



Mémoire de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Étude de la conformité hydrique d'un site de production
et analyse technique de la consommation d'eau
industrielle

Cas d'étude : *Cimenterie de Msila*

Réalisé par : AISSAOUI Yanis

Sous la direction de :

Mme. Souad BENTAALLA-KACED	MCB	ENP
M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	ENP
M. Smain BENGHEZAL	Manager Environnement Pays	Holcim
M. Mounir DJEGHABA	Manager Environnement à LCM	Holcim

Présenté et soutenue publiquement le 23/06/2025 devant le jury composé de :

Mme. Karima BITCHIKH	MCA	ENP	Présidente
Mme. Marya FODIL	MAA	ENP	Examinatrice
M. Amine BENMOKHTAR	MCA	ENP	Examineur
Mme. Souad BENTAALLA-KACED	MCB	ENP	Encadrante
M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	ENP	Encadrant
M. Smain BEGHEZAL	Manager Environnement pays	Holcim	Encadrant



Mémoire de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Étude de la conformité hydrique d'un site de production et analyse technique de la consommation d'eau industrielle

Cas d'étude : *Cimenterie de Msila*

Réalisé par : AISSAOUI Yanis

Sous la direction de :

Mme. Souad BENTAALLA-KACED	MCB	ENP
M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	ENP
M. Smain BENGHEZAL	Manager Environnement Pays	Holcim
M. Mounir DJEGHABA	Manager Environnement à LCM	Holcim

Présenté et soutenue publiquement le 08/07/2024 devant le jury composé de :

Mme. Karima BITCHIKH	MCA	ENP	Présidente
Mme. Marya FODIL	MAA	ENP	Examinatrice
M. Amine BENMOKHTAR	MCA	ENP	Examinateur
Mme. Souad BENTAALLA-KACED	MCB	ENP	Encadrante
M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur	ENP	Encadrant
M. Smain BENGHEZAL	Manager Environnement pays	Holcim	Encadrant

يركّز هذا المشروع على تقليل استهلاك المياه في وحدة إنتاج الإسمنت بمصنع هولسيم في المسيلة. بعد تقييم نظام إدارة المياه وفقًا للمعيار HSE-302 ، تم إجراء تحليل دقيق للطاحونة VRM 1 التي تم تحديدها كنقطة رئيسية في الاستهلاك المفرط للماء. من خلال الجمع بين المقاربات التقنية والتنظيمية، ساهم هذا العمل في فهم أسباب هذه الزيادة وتقديم مقترحات عملية لمعالجتها. وتُظهر النتائج إمكانية تحقيق تحسين ملحوظ في كفاءة استخدام المياه دون التأثير على الأداء الصناعي للمصنع.

الكلمات المفتاحية: الأداء البيئي، التحكم في الانحرافات، الكفاءة المائية، صناعة الإسمنت، معيار HSE

Abstract

This final-year project focuses on reducing water consumption within the clinker production unit at Holcim's M'Sila site. Following an assessment of the water management system based on the HSE-302 standard, a targeted analysis was conducted on Vertical Roller Mill 1 (VRM 1). By combining technical and organizational approaches, the study helped identify the main causes of water overuse and propose applicable improvements. The results demonstrate opportunities to enhance the site's water efficiency.

Keywords: environmental performance, deviation control, water efficiency, cement manufacturing, HSE standard

Résumé

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans une démarche de réduction de la consommation d'eau au sein de l'unité de production du ciment du site Holcim de Msila. Après une évaluation du système de gestion de l'eau selon le standard HSE-302, une analyse ciblée a été menée sur le broyeur vertical VRM 1. En croisant plusieurs approches techniques et organisationnelles, le projet a permis de mieux comprendre les causes de la surconsommation et de proposer des solutions concrètes. Les résultats obtenus confirment le potentiel d'amélioration de la performance hydrique du site.

Mots-clés : performance environnementale, maîtrise des dérives, efficacité hydrique, industrie du ciment, standard HSE

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents, pour leur amour, leur patience et leur soutien depuis le début. Que Dieu vous protège et vous garde en bonne santé.

À mes grandes sœurs, Feriel et Sara, merci de m'avoir toujours soutenu, même dans les petits détails du quotidien.

À mes grands-parents qui restent à jamais dans mon cœur, qu'Allah vous accorde Sa miséricorde.

À Younes, mon meilleur ami, mon frère ! merci d'avoir toujours été là, dans les hauts comme dans les bas.

À mes amis Kassia et Mimi, pour votre présence, vos encouragements et tous les bons moments partagés.

À Imene et Chahinez, pour votre gentillesse et votre soutien tout au long de ce parcours.

Je vous suis profondément reconnaissant. Je vous aime

Et enfin, à moi-même. Pour avoir tenu bon malgré les épreuves et les moments durs. Merci de ne pas avoir abandonné.

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Allah le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mm. S. BENTAALA et M. A. CHERGUI pour leur accompagnement, leurs conseils précieux, et le temps qu'ils m'ont consacré tout au long de ce projet.

Je remercie également M. S. BENGHEZAL, pour son accompagnement attentif, ses conseils toujours pertinents et sa confiance tout au long de mon stage, ainsi que M. M. DJEGHABA, pour sa disponibilité et son soutien durant cette expérience.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe process de LCM, pour leur accueil, leur collaboration, et les échanges enrichissants durant cette expérience professionnelle.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury : Mme. K. BITCHIKH, présidente du jury, ainsi que M. M. FODIL et M. A. BENMOHTAR, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je souhaite également remercier tous les enseignants du département MRIE, pour la qualité de l'enseignement dispensé et pour leur accompagnement tout au long de mon parcours universitaire.

Table des matières

Liste de figure

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale 11

Chapitre I : Généralités & Etat des lieux 13

I.1 Introduction..... 14

I.2 Historique de Holcim El Djazair 14

I.3 Procédé de fabrication 16

I.3.1 Préparation de la matière première..... 16

I.3.2 La cuisson 18

I.3.3 Broyage ciment 19

I.3.4 Stockage et expédition..... 20

I.4 L'eau douce: une ressource stratégique à préserver 20

I.4.1 Contexte climatique en Algérie 20

I.4.2 État des nappes phréatiques autour de la cimenterie de Hammam Dalaa 21

I.5 Les raisons pour lesquelles les industries veulent optimiser leur consommation en eau..... 22

I.6 Engagement de Holcim Algérie 23

I.7 Système de gestion de l'eau selon le standard HSE-302 de Holcim..... 24

I.7.1 Objectifs du système de management de l'eau 25

I.7.2 Identification et évaluation des impacts (Plan) 25

I.7.3 Gestion opérationnelle des impacts (Do)..... 27

I.7.4 Évaluation de la performance et amélioration continue (Check & Act) 29

I.7.5 Gestion de la documentation..... 29

I.8 Cadrage de la problématique 29

I.9 Conclusion 30

Chapitre II : Evaluation de conformité du site de Msila au standard HSE-302..... 31

II.1 Introduction..... 32

II.2 Contexte et aperçu du standard HSE-302..... 32

II.3 Composantes clés du standard HSE-302 32

II.4 Evaluation de la conformité au standard HSE-302 33

II.4.1 Développement de la checklist d'évaluation 33

II.4.1.1 Design 33

II.4.1.2 Contrôles préventifs 34

II.4.1.3 Contrôles d'atténuation des incidents 34

II.4.1.4 Opérations 35

II.4.1.5 Maintenance 36

II.4.2 Implémentation 36

II.4.3	Discussion des résultats	37
II.5	Recommandations.....	40
II.6	Résultats	41
II.6.1	Analyse comparative des résultats.....	41
II.7	Conclusion.....	43
Chapitre III :	Diagnostic fonctionnel du réseau hydrique industriel de l'usine de Msila	44
III.1	Introduction.....	45
III.2	Infrastructure hydrique et répartition des usages de l'eau	45
III.2.1	Tirage de l'eau de forages	45
III.2.2	La station de traitement des eaux brutes (STEB)	46
III.2.3	L'usage domestique	47
III.2.4	La station d'épuration(STEP).....	47
III.2.5	L'usage industriel	48
III.3	Analyse de Pareto de la consommation d'eau industrielle.....	51
III.3.1	Résultats de l'analyse.....	51
III.3.2	Justification du ciblage sur le VRM.....	52
III.3.3	Conclusion de l'analyse de Pareto	53
III.4	Fonctionnement général du broyeur vertical (VRM)	53
III.4.1	Le Système d'alimentation.....	53
III.4.2	Le Plateau de broyage et galets (meules)	54
III.4.3	Le Système de lubrification.....	54
III.4.4	La Conduite d'injection d'eau	54
III.4.5	L'anneau à aubes	54
III.4.6	Le séparateur	55
III.5	Evaluation de la consommation en eau du broyeur vertical	55
III.5.1	Présentation des données de comparaison	55
III.5.2	Analyse comparative.....	56
III.5.3	Interprétation	56
III.5.4	Hypothèses sur la surconsommation.....	56
III.6	Analyse des causes par diagramme d'Ishikawa.....	57
III.6.1	Méthode.....	58
III.6.2	Main-d'œuvre.....	58
III.6.3	Matériel	59
III.6.4	Matière	60
III.6.5	Milieu (Environnement).....	62
III.7	Conclusion	62
Chapitre IV :	Analyse technique des causes de surconsommation d'eau et évaluation des actions correctives.....	63

IV.1	Introduction.....	64
IV.2	Analyse croisée des causes	64
IV.2.1	Interactions entre méthodes, matière et matériel	64
IV.3	Recommandations	66
IV.4	Estimation des résultats attendus	68
IV.5	Conclusion	70
	Conclusion Générale	71
	Références Bibliographiques	73
	Annexes	75
	Annexe 1 : Checklist d’inspection de l’infrastructure hydrique	75
	Annexes 2 : Bulletins d’analyse de la qualité d’eau de rejets faite par l’ONEDD.....	77
	Annexe 3 : Limites de rejet pour la qualité de l’eau définis par le groupe.....	78
	Annexe 4 : Liste des KPIs identifiés par le groupe	79
	Annexe 5 : Evaluation de la conformité du site de Msila au standard HSE-302.....	81

Liste de figure

Figure I.1	Situation géographique du site de Msila	15
Figure I.2	Produits Holcim Algérie	15
Figure I.3	Schéma descriptif du procédé fabrication du ciment par voie sèche	16
Figure I.4	Vue intérieure du hall de stockage	17
Figure I.5	Schéma descriptif du broyeur vertical à galets	17
Figure I.6	Schéma descriptif de la tour de préchauffage	18
Figure I.7	Schéma descriptif du four rotatif	19
Figure I.8	Schéma descriptif du Broyeur à boulets	19
Figure I.9	Carte du risque global lié à l'eau pour la wilaya de Msila	21
Figure I.10	Hiérarchie de la gestion de l'eau	27
Figure II.1	Composantes clés du standard HSE-302	32
Figure II.2	Degré de conformité du site de Msila au standard HSE-302	37
Figure II.3	L'évolution du degré de conformité au standard HSE-302	42
Figure III.1	Situation des forages existants sur fond topographique au 1/25 000	45
Figure III.2	Flux de l'eau entrant à la STEB	46
Figure III.3	Consommation en eau en m ³ du broyeur vertical pour le mois de Mars	48
Figure III.4	Consommation en eau du BK1 pour le mois de Mars	49
Figure III.5	Consommation en eau de la GCT 1 pour le mois de Mars	50
Figure III.6	Pareto sur la consommation en eau	52
Figure III.7	Diagramme d'Ishikawa es causes de surconsommation en eau de VRM1	57
Figure III.8	Répartition des arrêts du VRM1 par système	59
Figure III.9	Répartition granulométrique de la matière première entre Janvier 2024 et Avril 2025	61
Figure IV.1	Corrélation entre l'irrégularité granulométrique de la matière première et les arrêts du VRM	65
Figure IV.2	La différence de consommation mensuelle en eau estimée pour le VRM 1	69
Figure IV.3	La différence de pompage mensuelle en eau estimée pour le VRM 1	69

Liste des tableaux

Tableau I.1	Comparaison des débits de forages entre les années 2003 et 2019	22
Tableau I.2	Exigences de formation du personnel	28
Tableau II.1	Exigences du design	33
Tableau II.2	Exigences du control préventif	34
Tableau II.3	Exigence du contrôles d'atténuation des incidents	34
Tableau II.4	Exigences des opérations	35
Tableau II.5	Exigences de Maintenance	36
Tableau II.6	Données hydrique non conformes à l'exigence D.2 du standard HSE-302	39
Tableau II.7	Recommandations d'amélioration du système de management de l'eau	40
Tableau III.1	Résumé du l'ensemble de la consommation	51
Tableau III.2	Tableau de Pareto de la consommation en eau	51
Tableau III.3	Données de comparaison du VRM 1 a des VRM locaux et internationaux	55
Tableau IV.1	Recommandations sur les surconsommations du VRM	67

Liste des abréviations

LCM	Lafarge Ciment Msila
VRM	Vertical Roller Mill
GCT	Gas Cooling Tower
HLC	High-Level Control
ISO	International Organization for Standardization
KPI	Key Performance Indicator
MES	Matières en suspension
ODD	Objectifs de Développement Durable
ONEDD	Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable
ONU	Organisation des Nations Unies
PNE	Politique Nationale de l'Eau
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
STEB	Station de Traitement des Eaux Brutes
STEP	Station de Traitement des Eaux Polluées

Introduction générale

L'eau aujourd'hui est l'une des ressources les plus stratégiques et les plus menacées à l'échelle mondiale. Entre la croissance démographique, l'urbanisation, l'industrialisation et les effets du changement climatique, la pression sur les réserves en eau douce ne cesse de s'intensifier. Dans ce contexte, de nombreuses organisations internationales, dont les Nations Unies, tirent la sonnette d'alarme face au risque croissant de pénurie hydrique si aucune mesure concrète n'est engagée [1]. L'industrie, grande consommatrice d'eau, se retrouve ainsi en première ligne des efforts à fournir pour limiter les prélèvements et promouvoir une gestion durable de cette ressource.

En Algérie, cette problématique prend une dimension particulièrement aiguë. La région de Msila, où se situe l'usine Lafarge Ciment (aujourd'hui Holcim El Djazaïr), est caractérisée par un climat semi-aride à aride, avec des précipitations faibles et irrégulières. Si des études hydrogéologiques avaient initialement validé l'implantation de l'usine grâce à la présence d'une nappe d'eau douce jugée suffisante, la réalité actuelle montre une diminution continue du niveau des nappes et une baisse significative des débits de pompage [2]. Face à cette situation, l'eau est devenue un enjeu critique, nécessitant des actions immédiates et structurées.

C'est dans cette optique que l'usine de Msila a engagé une démarche ambitieuse de réduction de sa consommation d'eau. Cette initiative vise non seulement à répondre aux exigences du standard du groupe Holcim, mais aussi à anticiper un durcissement des réglementations environnementales à venir. Elle s'inscrit dans une logique de conformité réglementaire et normative, de performance industrielle, mais surtout de responsabilité environnementale. Cette démarche prend une importance encore plus grande du fait que l'usine de Msila est la seule unité du groupe en Algérie à utiliser exclusivement de l'eau douce pour ses besoins industriels, renforçant ainsi la nécessité d'une gestion exemplaire.

Le présent travail s'articule autour de deux axes complémentaires. La première partie est consacrée à l'évaluation du système de management de l'eau mis en place à l'usine, à travers une analyse de sa conformité avec les exigences du standard du groupe Holcim HSE-302. Cette évaluation permet d'identifier les forces du système en place ainsi que ses points d'amélioration. La seconde partie, qui constitue le cœur du projet, s'intéresse à la problématique de la consommation d'eau. Elle explore les différents usages de l'eau sur le site, identifie les postes les

plus consommateurs, et propose des pistes concrètes d'optimisation afin de réduire significativement les volumes utilisés, tout en maintenant la performance industrielle.

Ce projet vise ainsi à concilier impératifs industriels et exigences environnementales, dans une approche durable alignée avec la vision du groupe Holcim.

Le Chapitre I présente un état des lieux global, en introduisant le contexte hydrique local, l'usine de Msila, ses procédés industriels, et les raisons qui ont conduit à prioriser la gestion de l'eau.

Le Chapitre II est dédié à l'évaluation du système de management de l'eau selon les critères du standard HSE-302, à l'aide d'une grille d'audit structurée.

Le Chapitre III se focalise sur l'infrastructure hydrique du site. Il décrit le réseau d'eau, recense les usages internes, identifie les équipements les plus consommateurs, et oriente l'analyse vers le poste prioritaire d'optimisation. Ce chapitre inclut également une première étude technique du système ciblé, identifiant les problèmes majeurs liés à sa consommation excessive.

Le Chapitre IV propose une analyse technique approfondie du système ciblé avec un diagnostic détaillé, des recommandations concrètes d'optimisation, ainsi qu'une évaluation des gains attendus, à la fois en termes de réduction de consommation d'eau et d'impact environnemental.

Enfin, une conclusion générale vient clore ce travail en récapitulant les principaux résultats obtenus, les apports de l'étude et en suggérant des perspectives d'amélioration à long terme.

Chapitre I :

Généralités & Etat des lieux

I.1 Introduction

Ce premier chapitre vise à poser les bases contextuelles du présent travail. Il commence par une brève présentation du groupe Holcim El Djazaïr et de son site industriel de Msila, avant de décrire le procédé de fabrication du ciment par voie sèche. L'accent est ensuite mis sur l'importance de l'eau dans ce type d'industrie, notamment dans un contexte local marqué par le stress hydrique. Enfin, les raisons qui poussent les industries à optimiser leur consommation en eau, ainsi que les engagements de Holcim en matière de durabilité, sont exposés afin de cadrer la problématique étudiée.

I.2 Historique de Holcim El Djazair

Holcim est une entreprise suisse de production et de commercialisation des matériaux de construction, principalement du ciment. Elle a été fondée en 1912 sous le nom de « Financière Glaris » dans le village de Holderbank du canton d'Argovie, à partir de la fusion de la « Fabrique argovienne de ciment Portland » avec la « *Rheintalischen Cementfabrik Rüthi* » [3].

Lafarge Algérie (Actuellement Holcim El Djazaïr), filiale du groupe Lafarge, a une histoire riche qui remonte à plus de 60 ans. Lafarge s'implante en Algérie en 1953, créant la Société des Ciments Portland de l'Algérie (SCPA). La SCPA devient rapidement l'un des principaux acteurs du secteur cimentier en Algérie. En 1983, la SCPA devient Lafarge Ciments Algérie et renforce sa position sur le marché en investissant dans de nouvelles installations de production de ciment.

En 2003, Lafarge Ciments Algérie continue son expansion en ouvrant une nouvelle usine de production de ciment à Msila (figure I.1), commune de Hammam Dalaa. L'usine dispose d'une capacité de production d'environ six millions de tonnes par an pour répondre à la demande croissante du marché. Cette usine est l'une des plus grandes installations de production de ciment et la plus importante de Holcim El Djazair, Elle comporte deux lignes de production et elle s'est classée sixième au niveau du groupe l'an 2022 selon des critères déterminés par ce dernier.

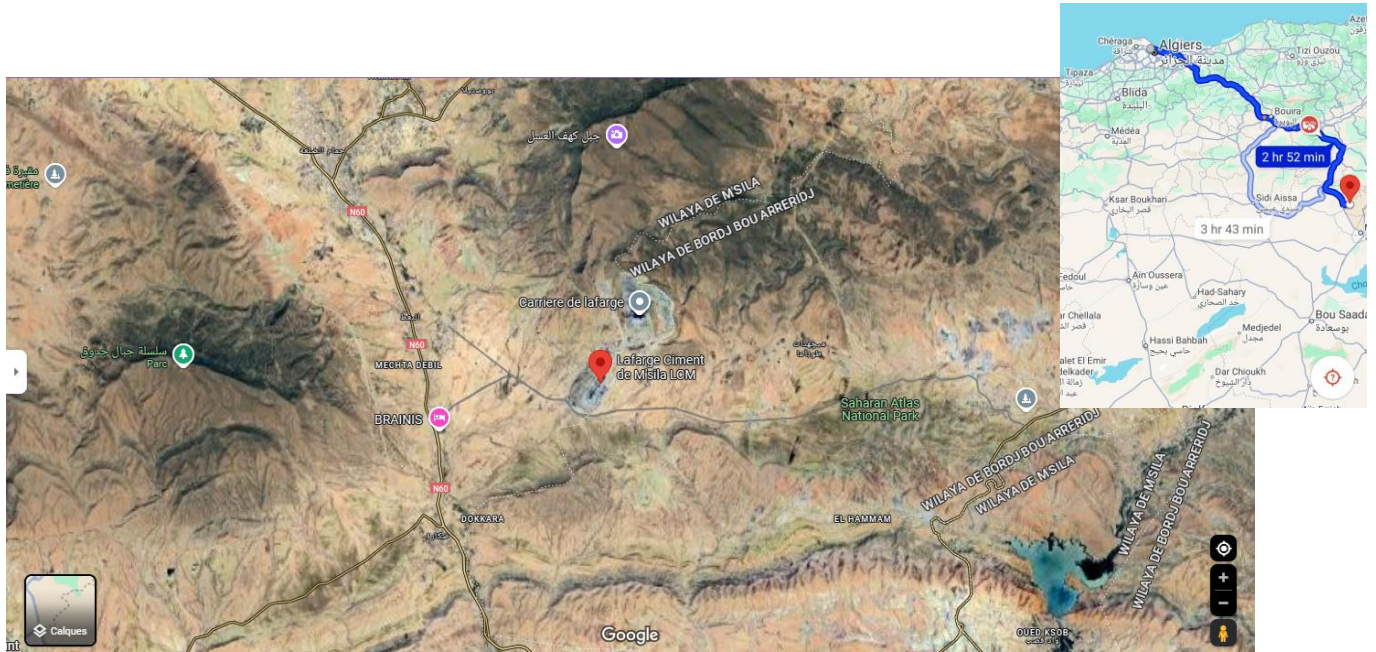


Figure I.1 Situation géographique du site de Msila [4]

En 2010, Lafarge lance de la gamme produits « *Chamil, Matine, Mokaouem, Malaki* » (figure I.2), et poursuit par le lancement d'un liant pour tous travaux de maçonnerie et finition « *MOUKAMIL* » en 2017.



Figure I.2 Produits Holcim Algérie [3]

Lafarge Ciments Algérie change de dénomination et devient LafargeHolcim Algérie en 2015 suite à la fusion entre Lafarge et Holcim, deux des plus grandes entreprises mondiales du secteur des matériaux de construction.

Enfin en 2021, Holcim annonce la finalisation de l'acquisition de Lafarge et devient ainsi, Holcim group le leader mondial du marché du ciment, répartie dans 70 pays se distingue par son engagement envers la durabilité, l'environnement et la sécurité au travail [5].

Aujourd'hui, Holcim El djazair est l'un des acteurs majeurs de l'industrie de la construction en Algérie, elle continue d'investir dans de nouvelles technologies et de développer ses activités pour répondre aux besoins du marché algérien en constante évolution.

