

Avec le soutien de



Energy saving concepts for the European ceramic industry

CERAMIN



Tutorial pour la sauvegarde de l'énergie

(Electricité non prise en compte)

Responsable du tutorial: Rüdiger Köhler, KI Keramik-Institut GmbH, D 01662 Meißen

Le contenu de cette publication n'engage que la responsabilité de son auteur et ne représente pas nécessairement l'opinion de la Communauté européenne. La Commission européenne n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qui y figurent.



Table des matières

0	Introduction	3
1	Remarques générales.....	6
2	Briques de structure.....	7
3	Briques de parement	15
4	Les Tuiles.....	22
5	Les articles de tables en céramique	29
6	Les produits sanitaires.....	35
7	Les Carreaux de sol et de mûr.....	40
8	Références.....	46



0 Introduction

Le projet CERAMIN vise à encourager l'industrie céramique européenne à réduire leur consommation énergétique spécifique (SEC) par la création d'un label énergétique et par la dissémination d'un tutorial de bonnes pratiques, guide élaboré à partir des informations obtenues auprès des entreprises européennes participantes.

Les entreprises céramiques de toutes les branches céramiques et de tous les pays européens ont été invitées à participer à ce "concours" afin de déterminer les entreprises consommant le moins d'énergie et celles qui ont diminuées leurs consommations. Dans un premier temps, le projet s'est limité à 60 entreprises dans 6 pays européens. Les partenaires du projet sont présentés sur la page web <http://www.ceramin.eu/partners.htm>.

Le tableau 1 montre la répartition des entreprises participantes par branche céramique et par pays après la première période.

Toutes les branches sont représentées, avec une plus forte mobilisation des produits rouges (tuiles et briques); ainsi qu'une bonne participation des produits réfractaires et des articles de tables.

	UK	E	F	I	D	PL	Total par branche
Briques de structure					1	2	3
Briques de parement	9				13	2	24
Tuiles						1	1
Produits réfractaires	2	2	1			1	6
Carreaux de sol et de mûr	1		2			1	4
Produits sanitaires			1		1	1	3
Articles de table	3		1			2	6
Céramiques techniques							0
Total par pays	15	3	5	0	15	10	48

Tableau 1: Répartition des entreprises participantes au projet CERAMIN au 31.12.2008



Le tableau 2 présente les résultats. Les calculs utilisés pour définir les rendements énergétiques sont présentés en annexe 1.

Après le calcul de la consommation spécifique (sur deux années), rapporté à la quantité massique de produits fabriqués, la réduction énergétique enregistrée par les entreprises est calculée. Les entreprises sont ensuite classées anonymement par branche et par niveau de réduction énergétique. Les 5 premiers de la partie "réduction énergétique", ainsi que le meilleur en absolue (meilleur SEC sur une année) par branche sont alors listés. Les données énergétiques ne sont pas vérifiées pour l'instant, cependant une vérification selon l'EUTS devrait être envisageable pour la majorité des compagnies.

A ce jour, la collecte des données présentes dans le tableau 2 est terminée. Cependant, la crise économique de 2009 a engendré des problèmes vis à vis de la coopération des entreprises qui hésite désormais à fournir des données qui expliquent leur propre succès énergétique aux autres partenaires ([50] [51]).

Les remarques et recommandations de ce tutorial sont basées sur l'expérience générale des partenaires, ainsi que sur de nombreux articles présentés en annexe. Certains ont été collectés ou rédigés par le groupe d'expert partenaire du projet composé de:

- CERAM Research Ltd. (UK) – www.ceram.com
- Instytut Szkła i Ceramiki, Materialow Orgniotrwalych i Budowlanych (PL) – www.isic.waw.pl
- Société Française de Céramique (F) – www.ceramique.fr
- KI Keramik-Institut GmbH (D) – www.ceramics-institute.com

	N° Entreprise	N° Usine	Branche céramique	Consommation énergétique [GJ]	SEC [GJ/t]	Rang en absolu	Réduction énergie	Rang Réduction Énergétique
D	1	1	Masonry...	15.308	2,69	4	0,92	1
PL	PL-3	PL-3	Masonry...	181.290	1,34	1	0,38	2
PL	PL-5	PL-5-2	Masonry...	145.052	2,17	2	0,29	3
PL	PL-5	PL-5-2	Masonry...	138.090	2,61	3		
PL	PL-3	PL-3	Masonry...	287.464	2,76	5		
D	1	1	Masonry...	20.885	3,60	6		
UK	5	1	Pavement...	56.609	10,63	42	3,81	1



UK		3	1	Pavement...	21.388	4,24	32	1,63	2
UK		8	1	Pavement...	9.768	3,16	25	1,10	3
UK		6	1	Pavement...	19.413	5,83	38	0,97	4
D		6	1	Pavement...	90.670	4,72	35	0,40	5
UK		1	1	Pavement...	4.135	1,43	2	-0,05	16
UK		1	1	Pavement...	4.024	1,37	1		
UK		8	1	Pavement...	13.168	4,26	33		
D		6	1	Pavement...	99.921	5,12	37		
UK		3	1	Pavement...	35.812	5,88	39		
UK		6	1	Pavement...	21.743	6,80	40		
UK		5	1	Pavement...	62.746	14,45	46		
PL	PL-5	PL-5-1		roof...	78.481	4,27		12,08	
PL	PL-5	PL-5-1		roof...	34.822	22,38			
UK		9	1	refractories	90.397	16,31	11	6,27	1
E		2	2	refractories	44.031	8,16	7	1,72	2
PL	PL-4	PL-4		refractories	304.986	4,91	3	1,13	3
F		D	1	refractories	50.026	10,88	8	0,51	4
E		2	1	refractories	57.675	3,77	1	0,24	5
E		2	1	refractories	53.184	4,66	2		
PL	PL-4	PL-4		refractories	347.730	6,04	4		
F		D	1	refractories	45.543	11,39	9		
E		2	2	refractories	51.487	13,32	10		
UK		9	1	refractories	145.421	25,72	12		
UK		13	1	tiles	475.346	8,80	7	0,67	1
PL	PL-1	PL-1		tiles	505.728	5,13	3	0,28	2
F		C	1	tiles	212.677	8,33	5	0,13	3
F		B	1	tiles	300.240	5,12	2	-0,12	4
F		B	1	tiles	349.200	5,00	1		
PL	PL-1	PL-1		tiles	356.082	5,55	4		
F		C	1	tiles	196.815	8,73	6		
UK		13	1	tiles	491.282	9,46	8		
F		A	1	sanitary...	176.090	20,79	5	3,02	1
PL	PL-7	PL-7		sanitary...	118.560	10,68	1	1,03	2
D		13	1	sanitary...	81.472	10,76	2	0,65	3
D		13	1	sanitary...	82.198	12,07	3		
PL	PL-7	PL-7		sanitary...	138.484	14,69	4		
F		A	1	sanitary...	178.351	25,33	6		
UK		11	1	table...	131.907	56,35	10	13,18	1
PL	PL-8	PL-8		table...	259.203	44,57	5	4,96	2
F		E	1	table...	125.536	52,39	6	3,90	3
PL	PL-2	PL-2		table...	454.358	31,21	1	1,96	4
UK		12	1	table...	241.809	33,13	2	1,01	5
PL	PL-2	PL-2		table...	299.109	36,10	4		
UK		12	1	table...	277.784	34,65	3		
PL	PL-8	PL-8		table...	287.050	54,50	8		
F		E	1	table...	122.729	56,30	9		
UK		11	1	table...	169.593	76,12	12		

Tableau 2: Résultat d'entreprises participantes par branche céramique



1 Remarques générales

1.1 Sur ce tutorial

Le présent guide est structuré par branche céramique. De nombreuses recommandations sont générales et, de ce fait, se retrouvent dans plusieurs secteurs céramiques. C'est pourquoi, certaines recommandations peuvent être répétées dans plusieurs parties de ce document.

Remarque: Seulement quelques recommandations sont assimilables à votre procédé de production et à vos besoins propres en matière de réduction énergétique.

1.2 Validité commune

- o Une usine qui travaille à pleine capacité possède une consommation énergétique spécifique (SEC) plus basse qu'à plus faible régime (production inférieure à la capacité de l'usine).
- o Bien que l'énergie électrique consommée ne soit pas pris en compte, la cogénération de chaleur ou de puissance (issue du four) peut être une bonne stratégie pour sauver de l'énergie et diminuer les coûts.



2 Briques de structure

2.1 Les matières premières

- o Des additifs généralement utilisés comme isolant peuvent aussi être utilisés comme source énergétique. La température de combustion de ces produits peut permettre un apport calorifique supplémentaire. Ainsi, les déchets de graphite [47], le coke du pétrole [17] ou la poudre de charbon [19] peuvent permettre d'obtenir des températures allant jusqu'à 800 °C.
- o Des additifs de frittage comme des déchets de verre, des fumées de silice, les fibres de verre ou minérale, ou des argiles grésantes, peuvent aussi aider à réduire la température de frittage ou produire (séchage et cuisson) des produits plus légers présentant des propriétés mécaniques similaires ([47], [29], [37] et [65]).
- o Le besoin de plasticité, en particulier pour les briques modernes entraîne nécessairement l'utilisation d'une plus grande quantité d'eau. Une diminution d'eau est possible par l'utilisation de meilleures argiles ou de plastifiants (additifs) qui favorisent la plasticité de la masse. Ceci permet de réduire l'énergie consommée lors du séchage ([47] [48] [21] [37]).

2.2 Le façonnage

- o Il est possible de sauvegarder de l'énergie en utilisant un procédé de pressage ("stiff pressing"). Cependant, tous les produits ne sont pas concernés par ce type de façonnage. Quelques fois, l'énergie de séchage économisée est consommée lors de l'extrusion comme énergie électrique ([48] [1]).
- o Essayer d'utiliser la température qu'acquiert le produit lors de l'extrusion à l'entrée du séchoir ([36] [5] [6] [26]).



2.3 Le séchage

Dans l'industrie céramique, le séchage consiste à évaporer l'eau physiquement lié (ou eau colloïdale). Il est bien connu que l'eau est caractérisée par une capacité calorifique élevée (4,2 kJ/kg K) et une très grande chaleur d'évaporation (2500 kJ/kg). Cette énergie est nécessaire afin de chauffer, puis évaporer l'eau contenue dans la pâte céramique. Ce qui est la cause directe d'une consommation énergétique élevée.

Le principal objectif consiste donc à se rapprocher autant que possible de la consommation théorique et ainsi éviter les pertes énergétiques.

