
RAPPORT D'ALTERNANCE

OPTIMISATION DE LA FINESSE DU CRU

EN SORTIE DE BROYEUR

Préambule

Ce rapport d'alternance s'inscrit dans le cadre de ma formation en Génie des Procédés Industriels à CPE Lyon. Il a pour objectif de rendre compte d'un projet réalisé durant ma première année d'alternance tout en illustrant les compétences que j'ai pu développer au cours de cette période en entreprise.

Mon alternance s'est déroulée au sein d'une cimenterie du groupe Vicat, un environnement industriel exigeant où les enjeux liés à la production mais aussi à la qualité et la sécurité sont particulièrement importants. Cette première année d'alternance m'a permis d'être immergée dans un secteur où les procédés ont une place essentielle et mieux comprendre les problématiques techniques propres à la production en industrie.

Mon choix de suivre cette formation et d'effectuer mon alternance en cimenterie s'appuie sur un fort intérêt pour le secteur industriel, ainsi que sur la volonté de m'orienter vers la production afin de mieux appréhender les problématiques concrètes du terrain, au-delà des aspects purement théoriques.

Ce rapport a été rédigé dans le but de présenter de manière structurée les différentes étapes de mon travail sur le projet d'optimisation de finesse du cru : de la découverte du fonctionnement global de l'entreprise à la réalisation du projet.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le groupe VICAT, et plus particulièrement Martial LAFOY, directeur d'usine et également mon tuteur, de m'accueillir pendant 3 ans sur le site de Montalieu-Vercieu, et de me donner l'opportunité de découvrir le métier d'ingénieur procédé. Je souhaite également le remercier pour le temps qu'il m'a consacré, son accompagnement, le partage de ses connaissances et sa bienveillance. Je suis extrêmement reconnaissante de la confiance et de l'autonomie qu'il m'a accordé tout au long de mon stage.

Je remercie également l'équipe process qui m'a accueillie dans les meilleures conditions et m'a accompagnée de près. Grâce à leur esprit d'équipe, leur pédagogie et leurs conseils, ma première année d'alternance s'est déroulée dans les meilleures conditions.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des équipes de tous les services de l'entreprise pour leur disponibilité et leur aide précieuse chaque fois que j'en ai eu besoin. Leur bienveillance et leur accueil m'ont permis de m'intégrer rapidement et de travailler dans les meilleures conditions.

Je terminerai en remerciant Elise FOURNIER, enseignant tuteur, pour son suivi et son investissement.

SOMMAIRE

NOMENCLATURE ET ABREVIATIONS	8
I. INTRODUCTION	9
II. LE GROUPE VICAT	10
II-1 Son histoire.....	10
II-2 Ses activités	10
III. LA CIMENTERIE DE MONTALIEU-VERCIEU	14
III-1 Organisation	14
III-2 Activités	15
IV. PROCEDE DE FABRICATION DU CIMENT.....	16
IV-1 Les carrières et la pré-homogénéisation	17
IV-2 Le cru	18
IV-3 La cuisson	19
IV-4 Le ciment.....	23
IV-5 Le contrôle qualité	24
V. LES BROYEURS CRU	25
V-1 Broyeur à boulets.....	25
V-2 Broyeur vertical à galets	26
VI. PROJET D'OPTIMISATION DE LA FINESSE DU CRU.....	28
VI-1 La mesure de finesse.....	28
VI-2 Les problématiques actuelles liées à la finesse.....	30
VI-3 Les solutions.....	32
VI-4 Prises d'échantillons	34
VI-5 Résultats et exploitation.....	37
VII. LES PERSPECTIVES POUR LA SUITE.....	39
VIII. CONCLUSION.....	40
IX. BIBLIOGRAPHIE	42
ANNEXE 1 – Norme EN 196 - Partie 7 : Méthodes de prélèvement et d'échantillonnage du ciment	44
ANNEXE 2 - Résultats finesses échantillons 1 ^{er} lieu de prélèvement	45
ANNEXE 3 – Plan d'expérience pour les essais finesse.....	46
ANNEXE 4 - Résultats finesses échantillons 2 nd lieu de prélèvement.....	47
ANNEXE 5 - Risques Qualité Hygiène Sécurité Environnement (QHSE) liés à mon projet...	48

Table des figures

Figure 1 : Frise chronologique des grandes étapes de développement du groupe VICAT.....	10
Figure 2 : Activités du groupe VICAT	11
Figure 3 : Carte des différentes cimenteries VICAT en France	11
Figure 4 : Carte présentant la présence à l'international du groupe (12 pays)	12
Figure 5 : Différents types de granulats	13
Figure 6 : Centrale à béton VICAT.....	13
Figure 7 : Organigramme simplifié des différents services.....	14
Figure 8 : Cimenterie de Montalieu-Vercieu	15
Figure 9 : Photographies de carrières	17
Figure 10 : Hall marne	18
Figure 11 : Schéma simplifié des flux de matière et de gaz au niveau du four et de la tour de préchauffage	20
Figure 12 : Schéma simplifié des différentes phases de formation du clinker	22
Figure 13 : Photographies d'un four rotatif, de la flamme et du clinker	22
Figure 14 : Refroidisseur	23
Figure 15 : Hall de stockage du clinker.....	23
Figure 16 : Broyeur à boulets et broyeur vertical à galets.....	24
Figure 17 : Schéma des silos de stockage ciment.....	24
Figure 18 : Broyeur à boulets.....	26
Figure 19 : Schématisation des galets sur la table	26
Figure 20 : Schématisation de la recirculation externe	27
Figure 21 : Schématisation de la recirculation interne	28
Figure 22 : Tamiseuse alpine Retsch avec les deux tamis de 90 et 200 μm	29
Figure 23 : Répartition des refus à 90 μm de janvier 2021 à janvier 2025.....	30
Figure 24 : Répartition des refus à 200 μm de janvier 2021 à février 2025	30
Figure 25 : Graphique montrant l'évolution des refus à 90 μm sur la journée du 1/07/25 accompagné des paramètres de marche du broyeur.....	31
Figure 26 : Séparateur dynamique.....	32
Figure 27: Représentation des flux de matières et de gaz dans le broyeur cru.....	33
Figure 28 : Galet avec un nouveau bandage et un bandage usé	34
Figure 29 : Lieux de prélèvement de mes échantillons	34
Figure 30 : Lieu de prélèvement 1	35
Figure 31 : Fonctionnement d'un filtre à manches	35
Figure 32 : Aéroglissière	36
Figure 33 : Lieu de prélèvement 3.....	36
Figure 34 : Graphique des refus à 90 μm en entrée tour de préchauffage (3 ^{ème} lieu de prélèvement) depuis mars 2025	38
Figure 35 : Graphique des refus à 200 μm en entrée tour de préchauffage (3 ^{ème} lieu de prélèvement) depuis mars 2025	38
Figure 36 : Bandage du galet 4 le 24/07/25.....	39
Figure 37 : Graphique de l'évolution des KWh/t au B7.....	40

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Caractéristiques des différentes qualités de ciments</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 2 : Résistances des ciments.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 3 : Combustibles secondaires avec leur PCI</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 4 : Exemple de composition du cru</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 5 : Analyses sur la matière</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 6 : Comparaison entre les broyeurs verticaux avec les broyeurs à boulets</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 7 : Données finesses 2021, 2022, 2023, 2024</i>	<i>31</i>

NOMENCLATURE ET ABREVIATIONS

DECA : Décarbonaté

CEM : Cement

SATMA : Société Anonyme de Tuyaux de Matériaux et d'Agglomérés

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

CSS : Combustibles Solides de Substitutions

DND : Déchets Non Dangereux

DD : Déchets Dangereux

MTB : “More Than Business”, nom de l’entreprise qui fournit le combustible

TC : Tour de conditionnement

Exh : Exhauteur

C1, C2, C3, C4, C5 : Cyclones 1, 2, 3, 4, 5

BAF : Boite à Fumée

Préca : Précalcinateur

DRX : Diffraction des rayons X

Fluo X : Fluorescence X

BK : Broyeur Clinker

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de mes trois années de cycle ingénieur en Génie des Procédés Industriels à CPE Lyon, j'effectue mon alternance au sein de la cimenterie du groupe Vicat à Montalieu-Vercieu, de septembre 2024 à juillet 2027.

La cimenterie de Montalieu-Vercieu est l'un des sites majeurs du groupe. C'est la plus grande cimenterie Vicat en France, mais c'est aussi le 6^e site industriel le plus polluant du pays, notamment en raison de la décarbonation du calcaire et de l'utilisation de combustibles fossiles. Malgré cela, la demande mondiale en ciment reste très forte, avec plus de 4 milliards de tonnes vendues chaque année dans le monde. Cela est dû notamment à la croissance urbaine, à la construction d'infrastructures et à des projets de reconstruction dans les zones touchées par des catastrophes ou des conflits armés.

Face à ces défis environnementaux, économiques et sociétaux, le groupe VICAT s'engage dans des démarches d'innovation : amélioration de l'efficacité énergétique, utilisation de combustibles alternatifs, développement de nouveaux ciments à faible empreinte carbone, ou encore valorisation de déchets industriels. Le rôle des ingénieurs procédés est alors central pour accompagner ces transitions technologiques.

Au cours de cette première année d'alternance, je suis impliquée dans différentes missions au sein du service procédé. Un projet m'a notamment été confié autour d'un sujet qualité portant sur la finesse du cru en sortie de broyeur. Cette mission constitue une excellente opportunité pour approfondir ma compréhension du processus de fabrication du ciment, en particulier la préparation du cru : choix et gestion des matières premières, broyage, homogénéisation... Elle me permet également de me familiariser concrètement avec les équipements clés, notamment le broyeur cru, dont j'ai pu étudier le fonctionnement, les paramètres de conduite et les réglages opérationnels.

Ce rapport a pour objectif de présenter dans un premier temps le groupe Vicat dans son ensemble, puis de s'intéresser plus particulièrement au site de Montalieu et au procédé cimentier. Ensuite, je présenterai le travail réalisé sur mon projet. Enfin, je conclurai par un bilan de cette année d'alternance et par les perspectives que j'envisage pour la suite de ma formation.

II. LE GROUPE VICAT

II-1 Son histoire

Le groupe VICAT a été créé en 1853 par Joseph Vicat, fils de Louis Vicat, ingénieur renommé et inventeur du ciment artificiel. L'entreprise familiale n'a cessé de se développer, jusqu'à devenir aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans les secteurs du ciment, du béton et des granulats, avec une présence dans 12 pays répartis sur 4 continents.

L'évolution de VICAT peut être structurée en plusieurs grandes étapes de développement, que nous allons résumer ci-dessous :

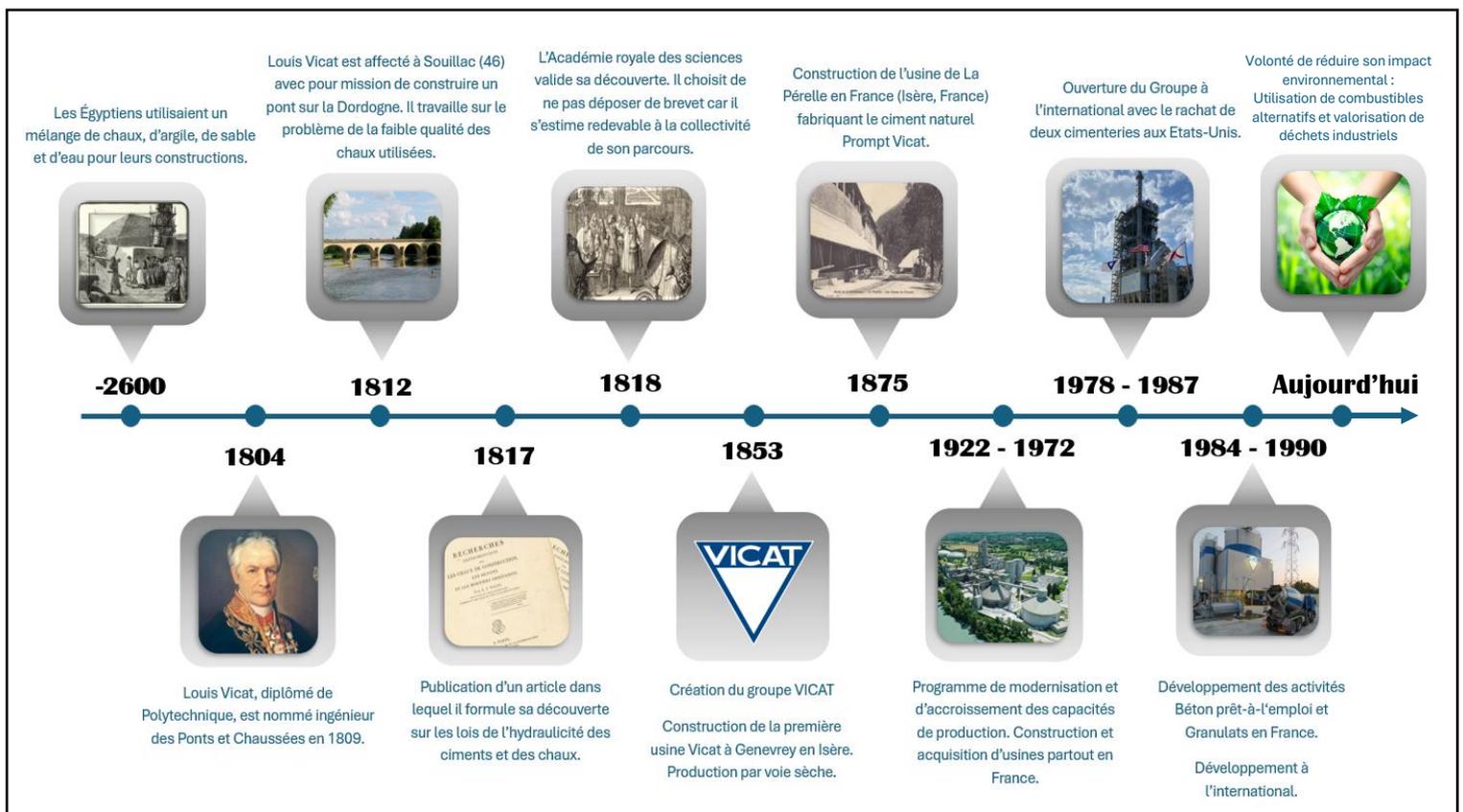


Figure 1 : Frise chronologique des grandes étapes de développement du groupe VICAT

II-2 Ses activités

Le groupe VICAT est un acteur international dans le domaine des matériaux de construction. Son activité repose sur trois principaux domaines : le ciment, les granulats et le béton prêt à l'emploi.