I.3 Procédé de fabrication

La fabrication du ciment fait appel à de nombreuses techniques et technologies (figure I.3). En vue des différentes étapes par lesquelles passent les matières premières, celles-ci nécessitent le déploiement de grands moyens humains et matériels. La figure schématise le procédé de fabrication de ciment par voie sèche :

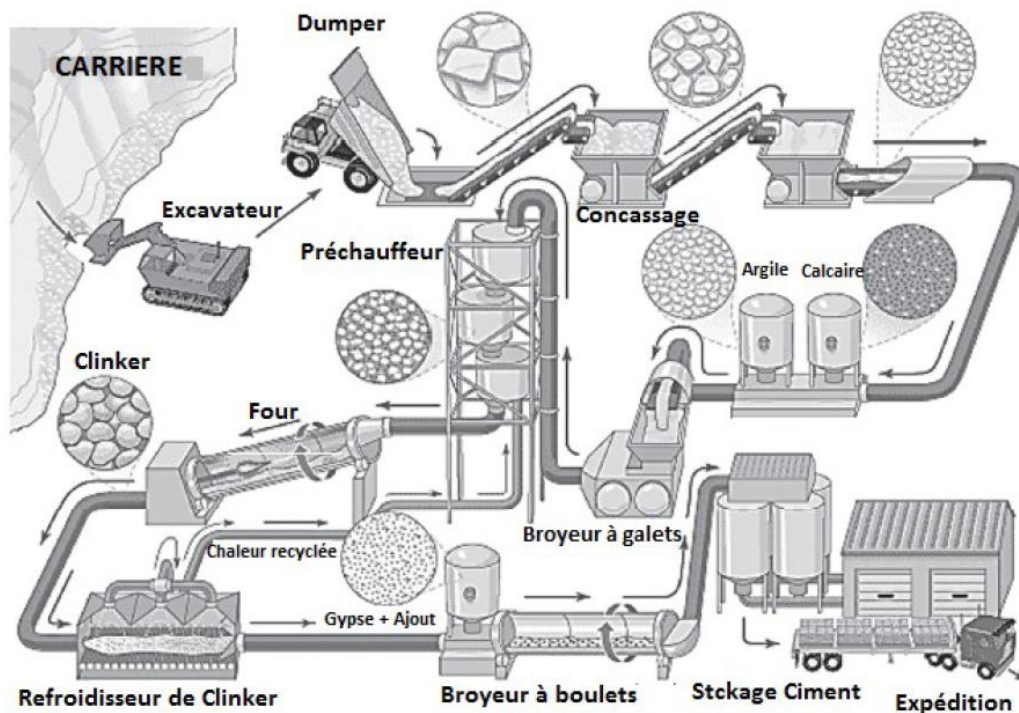


Figure I.3 Schéma descriptif du procédé fabrication du ciment par voie sèche [6]

I.3.1 Préparation de la matière première

La fabrication du ciment repose principalement sur deux matières premières : le calcaire, riche en carbonate de calcium (CaCO_3), et l'argile, qui contient généralement un mélange hydraté de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). Ces éléments sont généralement introduits dans des proportions moyennes de 80 % pour le calcaire et 20 % pour l'argile. Afin d'assurer une qualité constante du produit fini, il est essentiel de procéder à un échantillonnage rigoureux, un dosage précis et un mélange homogène des matières premières, de manière à maintenir une composition chimique stable dans le temps [7].

Cette étape initiale du procédé comprend plusieurs opérations de préparation, conduisant à l'obtention d'une poudre fine et homogène appelée le "cru", qui servira de base à la cuisson.

- i) **Le concassage** : Les blocs issus de la carrière sont réduits en éléments d'une dimension de 80 à 150 mm au niveau du concasseur.
- ii) **La Pré-homogénéisation** : Cette étape vise à assurer une composition chimique constante du mélange de matières premières dans un hall de stockage circulaire à racleur (figure I.4), permettant un stockage en étage, grâce au racleur à mouvement vertical et horizontal. Des échantillons sont prélevés et analysés en laboratoire, afin d'ajuster les proportions des composants et garantir une qualité stable du mélange. Ce mélange est appelé le cru.

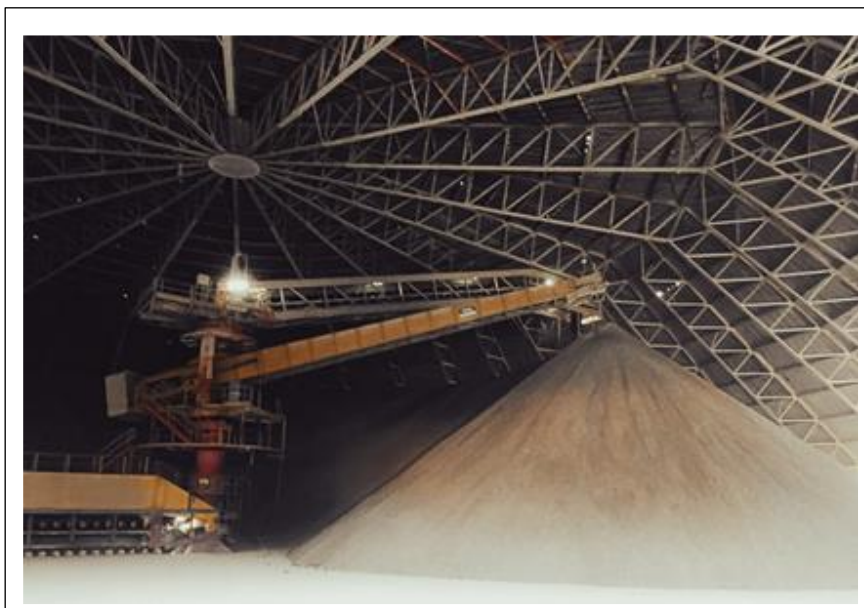


Figure I.4 Vue intérieure du hall de stockage de la matière première

- iii) **Le Broyage et séchage** : Après la pré-homogénéisation, le cru est transféré vers des broyeurs verticaux sécheurs : Vertical Roller Mill (VRM) (Figure I.5). Ceux-ci assurent à la fois la réduction granulométrique très fine du mélange et l'élimination de l'humidité résiduelle. On obtient ainsi une poudre sèche à la finesse contrôlée, maintenant appelée farine.
- iv) **Homogénéisation finale** : Avant son introduction dans le four, la farine est soigneusement malaxée afin d'assurer une homogénéité parfaite et des propriétés rhéologiques adaptées. Elle est ensuite stockée dans des silos farine, en attente de cuisson.

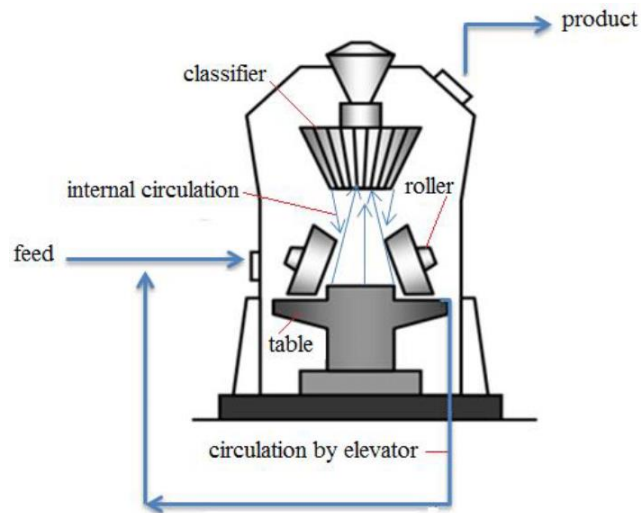


Figure I.5 Schéma descriptif du broyeur vertical à galets [8]

I.3.2 La cuisson

La cuisson est le processus de transformation de la farine crue en clinker, par un apport thermique suffisant pour obtenir des réactions chimiques complètes (clinkérisation) conduisant à la formation des principaux composés du clinker. L'atelier de cuisson comporte un préchauffeur à cyclones, un four rotatif et un refroidisseur à grilles.

i) Le préchauffage

La tour de préchauffage comportant une série de cinq cyclones dans lesquels la farine déversée à la partie supérieure descend vers l'entrée du four rotatif (Figure I.6). Elle se réchauffe au contact des gaz chauds provenant du four et circulant à contre-courant. La farine est ainsi portée à une température comprise entre 800 °C et 1 000 °C [7].

Le but recherché de la tour est la décarbonatation de notre farine : la calcaire, suite à la température se transforme en dioxyde de Carbone et en chaux.

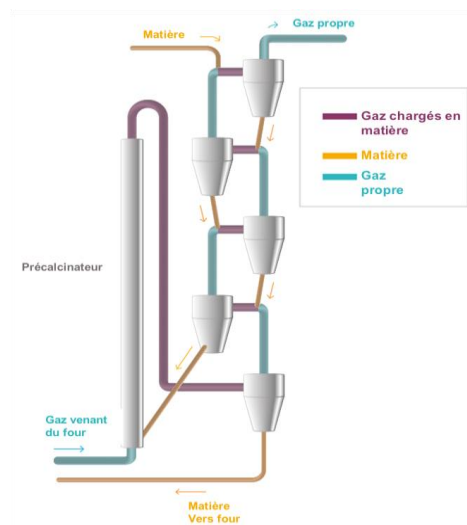


Figure I.6 Schéma descriptif de la tour de préchauffage [9]

ii) La clinkérisation

Un four horizontal rotatif cylindrique en acier (avec revêtement intérieur réfractaire), légèrement incliné et tournant de 1 à 3 tours/minute (Figure I.7). La matière pénètre à l'amont du four (en partie haute) où s'achève la décarbonatation, et progresse jusqu'à la zone de clinkérisation (à 1450 °C). On obtient du clinker qui est ensuite brusquement refroidi.

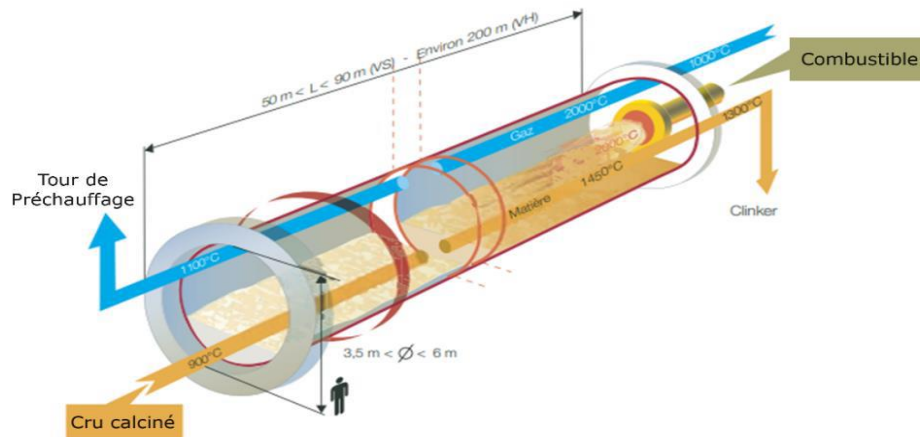


Figure I.7 Schéma descriptif du four rotatif [10]

iii) Le refroidissement

Une fois la zone de cuisson franchie, les propriétés du clinker ne sont pas toutes figées. Pour solidifier la phase liquide, on la refroidit rapidement (trempe), ce qui a un impact positif sur la qualité du ciment final. Ce processus favorise la cristallisation des aluminates et des aluminoferrites tout en évitant la décomposition du C3S en C2S et CaO. Ainsi, les silicates conservent essentiellement leur composition et leur structure d'origine [7].

I.3.3 Broyage ciment

Le clinker, refroidi à 100°C, est acheminé et entreposé dans un vaste hall de stockage assurant une production continue de ciment. Le clinker est ensuite broyé avec du gypse (un régulateur de prise), à l'aide d'un broyeur horizontal à boulets (Figure I.8). Ce mélange broyé est ensuite dirigé vers un séparateur de particules pour obtenir une poudre fine, à granulométrie ciblée et uniforme : le ciment [11].

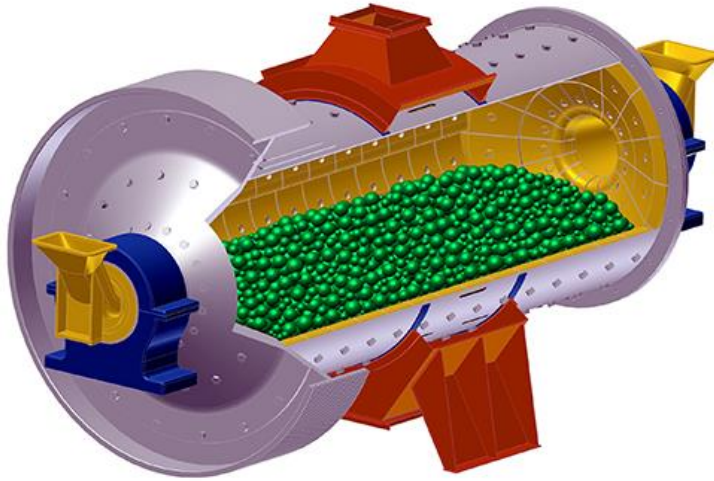


Figure I.8 Schéma descriptif du Broyeur à boulets [12]

I.3.4 Stockage et expédition

Le ciment est stocké dans des silos, parfois segmentés en plusieurs sections pour accueillir différents types de ciment. Ensuite, il est conditionné en sacs ou expédié en vrac [11].

I.4 L'eau douce: une ressource stratégique à préserver

L'eau douce constitue une ressource naturelle essentielle, elle ne représente que moins de 3% de l'eau sur terre. Dans un contexte mondial marqué par une pression croissante sur les réserves hydriques, sa préservation est devenue une obligation, en particulier dans les régions arides comme l'Algérie [13].

I.4.1 Contexte climatique en Algérie

L'Algérie figure parmi les pays les plus exposés au stress hydrique à l'échelle mondiale, et, au sein de son territoire, la wilaya de Msila est particulièrement reconnue pour ses conditions climatiques arides à semi-arides mais aussi par les effets croissants du changement climatique. Les précipitations, déjà faibles, sont très irrégulières d'une année à l'autre et d'une région à l'autre. Les épisodes de sécheresse sont fréquents et peuvent durer plusieurs années, compromettant la recharge des nappes phréatiques et la disponibilité des ressources en eau de surface [14].

La répartition des pluies suit un schéma saisonnier marqué : elles se concentrent majoritairement en automne et en hiver, avec des étés particulièrement secs. Par ailleurs, les épisodes pluvieux sont souvent courts mais intenses, ce qui limite leur efficacité hydrologique : l'eau ruisselle rapidement au lieu de s'infiltrer lentement dans les sols. L'infiltration est estimée à environ 5 % des précipitations totales dans certaines zones, comme le sous bassin versant de l'Oued Loughmane (wilaya de Msila), ce qui reste insuffisant pour compenser les prélèvements [2].

Cette raréfaction de l'eau se heurte à une demande croissante, tirée à la fois par la croissance démographique et le développement des activités économiques. Les usages domestiques, agricoles et industriels se partagent la ressource, avec une pression particulièrement forte sur les nappes souterraines, qui représentent plus de 70 % des ressources mobilisées dans certaines régions. Le secteur agricole reste le plus gros consommateur, mais l'industrie, notamment cimentière, nécessite également d'importants volumes d'eau pour ses différents procédés [15].

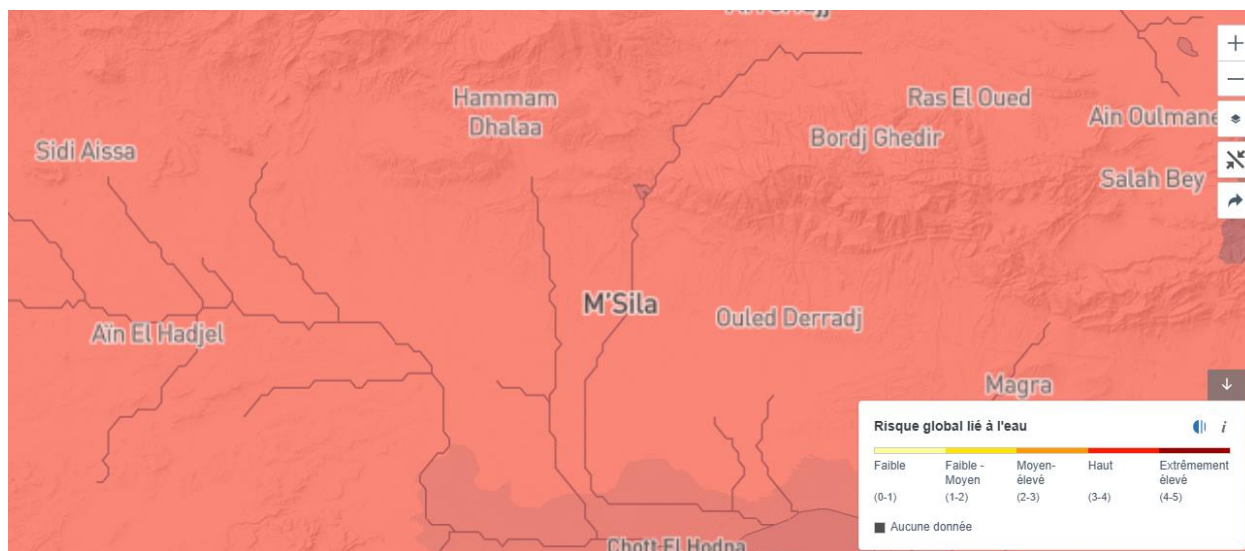


Figure I.9 Carte du risque global lié à l'eau pour la wilaya de Msila [16]

Dans ce contexte, la gestion durable de l'eau devient un enjeu stratégique. La réduction des consommations, la réutilisation des eaux traitées et la protection des nappes sont autant de leviers incontournables pour assurer l'équilibre entre disponibilité et besoins. Lafarge Algérie, à travers ses sites comme celui de Hammam Dalaa, s'inscrit dans cette dynamique en étudiant de près l'impact de ses prélèvements et en cherchant à optimiser ses consommations.

I.4.2 État des nappes phréatiques autour de la cimenterie de Hammam Dalaa

L'étude hydrogéologique menée autour des forages de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaa (wilaya de Msila) révèle une situation préoccupante concernant la ressource en eau souterraine, notamment en termes de disponibilité et d'évolution piézométrique.

Les cinq forages principaux (P1 à P5), réalisés entre 2003 et 2004 dans la région d'El Feidj, captent une nappe karstique située dans les formations calcaires et marno-calcaires du Campanien–Santonien. Ces nappes sont profondes : le niveau statique des eaux se situe entre 80 et 98 mètres sous la surface du sol, indiquant une ressource difficilement accessible et déjà fortement exploitée [2].

Les données sur le Tableau I.1 montrent une baisse notable des débits depuis leur mise en service

Tableau I.1 comparaison des débits de forages entre les années 2003 et 2019

Numéro du forage	Profondeur(m) 2003-2004	Débit (m ³ /h)		Niveau statique (m)/ sol	Niveau dynamique (m)
		2003	2019	Année des essais : 2003-2004	
P1	360	10	N/A	79,93	168,79
P2	360	60	45	85,87	147,7
P3	325	70	55	97,00	124,75
P4	321	100	50	89,80	92,2
P5	330	60	40	98,00	180

Cette baisse généralisée des débits (de l'ordre de 30 à 50 %) est accompagnée d'un rabattement significatif des niveaux piézométriques, signe d'une surexploitation progressive de la nappe. À titre d'exemple, le niveau dynamique du forage P2 est passé de 85 m à plus de 147 m. Cette évolution traduit une pression hydrique croissante, aggravée par le faible taux de recharge de la nappe estimé à seulement 5 % des précipitations annuelles [2].

La vulnérabilité de la ressource est également mise en lumière par les caractéristiques géologiques de la région. Les sols, peu développés et à texture grossière, ne freinent pas efficacement l'infiltration des polluants. De plus, le réseau karstique peu développé limite les capacités d'autoépuration naturelles de la nappe.

Ces constats appuient la nécessité de mettre en œuvre des mesures urgentes de gestion rationnelle de la ressource, et de réduction de la consommation d'eau douce, notamment dans les activités industrielles.

I.5 Les raisons pour lesquelles les industries veulent optimiser leur consommation en eau

À l'échelle mondiale, environ 20 % de l'eau douce prélevée est utilisée par l'industrie [17]. En Algérie, cette part est plus faible, autour de 3 à 5 % [17, 18]. Même si la part est réduite, la consommation industrielle reste un enjeu important, surtout face aux pénuries d'eau qui touchent de plus en plus de régions.

L'industrie utilise beaucoup d'eau dans certains secteurs comme la chimie, l'agroalimentaire ou la production du ciment. L'eau est utilisée pour le refroidissement, le nettoyage ou encore la

fabrication de produits. Mais cette consommation peut avoir de graves conséquences : baisse des nappes souterraines, pollution, conflits avec les autres usagers de l'eau [18].

Réduire l'eau utilisée permet d'être plus respectueux de l'environnement. Cela montre que l'entreprise prend ses responsabilités et agit pour le bien commun. Ce comportement est encouragé par les politiques publiques, comme la directive-cadre européenne sur l'eau ou la loi sur l'eau en Algérie [21, 22].

Diminuer la consommation permet aussi de faire des économies. Moins d'eau à pomper, à chauffer, à traiter et à rejeter, c'est moins de dépenses. Par exemple, l'usine Toyota de Valenciennes a économisé jusqu'à 80 % de sa consommation grâce à la réutilisation des eaux de process [20]. Cela montre que des résultats concrets sont possibles grâce à des solutions simples et efficaces.

En plus des économies, cela réduit aussi les risques. Une usine qui dépend d'une grande quantité d'eau peut être arrêtée en cas de sécheresse ou de coupure. Avoir une consommation plus faible rend l'entreprise plus résistante face aux aléas climatiques [19].

On peut déduire que l'eau sera de plus en plus encadrée par la réglementation. On observe déjà des signaux dans ce sens, comme pour les émissions de CO₂ et des gaz à effet de serre. Des règles strictes ont été imposées avec le temps. Il est donc très probable que l'usage de l'eau suive la même logique : quotas, contrôles, pénalités. Les entreprises ont tout intérêt à anticiper ces évolutions pour éviter des coûts supplémentaires ou des sanctions [21].

Réduire la consommation d'eau permet aussi de contribuer aux Objectifs de Développement Durable des Nations Unies. En particulier, l'ODD 6 vise à garantir un accès à l'eau propre et à un assainissement pour tous d'ici 2030 [17]. Les industries ont un rôle à jouer pour atteindre cet objectif mondial.

I.6 Engagement de Holcim Algérie

Holcim Algérie, à travers ses sites industriels, prend de plus en plus conscience des enjeux liés à la gestion durable de l'eau. Dans un contexte de changement climatique et de pression croissante sur les ressources hydriques, le groupe a adopté une politique environnementale ambitieuse appelée "nature-positive". Cette stratégie vise à réduire les impacts de ses activités sur l'environnement, en fixant des objectifs clairs et mesurables en matière de biodiversité et de consommation d'eau à l'horizon 2030 [23].

Au niveau mondial, Holcim s'est engagé à réduire de 33 % sa consommation d'eau douce par tonne de matériaux cimentaires d'ici 2030, en prenant comme référence une consommation de

305 litres par tonne en 2018. En 2021, ce chiffre a été ramené à 273 litres, ce qui montre une progression concrète [24]. Ces efforts passent par des actions comme le recyclage des eaux de process, la récupération des eaux pluviales ou encore l'amélioration des équipements utilisant de l'eau.

Tous les sites du groupe doivent appliquer une démarche rigoureuse de gestion de l'eau, conformément au standard interne relatif à l'eau HSE-302. Celui-ci impose notamment une cartographie précise des réseaux, la mise en place d'indicateurs de performance environnementale liés à la consommation d'eau, un suivi régulier des volumes utilisés, ainsi qu'un plan d'action annuel pour la réduction des consommations [25].

En parallèle des exigences internes du groupe, le site de Msila fonctionne dans le respect de la réglementation algérienne, notamment la loi n°05-12 relative à l'eau. Cette législation encadre l'utilisation industrielle des ressources hydriques, en imposant des autorisations de prélèvement, un suivi des volumes, ainsi que le contrôle de la qualité de l'eau et des rejets [22]. Le site veille à rester conforme à ces obligations, ce qui contribue à limiter les risques réglementaires.

Le site de Msila a une situation particulière au sein de Holcim Algérie. Il s'agit de la seule cimenterie du groupe dans le pays à utiliser de l'eau douce pour des besoins industriels. Cette eau est prélevée par des forages profonds, et la baisse progressive des débits constatée dans ces puits constitue un risque réel pour l'activité [2]. Cette diminution pourrait, si elle se poursuit, affecter directement la continuité et la stabilité de la production à moyen ou long terme.

À LCM, le suivi de la consommation d'eau est intégré aux opérations courantes de l'usine. Des compteurs, des relevés réguliers et des contrôles de qualité sont utilisés pour assurer une gestion fiable. Ce système fait partie des exigences environnementales du groupe Holcim et permet d'avoir une vision claire des volumes utilisés. Il s'agit d'une base essentielle pour suivre la performance et identifier les éventuelles dérives

On peut voir que le site de Msila a mis en place plusieurs actions concrètes comme l'optimisation des circuits d'eau et la gestion rigoureuse des consommations. Ces efforts, témoignent de l'engagement du site envers une production plus durable, en phase avec les standards du groupe Holcim.

