

Délivrable 2.4 Partie I–Audit énergétique thermique et électrique

Délivrable 2.4 Partie II – Feuille de travail et manuel du bilan énergétique

All figures in this report are either publicly available or estimations from the consultants

Contents

1.	General.....	4
2.	Partie 1 – AUDIT THERMIque ET ELECTRIQUE	4
3.	Partie II – Balance énergétique thermique.....	6
3.1	Bilan thermique du four	8
3.1.1	Feuille de calcul des flux de gaz et de combustible du four.....	8
3.1.2	Feuille de calcul des flux de matière et d’air du four	13
3.1.3	Feuille de calcul “Pertes par rayonnement et par convection”	19
3.1.4	Résumé du four	21
3.2	Systèmes de broyage	25
3.2.1	VRM (Broyeurs verticaux a rouleaux).....	25
3.2.2	Broyeur à boulet (décharge en bout)	30
3.2.3	Broyeur à boulets à balayage d’air	35
	Figure 1: Les installations cimentières de la République du Congo– État Opérationnel d’Avril 2022 (date de l’audit du (des) site(s)).....	5
	Figure 2: Fichier de calcul de la balance thermique – structure du fichier.....	6
	Figure 3: Capture d’écran de la section “générale”.....	8
	Figure 4: Capture d’écran de la section “combustibles utilisés”	9
	Figure 5: Capture d’écran de la section “Flux de gaz de four”	12
	Figure 6: Capture d’écran de la section “Composition des gaz à la sortie du préchauffeur”	12
	Figure 7: Capture d’écran de la section “Conditions ambiantes de l’usine”	13
	Figure 8: Capture d’écran de la section “Alimentation du four”	13
	Figure 9: Capture d’écran de la section “Gaz de sortie et émission de poussière du préchauffeur”	14
	Figure 10: Capture d’écran de la section “Gaz de sortie du calcinateur”	15
	Figure 11: section Capture d’écran “Gaz d’entrée de four”	15
	Figure 12: Capture d’écran de la section “Flux d’airs du bruleur principal et du bruleur du calcinateur”	15
	Figure 13: section Capture d’écran de la section “Clinker”	16
	Figure 14: Capture d’écran de la section “Refroidisseur clinker”	18
	Figure 15: Capture d’écran “Entrées d’air parasite”	19
	Figure 16: Capture d’écran de la section « Pertes par rayonnement et par convection	19
	Figure 17: Capture d’écran de la section “Données de base”	20
	Figure 18: Capture d’écran de la section “Bilan massique du four”	22
	Figure 19: d’écran de la section “Bilan massique du refroidisseur”	22

Figure 20: Capture d'écran de la section équilibre thermique du refroidisseur	23
Figure 21: Capture d'écran de la section "Equilibre thermique du four"	24
Figure 22: Capture d'écran de la section "Matières premières vers le broyeur"	26
Figure 23: Capture d'écran de la section "Système de broyage"	27
Figure 24: Capture d'écran de la section "Flux de gaz du système du four"	28
Figure 25: Capture d'écran de la section "Flux de gaz dans le système de broyage"	29
Figure 26: Capture d'écran de la section "Bilan thermique des broyeurs"	29
Figure 27: Capture d'écran de la section "Matières premières vers le broyeur"	30
Figure 28: Capture d'écran de la section "Système de broyage"	32
Figure 29: d'écran de la section "flux de gaz du système de four"	33
Figure 30: Capture d'écran de la section "Flux de gaz dans le système de broyage"	34
Figure 31: Capture d'écran de la section "Bilan thermique des broyeurs"	35
Figure 32: Capture d'écran de la section "Matières premières vers le broyeur"	36
Figure 33: Capture d'écran de la section "Système de broyage"	37
Figure 34: Capture d'écran de la section "Flux de gaz du système de four"	38
Figure 35: Capture d'écran de la section "Flux de gaz dans le système de broyage"	39
Figure 36: Capture d'écran de la section "Bilan thermique des broyeurs"	40

Délivrable 2.4 Partie I (Audit énergétique d'usines présélectionnées en République du Congo,

Délivrable 2.4 Partie II (Manuel et feuille de travail du bilan énergétique)

1. GENERAL

Le livrable 2.4 " Audit énergétique en République du Congo se compose de deux parties comme suit :

Partie I - Audit énergétique - Audit énergétique thermique et électrique réalisé sur la base des données énergétiques opérationnelles existantes pour les installations de ciment en République du Congo.

Partie II - Manuel de bilan d'énergie thermique (bilan thermique) comprenant des feuilles de travail, fournissant un bilan thermique détaillé pour un système de four de précalcination combiné à divers systèmes de broyage tels qu'observés en République du Congo.

2. PARTIE 1 – AUDIT THERMIQUE ET ELECTRIQUE

La partie I de l'audit énergétique thermique et électrique fournit un audit énergétique électrique et thermique des installations de production de ciment sélectionnées en République

du Congo au moment du processus d'audit énergétique et des données correspondantes disponibles.

Les installations de production entièrement opérationnelles, avec un accès aux paramètres techniques et de processus détaillés (en direct) sont nécessaires pour réaliser un bilan énergétique chronologique (instantané) des installations de production respectives. Au moment de l'audit opérationnel du site, l'état opérationnel suivant des installations a été observé :

Nom du Groupe	Non de la filiale	Plant	Location	Activité	Status opérationnel April 2022
Ciments de l'Afrique (CIMAF) (Morocco)	CIMAF Congo	Point- Noire	Hinda	Station de broyage	Arrêté & décomissionné
Dangote Cement Plc (Dangcem)	Dangote Industries Congo S.A.	Mfila	Bouasnsa	Usine intégrale	Arrêté (pb de demande)
Diamond Cement	Diamond Cement	Mindouli	Mindouli	Usine intégrale	Failite
FORSPAK China International Congo	FORSPAK China International Congo	Dolisie	Dolisie	Usine intégrale	En activité (Données non communiquées)
Société Nouvelle des Ciments du Congo (SONOCC)	Société Nouvelle des Ciments du Congo (SONOCC)	Loutété	Loutété	Usine intégrale	En activité (Données non communiquées)

Figure 1: Les installations cimentières de la République du Congo– État Opérationnel d'Avril 2022 (date de l'audit du (des) site(s))

Les installations de production intégrée de la République du Congo sont toutes situées dans le même environnement général et dans des formations géologiques similaires. Ainsi, toutes les installations de production intégrée utilisent une matière première principale similaire, à savoir le calcaire. Les quatre unités de production intégrée utilisent toutes du charbon importé comme combustible principal, charbon qui est, à l'heure actuelle, importé d'Afrique du Sud.

Compte tenu du peu de données opérationnelles disponibles, un audit énergétique préliminaire a été réalisé pour une installation "type" de production de clinker de 3000 tpd. Les données de l'installation type sont basées sur une technologie de pointe utilisant un système de four de précalcination à 5 étages et des broyeurs verticaux pour le broyage des matières premières, du charbon et du ciment. La technologie de traitement du ciment n'a, en général, pas varié de manière significative au cours des dernières décennies, et les données opérationnelles typiques prises en compte dans l'audit énergétique fourni sont facilement disponibles pour divers emplacements géographiques, y compris le bassin du Congo.

Bien que les entrées et sorties typiques de l'audit énergétique soient fournies pour une installation de production typique de 3000 tpd, un audit énergétique peut être généré pour chacune des installations de production de la station intégrée et de la station de broyage sur la base des données opérationnelles et mesurées. Le manuel de consommation spécifique d'énergie thermique (STEC) et de consommation spécifique d'énergie électrique (SEEC) est disponible dans le cadre des livrables 3.1 & 3.2 de l'engagement ONUDI / CTCN pour la République du Congo.

3. PARTIE II – BALANCE ÉNERGÉTIQUE THERMIQUE

La partie II du bilan thermique est fournie comme un outil de travail qui peut être utilisé pour surveiller et optimiser l'énergie principale, et le conducteur de CO₂ du combustible thermique, des installations de production de ciment dans la République du Congo pour surveiller et optimiser les opérations de processus.

Le modèle de bilan thermique calcule la quantité de gaz de procédé générée dans les systèmes de four et les gaz de procédé nécessaires au séchage dans les différents systèmes de broyage.

Le fichier de calcul / outil fourni est complexe et généralement utilisé par les experts en ingénierie opérationnelle et de processus dans les installations de production.

À titre d'"exemple", les données relatives au processus associées à une installation de production "typique" de 3000 tpd-clinker. Les données relatives au procédé ont été basées sur une technologie de pointe utilisant un système de four de précalcination à 5 étages et des broyeurs verticaux pour le broyage des matières premières, du charbon et du ciment. La technologie de traitement du ciment n'a, en général, pas varié de manière significative au cours des dernières décennies, et les données opérationnelles typiques prises en compte dans le modèle de bilan thermique fourni sont facilement disponibles pour divers emplacements géographiques, y compris le bassin du Congo.

Le modèle de bilan thermique (fichier) est composé de plusieurs feuilles de calcul (dans un seul fichier). La structure générale, y compris les exigences d'entrée et de sortie du classeur de bilan thermique, est la suivante :

Feuilles de calcul	Type	Description
<u>Feuilles de calcul du four</u>		
Combustible four & flux de gaz	Entrées	Entrée des propriétés du combustible sur la base d'une analyse élémentaire du combustible et calcul du volume de gaz produit pendant la combustion et la fabrication du clinker
Matières du four & flux de gaz	Entrées	Saisie des flux de matériaux dans le système de four et des propriétés des matériaux
Rayonnement & convection du four	Entrées	Saisie de la température de surface des différentes cuves et des conditions ambiantes dominantes pour le calcul des pertes par rayonnement et convection du système du four
Résumé du four	Sorties	Résumé du bilan thermique de la matière, de l'air de refroidissement, du refroidisseur et du four et indication du débit de gaz disponible du four pour le séchage dans les différents systèmes du broyeur
<u>Feuilles de calcul broyeurs (s)</u>		
Broyeur matière (VRM) /	Entrées & Sorties	Pour plusieurs usines, par exemple, les feuilles de calcul VRM doivent être dupliquées pour l'usine Feuille d'entrée et d'itération, Sortie sous §5 Bilan thermique du broyeur
Broyeur charbon (VRM) /	Entrées & Sorties	Feuille d'entrée et d'itération, Sortie sous §5 Bilan thermique du broyeur
Broyeur Ciment (VRM) /	Entrées & Sorties	Feuille d'entrée et d'itération, Sortie sous §5 Bilan thermique du broyeur
Broyeur à boulet (déc. en bout) /	Entrées & Sorties	Feuille d'entrée et d'itération, Sortie sous §5 Bilan thermique du broyeur
Broyeur à boulet (air balayé) /	Entrées & Sorties	Feuille d'entrée et d'itération, Sortie sous §5 Bilan thermique du broyeur

Figure 2: Fichier de calcul de la balance thermique – structure du fichier

Pour le four, quatre feuilles de travail sont présentées comme suit :

- **Flux de combustible et de gaz du four** - les propriétés du combustible basées sur une analyse élémentaire du combustible sont renseignées et le volume de gaz produit pendant la combustion et la fabrication du clinker est calculé.
- **Flux de matériaux et d'air dans le four** - dans cette feuille de travail, les flux de matériaux dans le système du four et les propriétés des matériaux sont renseignés et calculés.
- **Rayonnement et convection du four** - les pertes par rayonnement et convection du système de four sont calculées sur la base de la température de surface des différentes viroles et des conditions ambiantes.
- **Résumé du four** - dans cette feuille de calcul, un résumé du bilan thermique du matériau, de l'air de refroidissement, du refroidisseur et du four est affiché et la quantité de gaz disponible du four pour le séchage dans les différents systèmes du broyeur est indiquée.

Pour les broyeurs (systèmes de broyage), une fiche de travail pour chacun des types de systèmes de broyage les plus courants est disponible. Ces systèmes de broyage reflètent généralement ceux de la République du Congo et sont résumés comme suit :

- **Systèmes de broyeurs à rouleaux verticaux (VRM)** - similaires aux solutions technologiques de la cimenterie Dangote en République du Congo.
- **Systèmes de broyeurs à boulets à décharge en bout** - similaires à la solution technologique de la station de broyage CIMAF en République du Congo.
- **Systèmes de broyeurs à boulets à balayage par air - similaires aux solutions technologiques de SONOCC, Forspak et Diamond en République du Congo**

Si plusieurs systèmes de broyage du même type sont connectés au four, la feuille de travail correspondante doit être dupliquée. Si un certain système de broyage n'est pas en place, la feuille de travail correspondante peut être supprimée.