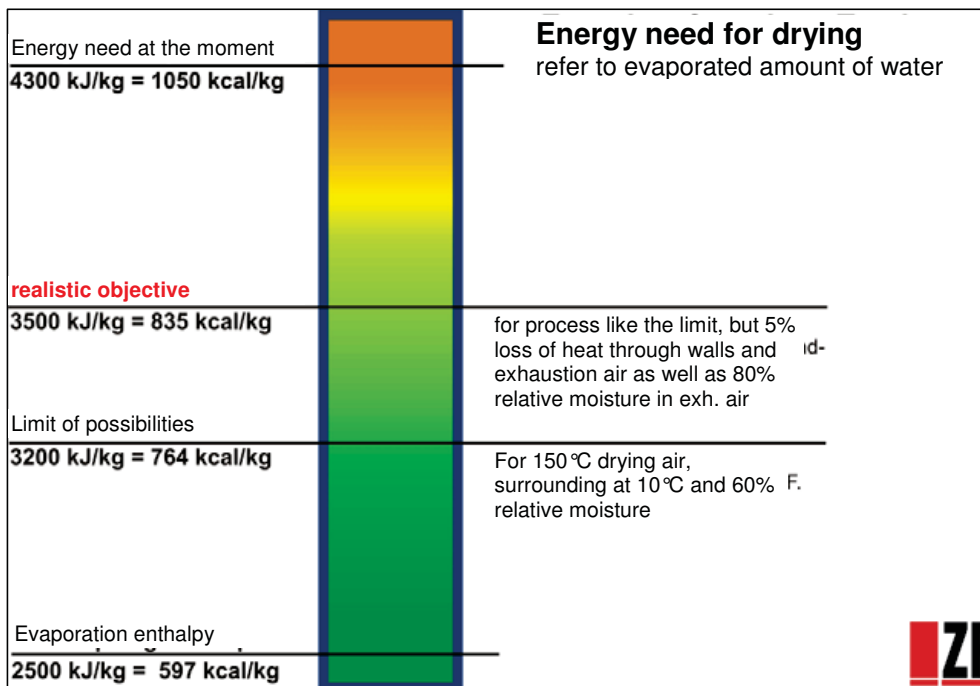


Figure 1: Energie nécessaire au séchage



La figure 1 montre que pour le moment, 50% de l'énergie thermique dans la production de produit céramique est utilisée pour sécher ([49]). Dans le Royaume Uni, l'utilisation d'un procédé de "stiff pressing" a permis de diminuer ce taux à 30% ([9]).

- o Un moyen de réduire la consommation d'énergie au niveau du séchage est de coupler le séchoir au four, et ainsi utiliser les calories perdues dans les fumées du four ([7]).
- o Aujourd'hui le couplage séchoir / four est très courant, cependant un travail des deux outils en parallèle est important pour ne pas perdre de calories. Ce qui signifie qu'il ne faudrait pas d'arrêt le week-end sur l'ensemble de la chaîne de production pour optimiser le rendement énergétique ([43]).
- o Un autre moyen d'optimisation est d'ajouter un système de contrôle de ventilation/chauffage dans l'enceinte de séchage afin de contrôler l'atmosphère de séchage en fonction de la quantité d'eau à évaporer ([6]).
- o L'utilisation de petites quantités d'air avec une haute température diminue la perte énergétique due au réchauffement de cet air ([36] [45] [49]).
- o Une bonne circulation de l'air au travers des briques de structure permet un meilleur séchage ([47]).
- o La Figure 2 montre que le coût énergétique de séchage est un compromis entre le coût de l'énergie de chauffe et celui de ventilation. Il existe cependant un optimum qu'il faut rechercher.

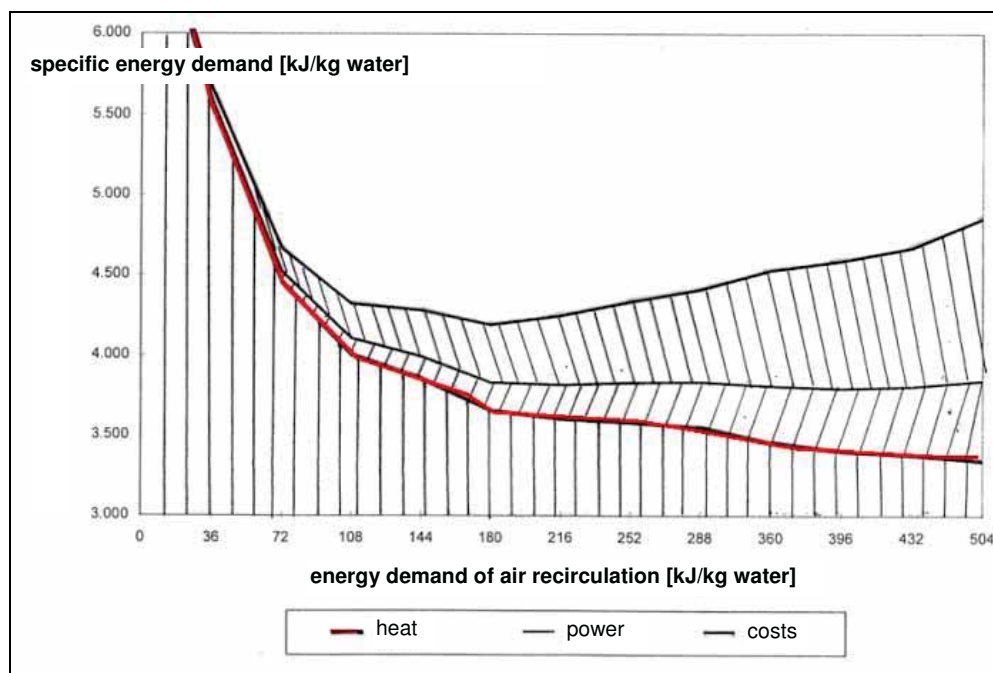


Figure 2: Demande d'énergie de chauffe en fonction de la demande d'énergie de la mise en mouvement de l'air dans un séchoir.

- o L'enfournement et la densité d'enfournement doit permettre à la majeure partie des surfaces à être facilement au contact de l'air de séchage ([5]).
- o Des cycles de séchage plus rapide permettent de diminuer la consommation d'énergie ([5] [6] [41] [44]).
- o Eviter d'augmenter l'humidité de l'air et favoriser une augmentation de la densité d'enfournement pour augmenter l'humidité de l'enceinte ([9]).
- o Rediriger le flux d'air peut améliorer considérablement le séchage et diminuer sa durée ([9]).
- o Des logiciels de simulation du procédé de séchage peuvent être utilisés pour optimiser le séchage ([36]).
- o Dans le cas d'un couplage entre le four et le séchoir, le niveau d'énergie du four gouverne le niveau d'énergie que reçoit le séchoir (et pas la demande énergétique du séchoir). De ce fait, une basse énergie utilisée par le séchoir cause une grande perte énergétique au niveau du four ([36] [42]).



- o Le système qui collecte l'air chaud de la sortie du four et l'envoi vers le séchoir doit être bien isolé afin de diminuer les pertes thermiques ([47]).
- o Les séchoirs les plus modernes peuvent diminuer la durée de séchage de 90% (comparé aux séchoirs conventionnels) ([49]).
- o Des séchoirs alternatifs appelés « airless drying », utilisant une atmosphère sous pression, permettrait une diminution du temps de séchage de 80% ([63]).

2.4 La cuisson

La consommation spécifique utilisée pour cuire les différentes céramiques dépend principalement de la température de cuisson. Cette température est déterminée par la composition minéralogique du produit, le procédé de fabrication et les propriétés attendues. La figure 3 montre une augmentation exponentielle de la demande énergétique avec la température.

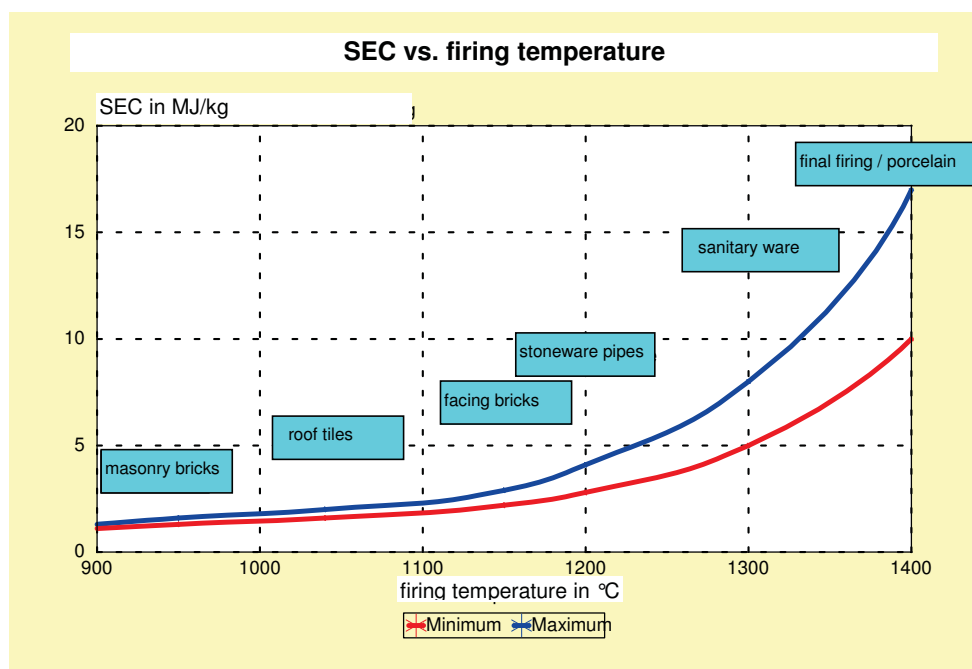


Figure 3: Consommation énergétique des différents produits céramiques cuits à des températures différentes ([48]).



La figure 4 représente le bilan énergétique d'un four tunnel utilisé dans la fabrication de briques de structure. La plus grande perte énergétique concerne ici la colonne d'air représentant le refroidissement du four, qui est néanmoins utilisée en partie pour le séchage.

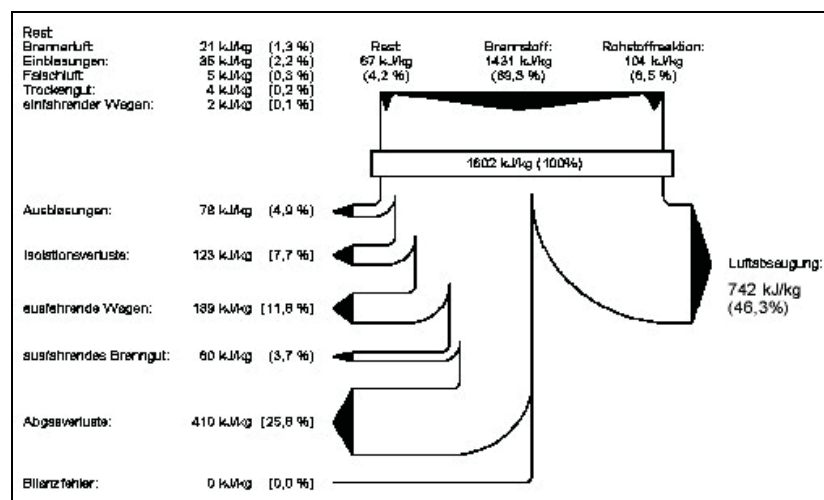


Figure 4: Bilan énergétique d'un four tunnel pour briques de structures ([47]).

2.4.1 Four et accessoires

Il existe 2 voies d'amélioration afin de réduire les pertes énergétiques dues à la conception des fours et des wagonnets réfractaires:

1. Isoler du four

“Un des meilleur moyen de sauver de l'énergie est de limiter les fuites”(“However one of the best possibilities to save energy is still to eliminate leakages” Don Denison, Denison Inc. [21]).