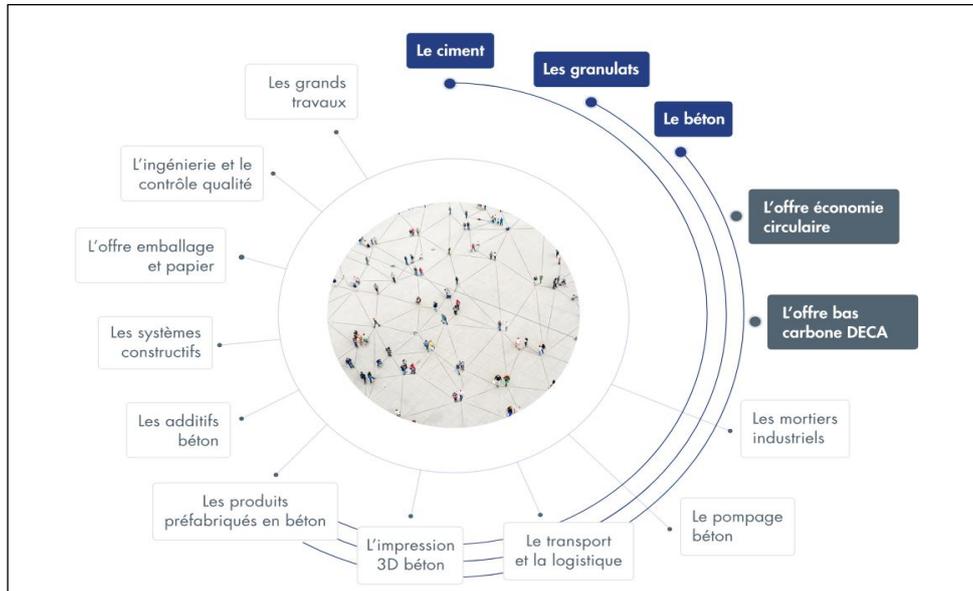


Figure 2 : Activités du groupe VICAT

A - Le ciment

Chaque année, 28 millions de tonnes de ciment sont vendues par VICAT. Le groupe possède 17 cimenteries à travers le monde dont 5 en France.

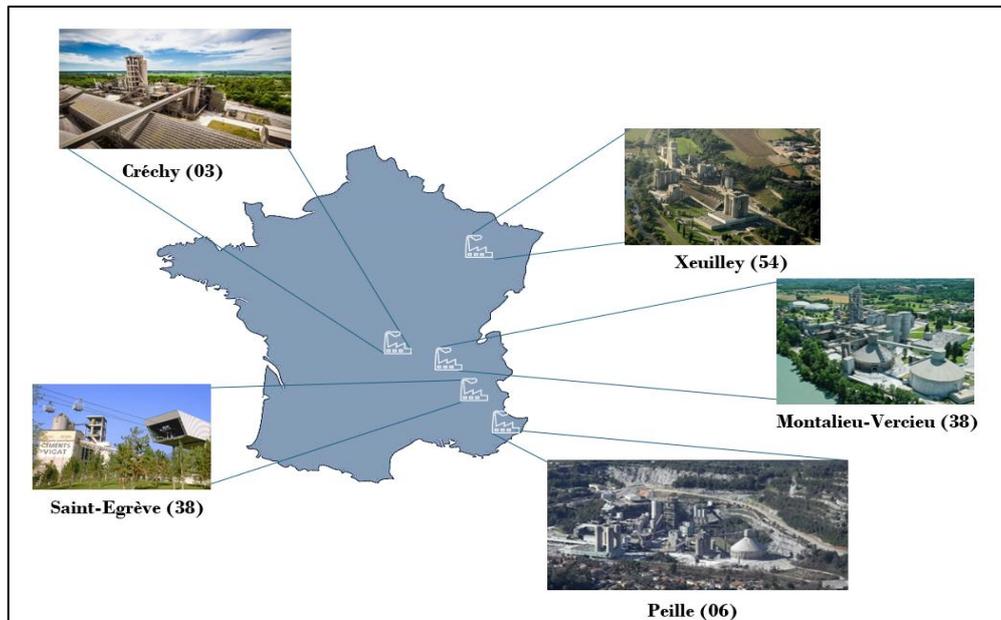


Figure 3 : Carte des différentes cimenteries VICAT en France

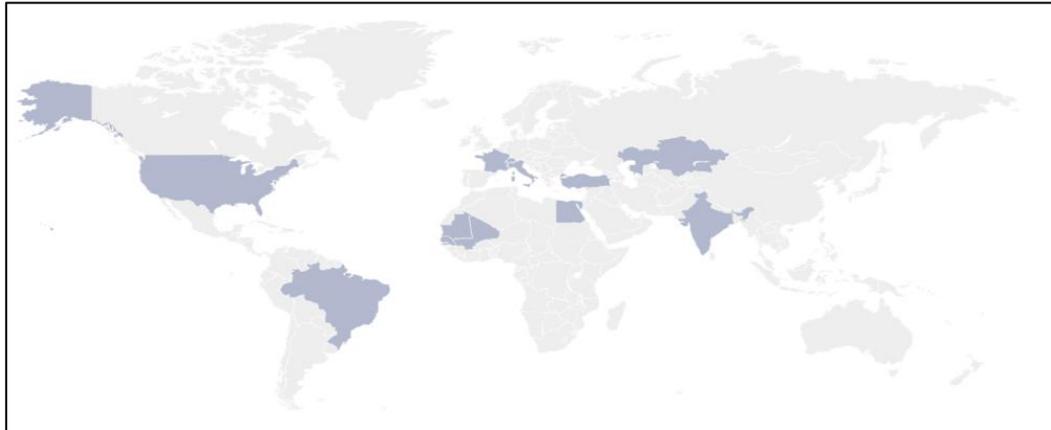


Figure 4 : Carte présentant la présence à l'international du groupe (12 pays)

Le groupe Vicat produit, en Europe, plusieurs types de ciments classés selon les normes européennes. Ces différents types de ciments correspondent à des applications spécifiques : la construction résidentielle, la construction d'ouvrages d'art, les travaux souterrains... Les différentes propriétés de ces ciments dépendent : de la composition chimique des matières premières, des ajouts éventuels lors du broyage et de la finesse du produit. La quantité de constituants secondaires se lit sous forme de lettres :

- A signifie peu de constituant
- B pour une quantité moyenne
- C pour un important taux de constituants secondaires.

Le ciment se décline en plusieurs niveaux de résistance : 32.5, 42.5, 52.5 MPa. Il s'agit du niveau de résistance minimale à la compression mesurée sur un échantillon après 28 jours. Plus l'indice est élevé, plus le ciment est résistant. De plus, le ciment peut avoir une prise normale ou rapide. Trois indices caractérisent la résistance initiale : « L » comme « lent », « N » comme « normal », « R » comme « rapide ».

Tableau 1 : Caractéristiques des différents types de ciments

	CEM I	CEM II		CEM III			CEM IV	CEM V	
		CEM I A	CEM I B	CEM III A	CEM III B	CEM III C		CEM V A	CEM V B
Appellation	Ciments Portland	Ciments Portland composés		Ciments de Haut-Fourneau			Ciments pouzzolaniques	Ciments laitiers	
Composition	Au min 95% de clinker et au max 5% de constituants secondaires	Au min 80 à 94% de clinker et au max 6 à 20% d'autres constituants	Au min 65 à 79% de clinker et au max 21 à 35% d'autres constituants	Au min 35 à 64% de clinker et au min 36% de laitier	Au min 20 à 34% de clinker et au min 66% de laitier	Au min 5 à 19% de clinker et au min 81% de laitier	Clinker et pouzzolane (matériau d'origine volcanique)	40 à 64% de clinker, 18 à 30% de laitier et 16 à 30% de cendres volantes siliceuses	20 à 38% de clinker, 31 à 50% de laitier et 31 à 50% de cendres volantes siliceuses
Utilisation	Ouvrages classiques en béton armé (bâtiments industriels et commerciaux et la construction résidentielle...)			Travaux souterrains en milieux agressifs ou dans les travaux à la mer.			Barrages, digues, zones exposées aux sulfates ou chlorures		

Tableau 2 : Résistances des ciments

Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5 L	-	10	30
32,5 N	-	14	30
32,5 R	8	-	30
42,5 L	-	14	40
42,5 N	8	-	40
42,5 R	18	-	40
52,5 L	8	-	50
52,5 N	18	-	50
52,5 R	28	-	50

B- Les granulats

Les granulats sont des matériaux naturels (sables et graviers) ou recyclés. Essentiels pour la production de bétons, ces matériaux sont principalement utilisés dans l'élaboration de revêtements de route. Actuellement, Vicat produit et vend plus de 24 millions de tonnes de granulats et possède 71 carrières. On distingue plusieurs sortes de granulats, qui se caractérisent par leur composition chimique et physique, notamment la taille des grains et la dureté.



Figure 5 : Différents types de granulats

C - Le béton



Figure 6 : Centrale à béton VICAT

Le béton, composé de ciment, de sable, de gravier, d'eau et d'adjuvants, possède des caractéristiques distinctes selon son application et les quantités de matières premières utilisées. Le béton est produit dans des centrales situées à proximité des lieux de chantiers (entre 20 et 30 km). En effet, en raison du temps de prise, le béton doit être livré sur le lieu de mise en œuvre dans un délai maximum de deux heures. Selon les besoins du chantier, des centrales mobiles peuvent être mises en place. Aujourd'hui, Vicat vend 10 millions de m³ de béton et possède 273 centrales.

III. LA CIMENTERIE DE MONTALIEU-VERCIEU

Construite en 1922 au bord du Rhône, la cimenterie de Montalieu-Vercieu est aujourd'hui l'une des plus performantes du groupe. Après des travaux de modernisation et d'augmentation de sa capacité de production en 2007 et 2008, cette cimenterie est aujourd'hui l'une des plus modernes d'Europe. La production annuelle est capable d'atteindre 2 millions de tonnes.

III-1 Organisation

Plus de 100 salariés travaillent dans l'usine. Le personnel est reparti entre différents services :

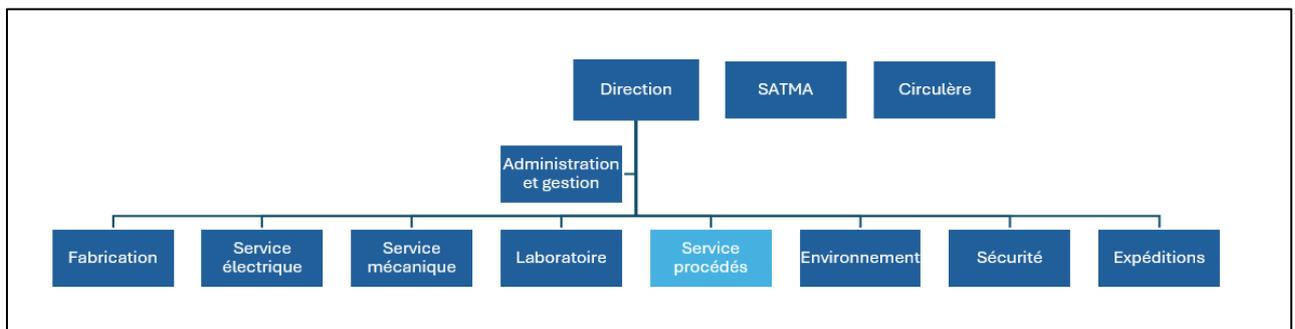


Figure 7 : Organigramme simplifié des différents services

Une filiale de VICAT, appelé Circulère, s'occupe de tous les approvisionnements de l'usine en termes de combustibles et matériaux de substitution. Elle contribue à la valorisation des terres excavées (dépollution des sols), au le recyclage des matériaux issus de la déconstruction et rend possible la substitution des combustibles fossiles par des combustibles alternatifs.

La SATMA s'occupe de l'extraction et l'exploitation des matières premières dans les carrières du groupe.

Le service procédé est composé de 2 ingénieurs et un technicien supérieur. L'équipe intervient sur les problématiques quotidiennes de l'usine et sur des projets d'amélioration continue. En tant qu'alternante, j'ai intégré cette équipe et participé aux interventions et aux résolutions de problèmes quotidiens, en travaillant en parallèle sur mon projet d'optimisation de la finesse du cru.

