
Livrable 2.5. Identification des technologies et des meilleures pratiques pour la réduction des GES dans le secteur du ciment

Table des matières

1.	Les options vers l'engagement net zero de la part des organisations et des cimenteries	4
1.1.	Feuille de route de la « Global Cement and Concrete Association »	4
1.2.	Le scénario net 0 de l'Agence Internationale de l'Énergie d'ici 2050.....	5
1.3.	Les grands groupes de ciment se dirigent aussi vers le net zéro	6
2.	Options de décarbonisation de l'industrie cimentière dans le monde	7
2.1.	Les 4 leviers possibles en détail.....	8
2.2.	Améliorer l'efficacité énergétique.....	8
2.3.	Réduire le rapport clinker/ciment	10
2.4.	Augmenter l'utilisation de combustibles alternatifs	12
2.5.	Utiliser CCUS.....	13
	Captage du carbone.....	14
	Utilisation du carbone.....	14
	Séquestration du carbone.....	15
3.	Les différents leviers applicables au Congo et leurs conséquences sociales et économiques	16
3.1.	Levier d'efficacité énergétique applicable au Congo.....	17
3.2.	Levier de facteur clinker applicable au Congo.....	18
3.3.	Levier d'utilisation des combustibles alternatifs applicable au Congo	19
3.4.	Levier CCUS applicable au Congo	19
3.5.	Délai de mise en œuvre des différents leviers	20
3.6.	Les bénéfices potentiels pour les femmes et les jeunes	20
	Bibliographie	23

Glossaire / Abréviations

AFR- Alternative Fuel & Raw Material - Carburants alternatifs et matières premières

CCUS – Carbon Capture & Utilisation – La capture et la séquestrat

GCCA - Global Cement and Concrete Association – l'Association Mondiale du Ciment et du béton

IEA ou AIE – International Energy Agency - l'Agence Internationale de l'Énergie

LC3 : Limestone calcined Clay Cement – Ciment a argile calcinee et calcaire

WHRS – Waste Heat Recovery System - Systèmes de récupération de la chaleur résiduelle

Ce rapport est basé sur l'identification des stratégies potentielles, des obstacles et des catalyseurs nécessaires pour décarboniser l'industrie du ciment au Congo.

1. Les options vers l'engagement net zero de la part des organisations et des cimenteries

1.1. Feuille de route de la « Global Cement and Concrete Association »

La Global Cement and Concrete Association (GCCA) est composée de producteurs de ciment du monde entier. GCCA représente 80 % de la capacité mondiale des producteurs de ciment hors Chine.

La feuille de route de GCCA, établie en octobre 2021, définit une trajectoire nette zéro pour aider à limiter le réchauffement climatique à 1,5 ° C. Selon la feuille de route, le secteur s'est engagé à produire du béton net zéro d'ici 2050.

GCCA 2020 à 2030 – Durant cette période les actions et initiatives suivantes seront engagées :

- Augmentation de la substitution du clinker – y compris les cendres volantes, les argiles calcinées, les scories granulées broyées de haut fourneau (ggbfs) et le calcaire broyé.
- Réduction des combustibles fossiles et utilisation accrue des combustibles alternatifs
- Amélioration de l'efficacité dans la production de béton
- Amélioration de l'efficacité dans la conception de projets en béton et l'utilisation du béton pendant la construction, y compris le recyclage
- Investissement dans la technologie et l'innovation
- Développement de la technologie et de l'infrastructure CCUS

Les ambitions de GCCA pour 2030 à 2050 – Durant cette période les actions et initiatives suivantes seront engagées :

- La substitution du clinker se poursuivra avec l'augmentation du volume de calcaire broyé et d'argile calcinée.
- Poursuite de l'utilisation de combustibles alternatifs pour réduire les émissions de CO₂.
- En fin de compte, le CO₂ devra être capturé, réutilisé si possible, ou stocké.

ACTIONS TO A NET ZERO FUTURE

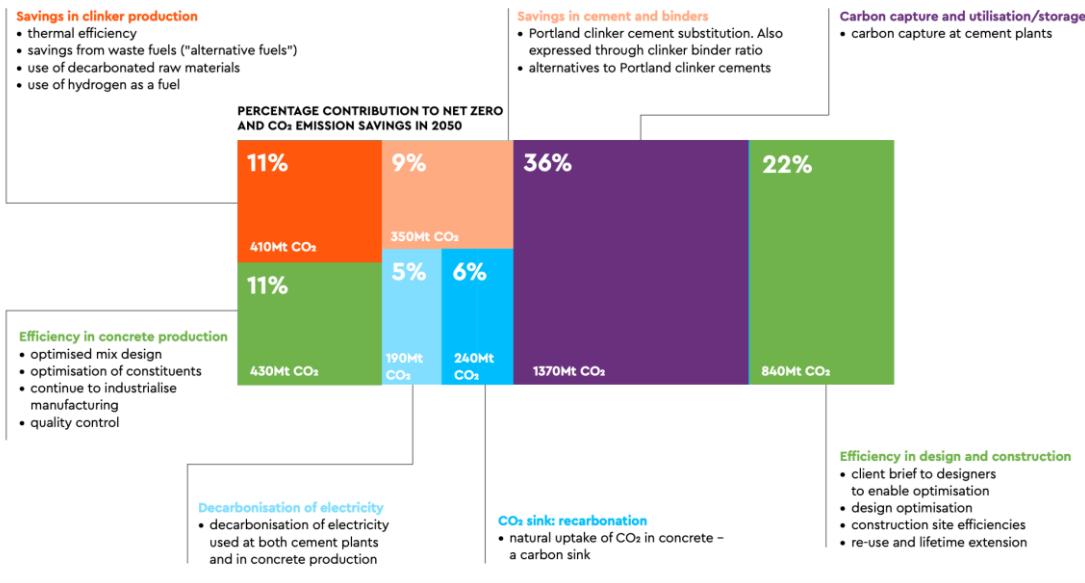


Figure 1 - Feuille de route de GCCA (GCCA, 2021)