Toutes les entrées requises doivent être remplies dans les cellules marquées en **BLEU**. Les cellules **VERTES** sont des données calculées et ne peuvent pas être écrasées. Les cellules en italique contiennent des valeurs de processus qui sont calculées dans une autre feuille de calcul ou dans une autre cellule et qui n'ont qu'un caractère informatif.

Les entrées ou sorties des flux massiques et gazeux sont basées sur des valeurs horaires moyennes. Ainsi, toutes les mesures du bilan thermique, qui proviennent généralement d'une campagne de mesure de 12 à 24 heures, doivent être converties en une base horaire moyenne.

Lors de l'utilisation des feuilles de calcul du bilan thermique, il est recommandé de sauvegarder régulièrement le fichier du bilan thermique afin d'éviter toute perte de données.

3.1 Bilan thermique du four

3.1.1 Feuille de calcul des flux de gaz et de combustible du four

3.1.1.1 General

Les taux de production (taux de production horaire et journalier moyen) sont importés de la feuille de calcul "Flux de matière et d'air du four" et la consommation de chaleur spécifique calculée ainsi que la répartition du combustible dans le système du four sont indiquées. Le taux de production horaire est basé sur le taux de production horaire moyen de clinker mesuré pendant la période de mesure considérée. Si une pesée du clinker n'a pas été effectuée, un nombre raisonnable pour le taux de production de clinker doit être mis à la place, en équilibrant l'erreur du bilan massique à zéro dans la feuille de calcul " Flux de matière et d'air du four ".

1	general						
	Taux de production clinker		3000.0	t/d			
			125.0	t/h			
					répartition combustible		
					bruteur princip	brut. Sec.	calcinateur
	Consommation thermique		2'921	kJ/kg cli	40.0%	0.0%	60.0%

Figure 3: Capture d'écran de la section "générale"

3.1.1.2 Combustibles utilisés

Le type de combustible est sélectionné dans le menu déroulant des cellules D12 à H12. En fonction de la sélection, le pouvoir calorifique spécifique c_p des combustibles nobles est calculé. Si des combustibles alternatifs sont utilisés, une valeur calorifique spécifique c_p de 2,5 kJ / kg °C est définie par défaut, ce qui est une bonne approximation, si les combustibles alternatifs ont une humidité typique de 15 à 25 %. Toutefois, si le taux d'humidité des combustibles de substitution est nettement supérieur ou inférieur ou si la valeur thermique spécifique réelle c_p du combustible de substitution est connue, la valeur thermique spécifique c_p peut être remplacée par une valeur supérieure ou inférieure.

fuels used		charbon bitumineux	petcoke	AF 1	AF 2	AF 3
Type de combustible						
analyse ultime (waf)	C (% masse)	83.3%	91.0%	59.8%	57.8%	72.0%
(eau & cendre libre)	H (% masse)	4.2%	4.0%	9.9%	7.8%	22.0%
	N (% masse)	1.9%	2.0%	1.1%	1.4%	1.0%
	S (% masse)	0.7%	2.1%	0.1%	0.2%	0.1%
	O (% masse)	9.8%	0.8%	29.1%	32.8%	4.9%
	total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
contenu cendre (af)	as fired (% masse)	16.4%	1.5%	5.0%	1.0%	0.0%
humidité (af)	as fired (% masse)	7.1%	1.2%	1.0%	0.5%	0.2%
analyse ultime	C (% masse)	63.8%	88.6%	56.2%	56.9%	71.9%
af (brulé, incl. cendre & humidité)	H (% masse)	3.2%	3.9%	9.3%	7.7%	22.0%
	N (% masse)	1.5%	2.0%	1.0%	1.4%	1.0%
	S (% masse)	0.5%	2.1%	0.1%	0.2%	0.1%
	O (% masse)	7.5%	0.8%	27.4%	32.3%	4.9%
taux alimentation four	t/h @ main burner	6.0				
taux alimentation entrée du four	t/h @ sec. firing	0.0				
taux alimentation calcinateur	t/h @ calciner	9.0				
total		15	0.0	0.0	0.0	0.0
LHV combustible	brulé (kJ/kg)	24'338	32'128	24'000	22'000	36'500
temperature combustible	brulé (°C)	45	41	25	25	20
cp fuel (cell F40:H40 can be overwritten)	brulé (kJ/kg°C)	1.15	0.98	2.50	2.50	2.50
chaleur sensible du combustible	brulé (MJ/h)	431				
chaleur sensible du combustible	brulé (kJ/kg cli)	3.5				
valeur calorifique du combustible	brulé (MJ/h)	365				
valeur calorifique du combustible	brulé (kJ/kg cli)	2920.5				
combustion stoichiometric de l'air	[Nm ³ /kJ]	0.259	0.278	0.273	0.274	0.329
combustion stoichiometric du gaz humide	[Nm ³ wet/kJ]	0.310	0.316	0.342	0.346	0.392
combustion stoichiometric du gaz sec	[Nm ³ dry/kJ]	0.284	0.294	0.290	0.299	0.316

Figure 4: Capture d'écran de la section "combustibles utilisés"

Les propriétés chimiques des combustibles sont introduites sur la base d'une analyse ultime (ou élémentaire) des combustibles utilisés dans le système du four. Cette analyse élémentaire est généralement donnée sans eau ni cendres (waf) et obtenue par le fournisseur du combustible. Cette analyse élémentaire permet de calculer l'air de combustion nécessaire ainsi que les gaz de combustion produits.

Pour les combustibles courants, une marge typique pour les principaux éléments de l'analyse élémentaire est donnée dans le tableau suivant. La somme des 5 éléments principaux doit être proche ou égale à 100 %, puisque la mesure en laboratoire ne prend en compte que les 5 éléments principaux (détermination faite avec un analyseur CHNSO).

	Lignite	Charb. bitumineux	Anthracite	Petcoke	Heavy fuel oil	Gaz naturel
Combustion air stoichiometric (Nm ₃ /kJ)	0.26 – 0.27	0.26 – 0.27	0.27 – 0.28	0.27 – 0.28	0.26 – 0.27	0.27 – 0.28
Combustion gaz stoichiometric humide (Nm ₃ /kJ)	0.29 – 0.30	0.29 – 0.30	0.30 – 0.31	0.30 – 0.31	0.28 – 0.29	0.30 – 0.31

Table 1: Analyse élémentaire typique des combustibles nobles standards – hors eau et cendre (waf)

La teneur en carbone des combustibles solides dépend généralement de la teneur en matières volatiles. Plus la teneur en matières volatiles du charbon est faible, plus la teneur en carbone (ainsi que le pouvoir calorifique) est élevée et plus la teneur en hydrogène et en oxygène est faible.

En outre, il faut tenir compte du pouvoir calorifique inférieur (PCI) ainsi que de la teneur en cendres et en humidité du combustible tel qu'il est brûlé (af). Le PCI, qui est calculé à partir du pouvoir calorifique supérieur (PCS) mesuré en laboratoire, dépend non seulement du pouvoir calorifique du charbon brut, mais aussi du niveau de transformation du combustible. Par conséquent, la teneur en cendres des combustibles solides ne fait pas seulement référence aux cendres du combustible brut, mais inclut également la poussière du système d'allumage, qui provient des gaz chauds utilisés pour le séchage dans l'usine. La teneur en humidité se réfère au charbon fin tel que cuit (af).

L'augmentation de la teneur en cendres et l'exhaustivité du séchage dans le broyeur à charbon peuvent avoir un impact significatif sur le pouvoir calorifique final.

Les plages typiques des combustibles nobles courants sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

	Lignite	Charbon sub bitumineux	Charbon bitumineux et thermique	Anthracite	Petcoke	Fuel lourd	Gaz naturel
NCV (kJ/kg) (or kJ/Nm ₃):	15'000 – 22'500	21'000 – 25'000	24'500 – 30'000	28'000 – 32'000	31'000 – 34'000	41'000 – 42'000	33'000 – 36'000
moisture af (%):	5 – 10	3 – 8	0.5 – 2.0	0.5 – 1.0	0 – 1.0	0	0 - 1
ash (%):	5 – 20	5 - 15	3 - 10	2 - 10	2 – 4	0 - 0.15	0
volatiles (%):	> 40	30 – 40	10 – 30	< 10	< 10	-	-

Table 2: Plage typique de Valeur calorifique nette (NCV), humidité et cendre (et volatiles) de combustibles nobles standards

Si les propriétés des combustibles sont correctement indiquées, on obtient le volume¹ spécifique d'air de combustion et le volume² spécifique de gaz de combustion suivants.

	Lignite	Charbon bitumineux	Anthracite	Petcoke	Fuel lourd	Gaz naturel
stoichiometric combustion air (Nm ₃ /kJ)	0.26 – 0.27	0.26 – 0.27	0.27 – 0.28	0.27 – 0.28	0.26 – 0.27	0.27 – 0.28
stoichiometric combustion gaz wet (Nm ₃ /kJ)	0.29 – 0.30	0.29 – 0.30	0.30 – 0.31	0.30 – 0.31	0.28 – 0.29	0.30 – 0.31

Table 3: Plage typique des volumes d'air de combustion stœchiométrique requis et des volumes de gaz de combustion stœchiométrique produits pour les combustibles nobles courants (tels qu'ils sont brûlés).

Si des combustibles alternatifs sont utilisés dans le système du four, on peut s'attendre à des quantités légèrement plus élevées d'air de combustion nécessaire et de gaz de combustion produit, ce qui est particulièrement vrai si les combustibles alternatifs (tels qu'ils sont cuits) ont une forte teneur en humidité.

Le taux de combustible utilisé dans les différents sites est déterminé à partir de la lecture du compteur du système de dosage. Les différents emplacements sont les suivants :

- Cuisson principale (brûleur principal du four rotatif)
- Cuisson secondaire (brûleur situé dans la partie statique de la zone d'entrée du four d'un four de calcination, qui utilise l'excès d'air restant du four rotatif pour la combustion).
- Précalcinateur (brûleur des fours à calcination, qui utilise principalement l'air tertiaire du refroidisseur pour la combustion).

Tous les débits de combustibles solides et liquides sont présentés sous forme de débit massique (c'est-à-dire en tonnes par heure), tandis que le gaz naturel est présenté sous forme de débit volumique normalisé (c'est-à-dire en mètres cubes normaux par heure).

3.1.1.3 Flux de gaz dans le système de four

Sur la base des propriétés du combustible, de la composition chimique du clinker, de l'humidité de l'alimentation du four, ainsi que des conditions du procédé (taux d'excès d'air, air parasite, etc.), on calcule les débits de gaz horaires normalisés ainsi que le débit de gaz spécifique, sur la base du taux de production de clinker mesuré ou utilisé.

¹ le volume d'air spécifique de combustion est la quantité d'air nécessaire à la combustion stœchiométrique de 1 kJ d'énergie calorifique

² le volume spécifique de gaz de combustion est la quantité de gaz produite par la combustion stœchiométrique de 1 kJ d'énergie calorifique.

3 gas flows in kiln system						
combustion stoichiometrique de l'air du four	37'769	Nm3/h	0.302	Nm3/kg cli		
combustion stoichiometrique gaz de four humide	39'496	Nm3/h	0.316	Nm3/kg cli		
combustion stoichiometrique gaz de four sec	36'819	Nm3/h	0.295	Nm3/kg cli		
gas from calcination in kiln	2'853	Nm3/h	0.023	Nm3/kg cli		
excès d'air du four	10'774	Nm3/h	0.086	Nm3/kg cli		
air primaire et de transfert du bruleur principal	5'012	Nm3/h	0.040	Nm3/kg cli		
air parasite de a sortie du four et de la hotte	881	Nm3/h	0.007	Nm3/kg cli		
air secondaire	42'650	Nm3/h	0.341	Nm3/kg cli		
combustion stoichiometrique air SF&PC	56'653	Nm3/h	0.453	Nm3/kg cli		
combustion stoichiometrique gaz SF & PC humide	59'244	Nm3/h	0.474	Nm3/kg cli		
combustion stoichiometrique gaz SF & PC sec	55'228	Nm3/h	0.442	Nm3/kg cli		
gaz de la calcination dans four et calcinateur (100 %)	34'070	Nm3/h	0.273	Nm3/kg cli		
excès d'air du calcinateur	13'275	Nm3/h	0.106	Nm3/kg cli		
air primaire et de transfert du calcinateur	1'564	Nm3/h	0.013	Nm3/kg cli		
air parasite de l'entrée du fur et du calcinateur	2'642	Nm3/h	0.021	Nm3/kg cli		
air tertiaire	54'948	Nm3/h	0.440	Nm3/kg cli		
gaz humide après calcinateur	146'085	Nm3/h	1.169	Nm3/kg cli		
gaz sec après calcinateur	139'393	Nm3/h	1.115	Nm3/kg cli		
air parasite dans le préchauffeur	16'319	Nm3/h	0.131	Nm3/kg cli		
gaz humide après le préchauffeur	164'511	Nm3/h	1.316	Nm3/kg cli		
gaz sec après le préchauffeur	155'711	Nm3/h	1.246	Nm3/kg cli		

Figure 5: Capture d'écran de la section "Flux de gaz de four"

3.1.1.4 Composition des gaz à la sortie du préchauffeur

Dans cette section, les flux de gaz et la composition des gaz du préchauffeur à la sortie du préchauffeur sont affichés. La capacité thermique spécifique des gaz d'échappement du préchauffeur est calculée sur la base de cette composition gazeuse.