III-2 Activités

La cimenterie de Montalieu-Vercieu produit 7 qualités de ciment différentes :

CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 N	CEM II/A 52,5 R	CEM II/A 42,5 R	CEM II/A 42,5 N	CEM II/B 42,5 R	CEM II/B 32,5 R
-----------------	-----------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------



Figure 8 : Cimenterie de Montalieu-Vercieu

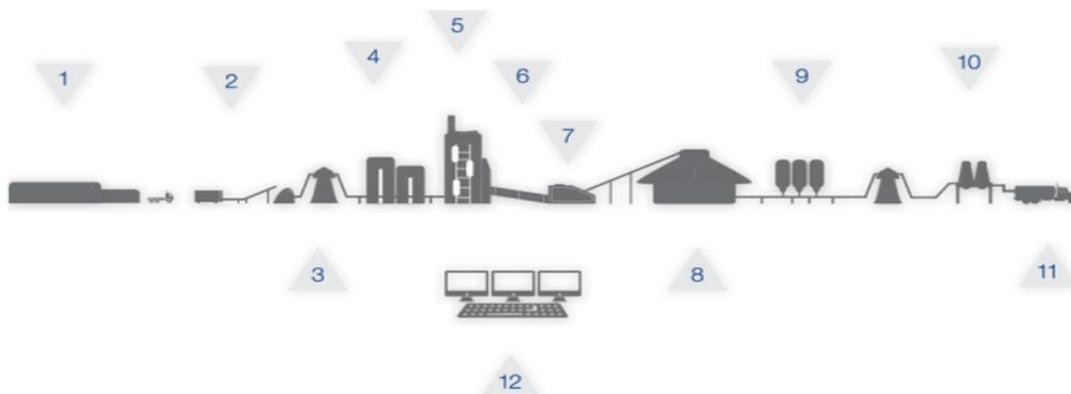
L'usine est aussi engagée dans une démarche environnementale, en valorisant des combustibles alternatifs et en travaillant sur la réduction de ses émissions. Ainsi, en plus des combustibles fossiles (charbon et coke de pétrole), des combustibles de substitution sont utilisés.

Tableau 3 : Combustibles secondaires avec leur PCI

COMBUSTIBLE	PCI (kcal/kg)
L 3 - HUILES	9000
L 4 - SOLVANT_G3000	6600
L 5 - EAUX POLLUEES_G2000	150
ZONE 1 - PNEUS + Résidus broyés automobile	3600
ZONE 2 - CSS BOIS DD	4020
ZONE 3 - Déchet solides broyés 1	3800
ZONE 4 - Déchets solides broyés 2	3800
ZONE 5 - CENDRES_VOLANTES	200
ZONE 6 - BOIS DND OU DD	7500
ZONE 8 - Farines animales	4000
ZONE 9 - Valortec	9800
ZONE 10 - MTB (plastiques broyés)	8000

IV. PROCEDE DE FABRICATION DU CIMENT

De la carrière au conditionnement, le processus de fabrication du ciment comporte 12 étapes.



- ▼ Carrière
- ▼ Concassage et pré-homogénéisation
- ▼ Broyage du cru
- ▼ Homogénéisation,
- ▼ Préchauffage
- ▼ Cuisson en four rotatif
- ▼ Refroidissement
- ▼ Stockage hall clinker
- ▼ Ajouts et broyage du ciment
- ▼ Stockage du ciment
- ▼ Expéditions
- ▼ Salle de contrôle avec pupitre

IV-1 Les carrières et la pré-homogénéisation

La fabrication du ciment commence dans les carrières, où sont extraites les matières premières nécessaires à la fabrication du ciment : le calcaire et la marne. Ces roches proviennent de carrières à ciel ouvert proches de l'usine : Énieu à 2km qui est une carrière de marne et Mépieu à 7km qui est une carrière de calcaire. L'extraction se fait par tirs de mines et les blocs de roches, dont les dimensions peuvent atteindre 1x1x1 m ou plus, sont transportés par dumper vers des concasseurs qui vont réduire leurs dimensions à 0-0,1 m. Puis la matière est acheminée par des convoyeurs à bande vers les deux halls de pré-homogénéisation.



Figure 9 : Photographies de carrières

Pour fabriquer du ciment, certains éléments chimiques sont recherchés comme le calcium (Ca), le silicium (Si), l'aluminium (Al) et le fer (Fe). Ces éléments se retrouvent naturellement dans les matières premières utilisées : le calcaire apporte principalement le carbonate de calcium (CaCO_3), tandis que la marne, un mélange d'argile et de calcaire, fournit la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et les oxydes de fer (Fe_2O_3). Le bon équilibre entre ces constituants est crucial pour obtenir un ciment performant, car il détermine la formation des minéraux clés du clinker lors de la cuisson, comme les silicates et aluminates de calcium.

Les roches extraites de la carrières, concassées et acheminées jusqu'à la cimenterie, sont stockées dans des halls de pré-homogénéisation. Il y a 2 halls : un pour la marne et l'autre pour le calcaire. Ils ont chacun une capacité de stockage de 30 000 tonnes. Une pré homogénéisation de la matière est réalisée grâce à un procédé de dépôt circulaire en couche superposé, suivi d'un prélèvement transversal à l'aide d'un gratteur. Cela permet d'obtenir une plus grande régularité de la composition chimique du mélange minéral, en compensant les variations naturelles liées à l'hétérogénéité des formations géologiques des carrières.

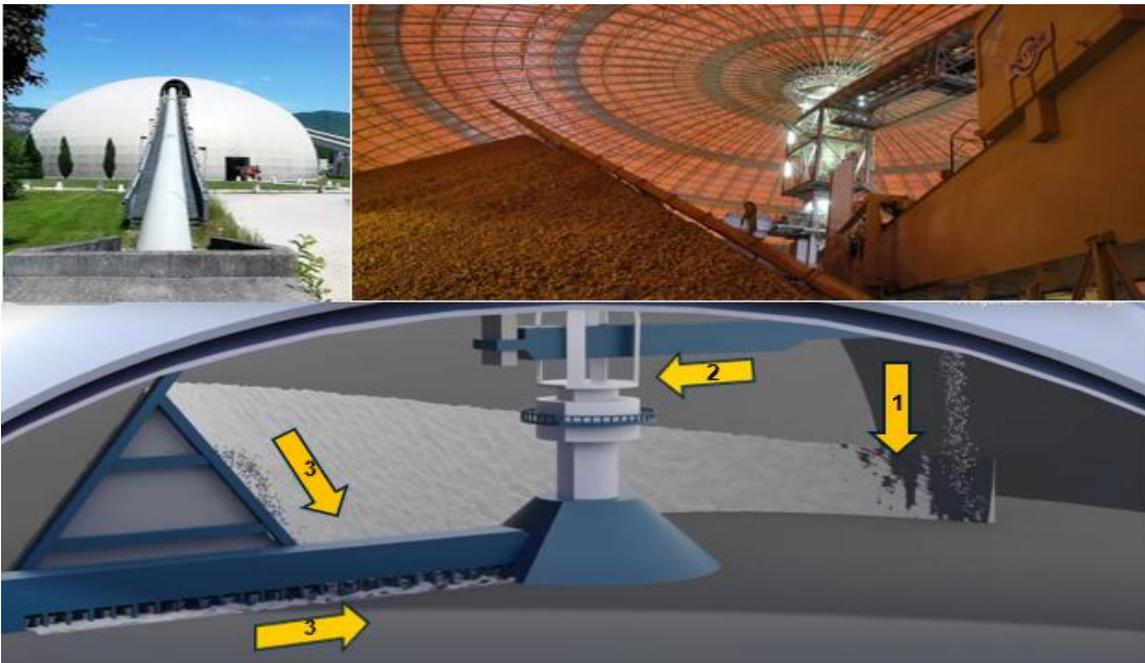


Figure 10 : Hall marne

- 1) La marne est déposée verticalement par le jeteur,
- 2) Le bras du jeteur se déplace circulairement pour former des tas en couches superposés,
- 3) Pendant ce temps, le gratteur, situé à l'opposé du jeteur, vient racler les couches formées pour faire descendre la matière et ainsi qu'elle puisse être acheminée au centre du hall où elle sera ensuite transportée jusqu'à une trémie de stockage intermédiaire. Le débit de la marne sera alors dosé puis déversé sur le convoyeur à bande pour alimenter le broyeur cru.

IV-2 Le cru

Un mélange de marne et calcaire est dosé, séché et broyé afin de réduire la roche en une poudre très fine de taille de l'ordre d'une dizaine de micron. Cette poudre est

appelée la « farine » ou le « cru ». Lors du broyage, il est possible d'ajouter certains matériaux qui permettent de limiter la consommation de ressources naturelles et d'ajuster les proportions des oxydes. Par exemple, il est possible d'ajouter des terres issues de la décontamination d'anciens sites industriels, des sables recyclés ou cendres volantes lorsqu'il n'y a pas assez de SiO₂ (S), ou encore, du minerai de fer quand il n'y a pas assez de Fe₂O₃ (F). Cela contribue à réduire, par la même occasion, la mise en décharge de ces matières.

Tableau 4 : Exemple de composition du cru

Terres Excavées	8,00%
MATEX (roche)	2,50%
Oxyde de fer	0,80%
Cendres	0,10%
Sable	8,00%
Sable de fonderie	1,30%
Marne	32,3%
Calcaire	47,00%

La part de chaque composant varie régulièrement en fonction des approvisionnements mais aussi des perturbations en carrières et sur les installations.

Après avoir été finement broyée, la farine est mélangée dans un silo d'homogénéisation : le 8KT qui, comme son nom l'indique, peut stocker jusqu'à 8000 tonnes. Cette étape d'homogénéisation permet d'obtenir une composition chimique et physique ciblée la plus régulière possible. La stabilité du four lors de la cuisson et la qualité du clinker obtenu dépendent de cette homogénéité.

IV-3 La cuisson

La farine crue homogénéisée est d'abord chauffée à plus de 900°C dans la tour de préchauffage, où la chaleur dégagée par le four est récupérée et réutilisée. La farine descend en tourbillon à travers les cyclones à contre-courant de gaz chauds. Ce procédé permet de réduire considérablement l'empreinte CO₂ du matériau. Ensuite, elle est portée à une température d'environ 1450°C dans un four rotatif de 63 mètres de long, équipé de briques réfractaires, où une flamme atteignant 2000°C est produite par une tuyère injectant des combustibles (fossiles ou de substitution).

Dans ce four, une série de réactions chimiques complexes se déroule au sein de la matière en fusion, permettant la formation de combinaisons moléculaires attendues pour obtenir le clinker.

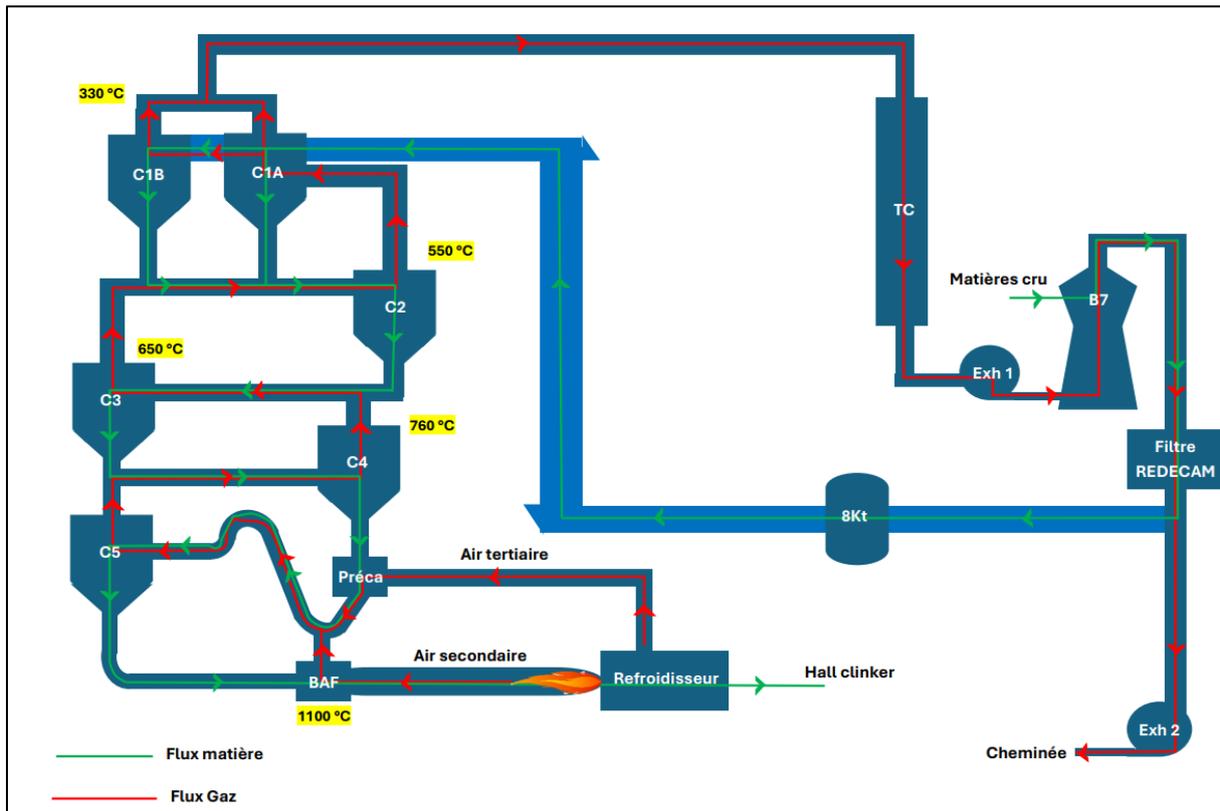


Figure 11 : Schéma simplifié des flux de matière et de gaz au niveau du four et de la tour de préchauffage

Les échanges thermiques s'effectuent à contre-courant : la matière descend et les gaz remontent le système, aspirés par un puissant ventilateur de tirage (exhausteur 1). Les gaz récupérés servent au séchage et au transport de la farine dans le broyeur cru (B7). Ils sont ensuite évacués vers un filtre à manche avant d'être rejetés à la cheminée.