2. Diminuer le poids des réfractaires utilisés dans la conception du four et des wagonnets que l'on doit chauffer

- o Les roues des wagonnets devraient être en principe situées à l'extérieur du four ("Wheel flanges of kiln car wheels should in principle be located on the outside" [2]).
- o Les matériaux réfractaires constituant les wagonnets doivent être de bonne qualité isolante et le plus léger possible, tout en étant adaptés aux chocs thermiques existants au sein du four ([2] [3] [20]).
- o La référence [2] présente une méthode de calcul afin de déterminer l'épaisseur optimale des wagonnets en fonction de leur composition.
- o Des suggestions afin d'éviter les pertes calorifiques dans le four sont présentées dans les documents [2] et [33].
- o De nouveaux designs de voute de four ont été développés afin de limiter les pertes thermiques dues à leur dilatation différentielle entre les hautes températures et les plus faibles ([2]).

2.4.2 Nature d'énergie et technologie

- o Dans la zone principale de cuisson, une pression de 10-15 Pa est recommandée ([74]).
- o Cuire au gaz naturel au lieu du fioul permet d'augmenter le pouvoir calorifique et ainsi diminuer la quantité de combustible ([51]).
- o Utiliser de l'énergie renouvelable produit directement sur site comme le biogaz peut diminuer le coût énergétique, ainsi que les émissions de CO₂ ([11]). Le biogaz peut couvrir l'entière demande énergétique pour la cuisson de brique ([47]).
- o Augmenter le contrôle de la cuisson avec l'utilisation de nouveaux brûleurs ou de nouveau système de contrôle multizone ([33] [51] [34]).
- o Les brûleurs jet sont plus efficaces que les brûleurs conventionnels ([74]).
- o Les brûleurs jet (vitesse des gaz chauds > 100 m/s) sont recommandés dans les zones de préchauffage jusqu'à 700°C. Au delà de cette température, les



mouvements de convection permettent naturellement l'homogénéité de la température. Les fours peuvent être facilement modifiés avec ce type de brûleur pour économiser de l'énergie. ([74])

- o Des techniques déjà décrites dans la partie "séchage" peuvent aussi s'appliquer ici ([33] [34]).
- o L'air de combustion peut être préchauffé afin de diminuer l'énergie de combustion utilisée pour chauffer l'air ([40]).
- o Utiliser des supports réfractaires similaires pour le séchage et la cuisson permet d'économiser de l'énergie au niveau de la cuisson (chauffe des supports réfractaires) ([1] [23]).
- o Les derniers développements dans le secteur des tuiles et briques consistent à utiliser des revêtements spéciaux dans certaines zones du four afin de réfléchir la chaleur vers d'autres zones et ainsi réduire les gradients thermiques. Ceci devrait en théorie réduire l'utilisation de gaz de 10% environ ([51]).
- o Réduire les pertes superflues en chauffant le four sur toute sa longueur ([33]).
- o Améliorer les mouvements d'air au sein du four ([47]).
- o Revalorisation des calories issues des fumées et des gaz émis ([18] [47]).



3 Briques de parement

3.1 Les matières premières

- o Des additifs de frittage comme des déchets de verre, des fumées de silice, les fibres de verre ou minérale, ou des argiles grésantes, peuvent aussi aider à réduire la température de frittage ou produire (séchage et cuisson) des produits plus légers présentant des propriétés mécaniques similaires ([47], [29], [35] et [65]).
- o Le besoin de plasticité, en particulier pour les briques modernes entraîne nécessairement l'utilisation d'une plus grande quantité d'eau. Une diminution d'eau est possible par l'utilisation de meilleures argiles ou de plastifiants (additifs) qui favorisent la plasticité de la masse. Ceci permet de réduire l'énergie consommé lors du séchage ([47] [48] [21] [37]).
- o Des additifs organiques spéciaux peuvent être ajoutés pour obtenir des effets de surfaces de flammage et de structure. Ceux-ci contribuent au dégagement de gaz lors de la cuisson qui n'améliore pas le rendement énergétique. Cependant, le département marketing obtient la décision finale ([21]).

3.2 Le façonnage

- o Il est possible de sauvegarder de l'énergie en utilisant un procédé de pressage ("stiff pressing"). Cependant, tous les produits ne sont pas concernés par ce type de façonnage. Quelques fois, l'énergie de séchage économisée est consommée lors de l'extrusion comme énergie électrique ([48] [1]).
- o Essayer d'utiliser la température qu'acquiert le produit lors de l'extrusion à l'entrée du séchoir ([36] [5] [6] [26]).
- o Des formes sophistiquées peuvent permettre une diminution du poids des briques de parements. Cet allègement est synonyme de gain énergétique lors du séchage et de la cuisson des produits.



- o Un façonnage à sec ou avec une faible humidité peut permettre une économie d'énergie au niveau du séchage, mais demandera une énergie supérieure au niveau du façonnage et peut influencer sur la qualité du produit. Un optimum existe ([21]).

3.3 Le séchage

Dans l'industrie céramique, le séchage consiste à évaporer l'eau physiquement lié (ou eau colloïdale). Il est bien connu que l'eau est caractérisée par une capacité calorifique élevée (4,2 kJ/kg K) et une très grande chaleur d'évaporation (2500 kJ/kg). Cette énergie est nécessaire afin de chauffer, puis évaporer l'eau contenue dans la pâte céramique. Ce qui est la cause directe d'une consommation énergétique élevée.

Le principal objectif consiste donc à se rapprocher autant que possible de la consommation théorique et ainsi éviter les pertes énergétiques.

La figure 1 montre que pour le moment, 50% de l'énergie thermique dans la production de produit céramique est utilisée pour sécher ([49]). Dans le Royaume Uni, l'utilisation d'un procédé de "stiff pressing" a permis de diminuer ce taux à 30% ([9]).

- o Un moyen de réduire la consommation d'énergie au niveau du séchage est de coupler le séchoir au four, et ainsi utiliser les calories perdues dans les fumées du four ([7]).
- o Aujourd'hui le couplage séchoir / four est très courant, cependant un travail des deux outils en parallèle est important pour ne pas perdre de calories. Ce qui signifie qu'il ne faudrait pas d'arrêt le week-end sur l'ensemble de la chaîne de production pour optimiser le rendement énergétique ([43]).
- o Un autre moyen d'optimisation est d'ajouter un système de contrôle de ventilation/chauffage dans l'enceinte de séchage afin de contrôler l'atmosphère de séchage en fonction de la quantité d'eau à évaporer ([6]).
- o L'utilisation de petites quantités d'air avec une haute température diminue la perte énergétique due au réchauffement de cet air ([36] [45] [49]).



- o Une bonne circulation de l'air au travers des briques permet un meilleur séchage ([47]).
- o La Figure 2 montre que le coût énergétique de séchage est un compromis entre le coût de l'énergie de chauffe et celui de ventilation. Il existe cependant un optimum qu'il faut rechercher.
- o L'enfournement et la densité d'enfournement doit permettre à la majeure partie des surfaces à être facilement au contact de l'air de séchage ([5]).
- o Des cycles de séchage plus rapide permettent de diminuer la consommation d'énergie ([5] [6] [41] [44]).
- o Eviter d'augmenter l'humidité de l'air et favoriser une augmentation de la densité d'enfournement pour augmenter l'humidité de l'enceinte ([9]).
- o Rediriger le flux d'air peut améliorer considérablement le séchage et diminuer sa durée ([9]).
- o Des logiciels de simulation du procédé de séchage peuvent être utilisés pour optimiser le séchage ([36]).
- o Dans le cas d'un couplage entre le four et le séchoir, le niveau d'énergie du four gouverne le niveau d'énergie que reçoit le séchoir (et pas la demande énergétique du séchoir). De ce fait, une basse énergie utilisée par le séchoir cause une grande perte énergétique au niveau du four ([36] [42]).
- o Le système qui collecte l'air chaud de la sortie du four et l'envoi vers le séchoir doit être bien isolé afin de diminuer les pertes thermiques ([47]).
- o Les séchoirs les plus modernes peuvent diminuer la durée de séchage de 90% (comparé aux séchoirs conventionnels) ([49]).
- o Des supports modernes de séchoir peuvent permettre une meilleure circulation de l'air (figure 5, [49]).



Figure 5: MobilSystem by Rotho- channel for facing or pavement bricks [49]

3.4 La cuisson

La consommation spécifique utilisée pour cuire les différentes céramiques dépend principalement de la température de cuisson. Cette température est déterminée par la composition minéralogique du produit, le procédé de fabrication et les propriétés attendues. La figure 3 montre une augmentation exponentielle de la demande énergétique avec la température.

La figure 4 représente le bilan énergétique d'un four tunnel utilisé dans la fabrication de briques. La plus grande perte énergétique concerne ici la colonne d'air représentant le refroidissement du four, qui est néanmoins utilisée en partie pour le séchage.



3.4.1 Four et accessoires

Il existe 2 voies d'amélioration afin de réduire les pertes énergétiques dues à la conception des fours et des wagonnets réfractaires:

1. Isoler du four

“Un des meilleur moyen de sauver de l'énergie est de limiter les fuites”(“However one of the best possibilities to save energy is still to eliminate leakages” Don Denison, Denison Inc. [21]).

2. Diminuer le poids des réfractaires utilisés dans la conception du four et des wagonnets que l'on doit chauffer

- o Les roues des wagonnets devraient être en principe situées à l'extérieur du four (“Wheel flanges of kiln car wheels should in principle be located on the outside” [2]).
- o Les matériaux réfractaires constituant les wagonnets doivent être de bonne qualité isolante et le plus léger possible, tout en étant adaptés aux chocs thermiques existants au sein du four ([2] [3] [20]).
- o De nouveaux supports réfractaires en SiC peuvent être utilisés afin de diminuer la charge de réfractaires ([2]).
- o La référence [2] présente une méthode de calcul afin de déterminer l'épaisseur optimale des wagonnets en fonction de leur composition.
- o Des suggestions afin d'éviter les pertes calorifiques dans le four sont présentées dans les documents [2] et [33].
- o De nouveaux designs de voute de four ont été développés afin de limiter les pertes thermiques dues à leur dilatation différentielle entre les hautes températures et les plus faibles ([2]).



3.4.2 Nature d'énergie et technologie

- o Dans la zone principale de cuisson, une pression de 10-15 Pa est recommandée ([74]).
- o Cuire au gaz naturel au lieu du fioul permet d'augmenter le pouvoir calorifique et ainsi diminuer la quantité de combustible ([51]).
- o Utiliser de l'énergie renouvelable produit directement sur site comme le biogaz peut diminuer le coût énergétique, ainsi que les émissions de CO₂ ([11]). Le biogaz peut couvrir l'entière demande énergétique pour la cuisson de brique ([47]).
- o Augmenter le contrôle de la cuisson avec l'utilisation de nouveaux brûleurs ou de nouveau système de contrôle multizone ([33] [51] [34]).
- o Les brûleurs jet sont plus efficaces que les brûleurs conventionnels ([74]).
- o Les brûleurs jet (vitesse des gaz chauds > 100 m/s) sont recommandés dans les zones de préchauffage jusqu'à 700°C. Au delà de cette température, les mouvements de convection permettent naturellement l'homogénéité de la température. Les fours peuvent être facilement modifiés avec ce type de brûleur pour économiser de l'énergie. ([74])
- o Des techniques déjà décrites dans la partie "séchage" peuvent aussi s'appliquer ici ([33] [34]).
- o L'air de combustion peut être préchauffé afin de diminuer l'énergie de combustion utilisée pour chauffer l'air ([40]).
- o Utiliser des supports réfractaires similaires pour le séchage et la cuisson permet d'économiser de l'énergie au niveau de la cuisson (chauffe des supports réfractaires) ([1] [23]).
- o Les derniers développements dans le secteur des tuiles et briques consistent à utiliser des revêtements spéciaux dans certaines zones du four afin de réfléchir la chaleur vers d'autres zones et ainsi réduire les gradients thermiques. Ceci devrait en théorie réduire l'utilisation de gaz de 10% environ ([51]).
- o Réduire les pertes superflues en chauffant le four sur toute sa longueur ([33]).
- o Améliorer les mouvements d'air au sein du four ([47]).