4 preheater exit gas composition						
PC temperature de sortie	320	°C				
CO2	52'031	Nm3/h	1.898	kJ/kg°C	31.7%	
CO	0	Nm3/h	1.321	kJ/kg°C	0.0%	
H2O	8'800	Nm3/h	1.550	kJ/kg°C	5.4%	
O2	6'228	Nm3/h	1.365	kJ/kg°C	3.8%	
N2	97'035	Nm3/h	1.311	kJ/kg°C	59.1%	
total gaz humide	164'095	Nm3/h	1.512	kJ/kg°C	100.0%	
total gaz sec	155'295	Nm3/h	1.510	kJ/kg°C	94.6%	
point de condensation des gaz de sortie du préchauffeur @ pression ambiante	34	°C				

Figure 6: Capture d'écran de la section "Composition des gaz à la sortie du préchauffeur"

3.1.2 Feuille de calcul des flux de matière et d'air du four

3.1.2.1 Conditions ambiantes de l'usine

Les conditions ambiantes prévalant dans l'usine lors des mesures sur le terrain du bilan thermique sont indiquées dans cette section. Ces conditions ambiantes sont également utilisées par les feuilles de calcul de l'usine. Donc dans tous les cas la section 1 doit être remplie correctement, même si aucun bilan thermique du four n'a été effectué. Si la pression ambiante réelle est inconnue, il faut utiliser la pression ambiante calculée en fonction de l'altitude de l'usine. Si l'humidité relative de l'air réelle est inconnue, une hypothèse raisonnable doit être faite sur la base d'une humidité relative de l'air typique pour la période considérée.

1 Conditions ambiantes de l'usine						
Altitude de l'usine	330	m (asl)	Température ambiante	25	°C	
Pression ambiante (calculée)	974	mbar	Humidité relative	85	%	
Pression ambiante (réelle et utilisée)	974	mbar	Humidité absolue	0.028	g H2O / Nm3 air	

Figure 7: Capture d'écran de la section "Conditions ambiantes de l'usine"

3.1.2.2 Alimentation du four

Dans cette section, les principales propriétés de l'alimentation du four telles qu'elles sont introduites au sommet du préchauffeur sont présentées.

La teneur totale en carbone organique fait référence au carbone organique introduit par les matières premières. Si une analyse en laboratoire de la teneur en carbone organique de la charge du four n'est pas disponible ou si les conditions du processus (par exemple, augmentation de la teneur en CO dans les étages intermédiaires du cyclone, profil de température décalé sur les étages du cyclone) n'indiquent pas une quantité significative de carbone brûlable dans la charge du four, la teneur en carbone est laissée vide ou mise à zéro.

Avec le débit massique de clinker mesuré après le refroidisseur de clinker, on calcule le facteur alimentation du four / clinker, qui est généralement compris entre 1,61 et 1,65, en fonction principalement de la perte de poussière du préchauffeur et de la quantité de cendres de combustible introduites.

2 Alimentation du four						
Taux d'alimentation du four	203.0	t/h	Contenu carbone organique	0.05	%	
Température de l'alimentation four	75	°C	LHV du carbone organique	33'000	kJ/kg	
Humidité de l'alimentation four	0.65	%				
LOI	35.50	%	Alimentation four / facteur clinker	1.62	-	

Figure 8: Capture d'écran de la section "Alimentation du four"

3.1.2.3 Gaz de sortie et émission de poussière du préchauffeur

Cette section présente l'analyse des gaz du préchauffeur (oxygène et CO) ainsi que les propriétés de la poussière du préchauffeur et la perte de poussière.

La composition de la poussière du préchauffeur étant très souvent chimiquement assez différente de celle de l'alimentation du four, la perte au feu (LOI) de la poussière du préchauffeur est particulièrement importante. Bien que cette poussière de préchauffage, qui est normalement composée de la poussière de la tour de conditionnement des gaz et de la poussière des filtres à manche principale en fonctionnement direct (sans tenir compte d'un broyeur en fonctionnement et en utilisant le gaz de préchauffage), puisse présenter une certaine humidité (évaporation insuffisante de l'eau injectée dans le trajet des gaz), la perte au feu se réfère à un échantillon préséché.

La perte de poussière typique d'un préchauffeur est de l'ordre de 6 à 8 %, en fonction de la conception du cyclone du préchauffeur, des vitesses de gaz dominantes et de la finesse de la farine brute.

La température de sortie du préchauffeur est la température moyenne pondérée des gaz de tous les étages supérieurs du cyclone à la sortie du cyclone.

3 Gaz de sortie du préchauffeur et perte de poussière au préchauffeur					
PH température de sortie	320	°C	PH sortie du contenu oxygène	4.00	%
PH pertes de poussières (opération directe)	13.0	t/h	PH sortie du contenu CO	0.02	%
PH pertes poussières	6.4	%	LOI	36.00	%

Figure 9: Capture d'écran de la section "Gaz de sortie et émission de poussière du préchauffeur"

3.1.2.4 Gaz de sortie du calcinateur

Si la composition du gaz à la sortie du calcinateur est connue et mesurée, le niveau d'oxygène et de CO doit être introduit et, sur la base de cette composition, le débit d'air tertiaire et l'air parasite du préchauffeur sont calculés.

Si la composition du gaz à la sortie du calcinateur n'est pas connue, des hypothèses objectives doivent être faites (basées sur le profil de pression et la situation d'air parasite du préchauffeur) et des valeurs estimées doivent être introduites pour permettre un calcul correct des flux de gaz. Ces hypothèses considèrent typiquement une augmentation de la teneur en oxygène sur le préchauffeur due à l'air parasite de 0,2 à 0,4 % d'O₂ par étage de cyclone (c'est-à-dire que si seule la composition du gaz à la sortie du préchauffeur est connue, la teneur en oxygène à la sortie du calcinateur serait inférieure de 1,0 à 2,0 % d'O₂ dans un système de préchauffage à 5 étages).

4 Gaz à la sortie du calcinateur									
Contenu oxygène à la sortie du calcinateur			2.00	%	Contenu de CO à la sortie du calcinateur			0.00	%

Figure 10: Capture d'écran de la section "Gaz de sortie du calcinateur"

3.1.2.5 Gaz d'entrée du four

La composition du gaz à l'entrée du four est nécessaire pour permettre le calcul du débit de gaz du four et de l'air secondaire plus froid.

Si la composition du gaz à l'entrée du four n'est pas connue, des hypothèses objectives doivent être faites et des valeurs estimées doivent être introduites pour permettre le calcul du débit de gaz du four.

Sur la base de la perte d'allumage de la farine chaude, on calcule la quantité de gaz de calcination produite dans le four rotatif et le degré de calcination. Pour les fours de calcination normaux, le degré de calcination typique de la farine chaude est compris entre 90 % et 95 %.

5 Gaz à l'entrée du four									
Contenu oxygène à l'entrée du four			4.50	%	LOI du cru chaud			3.00	%
Contenu de CO à l'entrée du four			0.03	%	Degré de calcination du cru			91.6	%

Figure 11: section Capture d'écran "Gaz d'entrée de four"

3.1.2.6 Flux d'airs du bruleur principal et du bruleur du calcinateur

Les propriétés de l'air primaire et de l'air de transfert font référence aux flux d'air après le ventilateur d'air primaire ou la soufflerie d'air primaire / air de transfert (c'est-à-dire tel qu'il est injecté dans le système du four). Si ces mesures de débit sont prises du côté aspiration du ventilateur ou de la soufflante, les débits d'air réels doivent être convertis en conditions après le ventilateur / la soufflante.

6 Flux d'air au bruleur principal et au bruleur du calcinateur									
Flux d'air primaire au bruleur principal		4'000	m3/h	64	°C	250	mbar	10.4%	of comb. air
Flux d'air de transfert au bruleur principal		1'000	m3/h	40	°C	300	mbar	2.9%	of comb. air
Flux d'air primaire au calcinateur			m3/h		°C		mbar	0.0%	of comb. air
Flux d'air de transfert au calcinateur		1'700	m3/h	40	°C	95	mbar	2.8%	of comb. air

Figure 12: Capture d'écran de la section "Flux d'airs du bruleur principal et du bruleur du calcinateur"

Si le calcinateur n'a pas de brûleur et que le combustible est simplement soufflé dans le calcinateur avec l'air de transfert, le flux d'air primaire du calcinateur est laissé vide.

3.1.2.7 Clinker

Les propriétés chimiques du clinker sont nécessaires pour calculer la chaleur théorique de formation du clinker (selon la formule de Strasser couramment utilisée) et pour déterminer la quantité de gaz de calcination produite. Étant donné que seuls les principaux éléments du clinker sont pris en compte, la somme de ces éléments principaux est normalement légèrement inférieure à 100 %. La valeur par défaut de la chaleur de formation du clinker est de 1750 kJ/kg de clinker.

Si une pesée du clinker a été effectuée, le taux moyen de production de clinker mesuré est introduit dans la cellule E47. Comme le taux de production de clinker mesuré est la base du calcul de la consommation de chaleur spécifique, l'erreur du bilan massique doit être < 3 % pour obtenir une erreur appropriée du bilan thermique. Si l'erreur du bilan massique est plus élevée, la pesée des différents flux de masse doit d'abord être révisée.

Si aucune pesée de clinker n'a été effectuée, le débit massique de clinker calculé (cellule E51) doit être utilisé à la place dans la cellule E47. Ce débit massique de clinker calculé prend en compte les débits massiques de l'alimentation du four, la perte de poussière du préchauffeur ainsi que les cendres du combustible. Le taux de recirculation de la poussière du refroidisseur vers le four n'est pris en compte que dans le calcul de l'efficacité du refroidisseur et doit être estimé correctement. Cette recirculation de la poussière de clinker varie généralement de 1 % (pour une atmosphère de four très claire avec une flamme bien visible) à 3-4 % (si l'atmosphère du four est plutôt poussiéreuse et que la flamme n'est plus visible).

Étant donné que la température du clinker lors de sa descente du four dans le refroidisseur ne peut être mesurée correctement, une valeur par défaut de 1450 °C est généralement utilisée. Cette température est également la base du calcul de l'efficacité du refroidisseur.

La température du clinker après le refroidisseur est la moyenne d'un nombre suffisamment élevé d'échantillons ponctuels de température du clinker correctement mesurés.

7 Clinker											
Analyse du clinker											
	CaO	MgO	SiO2	Fe2O3	Al2O3	SO3	Na2O	K2O	Sum		
[%]	65.51	1.93	20.42	3.65	5.42	0.81	0.56	0.67	99.0%		
(kJ/kg) formation de chaleur	3200	2710	-2140	-250	1720						
Taux de production de clinker (mesuré)			125.0	t/h	Chaleur de formation du clinker (calculé par la chimie)						
Température du four			1450	°C			1795.7			kJ/kg cli	
Température après refroidisseur			130	°C	Chaleur de formation de clinker (utilisé dans la balance thermique)						
Taux de production de clinker (calculé)			125.1	t/h			1750			kJ/kg cli	
							2			%	
									Erreur de balance massique		0.06%

Figure 13: section Capture d'écran de la section "Clinker"

3.1.2.8 Refroidisseur clinker

Les débits d'air du refroidisseur se réfèrent à la pression du côté aspiration des ventilateurs. Si les flux d'air du refroidisseur sont mesurés du côté aspiration des ventilateurs, les flux doivent être convertis en conditions sortie des ventilateurs. En raison de la compression de l'air et des pertes des ventilateurs (le rendement des ventilateurs pour la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique n'est généralement que de 70 à 75 %), la température de l'air après les ventilateurs est supérieure à la température ambiante.

L'air de refroidissement spécifique des refroidisseurs modernes en fonctionnement se situe typiquement entre 1,7 Nm³/kgcli et 1,8 Nm³/kgcli.