1.2. Le scénario net 0 de l'Agence Internationale de l'Énergie d'ici 2050

En mai 2021, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a publié sa feuille de route pour le secteur de l'énergie avec un chapitre spécifique sur le ciment. La feuille de route de l'AIE n'est pas très différente de celle de GCCA.

La première action serait d'augmenter le mélange de matériaux alternatifs dans le ciment pour remplacer une partie de clinker. Le rapport indique qu'en utilisant des ciments mélangés, le ratio mondial clinker / ciment passerait de 0,71 en 2020 à 0,65 en 2030, puis continuerait à diminuer pour atteindre 0,57 en 2050. Le calcaire et l'argile calcinée seraient les principaux matériaux alternatifs utilisés dans les ciments mélangés à l'horizon 2070. (Figure 2).

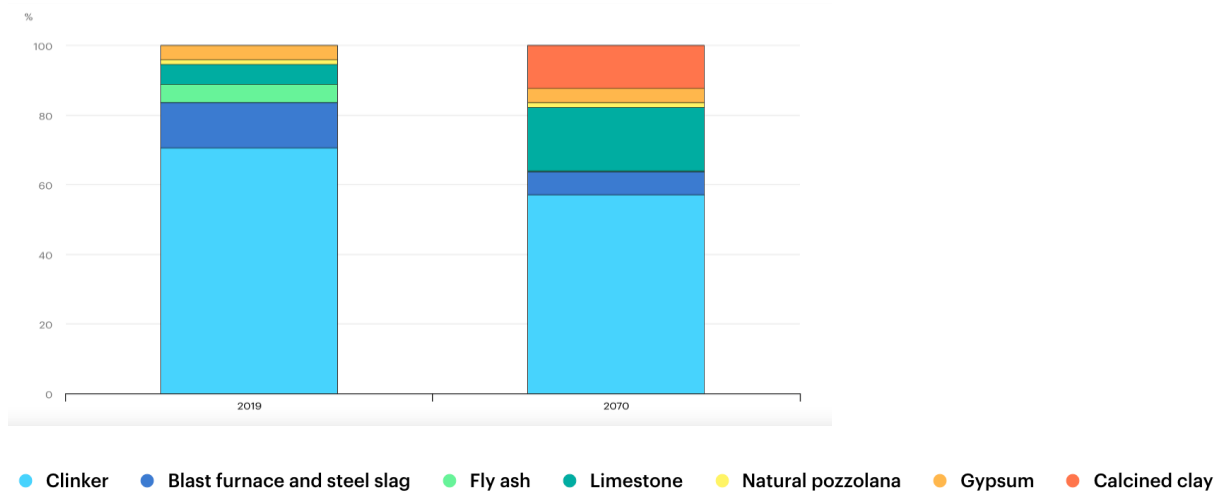


Figure 2 - AIE, Production mondiale de ciment par type de matériaux dans le scénario de développement durable, 2019 et 2070, AIE, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-cement-production-by-material-composition-in-the-sustainable-development-scenario-2019-and-2070>

Le CCUS reste l'un des leviers les plus importants pour réduire davantage les émissions et représenterait 55% des réductions en 2050. Selon l'AIE, le charbon et le petcoke seront totalement éliminés d'ici 2050. Le scénario de mix énergétique thermique d'ici 2050 de l'AIE est composé de 40 % de gaz naturel (contre 15 % aujourd'hui), de 35 % de biomasse et de déchets renouvelables (contre moins de 5 % aujourd'hui), de 15 % d'hydrogène et d'électrification directe. Les 10 % restants se composeraient de produits pétroliers et de déchets non renouvelables.

1.3. Les grands groupes de ciment se dirigent aussi vers le net zéro

Holcim

Le « Net Zero Climate Pledge » du groupe Holcim privilégie la réduction du ratio clinker / ciment, en particulier grâce à l'argile calcinée, et l'utilisation intensive de combustibles dérivés des déchets. L'utilisation et la séquestration du carbone ne seront déployés à grande échelle qu'à partir de 2030.

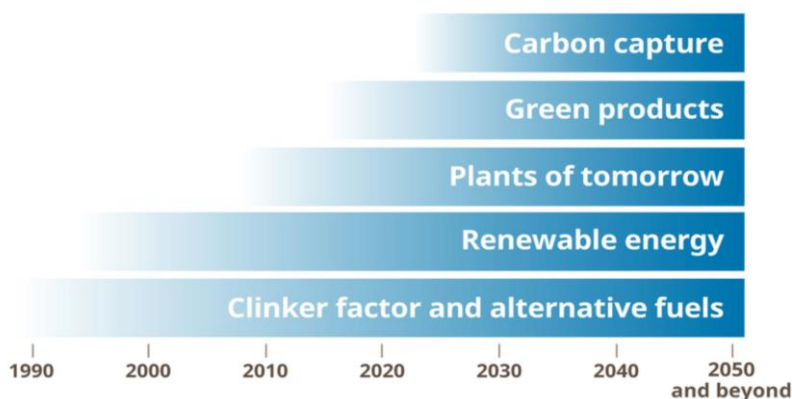


Figure 3 - Objectif climatique net zéro Holcim (www.holcim.com, 2021)

