réglage manuel. Ce dispositif permet d'ajuster la ventilation en fonction de trois configurations : un recyclage de 50% de l'air du séchoir, un recyclage de 25% de l'air, ou aucun recyclage.

Pour garantir une évacuation d'air optimale et éviter la surconsommation énergétique, le filtre à peluches du séchoir a été nettoyé après chaque essai.



- Air chaud et humide
- Air chaud
- Air ambiant



Registre d'équilibrage manuel pour ajuster la ventilation

- Recyclage 50%
- Recyclage 25%
- Recyclage 0%



Effets des variables étudiés :

› Température de consigne sortie tambour :

46 ; 60 et 74 degrés Celsius.

› Chargement :

2,6 kg ; 5,2 kg et 7,8 kg.

› Taux d'humidité initial du linge :

30% ; 40% et 50% (% massique).

› Taux de recyclage de l'air :

0%, 25% et 50% du débit d'air nominal d'extraction (calibrage à froid, hors chargement).

Ces variables ont été définies en considérant le fonctionnement du sèche-linge, notamment la température de l'air, contrôlée de manière spécifique par ce matériel : température en entrée fixe et plafonnée ; température de l'air en sortie tambour réglable sur une certaine plage.

Réponses sur lesquelles les effets de ces variables sont étudiés (performances du sèche-linge) :

› Consommation spécifique d'énergie :

en kWh/kg de linge séché.

› Productivité ou production de linge séché à l'heure :

en kg/h.

› Taux d'humidité résiduel du linge après séchage :

% massique.

Stratégie d'expérimentation

Le CTTN a fait appel à l'institut des Sciences Analytiques de Lyon (L'ISA, Université LYON I) pour concevoir le plan d'expérience en ciblant des modèles expérimentaux du premier degré et du second ordre :
Expression polynomiale des réponses étudiées, en fonction des variables d'entrées et des interactions de variables.

$$R = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_{12}X_1X_2 + \dots$$

A_0 = constante du polynôme

A_1, A_2, \dots = effets des variables X_1, X_2, \dots

A_{12}, \dots = effet des interactions de variables X_1 et X_2 le cas échéant.

Il faut noter que dans cette forme polynômiale, les variables définies ci-avant, sont exprimées sous la forme de « variables réduites centrées » :

Expression des variables en «variables réduites centrées»			
Température de consigne sortie tambour (°C)	46	60	74
Forme réduite centrée	-1	0	1
Chargement (kg)	2,6	5,2	7,8
Forme réduite centrée	-1	0	1
Taux d'humidité initial du linge (%)	30	40	50
Forme réduite centrée	-1	0	1
Taux de recyclage de l'air (% du débit d'air)	0	25	50
Forme réduite centrée	-1	0	1

Une matrice d'essais optimale a été conçue en collaboration avec l'ISA, de manière à déterminer les effets A_i et A_{ij} et la constante A_0 pour chacune des réponses R étudiées.

Cette matrice prévoit une série d'essais, dans certaines configurations où les variables X_i, X_j sont réglées à des valeurs déterminées.

La technique des plans d'expérience offre la possibilité d'adopter une stratégie expérimentale qui permet d'optimiser le nombre d'essais à réaliser pour parvenir à des modèles significatifs, descriptifs des phénomènes étudiés.

Le protocole expérimental a été basé sur un plan factoriel complet à deux niveaux pour examiner systématiquement l'impact de quatre paramètres clés sur les performances du séchoir. Au total, trente-huit essais ont été conduits ($2^4 = 16$ essais, doublés, avec aussi des essais au centre du domaine et quelques essais complémentaires), permettant une exploration exhaustive des paramètres en question.

↳ Mesures effectuées

- › **Durée des cycles et masse textile pour déterminer la productivité ;**
- › **Consommation électrique mesurée par un analyseur de réseau, avec acquisition de données.**

Les variables ont été maîtrisées à l'aide d'instruments de mesure pour contrôler leur réglage :

- › **Chargement et taux d'humidité initiale des charges textiles par pesage à l'aide d'une balance de précision ;**
- › **Thermomètre de précision pour le contrôle de la température d'air en sortie ;**
- › **Débitmètre pour contrôler le réglage du taux de recyclage.**

La température du local d'essais a été surveillée de façon continue.