Si un air intermédiaire est extrait, le débit d'air intermédiaire doit être mesuré. Le débit d'air intermédiaire représente généralement jusqu'à 80 % du total de l'air excédentaire du refroidisseurs (l'air excédentaire du refroidisseur étant l'air de refroidissement qui n'est pas utilisé dans le four ou dans le calcinateur pour la combustion). Si l'air intermédiaire du refroidisseur n'est pas mesuré, les cellules correspondantes C74 et E74 sont laissées vides.

Les températures de l'air intermédiaire et de l'air résiduel du refroidisseur sont des températures moyennes de toute la section transversale aux points de prélèvement du refroidisseur. Si une mesure manuelle ponctuelle de ces températures a été effectuée, ces températures sont corrélées aux valeurs moyennes des mesures de température.

Si une mesure du débit d'air excédentaire du refroidisseur a été effectuée, le débit d'air usé mesuré est utilisé et la correction est évaluée. Si l'erreur du bilan de l'air du refroidisseur est significativement supérieure à 3 %, les débits d'air du ventilateur du refroidisseur mesurés ainsi que la mesure du débit d'air usé doivent être revus. Si le débit d'air usé du refroidisseur n'est pas mesuré ou si l'erreur du bilan d'air reste supérieure à 3 %, la valeur calculée (cellule G75) doit être utilisée à la place.

La quantité d'air secondaire et d'air tertiaire est calculée, sur la base des données fournies sur le combustible (besoin en air de combustion) et sur la base des conditions du procédé (taux d'air excédentaire et taux d'air parasite).

La température de l'air secondaire est utilisée pour équilibrer le bilan thermique du refroidisseur. Si la température de l'air tertiaire est mesurée et si l'air secondaire et l'air tertiaire sont prélevés en commun dans la hotte du four, la température de cet air secondaire doit être égale ou proche de la température de l'air tertiaire.

L'efficacité réelle du refroidisseur avec l'air de récupération réel ainsi que l'efficacité "normalisée" du refroidisseur, qui est basée sur un air de récupération standard de 0,8 Nm³/kgcli, sont calculées dans les cellules F81 et F82. Cette efficacité "normalisée" du refroidisseur est généralement comprise entre 68 et 73 % pour les refroidisseurs à grille modernes (par exemple, les refroidisseurs à plancher mobile).

8 Refroidisseur clinker									
Flux d'air du refroidisseur									
Fan 1	14'000	m3/h	50	°C		100	mbar		
Fan 2	22'000	m3/h	50	°C		100	mbar		
Fan 3	17'000	m3/h	45	°C		80	mbar		
Fan 4	17'000	m3/h	45	°C		80	mbar		
Fan 5	17'000	m3/h	40	°C		75	mbar		
Fan 6	20'000	m3/h	40	°C		70	mbar		
Fan 7	24'500	m3/h	40	°C		65	mbar		
Fan 8	35'000	m3/h	35	°C		60	mbar		
Fan 9	35'000	m3/h	35	°C		55	mbar		
Fan 10	35'000	m3/h	35	°C		50	mbar		
Total flux d'air du refroidisseur	238'500	m3/h	40	°C		Air spécifique du refroidisseur	1.713	Nm3/kg cli	
Air intermédiaire du refroidisseur		m3/h		°C	Air perdu & intermédiaire du refroidisseur (calculé)				Nm3/kg cli
Air perdu du refroidisseur	269'307	m3/h	320	°C	269'307	m3/h	0.954	Nm3/kg cli	
Air secondaire	42'550	Nm3/h	1040	°C			0.341	Nm3/kg cli	
Air tertiaire	54'948	Nm3/h	1040	°C			0.440	Nm3/kg cli	
Efficacité réelle du refroidisseur		[@0.781 Nm3/kg cli]	70.4%		Erreur de balance du refroidisseur		0.00%		
Efficacité normalisée du refroidisseur		[@0.800 Nm3/kg cli]	71.4%		Erreur de balance thermique du refroidisseur		-0.34%		

Figure 14: Capture d'écran de la section "Refroidisseur clinker"

3.1.2.9 Entrées d'air parasite

Les entrées d'air parasite sont calculées en fonction des surfaces des ouvertures dans les différentes sections du four et en fonction de la dépression qui règne dans le système du four (formule de Bernoulli utilisée pour le calcul des vitesses d'entrée d'air parasite).

- Sortie du four et hotte (c'est l'air parasite provenant du joint de sortie du four et des ouvertures de la hotte du four, qui remplace l'air secondaire récupéré du refroidisseur et qui est envoyé au four comme air de combustion).
- Entrée du four (c'est l'air usé provenant du joint d'entrée du four et de la zone statique d'entrée du four, qui entre après l'analyse des gaz d'entrée du four, qui remplace l'air tertiaire récupéré du refroidisseur et qui va au four comme air de combustion).
- Calcinateur (c'est l'air parasite qui entre dans le calcinateur, qui remplace l'air tertiaire récupéré du refroidisseur et qui va au calcinateur comme air de combustion).
- Refroidisseur (c'est l'air parasite provenant principalement du broyeur de clinker, qui quitte le refroidisseur avec l'air résiduel du refroidisseur).

L'air usé dans le préchauffeur est calculé sur la base des compositions des gaz après le calcinateur et après le préchauffeur. Si aucune analyse des gaz n'est disponible après le calcinateur, mais seulement après le préchauffeur, la composition des gaz doit être estimée, sur la base d'une augmentation de l'oxygène de 0,2 à 0,4 % par étage de cyclone.

9 Entrées air parasite									
Sortie de four et hotte	1000	m3/h	0.01	m3/kg cli	Calcinateur	1000	m3/h	0.01	m3/kg cli
Entrée du four	2000	m3/h	0.02	m3/kg cli	Refroidisseur	2000	m3/h	0.02	m3/kg cli
					Préchauffeur	18530	m3/h	0.15	m3/kg cli

Figure 15: Capture d'écran "Entrées d'air parasite"

Les valeurs indicatives typiques pour le taux d'air parasite sont indiquées ci-dessous. Ces taux d'air parasite dépendent fortement de l'état mécanique des joints du four rotatif, de l'état des joints des portes, des trous d'homme ou des trous de piquage, ainsi que de la pression de service de la cuve.

	Sortie de four et hotte	Entrée de four	Calcinateur	Refroidisseur	Préchauffeur
Taux d'air parasite spécifique [m ³ /kg _{cli}]	0.01 - 0.03	0.01 - 0.03	0.01 - 0.02	0.02 - 0.05	0.01 - 0.02

Table 4: Taux typiques d'air parasite de four

3.1.2.10 Pertes par rayonnement et par convection

Les pertes par rayonnement et convection du système de four sont calculées dans la feuille de travail séparée "Rayonnement et convection du four" et les valeurs sont importées à partir de là.

10 Pertes de rayonnement et de convection					
Four rotatif	181	kJ/kg cli	KI & Calciner	21	kJ/kg cli
Refroidisseur	8	kJ/kg cli	Preheater	28	kJ/kg cli

Figure 16: Capture d'écran de la section « Pertes par rayonnement et par convection

3.1.3 Feuille de calcul "Pertes par rayonnement et par convection"

3.1.3.1 Données de base

Les conditions ambiantes et le taux de production de clinker sont importés de la feuille de travail "Matériau du four et débit d'air".

La température de l'enveloppe du four est mesurée à l'aide d'un pyromètre manuel dans chaque mètre de l'enveloppe du four et la lecture moyenne sur la circonférence du four est utilisée.

Les températures dans la partie statique du système du four sont mesurées soit par un pyromètre manuel, soit par un thermomètre de contact manuel.

Les vitesses du vent doivent être mesurées ou sont estimées.

1 Données de base					
Taux de production du four	125.0 t/h	Vitesse typique du vent au refroidisseur	0 m/s	Emissivité de l'enveloppe du four	0.90 -
Altitude de l'usine	330 m (asl)	Vitesse typique du vent au préchauffeur	1 m/s	Emissivité de l'entrée du four et du calcinateur	0.60 -
Pression ambiante (réelle et utilisée)	974 mbar			Emissivité du conduit d'air tertiaire	0.65 -
Température ambiante	25 °C			Emissivité du préchauffeur	0.60 -
Densité de l'air et conditions ambiantes	1.189 kg/m3			Emissivité du refroidisseur	0.60 -

Figure 17: Capture d'écran de la section "Données de base"

Pour l'émissivité des contenants, il convient d'utiliser des valeurs typiques, qui dépendent de l'état de la surface et surtout de l'état de la peinture.

	Surface rouillée	Peinture aluminium
Emissivité [-]	0.9	0.3 - 0.6 (dépend de l'âge et de la conteneur et Al

Table 5: Emissivité typique des surfaces

3.1.3.2 Pertes par rayonnement et convection dans un four rotatif

Les températures de surface du four rotatif sont mesurées avec un pyromètre manuel tous les mètres sur toute la longueur du four rotatif.

Cette mesure ne doit être effectuée que si l'environnement est sec (pas de pluie ou de neige tombant sur le four) :

Dans le cas où des ventilateurs de refroidissement de l'enveloppe du four sont utilisés pour refroidir localement l'enveloppe du four rotatif, on peut supposer une vitesse du vent d'environ 4 m/s, si aucun flux d'air des ventilateurs de refroidissement de l'enveloppe n'est disponible ou mesuré. Si le débit d'air des ventilateurs de refroidissement de l'enveloppe est disponible ou mesuré, ce débit d'air doit être réparti sur toute la surface de la virole du four qui est refroidie.

3.1.3.3 Pertes par rayonnement et convection partie statique

Les températures de surface des différents récipients sont mesurées à l'aide d'un pyromètre portatif ou d'un thermomètre de contact à plusieurs endroits et une température moyenne raisonnable des différents récipients est calculée manuellement à partir de ces mesures ponctuelles.

3.1.4 Résumé du four

Dans la feuille de calcul "Résumé du four", les principaux résultats sont affichés. La disposition des différentes sections suit la même méthodologie que pour le réglage d'un bilan thermique, à savoir

- Réglage du bilan massique du four (l'erreur de mesure du débit massique de clinker doit être < 3 % ou fixée à 0 % en utilisant la production de clinker calculée).
- Réglage du bilan d'air du refroidisseur (l'erreur dans la mesure de l'excès d'air du refroidisseur doit être < 5 % ou fixée à 0 % en utilisant l'air résiduel calculé du refroidisseur).
- Réglage du bilan thermique du refroidisseur (l'erreur de mesure de la température de l'air tertiaire et l'utilisation de la même température que celle de l'air secondaire doivent être inférieures à 5 % ou réglées à 0 % en ajustant la température de l'air secondaire et de l'air tertiaire, tout en maintenant des rendements " normalisés " raisonnables du refroidisseur).
- Réglage du bilan thermique du four (l'erreur doit être < 5 %).

3.1.4.1 Bilan massique

Si une pesée du clinker a été effectuée, le bilan massique doit être révisé et réglé jusqu'à ce que l'erreur soit inférieure à 3 %. Si l'erreur est significativement plus élevée, l'étalonnage des alimentateurs, en particulier de l'alimentation du four, doit être vérifié et le débit massique de clinker doit être contre-vérifié.

Si aucune pesée de clinker n'a été effectuée, le débit massique de clinker calculé est utilisé et l'erreur du bilan massique devient 0 %.

1 Balance massique du four				
		t/h (alimentation)	kg/kg cli	t/h (base clinker)
Entrées	Débit alimentation four	203.0	1.624	130.9
	Cendres de four	2.5	0.020	2.5
	Total			133.4
Sorties	Poussières au préchauffeur	13.0	0.104	8.3
	Taux de production clinker	125.0	1.000	125.0
	Erreur de balance massique	0.1%		0.1
	Total			133.4
	<i>Alimentation four / clinker</i>	1.624		

Figure 18: Capture d'écran de la section "Bilan massique du four"

3.1.4.2 Balance massique de l'air du refroidisseur

Si une mesure du débit d'air résiduel et du débit d'air moyen du refroidisseur a été effectuée, l'erreur du bilan d'air doit être < 5 %. Si aucune mesure du débit d'air résiduaire du refroidisseur n'a été effectuée, le débit d'air résiduaire du refroidisseur calculé est utilisé et l'erreur du bilan d'air du refroidisseur devient 0 %.