La formation de clinker résulte d'une réaction chimique à haute température comprise entre 1400 et 1450°C, impliquant la chaux issue du carbonate de calcium, ainsi que l'alumine, le fer et la silice. Ces éléments réagissent pour former des silicates et des aluminates de calcium, responsables des propriétés mécaniques du ciment.

La cuisson du cru correspond à une succession de réactions physico-chimiques, à la fois endothermiques et exothermiques, que l'on peut répartir en plusieurs étapes :

- Déshydratation des argiles (environ 100-600 °C) : Les argiles contenues dans la marne perdent leurs eaux de constitution :



Cette étape prépare les minéraux argileux à réagir chimiquement avec les autres constituants.

- Décomposition du carbonate de calcium (décarbonatation) de 650 à 950 °C : Le calcaire (CaCO₃) se décompose sous l'effet de la chaleur pour former de la chaux vive (CaO) et du dioxyde de carbone (CO₂) :



Cette réaction est fortement endothermique et essentielle pour fournir la chaux libre nécessaire aux réactions suivantes.

- Réactions en phase solide de 900 à 1250 °C : Une fois les oxydes formés (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃), ils commencent à réagir entre eux lentement en phase solide. C'est à cette étape que naissent les premiers silicates de calcium : Formation de bélite (C₂S)-silicate bicalcique :



- Apparition de la phase liquide à partir de 1250-1320 °C : Une phase fondue apparaît. Elle permet aux réactions chimiques de se produire plus rapidement et plus complètement. À ce stade, les oxydes d'aluminium (Al₂O₃) et de fer (Fe₂O₃) réagissent avec la chaux pour former de l'aluminate tricalcique (C₃A) et du ferroaluminate tétracalcique (C₄AF) :



Ces deux phases contribuent à la prise du ciment et à certaines de ses propriétés mécaniques et chimiques.

- Formation de l'alite (C₃S) de 1350 à 1450 °C : C'est la réaction principale et la plus déterminante pour la qualité du clinker. À haute température, la bélite (C₂S) réagit avec la chaux libre (CaO) dans la phase liquide pour former de l'alite (C₃S), le composant majoritaire du clinker (50 à 70 %) et celui qui donne au ciment sa résistance rapide :



Cette réaction est exothermique et marque le cœur du processus de clinkérisation.

Le schéma ci-après propose une représentation simplifiée des différentes phases de formation du clinker :

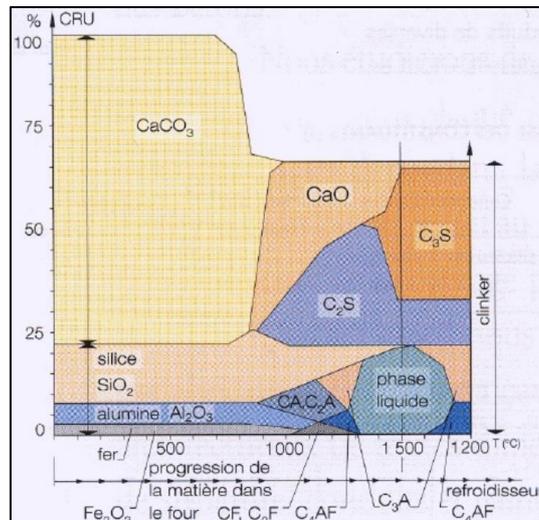


Figure 12 : Schéma simplifié des différentes phases de formation du clinker



Figure 13 : Photographies d'un four rotatif, de la flamme et du clinker

Une fois la cuisson terminée, le clinker en fusion est refroidi brutalement dans le refroidisseur grâce à un soufflage d'air. Ce refroidissement rapide, appelé « trempe », permet de stabiliser la structure cristalline nécessaire aux propriétés hydrauliques du clinker. Durant cette étape, les phases C_3A et C_4AF se forment par cristallisation. Un refroidissement rapide permet de figer le clinker dans l'état chimique et minéralogique atteint en fin de cuisson, et d'en conserver les caractéristiques à température ambiante. Le clinker prend la forme de granules de quelques centimètres, il est finalement refroidi sous une température de l'ordre de $100^{\circ}C$ avant d'être acheminé vers le hall de stockage. L'énergie thermique du refroidisseur est réutilisée pour le préchauffage de la farine crue (air tertiaire sur la Figure 11). Ce qui améliore

considérablement, l'impact environnementale du produit.

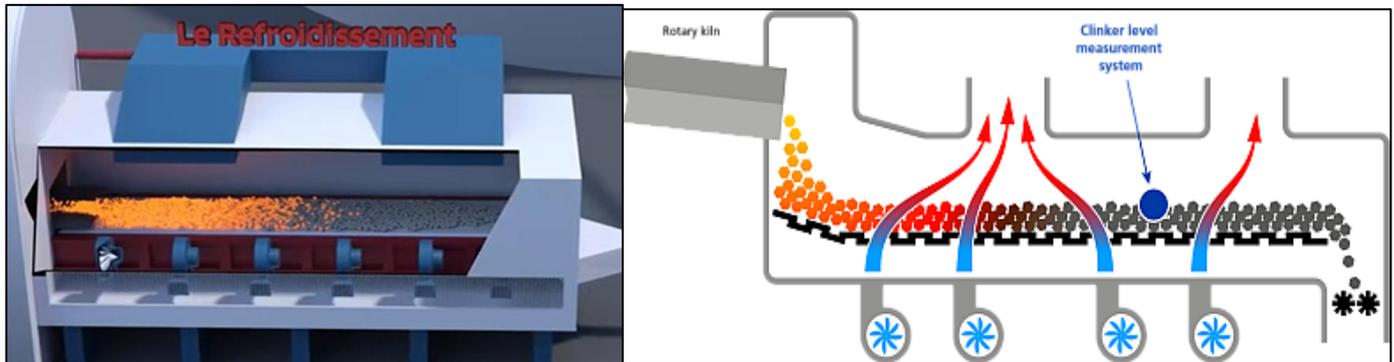


Figure 14 : Refroidisseur

Le clinker refroidi à 100°C est transporté et stocké dans un des deux halls de 68 000 tonnes permettant d'assurer une continuité de la production du ciment y compris lors des arrêts de la ligne de cuisson ou lors des arrêts de maintenance par exemple.



Figure 15 : Hall de stockage du clinker

IV-4 Le ciment

Le clinker est ensuite broyé puis mélangé avec d'autres constituants comme du gypse, qui joue le rôle de régulateur de prise ou encore les fillers calcaires ou le sulfate de fer. Les dosages sont adaptés selon la qualité souhaitée. Deux types de broyeurs sont utilisés : un broyeur vertical à galets et un broyeur à boulets. Le broyeur vertical a une capacité de production plus élevée et consomme moins d'énergie mais il ne peut pas de produire toutes les qualités de ciment actuellement à Montalieu-Vercieu.



Figure 16 : Broyeur à boulets et broyeur vertical à galets

Le ciment est stocké dans deux silos contenant chacun 18 000 tonnes, ils sont divisés en plusieurs compartiments pour stocker différentes qualités. Les camions-citernes sont remplis à la base des silos. Le ciment est ainsi vendu en vrac. En parallèle, le ciment peut aussi être vendu en sacs de 25 ou 35 kg. L'ensachage est entièrement automatisé.

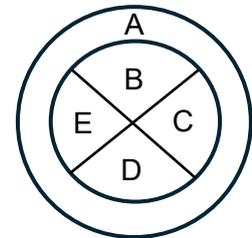


Figure 17 : Schéma des silos de stockage ciment

IV-5 Le contrôle qualité

A chaque étape de fabrication, des échantillons de matière sont prélevés et analysés chimiquement et physiquement afin de garantir un niveau de qualité conforme aux exigences. Deux techniques d'analyse principales sont utilisées : la fluorescence X et diffraction des rayons X.

Fluorescence X : Permet de déterminer les composants de la matière au travers de l'analyse qualitative et quantitative des oxydes de Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Fe... En effet, chaque élément chimique possède une configuration électronique unique, qui émet des photons d'une énergie et d'une longueur d'onde caractéristiques lorsqu'il est excité.

Diffraction des rayons X : Permet d'identifier les phases cristallines présentes dans la matière (comme l'alite, la bélite, le C3A, le C4AF...), c'est-à-dire les structures minéralogiques des constituants. La DRX fournit ainsi des informations précises sur l'arrangement atomique et la nature cristalline des composants

La qualité d'un ciment se mesure à la constance de sa composition chimique et de ses performances mécaniques.

Tableau 5 : Fréquences des analyses sur la matière

Désignation	Analyses	Fréquence
Cuttings de carrière	Perte au feu Fluo X	A chaque sondages
Matières premières	Perte au feu Humidité Composition par fluo X Densité	Au minimum 1/mois
Sortie broyeur cru	Perte au feu, finesse Composition par fluo X	1/heure
Désignation	Analyses	Fréquence
Entrée four	Perte au feu Finesse Composition par fluo X	1/heure
Farines chaudes cyclones	Perte au feu Composition par fluo X	au moins 1/poste
Combustibles non dangereux	PCI, Humidité, cendres SO ₃ , Cl	1/mois 1/semaine 1/mois
Combustibles dangereux	PCI, Humidité, cendres Composition	A chaque lot / livraison (Scori) + vérification Vicat
Clinker	CaO libre Composition par fluo X Calcul des modules cimentiers Teneur en chrome VI Etude minéralogique Broyabilité Poids au litre Clinker gypsé (finesse, résistances)	Echantillon auto (17min) Ech manuel 2/ postes 2/ postes 2/ postes 1/mois ou plus si dérive " " " Au moins 1/semaine pour anticiper les évolutions du clinker et des résistances

V. LES BROYEURS CRU

V-1 Broyeur à boulets

Sur le site de Montalieu-Vercieu, plusieurs broyeurs à boulets sont utilisés pour broyer du charbon, du cru et du clinker : B5 (charbon), BK2 (clinker), BK1 (clinker). Cette année, seul le B5 et le BK2 ont été en activité.

Le broyeur à boulets est composé d'un grand cylindre métallique en rotation autour d'un axe horizontal. A l'intérieur, des blindages en acier résistants aux chocs et à l'abrasion protègent ce cylindre. Il est divisé en deux ou plusieurs chambres séparées par des cloisons en acier. Les chambres sont remplies par des boulets en acier sphériques, de diamètres différents, utilisés pour broyer la matière. Celle-ci est alimentée à l'une des extrémités, puis entraînée par un flux de gaz le long du cylindre. Le broyage dure généralement entre de 3 et 5 min. Le cylindre peut atteindre jusqu'à 6 m de diamètre et 16 m de longueur.



Figure 18 : Broyeur à boulets

V-2 Broyeur vertical à galets

Sur le site de Montalieu-Vercieu, plusieurs broyeurs verticaux à galets sont utilisés pour broyer du cru, du clinker et du filler : BK3 (clinker), B7 (cru ou filler), B6 (filler). Cette année, seul le B7 et le BK3 ont été en activité.

La matière à broyer est introduite dans le broyeur via un sas d'alimentation qui introduit la matière au centre de la table de broyage. Cette table tourne généralement à une vitesse comprise entre 18 et 30 tours par minute. Le broyage se fait selon le principe du lit de matière : une couche de matière est compactée puis broyée entre deux surfaces tournantes, un galet et une table, qui sont pressées l'une contre l'autre. Le maintien d'un lit de matière stable est essentiel pour assurer un bon fonctionnement du broyeur. En effet, un lit trop mince entraîne une pression insuffisante entre les galets et la table, provoquant d'importantes vibrations. Inversement, un lit trop épais peut aussi générer des déséquilibres. Pour stabiliser ce lit, de l'eau peut être injectée sur la table afin d'ajuster l'humidité de la matière. Une matière trop sèche favorise également l'apparition de vibrations.

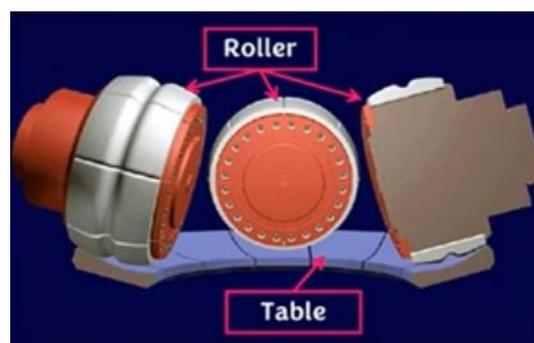


Figure 19 : Schématisation des galets sur la table

Le broyeur cru est traversé par un flux de gaz chauds, provenant du refroidisseur et du four. Ces gaz permettent de sécher la matière durant son passage dans le broyeur et de transporter les particules fines vers le séparateur. Les particules ayant atteint la granulométrie requise sont alors dirigées vers le filtre, avant d'être envoyées dans le circuit de production. Les particules trop grossières sont renvoyées soit :

- directement sur la table (recirculation interne),
- en dehors du broyeur pour être réintroduites via un circuit externe (recirculation externe).