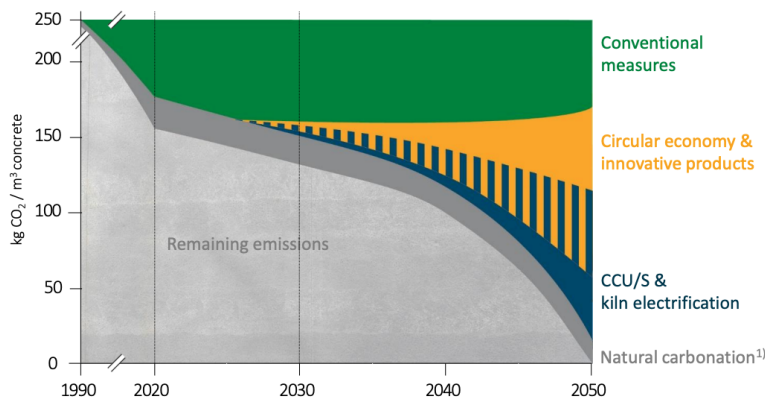
Heidelberg

Heidelberg Cement suit une trajectoire semblable pour son objectif net grâce à son « Leading the way to carbon neutrality ». Une utilisation accrue de carburants alternatifs et la substitution du clinker par des matériaux à basse teneur CO2 seront essentielles. Au-delà de 2030, le CCUS sera développé.



Carbon neutrality by 2050 requires a variety of localized approaches

Our approach to carbon neutrality



1) Natural carbonation is the absorption of CO₂ from the atmosphere during the lifetime of a concrete construction

Capital Markets Day 2020 | 16.09.2020

Circular economy & innovative products

- Recycled materials (recycled aggregates, recycled concrete paste as raw material)
- Alternative cementitious materials (e.g. calcined clay, carbonated recycled concrete paste)
- Low carbon clinker types (example: Ternocem, CSA)
- Low carbon cement types (example: MultiComponentCement – CEMII/C-M)

CCU/S & kiln electrification

- Carbon Capture & Usage (high protein animal feed, manufacture of fuels, carbonates and chemicals)
- Carbon Capture & Storage (amine scrubbing, Oxyfuel technology, LEILAC)
- Hydrogen & kiln electrification projects

HEIDELBERGCEMENT

Figure 4 - Plan d'action neutralité carbone de Heidelberg Cement

2. Options de décarbonisation de l'industrie cimentière dans le monde

Les options de décarbonisation sont nombreuses dans l'industrie avec des impacts différents. Il a été convenu que les options suivantes ont un impact sur la réduction de l'empreinte carbone de l'industrie.

- Efficacité énergétique des équipements : ce levier se développe grâce à l'application des meilleurs technologies disponibles.
- Réduction du rapport clinker / ciment
- L'utilisation de combustible : ce levier favorise l'utilisation de combustibles non fossiles comme les déchets ou les combustibles issus de la biomasse. Certaines études analysent également l'apport d'hydrogène vert dans le mélange de combustibles à un certain %. L'utilisation de gaz naturel est également l'une des options pour réduire les émissions .
- Utilisation et stockage du carbone (CCUS) : le levier le plus important pour atteindre zéro émission nette.
- D'autres leviers, qui ne seront pas abordés dans ce document car ils agissent en bas de la chaîne de valeur, sont l'optimisation du design de la construction par les architectes ainsi que la définition des formules bétons, la recarbonation (absorption de CO₂ par le béton) et la décarbonisation de la consommation d'électricité.

2.1. Les 4 leviers possibles en détail

Quatre leviers différents seront analysés en détail. Certains de ces leviers peuvent être appliqués directement, d'autres dans les 2 prochaines années, et d'autres ne seront économiquement réalisables qu'après 2030. Ce calendrier peut totalement changer si une taxe sur le CO₂ ou une réglementation sur le CO₂ est appliquée dans le pays ciblé.

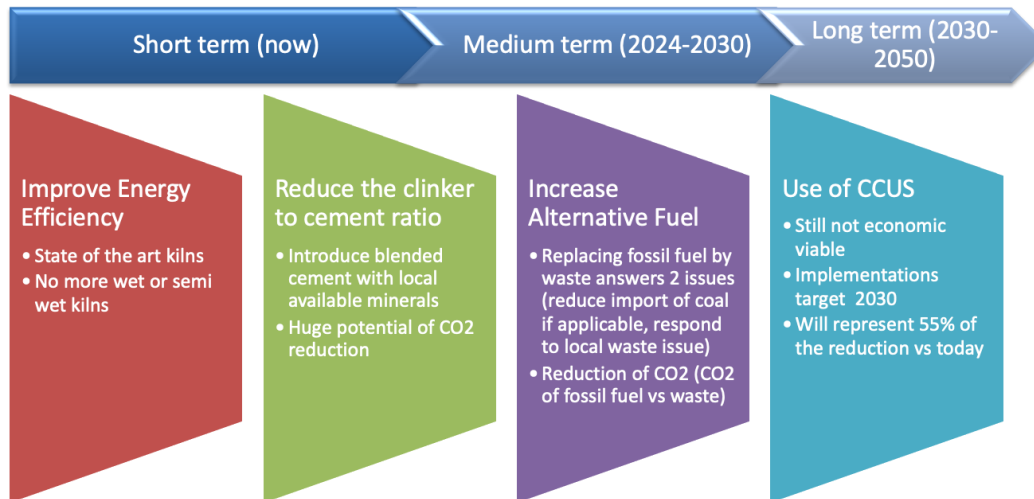


Figure 5 - Les quatre principaux leviers de décarbonisation de l'industrie (Cementis)

2.2. Améliorer l'efficacité énergétique

L'efficacité en termes d'énergie se réfère principalement à la quantité d'énergie combustible nécessaire pour la fabrication du clinker. Celle-ci est en majeure partie dépendante du type de four utilisé.