2 Balance de l'air du refroidisseur				
		Nm3/h	Nm3/kg cli	
Entrées	Air de refroidissement	214'173	1.713	
	Air parasite du refroidisseur, sortie et enveloppe du four	2'642	0.021	
	Total	216'815	1.735	
Sorties	Air secondaire	42'650	0.341	
	Air tertiaire	54'948	0.440	
	Air usé	119'216	0.954	
	Erreur de balance de l'air	0.0%	0	0.000
	Total	216814.9	1.735	

Figure 19: d'écran de la section "Bilan massique du refroidisseur"

3.1.4.3 Equilibre thermique du refroidisseur

Le bilan thermique du refroidisseur est réglé en ajustant la température de l'air secondaire (et de l'air tertiaire) jusqu'à ce que des rendements raisonnables du refroidisseur soient obtenus et que l'erreur du bilan thermique devienne inférieure à 5 %. Si l'erreur ne peut pas être minimisée en ajustant la température de l'air secondaire (et de l'air tertiaire), la température et le débit de l'air résiduel (et de l'air intermédiaire) ainsi que les débits du ventilateur du refroidisseur et de l'air excédentaire du refroidisseur doivent être révisés.

3 Balance thermique du refroidisseur							
		Nm ³ /h	Nm ³ /kg cli	°C	kJ/kg cli		
Entrées		kg/h	kg/kg cli				
	Clinker du four	127'500	1.020	1'450	1'579.1		
	Air froid vers refroidisseur	214'173	1.713	40	44.7		
	Air parasite du refroidisseur, sortie et enveloppe du four	2'642	0.021	25	0.1		
Total		216'815	1.735		1624.0		
Sorties							
	Air secondaire	42'650	0.341	1'040	490.3		
	Air tertiaire	54'948	0.440	1'040	631.7		
	Air usé	119'216	0.954	320	380.3		
	Poussière du refroidisseur vers le four	2'500	0.020	1'040	20.5		
	Clinker après refroidisseur broyeur	125'000	1.000	130	87.6		
	Perte de convection et de rayonnement du refroidisseur	-	-	-	8.0		
	Erreur de balance thermique	0.3%			5.6		
Total					1624.0		
	Efficacité réelle du refroidisseur	[@0.781 Nm ³ /kg cli]	70.4%				
	Efficacité normalisée du refroidisseur	[@0.800 Nm ³ /kg cli]	71.4%				

Figure 20: Capture d'écran de la section équilibre thermique du refroidisseur

3.1.4.4 Equilibre thermique du four

Le bilan thermique du four indique finalement les principaux apports et rejets de chaleur. Si toutes les mesures ont été bien effectuées et si tous les résultats de laboratoire sont corrects, l'erreur du bilan thermique devrait être inférieure à 5 %.

4 Balance thermique du four				Nm ³ /h	Nm ³ /kg cli	°C	kJ/kg cli
Entrées				<i>kg/h</i>	<i>kg/kg cli</i>		
	Alimentation du four			203'000	1.624	75	80.4
	Carbone organique total de l'alimentation four			102	0.001	-	26.8
	Valeur thermique sensible totale du combustible			15'000	0.120	45	3.5
	Valeur calorifique totale du combustible			15'000	0.120	-	2920.5
	Valeur thermique sensible totale air primaire et de transfert			6'576	0.053	45	2.3
	Air froid vers refroidisseur			214'173	1.713	40	44.7
	Air parasite total du système			21'603	0.173	25	1.1
			Total				3079.4
Sorties							
	Chaleur de la constitution du clinker			-	-	-	1'750
	Gaz de sortie du préchauffeur (humide)			164'511	1.316	320	596.9
	Perte de poussière du préchauffeur (sec)			13'000	0.104	320	31.9
	Evaporation de l'alimentation four			1'320	0.011	-	26.4
	CO dans le gaz de sortie du préchauffeur			33	0.001	-	3.3
	Air usé			119'216	0.954	320	380.3
	Clinker après refroidisseur broyeur			125'000	1.000	130	44.7
	Perte totale de rayonnement et de convection			-	-	-	238.7
	Erreur balance thermique	0.2%					7.1
			Total				3079.4

Figure 21: Capture d'écran de la section "Equilibre thermique du four"

3.2 Systèmes de broyage

Pour le bilan thermique des broyeurs, 3 types de broyeurs différents sont disponibles, à savoir

- un broyeur à rouleaux verticaux (VRM)
- un broyeur à boulets à décharge en bout
- un broyeur à boulets à balayage d'air

Si plusieurs broyeurs du même type sont installés dans l'usine, la feuille de calcul correspondante doit être dupliquée.

Tous les bilans thermiques des broyeurs utilisent des itérations numériques pour calculer la recirculation des matières ou des gaz. Afin d'obtenir des performances de calcul adéquates, le calcul automatique des formules doit être activé, les itérations doivent être activées et le nombre d'itérations doit être limité (activer les itérations dans **Fichier > Options > Formules > Options de calcul > Calcul du classeur : Automatique > Activer le calcul itératif > Définir le nombre d'itérations à 100 et la variation maximale à 0,001**).

Dans les bilans thermiques, certaines des valeurs clés du processus sont calculées, qui ne sont pas utilisées pour le bilan thermique, mais qui aident à vérifier le flux de gaz dans les systèmes. Les valeurs guides pour ces valeurs de processus sont indiquées dans les commentaires de ces cellules.

3.2.1 VRM (Broyeurs verticaux a rouleaux)

3.2.1.1 Matières premières vers le broyeur

En fonction de la composition du produit fabriqué, les matières sont sélectionnées dans le menu déroulant des cellules B7 à B12. Si une seule matière est introduite dans le broyeur ou si de la farine brute est produite, seule la cellule B7 est sélectionnée et les cellules B8 à B12 restent vides. En outre, le débit d'alimentation des doseurs pondéraux, l'humidité et la température des matières premières broyées ainsi que l'humidité du produit sont insérés.

La température du produit est calculée sur la base de la température de sortie du broyeur et en tenant compte de l'entrée d'air parasite entre la sortie du broyeur et l'entrée du ventilateur. Les taux d'air parasite typiques utilisés pour la conception du système de traitement des gaz VRM sont de 10 % d'air parasite au-dessus du broyeur et de 5 % d'air parasite de la sortie du broyeur à l'entrée du ventilateur.

Le taux de production est calculé sur la base des matières premières alimentées et inclut la poussière qui provient du système de four avec les gaz chauds.

La poussière dans le gaz du four est calculée à partir de la perte de poussière du préchauffeur et du gaz du préchauffeur utilisé dans l'usine concernée.

La poussière dans l'excès d'air du refroidisseur doit être réglée manuellement (cellule Z37), sur la base d'une estimation correcte.

1 Raw materials to mill							
	alimentation (humide)			Produit (sec)	Humidité (res.)		Temperature
	t/h	% eau	°C		t/h	% eau	
Clinker	113.5	0.0%	80	113.5			
Gypse	6.9	6.0%	25	6.5			
Calcaire	51.6	6.5%	25	48.2	0.3%	72.8	
Alimentation (humide)	172.0	2.2%	61	168.2	@ 0.0 % humidité et poussière système de four incluse		
				168.7	@ 0.3 % humidité et poussière système de four incluse		

Figure 22: Capture d'écran de la section "Matières premières vers le broyeur"

3.2.1.2 Système de broyage

Dans cette section, les données opérationnelles du système VRM sont définies. Sur la base de la puissance absorbée par le ventilateur du broyeur et de l'augmentation de la pression au-dessus du ventilateur, le débit de gaz à travers le VRM est calculé. Cependant, le débit de gaz réellement utilisé doit encore être inséré manuellement dans la cellule D31. Afin de calculer la charge de poussière du gaz au niveau du ventilateur, il est nécessaire de sélectionner dans le menu déroulant des cellules D23:E23 le système de dépoussiérage fourni, qui est généralement un dépoussiérage par cyclone dans les broyeurs de matières premières et un dépoussiérage par manches dans les broyeurs de charbon et de ciment.

Il est supposé que l'énergie électrique introduite dans le système est convertie en chaleur selon les hypothèses suivantes :

- 93 % de la puissance de la table d'entraînement principale du VRM
- 100 % de la puissance du séparateur
- (100 % - % de rendement du ventilateur) de la puissance du ventilateur du broyeur.

La recirculation des gaz du broyeur est calculée en fonction de la quantité de gaz utilisée dans le système du four. Comme la composition du gaz d'entrée du ventilateur dépend des gaz du four utilisés et de cette recirculation de gaz, la composition du gaz est trouvée de manière itérative.

En cas d'erreur (#valeur), la composition du gaz dans les cellules AN60:AN64 peut être remplacée par des valeurs estimées (en ouvrant le lien vers les cellules AO60:AO64) et la boucle du calcul circulaire est rompue. Une fois que le programme calcule à nouveau correctement, ces cellules peuvent être à nouveau liées aux cellules AO60:AO64 et le calcul circulaire est à nouveau activé.

Il en va de même pour la recirculation de la poussière avec le gaz de recirculation. En cas d'erreur (#valeur), la poussière recirculée dans la cellule AH68 peut être remplacée par une valeur estimée (en ouvrant le lien vers la cellule AH69) et la boucle du calcul circulaire est rompue. Une fois que le programme calcule à nouveau correctement, cette cellule peut être à nouveau liée à la cellule AH69 et le calcul circulaire est à nouveau activé.

Les pertes par rayonnement et convection du VRM sont estimées et se situent généralement autour de 10 kJ/kg de produit pour un système de traitement des gaz bien isolé.

2 Système de broyeurs			
Puissance réelle du séparateur	200 kW	Puissance réelle moteur principal du	3'953 kW
		Efficacité de l'ensemble moteur principal	94.1%
Puissance réelle du ventilateur du broyeur	1'850 kW		
Efficacité du ventilateur de l'arbre de transmission du broyeur	94.1%	Table SEEC	22.1 kWh/t
Dépoussiérage intermédiaire	Cyclone avant ventilateur broyeur		
Efficacité cyclone (intermédiaire)	95.0%	Injection d'eau dans broyeur	5.000 m3/h
Efficacité du ventilateur broyeur	75.0%	Air parasite sur le broyeur	10.0%
Pression d'entrée du ventilateur broyeur	-80 mbar		
Pression de sortie du ventilateur broyeur	-2 mbar	Température des gaz à la sortie broyeur	75 °C
Charge de poussière au ventilateur (calculée)	14.3 g/m3	Pression de sortie du ventilateur broyeur	-65 mbar
		Flux de gaz à la sortie du broyeur	556'147 m3/h
Flux de gaz du ventilateur du broyeur (calculé)	593'295 m3/h		
Flux de gaz du ventilateur du broyeur (usé)	590'000 m3/h	Flux de gaz spécifique (@ sortie broyeur)	3.28 m3/kg product
		Air parasite de la sortie broyeur vers ventilateur broyeur	
Pertes de rayonnement et de convection	10 kJ/kg prod.		5.0%

Figure 23: Capture d'écran de la section "Système de broyage"

3.2.1.3 Flux de gaz provenant du système de four

Dans cette section, les flux de gaz provenant du système de four sont définis.

Dans les cellules D37:E37, le point d'extraction des gaz du four est sélectionné.

Si l'extraction des gaz du four se fait après le ventilateur ID et si une tour de conditionnement des gaz est installée et utilisée avant le ventilateur ID, le refroidissement des gaz par injection d'eau doit être pris en compte. Pour ce faire, il faut ajuster la température après le refroidissement du gaz de manière à ce que la différence d'enthalpie entre la tour de conditionnement du gaz et l'injection d'eau devienne nulle (**Data > What-if-Analysis > Goal seek....> Set cell : H41, à la valeur : 0, en modifiant la cellule : H40**).

Si un cyclone de dépoussiérage supplémentaire est installé dans le trajet des gaz de la tour de préchauffage (souvent installé dans le trajet des gaz des broyeurs de charbon pour réduire la quantité de poussière du préchauffeur dans le broyeur de charbon), la sélection adéquate doit être effectuée dans les cellules D38:E38. L'efficacité de ce dépoussiérage supplémentaire est déterminée par une mesure en laboratoire et par le processus (augmentation de la teneur en cendres du combustible solide pendant le broyage, perte de poussière du préchauffeur, etc.

À partir du bilan thermique du four, la quantité totale disponible de gaz du four et d'air excédentaire du refroidisseur est importée et affichée. La quantité de gaz de combustion et d'air de refroidissement qui peut être utilisée dans un système de broyeur particulier dépend de la quantité de gaz consommée par tous les autres broyeurs. Ainsi, le gaz de four disponible et l'air excédentaire du refroidisseur disponible représentent le débit de gaz **maximal** disponible pour **tous** les systèmes du broyeur. Cependant, dans la plupart des cas, l'excès d'air du refroidisseur ne peut être utilisé qu'à hauteur de 80 %, car un certain débit d'air minimum doit être maintenu dans le système d'évacuation du refroidisseur pour permettre un contrôle correct de la pression de la hotte du four.