▪ Recirculation externe :

Elle concerne les particules qui ne sont pas suffisamment fines et qui tombent à travers l'anneau de buse (endroit où entrent les gaz). Cette matière est récupérée par un scraper sous la table, puis extraits par un convoyeur de reprise, remontés par un élévateur, et réintroduits à l'entrée du broyeur.

Cette recirculation permet de réduire la charge aéraulique dans le broyeur (moins de matière à transporter par les gaz), ce qui limite les pertes de charge.

Le débit de recirculation externe est généralement de 10 à 100 % du débit d'alimentation.

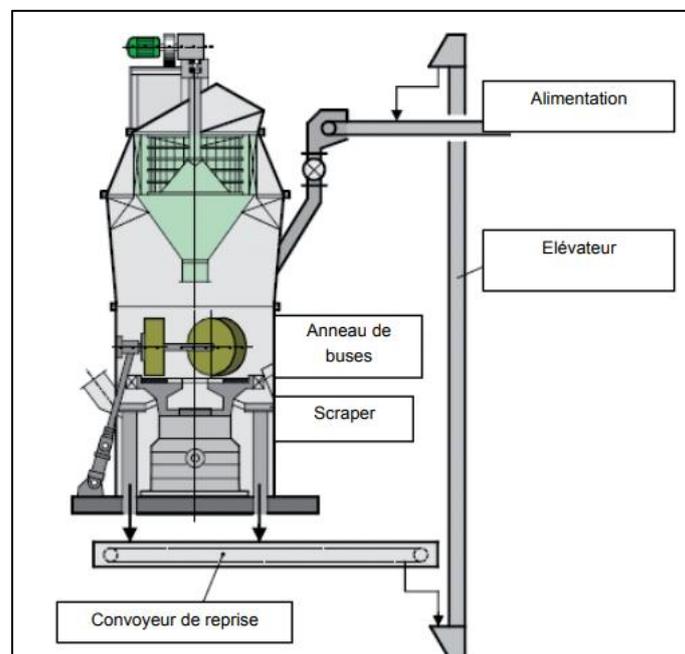


Figure 20 : Schématisation de la recirculation externe

▪ Recirculation interne :

Elle concerne les particules qui, après au moins un passage sur la table, ne sont pas assez fines pour être entraînées par le flux gazeux, mais pas assez grosses pour retomber en recirculation externe. Ces particules retournent simplement sur la table par gravité.

La recirculation interne est importante pour réduire la pression de broyage et améliorer l'efficacité du système.

Le nombre de cycles de recirculation interne peut varier entre 15 et 25, en fonction de la broyabilité de la matière et de la finesse recherchée.

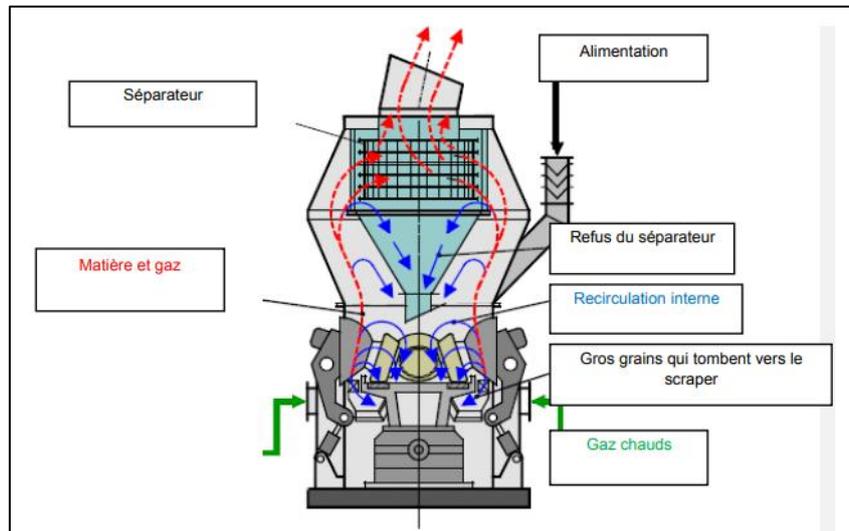


Figure 21 : Schématisation de la recirculation interne

Tableau 6 : Avantages et inconvénients du broyeur vertical à galets par rapport au broyeur à boulets

Broyeur verticaux	
Avantages ✓	Inconvénients ✗
- encombrement de l'atelier de broyage plus petit,	- plus cher à l'achat,
- capacité de production plus élevée,	- entretiens plus techniques et plus lourds (rechargement de la table et des galets, remplacement des galets),
- capacité de séchage plus importante : jusqu'à 20% d'eau,	- plus grande sensibilité de la machine aux variations de l'alimentation,
- énergie spécifique de broyage plus faible (- 25% à - 40%),	- injection d'eau nécessaire pour tenir le lit de matière,
- émissions sonores plus faibles,	- la mise au point et les réglages sont plus délicats,
- usure des blindages et corps broyant de l'ordre de 5 à 10 g/t contre 20 à 40 g/t pour les broyeurs à boulets.	

VI. PROJET D'OPTIMISATION DE LA FINESSE DU CRU

VI-1 La mesure de finesse

La finesse du cru est contrôlée une fois par jour pour assurer la régularité des résultats. Elle permet de connaître la granulométrie du mélange. Elle est ciblée pour permettre une bonne réaction chimique lors de la cuisson. En effet, la finesse est un des facteurs qui influence la qualité du clinker. Par exemple, une différence entre la taille des grains

de calcite (CaO) et du quartz (SiO₂) peut induire une hétérogénéité chimique locale et une réactivité faible. De même, la présence de grains de quartz de plus de 100 µm au sein du cru va modifier les équilibres et les cinétiques de réactions et conduire à une composition minéralogique locale un peu différente du reste. Les particules de quartz de plus de 45 µm conduisent à la formation de clusters de bélite. Ces derniers réagissent difficilement avec la chaux disponible pour former de l'alite. De plus, ces clusters causent des difficultés lors du broyage du clinker à cause de leur dureté relativement plus élevée¹.

La finesse est mesurée avec une tamiseuse alpine RETSCH AS200 jet.

Deux tamis sont utilisés : un de 90 µm et un de 200 µm.

A l'aide d'un courant d'air, une différence de pression entre les deux niveaux du tamis est créée (25 mbar). Les passants à travers le tamis sont entraînés par le courant d'air et les grains dont les dimensions sont supérieures aux mailles du tamis constituent donc les refus.

$$\text{Taux de refus (\%)} = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

Avec :

- m₁ : masse avant tamisage (g).
- m₂ : masse après tamisage (g).

Pour le cru, les cibles de finesse sont **12-14%** de refus à 90 µm et **0-1%** de refus à 200 µm.



Figure 22 : Tamiseuse alpine Retsch avec les deux tamis de 90 et 200 µm

VI-2 Les problématiques actuelles liées à la finesse

Comme précisé précédemment, la qualité du clinker passe par la régularité de la finesse du cru. Or, en comparant les résultats de finesse sur le cru des 3 dernières années, on remarque une très grosse dispersion des valeurs quotidiennes.

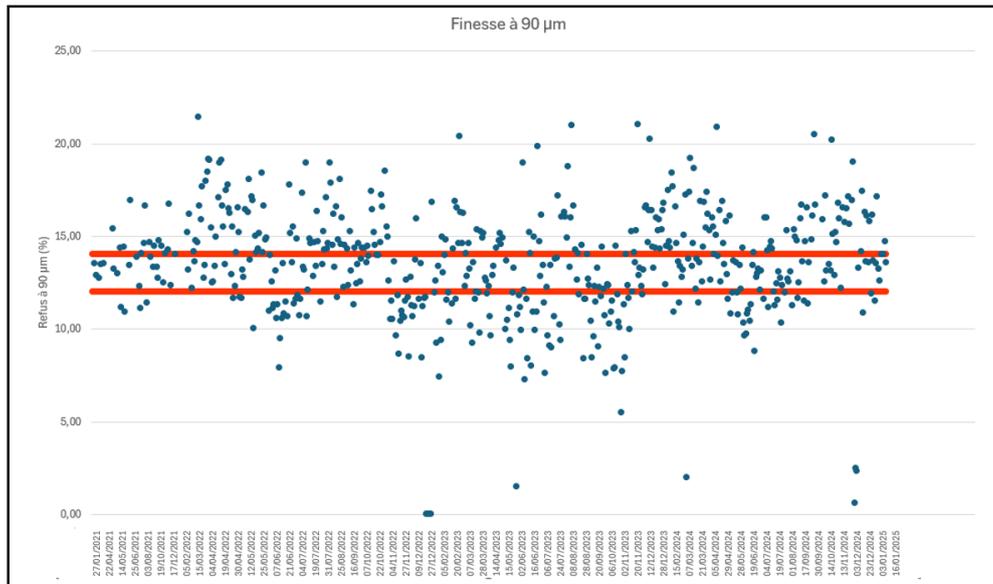


Figure 23 : Répartition des refus à 90 µm de janvier 2021 à janvier 2025

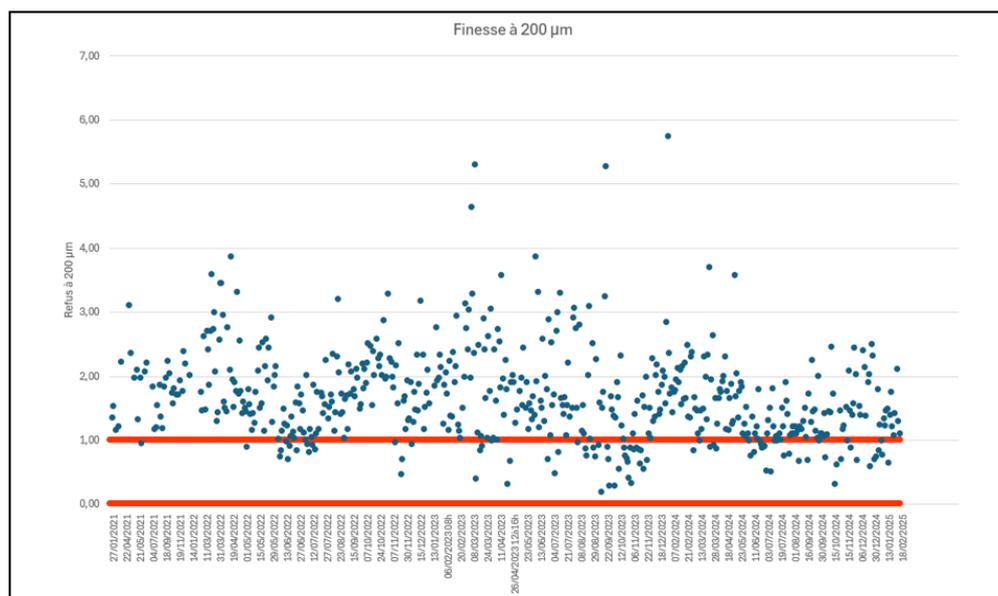


Figure 24 : Répartition des refus à 200 µm de janvier 2021 à février 2025

A 200 μm , on remarque que très peu de valeurs (15%) sont dans l'intervalle ciblé en rouge (0-1% de refus). A 90 μm , plus de valeurs (28%) sont dans les cibles mais un grand nombre se trouve en dehors de cet intervalle.

Tableau 7 : Données finesses 2021, 2022, 2023, 2024

2021			2022		
Rejets	R90 (%)	R200 (%)	Rejets	R90 (%)	R200 (%)
Moyenne	13,49	1,82	Moyenne	13,99	1,78
Ecart type	1,53	0,59	Ecart type	2,53	0,64
Max	16,93	3,1	Max	21,39	3,86
Min	10,9	0,94	Min	7,9	0,46

2023			2024		
Rejets	R90 (%)	R200 (%)	Rejets	R90 (%)	R200 (%)
Moyenne	12,56	1,72	Moyenne	14,11	1,46
Ecart type	2,95	0,86	Ecart type	2,53	0,64
Max	21	5,29	Max	20,85	5,74
Min	1,49	0,18	Min	1,98	0,31

On peut observer qu'en 2024, la moyenne des refus à 90 μm est à la hausse et de plus, les écarts types sont élevés sur les 4 années.

De plus, au-delà de la dispersion observée jour après jour, on peut aussi constater des variations au cours d'une même journée, malgré une conduite stable du broyeur. Pour illustrer cela, on peut prendre par exemple la journée du 01/07/25. Des prises d'échantillons de cru ont été réalisées chaque heure afin de suivre l'évolution sur la journée. On observe une grande dispersion des valeurs de refus à 90 μm ainsi que des valeurs hors cible. Ce phénomène est répétitif sur l'année et peut être la cause de nombreux problèmes de qualité clinker.