- o Un four tunnel devrait être utilisé pour un type de produits et le cycle de cuisson devrait être optimisé pour ce type. Lorsque plusieurs produits sont cuits dans le même four tunnel, il est difficile d'optimiser la cuisson. Des petits fours tunnels "shuttle kilns" peuvent être utilisés pour les produits spéciaux, ou une réduction de la diversité des produits peut permettre une optimisation de la cuisson ([9]).
- o Revaloriser des calories issues des fumées et des gaz émis ([18] [47]).



4 Les Tuiles

4.1 Les matières premières

- o Des additifs de frittage comme des déchets de verre, des fumées de silice, les fibres de verre ou minérale, ou des argiles grésantes, peuvent aussi aider à réduire la température de frittage ou produire (séchage et cuisson) des produits plus légers présentant des propriétés mécaniques similaires ([47], [29], [65] et [35]).
- o Le besoin de plasticité, en particulier pour les briques modernes entraîne nécessairement l'utilisation d'une plus grande quantité d'eau. Une diminution d'eau est possible par l'utilisation de meilleures argiles ou de plastifiants (additifs) qui favorisent la plasticité de la masse. Ceci permet de réduire l'énergie consommé lors du séchage ([47] [48] [21] [37]).
- o Des additifs organiques spéciaux peuvent être ajoutés pour obtenir des effets de surfaces de flammage et de structure. Ceux-ci contribuent au dégagement de gaz lors de la cuisson qui n'améliore pas le rendement énergétique. Cependant, le département marketing obtient la décision finale ([21]).

4.2 Le façonnage

- o Il est possible de sauvegarder de l'énergie en utilisant un procédé de pressage ("stiff pressing"). Cependant, tous les produits ne sont pas concernés par ce type de façonnage. Quelques fois, l'énergie de séchage économisée est consommée lors de l'extrusion comme énergie électrique ([48] [1]).
- o Essayer d'utiliser la température qu'acquiert le produit lors de l'extrusion à l'entrée du séchoir ([36] [5] [6] [26]).
- o Des formes sophistiquées peuvent permettre une diminution du poids des tuiles. Cet allègement est synonyme de gain énergétique lors du séchage et de la cuisson des produits.



- o Un façonnage à sec ou avec une faible humidité peut permettre une économie d'énergie au niveau du séchage, mais demandera une énergie supérieure au niveau du façonnage et peut influencer sur la qualité du produit. Un optimum existe ([21]).

4.3 Le séchage

Dans l'industrie céramique, le séchage consiste à évaporer l'eau physiquement lié (ou eau colloïdale). Il est bien connu que l'eau est caractérisée par une capacité calorifique élevée (4,2 kJ/kg K) et une très grande chaleur d'évaporation (2500 kJ/kg). Cette énergie est nécessaire afin de chauffer, puis évaporer l'eau contenue dans la pâte céramique. Ce qui est la cause directe d'une consommation énergétique élevée.

Le principal objectif consiste donc à se rapprocher autant que possible de la consommation théorique et ainsi éviter les pertes énergétiques.

La figure 1 montre que pour le moment, 50% de l'énergie thermique dans la production de produit céramique est utilisée pour sécher ([49]). Dans le Royaume Uni, l'utilisation d'un procédé de "stiff pressing" a permis de diminuer ce taux à 30% ([9]).

- o Un moyen de réduire la consommation d'énergie au niveau du séchage est de coupler le séchoir au four, et ainsi utiliser les calories perdues dans les fumées du four ([7]).
- o Aujourd'hui le couplage séchoir / four est très courant, cependant un travail des deux outils en parallèle est important pour ne pas perdre de calories. Ce qui signifie qu'il ne faudrait pas d'arrêt le week-end sur l'ensemble de la chaîne de production pour optimiser le rendement énergétique ([43]).
- o Un autre moyen d'optimisation est d'ajouter un système de contrôle de ventilation/chauffage dans l'enceinte de séchage afin de contrôler l'atmosphère de séchage en fonction de la quantité d'eau à évaporer ([6]).
- o L'utilisation de petites quantités d'air avec une haute température diminue la perte énergétique due au réchauffement de cet air ([36] [45] [49]).
- o Un flux d'air discontinu est plus efficace qu'un flux laminaire (Figure 8, [4]).



- o La Figure 2 montre que le coût énergétique de séchage est un compromis entre le coût de l'énergie de chauffe et celui de ventilation. Il existe cependant un optimum qu'il faut rechercher.
- o L'enfournement et la densité d'enfournement doit permettre à la majeure partie des surfaces à être facilement au contact de l'air de séchage ([5]).
- o Des supports modernes de séchoir peuvent permettre une meilleure circulation de l'air (figure 6 et 7, [49]).
- o Des cycles de séchage plus rapide permettent de diminuer la consommation d'énergie ([5] [6] [41] [44]).
- o Eviter d'augmenter l'humidité de l'air et favoriser une augmentation de la densité d'enfournement pour augmenter l'humidité de l'enceinte ([9]).
- o Rediriger le flux d'air peut améliorer considérablement le séchage et diminuer sa durée ([9]).
- o Des logiciels de simulation du procédé de séchage peuvent être utilisés pour optimiser le séchage ([36]).
- o Dans le cas d'un couplage entre le four et le séchoir, le niveau d'énergie du four gouverne le niveau d'énergie que reçoit le séchoir (et pas la demande énergétique du séchoir). De ce fait, une basse énergie utilisée par le séchoir cause une grande perte énergétique au niveau du four ([36] [42]).
- o Le système qui collecte l'air chaud de la sortie du four et l'envoi vers le séchoir doit être bien isolé afin de diminuer les pertes thermiques ([47]).
- o Les séchoirs les plus modernes peuvent diminuer la durée de séchage de 90% (comparé aux séchoirs conventionnels) ([49]).
- o Des séchoirs alternatifs appelés « airless drying », utilisant une atmosphère sous pression, permettrait une diminution du temps de séchage de 80% ([63]).



Figure 6: MobilSystem by Rotho- channel setter for roofing tiles /49/



Figure 7: MobilSystem by Rotho- System of channel setters for roofing tiles /49/

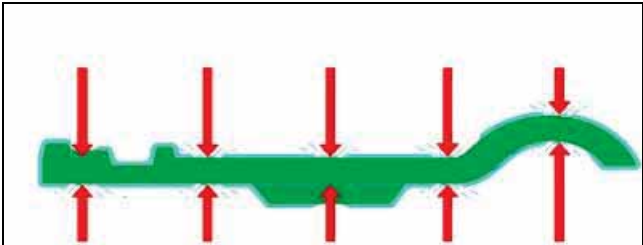


Figure 8: Impact flow, as optimal kind of drying for roof tiles



4.4 La cuisson

La consommation spécifique utilisée pour cuire les différentes céramiques dépend principalement de la température de cuisson. Cette température est déterminée par la composition minéralogique du produit, le procédé de fabrication et les propriétés attendues. La figure 3 montre une augmentation exponentielle de la demande énergétique avec la température.

La figure 4 représente le bilan énergétique d'un four tunnel utilisé dans la fabrication de produits en terre cuite. La plus grande perte énergétique concerne ici la colonne d'air représentant le refroidissement du four, qui est néanmoins utilisée en partie pour le séchage. La température de cuisson des tuiles étant plus élevée, le SEC pour cuire des tuiles est en moyenne 2,5 fois plus élevé que dans le cas des briques de structures ([47]).



4.4.1 Four et accessoires

Il existe 2 voies d'amélioration afin de réduire les pertes énergétiques dues à la conception des fours et des wagonnets réfractaires:

1. Isoler du four

“Un des meilleur moyen de sauver de l'énergie est de limiter les fuites”(“However one of the best possibilities to save energy is still to eliminate leakages” Don Denison, Denison Inc. [21]).

2. Diminuer le poids des réfractaires utilisés dans la conception du four et des wagonnets que l'on doit chauffer

- o Les roues des wagonnets devraient être en principe situées à l'extérieur du four (“Wheel flanges of kiln car wheels should in principle be located on the outside” [2]).
- o Les matériaux réfractaires constituant les wagonnets doivent être de bonne qualité isolante et le plus léger possible, tout en étant adaptés aux chocs thermiques existants au sein du four ([2] [3] [20]).
- o De nouveaux supports réfractaires en SiC peuvent être utilisés afin de diminuer la charge de réfractaires ([2]).
- o La référence [2] présente une méthode de calcul afin de déterminer l'épaisseur optimale des wagonnets en fonction de leur composition.
- o La référence [14] décrit un four rouleau spécialement dessiné pour les tuiles de terre cuite, avec des supports extra-légers et des temps de cuissons inférieur à 120 min et un SEC très bas.



4.4.2 Nature d'énergie et technologie

- o Dans la zone principale de cuisson, une pression de 10-15 Pa est recommandée ([74]).
- o Utiliser de l'énergie renouvelable produit directement sur site comme le biogaz peut diminuer le coût énergétique, ainsi que les émissions de CO₂ ([11]). Le biogaz peut couvrir l'entière demande énergétique pour la cuisson de brique ([47]).
- o Augmenter le contrôle de la cuisson avec l'utilisation de nouveaux brûleurs ou de nouveau système de contrôle multizone ([33] [51] [34]).
- o Les brûleurs jet sont plus efficaces que les brûleurs conventionnels ([74]).
- o Les brûleurs jet (vitesse des gaz chauds > 100 m/s) sont recommandés dans les zones de préchauffage jusqu'à 700°C. Au delà de cette température, les mouvements de convection permettent naturellement l'homogénéité de la température. Les fours peuvent être facilement modifiés avec ce type de brûleur pour économiser de l'énergie. ([74])
- o Des techniques déjà décrites dans la partie "séchage" peuvent aussi s'appliquer ici ([33] [34]).
- o L'air de combustion peut être préchauffé afin de diminuer l'énergie de combustion utilisée pour chauffer l'air ([40]).
- o Les derniers développements dans le secteur des tuiles et briques consistent à utiliser des revêtements spéciaux dans certaines zones du four afin de réfléchir la chaleur vers d'autres zones et ainsi réduire les gradients thermiques. Ceci devrait en théorie réduire l'utilisation de gaz de 10% environ ([51]).
- o Réduire les pertes superflues en chauffant le four sur toute sa longueur ([33]).
- o Améliorer les mouvements d'air au sein du four ([47]).
- o Les supports réfractaires sont là encore très consommateur d'énergie. Des supports moderne très léger et peu dense permettent d'optimiser le poids de ces supports ([15] [24]).
- o Les meilleurs supports pour tuiles sont présentés dans les références [22] et [39].
- o Les fours tunnels utilisés pour les accessoires en terre cuite peuvent être optimisés par un préchauffage de l'air, ou si celui-ci est couplé avec le séchoir.