Selon les types de fours les besoins énergétiques diffèrent en fonction de la matière première utilisée :

- Voie humide : Les premiers fours à ciment étaient de ce type. Le mélange de calcaire peut contenir jusqu'à 40% d'eau, ce qui en fait le four le plus énergivore car une grande partie de l'énergie est utilisée à sécher la matière première
- Voie semi-humide : Intègre l'utilisation d'un filtre-pressé pour réduire la teneur en eau de la matière première avant d'entrer dans le four
- Voie sèche (longue) : La plupart des fours à séchage long sont équipés de chaînes à l'extrémité de l'alimentation pour transférer la chaleur résiduelle au mélange lorsqu'il pénètre dans le four.
- Voie sèche avec préchauffage et calcinateur : La chaleur résiduelle du four préchauffe le mélange à l'aide d'une tour contenant une série de cyclones d'air.

Les différents besoins énergétiques selon le type de four sont résumés dans le tableau suivant :



Kiln process	Heat consumption (kcal/kg clinker)
Wet process	1400-1500
Long dry process	1100
1-stage cyclone preheater	1000
2-stage cyclone preheater	900
4-stage cyclone preheater	800
4-stage cyclone preheater with calciner	750
5- stage preheater with calciner and high efficiency cooler	720
6-stage preheater with calciner and high efficiency cooler	<700

Tableau 1 - Consommation énergétique par type de four

Ce levier a de moins en moins de potentiel de réduction car depuis 2005, 80% de la production mondiale de clinker est obtenue à partir de fours à voie sèche.

Il existe également des systèmes d'optimisation des procédés et de récupération de la chaleur résiduelle

Optimisation des processus

L'optimisation du process consiste à affiner le fonctionnement opérationnel du four afin de réduire légèrement les émissions de CO₂; cependant, son impact est marginal. Par exemple en 2016 dans une usine de taille moyenne, les émissions brutes moyennes mondiales de CO₂ selon le GNR étaient de 842 kg co₂ / tonne de clinker. Par conséquent une amélioration de 2% des émissions liées à la consommation de combustible ne conduirait qu'à une amélioration des émissions de 6-7 kg CO₂ / t clinker. Ce volume est infime et ne pourrait être augmenté que grâce à l'arrivée de nouvelles technologies ou de nouveaux matériaux. Les fours les plus anciens ne seraient probablement pas en mesure d'améliorer leurs performances environnementales compte-tenu de l'âge et de l'usure des équipements. Quant aux nouveaux fours ils sont déjà proche du niveau maximum en termes d'optimisation du process. Par conséquent l'optimisation du process n'est pas considérée comme un moyen significatif de réduire les émissions de CO₂ et de ce fait aucune action majeure n'est requise dans ce domaine pour réduire les émissions de CO₂.

Systèmes de récupération de la chaleur résiduelle (WHRS)

Des systèmes de récupération de la chaleur résiduelle (WHRS) ont été installés dans de nombreuses cimenteries. L'utilisation de la chaleur résiduelle générée par la chaleur des gaz d'échappement des fours peut être utilisée pour la production d'électricité. Le potentiel de production d'électricité est de 25 kWh/tonne à 40 kWh/tonne de clinker. Les coûts d'une telle installation dans une nouvelle ligne de four de 4'000 tonnes par jour avec pré-calcaireur sont estimés entre 15 et 25 millions d'euros pour une puissance nominale totale brute de 7,5 MW. Les économies d'électricité réalisées par ce biais se traduisent par une réduction des coûts de l'énergie électrique. De plus, l'énergie électrique ainsi économisée peut maintenant être utilisée par d'autres secteurs de l'économie régionale ou même supprimée. Dans tous les cas, la réduction correspondante des émissions de CO₂ en kg résultant de la mise en œuvre d'un WHRS n'est pas calculée au niveau de l'usine.

2.3. Réduire le rapport clinker/ciment

Le pourcentage de clinker dans un type de ciment est appelé facteur clinker ou ratio clinker / ciment. Le facteur clinker moyen peut différer d'un pays à l'autre selon les types de ciments disponibles sur un marché donné. Le type le plus connu est le ciment Portland ordinaire (OPC) qui contient 95% de clinker. Dans les autres ciments, appelés ciments composites ou mélangés, le clinker est remplacé par des matériaux dit de substitution au clinker.

Ces matériaux, souvent à faible émission voir même 0 émission de CO₂, comprennent les cendres volantes, la pozzolana naturelle, les scories de haut fourneau, et le calcaire (non calciné). Cependant, la disponibilité des cendres volantes et des scories de haut fourneau diminue en volume et finira par disparaître à court et moyen terme en raison de la fermeture des centrales électriques au charbon et de l'augmentation du recyclage de la ferraille par le biais du processus de four à arc électrique.