I.7 Système de gestion de l'eau selon le standard HSE-302 de Holcim

Le standard HSE-302 est le document de référence du groupe Holcim pour bien gérer l'eau sur tous ses sites industriels. Il sert à évaluer, contrôler et améliorer les impacts liés à l'utilisation de

cette ressource, en respectant les lois locales et les engagements environnementaux du groupe. Il s'applique à toutes les activités de production ou de construction dans lesquelles Holcim est majoritaire ou responsable.

Ce standard est inspiré de la norme ISO 14001, à laquelle Holcim est certifié. Il suit les mêmes grands principes : connaître les impacts environnementaux, respecter les règles, gérer les risques, et chercher à s'améliorer en continu. Le HSE-302 a été adapté pour répondre aux besoins spécifiques de Holcim, dans le cadre de son système de management environnemental.

I.7.1 Objectifs du système de management de l'eau

L'objectif principal du standard est de prévenir les risques critiques tels que le rejet d'eau polluée dans l'environnement, tout en garantissant une utilisation responsable et durable de cette ressource. Les mesures prévues s'articulent autour des piliers suivants :

- Réduction de la consommation en eau douce.
- Protection des écosystèmes aquatiques
- Prévention de la pollution des eaux souterraines et de surface
- Conformité réglementaire stricte
- Suivi et amélioration continue de la performance hydrique

Afin de mettre en œuvre une gestion efficace et durable de l'eau, le standard HSE-302 s'appuie sur un ensemble de composantes opérationnelles alignées sur la logique du cycle PDCA (Plan – Do – Check – Act). Ces éléments permettent d'identifier les enjeux, de définir des actions, de surveiller les résultats et d'ajuster les pratiques en continu. La suite de cette section détaille ces composantes, en commençant par l'étape de planification.

I.7.2 Identification et évaluation des impacts (Plan)

La phase de planification du standard HSE-302 repose sur une évaluation rigoureuse des impacts liés à l'usage de l'eau. Elle vise à identifier les risques, les sources de consommation, et les opportunités d'amélioration. Cela implique une série d'actions structurées allant de la cartographie du réseau hydrique à la définition d'objectifs annuels de performance, en passant par la mise en place de dispositifs de prévention, de traitement et de suivi.

I.7.2.1 Cartographie et métrologie :

Une bonne planification de la gestion de l'eau commence par une connaissance précise du réseau hydrique du site. Avant toute prise de décision ou définition d'actions, il est essentiel d'identifier et de localiser l'ensemble des composantes intervenant dans le cycle de l'eau au sein de l'unité de production. Cela inclut notamment : les forages, les stations de traitement, les points de prélèvement et de rejet ainsi que les équipements consommateurs.

Il est également essentiel d'équiper les principaux points de consommation en compteurs afin de permettre l'établissement d'un bilan hydrique fiable et représentatif des usages réels du site.

I.7.2.2 Contention et prévention des déversements :

Afin de prévenir tout risque de pollution, les unités doivent mettre en place des dispositifs de rétention secondaires autour des installations sensibles de traitement. Ces dispositifs doivent être dimensionnés de manière à pouvoir contenir 110 % du volume du plus grand contenant ou 25 % de la somme des volumes stockés, en retenant la valeur la plus élevée des deux.

Pour garantir leur efficacité dans le temps, ces systèmes de rétention doivent faire l'objet de contrôles périodiques réalisés à l'aide d'une checklist (Annexe 1).

I.7.2.3 Systèmes de traitement des rejets :

Avant d'être rejetées, les eaux usées doivent être traitées selon des paramètres strictement définis (pH, MES, Métaux...) en conformité avec les limites fixées du standard (Annexe 2). Pour garantir cette conformité, les sites doivent mettre en place un plan d'échantillonnage et de contrôle. Ce plan doit être documenté, régulièrement mis à jour et intégré à la revue annuelle du programme. En cas de non-conformité, des procédures écrites doivent permettre d'identifier rapidement l'origine du problème et de mettre en œuvre les actions correctives nécessaires.

I.7.2.4 Indicateurs clés de performance (KPI):

Pour assurer un suivi régulier et une évaluation continue de la performance en matière de gestion de l'eau, le standard HSE-302 prévoit également la mise en place des KPIs (3). Ces indicateurs permettent de mesurer, comparer et améliorer les différentes dimensions du système hydrique (captage, consommation, rejet, recyclage, etc.).

I.7.2.5 Objectifs annuelles

En complément de ces indicateurs globaux, chaque unité est tenue d'établir des objectifs annuels clairs et mesurables en lien avec la consommation et l'efficacité de l'utilisation de l'eau. Ces objectifs doivent être validés par la direction et intégrés dans le plan d'amélioration permettant ainsi un suivi régulier des performances et une mise en œuvre d'actions correctives en cas d'écart.

À l'usine Msila, deux objectifs principaux ont été fixés pour l'année 2025, en ligne avec les exigences du Groupe Holcim :

- i) **Objectif de pompage** : limiter le volume d'eau souterraine pompée depuis les forages à une moyenne de 140 litres par tonne de ciment produite. Cet indicateur permet de

surveiller l'extraction de la ressource naturelle et d'encourager l'optimisation des circuits internes et des systèmes de recyclage.

- ii) **Objectif de consommation** : maintenir la consommation totale d'eau douce utilisée dans le processus de fabrication du clinker en dessous d'une moyenne de 160 litres par tonne de clinker produite. Cet objectif vise à améliorer l'efficacité hydrique, réduire les pertes, et favoriser la réutilisation de l'eau dans les différentes étapes du processus.

Ces deux indicateurs stratégiques sont suivis mensuellement, et des actions d'amélioration sont planifiées en cas de dépassement. Ils s'inscrivent dans une logique d'optimisation continue et de respect des engagements du groupe en matière de durabilité.

I.7.3 Gestion opérationnelle des impacts (Do)

Une fois les impacts identifiés, la phase « Do » du cycle PDCA consiste à mettre en œuvre les mesures nécessaires pour maîtriser et réduire la consommation et les rejets d'eau. Cela passe par l'application de procédures opérationnelles, une maintenance rigoureuse des installations, le renforcement des compétences du personnel, et la préparation aux situations d'urgence.

I.7.3.1 Procédures de gestion de l'eau

La mise en œuvre d'une gestion efficace de l'eau repose sur une hiérarchisation des actions à adopter pour limiter les prélèvements et réduire les impacts environnementaux. Le standard HSE-302 propose une pyramide de priorités, allant de l'élimination des besoins en eau jusqu'au rejet maîtrisé. Chaque niveau représente une stratégie progressive, à privilégier selon les

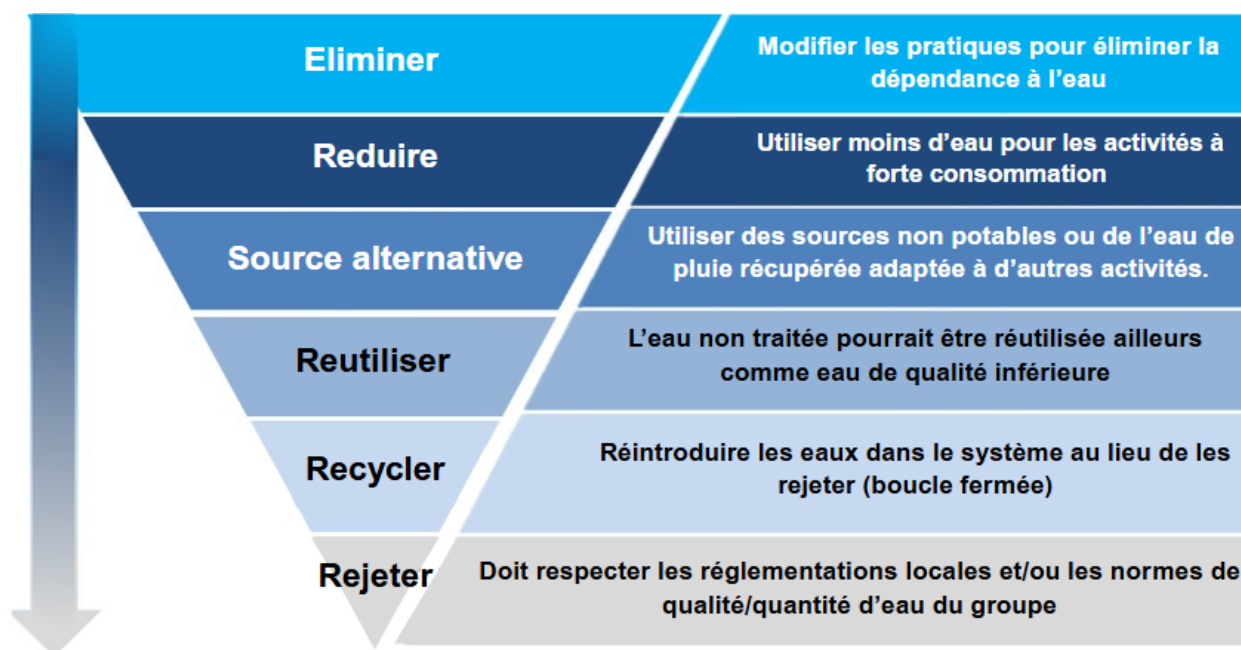


Figure I.10 Hiérarchie de la gestion de l'eau selon le standard HSE-302

possibilités techniques du site et la qualité de l'eau disponible.

I.7.3.2 Maintenance

Tous les équipements liés à la gestion de l'eau, y compris les systèmes de pompage, les stations de traitement, les capteurs, les compteurs et les réservoirs, doivent être intégrés dans le plan de maintenance préventive du site. Les interventions doivent suivre les recommandations des fabricants, en incluant notamment la calibration régulière des instruments de mesure.

De plus, tout appareil, consommable ou pièce de rechange nécessaire au fonctionnement ou à la mesure des installations de traitement doit être disponible en stock ou faire l'objet d'une procédure d'acquisition rapide. Cela peut se faire, par exemple, par le biais d'un bon de commande ouvert ou d'un accord-cadre permettant une livraison immédiate en cas de besoin. L'objectif est d'éviter toute interruption dans le suivi ou le traitement de l'eau due à une défaillance matérielle ou à un manque de pièces.

I.7.3.3 Formation et compétences

Afin d'assurer la bonne application des exigences du standard HSE-302, l'ensemble du personnel concerné par la gestion de l'eau doit bénéficier d'un niveau de formation adapté à son rôle (Tableau I.2).

Tableau I.2 Exigences de formation du personnel

Le personnel	Contenu de la formation	Objectif
Management du site	Présentation complète du standard HSE-302 et de ses exigences	Comprendre les exigences globales et les intégrer à la stratégie HSE
Responsable Du Système de traitement des eaux	Formation approfondie sur les contrôles critiques liés à la pollution de l'eau (effluents liquides, système de traitement et contamination)	Assurer la performance et le suivi des mesures de traitement des rejets
Personnel de maintenance	Formation technique sur les systèmes hydriques (pompes, capteurs, traitement, etc.)	Réaliser les interventions de maintenance et de calibration efficacement
Tous les employés et sous-traitants	Sensibilisation aux bonnes pratiques de gestion de l'eau et à la prévention de pollution	Favoriser une culture de responsabilité environnementale sur le site

I.7.3.4 Gestion des urgences

Les Plans d'Intervention d'Urgence (ERP) doivent inclure des scénarios de rejets d'eaux polluées, comme les pannes de traitement, les inondations ou les eaux d'extinction d'incendie. Ils doivent prévoir les équipements nécessaires (kits anti-déversement, vannes, barrages), les

prestataires de dépollution certifiés, ainsi que des exercices de simulation réguliers. Les équipes doivent être formées à la réponse d'urgence, et les procédures doivent intégrer la gestion de crise et la communication avec les parties prenantes, conformément aux directives du Groupe

I.7.4 Évaluation de la performance et amélioration continue (Check & Act)

Le programme de gestion de l'eau fait l'objet d'une évaluation annuelle, reposant sur l'outil d'évaluation du standard HSE-302, qui permet d'identifier les écarts et de suivre la mise en œuvre des actions correctives. Cette revue analyse les résultats par rapport aux objectifs, les incidents liés à l'eau, les non-conformités constatées ainsi que l'avancement des projets d'amélioration. L'ensemble de ces éléments est intégré à la revue de direction, pour assurer l'amélioration continue du système et ajuster les priorités HSE.

I.7.5 Gestion de la documentation

Pour garantir le bon fonctionnement du système de gestion de l'eau, toutes les étapes décrites dans le cycle PDCA doivent être documentées. Cela inclut les objectifs, les plans d'action, les suivis, les audits et les actions correctives. Les documents clés (permis, rapports, analyses, incidents, etc.) doivent être clairement identifiés, à jour et conservés au minimum cinq ans, en conformité avec les exigences légales. Les données doivent faire l'objet du reporting environnemental du Groupe.

Le standard HSE-302 permet de structurer efficacement la gestion de l'eau autour du cycle PDCA. Son application garantit le suivi, la maîtrise et l'amélioration continue des performances hydriques, en lien avec les objectifs environnementaux du groupe Holcim.

I.8 Cadrage de la problématique

L'eau douce, ressource vitale et de plus en plus rare, fait aujourd'hui l'objet d'une pression sans précédent, tant sur le plan environnemental que géopolitique. Dans les régions arides comme la wilaya de Msila, où la baisse des précipitations, l'irrégularité climatique et la surexploitation des nappes s'accroissent d'année en année, le risque de rupture d'approvisionnement en eau n'est plus une hypothèse, mais une trajectoire déjà amorcée. Les forages industriels du site Lafarge de Hammam Dalaa en offrent une illustration concrète : diminution des débits, rabattement des niveaux piézométriques, recharge quasi-nulle — tous les indicateurs signalent une ressource sous tension critique.

Dans ce contexte, la question n'est plus de savoir s'il faut agir, mais jusqu'où et à quelle vitesse. Car ce sont la continuité des opérations, la stabilité de la production, et à terme la viabilité même de l'activité industrielle qui sont menacées. Holcim ne peut plus se permettre de maintenir un

mode de consommation qui repose sur une ressource aussi fragile et vulnérable. La raréfaction de l'eau, combinée à l'évolution inévitable des réglementations, plus strictes, plus contraignantes, plus surveillées, impose un changement immédiat, structuré et mesurable.

Le groupe Holcim l'a compris au niveau mondial, en intégrant la gestion de l'eau parmi ses priorités environnementales, avec des objectifs clairs de réduction d'ici 2030. Ces engagements se traduisent par des exigences internes comme le standard HSE-302, qui impose une cartographie rigoureuse des consommations, un suivi régulier et des plans d'action de réduction. Mais pour le site de Msila, ces exigences ne sont pas seulement des lignes directrices : elles sont une condition de survie. En tant que seule cimenterie du groupe en Algérie à consommer de l'eau douce pour ses procédés, elle se trouve face à un enjeu unique — et critique.

Dans ce contexte, l'optimisation de la consommation d'eau n'est pas un simple levier d'amélioration : c'est une obligation stratégique, une réponse urgente à une crise hydrique déjà installée, une condition indispensable pour maintenir l'activité industrielle dans le temps, éviter des sanctions réglementaires à venir, préserver la légitimité environnementale de l'entreprise et protéger une ressource partagée.

Dès lors, une question centrale s'impose :

Comment le site de Msila peut-il transformer sa gestion de l'eau pour répondre à une triple urgence ; préserver une ressource vitale localement menacée, garantir la conformité à des exigences environnementales de plus en plus strictes, et assurer la pérennité industrielle dans un contexte de stress hydrique aggravé ?

I.9 Conclusion

Ce chapitre a permis d'introduire le contexte général du site de Holcim Msila, en présentant son fonctionnement, son environnement hydrique, ainsi que les enjeux liés à la gestion durable de l'eau. Il a mis en évidence la nécessité d'agir face à une ressource de plus en plus limitée, dans un cadre réglementaire et environnemental de plus en plus exigeant. Sur cette base, le chapitre suivant se consacrera à l'évaluation de la conformité du site au standard HSE-302, référentiel interne du groupe Holcim en matière de gestion responsable de l'eau.

Chapitre II

Evaluation de conformité du site de Msila au standard HSE-302

II.1 Introduction

Ce chapitre présente l'évaluation du système de gestion de l'eau actuellement en place à l'usine Holcim de Msila, en référence aux exigences du standard HSE-302. L'objectif est de vérifier la conformité des pratiques du site avec les principes du groupe en matière de durabilité et de performance hydrique. Le périmètre du standard HSE-302 sera d'abord précisé, ainsi que ses principaux axes. Ensuite, une évaluation de conformité sera menée à l'aide d'une checklist structurée. Les résultats obtenus permettront d'élaborer un plan d'action ciblé afin de renforcer l'efficacité du système et de corriger les écarts identifiés.

II.2 Contexte et aperçu du standard HSE-302

Le standard HSE-302 constitue une référence interne du groupe Holcim en matière de gestion de l'eau sur ses sites industriels. Ce standard HSE-302 s'applique à l'ensemble des sites de production du groupe Holcim, incluant les unités de fabrication de clinker, de ciment et toutes les installations annexes où l'eau est utilisée comme ressource technique ou environnementale. Il couvre l'ensemble du cycle de gestion de l'eau sur site : prélèvement, consommation, traitement, réutilisation, et rejet. Ce standard s'impose à toutes les installations, qu'elles soient nouvelles ou existantes, et doit être intégré dans les pratiques opérationnelles quotidiennes. Son application permet de garantir une gestion responsable et homogène de l'eau à l'échelle du groupe, tout en prenant en compte les spécificités locales de chaque site.

II.3 Composantes clés du standard HSE-302

Le standard HSE-302 repose sur plusieurs composantes clés qui structurent l'ensemble du système de gestion de l'eau (Figure II.1). Chacune d'elles couvre un aspect essentiel permettant d'assurer une gestion efficace, durable et conforme aux attentes du groupe Holcim.

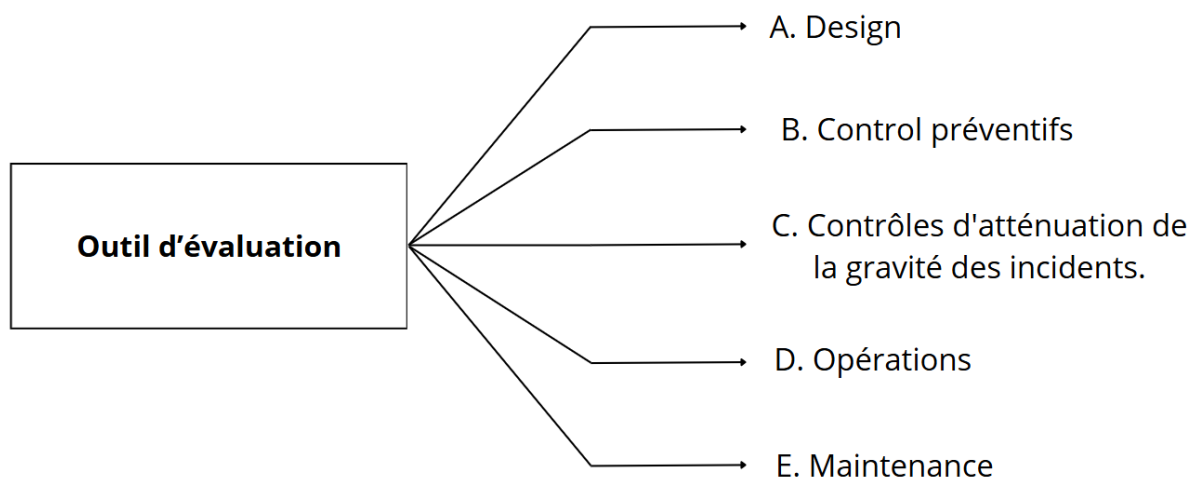


Figure II.1 Composantes clés du standard HSE-302

II.4 Evaluation de la conformité au standard HSE-302

Dans cette section, la conformité du site de Msila aux exigences du standard HSE-302 est évaluée à l'aide d'un questionnaire structuré, élaboré sous forme de checklist. Ce questionnaire a été développé à partir de l'outil d'évaluation interne du standard, en s'appuyant sur les exigences détaillées du référentiel. L'évaluation a été réalisée à travers des entretiens avec le personnel concerné ainsi que des visites sur site, permettant d'obtenir une vision concrète du niveau d'application des exigences sur le terrain.

II.4.1 Développement de la checklist d'évaluation

L'outil d'évaluation du standard HSE-302 se présente initialement sous forme d'un ensemble d'exigences générales couvrant les différentes dimensions de la gestion de l'eau. Afin de le rendre exploitable dans un contexte d'audit de terrain, ces exigences ont été traduites en une série de questions claires et mesurables, regroupées sous forme de checklist. Cette démarche a permis de transformer un référentiel technique en un outil d'évaluation structuré, facilitant l'analyse de la conformité. Chaque élément est évalué selon une grille binaire fondée sur la présence ou l'absence de mise en œuvre effective, avec des réponses codées « Oui » pour les exigences satisfaites et « Non » pour celles qui ne le sont pas, permettant ainsi une interprétation rigoureuse et normalisée des résultats.

II.4.1.1 Design

La composante « Design » porte sur la manière dont le système de gestion de l'eau est conçu à l'échelle du site. Elle s'intéresse notamment à la cartographie des équipements, aux circuits d'eau et à l'adéquation des infrastructures avec les exigences de gestion et de traitement de l'eau. Le tableau II.1 représente ses exigences sous forme de questions.

Tableau II.1 Exigences du design

#	Composant	Exigences
A	Design	
A.1	Cartographie des équipements et réseau d'eau	Existe-t-il une cartographie complète des composants du système d'eau incluant les sources, les points de rejets, les systèmes de traitement, les compteurs, les points de prélèvement etc. ?
A.2	Schéma de distribution des flux d'eau	Le schéma des flux d'eau entrants, de consommation, de rejet et de recyclage est-il disponible et à jour ?
A.3	Conception du système de traitement [Critique]	Le système de traitement est-il adapté aux volumes variés et conforme aux normes de rejet ?
A.4	Système de	Le système de drainage gère-t-il efficacement les pluies maximales

	drainage pour pluies maximales	quotidiennes sur les 10 dernières années ?
A.5	Systèmes de rétention des eaux pluviales [Critique]	Le système de rétention gère-t-il les moyennes quotidiennes maximales de pluie des 10 dernières années ?

II.4.1.2 Contrôles préventifs

Cette partie vise à évaluer la capacité du site à anticiper les risques liés à l'eau. Elle comprend les dispositions prises lors des changements d'équipements ou de production, ainsi que les mesures mises en place pour prévenir les non-conformités réglementaires ou les aléas comme les inondations. La table II.2 représente ses exigences sous forme de questions.

Tableau II.2 Exigences du control préventif

#	Composant	Exigences
B	Contrôles Préventifs	
B.1	Gestion des Changements	Est-ce que la gestion des changements tient en compte les impacts des modifications des équipements majeurs sur les ressources en eau ?
		Est-ce que ça tient en compte les changement de volume de production ?
		et est-ce que les procédures incluent des actions d'atténuation de ces impacts ?
B.2	Transition pour conformité réglementaire	Est-ce que les rejets et les systèmes de traitement sont surveillés et validés pendant les transitions pour garantir la conformité réglementaire ?
B.3	Étude de risque d'inondation (si nécessaire)	Une étude de risque d'inondation a-t-elle été réalisée si le site a été inondé dans les 50 dernières années ?

II.4.1.3 Contrôles d'atténuation des incidents

Il s'agit ici des dispositifs mis en place pour limiter les conséquences des incidents impliquant l'eau. L'accent est mis sur la préparation aux situations d'urgence, la présence de plans d'intervention adaptés et l'identification des zones ou équipements critiques. Le tableau II.3 représente ses exigences sous forme de questions.