En ajustant le débit de gaz du four et le débit d'air du refroidisseur, l'erreur du bilan thermique du VRM est minimisée.

Les taux d'air parasite dans le système de gaz du four et du refroidisseur sont basés sur des estimations ou proviennent d'une mesure d'air parasite (profil d'oxygène). Pour le calcul du bilan thermique, il est supposé que tout l'air parasite du four et l'excès d'air du refroidisseur entrent dans les circuits directement à l'entrée du broyeur.

3 Flux de gaz du système de four			
Point d'extraction du gaz PC	Après ventilateur ID		Calculer temperature après ventilateur ID dans la cellule avec fonction EXCEL goal seek (delta H GCT=0)
Dépoussiérage additionnel après PC	No high efficiency cyclone		T @ sortie PC 320 °C
Laisser cellule E35 vide			T @ sortie ventilateur ID 320 °C
			delta H GCT 0 MJ/h
Injection d'eau dans la conduite descendante du préchauffeur / GCT		- m3/h	
Gaz disponible du préchauffeur (calculé)		144 095 Nm3/h	320 °C
Gaz réellement utilisé du préchauffeur (calculé)			320 °C
Gaz intermédiaire / usé disponible du refroidisseur (calculé)		119 216 Nm3/h	320 °C
Air réellement usé du refroidisseur (hors air parasite)		18 000 Nm3/h	320 °C
Air parasite du préchauffeur vers broyeur		5.0%	Erreur balance thermique -25.14%
Air parasite du refroidisseur vers broyeur		5.0%	Augmenter gaz de four / air de refroidiss. 70% MJ/h

Figure 24: Capture d'écran de la section "Flux de gaz du système du four"

Si aucun gaz n'est disponible dans le système du four et qu'un générateur de gaz chaud est utilisé à la place, le bilan thermique du four doit être ajusté de manière à refléter les conditions réelles de fonctionnement du générateur de gaz chaud (régler le type et le taux de combustible, éliminer la chimie du clinker pour éviter le gaz de calcination, régler la température de sortie du générateur de gaz chaud en conséquence).

3.2.1.4 Flux de gaz dans le système de broyage

Dans cette section, les débits de gaz normalisés dans l'usine sont calculés. Deux valeurs clés sont utilisées dans le calcul, à savoir la température de sortie de l'usine (définie dans la cellule H27) et le débit de gaz au niveau du ventilateur (défini dans la cellule D31). A partir de cette température de sortie du broyeur, toutes les autres températures de gaz sont calculées (suggestions dans les cellules J60, J66, J67). Cependant, ces températures doivent encore

être introduites manuellement dans les cellules G60, G66, G67), puisque seules les valeurs de ces cellules sont utilisées dans le bilan thermique. Dans ce contexte, on suppose que la température du produit est égale à la température du gaz à l'entrée du ventilateur de l'usine (c'est-à-dire qu'il n'y a pas de parasite air entre le système de dépoussiérage intermédiaire et l'entrée du ventilateur).

4 Flux de gaz dans le système de broyeur					
Gaz usé du système de four <i>(incl. air parasite et descente d'eau ou GCT)</i>	0 Nm ³ /h	Recirculation	326688 Nm ³ /h		
Air usé du refroidisseur <i>(incl. air parasite)</i>	18900 Nm ³ /h				
Gaz entrée broyeur	345588 Nm ³ /h		98.6 °C	suggestion	87.4 °C
Evaporation d'eau dans le broyeur	10275 Nm ³ /h				
Air parasite broyeur	35586 Nm ³ /h				
Gaz sortie broyeur	391449 Nm ³ /h		75.0 °C		
Air parasite de la sortie broyeur vers ventilateur broyeur	19572 Nm ³ /h				
Gaz entrée broyeur	411021 Nm ³ /h		72.8 °C	suggestion	72.8 °C
Gaz sortie ventilateur broyeur	411021 Nm ³ /h		75.5 °C	suggestion	75.5 °C

Figure 25: Capture d'écran de la section "Flux de gaz dans le système de broyage"

3.2.1.5 Résumé du bilan thermique des broyeurs

Dans cette dernière section, un résumé de toutes les entrées et sorties de chaleur est affiché et les flux de gaz spécifiques normalisés dans l'usine sont indiqués.

L'erreur du bilan thermique est indiquée et devrait être inférieure à 5 %, si toutes les données d'entrée sont correctes.

5 Mill heat balance						
		MJ/h	Nm ³ /kg prod.* kg/kg prod.*	°C	kJ/kg prod.	
Entrées	Alimentation initiale broyeur (incl. humidité)	5'562	1.019	61	33.0	
	Total chaleur sensible du gaz de four usé (incl. poussière)	0	0.000	320	0.0	
	Total chaleur sensible du refroidisseur (incl. poussière)	7'499	0.112	320	44.4	
	Total chaleur sensible air parasite	364	0.000	25	2.2	
	Total chaleur sensible injection eau broyeur	104	0.030	25	0.6	
	Efficacité totale des moteurs électriques convertie en chaleur: 4081 kW	14'690				87.1
Total		28'219			167.2	
Sorties	Production des broyeurs (incl. humidité et poussière sortie broyeur, PC & refroidisseur)	7'188	0.998	73	42.6	
	Evaporation humidité alimentation broyeur	7'992	0.019	-	47.4	
	Evaporation injection eau broyeur	12'253	0.030	-	72.6	
	Total chaleur sensible des gaz quittant le système de broyage	6'195	0.500	76	36.7	
	Total pertes radiation et convection	1'687	-	-	10.0	
	Erreur balance thermique	-25.1%	-7'096			-42.0
	Total		28'219.3			167.2

*production (kg prod) inclue produit humide résiduelle poussière des gaz de sortie du système de broyeur ainsi que poussière du système de four

Figure 26: Capture d'écran de la section "Bilan thermique des broyeurs"

3.2.2 Broyeur à boulet (décharge en bout)

3.2.2.1 Matières premières vers le broyeur

En fonction de la composition du produit fabriqué, les matières sont sélectionnées dans le menu déroulant des cellules B7:B12. Si une seule matière est introduite dans le broyeur ou si de la farine brute est produite, seule la cellule B7 est sélectionnée et les cellules B8:B12 restent vides. En outre, le débit d'alimentation des doseurs pondéraux, l'humidité et la température des matières premières broyées ainsi que l'humidité du produit sont insérés.

La température du produit est calculée sur la base de la température de sortie du broyeur et tient compte de l'entrée d'air parasite et frais dans le séparateur ainsi que de la puissance du séparateur. Dans le cas d'un système de séparateur à passage unique, où 100 % de l'air du séparateur est dépoussiéré dans un système à manches filtrants, jusqu'à 100 % du flux d'air du séparateur peut être introduit comme air frais, alors que dans les systèmes à cyclone, où l'air du séparateur est dépoussiéré dans système à sacs filtrants,, seulement 10 à 15 % du flux d'air du séparateur peut être introduit comme air frais. Dans le cas d'un séparateur de 1ère génération, qui n'a pas de dépoussiérage du tout (ou seulement un très petit dépoussiérage), aucun refroidissement par air frais n'est prévu.

Le taux de production est calculé sur la base des matières premières alimentées et inclut la poussière qui provient du système de four avec les gaz chauds.

La poussière dans le gaz du four est calculée à partir de la perte de poussière du préchauffeur et du gaz du préchauffeur utilisé dans l'usine concernée.

La poussière dans l'excès d'air du refroidisseur doit être réglée manuellement (cellule Z38), sur la base d'une estimation correcte.

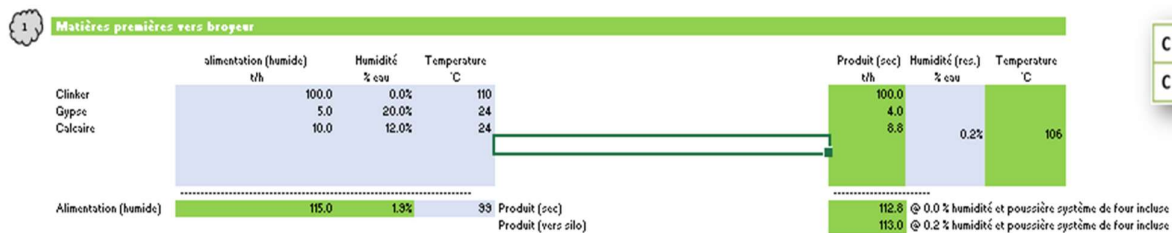


Figure 27: Capture d'écran de la section "Matières premières vers le broyeur"

3.2.2.2 Système de broyeur

Dans cette section, les données opérationnelles du système de broyage sont définies. Sur la base de la puissance absorbée par le broyeur et le ventilateur du séparateur ainsi que de l'augmentation de la pression sur les ventilateurs, le débit de gaz à travers le broyeur à boulets et dans le circuit du séparateur est calculé. Cependant, les flux de gaz réellement utilisés

doivent encore être insérés manuellement dans les cellules D33, D42 et H36. Afin de calculer la charge de poussière des gaz au niveau du ventilateur, il est nécessaire de sélectionner le type de séparateur et le système de dépoussiérage prévu dans le menu déroulant des cellules D20:G20, qui est pour les séparateurs de 2ème et 3ème génération typiquement un dépoussiérage par cyclone (avec un petit séparateur dépoussiérant à manches uniquement) ou un dépoussiérage à manches dans les systèmes à passage unique.

Il est supposé que l'énergie électrique introduite dans le système est convertie en chaleur selon les hypothèses suivantes :

- 97 % de la puissance d'entraînement de l'enveloppe du broyeur à boulets
- 100 % de la puissance du séparateur
- $(100 \% - \% \text{ efficacité du ventilateur du séparateur}) \times (100 \% - (\% \text{ d'air frais et parasite dans le séparateur})) \times \text{puissance du ventilateur du séparateur}$
- la puissance du ventilateur du broyeur n'est pas prise en compte (la limite du bilan thermique est l'entrée du ventilateur du broyeur)
- la puissance du ventilateur de dépoussiérage du séparateur (le cas échéant) n'est pas prise en compte (la limite du bilan thermique est l'entrée du ventilateur de dépoussiérage du séparateur).

La recirculation de la matière du séparateur vers le broyeur (charge de circulation définie comme le rapport entre le débit d'alimentation du séparateur et le produit du séparateur) est introduite manuellement (sur la base d'une mesure de la courbe de Tromp ou d'une mesure fiable du débit de matière rejetée).

La température de rejet est calculée en fonction de la quantité d'air frais et d'air vicié introduite dans le séparateur, de la puissance du séparateur ainsi que des pertes par rayonnement et convection (50 % des pertes totales de R&C sont supposées être attribuables au séparateur, qui comprend les systèmes de dépoussiérage et les conduits correspondants).

Les pertes totales par rayonnement et convection de l'ensemble du système du broyeur à boulets sont estimées et se situent généralement autour de 10 kJ/kg de produit pour un système de traitement des gaz bien isolé.

Le pivot des calculs du bilan thermique est la température des gaz de sortie du broyeur. Cette température du gaz ne doit pas tenir compte de l'entrée d'air parasite généralement élevée à la sortie du broyeur. Cette température doit donc être mesurée dans le tourillon du broyeur à boulets pour éviter toute extinction du gaz de sortie du broyeur par l'air parasite. Puisque les calculs du bilan thermique supposent une température égale du gaz et du matériau à la sortie du broyeur, on peut aussi utiliser la température du matériau directement après le broyeur dans la glissière d'air.

Dans tous les cas, si la situation d'air parasite à la sortie du broyeur est satisfaisante, la différence de température entre la température du matériau et celle du gaz dans le boîtier de sortie du broyeur doit être nettement inférieure à 5 %. Ainsi, la température du gaz après le tourillon du broyeur et dans le boîtier de sortie peut également être utile, si une mesure de la

température du gaz dans le tourillon n'est pas possible et si la situation d'air parasite est satisfaisante.