Mais depuis quelques années, un nouveau produit de substitution au clinker se développe à plein régime notamment par les leaders de l'industrie, l'argile calcinée.

En effet, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse a découvert un nouveau ciment à faible émission de CO₂, le « Limestone Calcined Clay Cement (LC3) », qui réduit considérablement le taux de clinker, tout en maintenant la qualité et les performances du produit final. Ce nouveau ciment est composé de 50% de clinker, 30% d'argile calcinée, 15% de calcaire concassé et 5% de gypse (Figure 6). La réduction des émissions de CO₂ s'explique principalement par le faible ratio de clinker / ciment. LC3 peut réduire jusqu'à 39% du CO₂ par rapport au ciment OPC. (LC3, lc3.ch, 2021) Bien que ne contenant que 50% de clinker ce ciment à des performances comparables au ciment Portland ordinaire composé de 95% de clinker.

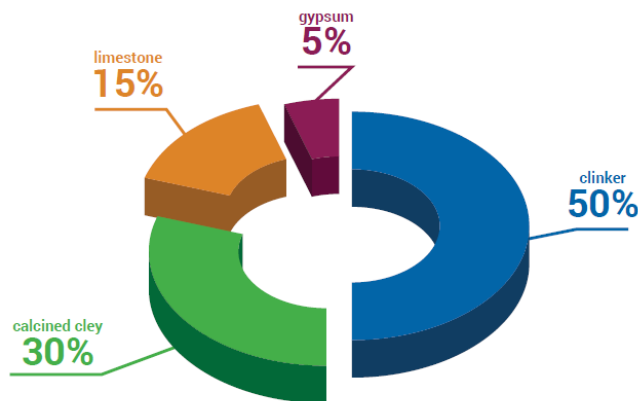


Figure 6 - Ciment argileux calciné calcaire (LC3)

Outre le fait que contrairement au clinker l'argile n'émet pas de CO₂ lors de sa calcination, sa spécificité est qu'elle n'a besoin que de température de l'ordre de 850°C alors qu'il faut 1'450 degrés pour le clinker. En termes d'équipement deux options existent : le four rotatif ou le calcinateur flash. On peut également convertir un four à clinker pour produire de l'argile calcinée.

Selon une étude de faisabilité réalisée en 2019, les coûts de production de LC3 peuvent être inférieurs de 6 et 7 USD par tonne par rapport à ceux de l'OPC en raison des besoins moindres en clinker, de l'utilisation de calcaire concassé peu coûteux, et d'une consommation de carburant réduite pour la calcination de l'argile. En outre, l'investissement nécessaire pour

produire un million de tonnes de LC3 ou 300 000 tonnes d'argile calcinée avec un four rotatif est de l'ordre de 10,3 millions USD. (LC3, Financial attractiveness of LC3, 2019)

Mais pour produire un nouveau ciment constitué de nouveaux matériaux celui-ci doit être reconnu par les normes. L'ensemble de normes EN-197 du Comité européen de normalisation (CEN) régleme les types de ciment et leur composition en Europe et fait également référence dans de nombreux pays du monde.

Le ciment original et le plus pur en clinker se nomme CEM I. Sa teneur en clinker est de 95% mais c'est aussi par conséquent le ciment qui a l'empreinte carbone la plus élevée (Tableau 2). Jusqu'en 2021, le contenu minimum de clinker pour un CEM II était de 65%. La nouvelle version 5 de la norme EN197 a corrigé cela en ramenant le pourcentage minimum de clinker à 50% (tableau 3).

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass ^a)										Minor additional constituents	
			Main constituents											
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone			
						natural	natural calcined	siliceous	calcareous		L	LL		
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-pozzolana cement	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Portland-composite cement ^c	CEM II/A-M	80-88	12-20										0-5
CEM II/B-M		65-79	21-35										0-5	
CEM III	Blast furnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement ^c	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Composite cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49			-	-	-	-	0-5	

^a The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.

^b The proportion of silica fume is limited to 10 %.

^c In Portland-composite cements CEM II/A-M and CEM II/B-M, in pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B and in composite cements CEM V/A and CEM V/B the main constituents other than clinker shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 8).

Tableau 2 - Norme européenne sur le ciment 197-1



Main types	Notation of the products (types of cement)		Composition (percentage by mass a)										
			Main constituents									Minor additional constituents	
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone		
						natural	natural calcined	siliceous	calcareous				
Type name	Type notation	K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L ^c	LL ^c		
CEM II	Portland-composite cement ^d	CEM II/C-M	50-64	←----- 36-50 -----→								0-5	

Tableau 3 - la nouvelle norme CEM II avec 50% de clinker EN 197-5 (2021)

2.4. Augmenter l'utilisation de combustibles alternatifs

L'utilisation de combustibles alternatifs au lieu de combustibles fossiles non renouvelables est un levier important pour réduire les émissions de CO₂ provenant de la combustion. L'industrie du ciment utilise depuis de nombreuses décennies les déchets comme carburant alternatif. Un taux de substitution de combustible fossile par 99% de déchets est techniquement possible pour une cimenterie, mais la réalité peut différer selon les pays et leur législation. Par exemple, l'industrie cimentière autrichienne a un taux moyen de substitution en combustibles alternatifs de 80% en 2019. (Cemnet, 2020)

Au plan mondial, le charbon et le petcoke représentent 90 % de la consommation de combustibles dans les cimenteries. Avec une teneur respective en carbone de 77,3 kg/GJ et de 95 kg/GJ (tableau 4) leur utilisation devra diminuer considérablement pour atteindre zéro émission nette. Par exemple, le remplacement du charbon par des résidus de solvants réduit les émissions de CO₂ de 22 kg de CO₂ par GJ (96 kg – 74 kg de CO₂).