Tableau II.3 Exigence du contrôles d'atténuation des incidents

#		Exigences
C	Contrôles d'atténuation	

	des incidents	
C.1	Identification des composants critiques	Les composants critiques sont-ils clairement identifiés par une signalisation visible ?
C.2	Rétentions secondaires définies [Critique]	Les dispositifs de rétention secondaire répondent-ils aux exigences de contenance ?
C.3	Plan d'Intervention d'Urgence – scénarios de rejets [Critique]	C.3.a. Le Plan d'Intervention d'Urgence inclut-il les scénarios de rejet d'eaux polluées ?
		C.3.b. Est-ce que les prestataires de dépollution tiers sont inclus dans le Plan d'Intervention ?
		C.3.c. Est-ce que les scénarios de rejets pollués sont revus annuellement, les modifications enregistrées et le personnel formé si nécessaire ?
C.4	Exercices d'urgence [Critique]	Des exercices d'urgence liés aux rejets sont-ils planifiés et réalisés ?
C.5	Plan d'Intervention d'Urgence – eaux d'incendie [Critique]	C.5.a. Est-ce que le Plan d'Intervention traite la rétention des eaux d'extinctions d'incendies ?
		C.5.b. Est-ce que les équipes sont formées à la gestion des rejets d'eaux incendies ?
C.6	Plan d'Intervention d'Urgence – gestion de crise et parties prenantes [Critique]	Le plan intègre-t-il la gestion de crise et l'engagement des parties prenantes ?

II.4.1.4 Opérations

Cette composante évalue le fonctionnement quotidien du système de gestion de l'eau. Elle couvre les pratiques opérationnelles, le suivi des consommations, la mise en œuvre d'indicateurs de performance, ainsi que la remontée des données dans les outils de reporting du Groupe. Le tableau II.4 représente ses exigences sous forme de questions.

Tableau II.4 Exigences des opérations

#	Composant	Exigences
D	Operations	
D.1	Programme de gestion de l'eau avec KPI	D.1.a. Existe-t-il un processus de réduction, de recyclage et de réutilisation d'eau ?
		D.1.b. Existence-t-ils des Indicateurs de Performances (KPI) pour mesurer la performance de l'unité en matière de gestion d'eau ?
		D.1.c. Est-ce que des initiatives ou des programmes définis par le groupe sont mis en œuvre, ex : dons d'eau ?
D.2	Mesure des quantités d'eau	Les volumes prélevés, consommés et rejetés sont-ils correctement mesurés et documentés ?
D.3	Reporting dans	Les données sont-elles reportées dans l'outil de reporting du

	l'outil Groupe	Groupe ?
D.4	Vidange après pluie	Les rétentions secondaires sont-elles vidées après chaque pluie ?
D.5	Les procédures Opérationnelles Standards pour traitement et inondation	Est-ce que des procédures opérationnelles sont en place pour le traitement et la prévention des inondations ?
D.6	Échantillonnage et surveillance [Critique]	Un programme d'échantillonnage conforme est-il mis en œuvre avant tout rejet ?
D.7	Permis valides et revus [Critique]	Tous les permis requis sont-ils valides et révisés annuellement ?

II.4.1.5 Maintenance

La maintenance concerne l'entretien et la fiabilité des installations liées à l'eau. Elle comprend les vérifications périodiques, la gestion des pièces de rechange et l'assurance que les équipements critiques fonctionnent en permanence dans des conditions optimales. Le tableau II.5 représente ses exigences sous forme de questions.

Tableau II.5 Exigences de Maintenance

#	Composant	Exigences
E	Maintenance	
E.1	Maintenance des équipements de traitement [Critique]	Est-ce que les équipements de traitement, y compris : tuyaux, pompes, compteurs etc., sont inclus dans le plan de maintenance ?
E.2	Entretien et calibration des appareils	Est-ce que les équipements de mesure, sont régulièrement entretenus et calibrés ?
E.3	Rétentions et drainage dans le plan	Est-ce que les systèmes de drainage et de rétentions sont inspectés régulièrement ?
E.4	Pièces critiques de rechange	Est-ce que les pièces de rechanges critiques des systèmes de traitement sont identifiés et disponibles
E.5	Équipements d'urgence testés	Les équipements d'urgence sont-ils régulièrement testés ?
E.6	Inspection des rétentions secondaires	Les rétentions secondaires sont-elles inspectées pour détecter fissures ou corrosion ?

II.4.2 Implémentation

L'évaluation de la conformité a été réalisée de manière complète en s'appuyant, dans un premier temps, sur la checklist élaborée préalablement. Elle a ensuite été mise en œuvre à travers plusieurs actions complémentaires : des visites sur site menées sur une période d'environ deux

semaines, des entretiens avec le personnel opérationnel, ainsi qu'une revue de la documentation disponible. L'ensemble des éléments collectés a été comparé aux questions de la checklist, afin de déterminer pour chaque exigence si elle était respectée « Oui » ou non respectée « Non ». Les résultats obtenus ont été synthétisés et sont présentés en annexe.

II.4.3 Discussion des résultats

Les résultats obtenus à partir de l'évaluation précédente permettent de visualiser le niveau de conformité actuel du système de gestion de l'eau par rapport aux exigences du standard HSE-302. Pour illustrer ces niveaux de conformité de manière claire et comparative, un graphique radar a été utilisé.

Ce type de représentation graphique est particulièrement adapté, car il permet de visualiser plusieurs dimensions du standard sur un seul diagramme. Le graphique radar met en évidence les niveaux de conformité actuels pour chaque grande composante du standard, en montrant distinctement les domaines où les exigences sont majoritairement respectées, ceux où la conformité est partielle, ainsi que ceux présentant des insuffisances notables.

Cette visualisation permet ainsi de repérer rapidement les axes nécessitant des actions correctives prioritaires afin d'améliorer la performance globale du système de gestion de l'eau du site.

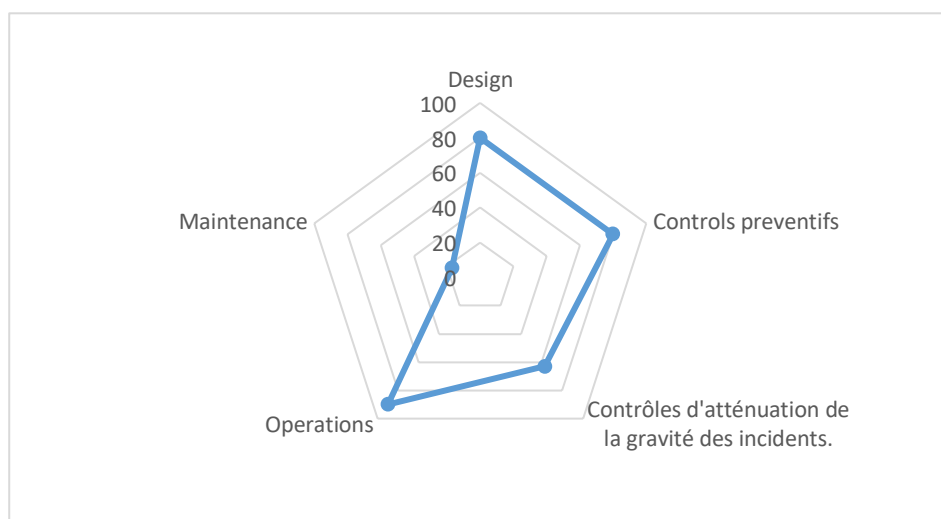


Figure II.2 Degré de conformité du site de Msila au standard HSE-302

D'après le graphique radar (figure II.2), on observe des niveaux de conformité très variés selon les cinq composantes du standard HSE-302. L'analyse détaillée des lacunes met en lumière les points suivants :

II.4.3.1 Design

L'évaluation confirme que les infrastructures de conception sont globalement conformes : la cartographie couvre la majorité des équipements et le schéma de flux est à jour, de même, les dispositifs de rétention secondaire répondent aux exigences du standard. Seul point d'attention : quelques compteurs et pompes n'apparaissent pas dans le plan de cartographie.

II.4.3.2 Contrôles préventifs

Les procédures de gestion des changements intègrent correctement les impacts techniques, et les systèmes de traitement sont surveillés lors des phases de transition. Néanmoins, la checklist a mis en évidence un manque de prise en compte des variations de volume de production dans la planification des changements, ce qui peut conduire à des écarts non anticipés.

II.4.3.3 Contrôles d'atténuation des incidents

Le site bénéficie d'une identification claire des composants critiques et d'un plan d'intervention couvrant les eaux d'incendie et la gestion de crise. Toutefois, les scénarios de rejet d'eaux polluées ne sont pas formalisés, les prestataires de dépollution tiers restent exclus des procédures, et il n'existe ni revue annuelle de ces scénarios ni exercices d'urgence planifiés. Ces lacunes affaiblissent la réactivité et la fiabilité du dispositif d'atténuation en cas d'incident contaminant.

II.4.3.4 Opérations

La mise en œuvre quotidienne des procédures (reporting, échantillonnage avant rejet, vidange des rétentions) est globalement satisfaisante, comme le montre le score maximal sur le radar. Toutefois, la mesure précise des volumes prélevés, consommés et rejetés n'est pas toujours réalisable faute d'instruments correctement calibrés, ce qui pénalise la fiabilité des données opérationnelles.

Le tableau II.6 présente un aperçu des données hydriques non conforme au standard, en précisant leur mode d'obtention ainsi que les remarques associées. Il met en évidence plusieurs limites, notamment la présence d'estimations arbitraires et des dysfonctionnements au niveau des compteurs ou de l'affichage logiciel, ce qui affecte la fiabilité du suivi opérationnel et la qualité du reporting environnemental.

Tableau II.6 Données hydrique non conformes à l'exigence D.2 du standard HSE-302

Donnée	Obtention	Remarques
Entrée usine (m ³)	Compteur numérique	Remonte a une valeur antérieure
Consommation Ligne 1	Compteur mécanique	Affichage sur logiciel erroné
Consommation ligne 2	Compteur numérique	Affichage sur logiciel erroné
Arrosage verdure (depuis STEP destiné pour irrigation ou arrosage)= Eau consommée domestique*70%	Estimation	Estimation arbitraire
Arrosage des pistes (depuis STEB)	Estimation	Estimation arbitraire
Rejet STEB	Estimation	Estimation arbitraire
Ciment ligne 1	Compteur numérique	Affichage sur logiciel erroné
Cuisson ligne 1	Compteur numérique	Affichage sur logiciel erroné
Ciment ligne 2	Compteur numérique	Affichage sur logiciel erroné
Cuisson ligne 2	Compteur mécanique	Affichage sur logiciel erroné
Four 1	Compteur Numérique	Affichage sur logiciel erroné
Four 2	Compteur Numérique	Affichage sur logiciel erroné

II.4.3.5 Maintenance

La composante maintenance met en évidence que seuls les équipements d'urgence font l'objet de tests réguliers, conformément aux attentes. En revanche, les équipements de traitement, notamment les compteurs, ne sont pas encore intégrés dans le plan de maintenance, et ne

bénéficient pas de calibrations périodiques. Par ailleurs, les inspections des systèmes de drainage et de rétention ainsi que la gestion des pièces de rechange critiques restent à formaliser.

À l'issue de cette analyse, les principaux écarts identifiés au sein des différentes composantes du standard HSE-302 offrent une base claire pour définir des actions ciblées. En particulier, la maintenance apparaît comme le volet le plus fragile ; absence de suivi des équipements de traitement, manque de calibrations et d'inspections régulières, ce qui accroît le risque de défaillance. Les recommandations qui suivent viseront donc à renforcer prioritairement ce programme de maintenance, tout en adressant les autres lacunes relevées.

II.5 Recommandations

Le tableau II.7 constitue un plan d'action structuré visant à corriger les non-conformités identifiées lors de l'évaluation. Chaque action proposée cible une faiblesse spécifique du système de gestion de l'eau, en couvrant l'ensemble des composantes du standard HSE-302, depuis la mise à jour des documents techniques jusqu'à l'amélioration des pratiques de maintenance et de suivi des équipements.

Tableau II.7 Recommandations d'amélioration du système de management de l'eau

Composante	Non-conformité ou faiblesse identifiée	Action recommandée	Priorité
Design	Cartographie incomplète	Actualiser la cartographie du réseau d'eau en intégrant les pompes et les points de prélèvement des échantillons	Moyenne
Contrôles préventifs	Variation de production non prise en compte dans la gestion des changements	Intégrer les fluctuations de volume dans les procédures de changement	Moyenne
Contrôles d'atténuation	Absence de scénarios de rejet pollué dans le Plan d'Urgence	Formaliser des scénarii spécifiques aux rejets pollués dans le Plan	Élevée
	Pas de prestataires de dépollution identifiés ni intégrés au PIU	Contacteur et intégrer un prestataire tiers dans la chaîne d'intervention	Élevée
	Aucun exercice d'urgence réalisé	Organiser un exercice annuel simulant un rejet pollué accidentel	Élevée
Opérations	Données hydriques partielles, estimations non fiables, compteurs défectueux	Remplacer les compteurs défaillants et fiabiliser les chaînes de mesure	Élevée
	Affichage logiciel erroné sur plusieurs points	Vérifier et corriger les formules d'affichage dans le système de supervision	Moyenne
Maintenance	Équipements de traitement non inclus dans le plan de	Mettre à jour le plan de maintenance préventive en incluant	Élevée

	maintenance	les compteurs d'eau.	
	Aucun programme de calibrage pour les appareils de mesure ; compteurs	Définir une fréquence de calibration et tenir un registre de suivi des compteurs.	Élevée
	Systèmes de drainage et de rétention non inspectés régulièrement	Intégrer ces éléments dans un protocole d'inspection périodique.	Élevée
	Pièces de rechange critiques non identifiées ni disponibles	Établir une liste des compteurs et des équipements défaillants et constituer un stock minimum	Élevée

Ce plan d'action regroupe les principales mesures correctives à mettre en œuvre pour répondre aux écarts identifiés lors de l'évaluation. L'accent est mis sur la mise à niveau du système de maintenance, la fiabilisation des équipements de mesure et l'amélioration de la préparation aux situations d'urgence. La mise en œuvre progressive de ces actions permettra au site de se rapprocher pleinement des exigences du standard HSE-302.

II.6 Résultats

Suite à l'analyse des écarts de conformité vis-à-vis du standard HSE 302, un ensemble de recommandations a été formulé. Dans cette section, seuls les résultats potentiels liés aux recommandations à haute priorité sont présentés, les autres actions, conformément à l'approche de traitement des risques par priorisation.

Ces recommandations concernaient principalement les composantes suivantes :

- i) **Contrôles correctifs** : formalisation des scénarios de rejet, intégration des prestataires de dépollution, planification d'exercices d'urgence.
- ii) **Maintenance** : intégration des équipements de traitement (notamment les compteurs) au plan de maintenance, début de la mise en place d'un programme de calibration.
- iii) **Contrôles préventifs** : prise en compte des variations de production dans la gestion des changements.

II.6.1 Analyse comparative des résultats

Le graphique radar ci-dessous (figure II.3) illustre l'évolution du niveau de conformité entre la situation initiale et la situation après mise en œuvre des recommandations prioritaires.

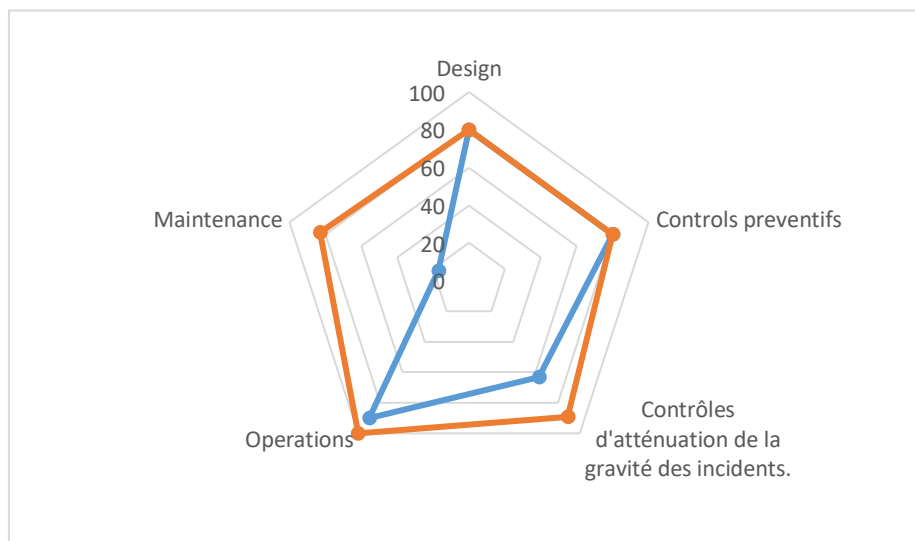


Figure II.3 L'évolution du degré de conformité au standard HSE-302

Le graphique radar illustre qu'une nette amélioration est visible sur plusieurs axes, témoignant de l'efficacité des actions mises en place.

La **composante "Maintenance"** enregistre la progression la plus marquée. Cette amélioration est principalement due à l'intégration des équipements de traitement dans le plan de maintenance préventive, ainsi qu'au lancement d'un programme de calibrage des instruments de mesure. Ces actions ont permis de renforcer la fiabilité du suivi hydrique et de prévenir les défaillances.

Du côté des **contrôles d'atténuation**, des progrès significatifs ont été réalisés grâce à la formalisation des scénarios de rejet d'eaux polluées et à la sensibilisation du personnel aux procédures d'urgence. Bien que certains aspects restent à finaliser, notamment l'organisation d'exercices pratiques, les bases d'un dispositif réactif sont désormais en place.

Enfin, les **contrôles préventifs** montrent également une amélioration notable. L'ajustement des procédures de gestion du changement, désormais adaptées aux variations de production, permet une meilleure anticipation des impacts sur les ressources en eau, renforçant ainsi la résilience du système.

En revanche, les composantes "Design" et "Operations", déjà bien notées lors de l'audit initial, n'ont pas connu de changement significatif, car elles ne faisaient pas l'objet d'actions urgentes. Cela confirme que les efforts ont été correctement orientés vers les domaines les plus sensibles.

L'application ciblée des recommandations à criticité élevée a permis une amélioration mesurable du système de gestion de l'eau, renforçant ainsi sa robustesse face aux incidents et sa conformité au standard HSE 302. Ces premiers résultats confirment la pertinence de l'approche

progressive adoptée, et justifient l'élargissement des actions correctives aux recommandations à criticité moyenne et faible dans une phase ultérieure.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a évalué le système de gestion de l'eau du site de Msila en se basant sur le standard HSE-302 du groupe Holcim. Après avoir présenté les exigences de ce standard, un questionnaire a été développé pour vérifier, point par point, si le site respecte ces exigences.

L'évaluation a montré que certaines parties du système sont bien en place, surtout au niveau des opérations courantes. Mais elle a aussi révélé plusieurs points faibles, notamment dans la maintenance des équipements et la gestion des situations d'urgence. En plus du questionnaire, des vérifications ont été faites sur le terrain, comme l'état des compteurs, ce qui a permis de mieux comprendre certains problèmes techniques.

Un tableau de recommandations a ensuite été proposé pour corriger ces écarts. Ces actions visent à améliorer le suivi de la consommation d'eau, à renforcer la maintenance, et à rendre le site plus conforme aux exigences du groupe.

Chapitre III :

Diagnostic fonctionnel du réseau hydrique industriel de l'usine de Msila

III.1 Introduction

Ce chapitre présente l'évaluation de la consommation d'eau, dans une démarche visant à identifier les principaux postes consommateurs et à explorer les opportunités d'optimisation. Je commencerai par décrire l'infrastructure hydrique du site ainsi que la répartition des différents usages de l'eau. Ensuite, j'examinerai les équipements à forte consommation afin de mettre en évidence les zones critiques. À partir de cette analyse, une étude plus approfondie sera menée afin d'examiner leur fonctionnement, d'évaluer les niveaux de consommation associés et de comprendre les facteurs pouvant expliquer certains écarts.

III.2 Infrastructure hydrique et répartition des usages de l'eau

III.2.1 Tirage de l'eau de forages

Le réseau d'eau de l'usine de Hammam Dalaa s'articule autour de cinq forages profonds (P1 à P5) creusés dans l'aquifère Campanien–Santonien entre 2003 et 2004 (Figure III.1). Parmi ces captages, le forage P1 est aujourd'hui abandonné pour mauvaise qualité d'eau, et le P3 n'est plus exploité en raison de problèmes de pompage. Ainsi, la production d'eau brute repose exclusivement sur les forages P2, P4 et P5, qui fournissent ensemble un débit moyen stabilisé à environ 45 m³/h chacun lors des opérations courantes.

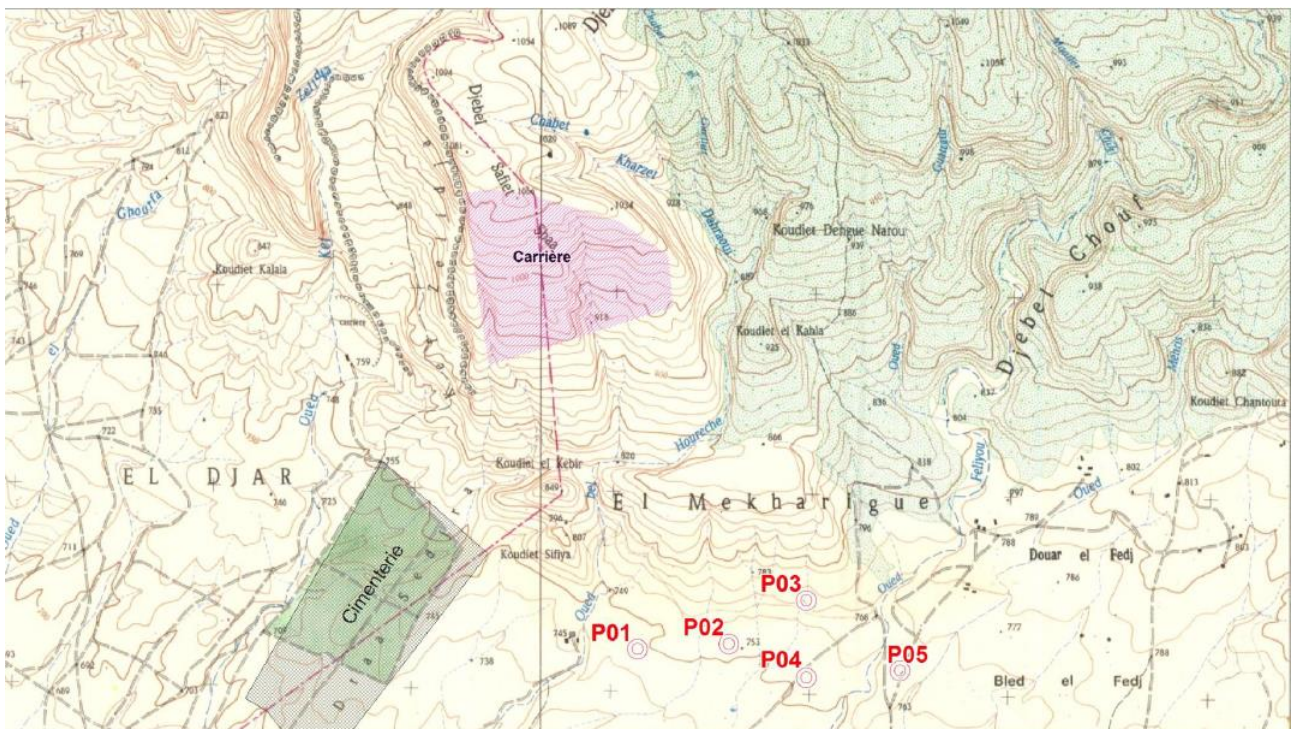


Figure III.1 Situation des forages existants sur fond topographique au 1/25 000 [2]

L'eau extraite par P2, P4 et P5 est immédiatement pompée vers une cuve de stockage de 1 000 m³, située à l'intérieur du site, qui est maintenu à un niveau de 80%. Cette cuve reçoit

quotidiennement une moyenne de 1 500 m³ pompées, c'est-à-dire environ 45 000m³ d'eau par mois, ce qui permet d'assurer une réserve suffisante même en cas de fluctuation de débit. Depuis ce réservoir, l'eau brute est dirigée vers la Station de Traitement des Eaux Brutes de forages (STEB) pour élimination des impuretés et minéraux indésirables.