2 Système de broyeur			
Type de broyeur à boulet	Broyeur à décharge finale		
Dépoussiéreur du séparateur	Cyclones avant le ventilateur du séparateur (séparateur de 2ème à 3ème génération)		
Puissance réelle du ventilateur du séparateur	200 kW	Puissance réelle du moteur du broyeur	3'500 kW
Efficacité du moteur du ventilateur du séparateur	34.0%	Efficacité du moteur principal du broyeur	32.3%
Efficacité du ventilateur du séparateur	75.0%	Air frais usé à l'entrée du broyeur	19'000 Nm3/h
Pression d'entrée du ventilateur du séparateur	-33 mbar	Air parasite autour du broyeur	5.0%
Pression de sortie du ventilateur du séparateur	-1 mbar	Air parasite de la sortie du broyeur vers le ventilateur du broyeur	10.0%
Efficacité des cyclones	35.0%	Puissance réelle du ventilateur du broyeur	48 kW
Charge de poussière au ventilateur	415 g/m3	Efficacité du moteur du ventilateur du broyeur	34.1%
Flux de gaz du séparateur (calc.)	131'648 m3/h	Efficacité du ventilateur du broyeur	75.0%
Flux de gaz du séparateur (usés)	136'300 m3/h	Pression d'entrée du ventilateur du broyeur	-28 mbar
Flux spécifiques de gaz du séparateur	2.49 kg product/m3	Pression de sortie du ventilateur du broyeur	-1 mbar
Potentiel pour air frais (calc.)	12'619 Nm3/h	Flux de gaz du ventilateur du broyeur (calc.)	44'831 m3/h
Air frais (usé)	13'480 Nm3/h	Flux de gaz du ventilateur du broyeur (usé)	45'000 m3/h
Puissance réelle du dépoussiéreur du séparateur	15 kW	Diamètre interne de la partie vide de l'enveloppe du broyeur	4.2 m
Efficacité du dépoussiéreur du moteur du ventilateur	34.1%	Degré de remplissage du broyeur	30.0%
Efficacité du dépoussiéreur du ventilateur du séparateur	75.0%	Injection d'eau dans le broyeur	0.500 m3/h
Pression d'entrée du ventilateur de dépoussiérage	-20 mbar	Pression à la sortie du broyeur	-10 mbar
Pression extérieure du ventilateur du dépoussiéreur	-1 mbar	Température des gaz à la sortie du broyeur	110 °C
Flux de gaz du ventilateur du dépoussiéreur (calc.)	20'060 m3/h	Flux de gaz à la sortie du broyeur	40'358 m3/h
Flux de gaz usés du ventilateur du dépoussiéreur	20'060 m3/h	Vitesse des gaz à la sortie du broyeur (corps)	1.2 m/s
Faible air into separator	1'000 Nm3/h	SEEC à l'enveloppe du broyeur	28.8 kwh/t
Puissance réelle du moteur du séparateur	220 kW	Erreur de balance thermique	-1.7%
Matière recirculées du broyeur	3.0	Chaleur effective requise du GDC	252 MWh
Température des produits et rejets	105.6 °C		
Température des produits et rejets	105.7 °C		
Pertes de rayonnement & convection	10 kJ/kg prod.		

Figure 28: Capture d'écran de la section "Système de broyage"

3.2.2.3 Flux de gaz du système de four

Dans cette section, les flux de gaz provenant du système du four sont définis. Dans les cellules D55:E55, le point d'extraction des gaz du four est sélectionné. Si l'extraction du gaz du four se fait après le ventilateur ID et si une tour de conditionnement du gaz est installée et utilisée avant le ventilateur ID, le refroidissement du gaz par injection d'eau doit être pris en compte. Pour ce faire, il faut ajuster la température après le refroidissement du gaz de manière à ce que la différence d'enthalpie par rapport à la tour de conditionnement du gaz devienne nulle (**Data > What-if-Analysis > Goal seek....> Set cell : H59, à la valeur : 0, en modifiant la cellule : H58**). Pour les broyeurs à boulets à décharge finale, il n'y a normalement pas de cyclone de dépoussiérage supplémentaire installé sur le trajet des gaz de la tour de préchauffage, il faut donc effectuer une sélection adéquate dans les cellules D56:E56.

À partir du bilan thermique du four, la quantité totale disponible de gaz du four et d'air excédentaire du refroidisseur est importée et affichée. La quantité de gaz de combustion et d'air de refroidissement qui peut être utilisée dans un système de broyeur particulier dépend de la quantité de gaz consommée par tous les autres broyeurs. Ainsi, le gaz de four disponible et l'air excédentaire du refroidisseur disponible représentent le débit de gaz maximal disponible pour tous les systèmes du broyeur. Cependant, dans la plupart des cas, l'excès d'air du refroidisseur ne peut être utilisé qu'à 80 %, car un certain débit d'air minimum doit être

maintenu dans le système d'air résiduaire du refroidisseur pour permettre un contrôle correct de la pression de la hotte du four.

Les taux d'air parasite dans les systèmes de gaz du four et du refroidisseur sont basés sur des estimations ou proviennent d'une mesure d'air parasite. Pour le calcul du bilan thermique, il est supposé que tout l'air parasite vers les gaz du four et l'air excédentaire du refroidisseur entrent dans les circuits directement à l'entrée du broyeur.

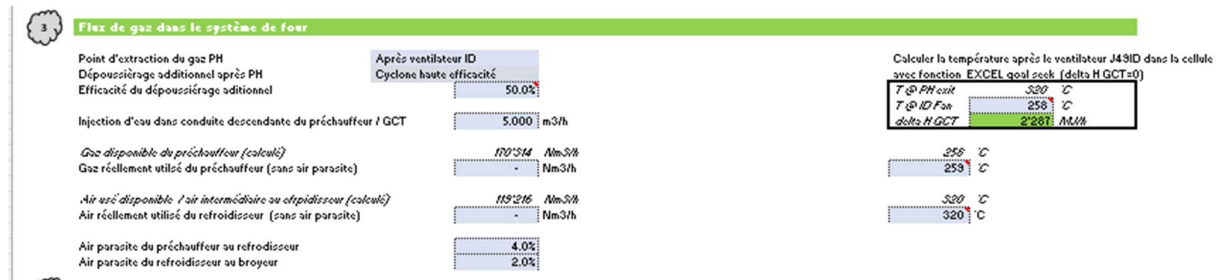


Figure 29: d'écran de la section "flux de gaz du système de four"

Si aucun gaz n'est disponible dans le système du four et qu'un générateur de gaz chaud est utilisé à la place, le bilan thermique du four doit être ajusté de manière à refléter les conditions réelles de fonctionnement du générateur de gaz chaud (régler le type et le taux de combustible, éliminer la chimie du clinker pour éviter les gaz de calcination, régler la température de sortie du générateur de gaz chaud en conséquence).

3.2.2.4 Flux de gaz dans le système de broyage

Dans cette section, les flux de gaz normalisés dans le broyeur sont calculés. Après avoir défini le flux de gaz provenant du four et le flux d'air provenant du refroidisseur, le flux d'air frais à l'entrée du broyeur doit être ajusté pour minimiser l'erreur du bilan gazeux (voir le conseil dans la cellule 179, qui apparaît si la différence de flux est supérieure à 100 Nm³/h).

La définition du débit de gaz du four et du débit d'air du refroidisseur dépend des exigences de séchage dans le broyeur à boulets, ce qui peut être vu dans le résumé du bilan thermique du broyeur (section 5).

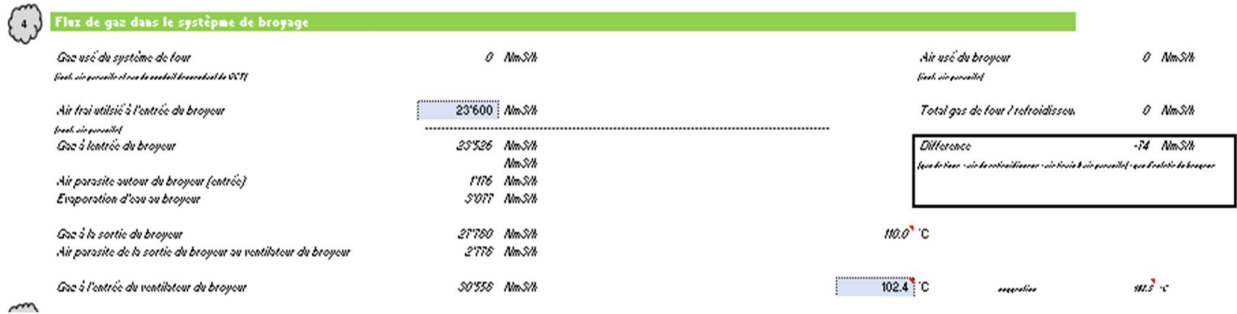


Figure 30: Capture d'écran de la section "Flux de gaz dans le système de broyage"

3.2.2.5 Résumé du bilan thermique des broyeurs

Dans cette dernière section, un résumé de toutes les entrées et sorties de chaleur est affiché et les flux de gaz spécifiques normalisés dans l'usine sont indiqués.

L'erreur du bilan thermique est indiquée et devrait être inférieure à 5 %, si toutes les données d'entrée sont correctes.

En cas de manque de séchage dans le broyeur (erreur négative du bilan thermique), il faut soit augmenter le débit de gaz chauds du système de séchage vers le broyeur, soit réduire la quantité d'eau injectée (le cas échéant).

En cas de manque de refroidissement dans le broyeur (erreur positive du bilan thermique), il faut soit réduire le flux de gaz chauds du système de séchage vers le broyeur (et par conséquent augmenter la quantité d'air frais), soit augmenter la quantité d'eau injectée (toutefois, la quantité totale d'eau injectée dans la première et la deuxième chambre ne doit jamais dépasser 2 à 3 % du taux de production pour ce type de système de broyage).



Bilance thermique de broyeur

		MJ/h	Nm ³ /kg prod.* kg/kg prod.*	°C	kJ/kg prod.
Entrées	Alimentation initiale broyeur (incl. humidité)	7170	1.000	39	63.4
	Total chaleur sensible du gaz de four usé (incl. poussières)	0	0.000	253	0.0
	Total chaleur sensible du refroidisseur (incl. poussières)	0	0.000	320	0.0
	Total chaleur sensible de tous les airs frais et air parasites	273	0.372	24	2.4
	Total chaleur sensible de l'injection d'eau dans le broyeur	10	0.004	25	0.1
	Puissance électrique totale des moteurs principaux convertie en chaleur: 3400 kW	12'239	-	-	108.3
	Total	19'632			174.2
Sorties	Production des broyeurs (incl. humidité et poussière sortie broyeur, PH & refroidisseur)	7734	1.000	106	63.0
	Evaporation humidité alimentation broyeur	4'821	0.07	24	42.6
	Evaporation injection eau broyeur	1'221	0.004	25	10.8
	Total chaleur sensible du gaz de broyeur à l'entrée du ventilateur	3'335	0.271	102	23.5
	Total chaleur sensible de l'air de dépoussiérage du séparateur (quittant le circuit)	1'620	0.128	106	14.3
	Total perte de rayonnement et de convection	1'130	-	-	10.0
	Erreur balance thermique	-230	-	-	-2.0
	Total	19'632			174.2

Figure 31: Capture d'écran de la section "Bilan thermique des broyeurs"

3.2.3 Broyeur à boulets à balayage d'air

3.2.3.1 Matières premières vers le broyeur

En fonction de la composition du produit fabriqué, les matières sont sélectionnées dans le menu déroulant des cellules B7:B12. Si une seule matière est introduite dans le broyeur ou si de la farine brute est produite, seule la cellule B7 est sélectionnée et les cellules B8:B12 restent vides. En outre, le débit d'alimentation des doseurs pondéraux, l'humidité et la température des matières premières broyées ainsi que l'humidité du produit sont insérés.

La température du produit est calculée sur la base de la température de sortie du broyeur, de la puissance du séparateur et en considérant le parasite jusqu'au séparateur.

Si un by-pass³ du séparateur à balayage d'air est prévu, la recirculation interne des gaz sur le séparateur ne doit pas être prise en compte, car elle peut difficilement influencer les flux thermiques globaux du séparateur. Cependant, si des prises d'air parasite frais sont présents dans cette dérivation, le refroidissement par cet air froid doit être pris en compte en ajustant le taux d'air parasite de la sortie du broyeur au séparateur en conséquence. Un réglage

³ La dérivation d'un séparateur balayé par l'air est une dérivation de gaz de la sortie du ventilateur du séparateur vers l'entrée du séparateur afin de permettre un contrôle du débit de gaz du séparateur relativement indépendant de la ventilation du broyeur.

approprié de cette entrée parasite est également nécessaire si un séparateur statique doit être installé entre la sortie du broyeur et l'entrée du séparateur.

Le taux de production est calculé sur la base des matières premières alimentées et inclut la poussière provenant du système de four avec les gaz chauds.

La poussière dans le gaz du four est calculée à partir de la perte de poussière du préchauffeur et du gaz du préchauffeur utilisé dans l'usine concernée.