↳ Analyse Statistique et Modélisation

Une analyse de la variance a ensuite été effectuée pour évaluer la qualité des résultats en termes d'effets de chaque variable et interaction de variables, sur les performances du séchoir (consommation et productivité). L'analyse statistique a révélé des résultats expérimentaux qui évoluent très linéairement en fonction des conditions d'essais, traduisant une forte corrélation entre les résultats théoriques obtenus à partir des équations et ceux observés expérimentalement. Cette concordance conforte la validité des expressions polynômiales obtenues (voir ci-dessous), ce qui en fait des outils fiables pour la prédiction et l'optimisation du processus de séchage. Les données recueillies ont été traitées à l'aide de logiciels statistiques avancés, pour conduire à la modélisation des relations entre les variables choisies et la prédiction des performances dans les diverses configurations opérationnelles possibles.

Les trois modèles prédictifs exploités décrivent donc les réponses suivantes :

- › **Consommation spécifique en kWh/kg**
- › **Productivité kg traité/h**
- › **Taux d'humidité des textiles en sortie de séchoir (%)**

↳ Consommation spécifique en kWh/kg

La consommation spécifique a été modélisée par l'expression polynomiale suivante :

Consommation spécifique kWh/kg = 0,6 - 0,157 x Chargement + 0,1065 x Taux d'humidité initial du linge + 0,034 x Température de l'air en sortie - 0,0166 x Taux de recyclage - 0,041 x Température de l'air en sortie x Chargement - 0,021 x Chargement x Taux d'humidité initial du linge + 0,018 x Température de l'air en sortie x Taux de recyclage.

Outre la constante A_0 d'une valeur de 0,6 pour ce premier modèle, les 4 premiers termes représentent les effets directs des variables sur la consommation spécifique. Les 3 suivants représentent les effets des interactions de variables jugées les plus significatives.

On note que le chargement et le taux d'humidité initial du linge sont les 2 facteurs les plus influents :

Ils représentent respectivement 26,2% et 17,7% de la constante A_0 (= 0,6 kWh/kg) qui représente la consommation spécifique au centre du domaine d'expérimentation, soit lorsque toutes les variables sont réglées à leur valeur moyenne (à 0 en variables réduites centrées).

Pris isolément, chacun des facteurs a tendance à agir ainsi sur cette réponse :

- › Un chargement élevé a pour effet de diminuer la consommation spécifique.
- › Un taux d'humidité initial élevé du linge a pour effet de l'augmenter.
- › Une température de l'air en sortie élevée, également.
- › Pratiquer un taux de recyclage élevé a tendance à abaisser la consommation spécifique, mais faiblement.

Concernant les interactions de variables statistiquement significatives, on note les éléments suivants :

- › Le taux de chargement prédomine sur d'autres variables : température de l'air en sortie et taux d'humidité initial du linge, puisque combiné à celles-ci, la tendance est à l'abaissement de la consommation spécifique.
- › Sur la plage de température utilisée (air en sortie tambour) qui reflète le fonctionnement du séchoir employé, pratiquer le recyclage de l'air a un certain impact, celui-ci ayant tendance à réduire la consommation spécifique, surtout en réglant la température de l'air en sortie tambour à un niveau bas.

Productivité en kg/h

La productivité ainsi définie a été modélisée par l'expression polynomiale suivante :

Productivité kg/h = 15,44 + 6,2 x Chargement – 3 x Taux d'humidité initial du linge + 0,99 x Température de l'air en sortie - 0,497 x Taux de recyclage - 1,436 x Chargement x Taux d'humidité initial du linge + 0,56 x Température de l'air en sortie x Taux d'humidité initial du linge.

Outre la constante A_0 ici d'une valeur de 15,44, les 4 premiers termes représentent les effets directs des variables sur la productivité. Les 2 suivants représentent les effets des interactions de variables jugées les plus significatives.

On note là aussi que le chargement et le taux d'humidité initial du linge sont les 2 facteurs les plus influents :

Ils représentent respectivement 40,2% et 19,4% de la constante A_0 (= 15,44 kg/h) qui représente la productivité au centre du domaine d'expérimentation, soit lorsque toutes les variables sont réglées à leur valeur moyenne (à 0, en variables réduites centrées).

Pris isolément, chacun des facteurs a tendance à agir ainsi sur cette réponse :

- › Un chargement élevé a pour effet d'augmenter la productivité, sans surprise
- › Un taux d'humidité initial élevé du linge a pour effet de la réduire
- › Une température de l'air en sortie élevée a tendance à l'augmenter également.
- › Pratiquer un taux de recyclage élevé a tendance à abaisser la productivité.