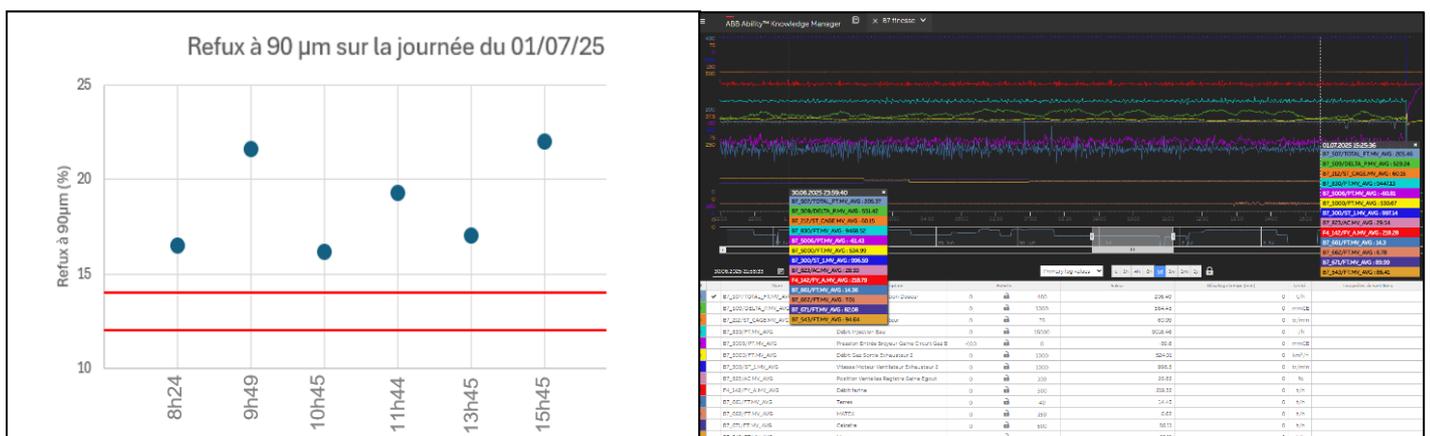


Figure 25 : Graphique montrant l'évolution des refus à 90 μm sur la journée du 1/07/25 accompagné des paramètres de marche du broyeur

VI-3 Les solutions

Pour diminuer les refus sur le cru, plusieurs paramètres peuvent être ajustés :

- La vitesse du séparateur (tr/min),
- Le débit de tirage des gaz de l'exhausteur 2 (Km³/h),
- La pression de broyage des galets (bar),
- Le débit d'injection d'eau sur la table (L/h).
- Composition du mélange cru

Les paramètres que j'ai modifiés lors de mes essais sont :

- La vitesse du séparateur

La finesse du produit final est contrôlée par la vitesse de rotation du séparateur : plus il tourne vite, plus la coupure granulométrique est fine, c'est-à-dire que seules les particules les plus petites sont autorisées à passer. En effet, l'augmentation de la vitesse du rotor génère une force centrifuge plus importante, ce qui empêche les particules grossières de franchir le champ de séparation. Ces particules sont alors rejetées et renvoyées vers la table de broyage

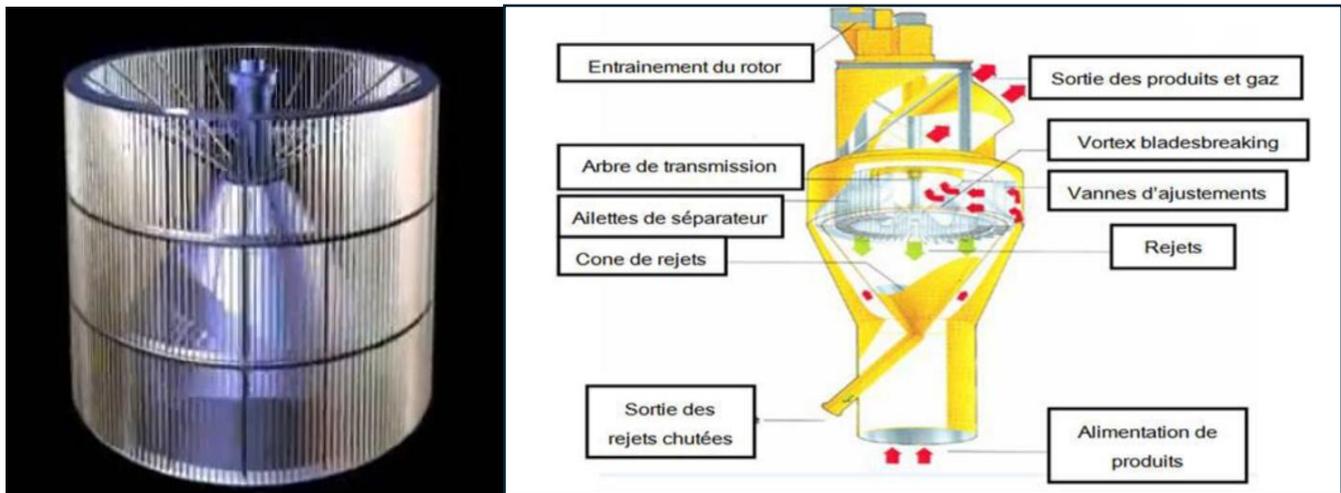


Figure 26 : Séparateur dynamique

- Le tirage des gaz par l'exhausteur 2.

En diminuant le débit de gaz tiré par l'exhausteur 2, la vitesse des gaz est réduite au milieu du broyeur car la section est plus grande ainsi, les particules grossières ont plus de mal à monter jusqu'au séparateur et retournent plus facilement sur la table.

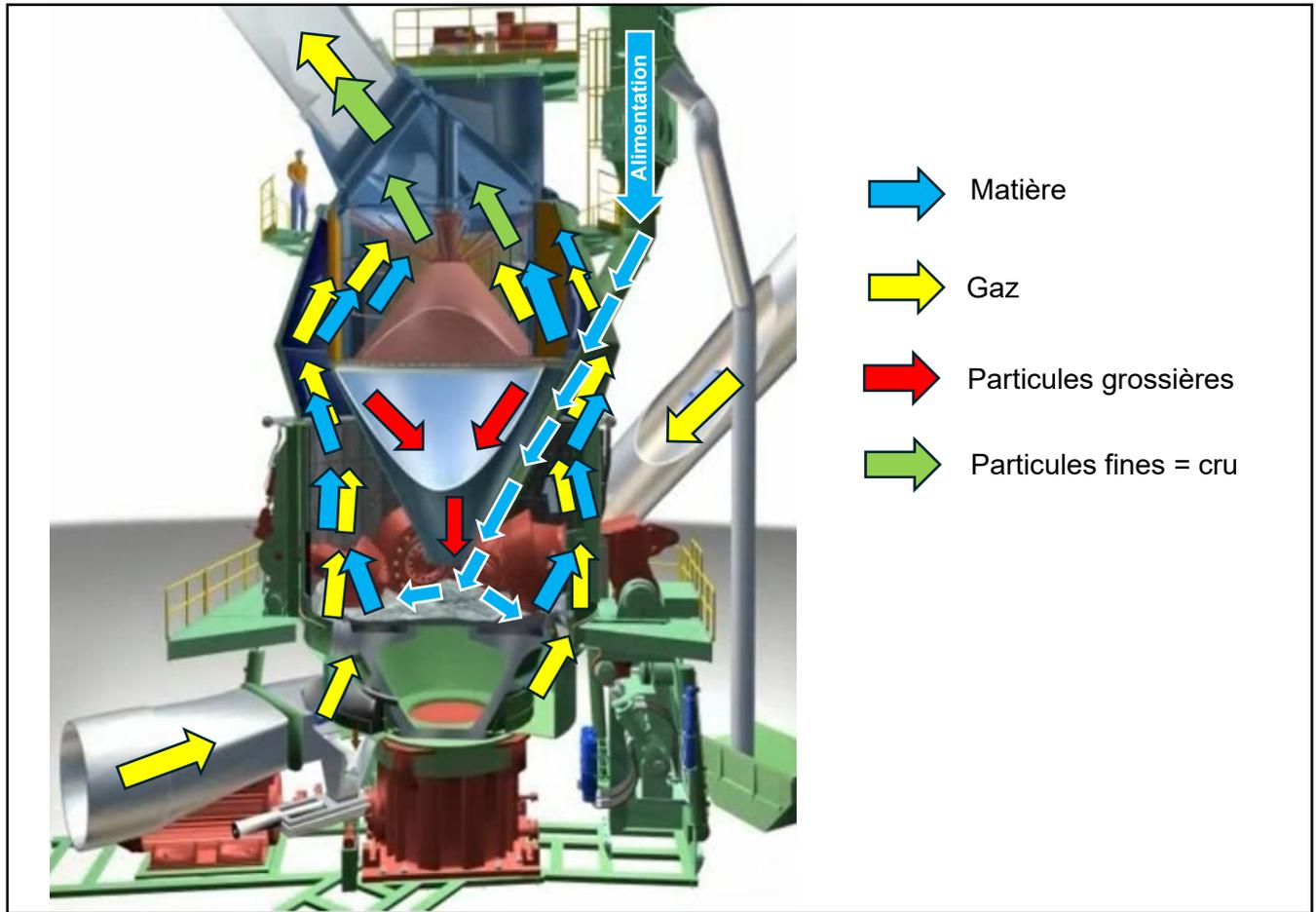


Figure 27: Représentation des flux de matières et de gaz dans le broyeur cru

Cependant, ces deux paramètres ne peuvent pas être modifiés de manière arbitraire car ils sont soumis à des contraintes opérationnelles. Le risque principal est le bouchage du broyeur, c'est-à-dire une accumulation excessive de matière dans le broyeur, entraînant un temps de séjour de la matière trop long. Pour éviter ce phénomène, il faut surveiller la différence de pression dans le broyeur ainsi que la dépression en entrée le broyeur. De plus, des particules de cru trop fines provoquent des bouchages dans la tour, notamment au cyclone 5. En effet, des particules trop fines favorisent une pré-réaction à des températures plus basses, ce qui peut entraîner un début de cuisson prématuré. Cela conduit à la formation d'agglomérats solides qui obstruent les sorties des cyclones. En cas de bouchage cyclone, un arrêt four est nécessaire et cela impact fortement la production.

Pour les autres paramètres, c'est plus délicat, il faut prendre en compte le contexte de production. Par exemple, pour la pression de broyage des galets, je n'ai pas pu l'augmenter lors de mes essais à cause de la sensibilité et la fragilité des galets depuis

le début d'année (déformations des bandages et casses). Il n'était pas judicieux de modifier ce paramètre dans un tel contexte, car le risque d'endommager davantage les galets et d'impacter la production en cas de casse était trop élevé.



Figure 28 : Galet avec un nouveau bandage et un bandage usé

VI-4 Prises d'échantillons

Pour la prise d'échantillons, plusieurs lieux de prélèvement ont été étudiés afin de caractériser la finesse du cru :

- 1^{er} lieu : Conduite en sortie de filtre REDECAM
- 2nd lieu : Echantillonneur automatique en sortie de filtre REDECAM
- 3^{ème} lieu : Aérogliissière entrée tour de préchauffage.

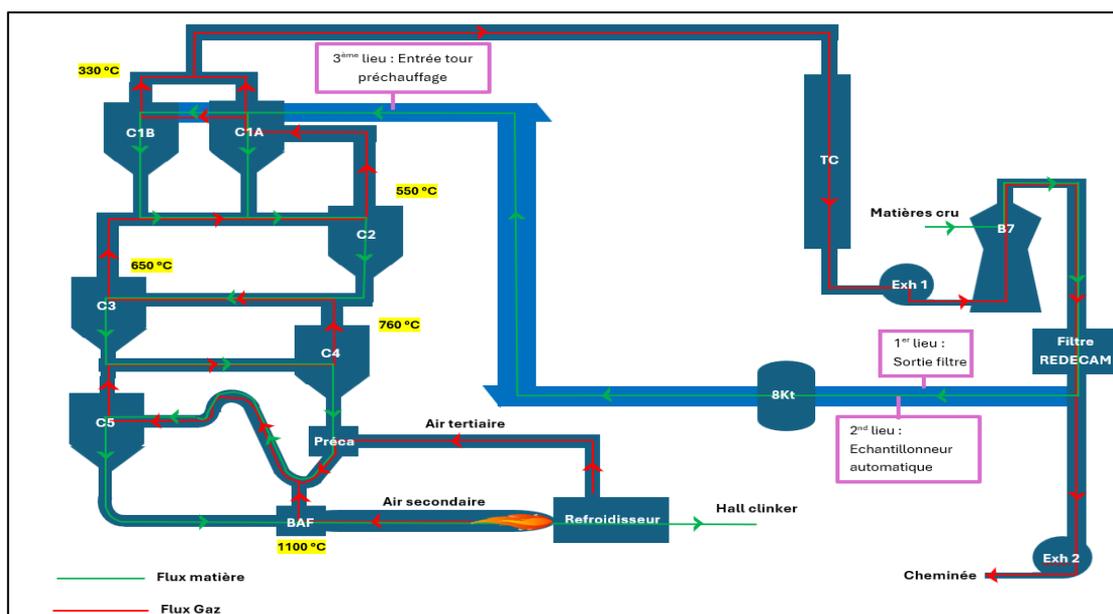


Figure 29 : Lieux de prélèvement de mes échantillons

1^{er} lieu de prélèvement : Dans une conduite en sortie de filtre REDECAM vers le 8KT

Le cru est prélevé au moyen d'une canne de prélèvement en inox directement dans une conduite verticale. Il est important de remplir 4 à 5 fois la canne sur plusieurs minutes pour constituer un échantillon pour qu'il soit le plus représentatif possible dépendamment de l'abattage du filtre REDECAM.