La poussière dans l'excès d'air du refroidisseur doit être réglée manuellement (cellule Z38), sur la base d'une estimation correcte.

1 Matières premières vers broyeur							
	alimentation (humide) t/h	Humidité % water	Temperature °C		Produit (sec) t/h	Humidité (res.) % water	Temperature °C
Matière première	150.0	5.0%	21		142.5	0.4%	99
Alimentation (humide)	150.0	5.0%	21	Produit (sec)	145.154	@ 0.0 % humidité et poussière système de four incluse	
				Produit (vers silo)	145.737	@ 0.4 % humidité et poussière système de four incluse	

Figure 32: Capture d'écran de la section "Matières premières vers le broyeur"

3.2.3.2 Système de broyage

Dans cette section, les données opérationnelles du système de broyage sont définies. Sur la base de la puissance absorbée par le ventilateur du séparateur et de l'augmentation de la pression au-dessus du ventilateur, le débit de gaz du broyeur à boulets jusqu'au circuit du séparateur est calculé. Cependant, le débit de gaz réellement utilisé doit encore être inséré manuellement dans la cellule D31.

On suppose que l'énergie électrique introduite dans le système est convertie en chaleur selon les estimations suivantes :

- 97 % de la puissance d'entraînement de l'enveloppe du broyeur à boulets
- 100 % de la puissance du séparateur
- La puissance du ventilateur du séparateur n'est pas prise en compte (la limite du bilan thermique est l'entrée du ventilateur du séparateur).

La recirculation de la matière du séparateur vers le broyeur (charge de circulation définie comme le rapport entre le débit d'alimentation du séparateur et le produit du séparateur) est saisie manuellement (sur la base d'une mesure de la courbe de Tromp ou d'une mesure fiable du débit de matière rejetée) et la température de rejet est calculée sur la base de la quantité d'admission d'air parasite de la sortie du broyeur vers le séparateur, de la puissance du séparateur ainsi que des pertes par rayonnement et convection (50 % des pertes totales de

R&C sont supposées être attribuables au séparateur, ce qui inclut le dépoussiérage et les conduits).

Les pertes totales par rayonnement et convection de l'ensemble du système du broyeur à boulets sont estimées et sont généralement de l'ordre de 10 kJ/kg de produit pour un système de traitement des gaz bien isolé.

Le pivot des calculs du bilan thermique est la température des gaz de sortie du broyeur. Cette température de gaz ne doit pas tenir compte de l'entrée d'air parasite généralement élevée à la sortie du broyeur. Cette température doit donc être mesurée dans le tourillon du broyeur à boulets afin d'éviter toute extinction du gaz de sortie du broyeur par l'air parasite de l'ensemble.

2 Système de broyeur		Broyeur à balayage d'air		Moteur principal du broyeur	
Type de broyeur	Broyeur à balayage d'air				
Dépoussiéreur du séparateur	Cyclones avant ventilateur du séparateur				
Puissance réelle du ventilateur du séparateur	320	kW	Puissance réelle du moteur principal du broyeur	2'500	kW
Efficacité du moteur du ventilateur du séparateur	94.0%		Efficacité du moteur principal du broyeur	92.9%	
Efficacité du ventilateur du séparateur	75.0%				
Température des gaz à l'entrée du ventilateur	96	°C	SEEC à l'enveloppe du broyeur	16.0	kWh/t
Pression d'entrée du ventilateur du séparateur	-40	mbar	Diamètre interne de la partie vide de l'enveloppe du broyeur	4.2	m
Pression de sortie du ventilateur du séparateur	-1	mbar	Degré de remplissage du broyeur	30.0%	
Efficacité du cyclone	95.0%				
Charge de poussière au ventilateur	411	g/m3	Injection d'eau dans le broyeur	-	m3/h
Flux e gaz au ventilateur du séparateur (calc.)	174'506	m3/h			
Flux des gaz au ventilateur du séparateur (usé)	177'300	m3/h			
Air parasite du séparateur au ventilateur du séparateur	5.0%		Température des gaz en sortie de broyeur	100	°C
			Pression en sortie de broyeur	-10	mbar
Flux des gaz au séparateur	166'188	m3/h	Flux des gaz en sortie de broyeur	156'105	m3/h
Flux des gaz spécifiques du séparateur	2.47	kg/m3	Vitesse des gaz en sortie de broyeur (cops)	4.5	m/s
Puissance réelle du moteur du séparateur	220	kW			
Air parasite de la sortie du broyeur au séparateur	5.0%		Matériaux du broyeur recirculés	3.0	
Air parasite autour du broyeur	5.0%		Température des produits & rejets	99.3	°C
Air frais utilisé à l'entrée du broyeur	25'900	Nm3/h	suggestion temperature de rejet	59.5	°C
Pertes de radiation & convection	10	kJ/kg prod.	Erreur de balance thermique	-0.28%	
			Chaleur effective requise du GGC	118 MkJ/h	

Figure 33: Capture d'écran de la section "Système de broyage"

3.2.3.3 Flux de gaz du système de four

Dans cette section, les flux de gaz provenant du système du four sont définis. Dans les cellules D55:E55, le point d'extraction des gaz du four est sélectionné. Si l'extraction du gaz du four se fait après le ventilateur ID et si une tour de conditionnement du gaz est installée et utilisée avant le ventilateur ID, le refroidissement du gaz par injection d'eau doit être pris en compte. Pour ce faire, il faut ajuster la température après le refroidissement du gaz de manière à ce que la différence d'enthalpie par rapport à la tour de conditionnement du gaz devienne nulle (**Data > What-if-Analysis > Goal seek....> Set cell : H59, à la valeur : 0, en modifiant la cellule : H58**). Si un cyclone de dépoussiérage supplémentaire est installé sur le trajet des gaz de la tour de préchauffage (souvent installé sur le trajet des gaz des broyeurs de charbon pour réduire la quantité de poussière du préchauffeur dans le broyeur de charbon), la sélection adéquate doit être effectuée dans les cellules D56:E56.

À partir du bilan thermique du four, la quantité totale disponible de gaz du four et d'air excédentaire du refroidisseur est importée et affichée. La quantité de gaz de combustion et d'air de refroidissement qui peut être utilisée dans un système de broyeur particulier dépend de la quantité de gaz consommée par tous les autres broyeurs. Ainsi, le gaz de four disponible et l'air excédentaire du refroidisseur disponible représentent le débit de gaz **maximal** disponible pour **tous** les systèmes du broyeur. Cependant, dans la plupart des cas, seuls 80 % de l'air excédentaire du refroidisseur peuvent être utilisés, car un certain débit d'air minimum vers le système d'air résiduaire du refroidisseur doit être maintenu pour permettre un contrôle correct de la pression de la hotte du four.

Les taux d'air parasite dans le système de gaz du four et du refroidisseur sont basés sur des estimations ou proviennent d'une mesure d'air parasite. Pour le calcul du bilan thermique, il est supposé que tout l'air parasite dans le gaz du four et l'excès d'air du refroidisseur entrent dans les circuits directement à l'entrée du broyeur.

3 Flux de gaz dans le système de four			
Point d'extraction du az PC	Après préchauffeur		Ne pas tenir compte de la cellule
Dépoussiérage additional après PC	Cyclone haute efficacité		
Efficacité dépoussiérage aditionnel	50.0%		
Laisser cellule E51 vide			
			<i>T@FC exit</i> 320 °C
			<i>T@ID Fan</i> 258 °C
			16'672
<i>Available gas from preheater (calculated)</i>	164'095	Nm ³ /h	320 °C
Gas actually used from preheater (w/o false air)	67'000	Nm ³ /h	315 °C
<i>Available waste / middle air at cooler (calculated)</i>	119'216	Nm ³ /h	320 °C
Air actually used from cooler (w/o false air)	-	Nm ³ /h	320 °C
False air preheater to mill	4.0%		
False air cooler to mill	2.0%		

Figure 34: Capture d'écran de la section "Flux de gaz du système de four"

Si aucun gaz n'est disponible dans le système du four et qu'un générateur de gaz chaud est utilisé à la place, le bilan thermique du four doit être ajusté de manière à refléter les conditions réelles de fonctionnement du générateur de gaz chaud (régler le type et le taux de combustible, éliminer la chimie du clinker pour éviter les gaz de calcination, régler la température de sortie du générateur de gaz chaud en conséquence).

3.2.3.4 Flux de gaz du système de broyage

Dans cette section, les flux de gaz normalisés dans le broyeur sont calculés. Après avoir défini le débit de gaz du four et le débit d'air du refroidisseur, le débit d'air frais à l'entrée du broyeur doit être ajusté pour minimiser l'erreur du bilan gazeux (voir le conseil dans la cellule 179, qui apparaît si la différence de débit est supérieure à 100 Nm³/h).

Le débit de gaz du four et le débit d'air du refroidisseur dépendent des exigences de séchage dans le broyeur à boulets et peuvent être vus dans le résumé du bilan thermique du broyeur.

4 Flux de gaz dans le système de broyage					
Gaz usé du système de four <i>(incl. air parasite et eau du conduit descendant du GCT)</i>	69'680	Nm ³ /h		Air used from cooler <i>(incl. false air)</i>	0 Nm ³ /h
Air frais utilisé à l'entrée du broyeur <i>(incl. air parasite)</i>	25'900	Nm ³ /h		Total kiln/cooler gases	69'680 Nm ³ /h
Gaz à l'entrée du broyeur	95'346	Nm ³ /h			
Air parasite autour du broyeur (entrée) Evaporation d'eau au broyeur	4'767 8'604	Nm ³ /h Nm ³ /h			
Gaz à la sortie du broyeur	108'717	Nm ³ /h	100 °C		
Air parasite de la sortie du broyeur au ventilateur du broyeur	5'436	Nm ³ /h			
Gaz à la sortie du séparateur	114'153	Nm ³ /h	99.3 °C		
Air parasite à la sortie du séparateur vers le ventilateur du séparateur	5'708	Nm ³ /h			
Gaz à l'entrée du ventilateur du broyeur	119'861	Nm ³ /h	96.2 °C	suggestion	96.2 °C

Difference gas balance -234 Nm³/h
(Mill gas + cooler air + fresh & false air) - mill inlet gas
Reduce gas flow into mill!!!

Figure 35: Capture d'écran de la section "Flux de gaz dans le système de broyage"

3.2.3.5 Bilan thermique des broyeurs

Dans cette dernière section, un résumé de toutes les entrées et sorties de chaleur est affiché et les flux de gaz spécifiques normalisés dans l'usine sont indiqués.

L'erreur du bilan thermique est indiquée et devrait être inférieure à 5 %, si toutes les données d'entrée sont correctes.

En cas de manque de séchage et de chaleur dans le broyeur (erreur négative du bilan thermique), il faut soit augmenter les flux de gaz chauds du système de séchage vers le broyeur, soit réduire la quantité d'eau injectée (le cas échéant).

En cas de manque de refroidissement dans le broyeur (erreur positive du bilan thermique), il faut soit réduire le flux de gaz chauds du système de séchage vers le broyeur (et par conséquent augmenter l'air frais), soit augmenter la quantité d'eau injectée.

5 Mill heat balance		MJ/h	Nm ³ /kg prod.* kg/kg prod.*	°C	kJ/kg prod.
Entrées	Alimentation broyeur (incl. humidité)	149	1.029	21	10
	Total chaleur sensible du gaz de four usé (incl. poussière)	32'265	0.478	316	2214
	Total chaleur sensible du refroidisseur (incl. poussière)	0	0.000	320	0.0
	Total chaleur sensible de tous les airs frais et air parasites	289	0.305	21	2.0
	Total chaleur sensible de l'injection d'eau dans le broyeur	0	0.000	25	0.0
	Puissance électrique totale des moteurs principaux convertie en chaleur: 0 kW	8'851	-	-	60.7
Total		41554			285.1
Outputs	Production broyeur (incl. humidité et poussières du ventilateur du broyeur, four et refroidisseur)	10'546	1.000	99	72.4
	Evaporation humidité alimentation broyeur	16'907	0.039	21	116.0
	Evaporation injection eau broyeur	0	0.000	25	0.0
	Total chaleur sensible du gaz de broyeur à l'entrée du ventilateur (excl. poussières)	12'760	0.824	96	87.6
	Total perte de rayonnement et de convection	1'457	-	-	10.0
	Erreur balance thermique	-0.3%	-18	-	-0.8
Total		41554			285.1

*production (kg prod) inclut produit humide résiduels, poussières des gaz de sortie du système de broyeur ainsi que poussières du système de four

Figure 36: Capture d'écran de la section "Bilan thermique des broyeurs"