III.2.2 La station de traitement des eaux brutes (STEB)

La STEB comprend successivement :

-**Filtre multimédia** : Premier niveau de filtration, composé de plusieurs couches de sable et de gravier, pour retenir les particules en suspension les plus volumineuses.

-**Filtres à cartouches** : Disposés en deux étapes (avant et après le réservoir tampon de la STEB) pour éliminer les plus fines impuretés.

-**Filtre à charbon actif** : Colonne remplie de charbon granulaire, destinée à piéger les composés organiques, les odeurs et à réduire les résidus de chlore.

-**Adoucisseur** : Système « duplex » à résine échangeuse d'ions, conçu pour abaisser la dureté de l'eau (élimination du calcium et du magnésium).

Le bassin à résine est équipé d'un système de lavage automatique : l'eau de rinçage est évaluée à 20% de l'eau pompée. Cette eau est ensuite chargée en sels concentrés, est collectée dans un bassin de rétention et valorisée pour l'irrigation des pistes internes. L'excédent, évalué à 50% n'étant pas réutilisable, est rejeté hors site (Figure III.2), conformément aux prescriptions du décret exécutif N°06-141 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

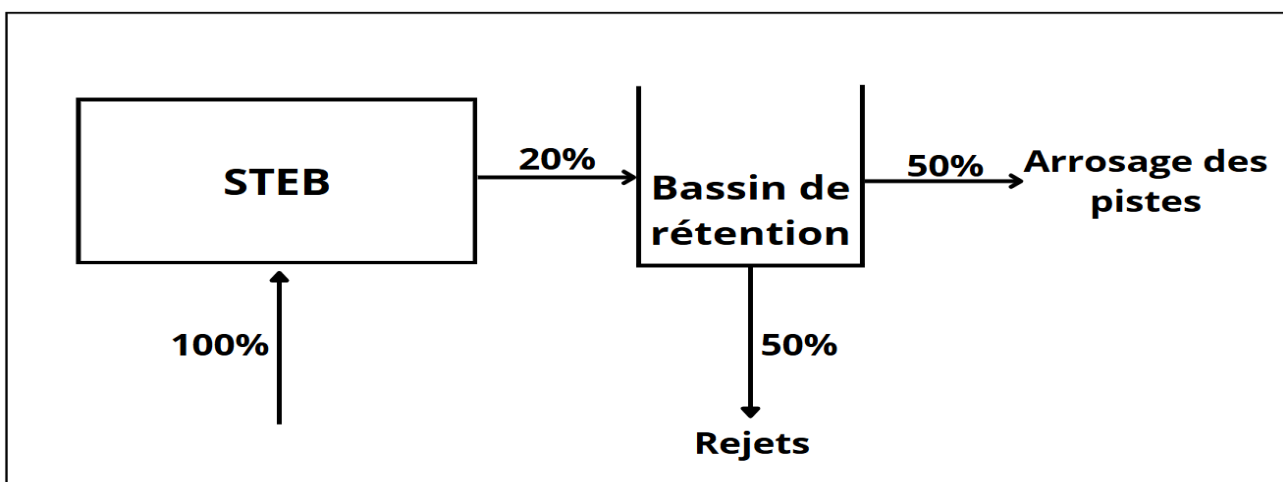


Figure III.2 Flux de l'eau entrant à la STEB

Après le traitement, l'eau est répartie en deux circuits distincts, chacun répondant à des besoins spécifiques : une ligne dédiée à l'usage domestique et une autre à l'usage industriel."

III.2.3 L'usage domestique

La ligne domestique débute par un réservoir de 400 m³, avec une moyenne de consommation de 219m³ journalière, destiné à l'alimentation en eau des installations sanitaires, du restaurant, de l'hôtel, des bâtiments administratifs ainsi que des vestiaires. Les eaux usées sont collectées et évacuées vers la station d'épuration à l'aide d'un réseau d'assainissement.

III.2.4 La station d'épuration(STEP)

Les eaux usées, estimées à 70% de l'eau à usage domestique, arrivent par l'égout puits où elles passent d'abord à travers une grille qui retient les gros déchets (papier, plastiques, feuilles). Ces déchets sont enlevés manuellement régulièrement. Le bassin situé sous le niveau de l'égout fait office de dessablage, éliminant les particules fines pour éviter le colmatage des canalisations. Des pompes submersibles, commandées par des interrupteurs de niveau, envoient ensuite ces eaux vers le réservoir d'aération prolongée.

Les eaux usées tamisées passent dans ce réservoir où elles sont mélangées avec des boues activées, riches en micro-organismes aérobies. Un système d'aération fournit l'oxygène nécessaire et maintient le mélange en agitation pour éviter la sédimentation. Les micro-organismes consomment la matière organique des eaux usées et se multiplient, générant un excès de boues activées qui doit être éliminé périodiquement.

Le mélange biologique arrive ensuite dans un réservoir de décantation où les boues se séparent de l'effluent clarifié. Une partie des boues est recyclée vers le bassin d'aération, et l'effluent secondaire est dirigé vers la phase suivante. L'effluent secondaire est désinfecté dans un réservoir de contact au chlore grâce à une dose contrôlée d'hypochlorite de sodium, injectée via une pompe doseuse. Après désinfection, l'effluent passe à travers un filtre à sable. Quand le filtre s'encrasse, il est lavé à contre-courant avec de l'eau réutilisée provenant du réservoir des effluents traités, et l'eau de lavage est renvoyée au début du traitement.

Les boues issues de la décantation sont stockées dans un réservoir pour une digestion aérobie supplémentaire. Elles sont ensuite évacuées par camion hydro cureur. Un lit de séchage composé de sable et gravier permet de déshydrater les boues, l'eau récupérée est renvoyée au bassin des eaux brutes. Les boues sèches sont soit réutilisées comme combustible dans le four de l'usine, soit utilisées comme compost pour les espaces verts.

Par la suite l'eau traitée est pompée à un point élevé de l'usine dans un grand bassin d'une capacité de 315 m³ pour la collecte des eaux d'irrigation des espaces verts grâce à un réseau d'irrigation par gravité.

III.2.5 L'usage industriel

Après traitement à la STEB, l'eau est dirigée vers un réservoir de stockage d'une capacité de 6 000 m³, qui alimente deux lignes de production identiques, tant par leur fonctionnement que par leurs besoins en eau. La consommation industrielle d'eau varie entre environ 24 000 m³, sur une consommation totale de 45 000 m³. Dans ce cadre, je présenterai l'usage industriel de l'eau de manière globale, sans distinguer chaque ligne. Cette approche permet de simplifier l'analyse tout en restant représentative de la réalité opérationnelle du site.

III.2.5.1 Le broyeur vertical (VRM)

Le broyeur vertical utilise de l'eau principalement pour deux raisons. D'abord, elle permet de maintenir une épaisseur constante du lit de matière à l'intérieur du broyeur, située généralement entre 40 et 60 mm. Cette épaisseur est essentielle pour garantir un broyage efficace. Ensuite, l'eau aide à stabiliser l'équipement pendant le fonctionnement en limitant les vibrations les à-coups mécaniques. Elle est injectée de manière contrôlée, en fonction des conditions de marche de l'installation.

En moyenne, le broyeur vertical consomme environ 242 m³ d'eau pour une production journalière de 9168 tonnes de matière broyée, soit un débit moyen de 11,08 m³/h (Figure III.3).

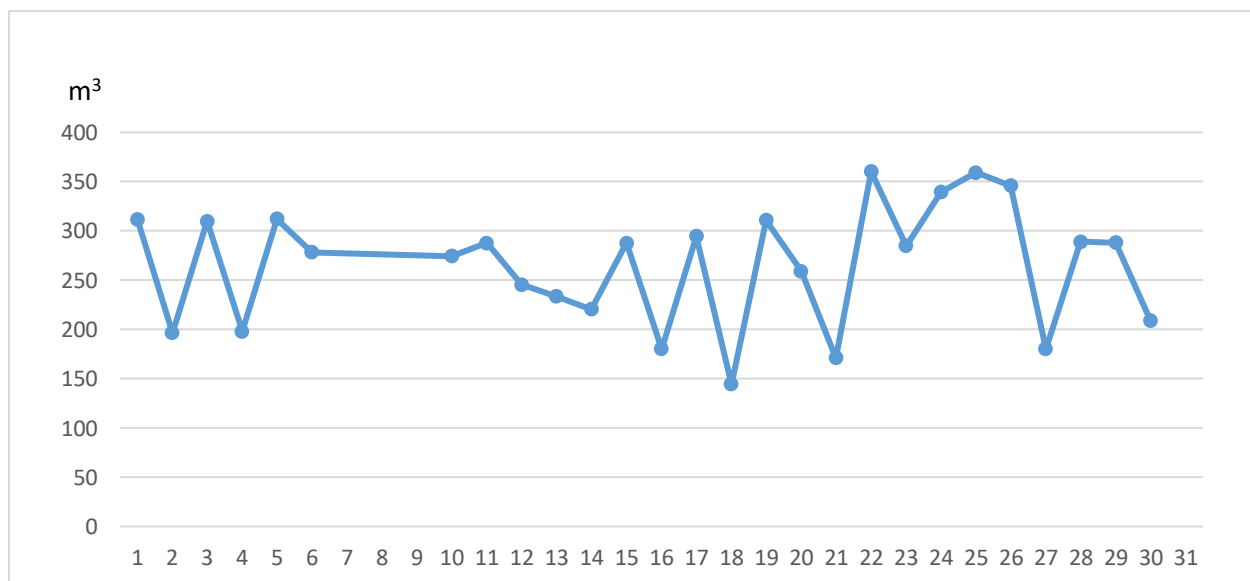


Figure III.3 Consommation en eau en m³ du broyeur vertical pour le mois de Mars

III.2.5.2 Le four rotatif

Le four rotatif n'utilise pas d'eau pendant le processus normal de cuisson du clinker. En revanche, de l'eau est utilisée de manière ponctuelle, uniquement lors des arrêts du four. Dans ces moments, elle sert au lavage des parois internes, des conduites et des équipements annexes, afin d'éliminer les dépôts de poussière ou les résidus solides accumulés pendant les cycles de production. Cette opération de nettoyage est indispensable pour assurer la sécurité, éviter les pannes et garantir une remise en service rapide du four. La quantité d'eau utilisée étant très faible et occasionnelle de l'ordre de quelques mètres cubes à chaque arrêt, alors sa consommation peut être considérée comme négligeable.

III.2.5.3 Le broyeur ciment à boulets

Le broyeur ciment est l'équipement où l'on broie le clinker avec du gypse et d'autres ajouts pour obtenir le ciment fini. Dans ce type de broyeur, une petite quantité d'eau peut être injectée, mais elle n'est pas utilisée en continu comme dans le VRM. L'eau sert principalement à limiter la température pendant le broyage, notamment lorsque la vitesse de rotation ou la charge du broyeur est élevée. Cela permet d'éviter la formation de grumeaux ou le collage de la matière sur les parois, ce qui a une influence directe sur la qualité du produit final. Toutefois, cette consommation reste faible par rapport à d'autres équipements, en moyenne, elle s'élève à environ 20 m³ par jour (Figure III.4).

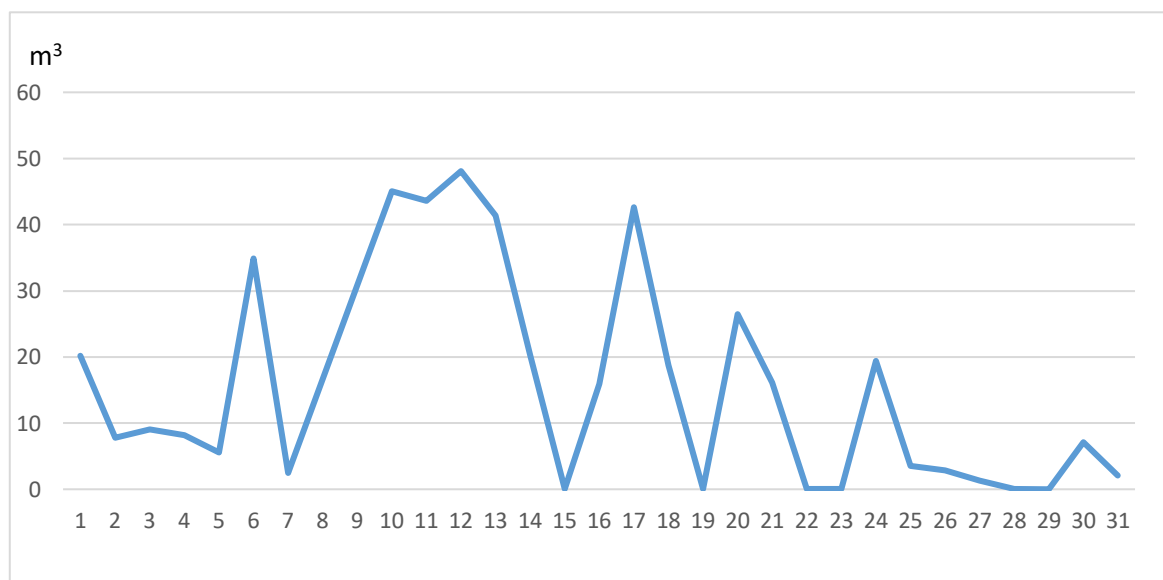


Figure III.4 Consommation en eau du BK1 pour le mois de Mars

III.2.5.4 La tour de refroidissement des gaz (Gas Cooling Tower – GCT)

La tour de refroidissement des gaz (GCT) est un équipement clé dans le processus de dépoussiérage. Elle est utilisée pour abaisser la température des gaz chauds en provenance du four et du broyeur vertical. Ces gaz, initialement à une température d'environ 350 °C, doivent être refroidis à près de 150 °C avant leur passage dans le filtre à poussière (comme un filtre à manches), ces derniers étant sensibles à des températures trop élevées. Pour cela, de l'eau, dont la consommation moyenne est d'environ 80 m³ par jour, est pulvérisée à l'intérieur de la tour sous forme de fines gouttelettes. Ce procédé permet un refroidissement rapide des gaz sans les mouiller. Cette consommation, bien que secondaire dans la chaîne de production, reste significative et fait l'objet d'un suivi régulier (Figure III.5).

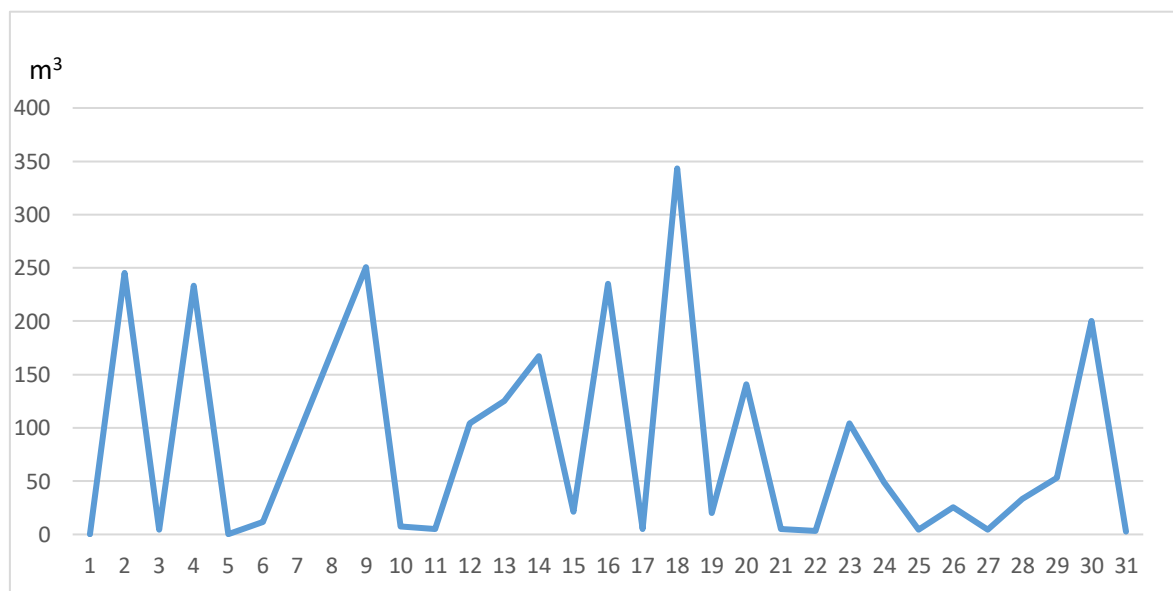


Figure III.5 Consommation en eau de la GCT 1 pour le mois de Mars

De manière synthétique, la consommation totale d'eau sur le site s'élève à environ 45 000 m³ par mois, répartie entre les usages industriels ; 24 000 m³, soit environ 55 % du total et les usages domestiques ; environ 6 570 m³ par mois, soit environ 15 % de la consommation totale. À cela s'ajoute une consommation estimée à 25 % du total, liée au fonctionnement de la Station de Traitement des Eaux Brutes (STEB).

L'ensemble de ces postes constitue ce que l'on qualifie de consommations identifiées. La différence entre cette somme et la consommation totale mesurée correspond à des volumes non attribués, généralement interprétés comme des fuites ou pertes non maîtrisées dans le réseau d'eau interne du site (Tableau III.1).

Tableau III.1 Résumé du l'ensemble de la consommation

Entrée totale (m ³)	Usage industriel (%)	STEB (%)	Usage domestique (%)	Consommation identifiée (%)	Fuites (%)
45 000	55	20	15	90	10%

Maintenant que l'ensemble des usages de l'eau a été identifié et quantifié, il est possible d'en analyser la répartition afin de mieux comprendre où se concentrent les principaux volumes consommés. Cette étape est essentielle pour orienter les efforts vers les sources les plus influentes.

III.3 Analyse de Pareto de la consommation d'eau industrielle

Dans le but d'orienter les efforts de réduction vers les postes les plus pertinents, j'ai effectué une analyse de Pareto afin d'identifier les équipements les plus consommateurs d'eau dans le processus industriel. Cette approche vise à prioriser les actions correctives sur les sources principales de consommation, en s'appuyant sur le principe bien connu des « 80/20 » selon lequel une minorité d'éléments est souvent responsable de la majorité des effets.

Dans ce contexte, on s'intéresse exclusivement à l'usage industriel de l'eau, qui représente à lui seul plus de 50 % de la consommation totale du site. Cette démarche permet de cibler les postes à fort impact tout en évitant de diluer les efforts sur des usages secondaires ou domestiques moins significatifs.

III.3.1 Résultats de l'analyse

Les données collectées sont résumées dans le tableau III.2:

Tableau III.2 Tableau de Pareto de la consommation en eau

	VRM1	GCT1	BK1	BK2
Consommation en eau (m ³)	7268.83	2406.10	601.59	343.14
Consommation cumulée (m ³)	7268.83	9674.93	10276.52	10619.66

Pourcentage (%)	68,45	22,66	5,66	3,23
Pourcentage cumulé (%)	68.45	91.11	96.77	100

Le graphique de Pareto (Figure III.6) confirme visuellement ces résultats :

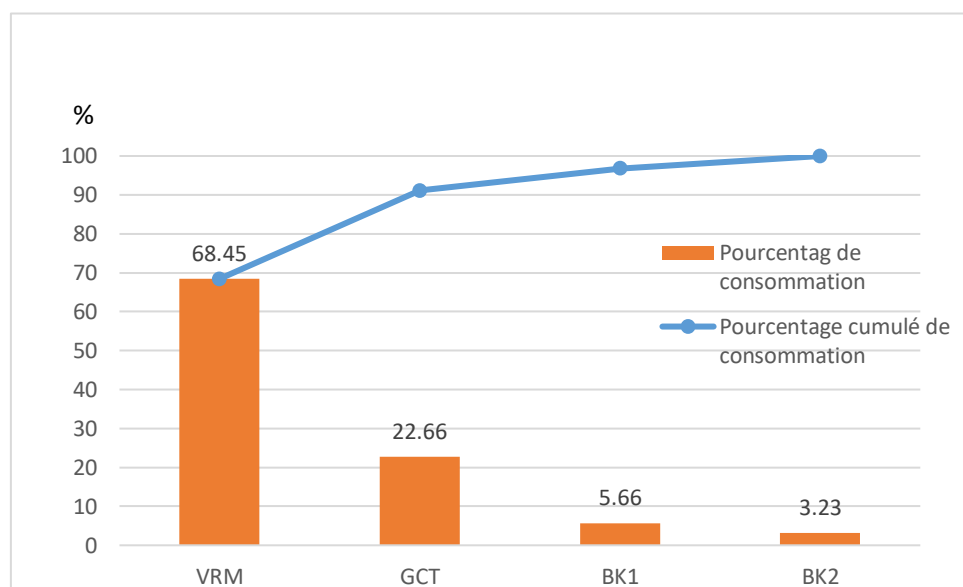


Figure III.6 Graphique de Pareto sur la consommation en eau

Comme le montre le graphique, le VRM1 (Vertical Roller Mill) est de loin le principal poste de consommation d'eau, représentant plus de 68 % de la consommation industrielle totale. Ce constat justifie pleinement qu'il soit placé au centre de notre réflexion et de nos propositions d'optimisation.

III.3.2 Justification du ciblage sur le VRM

L'un des intérêts majeurs de cette analyse n'est pas seulement d'identifier les équipements les plus consommateurs, mais aussi d'évaluer la marge de manœuvre réelle pour intervenir. En ce sens, il est important de souligner que le VRM constitue un levier prioritaire et pertinent pour la réduction de la consommation d'eau, car il est possible d'intervenir sur ses paramètres de fonctionnement sans compromettre la qualité du produit fini.

À l'inverse, les autres équipements identifiés dans l'analyse présentent des contraintes fortes qui limitent fortement la possibilité d'agir sur leur consommation d'eau :

-La tour de refroidissement : son rôle est de refroidir les gaz chauds avant leur passage dans le filtre à manches. Une réduction de l'eau ici pourrait compromettre l'efficacité du refroidissement

et endommager le système de filtration, ce qui est inacceptable d'un point de vue opérationnel et environnemental.

-Broyeurs à boulets : l'eau est utilisée pour ajuster la température au cours du broyage, ce qui influe directement sur le comportement du ciment (notamment la prise et la stabilité). Une modification non contrôlée de cette consommation peut altérer la qualité finale du produit, ce qui est exclu dans un contexte industriel normé.

Ainsi, même si GCT1, BK1 et BK2 consomment de l'eau, les opportunités d'optimisation sont très limitées, voire risquées. Le VRM1, en revanche, offre un potentiel d'amélioration réel et techniquement maîtrisable.

III.3.3 Conclusion de l'analyse de Pareto

L'analyse de Pareto nous permet de conclure que le VRM1 est à la fois le principal poste de consommation d'eau industrielle et la cible la plus favorable pour une optimisation sans compromettre les performances industrielles ni la qualité du produit.

Cibler les actions d'économie d'eau sur le VRM1 permettrait donc de générer un impact significatif à moindre risque, tout en respectant les exigences techniques du procédé de fabrication du clinker.

Afin de mieux comprendre les leviers d'optimisation possibles sur le VRM1, il est nécessaire de revenir sur son principe de fonctionnement. Cela permettra d'identifier plus précisément les étapes ou paramètres sur lesquels une action peut être envisagée.

III.4 Fonctionnement général du broyeur vertical (VRM)

Le broyeur vertical à galets est un équipement essentiel dans la chaîne de production du cru. Il assure la réduction granulométrique des matières premières par un procédé combinant la compression, le cisaillement et le séchage simultané. Le fonctionnement repose sur une interaction dynamique entre plusieurs composants majeurs, organisés dans un circuit fermé : la matière est introduite par un système d'alimentation spécifique (le SAS), puis broyée entre un plateau rotatif et des galets stationnaires. Des gaz chauds circulent dans le broyeur pour sécher la matière au cours du broyage. Les particules fines sont ensuite entraînées par ces gaz vers un séparateur dynamique, qui trie le produit final et recycle les particules grossières pour un deuxième broyage.