5 Les articles de tables en céramique

5.1 Les matières premières

- o Le SEC du produit dépend essentiellement de la nature de la céramique. Il existe une large gamme de produits céramiques (grès, faïence, porcelaine tendre...) ayant des températures de cuisson différente. Les porcelaines dures possèdent le SEC le plus mauvais compte tenu d'une cuisson à des températures pouvant aller jusqu'à 1400°C (Figure 3).

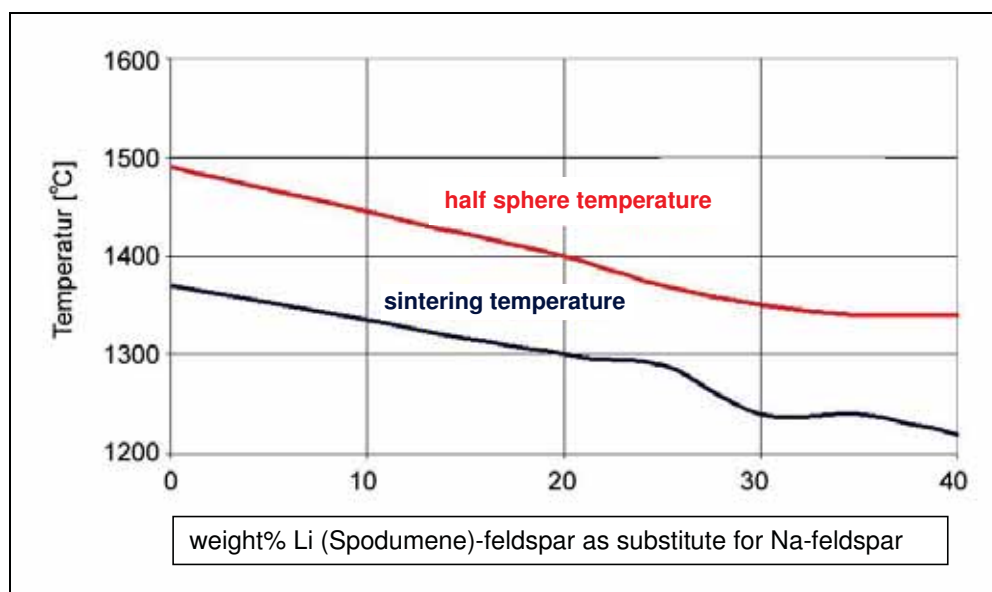


Figure 9: Effet de Li-Feldspath comme fondant. Thierry SiliCer 2003

- o De nouvelles matières premières tel les Feldspath lithique (figure 9 [53]), ou la colemanite [28], ou fondant siliceux (débris de verre) peuvent être utilisées pour faire baisser la température de cuisson jusqu'à 200°C (Figure 10 [48]).
- o La mono-cuisson permet d'économiser de l'énergie mais demande de nombreux réglages quand à l'accord émail/tesson (+ dégazage).



- o Le façonnage demande une certaine plasticité donnée par l'ajout d'eau. Diminuer la quantité d'eau par un meilleur choix des argiles qui donne de la plasticité est un bon moyen de diminuer le SEC lors du séchage ([37]).

5.2 Façonnage / décoration

- o Le façonnage qui utilise le moins d'eau est le plus intéressant pour économiser de l'énergie au niveau du séchage
 - Utiliser un procédé de pressage isostatique lorsque la forme du produit le permet. Aujourd'hui il est possible de façonner des produits creux par ce procédé.
 - Les presses isostatiques les plus modernes peuvent presser des produits à une humidité de 2%.
 - Le séchage des moules devient inutile par ce procédé.
 - Le pressage isostatique nécessite de granuler une barbotine. Il est important de bien défloculer la barbotine de départ afin d'utiliser le moins d'eau et ainsi économiser de l'énergie lors de l'atomisation (cf. Section sur les carreaux).
- o Utiliser une barbotine à haute densité afin de diminuer la quantité d'eau à évaporer (ou diminuer le temps de formage en moule en plâtre + séchage moules).
- o Un design sophistiqué peut permettre d'éviter aux pièces d'avoir des temps de séchage ou de cuisson trop élevés.
- o Des décors présentant des couleurs ayant une seule température de cuisson peuvent permettre de diminuer l'énergie utilisée pour la cuisson de décors.
- o Un nombre restreint de produits différents (forme + décors) peut permettre d'optimiser le process de production et la consommation d'énergie.
- o Utiliser des nouveau procédé de façonnage (flexi flat) qui utilisent plusieurs moules qui ne nécessitent aucun séchage. ([66])
- o Des brûleurs supplémentaires qui peuvent être coupés si nécessaire peuvent être employés dans la chaîne d'émaillage. ([64])

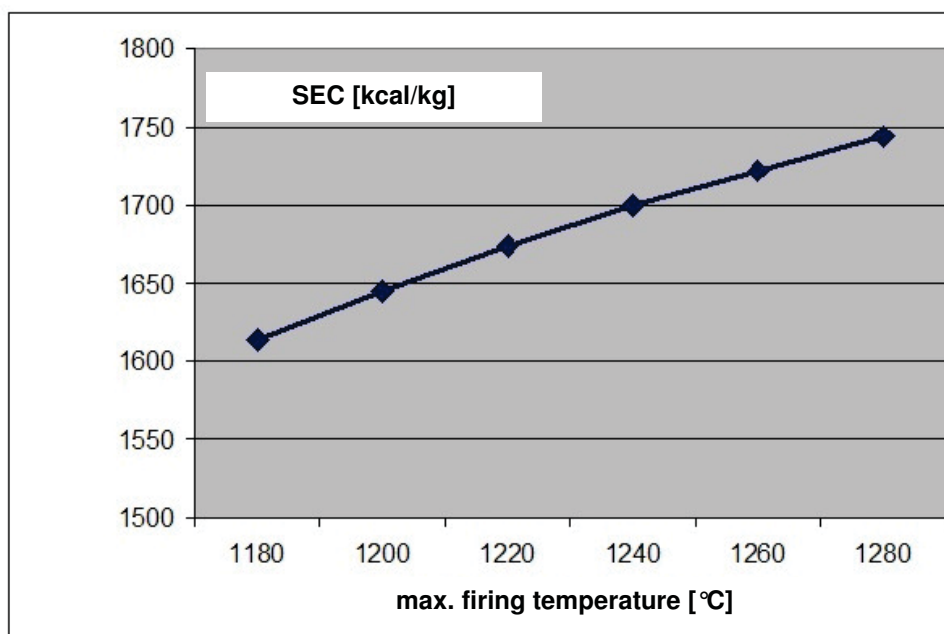


Figure 10: SEC en fonction de la température de cuisson des produits sanitaires [Friedherz Becker, Riedhammer GmbH 2007]

5.3 Le séchage

Dans l'industrie céramique, le séchage consiste à évaporer l'eau physiquement lié (ou eau colloïdale). Il est bien connu que l'eau est caractérisée par une capacité calorifique élevée (4,2 kJ/kg K) et une très grande chaleur d'évaporation (2500 kJ/kg). Cette énergie est nécessaire afin de chauffer, puis évaporer l'eau contenue dans la pâte céramique. Ce qui est la cause directe d'une consommation énergétique élevée.

- o La majorité des chaînes de production en tableware en Europe n'utilise pas de séchoirs mécaniques. Ce qui constitue le procédé de séchage le moins gourmand en énergie.
- o Pour les produits réalisés par coulage, l'utilisation de séchoir micro-onde peut être utilisée pour diminuer la consommation d'énergie.



- o Les effets d'un faible séchage (ou d'un mauvais séchage) est visible seulement après la cuisson (rebus); ce qui impacte directement le SEC ([58]).

5.4 La cuisson

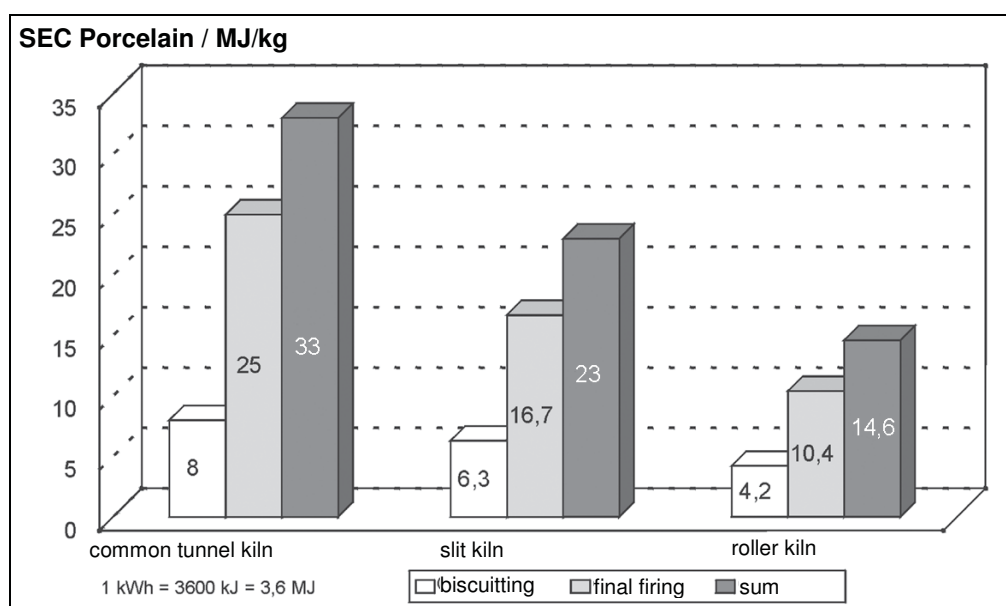


Figure 11: Comparaison des différents fours en production tableware

La consommation spécifique utilisée pour cuire les différentes céramiques dépend principalement de la température de cuisson. Cette température est déterminée par la composition minéralogique du produit, le procédé de fabrication et les propriétés attendues. La figure 3 montre une augmentation exponentielle de la demande énergétique avec la température.



5.4.1 Fours et accessoires

La Figure 11 montre le SEC de 3 différents fours utilisés dans la fabrication d'articles de table. Le "roller kiln" apparaît être le moins gourmand en énergie car celui-ci possède une charge de réfractaire inférieure.

Il existe 2 voies d'amélioration afin de réduire les pertes énergétiques dues à la conception des fours et des wagonnets réfractaires:

1. Isoler du four

"Un des meilleur moyen de sauver de l'énergie est de limiter les fuites" ("However one of the best possibilities to save energy is still to eliminate leakages" Don Denison, Denison Inc. [21]).

2. Diminuer le poids des réfractaires utilisés dans la conception du four et des wagonnets que l'on doit chauffer

- o Les roues des wagonnets devraient être en principe situées à l'extérieur du four ("Wheel flanges of kiln car wheels should in principle be located on the outside" [2]).
- o Les matériaux réfractaires constituant les wagonnets doivent être de bonne qualité isolante et le plus léger possible, tout en étant adaptés aux chocs thermiques existants au sein du four ([2] [3] [20]).
- o De nouveaux supports réfractaires en SiC peuvent être utilisés afin de diminuer la charge de réfractaires ([2]).
- o La référence [2] présente une méthode de calcul afin de déterminer l'épaisseur optimale des wagonnets en fonction de leur composition.