Principe du filtre à manche REDECAM :

Lors du passage dans le filtre, le flux gazeux chargé en matière est réparti dans plusieurs caissons équipés de manches filtrantes. La matière s'accumule sous forme de gâteau à la surface externe des manches et à intervalles réguliers (*toutes les X minutes*), un volume d'air comprimé est injecté à l'intérieur des manches provoquant la chute des particules dans la trémie inférieure. L'air filtré est amené vers la cheminée grâce à l'exhausteur 2. Ensuite, la matière est entraînée vers des sacs rotatifs qui ont eux aussi des cycles temporels de vidange, puis transférée vers une aéroglossière qui l'achemine jusqu'au stockage dans le silo 8KT.



Figure 30 : Lieu de prélèvement 1

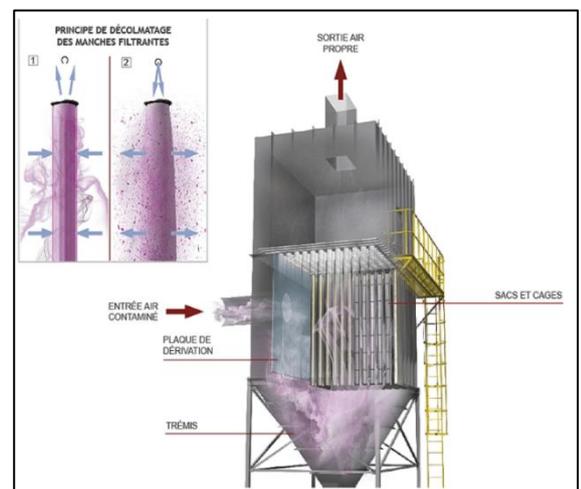


Figure 31 : Fonctionnement d'un filtre à manches

Ce premier point de prélèvement n'est pas adapté pour obtenir un échantillon représentatif. En effet, avec l'utilisation de la canne de prélèvement, il y a un contact direct entre l'échantillon et l'atmosphère, ce qui favorise la dispersion des particules les plus fines vers l'extérieur. Ainsi, l'échantillon a plus de risque d'être enrichi en particules grossières, ce qui fausse la mesure de la finesse. (c.f. ANNEXE 1). Ce biais explique les valeurs élevées et incohérentes obtenues, souvent bien supérieures à celles relevées sur d'autres lieux de prélèvement (c.f. ANNEXE 2). D'autre part, le fonctionnement cyclique de l'abattage du filtre REDECAM introduit un second biais : si le prélèvement est effectué trop tôt après un cycle, il risque de ne provenir que d'un seul caisson, et non de l'ensemble du flux global. Dans ces conditions, les mesures ne sont ni stables ni représentatives du cru réellement produit.

2nd lieu de prélèvement : Echantillonneur automatique dans une aéroglossière en sortie de filtre REDECAM.

Comme mentionné précédemment, un échantillon de cru est réceptionné automatiquement toutes les 30 min au laboratoire pour être analysé Fluo X. Chaque échantillon correspond à un prélèvement moyen sur 15 min dans une aéroglissière en sortie de filtre REDECAM. Contrairement au prélèvement manuel sur le lieu 1, cette méthode est plus représentative, car le cycle d'abattage des manches du REDECAM a eu lieu à plusieurs reprises au cours des 15 min, et il n'y a pas de contact entre l'échantillon et l'atmosphère.

C'est ce lieu que j'ai privilégié pour mes prises d'échantillons.

Une aéroglissière est un dispositif de transport de matières pulvérulentes. Elle fonctionne grâce à un flux d'air ascendant qui traverse une toile poreuse tendue au fond d'un caisson. Ce flux soulève légèrement les particules, réduisant ainsi les frottements et créant un « coussin d'air » sur lequel la matière peut se déplacer. L'ensemble est installé avec une légère inclinaison, ce qui permet à la gravité d'accompagner le mouvement et de faciliter l'écoulement du matériau vers la sortie.

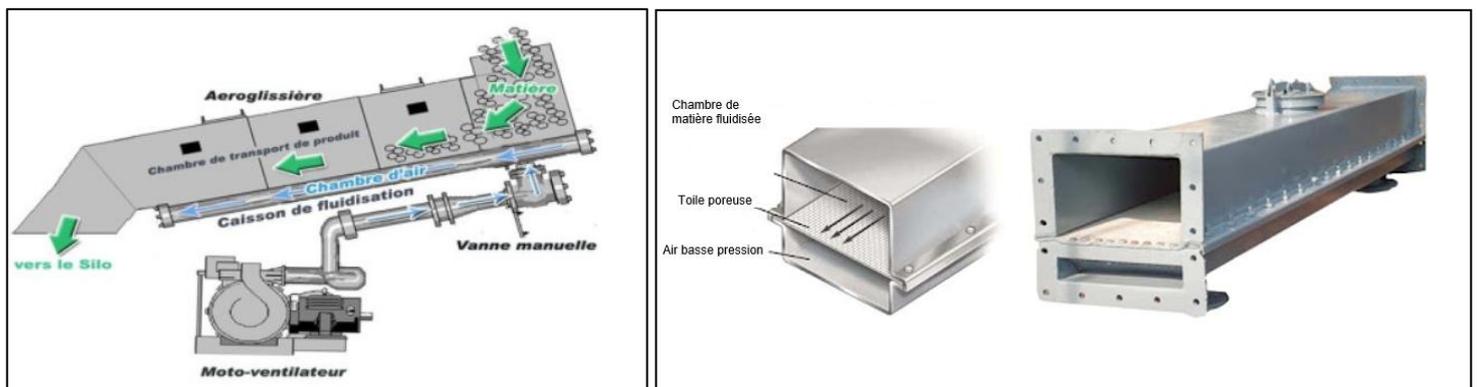


Figure 32 : Aéroglissière

3^{ème} lieu de prélèvement : Aéroglissière entrée tour de préchauffage

Le cru est prélevé à l'aide d'un distributeur automatique directement installé sur l'aéroglissière, qui amène la matière du 8KT à la tour de préchauffage. Ainsi, théoriquement, la matière a été homogénéisée dans le 8KT. Cependant, actuellement, l'homogénéisation n'est pas optimale dans le 8KT à cause d'un problème de vannes d'évents défectueuses. Ainsi, il est possible de considérer qu'en entrée tour de préchauffage, on retrouve la même matière que celle produite 3-4 h plus tôt dans le broyeur B7.

Ce lieu de prélèvement est intéressant car il représente réellement ce qui entre dans le four. En revanche, pour mes essais portant sur la production en sortie de broyeur, il est moins pertinent : le temps

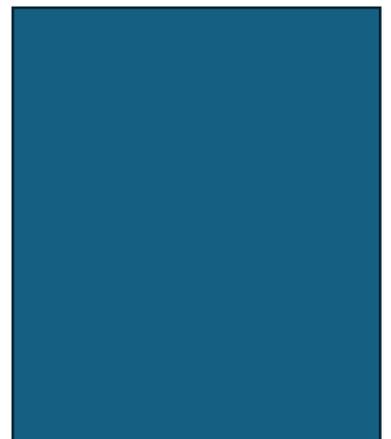


Figure 33 : Lieu de prélèvement 3

de transfert entre la sortie du broyeur et l'entrée de la tour de préchauffage est incertain, et le passage par le 8KT, même avec un mélange minime, peut modifier légèrement la composition ou la granulométrie de l'échantillon.

J'ai commencé mes essais en utilisant le 2nd lieu de prélèvement afin d'observer directement l'impact du changement de paramètres du broyeur et ainsi les ajuster rapidement. Cela m'a permis de fixer les paramètres optimaux pour la conduite du broyeur. Ensuite, dans un objectif de contrôle, j'ai utilisé ce 3^{ème} lieu de prélèvement pour suivre quotidiennement la finesse et vérifier sa conformité.

VI-5 Résultats et exploitation

Lors de mes essais, un échantillon de cru a été intercepté sur le 2nd lieu de prélèvement toutes les heures, puis analysé pour connaître sa finesse à 90 μm . Je n'ai pas pu suivre la finesse à 200 μm sur le 2nd lieu de prélèvement par soucis de manque de matière. En effet, je devais laisser de la matière pour l'analyse Fluo X. Un échantillon qui arrive au laboratoire représente environ 15 à 18 g de matière, or la mesure de finesse à 90 μm nécessite environ 10 g, et l'analyse par Fluo X consomme 5 g. Il ne restait donc pas assez de matière pour réaliser la mesure de finesse à 200 μm . J'ai donc choisi de privilégier la finesse à 90 μm , car c'est cette valeur qui est la plus couramment utilisée comme référence. Cependant, une fois les paramètres fixés, j'ai prélevé de la matière au 3^{ème} lieu de prélèvement dans un objectif de contrôle et ainsi, j'ai pu voir l'impact du changement de paramètres sur la finesse à 200 μm .

Un plan d'expérience a été fait en amont pour structurer mes essais et aussi voir influence des facteurs. (c.f. ANNEXE 3)

En accord avec les équipes de fabrication et quand la production le permettait, des essais ont été fait avec différentes vitesses de séparateur (entre 61 et 65 tr/min) et avec différents débits de gaz tiré par l'exhausteur 2 (570 à 520 Km^3/h). (c.f. ANNEXE 4)

Avant mes essais, la vitesse du séparateur était fixe à 61 tr/min et très rarement modifiée. Le tirage de l'exhausteur 2 variait beaucoup en fonction des pupitreurs, mais il était généralement autour des 560-570 Km^3/h .

Ce qui est ressorti avec la composition actuelle du cru, c'est qu'avec un débit compris entre 530 et 540 Km^3/h de gaz et une vitesse de séparateur de 65 tr/min, on a une finesse à 90 μm comprise entre 12 et 13%, ce qui est dans nos cibles.

Sur les graphiques ci-dessous, on voit l'évolution des finesses en entrée tour de préchauffage (3^{ème} lieu de prélèvement). Depuis que j'ai fixé mes paramètres, on voit

VII. LES PERSPECTIVES POUR LA SUITE

Il est important de garder à l'esprit que ces résultats sont valables pour la composition actuelle du cru, pour les conditions actuelles de marche du broyeur et pour un débit de farine compris entre 310 à 330 t/h à 4 galets et entre 200 et 225 t/h à 2 galets. Certains de ces facteurs peuvent être amenés à changer au cours de l'année ou dans les années à venir. Il est donc important que les équipes du laboratoire continuent de contrôler la finesse tous les jours.

De plus, l'usure du broyeur joue beaucoup sur la qualité de broyage et ainsi la finesse. En effet, lors du dernier arrêt du B7 le jeudi 24/07/2025, je suis entrée dans le broyeur pour inspecter les galets et leurs bandages. Ils étaient en très mauvais état. A l'arrêt d'été (septembre), les bandages vont être changés ainsi, théoriquement le broyage devrait être amélioré. Il sera donc important de revérifier la finesse à ce moment-là pour éviter des bourrages dans les cyclones en cas de matière trop fines.



Figure 36 : Bandage du galet 4 le 24/07/25

Pour rappel, le but de cette étude était de trouver des paramètres de conduite du broyeur qui permettait de stabiliser la finesse et de l'amener dans les cibles souhaitées pour améliorer la qualité du clinker et faciliter sa cuisson. Or, actuellement, le clinker produit à l'usine rencontre quelques problèmes de qualité à cause de certains combustibles. Des tests sont en cours pour en déterminer la cause mais cela ne me permet pas de conclure sur une amélioration ou non de la qualité par la réduction de la granulométrie du cru. Je suis en cours de formation l'observation microscopique des sections polies de clinker. A terme, cela me permettra d'analyser la composition minérale du clinker et ainsi conclure quant à l'impact de la finesse du cru sur la qualité clinker.

Enfin, en parallèle du sujet d'amélioration de la granulométrie du cru, il y a un sujet sur la consommation énergétique par tonnes de matière produite (KWh/t). L'atelier du broyeur B7 consomme beaucoup d'énergie et donc l'idéale aurait été de trouver des paramètres de conduite qui permettent de réduire cette consommation sur le long terme. Cependant, à ce stade du projet, je ne remarque pas de baisse significative de la consommation. En effet, malgré le fait qu'en diminuant le tirage des gaz de l'exhausteur 2, la consommation diminue, l'augmentation de la vitesse du séparateur augmente la consommation électrique.