III.4.1 Le Système d'alimentation

Le processus débute par l'introduction contrôlée de la matière dans le broyeur via le système d'alimentation. Ce dispositif est conçu pour transférer la matière tout en empêchant l'entrée d'air parasite dans le système. Il est constitué d'une roue cellulaire à huit poches, tournant à l'intérieur

d'un carter cylindrique. En tournant, les cellules capturent la matière et la déversent directement sur le plateau de broyage. Pour garantir la fluidité de l'alimentation, surtout en cas de matière humide, le SAS est équipé d'un système de chauffage électrique qui évite les colmatages. Ce rôle d'écluse est fondamental pour maintenir la pression et le flux de gaz à l'intérieur du broyeur.

III.4.2 Le Plateau de broyage et galets (meules)

Une fois la matière déversée au centre du plateau tournant, elle est répartie radialement vers la périphérie grâce à la force centrifuge générée par la rotation du plateau. Elle rencontre alors les galets, qui exercent une pression intense pour la broyer. Ces galets, généralement au nombre de trois, sont maintenus par des bras oscillants et pressés contre la matière par un système de suspension hydraulique. L'inclinaison des galets (environ 15°) permet de combiner une force de compression verticale à un effort de cisaillement horizontal, assurant un broyage efficace et homogène [26].

III.4.3 Le Système de lubrification

Le système de lubrification est conçu pour assurer la lubrification continue et efficace des galets de broyage. Il fonctionne par circulation d'huile, permettant de réduire les frottements, de limiter l'usure des composants en mouvement, et de maintenir une température de fonctionnement optimale. Ce système est équipé de pompes haute pression, de filtres, d'échangeurs de chaleur et de capteurs, garantissant un débit d'huile constant et contrôlé vers chaque galet. L'huile est aspirée depuis un réservoir, filtrée, refroidie, puis envoyée sous pression aux points de lubrification. Après avoir circulé, elle est récupérée, analysée, puis renvoyée dans le circuit. Ce dispositif est essentiel pour la fiabilité et la longévité du système de broyage [27].

III.4.4 La Conduite d'injection d'eau

Un système d'arrosage est utilisé pour stabiliser le lit de broyage. De petites quantités d'eau sont injectées directement sur le plateau à proximité immédiate des galets. Ce procédé permet de maintenir l'épaisseur du lit de matière et d'améliorer la répartition des particules, favorisant ainsi une efficacité de broyage accrue [28].

III.4.5 L'anneau à aubes

L'anneau à aubes, situé à la base du broyeur, autour du plateau de broyage, joue un rôle fondamental dans le fonctionnement du VRM. C'est par cet organe que les gaz chauds, sont introduits dans la chambre de broyage. Ces gaz sont dirigés vers le centre du broyeur, puis canalisés par l'anneau à aubes, qui assure leur répartition homogène sous le plateau. Ce flux gazeux ascendant a une double fonction : il permet d'une part le séchage de la matière broyée, en évacuant l'humidité résiduelle, et d'autre part le transport pneumatique des particules fines vers le séparateur dynamique situé en partie supérieure du broyeur [27].

III.4.6 Le séparateur

Le processus s'achève par la séparation des particules fines au moyen d'un séparateur dynamique situé au sommet du broyeur. Ce séparateur à cage utilise un rotor en rotation rapide, associé à un flux d'air ascendant, pour classer les particules en fonction de leur taille. Le mélange gaz-matière entre dans le séparateur par le bas et est redirigé tangentiellement par des déflecteurs vers le rotor. Les particules fines, assez légères pour franchir le champ centrifuge, passent à travers le rotor et sont dirigées vers les silos de stockage. Les particules plus grossières, quant à elles, sont rejetées vers le bas et retournent sur le plateau de broyage pour un nouveau cycle. Ce système permet d'obtenir un produit final à la granulométrie maîtrisée, adapté aux exigences de la cuisson dans le four [26, 28].

III.5 Evaluation de la consommation en eau du broyeur vertical

Dans cette partie, je cherche à évaluer la consommation en eau du broyeur vertical VRM 1 de la cimenterie de Msila, l'objectif est de vérifier si cette consommation est cohérente avec la production réalisée, et de la comparer avec celle d'autres broyeurs installés dans des cimenteries à l'échelle internationale. Cela me permettra de juger si le broyeur étudié fonctionne de manière optimale sur le plan de la consommation d'eau, ou s'il existe une surconsommation à corriger.

III.5.1 Présentation des données de comparaison

Pour cette analyse, j'ai utilisé des données collectées sur plusieurs broyeurs verticaux fonctionnant dans le même contexte de broyage de la matière première. Les sites considérés sont situés à Agadir (au Maroc), Oran et Biskra (en Algérie), Siggenthal (en Suisse), Bazian (en Irak), ainsi que le broyeur VRM 2 de la deuxième ligne de production de Msila. J'ai choisi ces références afin d'avoir une vue d'ensemble sur la consommation en eau dans des conditions industrielles variées. Les données portent sur les mois de mars et avril (Tableau III.3), et concernent la consommation mensuelle d'eau, les heures de marche, la production horaire en tonnes par heure, ainsi que le débit d'eau ajoutée

Tableau III.3 Données de comparaison du VRM 1 a des VRM locaux et internationaux

	Mars				Avril			
Sites	consommation par mois (m ³)	Heures de marches (h)	production (t/h)	débit d'eau ajoutée (m ³ /h)	consommation par mois (m ³)	Heures de marche (h)	production (t/h)	débit d'eau ajoutée (m ³ /h)
Agadir	23.6	526.5	294.4	0.04	11.1	527.3	293.9	0.02
Baziane	790.7	501.2	467.0	1.6	1435.4	471.4	457.0	3.0

Siggenthal	1326.1	551.4	165.6	2.4	1237.1	464.9	160.6	2.7
Oggaz	6235.4	627.1	385.4	9.9	5397.4	545.7	423.6	9.9
VRM 2	6414.8	595.8	382.8	9,25	5511.0	535.4	363.7	10.3
VRM1	7268,83	568,6	387.4	11,08	3633.9	304.6	400,16	11.9

III.5.2 Analyse comparative

L'étude comparative met clairement en évidence une surconsommation d'eau au niveau du broyeur VRM 1 par rapport aux autres broyeurs analysés. Même lorsqu'il fonctionne dans des conditions similaires, voire identiques à celles du VRM 2 de la même usine, le VRM 1 affiche un débit d'eau ajouté nettement plus élevé pour une production quasi équivalente. Cela laisse penser que l'injection d'eau sur ce broyeur n'est pas ajustée de manière optimale.

Ce constat devient encore plus frappant lorsqu'on le compare à d'autres sites à l'international. Certains broyeurs, comme ceux de Baziane ou de Siggenthal, affichent une consommation en eau bien inférieure. Même si le taux de production est faible par rapport à notre VRM, le rapport d'eau rajoutée par tonne de matière broyée reste en faveur des broyeurs de Baziane et de Siggenthal ; $0,003\text{m}^3/\text{t}$ $0,014\text{m}^3/\text{t}$ respectivement contre $0,028\text{m}^3/\text{t}$ pour le VRM1. Cela indique que, techniquement, il est tout à fait possible de maintenir une bonne performance de broyage tout en réduisant significativement l'utilisation d'eau.

La tendance se maintient également sur le mois d'avril, ce qui confirme que ce n'est pas une anomalie ponctuelle, mais bien une situation récurrente. Quelle que soit la période observée, le VRM 1 reste le broyeur le plus gourmand en eau parmi ceux étudiés. Cette surconsommation ne semble pas se justifier par un besoin de production ou par des conditions d'exploitation particulières, ce qui soulève des questions sur le réglage ou l'état du système d'injection d'eau.

III.5.3 Interprétation

Les écarts relevés suggèrent que la consommation en eau du broyeur VRM 1 de Msila est nettement au-dessus de la norme observée sur les autres sites. Dans certains cas, le débit d'eau ajouté est presque dix fois plus élevé que celui des autres broyeurs. Néanmoins, les différences sont suffisamment importantes pour écarter une simple variation due au contexte et pointer plutôt vers un fonctionnement inefficace ou mal calibré du système.

III.5.4 Hypothèses sur la surconsommation

À ce stade, je peux envisager plusieurs pistes pour expliquer la surconsommation constatée sur le VRM 1. Une première hypothèse concerne les réglages du circuit d'eau, qui pourraient être trop ouverts par défaut, entraînant une injection plus importante que nécessaire, sans réelle justification technique. Il est également possible que le système d'injection d'eau souffre d'un

mauvais calibrage ou d'un manque de maintenance, ce qui fausserait son fonctionnement optimal.

Une autre piste à considérer est la nature de la matière première elle-même, en particulier sa granulométrie. Si le matériau d'alimentation est trop fin ou, au contraire, trop grossier, cela peut influencer le besoin en humidification pour assurer un broyage efficace. Un matériau mal préparé en amont, ou présentant une répartition irrégulière des tailles de particules, pourrait nécessiter plus d'eau pour stabiliser le lit de matière et éviter les phénomènes de vibrations ou de mauvaise dispersion.

En conclusion, la comparaison des données montre clairement que la consommation en eau du broyeur vertical VRM 1 à Msila est anormalement élevée par rapport à d'autres installations dans des contextes similaires ou même plus exigeants. Cette surconsommation ne semble pas liée à une performance supérieure, puisque les débits de production sont comparables. Il apparaît donc nécessaire de mener un diagnostic poussé sur le VRM 1, afin de corriger ce déséquilibre et de réduire la consommation sans impacter la production.

III.6 Analyse des causes par diagramme d'Ishikawa

Pour identifier les causes possibles de la surconsommation d'eau observée sur le broyeur vertical VRM 1, j'ai utilisé un diagramme d'Ishikawa (Figure III.7). Cet outil, permet de représenter graphiquement les différentes sources potentielles d'un problème en les classant par grandes familles.

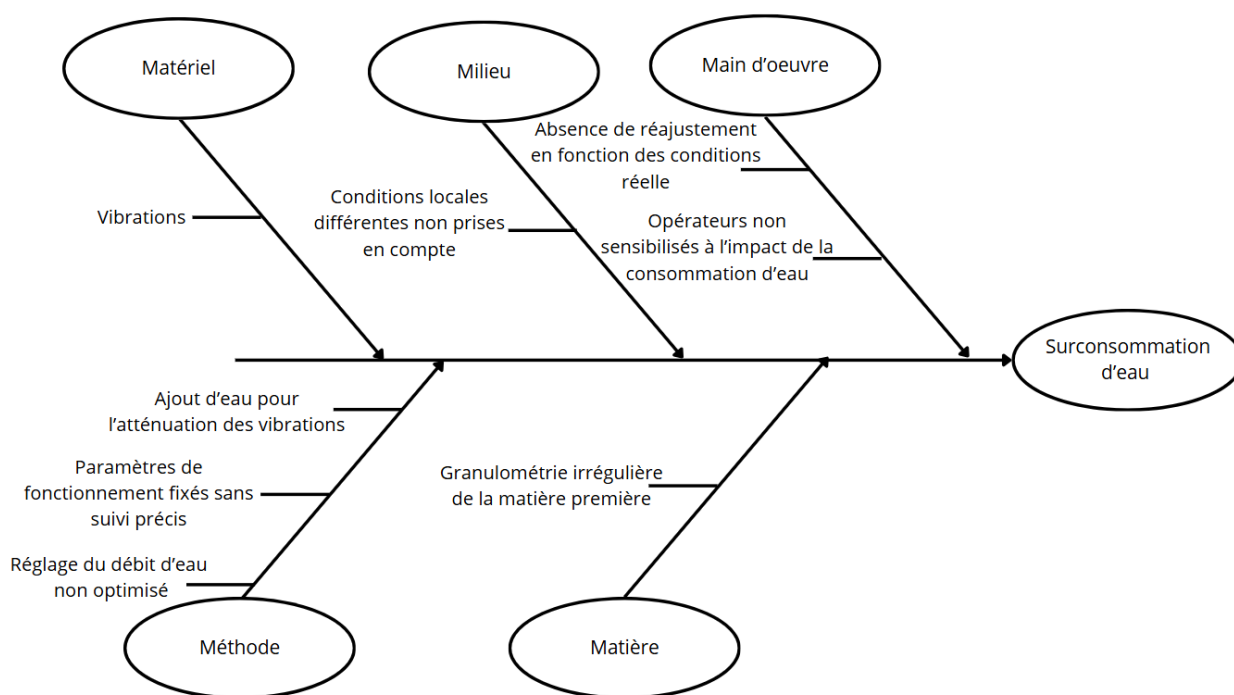


Figure III.7 Diagramme d'Ishikawa es causes de surconsommation en eau de VRM1

Chaque branche du diagramme correspond à une famille de causes identifiées comme pouvant contribuer à l'augmentation excessive de la consommation d'eau.

III.6.1 Méthode

L'une des causes majeures identifiées concerne les méthodes de réglage du débit d'eau injecté dans le broyeur VRM 1. Dans les installations modernes, le débit d'eau est ajusté automatiquement pour compenser les vibrations et maintenir une couche de broyage homogène. Ce pilotage est réalisé via un système de contrôle avancé appelé High-Level Control (HLC).

Le HLC agit en boucle fermée : des capteurs mesurent en continu les vibrations, et en déduisent les besoins exacts d'eau à injecter. Ce réglage est effectué automatiquement en temps réel, sans intervention humaine, garantissant une réponse précise et rapide.

Sur le broyeur VRM 2, ces technologies sont pleinement déployées. Le HLC est connecté et active, ajustant le débit d'eau en permanence selon les conditions opérationnelles et les signaux transmis par les capteurs. La conséquence : un fonctionnement stabilisé, sans excès de consommation, même en cas de fluctuations du lit de broyage.

En revanche, sur le VRM 1 étudié, le HLC n'est pas connecté. Le réglage du débit repose entièrement sur une intervention manuelle. Lorsqu'une vibration est détectée, l'opérateur augmente le débit d'eau jusqu'à stabilisation. Cependant, sans contrôle continu, ce débit reste souvent élevé ensuite, même si la vibration a diminué. En l'absence d'algorithmes de correction ou de limiteurs automatiques, cette pratique simple peut conduire à une injection excessive, parfois bien au-delà de ce qui serait nécessaire dans une gestion automatisée.

En résumé, la non-connexion du HLC sur le VRM 1 signifie que la régulation du débit d'eau est artisanale, non ajustée en continu et dépourvue de critères de retour en automatique. Cette différence technique avec le VRM 2 se traduit directement par une consommation d'eau nettement supérieure, basée sur un pilotage imprécis et non optimisé.

III.6.2 Main-d'œuvre

Dans la configuration actuelle du VRM 1, l'absence de connexion au système High-Level Control (HLC) place la responsabilité du réglage du débit d'eau directement sur le personnel opérant la machine. Ces derniers interviennent habituellement lorsque des vibrations apparaissent : ils augmentent manuellement le débit d'eau injectée, dans le but de stabiliser le broyeur. Cette méthode, bien que compréhensible dans l'urgence, repose avant tout sur un réflexe technique plutôt que sur une démarche préventive ou analytique.

Or, dès que le broyeur retrouve un fonctionnement plus stable, le débit d'eau injecté n'est généralement pas réajusté à la baisse. L'opérateur, concentré sur le maintien de la production, peut considérer cette eau supplémentaire comme acceptable, voire invisible tant que le processus ne montre pas de signes de dysfonctionnement. Cela reflète un manque de sensibilisation à l'importance de maîtriser la consommation d'eau : pour les opérateurs, l'objectif principal est la continuité de la production, et non l'optimisation des ressources.

Par rapport à ce fonctionnement, il faut souligner que, sans consigne ni indicateur de performance explicite, l'opérateur n'a aucun retour immédiat sur le surcroît d'eau injectée. Il agit selon sa seule perception visuelle ou auditive des vibrations, sans outil de suivi. Cette approche accentue l'aspect subjectif et irrégulier du réglage, qui devient une réponse ponctuelle et non adaptée aux conditions réelles.

Ce constat met en évidence que la responsabilité principale du comportement observé est le manque de visibilité et de sensibilisation des opérateurs au sujet de la consommation d'eau. Sans indicateurs clairs ni suivi régulier, leur intervention, conduit à des injections excessives prolongées, qui auraient pu être évitées avec une formation adaptée ou des repères de régulation concrets.

III.6.3 Matériel

La stabilité mécanique du broyeur vertical repose en grande partie sur le bon état de ses composants. Les vibrations, bien qu'atténuables temporairement par des ajustements de fonctionnement, trouvent souvent leur origine dans des défaillances techniques précises. L'analyse des données de maintenance, couvrant la période de janvier 2024 à avril 2025, met en évidence un ensemble de défaillances spécifiquement associées à l'apparition de vibrations mécaniques anormales (Figure III.8).

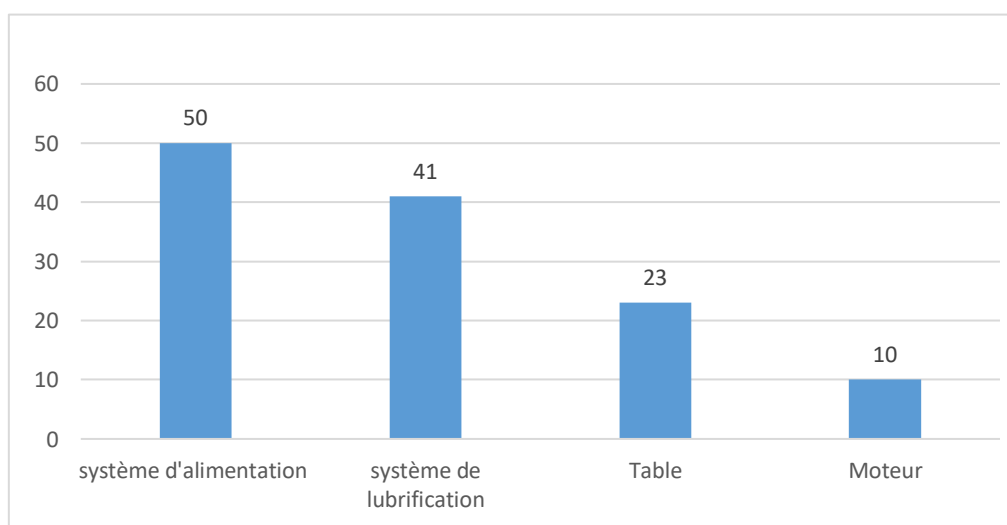


Figure III.8 Graphique montrant la répartition des arrêts du VRM1 par système

Le système d'alimentation se révèle être l'un des contributeurs majeurs, avec 50 arrêts enregistrés. Lorsqu'il est en défaut, l'alimentation en matière devient irrégulière, ce qui perturbe la formation homogène du lit de broyage. Cette instabilité se répercute directement sur les galets, provoquant des déséquilibres dynamiques et, par conséquent, des vibrations notables au niveau de la table.

Le système de lubrification, avec 41 arrêts, est un autre point critique. En cas de dysfonctionnement, que ce soit par manque de débit, colmatage ou défaillance de pompe, les frottements augmentent entre les composants mobiles, notamment les galets et la table. Ces frictions excessives sont une cause directe de l'élévation des niveaux vibratoires, qui compromettent la régularité du broyage.

La table de broyage, impliquée dans 23 arrêts, est elle-même une source potentielle de déséquilibres. L'usure inégale, les défauts d'équilibrage ou encore des déformations mécaniques peuvent générer des vibrations cycliques pendant la rotation, rendant difficile la stabilisation du fonctionnement.

Le moteur, bien que moins souvent mis en cause, a tout de même été responsable de 10 arrêts. Des problèmes de désalignement ou d'instabilité dans l'entraînement peuvent introduire des vibrations dès la source, lesquelles se propagent ensuite à l'ensemble du système.

En résumé, les données montrent que ces arrêts sont directement liés à des défaillances mécaniques provoquant des vibrations, lesquelles perturbent non seulement le rendement de broyage mais induisent également des ajustements non maîtrisés, notamment en ce qui concerne l'injection d'eau.

III.6.4 Matière

La régularité granulométrique de la matière première destinée au broyeur est un critère essentiel pour garantir un fonctionnement stable et conforme aux spécifications du procédé. Le broyeur vertical est conçu pour traiter des matériaux dont la taille se situe entre 25 mm et 60 mm, avec une tolérance précise sur les fractions hors plage : les matériaux inférieurs à 25 mm ainsi que ceux supérieurs à 60 mm ne doivent pas excéder 5 à 7 % du total (Figure III.9).

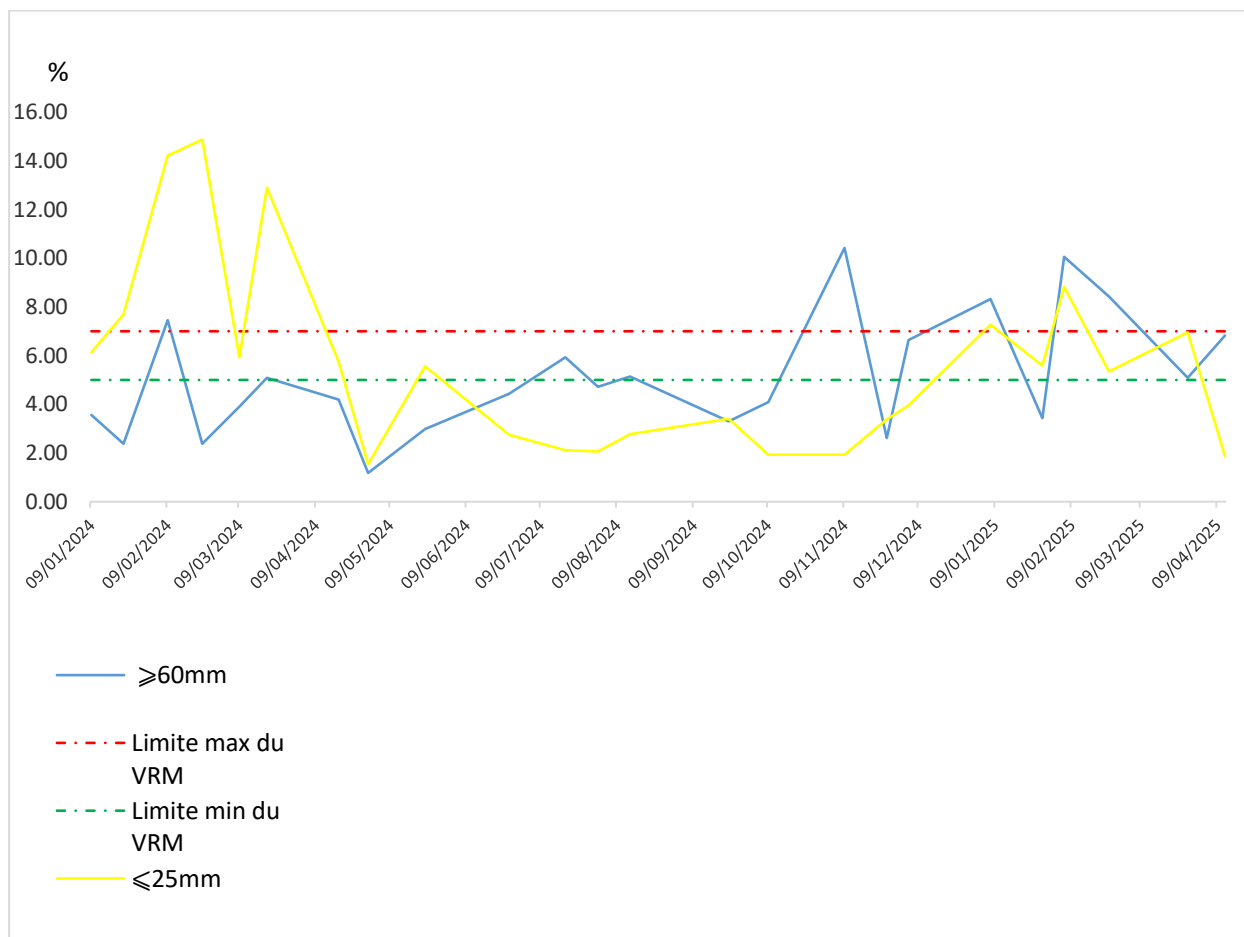


Figure III.9 Répartition granulométrique de la matière première entrante au VRM entre Janvier 2024 et Avril 2025

L'analyse des résultats de granulométrie issus du concasseur mix met en évidence une variabilité significative de ces fractions. Sur plusieurs périodes, les proportions de fines (<25 mm) ou de sur-grosses (>60 mm) dépassent de manière répétée les limites spécifiées, atteignant parfois des pics supérieurs à 10 %. Cette fluctuation traduit une absence de constance dans la qualité de l'alimentation, ce qui compromet le respect des conditions optimales prévues pour le fonctionnement du broyeur.