5.4.2 Nature d'énergie et technologie

- o L'utilisation de nouveaux fours tunnel pour des cuissons rapides permet une diminution de la consommation de gaz de 50% ([50]).
- o Dans la zone principale de cuisson, une pression de 10-15 Pa est recommandée ([74]).
- o Dans le cas de mono-cuisson, il n'y a pas de cuisson du biscuit. La figure 11 montre l'énergie qui est alors économisée.
- o Augmenter le contrôle de la cuisson avec l'utilisation de nouveaux brûleurs ou de nouveau système de contrôle multizone ([33] [51] [34]).
- o Les brûleurs jet sont plus efficaces que les brûleurs conventionnels ([74]).
- o Les brûleurs jet (vitesse des gaz chauds > 100 m/s) sont recommandés dans les zones de préchauffage jusqu'à 700°C. Au delà de cette température, les mouvements de convection permettent naturellement l'homogénéité de la température. Les fours peuvent être facilement modifiés avec ce type de brûleur pour sauver de l'énergie. ([74])
- o Des techniques déjà décrites dans la partie "séchage" peuvent aussi s'appliquer ici ([33] [34]).
- o L'air de combustion peut être préchauffé afin de diminuer l'énergie de combustion utilisée pour chauffer l'air ([40]).
- o Réduire les pertes superflues en chauffant le four sur toute sa longueur ([33]).
- o Essayer d'optimiser la courbe de cuisson sur un type de produit et limiter la diversité des produits cuits dans le même four. L'utilisation de petits fours tunnels peut permettre de travailler sur des petites séries supplémentaires ([9]).
- o Améliorer les mouvements d'air au sein du four ([47]).
- o Les supports réfractaires sont là encore très consommateur d'énergie. Des supports moderne très léger et peu dense permettent d'optimiser le poids de ces supports ([48]).
- o Les meilleurs supports pour les articles de tables sont "pas de support" (cf. Roller kiln)
- o Les fours tunnels utilisés peuvent être optimisés par l'utilisation d'un préchauffage d'air, ou si celui-ci est couplé avec le séchoir ([8] [27]).



6 Les produits sanitaires

6.1 Matières premières

- o De nouvelles matières premières tel les Feldspath lithique (figure 9 [53]), ou la colemanite [28], ou fondant siliceux (débris de verre) ([60]) peuvent être utilisées pour faire baisser la température de cuisson jusqu'à 200 °C (Figure 10 [48]).
- o Une composition optimisée à partir d'argiles traditionnelles et de china clay peut faire baisser la température de 50 °C ([55]).
- o Optimiser la granulométrie (notamment des feldspaths) ou ajouter des additifs de frittage peut augmenter la réactivité du mélange et ainsi diminuer la température de cuisson ([62]). Il existe cependant un optimum puisque broyer les feldspaths demande aussi de l'énergie.
- o La composition des produits sanitaires peut être optimisée pour réaliser des cuissons rapides.
- o Une certaine plasticité donnée par l'ajout d'eau est demandée au mélange. Diminuer la quantité d'eau par un meilleur choix des argiles qui donne de la plasticité est un bon moyen de diminuer le SEC lors du séchage ([37]).

6.2 Le Façonnage

- o Le façonnage qui utilise le moins d'eau est le plus intéressant pour économiser de l'énergie au niveau du séchage
- o Le procédé de coulage sous pression évite le séchage des moules en plâtre et permet d'obtenir un tesson à 2% d'humidité sans utilisation de séchoir. Il nécessite tout de même l'utilisation d'énergie électrique.
- o Augmenter la densité de la barbotine en utilisant des dispersants permet d'augmenter la vitesse de prise et donc de diminuer l'énergie utilisée.
- o Un design sophistiqué peut permettre d'éviter aux pièces d'avoir des temps de séchage ou de cuisson trop élevés.
- o Un nombre restreint de produits différents (forme + décors) peut permettre d'optimiser le process de production et la consommation d'énergie.



6.3 Le séchage

Dans l'industrie céramique, le séchage consiste à évaporer l'eau physiquement liée (ou eau colloïdale). Il est bien connu que l'eau est caractérisée par une capacité calorifique élevée (4,2 kJ/kg K) et une très grande chaleur d'évaporation (2500 kJ/kg). Cette énergie est nécessaire afin de chauffer, puis évaporer l'eau contenue dans la pâte céramique. Ce qui est la cause directe d'une consommation énergétique élevée.

- o Un moyen de réduire la consommation d'énergie au niveau du séchage est de coupler le séchoir au four, et ainsi utiliser les calories perdues dans les fumées du four ([7]).
- o Aujourd'hui le couplage séchoir / four est très courant, cependant un travail des deux outils en parallèle est important pour ne pas perdre de calories. Ce qui signifie qu'il ne faudrait pas d'arrêt le week-end sur l'ensemble de la chaîne de production pour optimiser le rendement énergétique ([43]).
- o Un autre moyen d'optimisation est d'ajouter un système de contrôle de ventilation/chauffage dans l'enceinte de séchage afin de contrôler l'atmosphère de séchage en fonction de la quantité d'eau à évaporer ([6]).
- o L'utilisation de petites quantités d'air avec une haute température diminue la perte énergétique due au réchauffement de cet air ([36] [45] [49]).
- o La Figure 2 montre que le coût énergétique de séchage est un compromis entre le coût de l'énergie de chauffe et celui de ventilation. Il existe cependant un optimum qu'il faut rechercher.
- o Pour les produits façonnés par coulage traditionnel, une augmentation des séchoirs micro-onde, en combinaison avec les séchoirs traditionnels, peut permettre de diminuer l'énergie consommée dans l'opération de séchage ([57] [61]).
- o Des temps de séchage plus courts permettent de diminuer la consommation énergétique ([5] [6] [41] [44]).
- o Eviter d'augmenter l'humidité de l'air et favoriser une augmentation de la densité d'enfournement pour augmenter l'humidité de l'enceinte ([9]).
- o Rediriger le flux d'air peut améliorer considérablement le séchage et diminuer sa durée ([9]).



- o Des logiciels de simulation du procédé de séchage peuvent être utilisés pour optimiser le séchage ([36]).
- o Dans le cas d'un couplage entre le four et le séchoir, le niveau d'énergie du four gouverne le niveau d'énergie que reçoit le séchoir (et pas la demande énergétique du séchoir). De ce fait, une basse énergie utilisée par le séchoir cause une grande perte énergétique au niveau du four ([36] [42]).
- o Le système qui collecte l'air chaud de la sortie du four et l'envoi vers le séchoir doit être bien isolé afin de diminuer les pertes thermiques ([47]).
- o Les effets d'un faible séchage (ou d'un mauvais séchage) est visible seulement après la cuisson (rebus); ce qui impacte directement le SEC ([58]).

6.4 Cuisson

La consommation spécifique utilisée pour cuire les différentes céramiques dépend principalement de la température de cuisson. Cette température est déterminée par la composition minéralogique du produit, le procédé de fabrication et les propriétés attendues. La figure 3 montre une augmentation exponentielle de la demande énergétique avec la température.

	Temperature [°C]	SEC [kJ/kg]	Capacity [t/h]
common tunnel kiln	1200-1280	6700-9200	10-50
modern tunnel kiln with fibre and light refractories	1230-1260	4200-6700	10-50
roller kiln	1230-1260	3100-4200	10-30

Tableau 3: SEC de différents types de fours utilisés en secteur sanitaire ([54])



6.4.1 Fours et accessoires

Le Tableau 3 représente le SEC de 3 types de fours que l'on peut rencontrer dans le secteur sanitaire. Le "roller kiln" présente une faible quantité massique de réfractaire, ce qui fait de lui le four le moins gourmand en énergie.

Il existe 2 voies d'amélioration afin de réduire les pertes énergétiques dues à la conception des fours et des wagonnets réfractaires:

1. Isoler du four

"Un des meilleur moyen de sauver de l'énergie est de limiter les fuites" ("However one of the best possibilities to save energy is still to eliminate leakages" Don Denison, Denison Inc. [21]).

2. Diminuer le poids des réfractaires utilisés dans la conception du four et des wagonnets que l'on doit chauffer

- o Les roues des wagonnets devraient être en principe situées à l'extérieur du four ("Wheel flanges of kiln car wheels should in principle be located on the outside" [2]).
- o Les matériaux réfractaires constituant les wagonnets doivent être de bonne qualité isolante et le plus léger possible, tout en étant adaptés aux chocs thermiques existants au sein du four ([2] [3] [20]).
- o De nouveaux supports réfractaires en SiC peuvent être utilisés afin de diminuer la charge de réfractaires ([2]).
- o La référence [2] présente une méthode de calcul afin de déterminer l'épaisseur optimale des wagonnets en fonction de leur composition.



6.4.2 Nature d'énergie et technologie

- o Dans la zone principale de cuisson, une pression de 10-15 Pa est recommandée ([74]).
- o Eviter les défauts d'émaillage afin d'éviter les re-cuisson et ainsi augmenter le SEC ([74]).
- o Augmenter le contrôle de la cuisson avec l'utilisation de nouveaux brûleurs ou de nouveau système de contrôle multizone ([33] [51] [34]).
- o Les brûleurs jet sont plus efficaces que les brûleurs conventionnels ([74]).
- o Les brûleurs jet (vitesse des gaz chauds > 100 m/s) sont recommandés dans les zones de préchauffage jusqu'à 700°C. Au delà de cette température, les mouvements de convection permettent naturellement l'homogénéité de la température. Les fours peuvent être facilement modifiés avec ce type de brûleur pour sauver de l'énergie ([74]).
- o Des techniques déjà décrites dans la partie "séchage" peuvent aussi s'appliquer ici ([33] [34]).
- o L'air de combustion peut être préchauffé afin de diminuer l'énergie de combustion utilisée pour chauffer l'air ([40]).
- o Réduire les pertes superflues en chauffant le four sur toute sa longueur ([33]).
- o Essayer d'optimiser la courbe de cuisson sur un type de produit et limiter la diversité des produits cuits dans le même four. L'utilisation de petits fours tunnels peut permettre de travailler sur des petites séries supplémentaires ([9]).
- o Améliorer les mouvements d'air au sein du four ([47]).
- o Les supports réfractaires sont là encore très consommateur d'énergie. Des supports moderne très léger et peu dense permettent d'optimiser le poids de ces supports ([48]).
- o Les meilleurs supports pour les articles de tables sont "pas de support" (cf. Roller kiln)
- o Les fours tunnels utilisés peuvent être optimisés par l'utilisation d'un préchauffage d'air, ou si celui-ci est couplé avec le séchoir ([8] [27]).



7 Les Carreaux de sol et de murs

7.1 Les matières premières

- o De nouvelles matières premières tel les Feldspath lithique (figure 9 [53]), ou la colemanite [28], ou fondant siliceux (débris de verre) ([60]) peuvent être utilisées pour faire baisser la température de cuisson jusqu'à 200 °C (Figure 10 [48]).
- o Une composition optimisée à partir d'argiles traditionnelles et de china clay peut faire baisser la température de 50 °C ([55]).
- o La composition des carreaux peut être optimisée pour réaliser des cuissons rapides.
- o L'atomisation nécessite une barbotine dont la densité est optimisée (la plus grande possible). Pour cela, l'utilisation de nouveaux dispersants peut permettre de diminuer la quantité d'eau et ainsi réaliser des économies d'énergie.
- o Un broyage continu permet une réduction de 2% d'eau dans la barbotine et augmente sa température de 10 °C (et diminue la consommation électrique) ([72]).