Concernant les interactions de variables statistiquement significatives, on note les éléments suivants :

- › Un chargement élevé avec une taux d'humidité initial du linge élevé réduit la productivité.
- › L'augmentation de la température de l'air en sortie a tendance à compenser l'effet d'un taux d'humidité élevé quant à la productivité.

↳ Tentatives d'optimisation : Tableau 1

A partir des modèles exposés ci-avant, il est possible de procéder à des calculs pour tenter de trouver des configurations optimales **Consommation spécifique/Productivité** ou pour mettre en évidence d'autres cas.

Calcul n°	Température de consigne de l'air en sortie tambour (°C)	Chargement (kg)	Taux d'humidité initial du linge (%)	Taux de recyclage de l'air (%)	Consommation spécifique (kWh/kg)	Productivité (kg/h)	Taux d'humidité résiduel (%)
					Résultat calculé	Résultat calculé	Résultat calculé
1	46	7,8	30	0	0,40	26,1	2,2
2	46	7,8	30	25	0,37	25,7	2,2
3	46	7,8	30	50	0,33	25,1	2,2
4	60	7,8	30	0	0,37	26,6	0,9
5	60	7,8	30	25	0,36	26,1	0,9
6	60	7,8	30	50	0,34	25,6	0,9
7	60	7,8	40	0	0,46	22,1	3,5
8	60	7,8	40	50	0,43	21,1	3,5
9	74	7,8	30	25	0,35	26,5	-0,4
10	74	7,8	30	50	0,35	26,0	-0,4
11	74	2,6	50	0	0,96	9,7	4,0
12	74	2,6	50	50	0,96	8,7	4,0
13	74	7,8	50	0	0,52	19,3	4,9
14	74	7,8	50	50	0,52	18,3	4,9
15	74	7,8	30	50	0,35	26,0	-0,4
16	74	7,8	30	0	0,35	27,0	-0,4

Quelques commentaires :

- › **Ligne 16 :** dans des conditions optimales de productivité, le maximum atteint est de 27 kg/h, à l'intérieur du domaine d'expérimentation. On ne peut espérer plus ici.
- › **Lignes 11 et 12 :** ce sont les pires configurations, du fait d'un sous chargement. Le recyclage de l'air n'a aucun effet dans ces conditions.
- › **Ligne 15 :** à pleine charge, avec recyclage d'air, dès lors que le taux d'humidité initial du linge est réduit, les résultats de consommation et de productivité sont corrects, avec un léger sur-séchage, ce qui laissera la possibilité de réduire la consommation en réduisant le temps de cycle de quelques minutes. Dans ces conditions, par rapport à la ligne 16, le recyclage de l'air n'a aucun effet.
- › **Lignes 13 et 14 :** avec les **lignes 9 et 10**, elles mettent en évidence l'importance de bien essorer le linge, puisqu'ici, le taux d'humidité initial du linge étant à son maximum, il pénalise les consommations, la productivité et conduit à un sous séchage (taux d'humidité résiduel du linge de 4 et 4.9%).

› **Lignes 1 à 8** : elles mettent en évidence l'intérêt du recyclage de l'air dès lors que la température de l'air en sortie tambour est réduite ou moyenne, et que le taux d'humidité initial du linge est de 30 ou 40%. Les consommations obtenues pour **les lignes 1 et 4** sont à l'avantage de la ligne 4 (température de l'air en sortie à 60°C) du fait d'une durée de cycle légèrement plus faible.

↳ Recyclage de l'air

Dans le domaine d'expérimentation défini ici et concernant le séchoir utilisé, le recyclage de l'air n'a pas d'effet lorsque le taux d'humidité initial du linge est élevé et aussi lorsque la température de consigne est élevée. En revanche, à température de consigne plus faible et avec un taux d'essorage réduit, il permet un gain énergétique (kWh/kg) qui s'échelonne entre 8 et 15%. Ce paramètre a aussi tendance à prolonger la durée des cycles.

↳ Taux humidité résiduel du linge après séchage (%)



Ce modèle statistique, qui présente toutefois un degré de fiabilité moindre que les 2 premiers du fait de l'instabilité de la réponse (taux d'humidité résiduelle du linge après séchage, contrôlée par le séchoir), a aussi permis de cibler un ajustement optimal des variables d'entrée pour obtenir un taux d'humidité spécifique en sortie.