Ces dérives peuvent s'expliquer par divers facteurs, notamment une usure ou un mauvais réglage des mâchoires du concasseur, une gestion inefficace de l'alimentation, ou encore un manque de contrôle qualité en amont. Le résultat est une granulométrie irrégulière qui ne respecte pas les plages cibles et qui expose le système à une performance non maîtrisée dès l'entrée matière.

Ainsi, la qualité de la matière première, telle qu'elle est observée actuellement, ne répond pas de manière constante aux exigences définies, ce qui constitue une source primaire de déséquilibre dans le procédé global de préparation.

III.6.5 Milieu (Environnement)

Parmi les axes analysés, l'environnement physique autour du broyeur vertical ne semble pas constituer un facteur déterminant dans la surconsommation d'eau observée. Les conditions ambiantes, telles que la température ou l'humidité, restent relativement stables et ne présentent pas de variations extrêmes susceptibles d'altérer le fonctionnement normal du circuit d'injection. De plus, aucun dysfonctionnement majeur n'a été relevé concernant des capteurs liés à l'environnement ou des interactions notables entre l'agencement physique des équipements et la régulation de l'eau.

Il est également important de souligner que le système n'est pas soumis à des contraintes environnementales particulières comme un climat excessivement chaud ou humide, qui pourrait par exemple augmenter les besoins en humidification par évaporation. Ainsi, même si le milieu de travail peut toujours avoir un effet indirect sur le fonctionnement des équipements, les éléments relevés dans cette analyse ne permettent pas d'identifier cette catégorie comme une cause significative de la consommation excessive en eau du VRM 1.

III.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer la consommation d'eau sur le site de Msila en combinant une analyse descriptive des infrastructures hydriques et une étude des usages, qu'ils soient domestiques, industriels ou liés aux procédés de traitement. Une analyse de la répartition des volumes consommés a été réalisée afin d'identifier les principales zones de consommation et de dégager les équipements les plus impactant.

Grâce à une approche basée sur le principe de Pareto, les équipements majoritairement responsables de la consommation industrielle ont pu être mis en évidence. Cette analyse a orienté l'attention vers certaines zones critiques nécessitant un approfondissement. L'étude du fonctionnement et des conditions d'exploitation a permis de mieux cerner les facteurs pouvant expliquer des niveaux de consommation élevés. Des écarts ont été constatés par rapport aux standards de sites similaires du groupe Holcim, justifiant une analyse des causes par la méthode du diagramme d'Ishikawa.

Les résultats obtenus constituent une base solide pour la suite du travail. Ils permettront de formuler des recommandations concrètes et ciblées en vue de réduire la consommation d'eau sans compromettre la performance industrielle. Le chapitre suivant poursuivra cette dynamique en se concentrant sur les actions envisageables à partir des constats techniques identifiés.

Chapitre IV

Analyse technique des causes de surconsommation d'eau et évaluation des actions correctives

IV.1 Introduction

Le diagramme d'Ishikawa présenté précédemment a permis d'identifier plusieurs causes possibles de la surconsommation d'eau au niveau du broyeur vertical VRM1. Ces causes, regroupées en catégories (méthodes, main-d'œuvre, matière, matériel et milieu), ont mis en évidence divers points de faiblesse dans le processus.

Ce chapitre va plus loin en analysant les interactions entre ces causes. Il s'agit de comprendre comment elles s'enchaînent et se renforcent mutuellement pour générer une consommation excessive d'eau. À partir de ce mécanisme global, nous proposerons des actions correctives ciblées, chacune accompagnée d'une estimation de gain potentiel. Enfin, une synthèse chiffrée présentera l'effet attendu si l'ensemble des actions est mis en œuvre.

IV.2 Analyse croisée des causes

Après avoir vu chaque cause séparément, il est important maintenant de les analyser ensemble. En effet, ces causes sont souvent liées entre elles : l'une peut entraîner une autre, ou bien aggraver ses effets. Cette partie va donc montrer comment ces facteurs se combinent et s'influencent, ce qui aide à mieux comprendre pourquoi la consommation d'eau reste élevée sur le VRM 1.

IV.2.1 Interactions entre méthodes, matière et matériel

L'ajout excessif d'eau au niveau du broyeur vertical ne constitue pas un événement isolé ou exceptionnel, mais plutôt une réponse systématique adoptée par les opérateurs face aux situations de vibrations. En l'absence de dispositif automatisé comme le HLC, le réglage du débit d'eau repose entièrement sur une intervention manuelle depuis la salle de contrôle. Ainsi, chaque fois que les vibrations du broyeur dépassent un certain seuil perçu comme critique, les opérateurs ajustent le débit d'eau en l'augmentant, dans le but d'atténuer l'instabilité. Cependant, cette régulation n'est pas toujours suivie en continu : une fois l'eau augmentée, si les vibrations se stabilisent mais que l'opérateur ne revient pas ajuster le débit, la quantité d'eau reste élevée, entraînant à terme une surconsommation.

Or, ces vibrations ne sont pas une cause en soi, mais plutôt un symptôme d'un déséquilibre en amont. Pour mieux comprendre le phénomène, une analyse des arrêts liés aux vibrations a été menée, en collaboration avec les ingénieurs du site. Cette étude a révélé que les principaux arrêts associés aux hausses de vibrations étaient concentrés autour de quatre éléments techniques : le système d'alimentation, le système de lubrification, la table de broyage et le moteur. Ces éléments, bien que de nature différente, partagent un lien direct avec le comportement dynamique du broyeur.

Par exemple, les dysfonctionnements liés à la lubrification, comme les chutes de pression, les débits insuffisants ou les fuites, ont des effets directs sur la stabilité mécanique de l'ensemble. Ces problèmes peuvent provenir de l'état des conduites, de la qualité de l'huile, ou encore de défaillances de la pompe. De leur côté, les pannes moteurs observées sont majoritairement d'origine électrique, et bien que moins fréquentes, elles peuvent contribuer à des réactions en chaîne.

Cependant, deux sources de perturbations ont attiré particulièrement l'attention : la table de broyage et le système d'alimentation. Dans plusieurs cas, des problèmes ont été détectés sur ces deux éléments, tels qu'une inclinaison anormale de la table ou un déséquilibre de charge entre ses côtés, ou encore un désalignement ou un manque de matière au niveau des bandes transporteuses. Ces constats ont amené à s'interroger sur l'origine réelle de ces dysfonctionnements. En approfondissant l'analyse, et notamment en consultant les données granulométriques disponibles, il est apparu que ces irrégularités étaient souvent précédées par des dépassements des seuils fixés pour la granulométrie du cru. En d'autres termes, c'est la variabilité ou la non-conformité de la granulométrie en entrée qui provoque une alimentation instable ou mal répartie, ce qui, à son tour, affecte directement le comportement mécanique de la table de broyage et du système d'alimentation.

Cette observation a été renforcée par l'analyse graphique croisée entre les dépassements granulométriques mesurés et les arrêts enregistrés sur la période étudiée (figure IV.1).

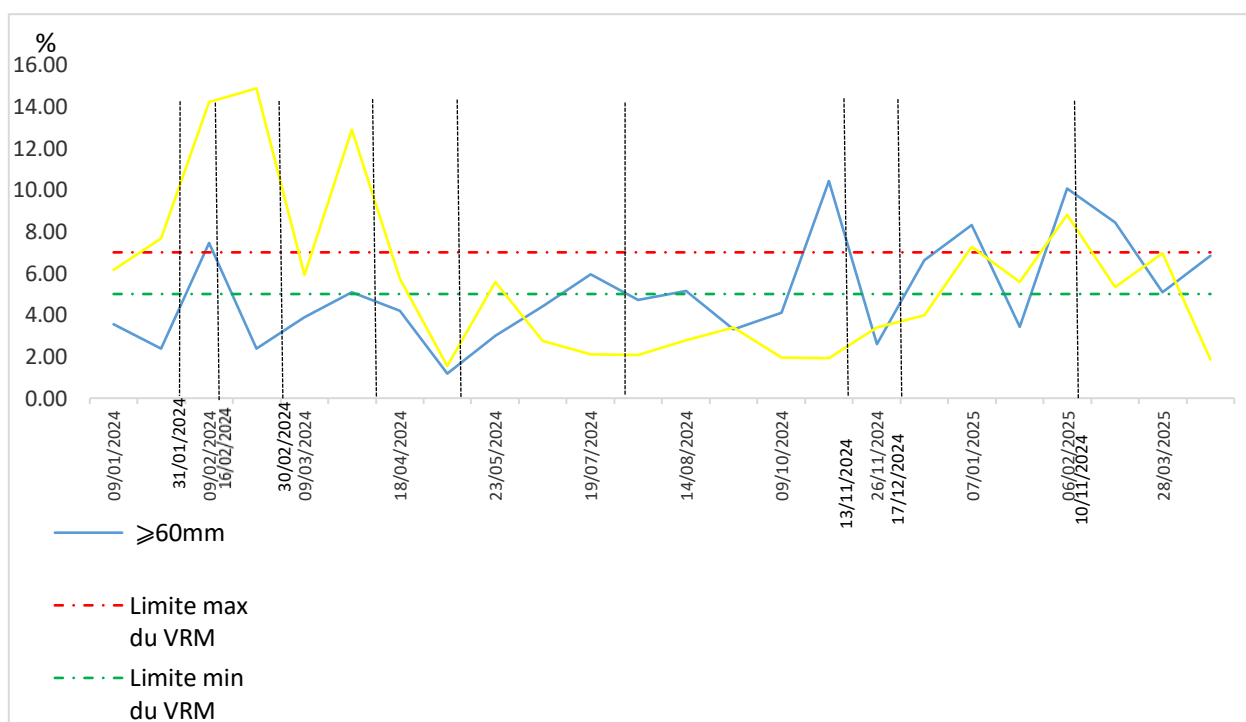


Figure IV.1 Corrélation entre l'irrégularité granulométrique et les arrêts

C'est à ce stade qu'un point critique a émergé. En superposant les données de contrôle granulométrique avec l'historique des arrêts liés aux vibrations, un schéma récurrent s'est imposé. Le graphique ci-dessous met en évidence deux courbes : l'une représentant le pourcentage de particules supérieures à 60 mm (courbe bleue), l'autre représentant les fractions inférieures à la limite minimale requise (courbe jaune). À cela s'ajoutent les lignes en pointillé représentant les limites admissibles fixées pour le bon fonctionnement du broyeur.

Les lignes verticales noires correspondent à certains des arrêts du broyeur, enregistrés entre janvier 2024 et mars 2025. Seuls quelques arrêts ont été représentés ici à titre d'illustration, bien qu'un total de 124 arrêts aient été enregistrés sur la période étudiée. L'objectif est de montrer la tendance générale sans surcharger la lecture graphique. Ce que l'on observe, c'est qu'une large majorité de ces arrêts survient juste après un dépassement de seuil granulométrique, qu'il s'agisse d'un excès de grosses particules ou, dans certains cas, d'un niveau trop élevé de fines.

Ces irrégularités dans la granulométrie perturbent la formation du lit de broyage, provoquant une répartition inégale de la matière sur la table. Cette mauvaise distribution génère des déséquilibres dynamiques et des vibrations non compensées par le système actuel. L'opérateur, sans outil d'analyse en temps réel ni régulation automatisée, réagit alors en augmentant le débit d'eau pour stabiliser le broyeur. Ce réflexe est compréhensible, mais il traite uniquement la conséquence, sans corriger la source du problème.

On se retrouve donc face à une chaîne continue, où chaque élément influence le suivant : un défaut au niveau matière (granulométrie) engendre un comportement mécanique perturbé (vibrations), auquel on répond par une méthode réactive (ajout manuel d'eau), ce qui conduit finalement à une consommation excessive sans résolution du problème initial. Cette boucle, si elle n'est pas rompue, ne peut que se répéter.

IV.3 Recommandations

À la lumière des constats établis lors de l'analyse croisée des causes, il devient essentiel de mettre en place des actions concrètes et ciblées pour corriger les dérives identifiées. Les recommandations suivantes s'inscrivent dans une logique d'optimisation durable de la consommation d'eau (Tableau IV.1), en agissant directement sur les leviers techniques, organisationnels et opérationnels impliqués dans le fonctionnement du VRM.

Tableau IV.1 Recommandations sur les surconsommations du VRM

Cause identifiée	Constat technique	Recommandation
Méthode (HLC non connecté)	Le réglage du débit d'eau repose entièrement sur l'intervention manuelle, ce qui entraîne des excès persistants après disparition des vibrations.	Connecter et calibrer le système HLC sur le VRM 1 afin d'assurer une régulation automatique en temps réel du débit d'eau selon les signaux vibratoires.
Main-d'œuvre (réduction non effectuée après stabilisation)	Les opérateurs ne réduisent pas le débit d'eau après stabilisation du VRM, ce qui maintient un excès d'injection inutile.	Intégrer une procédure claire pour la réévaluation du débit une fois les vibrations stabilisées, et former les opérateurs à l'importance de la maîtrise de l'eau dans le fonctionnement global.
Matériel (Colmatage partiel des conduites)	Baisse de pression et débit d'huile irrégulier dans certaines zones	Nettoyage régulier du circuit et remplacement des sections encrassées
Matériel (Filtres saturés ou non remplacés à temps)	Débit insuffisant d'huile malgré une pompe fonctionnelle	Mise en place d'un planning strict de remplacement des filtres
Matériel (Huile inadaptée ou dégradée)	Température élevée du circuit et usure accélérée des composants	Utilisation d'une huile de qualité avec viscosité adaptée et contrôle périodique de l'état de l'huile
Matériel (Défauts de la pompe de lubrification)	Arrêts fréquents, bruits anormaux ou absence de pression à l'allumage	Révision périodique de la pompe et mise en place d'une procédure de vérification avant démarrage
Matériel (table de broyage)	Une usure ou un déséquilibre de la table génère des vibrations répétées non détectées assez tôt.	Renforcer la surveillance de l'état de la table (usure, inclinaison, déséquilibre) à travers des inspections régulières. Toute anomalie doit être traitée rapidement pour éviter l'apparition de vibrations et une surconsommation d'eau.
Matière (granulométrie irrégulière)	La matière alimentée dépasse régulièrement les limites de taille, déstabilisant le lit de broyage et provoquant des vibrations.	Mettre en place un contrôle granulométrique automatique continu avec alarme en cas de dépassement ; Ajuster les mâchoires du concasseur et prévoir des interventions correctives dès déviation.
Matière (granulométrie instable non corrigée)	L'impact de la granulométrie sur la stabilité du broyage n'est pas traité de manière préventive.	Programmer des campagnes hebdomadaires d'échantillonnage granulométrique sur bande, et afficher les courbes de tendance pour détecter précocement toute dérive.
Matière (corrélation non exploitée)	Des dépassements de la granulométrie précèdent souvent les arrêts liés aux vibrations, mais cette corrélation n'est pas suivie.	Instaurer un suivi croisé régulier entre les résultats granulométriques et les arrêts liés aux vibrations, afin de bâtir des seuils d'alerte et des actions correctives ciblées.
Méthode (absence d'approche préventive)	L'approche actuelle repose principalement sur la réaction à des anomalies (vibrations, arrêts) plutôt que sur leur anticipation.	Établir une procédure de prévention intégrée, reliant qualité de l'alimentation, conditions mécaniques et niveau de consommation d'eau.

Il est important de souligner que ces recommandations restent majoritairement réactives, dans le sens où elles visent à mieux gérer les effets déjà visibles comme les vibrations ou les dérives de consommation. Cependant, pour traiter le problème à la source, l'enjeu principal réside dans la maîtrise de la granulométrie et l'amélioration du système de lubrification. Une action ciblée sur ces deux leviers permettrait de réduire considérablement les vibrations à l'origine du recours excessif à l'eau, et ainsi d'atteindre une stabilité durable du procédé.

IV.4 Estimation des résultats attendus

L'analyse comparative des différents broyeurs verticaux à galets (VRM) montre clairement un potentiel d'optimisation significatif pour le VRM 1 du site de Msila. En effet, bien que ce dernier fonctionne dans un environnement comparable au VRM 2, notamment en termes de matière traitée, de caractéristiques de granulométrie et de conditions d'exploitation, on observe une différence moyenne de 1,7 m³/h dans le débit d'eau ajoutée entre les deux broyeurs. Ce seul écart, s'il est corrigé par la mise en service du système HLC et une régulation plus fine de l'eau, permettrait une réduction directe d'environ 1 100 m³ consommées et 1 375 m³ pompées par mois, tout en maintenant les performances de production actuelles.

Par ailleurs, même si les autres VRM à l'échelle internationale (Agadir, Baziane, Siggenthal...) présentent des consommations bien plus faibles, il serait irréaliste d'imaginer atteindre leurs niveaux en l'état actuel. Ces références peuvent cependant servir d'indicateurs de bonnes pratiques et renforcer la pertinence des actions recommandées. Une réduction progressive mais structurée, tenant compte des spécificités du site, paraît plus cohérente.

En appliquant les recommandations relatives à la stabilisation de la granulométrie, à la modernisation du système de lubrification, il est réaliste de viser une baisse g de la consommation d'eau de 20 à 25 % de la consommation totale estimé à 242 m³ mensuelle. Cela équivaldrait à une réduction de plus de 1 700 m³ consommées et 2 125 m³ pompées par mois, sans compromis sur la production ni sur la sécurité des équipements.

En tenant compte à la fois de la mise en service du système HLC, de la stabilisation de la granulométrie, de l'amélioration du système de lubrification, du suivi plus rigoureux des vibrations et d'une meilleure gestion par les opérateurs, il devient réaliste d'envisager une réduction mensuelle d'environ 2 800 m³ d'eau réellement consommée et près de 3 500 m³ d'eau pompée. Cette économie, qui reste techniquement atteignable sans affecter la qualité du produit ni la stabilité du broyeur.

Les deux graphiques (figures IV.2, IV.4) résument clairement l'impact attendu de l'ensemble des recommandations formulées. Le premier illustre la réduction sur le volume d'eau consommée, tandis que le second concerne le volume d'eau pompée.

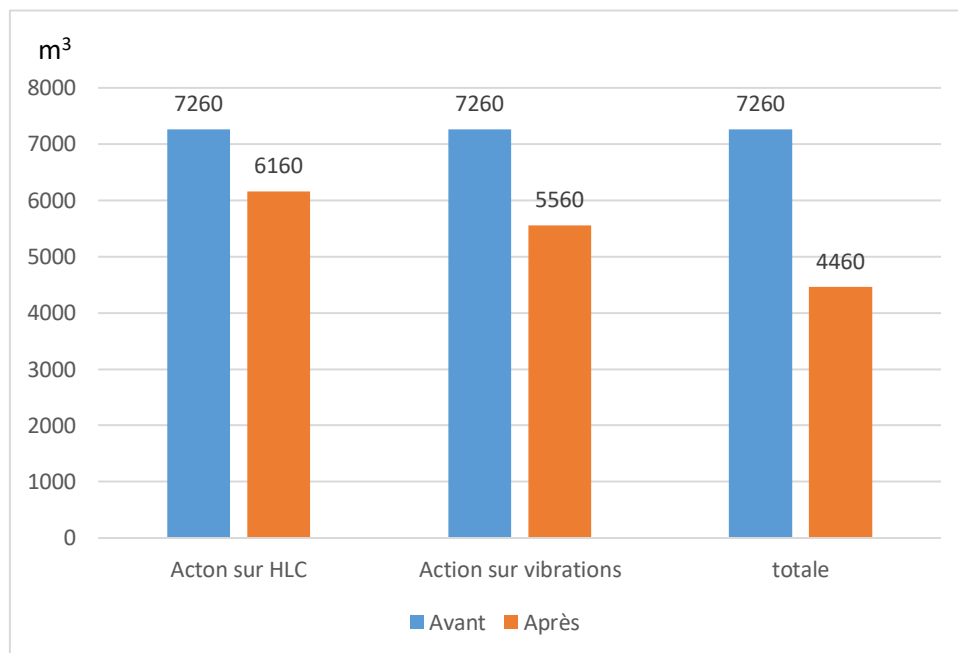


Figure IV.2 la différence de consommation mensuelle estimée pour le VRM 1

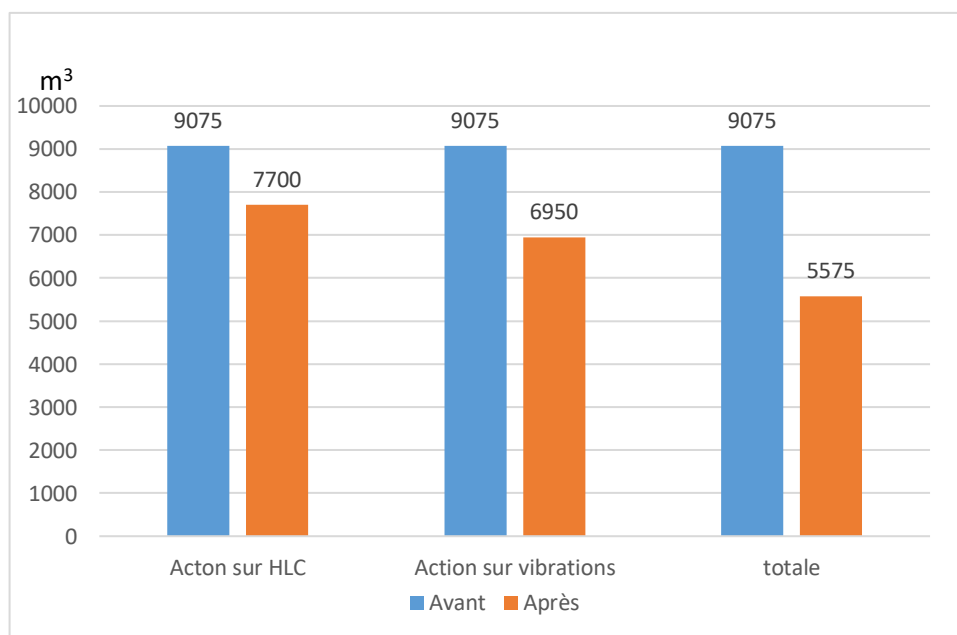


Figure IV.3 la différence de pompage mensuelle estimée pour le VRM 1

On remarque ainsi visuellement l'ampleur du gain potentiel, avec une chute marquée dès la mise en œuvre des premières mesures, traduisant l'impact direct des actions ciblées.

À long terme, l'impact cumulé de ces ajustements techniques et organisationnels peut consolider une gestion durable de l'eau, en cohérence avec les standards du groupe Holcim, tout en assurant une meilleure fiabilité du broyeur et une diminution des arrêts non planifiés.

IV.5 Conclusion

L'analyse approfondie des causes de la surconsommation d'eau au niveau du broyeur vertical à galets (VRM 1) a permis de mettre en lumière une série de facteurs techniques, organisationnels et opérationnels agissant de manière interdépendante. En partant de l'observation d'un débit d'eau élevé, l'étude a permis de remonter jusqu'aux déséquilibres de la granulométrie, aux anomalies d'alimentation, aux vibrations non maîtrisées et aux limites du système de lubrification. Cette approche globale a démontré que la consommation d'eau ne dépend pas uniquement de l'état des équipements, mais aussi des méthodes de pilotage adoptées et de la stabilité du procédé en amont.