Fuel	CO ₂ content	Waste	CO ₂ content
Coal	96 kg CO ₂ /GJ	Waste oil	74 kg CO ₂ /GJ
Natural gas	56 kg CO ₂ /GJ	Tyres	85 kg CO ₂ /GJ
Petcoke	93 kg CO ₂ /GJ	Plastic	75 kg CO ₂ /GJ
Heavy Fuel	77 kg CO ₂ /GJ	Solvents	74 kg CO ₂ /GJ
		Biomass	0

Tableau 4 - Émissions de CO₂ des combustibles conventionnels et alternatifs (en kg CO₂/GJ) (ghgprotocol, 2006)

Selon la feuille de route net 0 de l'AIE (IEA, 2021) le charbon et le petcoke disparaîtront d'ici 2050 et seront remplacés par le gaz naturel (40% de l'énergie thermique), la biomasse et les déchets renouvelables (35%), l'hydrogène et l'électrification directe (15%) et les produits pétroliers et les déchets non renouvelables pour le reste.

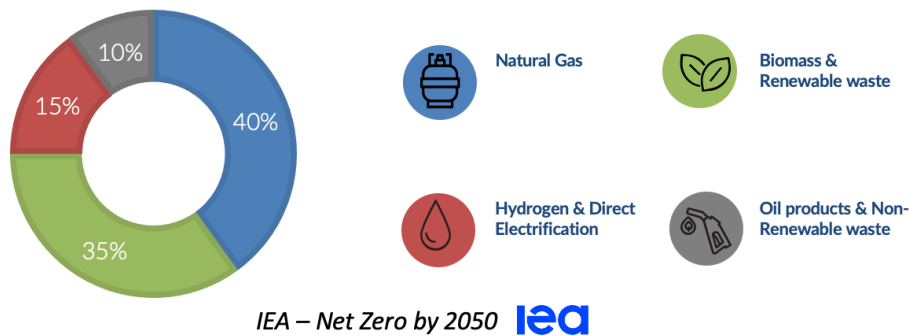


Figure 7 - Feuille de route net 0 de l'AIE d'ici 2050

Certaines associations cimentaires européennes comme VDZ ont plutôt l'intention de remplacer la quantité maximale de charbon par le o traitement des déchets avec un taux de substitution de 90% des déchets dont 35% de (VDZ, 2020) biomasse.

Il est important de souligner que lorsque l'industrie utilisera la biomasse en combinaison avec la capture de carbone, un effet de « puits de carbone » sera fourni.

Le problème lié à l'utilisation des déchets est que tous les déchets ne sont pas sans carbone, même si le co-traitement contribue à une économie plus circulaire et constitue l'alternative privilégiée aux décharges et à l'incinération traditionnelle. L'objectif à travers l'utilisation de déchets dans les fours à ciment est d'éviter le CO₂ émis par les décharges et les incinérateurs. (Geocycle, 2021). En effet les fours à ciment ont une bien meilleure efficacité énergétique que les incinérateurs.

L'une des principales mesures nécessaires à l'utilisation de déchets dans les fours à ciment est la taxation de l'enfouissement des déchets perçus à l'entrée des décharges. Une cimenterie n'utilisera de combustibles alternatifs que si ceux-ci lui reviennent moins chers que le combustible traditionnel. Compte-tenu des frais de logistique liés aux déchets et au coût de la préparation de ces déchets en cimenterie en vue de leur utilisation en tant que combustible, l'expérience a démontré que sans l'application du principe « celui qui pollue doit payer » l'utilisation de combustibles alternatifs en cimenterie reste anecdotique.

Les pays qui appliquent un principe strict de « pollueurs-payeurs » ont permis de déplacer les déchets vers les cimenteries et de réduire ainsi l'utilisation du charbon et ses émissions.

2.5. Utiliser CCUS

Le CCUS est l'utilisation et/ou la séquestration du carbone. S'il est généralement admis que sans CCUS l'objectif net 0 ne sera jamais atteint, tout le monde s'accorde à dire que cela doit être la dernière étape de la chaîne des mesures d'atténuation du CO₂ et ne devra en aucun cas remplacer tous les leviers ci-dessus.

Captage du carbone

Actuellement, les technologies de captage du carbone sont toujours au niveau TRL 6 à 8 (phase de démonstration ou de prototype) (Figure 8). Trois technologies principales sont répertoriées par l'ECRA pour capter le CO₂ : (ECRA, 2021)

- Séparation directe/calcination indirecte (Leilac)
- Oxyfuel
- Capture post-combustion (Brevik)