7.2 L'atomisation

Dans l'industrie céramique, le séchage consiste à évaporer l'eau physiquement lié (ou eau colloïdale). Il est bien connu que l'eau est caractérisée par une capacité calorifique élevée (4,2 kJ/kg K) et une très grande chaleur d'évaporation (2500 kJ/kg). Cette énergie est nécessaire afin de chauffer, puis évaporer l'eau contenue dans la pâte céramique. Ce qui est la cause directe d'une consommation énergétique élevée et spécialement pour le procédé d'atomisation où la quantité d'eau peut atteindre 50% de la barbotine.

- o Un des atomiseurs les plus économes en énergie est présenté sur la figure 12 (rendement énergétique de 90% environ). Ce type d'atomiseur présente la particularité de cogénérer de la chaleur ([73]).

- o Une augmentation de la densité des barbotines en utilisant de nouveaux dispersants peut permettre d'économiser de l'énergie au niveau de l'atomiseur ([59]).
- o La consommation énergétique de l'atomiseur diminue pour des granules plus fins.
- o Isoler l'atomiseur thermiquement afin de diminuer les pertes énergétiques.
- o Préchauffer l'air de combustion avec de l'air chaud issu des fours ou de l'atomiseur (Figure 14 [73]).
- o

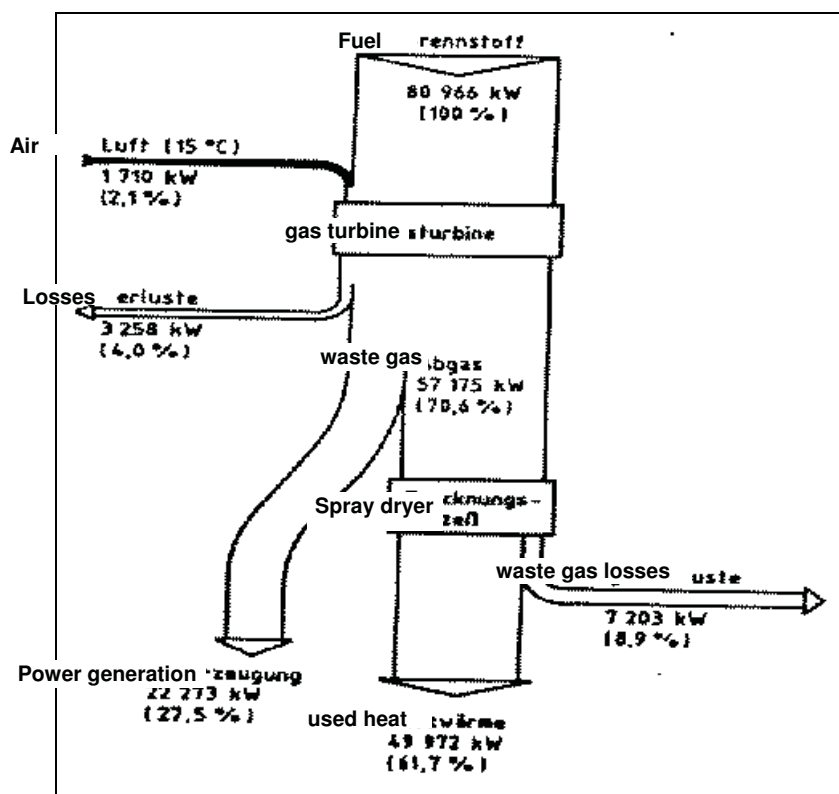


Figure 12: Bilan énergétique d'un atomiseur ([56]).

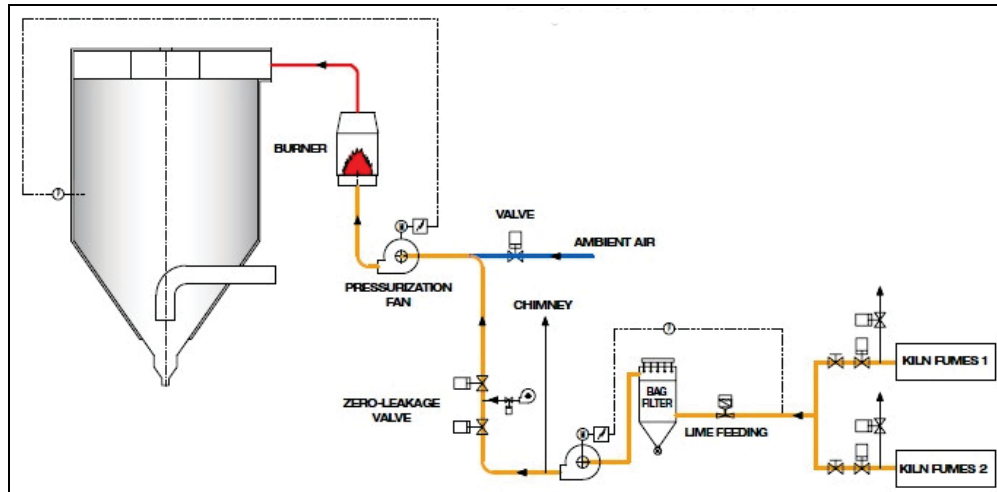


Figure 13: Recyclage des calories des fumées du four vers l'atomiseur (par SACMI) [73]

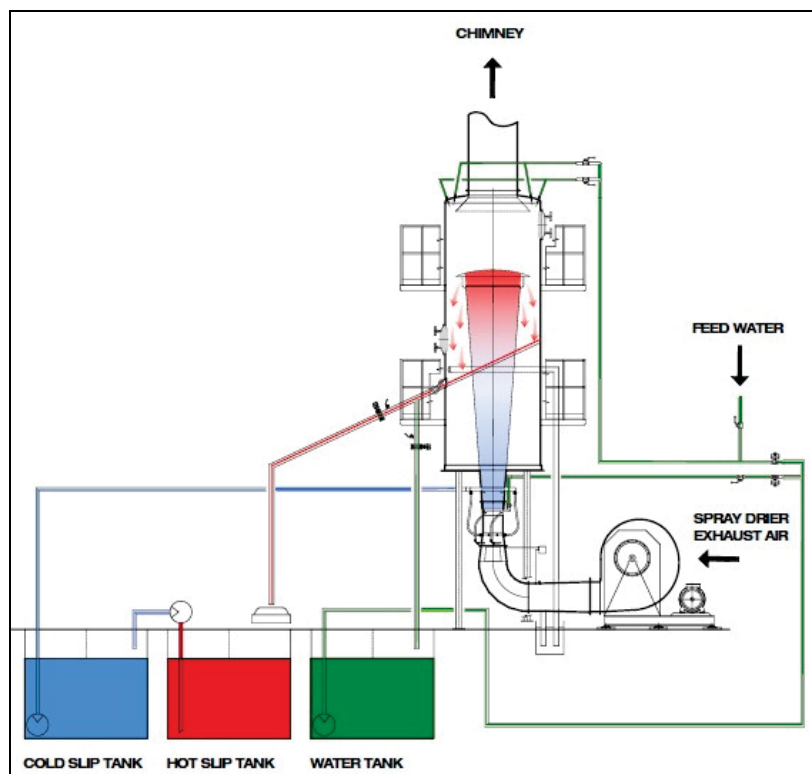


Figure 14: Séparateur pour système d'atomiseur(par SACMI)[73]



7.3 Façonnage / Décoration

- o Une optimisation du planning de production peut permettre de sécher et cuire de plus grands lots de produits, et de sauvegarder de l'énergie
- o Un nombre restreint de produits différents (forme + décors) peut permettre d'optimiser le process de production et la consommation d'énergie.

7.4 La cuisson

La consommation spécifique utilisée pour cuire les différentes céramiques dépend principalement de la température de cuisson. Cette température est déterminée par la composition minéralogique du produit, le procédé de fabrication et les propriétés attendues. La figure 3 montre une augmentation exponentielle de la demande énergétique avec la température.

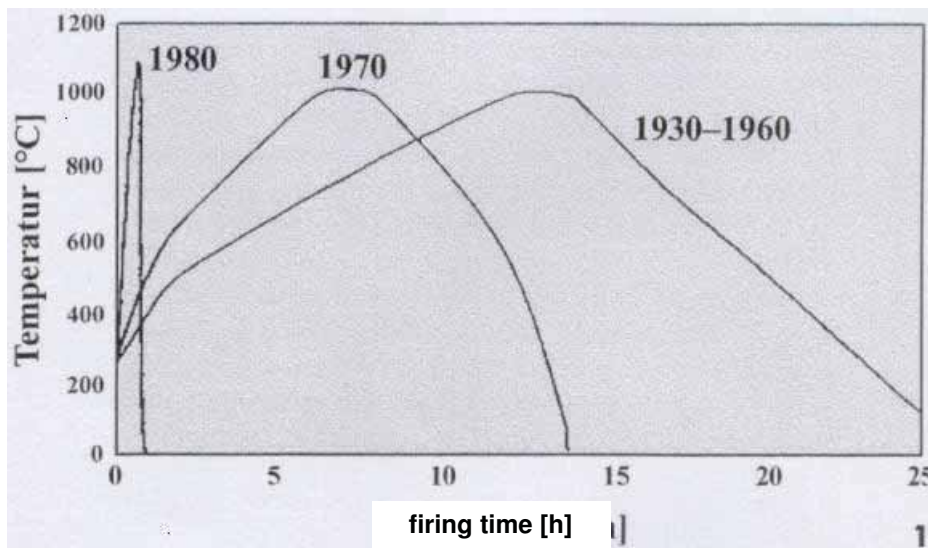


Figure 15: Diminution du temps de cuisson au cours du 20ème siècle ([55])



7.4.1 Fours et accessoires

Le Tableau 3 représente le SEC de 3 types de fours que l'on peut rencontrer dans le secteur sanitaire. Le "roller kiln" présente une faible quantité massique de réfractaire, ce qui fait de lui le four le moins gourmand en énergie. La Figure 13 montre la diminution du temps de cuisson qu'ont subi les carreaux au cours du 20^{ème} siècle. Le développement du four rouleau fut la cause de cette évolution qui a permis de réduire considérablement le SEC.

Il existe 2 voies d'amélioration afin de réduire les pertes énergétiques dues à la conception des fours et des wagonnets réfractaires:

1. Isoler du four

"Un des meilleur moyen de sauver de l'énergie est de limiter les fuites" ("However one of the best possibilities to save energy is still to eliminate leakages" Don Denison, Denison Inc. [21]).

2. Diminuer le poids des réfractaires utilisés dans la conception du four et des wagonnets que l'on doit chauffer

- o Les rouleaux doivent être bien fixés.
- o Les matériaux réfractaires constituant le four doivent être légers et présenter de bonnes caractéristiques isolantes (ex: fibres réfractaires). ([2], [3] et [20])
- o De nouveaux designs de voûtes de fours permettent d'obtenir une homogénéisation des températures ([2]).



7.4.2 Nature d'énergie et technologie

- o Dans la zone principale de cuisson, une pression de 10-15 Pa est recommandée ([74]).
- o Eviter les défauts d'émaillage afin d'éviter les rebuts et ainsi augmenter le SEC ([74]).
- o Augmenter le contrôle de la cuisson avec l'utilisation de nouveaux brûleurs ou de nouveau système de contrôle multizone ([33] [51] [34]).
- o Les brûleurs jet sont plus efficaces que les brûleurs conventionnels ([74]).
- o Les brûleurs jet (vitesse des gaz chauds > 100 m/s) sont recommandés dans les zones de préchauffage jusqu'à 700°C. Au delà de cette température, les mouvements de convection permettent naturellement l'homogénéité de la température. Les fours peuvent être facilement modifiés avec ce type de brûleur pour sauver de l'énergie ([74]).
- o L'air de combustion peut être préchauffé afin de diminuer l'énergie de combustion utilisée pour chauffer l'air ([40] [71]).
- o Essayer d'optimiser la courbe de cuisson sur un type de produit et limiter la diversité des produits cuits dans le même four. L'utilisation de petits fours tunnels peut permettre de travailler sur des petites séries supplémentaires ([9]).
- o Améliorer les mouvements d'air au sein du four ([47]).