Les recommandations proposées sont à la fois réalistes et adaptées aux spécificités du site de Msila. Elles s'appuient sur une combinaison de mesures techniques (mise en service du système HLC, amélioration du suivi des vibrations, modernisation de la lubrification), de bonnes pratiques opérationnelles ; suivi rigoureux des signaux de fonctionnement, formation des opérateurs et d'un meilleur contrôle de la matière première ; stabilisation de la granulométrie. L'impact attendu, confirmé par la comparaison avec d'autres VRM et illustré à travers des données projetées, montre qu'une réduction mensuelle de près de 2 800 m³ d'eau consommée et 3 500 m³ pompée est envisageable, sans affecter ni la productivité ni la sécurité.

Ce chapitre marque ainsi une étape clé dans l'identification des leviers d'action concrets, ouvrant la voie à une stratégie de réduction durable de la consommation d'eau, alignée avec les objectifs du groupe Holcim et les enjeux environnementaux actuels.

Conclusion Générale

Dans un contexte industriel où la gestion durable des ressources constitue un enjeu stratégique de plus en plus central, la maîtrise de la consommation d'eau dans les procédés de production devient une priorité à la fois environnementale, économique et opérationnelle. Le présent projet de fin d'études s'est inscrit dans cette démarche d'optimisation en s'attaquant à un point critique de consommation sur le site Holcim de Hammam Dalaa : le broyeur vertical VRM 1, identifié comme le principal poste de prélèvement industriel d'eau sur le site.

La première étape de cette étude a consisté à analyser l'ensemble du système d'approvisionnement, de distribution et d'utilisation de l'eau, en distinguant les usages domestiques, industriels et techniques. Cette cartographie initiale a permis de mettre en évidence les zones de forte consommation et d'identifier les équipements les plus importants. Une attention particulière a été portée à l'analyse comparative des consommations spécifiques (par tonne produite), afin de situer le VRM 1 non seulement par rapport à d'autres équipements du site — comme le VRM 2 — mais également à l'échelle intersites, à travers des références telles que Biskra, Agadir, Siggenthal ou Bazian. Ce positionnement a permis de confirmer que le VRM 1 présente une consommation significativement plus élevée, qui ne peut être justifiée par les seuls écarts de production ou de conditions locales.

Pour comprendre les causes de cette surconsommation, une méthodologie d'analyse causale a été appliquée. Le diagramme d'Ishikawa a permis de structurer les causes potentielles selon cinq grandes familles : méthode, main-d'œuvre, matière, matériel et milieu. Cette démarche a permis de mettre en évidence plusieurs leviers techniques et organisationnels, parmi lesquels l'absence de connexion du High-Level Control (HLC), qui empêche un ajustement dynamique du débit d'eau injectée ; l'intervention manuelle par les opérateurs, souvent non suivie de réduction une fois les vibrations atténuées ; une irrégularité fréquente de la granulométrie du cru alimenté, déstabilisant le lit de broyage ; et des défaillances récurrentes sur des sous-ensembles mécaniques critiques (système d'alimentation, table de broyage), à l'origine de vibrations amplifiées.

Au-delà de l'identification de ces facteurs, le travail a consisté à analyser leur interdépendance. Il est vite apparu que ces causes ne se manifestent pas isolément, mais interagissent au sein d'un mécanisme en boucle, où une perturbation localisée génère des réactions en chaîne. Cette lecture systémique a permis de proposer des recommandations combinées, techniques et organisationnelles, visant à interrompre ces cycles de dérive. Parmi ces actions, on peut citer la

connexion du HLC au VRM 1, l'amélioration du suivi granulométrique, le renforcement du plan de maintenance préventive sur les éléments sensibles aux vibrations, ou encore la sensibilisation ciblée des opérateurs à la consommation d'eau.

Chacune de ces recommandations a été accompagnée d'une estimation du gain potentiel. En croisant les données de fonctionnement réelles et les comparaisons intersites, il a été estimé qu'une réduction de l'ordre de 2 800 m³ par mois en eau consommée, et jusqu'à 3 500 m³ en eau pompée, est techniquement atteignable. Ces économies, significatives à l'échelle du site, s'accompagnent d'un gain indirect sur la stabilité du broyeur, la réduction des arrêts liés aux vibrations et la prolongation de la durée de vie des équipements.

Ce projet a ainsi permis de poser les bases concrètes d'une démarche de rationalisation de l'usage de l'eau sur le site de Hammam Dalaa. Il montre que des résultats mesurables peuvent être atteints sans investissements lourds, mais par une meilleure exploitation des données existantes, une coordination entre les services techniques, et un engagement opérationnel renforcé. Cette approche intégrée illustre comment la performance environnementale peut être alignée avec les objectifs industriels, dans une logique d'efficacité globale.

Au-delà des résultats quantitatifs obtenus, ce travail ouvre également la voie à une réflexion plus large sur le pilotage des procédés. Il met en lumière l'importance de l'anticipation, du suivi en temps réel, et du dialogue entre les différents acteurs de la production. Il constitue un premier jalon vers une gestion intelligente des ressources, qui pourrait être enrichie par d'autres volets tels que la récupération d'eau, l'optimisation énergétique ou l'intégration d'outils prédictifs.

Ce travail, bien qu'il ait permis d'avancer sur la compréhension et la maîtrise de la consommation d'eau, reste une démarche partielle. Il ouvre des perspectives pour des améliorations futures et souligne la nécessité de poursuivre les efforts engagés afin de consolider durablement la performance hydrique du site.

Références Bibliographiques

- [1] Organisation des Nations Unies. *L'eau : une question mondiale*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.un.org/fr/global-issues/water> (consulté le 14 mai 2025).
- [2] Direction de l'Hydraulique de M'Sila. *Étude technique pour la délimitation et le dimensionnement des périmètres de protection qualitative de la ressource en eau autour des forages de la cimenterie de Hammam Dalaa, wilaya de M'Sila*, rapport interne, 2023.
- [3] Holcim. *Site officiel du groupe Holcim*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.holcim.com> (consulté le 14 mars 2025).
- [4] Google Earth. *Visualisation du site de l'usine CILAS à Biskra, Algérie*. [En ligne]. (Consulté le 14 mars 2025).
- [5] Lafarge Algérie. *Site officiel*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.lafarge.dz> (consulté le 14 mars 2025).
- [6] SCHUMACHER, G., JUNIPER, L. *Coal Utilisation in the Cement and Concrete Industries*, in: *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. Elsevier, 2013, p. 387–426.
- [7] PAUCHET, W. *Les ciments*. Techniques de l'ingénieur, Réf. TBA1010, V2, 2019.
- [8] BARANI, K. *An approach to measuring and modelling the residence time distribution of cement clinker in vertical roller mills*, publication technique, 2021.
- [9] Cimenterie d'Airvault. *Dossier de concertation préalable du public pour la modernisation de la cimenterie d'Airvault*, 12 avril – 12 mai 2021.
- [10] *La contribution de l'industrie cimentière à la réduction des émissions de CO₂*, publication sectorielle. FEBELCEM.
- [11] PHILIP, A. et al. *The Cement Plant Operations Handbook for Dry-Process Plants*, 7^e édition, 2019.
- [12] BSC Industrie. *Broyeur à boulets MRD/MRE*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.bsc-industrie.com/works/broyeur-a-boulets-mrd-mre/> (consulté le 12 avril 2025).
- [13] Ministère français de la Transition écologique. *Statistiques du développement durable*. [en ligne]. Disponible sur : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr> (consulté le 9 avril 2025).
- [14] Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique (Algérie). *Plan National de l'Eau (PNE)*, 2021.
- [15] *Groundwater Overview: Making the Invisible Visible*, UN-Water, ONU / PNUD, 2022.
- [16] World Resources Institute. *Aqueduct Water Risk Atlas*. [en ligne]. Disponible sur : <https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas> (consulté le 14 mai 2025).

- [17] Rapport mondial sur la mise en valeur des ressources en eau 2024 : L'eau pour la prospérité et la paix, *UNESCO*, 2024.
- [18] Discours du Secrétaire général à la High-Level Panel on Water, *Nations Unies*, 2016.
- [19] Water: Essential for Life, Critical for Business, *UN Global Compact*, 2021.
- [20] Vers une gestion durable et sécurisée de l'eau en entreprise, *CCI France*, 2021.
- [21] Directive-cadre 2000/60/CE sur l'eau, *Journal officiel des Communautés européennes*, *Union européenne*, 2000.
- [22] République algérienne Démocratique et Populaire. Loi n° 05-12 du 4 août 2005 relative à l'eau.
- [23] Holcim announces biodiversity and water strategy, *The Cement Review*, *Septembre 2021*.
- [24] The cement industry must tackle water management head on, *The Cement Review*. *Septembre 2021*.
- [25] Holcim. Standard HSE-302 – Water Management Standard, *document interne*, *Holcim*. 2021.
- [26] GEROLD, Carston. *Operational parameters affecting the vertical roller mill performance*, Loesche GmbH, 2016.
- [27] JOERGENSEN, S.W. *Cement grinding: Vertical roller mills versus ball mills*, GM-Grinding Technology, F.L. Smidth.
- [28] *Vertical Roller Mill LM 53.3 – Manuel & Présentation technique*, document technique, Loesche GmbH.

Annexe 1 : Checklist d'inspection de l'infrastructure hydrique

Réservoirs de stockage			
Exigences	Oui/Non	Action corrective	Employé responsable
Y a-t-il des gouttes ou flaques au sol près des contenants ou des réservoirs ?			
Les bouchons de ventilation sont-ils fonctionnels et non obstrués ?			
Les contenants et réservoirs sont-ils fermés lorsqu'ils ne sont pas utilisés ?			
La signalisation est-elle suffisante et en bon état ?			
Le matériel d'intervention en cas de déversement est-il disponible et facilement accessible ?			
Les contenants et réservoirs sont-ils installés dans des zones sûres (protégées du passage de véhicules, couvertes en cas de pluie si nécessaire) ?			

Bassins de rétention secondaire			
Exigences	Oui /Non	Action corrective	Employé responsable
Le bassin secondaire est-il couvert (pour éviter l'entrée d'eau de pluie) ou vidé périodiquement ?			
La surface et les parois du bassin sont-elles exemptes de fissures, d'écaillage ou de corrosion ?			
Le volume stocké dans le bassin respecte-t-il la limite acceptable (110 % du plus grand contenant ou 25 % de la somme totale, selon le cas le plus élevé) ?			

Y a-t-il des traces de débordement en dehors du bassin secondaire ?			
Le cas échéant, les connexions du puisard (alimentation, canalisations, vannes de vidange) sont-elles en bon état ?			
Le bassin du puisard présente-t-il des fissures ou un décollement de surface ?			
Y a-t-il des débris dans le puisard ?			

Equipements et tuyauterie			
Exigences	Oui / Non	Action corrective	Employé responsable
Les vannes sont-elles fermées et verrouillées ?			
Tous les tuyaux sont-ils stockés à l'intérieur de la zone de rétention ?			
Y a-t-il des signes de corrosion, de fléchissement, de bosses, de suintement ou d'abrasion ?			
Y a-t-il des gouttes, des flaques ou une décoloration sous les tuyaux ou les flexibles ?			

Annexes 2 : Bulletins d'analyse de la qualité d'eau de rejets faite par l'ONEDD



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة البيئة والطاقة المتجددة
MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES ENERGIES RENOUVELABLES
المرصد الوطني للبيئة والتنمية المستدامة
OBSERVATOIRE NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE
ONEDD

Station de surveillance
de l'environnement
-M'sila-

N°...../SSMS/2024

M'sila le:

Bulletin d'Analyses

Pour le compte de : SPA Cimenterie Usine LCM – Lafarge Ciment de M'sila .

Adresse : Hammam Dalaa - M'sila

Spécification de l'échantillon: Rejet liquide (STEB) , au nombre de (01) échantillon

Prélèvement effectué par : membre de la station

Date de l'entrée de l'échantillon au laboratoire : 29/09/2024

Convention : N° 001/2022 du 16/02/2022

Présentation des résultats d'analyses					
Paramètres	Unités	Valeurs limites*	Tolérance aux Valeurs limites anciennes installations	Résultats	Normes d'analyse
Température	C°	30	30	16,5	Multi paramètres
PH	-	5,5 - 8,5	5,5 - 8,5	7,8	Multi paramètres
MES	mg/l	35	40	12	Méthode Instrument
DCO		80	120	110	ISO 6060: 1989
DBO ₅		35	40	15	Méthode Instrument
Matière décantable		0,5	1	<0,1	ISO : 8288-1986
Huiles et graisses		20	30	<2	ISO : 8288-1986
Cadmium		0,07	0,2	< 0,03	ISO : 8288-1986
Chrome		0,1	0,1	< 0,2	ISO : 8288-1986
Cuivre		0,1	0,3	< 0,1	ISO : 8288-1986
Cobalt		0,1	0,1	< 0,2	ISO : 8288-1986
Nickel		0,1	0,5	< 0,2	ISO : 8288-1986
Plomb		0,5	1	< 0,2	ISO : 8288-1986
Zinc		2	5	<0,18	ISO : 8288-1986

(*): Valeurs limites des paramètres des rejets d'effluents liquides Industriels selon le décret exécutif N° 06-141 du 20 Rabie el Aouel correspondant au 19 Avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels .

Chargée de la gestion de la station

أشوان ريزوق زغلاش
مصلحة بالسياسة
وزارة البيئة

Station de Surveillance de M'sila – Nouvelle Cité Administrative (En face Cité 1er Novembre 1954) – M'sila
N° Tel : 0655-34-32-19 / E-mail : ss.m'sila@onedd.org

Annexe 3 : Limites de rejet pour la qualité de l'eau définis par le groupe

Paramètre	Limites du Groupe	Fréquence d'échantillonnage	Méthodologie
pH	6 - 9,5	Trimestrielle	Kits de test pH, pH-mètre
MEST (Matières En Suspension)	150 mg/l	Trimestrielle	Méthode gravimétrique — Normes Standard Methods 2540D, BS EN 872, ou équivalent
Mercure	0,05 mg/l	Trimestrielle	Oxydation, spectrométrie de fluorescence atomique — PN-EN ISO 12846:2012+Apl:2016-07, EPA 1631E, ou équivalent
HCT (Hydrocarbures Totaux)	15 mg/l	Trimestrielle	PN EN ISO 9377:2003, Méthode EPA 1664 Rév.B, ou équivalent
Azote total	40 mg/l	Trimestrielle	Titration colorimétrique avec solution d'EDTA — Méthodes EPA 351.2 et 351.4 ou équivalent
Phosphore total	10 mg/l	Trimestrielle	Digestion + spectrophotométrie — APHA Méthode 4500-P ou équivalent
DBO (Demande Biologique en Oxygène)	30 mg/l	Trimestrielle	Normes BS EN 1899-1 & 2 ou équivalent

Annexe 4 : Liste des KPIs identifiés par le groupe

Code	KPI	Définition
WAT_WIT_001	Prélèvement d'eau de surface	Volume d'eau prélevé de rivières, lacs, étangs, etc. à des fins industrielles ou sanitaires.
WAT_WIT_002	Prélèvement d'eau souterraine	Volume d'eau prélevé de puits ou forages pour usage industriel ou sanitaire.
WAT_WIT_003	Prélèvement d'eau du réseau ou tiers	Eau fournie par un réseau public ou un fournisseur externe (camions, etc.).
WAT_WIT_004	Utilisation d'eau de carrière	Volume d'eau issue du drainage de carrière utilisée dans les opérations du site.
WAT_WIT_005	Prélèvement d'eaux non douces	Volume total d'eaux issues de sources non douces (eau de mer, polluée, etc.).
WAT_WIT_006	Eau de pluie récupérée	Volume de pluie ou de fonte de neige collectée sur site et utilisée.
WAT_DIS_001	Rejets vers les eaux de surface	Volume d'eaux usées rejeté dans les rivières, lacs, etc.
WAT_DIS_002	Rejets vers la mer	Volume d'eaux usées rejeté dans la mer.
WAT_DIS_003	Rejets vers les eaux souterraines (infiltration)	Volume d'eaux usées rejeté dans les nappes via infiltration (puits, etc.).
WAT_DIS_004	Rejets vers traitement externe / tiers	Volume d'eaux usées envoyé vers une station de traitement externe ou un tiers.
WAT_CON_001	Consommation d'eau pour le procédé	Eau utilisée pour les opérations industrielles (refroidissement, lavage, etc.).
WAT_CON_002	Consommation d'eau domestique	Eau utilisée à des fins sanitaires (boisson, nettoyage, etc.).
WAT_CON_003	Fuites et pertes d'eau	Volume total estimé des fuites et pertes d'eau sur le site.
WAT_REC_001	Système de recyclage d'eau en place	Présence ou non d'un système de recyclage d'eau (Oui / Non).
WAT_REC_002	Volume d'eau recyclée en interne	Quantité d'eau récupérée et réutilisée dans le processus.
WAT_REC_003	Traitement primaire des eaux	Présence de traitement primaire des eaux avant rejet (Oui / Non).
WAT_REC_004	Traitement secondaire des eaux	Présence de traitement secondaire des eaux avant rejet (Oui / Non).
WAT_REC_005	Traitement tertiaire des eaux	Présence de traitement tertiaire des eaux avant rejet (Oui / Non).
WAT_REC_006	Pas de traitement – envoyé vers tiers	L'eau est envoyée telle quelle à un traitement hors site (Oui / Non).
WAT_REC_007	Pas de traitement – conforme aux normes	L'eau rejetée respecte déjà les normes sans traitement (Oui / Non).
WAT_QUA_001	Qualité des rejets – conformité en %	Pourcentage du volume rejeté conforme aux normes locales et Holcim.
WAT_QUA_002	Motif de non-conformité des rejets	Raisons pour lesquelles une partie du rejet d'eau n'est pas conforme.
WAT_MAN_001	Dépenses liées à l'eau (OPEX)	Dépenses opérationnelles annuelles liées à la gestion de l'eau (analyses, services, entretien, etc.).

WAT_MAN_002	Crédits d'eau – Protection/restauration	Volume d'eau "créditée" via des projets de reforestation, recharge de nappes, etc.
WAT_MAN_003	Crédits d'eau – Accès et assainissement	Volume d'eau crédité via des projets communautaires d'accès à l'eau ou assainissement.
WAT_MAN_004	Crédits d'eau – Usage productif	Volume d'eau économisé via des pratiques agricoles ou industrielles efficaces.
WAT_MAN_005	Crédits d'eau – Autres projets	Volume d'eau crédité via d'autres projets (hors des catégories précédentes).
WAT_MAN_006	Accès à l'eau potable et sanitaires pour le personnel	Présence de points d'eau potable et de sanitaires pour tout le personnel et les visiteurs (Oui / Non).

Annexe 5 : Evaluation de la conformité du site de Msila au standard HSE-302

#		Exigences	Oui / Non / N/A	Commentaires
A	Design			
A.1	Cartographie des équipements et réseau d'eau	Existe-t-il une cartographie complète des composants du système d'eau incluant les sources, les points de rejets, les systèmes de traitement, les compteurs, les points de prélèvement etc. ?	Non	Les pompes et les points de prélèvements non inclus
A.2	Schéma de distribution des flux d'eau	Le schéma des flux d'eau entrants, de consommation, de rejet et de recyclage est-il disponible et à jour ?	Oui	/
A.3	Conception du système de traitement [Critique]	Le système de traitement est-il adapté aux volumes variés et conforme aux normes de rejet ?	Oui	/
A.4	Système de drainage pour pluies maximales	Le système de drainage gère-t-il efficacement les pluies maximales quotidiennes sur les 10 dernières années ?	Oui	/
A.5	Systèmes de rétention des eaux pluviales [Critique]	Le système de rétention gère-t-il les moyennes quotidiennes maximales de pluie des 10 dernières années ?	Oui	/
B	Contrôles Préventifs			
B.1	Gestion des Changements	B.1.a. Est-ce que la gestion des changements tient en compte les impacts des modifications des équipements majeurs sur les ressources en eau ?	Oui	/
		B.1.b. Est-ce que ça tient en compte les changement de volume de production ?	Non	/
		B.1.c. Est-ce que les procédures incluent des actions d'atténuation de ces impacts ?	Oui	/
B.2	Transition pour conformité réglementaire	Est-ce que les rejets et les systèmes de traitement sont surveillés et validés pendant les transitions pour garantir la conformité réglementaire ?	Oui	/
B.3	Étude de risque d'inondation (si nécessaire)	Une étude de risque d'inondation a-t-elle été réalisée si le site a été inondé dans les 50 dernières années ?	Oui	/
C	Contrôles Correctifs			
C.1	Identification des composants critiques	Les composants critiques sont-ils clairement identifiés par une signalisation visible ?	Oui	/
C.2	Rétentions secondaires définies [Critique]	Les dispositifs de rétention secondaire répondent-ils aux	Oui	/

		exigences de contenance ?		
C.3	Plan d'Intervention d'Urgence – scénarios de rejets [Critique]	C.3.a. Le Plan d'Intervention d'Urgence inclut-il les scénarios de rejet d'eaux polluées ?	Non	/
		C.3.b. Est-ce que les prestataires de dépollution tiers sont inclus dans les Plan d'Intervention ?	Non	/
		C.3.c. Est-ce que les scénarios de rejets pollués sont revus annuellement, les modifications enregistrées et le personnel formé si nécessaire ?	Non	/
C.4	Exercices d'urgence [Critique]	Est-ce que des exercices d'urgence liés aux rejets sont planifiés et réalisés ?	Non	/
C.5	Plan d'Intervention d'Urgence – eaux d'incendie [Critique]	C.5.a. Est-ce que le Plan d'Intervention traite la rétention des eaux d'extinctions d'incendies ?	Oui	/
		C.5.b. Est-ce que les équipes sont formées à la gestion des rejets d'eaux incendies ?	Oui	/
C.6	Plan d'Intervention d'Urgence – gestion de crise et parties prenantes [Critique]	Le plan intègre-t-il la gestion de crise et l'engagement des parties prenantes ?	Oui	/
D	Operations			
D.1	Programme de gestion de l'eau avec KPI	D.1.a. Existe-t-il un processus de réduction, de recyclage et de réutilisation d'eau ?	Oui	/
		D.1.b. Existent-ils des Indicateurs de Performances (KPI) pour mesurer la performance de l'unité en matière de gestion d'eau ?	Oui	/
		D.1.c. Est-ce que des initiatives ou des programmes définis par le groupe sont mis en œuvre, ex : dons d'eau ?	Oui	/
D.2	Mesure des quantités d'eau	Les volumes prélevés, consommés et rejetés sont-ils correctement mesurés et documentés ?	Non	Estimation arbitraire de plusieurs paramètres
D.3	Reporting dans l'outil Groupe	Les données sont-elles reportées dans l'outil de reporting du Groupe ?	Oui	/
D.4	Vidange après pluie	Les rétentions secondaires sont-elles vidées après chaque pluie ?	Oui	/
D.5	Les procédures Opérationnelles Standards pour traitement et inondation	Est-ce que des procédures opérationnelles sont en place pour le traitement et la prévention des inondations ?	Oui	/
D.6	Échantillonnage et	Un programme d'échantillonnage	Oui	/

	surveillance [Critique]	conforme est-il mis en œuvre avant tout rejet ?		
D.7	Permis valides et revus [Critique]	Tous les permis requis sont-ils valides et révisés annuellement ?	Oui	/
E	Maintenance			
E.1	Maintenance des équipements de traitement [Critique]	Est-ce que les équipements de traitement, y compris : tuyaux, pompes, compteurs etc., sont inclus dans le plan de maintenance ?	Non	Les compteurs non inclus
E.2	Entretien et calibration des appareils	Est-ce que les équipements de mesure, sont régulièrement entretenus et calibrés ?	Non	/
E.3	Rétentions et drainage dans le plan	Est-ce que les systèmes de drainage et de rétentions sont inspectés régulièrement ?	Non	/
E.4	Pièces critiques de rechange	Est-ce que les pièces de rechanges critiques des systèmes de traitement sont identifiés et disponibles	Non	/
E.5	Équipements d'urgence testés	Les équipements d'urgence sont-ils régulièrement testés ?	Oui	/
E.6	Inspection des rétentions secondaires	Les rétentions secondaires sont-elles inspectées pour détecter fissures ou corrosion ?	Non	/