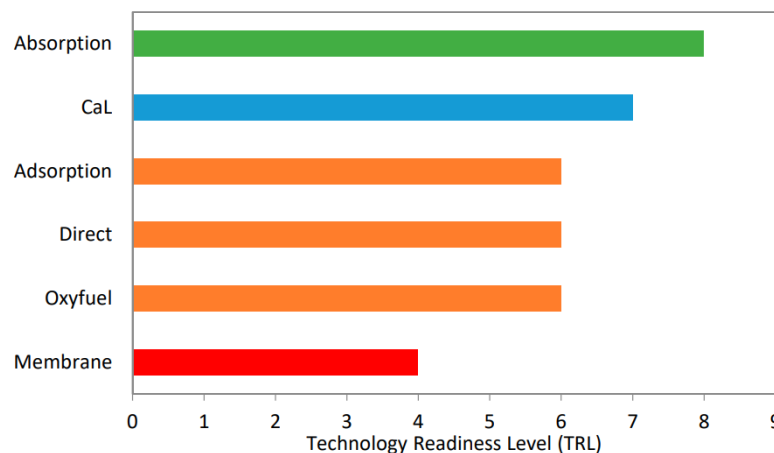


Figure 8 - NMT actuel des technologies de captage du CO₂ pour l'industrie du ciment (Plaza, Martínez, & Rubiera, 2020)

Selon INCAR-CSIC, le coût de la technologie dépend beaucoup de l'emplacement du site de l'usine, de la technologie spécifique utilisée, de la source de vapeur, du prix du carburant et des caractéristiques spécifiques de l'usine. Le coût peut varier entre un coût élevé de 80 EUR/t CO₂¹ évité avec la technologie d'absorption à base de MEA, et un coût plus faible de 30 à 40 EUR/t CO₂ évité avec « calcium looping technology » ou « l'oxyfuel ». (Plaza, Martínez, & Rubiera, 2020)

La technologie de postcombustion semble la meilleure option économique pour des cimenteries déjà construites, car elle peut être installée sur un four existant. La technologie Oxyfuel nécessitera une modification du processus et sera plus adaptée aux nouvelles usines. Pour le Congo, nous considérons que la technologie de postcombustion pourrait être la meilleure option.

Utilisation du carbone

La partie utilisation du carbone concentre beaucoup de nouvelles technologies comme le « CarbonCure », la minéralisation des agrégats, mais il est important d'analyser ces nouvelles

¹ Monoéthanolamine

technologies selon le principe de « Life Cycle Assessment (LCA) » car elles peuvent être contre-productives pour le changement climatique.

Par exemple, « Carbon Cure Technologies » intègre l'utilisation du CO₂ dans la production de béton prêt à l'emploi. Une réduction nette de 17,9 kg de CO₂ par m³ de béton serait obtenue, dont seulement 1,6% est dû à l'absorption directe de CO₂. Le delta, 98%, n'est que la conséquence d'une réduction du contenu de ciment dans le béton, basée sur une teneur en CO₂ de clinker très élevée aux USA de 1'040 kg CO₂/t.²

L'utilisation du carbone peut également être envisagée pour une autre industrie comme par exemple le projet Westküste 100 en Allemagne. Ce projet consiste en la recherche et le développement de la production d'hydrogène vert à partir de l'énergie éolienne offshore et à utiliser la chaleur résiduelle et l'oxygène générés dans le processus. Par la suite, l'hydrogène vert sera utilisé pour la production de carburants respectueux du climat pour les avions ainsi que pour alimenter les réseaux de gaz. Le processus de production de carburant utilisera l'hydrogène issue de l'électrolyse et le CO₂ provenant des cimenteries.

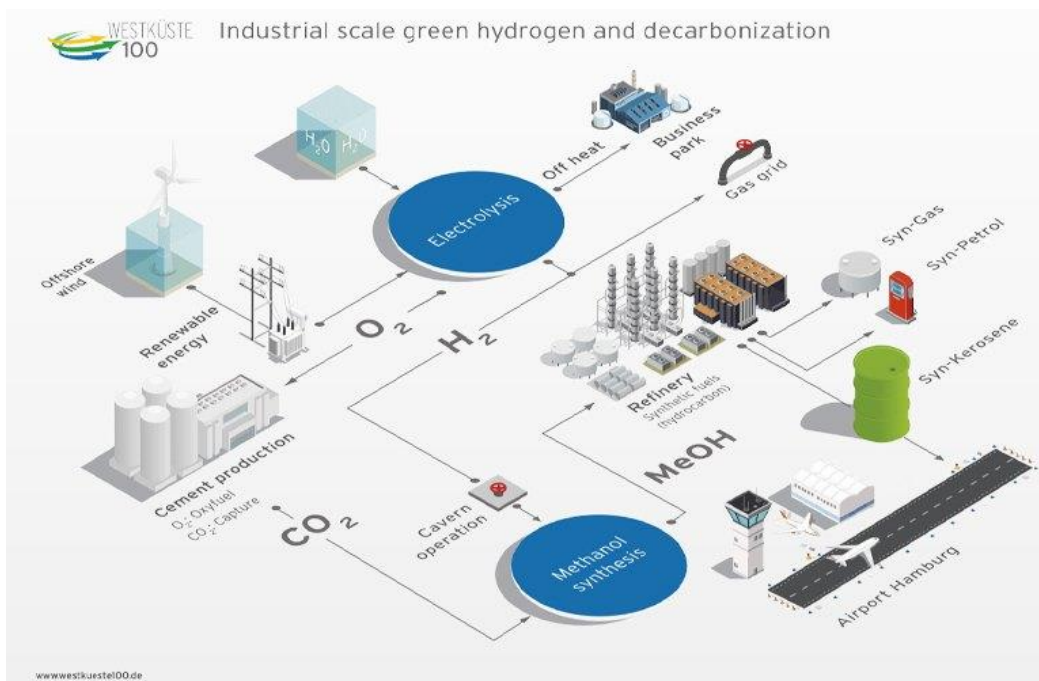


Figure 9 - Projet Allemand « Westküste 100 »