D'une façon générale, la gestion du taux d'humidité résiduel après séchage peut varier significativement en fonction du type de textile traité et de la finition souhaitée pour les articles.

Le modèle obtenu permet de déterminer les conditions optimales pour atteindre des taux d'humidité cibles en sortie, tels que 1%, 3% ou 6%. Mais il est important de noter que ces essais, avec le modèle mathématique qui en découle, ont été conduits exclusivement sur des articles en coton.

↳ Tableau 2

Température de consigne de l'air en sortie tambour (°C)	Chargement (kg)	Taux d'humidité initial du linge (%)	Taux de recyclage de l'air (%)	Résultat calculé (%)
46	2,6	50	0	1,4
46	2,6	50	25	1,4
70	2,6	40	0	3,1
70	2,6	40	25	3,1
70	2,6	40	50	3,1
60	7,8	50	0	6,2
60	7,8	50	25	6,2
60	7,8	50	50	6,2

↳ Taux d'Humidité de 1%

Pour atteindre un taux d'humidité bas, de l'ordre de 1%, les résultats indiquent qu'il est préférable d'utiliser une charge légère combinée à une température moyenne. Cette configuration permet au séchoir de minimiser l'humidité résiduelle sans surchauffer le textile, ce qui est idéal pour les articles nécessitant un séchage délicat sans risque de surchauffe.

↳ Taux d'Humidité de 3%

Lorsqu'un taux d'humidité de 3% est requis, ce qui peut être nécessaire pour des textiles qui doivent retenir une légère humidité pour le traitement de finition qui suite, il est conseillé d'opter pour une faible charge avec une température de consigne élevée. Cette approche augmente l'efficacité du séchage sans conduire à un état trop sec.

↳ Taux d'Humidité de 6%

Pour un taux d'humidité cible de 6%, généralement souhaité pour des textiles devant rester légèrement humides pour faciliter le repassage, la meilleure stratégie consiste à utiliser une charge lourde avec une température élevée. Cette configuration assure que la quantité plus importante de textile absorbe l'humidité sans sécher complètement, tout en utilisant efficacement l'énergie thermique générée par le séchoir.

Bien sûr, tous ces éléments sont valables pour le séchoir à tambour utilisé pour conduire cette expérimentation. Il est toutefois intéressant de bien noter les tendances apportées par les modèles obtenus :

Tableaux 1 et 2 ci-dessus.

↳ Les résultats des modèles prédictifs ont mis en évidence :

- › **Les effets significatifs du réglage de la température et du chargement** sur la consommation d'énergie spécifique et la durée des cycles. Ces paramètres sont cruciaux pour l'efficacité énergétique.
- › **Le taux d'humidité initial du linge (taux d'essorage)** doit être minimisé.
- › **Des interactions entre les variables** qui influencent de manière significative les performances, soulignant l'importance d'une approche intégrée dans l'ajustement des paramètres.

Les modèles prédictifs ont révélé que **le taux de recyclage de l'air** a tendance à ralentir les procédés de séchage et donc, à réduire légèrement la productivité, mais reste bénéfique pour la consommation d'énergie, dans certaines conditions : **température de consigne basse ou moyenne ; taux d'essorage optimisé.**

Maximiser le taux de charge et minimiser le taux d'humidité initial sont cruciaux pour optimiser l'efficacité énergétique et la productivité. Les analyses ont confirmé que les résultats expérimentaux sont en accord avec les prédictions théoriques, validant ainsi la stabilité des équations utilisées dans notre modèle.

Cette étude démontre que des ajustements soignés des paramètres de procédé des séchoirs peuvent significativement améliorer l'efficacité énergétique de ces matériels, en conservant une productivité optimale. Bien sûr, ces modèles ne sont valables que pour le domaine d'expérimentation défini au démarrage de l'étude et pour le matériel utilisé, qui est un matériel professionnel, que l'on rencontre en pressing. Les observations et conclusions que l'on en tire sont à considérer comme des tendances vérifiées qui ont cependant toutes les chances d'être transposables qualitativement à d'autres matériels.

Concernant le recyclage de l'air, il serait intéressant d'explorer un pilotage plus fin, notamment sur une partie du cycle seulement, ce qui n'a pas été possible.