8 Références

- /1/ Gres Acueducto, S.A.: The works and the products an unqualified success. ZI Ziegelindustrie International, 2000, 5, 23-30
- /2/ Riedel, R.: The real snag lies in the detail part 1 und 2. ZI Ziegelindustrie International, 2000, 6 und 9, 29-37, 23-32
- /3/ Hesse, V.: The problems of energy consumption of tunnel kiln cars in fast firing tunnel kilns. ZI Ziegelindustrie International, 2001, 3, 13-20
- /4/ Schlosser, M.; New concepts for tile setters and rapid drying in the clay roofing tile industry. ZI Ziegelindustrie International, 2001, 1/2, 25-29
- /5/ Ceramicas Casao: High quality, large capacity and low energy consumption. ZI Ziegelindustrie International, 2001, 7, 24-28
- /6/ Bauhütte Leitl-Werke GmbH: "Eco Brickworks 2000" operating at full capacity. ZI Ziegelindustrie International, 2001, 5, 16-24
- /7/ Vissing, L.: Energy consumption in the Danish brick industry. ZI Ziegelindustrie International, 2003, 3, 21-27
- /8/ Strohmenger, P.: Energy saving shuttle kiln with heat exchanger system. ZI Ziegelindustrie International, 2003, 3, 36-39
- /9/ www.tangram.co.uk: Energy efficiency in ceramics processing. www.tangram.co.uk
- /10/ Jüchter, M.: Modernization of an existing plant an economical alternative. ZI Ziegelindustrie International, 2004, 3, 20-23
- /11/ Mödinger, F.: The utilization of biogas at brickworks. ZI Ziegelindustrie International, 2004, 5, 20-31
- /12/ Bayerische Dachziegelwerke Bogen GmbH: Innovative tunnel kiln for accessories at Bogen roofing tile works. ZI Ziegelindustrie International, 2004, 9, 36-39
- /13/ Brick and Tile of Lawrenceville: A new manufacturing plant for for brick an tile Corporation of Lawrenceville. ZI Ziegelindustrie International, 2004, 10, 22-26
- /14/ Ronchetti, R.: A new type of kiln for rapid firing of clay roof tiles. ZI Ziegelindustrie International, 2004, 11, 38-42
- /15/ Hohlfeld, K.: Reduced kiln furniture weight for H-setters for firing roof tiles. ZI Ziegelindustrie International, 2005, 3, 19-28



- /16/ Mödinger, F.: Options for the use renewable fuels in tunnel kilns. ZI Ziegelindustrie International, 2006, 8, 44-53
- /17/ Aubertot, C.: Petroleum coke - a fuel of the future. ZI Ziegelindustrie International, 2006, 9, 36-40
- /18/ Rieger, W.: Flue gas post-combustion in tunnel kilns with utilization of the released heat of combustion for brick drying and firing. ZI Ziegelindustrie International, 2007, 9, 32-42
- /19/ Dörr, J.: Pore-forming with carboniferous clay blends - without strength loss but with a simultaneous energy saving. ZI Ziegelindustrie International, 2006, 5, 122-129
- /20/ Kettler, H.: Kiln car engineering and energy conservation. ZI Ziegelindustrie International, 2006, 5, 130-133
- /21/ anonymous: "International Brick Plant Operator's Forum" in Clemson (USA) with focus on energy saving. ZI Ziegelindustrie International, 2006, 12, 8-13
- /22/ Mori, G.: Röben clay roofing tile plant in Sroda Slaska - designed for 40 million tiles and 4 million accessories per year . ZI Ziegelindustrie International, 2006, 9, 18-27
- /23/ Rieger, W.: New design of a tunnel kiln structure made of prefabricated lightweight chamotte elements and replacement of the kiln cars by firing pallet circuit. ZI Ziegelindustrie International, 2007, 6/7, 45-55
- /24/ Kettler, H.: BurcoLight - Results from practical operations. ZI Ziegelindustrie International, 2008, 5, 21-28
- /25/ Industrie Pica S.p.A.: A new innovative clay roofing tile works at Portacomara. ZI Ziegelindustrie International, 2008, 8, 46-52
- /26/ Unieco Fornace di Fosdondo: Newly developed dryer for the brick factory Fornace di Fosdondo. ZI Ziegelindustrie International, 2008, 1/2, 51-54
- /27/ Strohmenger, P.: Energy saving Bogie-hearth furnace with heat Exchanger-System, Keramische Zeitschrift, 2003, 5, 350-352
- /28/ Kartal, A.: Untersuchungen zur Erstellung von Hartporzellan bei verringerten Brenntemperaturen. cfi/Ber. DKG, 2004, 5, D20-D22
- /29/ Rambaldi, E.: Glass recycling in porcelain stoneware tiles: Firing behaviour. cfi/Ber. DKG, 2004, 3, E32 - E 36



- /30/ Coudamy, G.: Energy Saving and optimised firing thanks to new technology: "Entropy+". cfi/Ber. DKG, 2003, 9, E53-E60
- /31/ Hansen, H.: Intelligente HAT-Herdwagenöfen. cfi/Ber. DKG, 2006, 11/12, D15-D16
- /32/ Müller-Zell, A.: Niedrig sinternde Fertigmassen für Geschirr. cfi/Ber. DKG , 2008, 11, D15-D16
- /33/ Fischer, M.: Möglichkeiten und Grenzen der Energieeinsparung. cfi/Ber. DKG , 2009, 2, D14-D18
- /34/ Slater, A.: Fire more or less. cfi/Ber. DKG , 2009, 2, E35-E39
- /35/ Junge, K.: Sintering aids for reducing the final firing temperature and energy saving. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 10, 686-687
- /36/ Leisenberg, W.: Ways to efficient use of energy. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 7, 434-440
- /37/ Bohlmann, C.: Reduction of mixing water with additives - a contribution to energy cost saving. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 1/2, 35-43
- /38/ König, R.: The "Laminaris" at the Staudacher Brickworks - a further advance in drying technology. ZI Ziegelindustrie International, 1999, 9, 67-71
- /39/ Masatishi Nakashima, J.: Clay roofing tile production in Japan. ZI Ziegelindustrie International, 1999, 3, 11-17
- /40/ Riedel, R.: Combustion air preheating. ZI Ziegelindustrie International, 1999, 11, 30-39
- /41/ Rapis-Ziegel Schmidt GmbH: New drying technology in the Rapis brickworks. ZI Ziegelindustrie International, 1999, 9, 73-78
- /42/ Vogt, S.: Way to efficient use of energy. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 8, 496-501
- /43/ Junge, K.: Effects of the ban on Sunday working on the energy consumption of heavy clay works. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 6, 327-335
- /44/ König, R.: The Laminaris rapid dryer at the Tonwerk Venus in Schwarzach. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 8, 502-508
- /45/ Denissen, J.A.M.: Energy efficient drying, Part 1: Energy efficiency of various techniques in convective drying. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 8, 509-517
- /46/ Häßler, A.: A new continuous system for drying, firing and transport. ZI Ziegelindustrie International, 1998, 8, 519-521



- /47/ Hobohm, F.: Maßnahmen zur Energieeinsparung. www.keramikinstitut.de, 2008
- /48/ Bartusch, R.: Potential for saving energy in the Ceramic Industry. *Keramische Zeitschrift*, 2002, 1, 6-10
- /49/ Vogt, S.: Fortschrittliche Trocknungstechnik. www.keramikinstitut.de, 2008
- /50/ Jaegermann, Z.: Information Polish table ware branch, personally, 2009, 3.
- /51/ Cartlidge, D.: New techniques in the brick industry of the UK, personally, 2009, 3.
- /52/ Petersminde Teglvaerk A/S, Stenstrup, Fünen, DK: A modern tunnel kiln for the manufacture of a wide assortment of facing bricks. *ZI Ziegelindustrie International*, 2005, 7, 14-17
- /53/ Telle, R.: Senkung der Brenntemperaturen bei Sanitärporzellan durch Lithium-Zugaben, www.keramikinstitut.de, 2007
- /54/ Sladek, R.: Gegenwärtiger Stand der Technik im Brennverfahren für sanitärkeramische Produkte, *Keramische Zeitschrift* 47 (1995) 5
- /55/ Schulle, W.: Entwicklungen und Probleme beim Schnellbrand keramischer Produkte. *Keramische Zeitschrift* 52 (2000) 12
- /56/ Köhler, R.: Personal talks with German tile producers
- /57/ Vouillemet, M.: Le séchage mixte air chaud / micro-ondes des moules en plâtre neufs pour l'industrie du sanitaire. *L'Industrie Céramique & Verrière* 899 , 12/94, 780-784
- /58/ Vouillemet, M.: Le séchage en céramique. *Les Techniques de l'Industrie Minérale* 8, 12/2000, 93-98.
- /59/ Blanc J.J.: The real costs of the dispersion of spray dried bodies. *Ceramic World Review* 70, 01-01/2007, 148-155
- /60/ Blanc J.J.: Valorisation des déchets de verre dans les céramiques vitrifiées. *L'Industrie Céramique & Verrière* 953, 01/2000, 671-676
- /61/ Vouillemet, M.: L'apport des micro-ondes comme source d'énergie en céramique. Réduction des cycles de traitement thermique et optimisation de la qualité des produits. Séchage mixte micro-ondes / air chaud des sanitaires : résultats pilotes et applications possibles.
- /62/ Blanc J.J.: La granularité des poudres en céramique. Finesse et réactivité des feldspaths pour vitreous sanitaire. *Mines & Carrières* 81, 07-08/99, 28-31.



- /63/ J. Fifer : Commercial case for airless drying. Br Ceram Trans 97, N°2, 1998, p80 – 82
- /64/ Cartlidge D : Personal : Infrared burner system that can be controlled in red and blue mode with the heating surface being a Sintered Nit. 2009
- /65/ WRAP : Glass in Bricks and Tiles. (UK website)
- /66/ Cartlidge D : Personal : Flexi flat roller making. 2009
- /67/ Cartlidge D : Personal : Laser decoration for sanitaryware. 2009
- /68/ Airless drying shapes up to Tableware challenge. Global Ceramic Review, N° 2/99, summer 1999
- /69/ Cartlidge D : Use of waste glasses in sanitaryware production. 2009
- /70/ SACMI *Imola S.C* :
http://www.sacmi.com/System/00/01/25/12544/633600971649531250_1.pdf
- /71/ SACMI *Imola S.C* :
http://www.sacmi.com/System/00/01/25/12542/633600970754531250_1.pdf
- /72/ SACMI *Imola S.C* :
http://www.sacmi.com/System/00/01/25/12552/633601079876875000_1.pdf
- /73/ SACMI *Imola S.C* :
http://www.sacmi.com/System/00/01/25/12553/633601080867187500_1.pdf
- /74/ Petzold, J : Personal recommendations about operating ceramic kilns