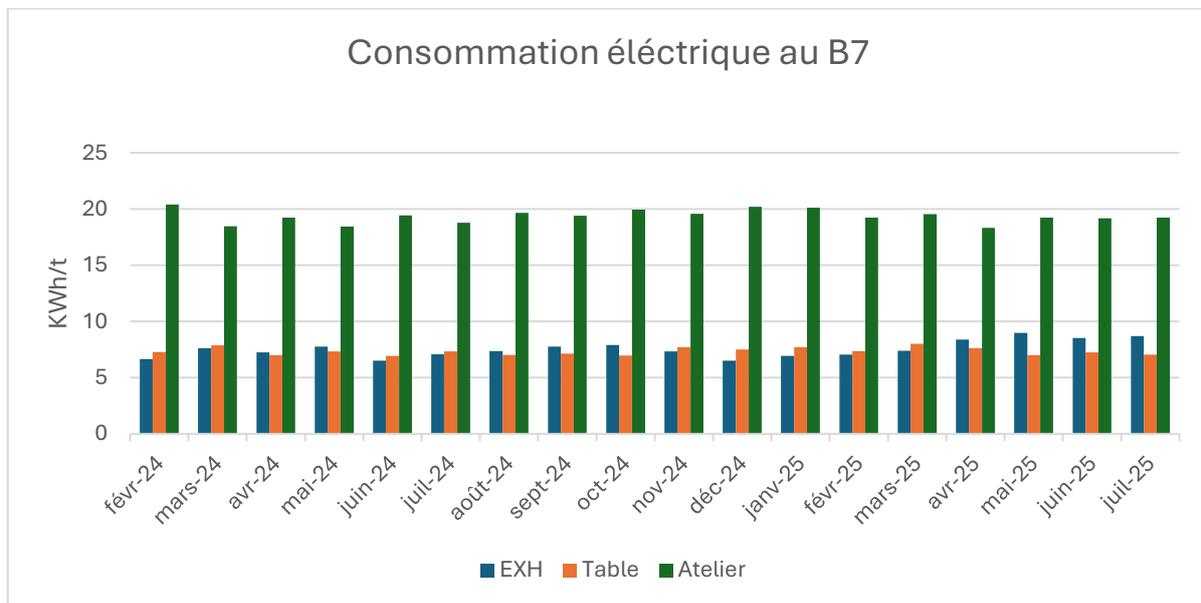


Figure 37 : Graphique de l'évolution des KWh/t au B7

VIII. CONCLUSION

Au cours de cette première année d'alternance, j'ai évolué au sein de l'entreprise, tant sur le plan professionnel que technique. Cette première année m'a permis de développer énormément de savoir et de compétences dans le secteur industriel et plus particulièrement en cimenterie. Mon projet principal, axé sur l'optimisation de la finesse du cru, m'a offert l'opportunité d'approfondir ma compréhension du processus de fabrication du ciment, notamment la préparation du cru. J'ai également pu me familiariser avec les équipements clés, en particulier le broyeur cru, dont j'ai étudié le fonctionnement, les paramètres de conduite et les réglages opérationnels. Outre les compétences pratiques développés dans le cadre de mon projet, comme par exemple le prélèvement d'échantillons, j'ai eu l'occasion d'utiliser divers instruments de mesure tels que les sondes Pitot pour évaluer les pressions statiques et dynamiques, ainsi que les anémomètres pour mesurer les débits de gaz, (rajouter des trucs), ce qui a enrichi

ma maîtrise des outils techniques.

Les premiers résultats obtenus dans le cadre du projet de finesse du cru sont encourageants, avec des valeurs stables entre 12 et 14 % et un faible écart-type. Cela montre l'efficacité des consignes de conduite mises en place depuis fin juillet. Néanmoins, il est essentiel de poursuivre le suivi quotidien de la finesse afin de consolider ces résultats. Par ailleurs, toute modification dans la composition du cru nécessitera de nouveaux essais, car elle peut influencer directement la finesse et donc la qualité du clinker.

J'ai rencontré quelques difficultés lors du travail sur mon projet. En effet, les contraintes liées à la production, les aléas du quotidien et les interruptions imprévues ont parfois compliqué la mise en œuvre des essais. Par exemple, les fluctuations dans l'approvisionnement en matières premières, comme celles provenant de fournisseurs externes (ex : MATEX et sable de fonderie), ont perturbé le rythme des tests, m'obligeant parfois à reprendre certaines étapes depuis le début. De plus, la communication entre les différents services s'est révélée cruciale. Une bonne coordination est indispensable pour réagir rapidement à toute modification, car la conduite du broyeur cru est une tâche délicate, essentielle à la stabilité de la production, surtout qu'il n'existe qu'un seul broyeur cru dans l'usine.

En conclusion, cette première année d'alternance a renforcé mon choix d'orientation professionnelle. Le secteur de la cimenterie, avec la diversité et la complexité des situations rencontrées, continue de susciter mon intérêt et de nourrir ma curiosité. C'est un domaine dynamique où l'on ne s'ennuie jamais, ce qui en fait un cadre idéal pour apprendre et progresser.

Au cours de cette première année d'alternance, j'ai beaucoup évolué au sein de l'entreprise. Cette première année m'a permis de développer énormément de savoir et de compétence en industrie et plus particulièrement en cimenterie. Outre mon projet d'optimisation de finesse du cru, qui m'a permis d'approfondir ma compréhension du processus de fabrication du ciment, en particulier la préparation du cru et également de me familiariser concrètement avec les équipements clés, notamment le broyeur cru, dont j'ai pu étudier le fonctionnement, les paramètres de conduite et les réglages opérationnels, j'ai pu utiliser tout un tas de matériel comme les sondes pitots pour mesurer des pressions statiques et dynamiques, des anémomètres pour mesurer des débits de gaz, ect ect(rajouter des trucs)

Concernant le projet de finesse du cru les premiers résultats sont encourageants, mais doivent être complétés en poursuivant le suivis des finesses chaque jour. De plus, si la composition du cru change, d'autres essais devront être programmés car il y a un risque de changement de finesse. J'ai rencontré quelques Difficulté à cause de toutes les contraintes de production, événements au jour le jour qui peuvent interrompent les essais, évènements parallèles qui impact les essais comme par exemple, les entreprises extérieures qui fournissent les matières comme les MATEX ou le sable de

fonderie qui à cause de la baisse de chantier ou autre ne peut plus plus alimenter normalement du jour au lendemain ce qui chamboule tous les essais et m'oblige à reprendre du début.

La difficulté est aussi au niveau de la communication, Il faut bien se tenir informer de tout ce qui se passe sur l'atelier de broyage mais aussi en carrière ou sur les stocks quand on fait les essais mais aussi en dehors pour être au courant si quelque chose est modifié pour réagir rapidement. Car il faut garder en tête que la conduite du broyeur est quelque chose de délicat qui est à prendre au sérieux et qui a de forts risques d'impacts sur la production en cas de problème (un seul broyeur cru dans l'usine).

Pour le moment, mes consignes de conduite du broyeur sont appliqués dans l'usine depuis fin juillet et les valeurs de finesses sont très bonnes (entre 12 et 14%) avec un faible écart type.

Pour finir, l'expérience que je retire de cette première année m'a permis de conforter mon choix d'étude. En effet, ce domaine continue de m'intriguer et de susciter mon intérêt, grâce à tous les nouveaux événements qui arrivent au jour le jour et la variabilité des sujets rencontrés. On ne s'ennuie jamais en cimenterie.

IX. BIBLIOGRAPHIE

¹ Recyclage du ciment dans le ciment : incorporation des déchets de construction et de

démolition dans le cru cimentier

ANNEXE 1 – Norme EN 196 - Partie 7 : Méthodes de prélèvement et d'échantillonnage du ciment

Il existe une norme, protégé par des droits d'auteurs qui décrit les méthodes de prélèvement et d'échantillonnage du ciment. Voici une partie de ce qu'elle contient :

Objet de la norme

Cette partie décrit les procédures et précautions à respecter pour effectuer des prélèvements de ciment représentatifs d'un lot défini, afin qu'ils soient utilisables pour les essais normalisés (par ex. résistance, finesse, temps de prise).

Le but est obtenir un échantillon représentatif de l'ensemble du lot, en évitant toute contamination, ségrégation ou perte d'humidité.

Types d'échantillons

- ▼ Échantillon ponctuel : Prélevé à un moment ou à un point donné (ex. à la sortie d'un silo, sur un tapis transporteur).
- ▼ Échantillon global : Résultant du mélange homogène de plusieurs échantillons ponctuels prélevés à intervalles réguliers.
- ▼ Échantillon réduit : Partie représentative obtenue par réduction (par exemple à l'aide d'un diviseur d'échantillon) pour atteindre la masse nécessaire aux essais.

Méthodes de prélèvement

- ▼ En vrac
 - Prélèvement à la sortie de l'ensacheuse ou du silo
 - Prélèvement sur convoyeur
- ▼ En sacs
 - Prélèvement dans plusieurs sacs choisis au hasard
- ▼ En wagons ou camions
 - Prélèvement en différents points et profondeurs

Précautions

- ▼ Utiliser des outils propres et secs (pelles, sondes, goulottes).
- ▼ Éviter tout contact avec l'humidité.
- ▼ Homogénéiser l'échantillon global avant réduction.
- ▼ Emballer dans des contenants hermétiques et étiqueter clairement (origine, date, lot, type).

ANNEXE 2 - Résultats finesses échantillons 1^{er} lieu de prélèvement

Date	Heure	Nb de galets	Débit B7 (t/h)	Mâtex (t/h)	Terres (t/h)	Marne (t/h)	Calcaire (t/h)	Vitesse séparateur (tr/min)	Débit ex2 (Km3/h)	Débit injection eau (L/h)	KWh/t	Finesse (90µm)	Finesse (200µm)
25-févr	6h30	4	320	0	0	215	80	62	543	6291	16	9,48603395	0,62
25-févr	8h15	4	320	0	0	215	80	62	540	6333	15,5	8,110993431	0,44
25-févr	10h15	4	320	0	19,9	171	108	62	544	6442	16,5	23,81583813	2,09
25-févr	11h45	4	320	0	19,5	170	112	62	544	6496	16,5	18,20308751	1,83
25-févr	13h30	4	320	8	10	150	130	62	545	6496	16,4	9,968504724	0,75
26-févr	6h15	4	320	7	20	150	130	62	556	6520	16	14,18644723	1,09
26-févr	8h15	4	320	7	20	150	130	62	559	6408	17	22,26205455	2,23
26-févr	9h30	4	320	7	20	150	130	63	552	6424,8	16,5	28,20376408	5,00
26-févr	11h45	4	320	7	20	135	140	64	545	6350	16,5	22,16307941	2,32
26-févr	14h23	4	320	7	20	140	130	65	550	6658	16,8	10,16796641	0,80
27-févr	10h50	2	185	7	0	125	60	61	559	7055		15,35	1,77
28-févr	8h20	4	320	8	19,2	150	130	61	557	5934	17	14,79196456	2,04
28-févr	10h	2	200	7	16	77	93	61	562	6592	26	21,54674598	2,54
28-févr	13h15	2	200	5	12			61	563	6602	19	12,35154157	2,28
01-juil	8h30	2	205	7	14	86	90	60	530	9500	20	16,26866566	1,33
01-juil	10h02	2	205	7	14	86	90	60	530	9500	20	11,58	0,76
01-juil	11h06	2	205	7	14	86	90	60	530	9500	20	20,09699244	2,55
01-juil	12h00	2	205	7	14	86	90	60	530	9500	20	19,51612442	1,27
01-juil	13h45	2	205	7	14	86	90	60	530	9500	20	20,00645654	2,79
01-juil	15h00	2	205	7	14	86	90	60	530	9500	20	19,78794857	2,26
02-juil	8h57	4	320	10	22	143	131	60	525	9000	16	16,35995548	1,62
02-juil	9h50	4	320	10	22	143	131	60	525	9000	16	15,33402561	1,14
02-juil	14h	4	320	10	22	143	131	61	525	9000	16	13,51652617	1,19
02-juil	15h08	4	320	10	22	143	131	61	525	9000	16	16,73094329	1,58

ANNEXE 3 – Plan d'expérience pour les essais finesse

ANNEXE 4 - Résultats finesses échantillons 2nd lieu de prélèvement

ANNEXE 5 - Risques Qualité Hygiène Sécurité Environnement (QHSE) liés à mon projet

▼ Risques sécuritaires liés à la nature de la matière manipulée :

Le cru est une matière poudreuse très fine, susceptible de générer des poussières en suspension dans l'air.

Ces poussières peuvent présenter un risque d'inhalation et provoquer des irritations des voies respiratoires.

▼ Risques thermiques

Lors du broyage, la température de la farine peut atteindre plus de X°C, ce qui présente un risque de brûlure au contact direct.

▼ Risques physiques liés à l'environnement de travail

Le prélèvement de farine s'effectue à différents endroits autour du broyeur, parfois dans des espaces peu accessibles, augmentant le risque de chutes, heurts ou blessures. De plus, l'accès à l'atelier de broyage nécessite de traverser l'usine, lieu de circulation de tous types de véhicules : camions-bennes, camions-citernes, chargeuses, voitures utilitaires, vélos... Ainsi, il est obligatoire d'utiliser les chemins piétons et les passages protégés et d'être attentif à son environnement.

▼ Risques environnementaux : consommation énergétique élevée

Un mauvais réglage (non optimisé) du broyeur peut entraîner une consommation excessive d'énergie, ce qui augmente ainsi l'empreinte environnementale du procédé.

▼ Risques de mauvaise gestion des déchets

Le surplus de mes échantillons doit être correctement géré pour éviter toute pollution du sol ou des eaux. En effet, il ne faut pas oublier que les composant du cru sont des matériaux pollués (MATEX, terres excavées, sable de fonderie...) ainsi, le surplus d'échantillon est jeté dans une bene qui part ensuite

Mesures de prévention mises en place :

▼ Port des Équipements de Protection Individuelle (EPI) obligatoires :

- Masque respiratoire adapté pour éviter l'inhalation de poussières fines.

- Gants pour manipuler les échantillons de farine chaude.
 - Lunettes de protection pour éviter toute projection dans les yeux.
 - Vêtements de travail couvrants pour limiter le contact direct avec la matière et réduire les risques d'irritation.
- ▼ Respect des consignes de sécurité autour du broyeur :
Visite du broyeur uniquement lorsque la machine est arrêtée et consignée.
- ▼ Formation et sensibilisation
Formation interne : Prélèvement cru et clinker avec personne habilitée du laboratoire.