Séquestration du carbone

Il existe trois types de formations géologiques qui ont fait l'objet d'une attention approfondie pour le stockage géologique du CO₂ : les réservoirs de pétrole et de gaz, les formations salines profondes et les filons de charbon ne pouvant être minés. (GreenFacts, 2021)

² Calcul des impacts sur la durabilité de CarbonCure Ready Mix, extrait de CarbonCure, mai 2017

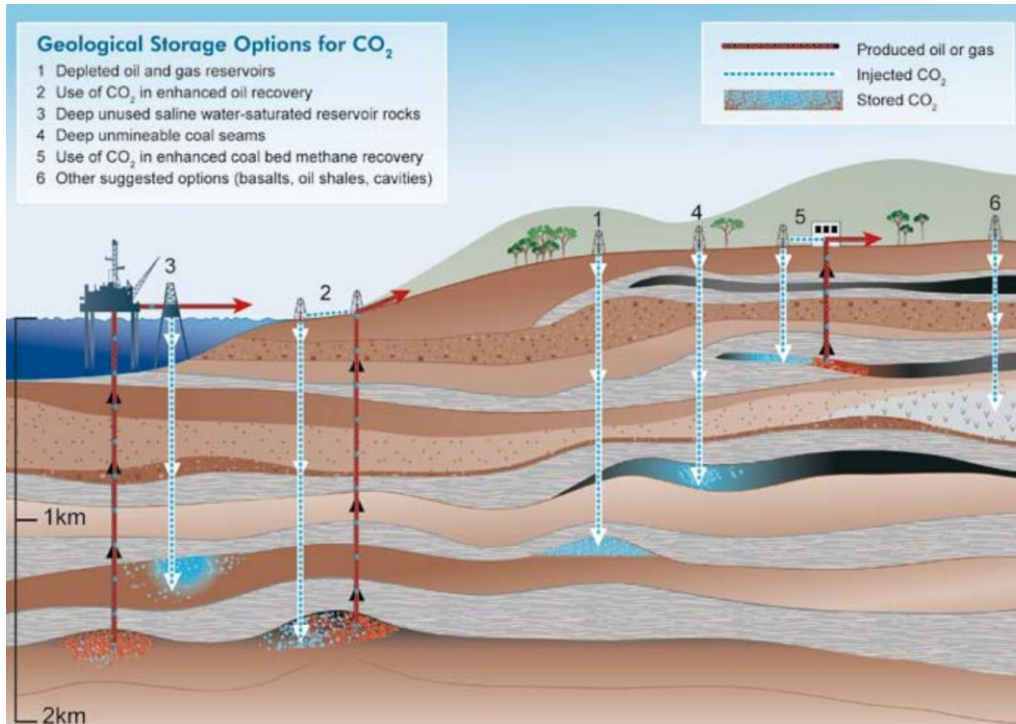


Figure 10 - Options de stockage du CO2

Le stockage du carbone par injection dans des formations géologiques visant à un stockage permanent comporte des défis. Le CO2 capté devra être liquéfié pour être transporté par camion ou par pipelines. Les usines qui seront situées au plus près des installations d'entreposage ou du port auront un certain avantage.

3. Les différents leviers applicables au Congo et leurs conséquences sociales et économiques

Quatre principaux leviers technologiques ont été évalués dans le contexte du marché congolais du ciment

- Composition et qualité du produit
- Efficacité énergétique (optimisation et utilisation de l'énergie, substitution de l'énergie thermique, substitution de l'énergie électrique)
- Nouvelles technologies
- Matériaux et méthodes de construction

Les différents leviers technologiques, y compris l'ordre de grandeur de l'investissement en capital (base 3000 tpd usine de production intégrée par exemple, Dangote), la réduction estimée du CO2 et le calendrier de mise en œuvre dans le contexte de la République du Congo (court, moyen et long terme) sont résumés comme suit :

Main Groupin g	Est. Pot. Red. [%CO2 reduced]	CAPEX [USD/t-cem] 3000 tpd-cll (1.2 mpta-cem) typ. basis	CO2 Reduction Levers	Implementation Timeframe (In the Context of The Republic of Congo)											
				Short Term (<5 years)				Mid-Term (<10 years)				Long Term (>10 years)			
1	~7-10%	~1-10 USD/t-cem	Product Composition & Quality	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		0.83	Clinker factor reduction (focus away from CEM I) Clinker factor reduction natural materials (Gypsum, Limestone, pozzolans)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		6.00	Clinker factor reduction industrial waste materials (GGBFS, Fly Ash, SynGyp)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		10.50	Clinker factor reduction man-made materials (Calcined Clays)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
2	~15-20%	~1-30 USD/t-cem	Energy Efficiency												
		new build only	Energy Optimization/Use (technology) State of the art kiln system transition(4-->5 stage PH/PC kiln or higher)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		30	State of the art grinding systems (no stand alone ball mills)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		3	Oxyfuel (STEC improvement and CO2 reduction)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		1	Alternative Raw Material (AF) co-processing e.g. steel belting	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		1	Clinker mineralization (co-processing or natural Fluorine)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		1	Thermal Energy Substitution Waste energy recovery (Thermal)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		2	Thermal (traditional) fuel carbon intensity transition (Coal (96 kgCo2/GJ) -->Pet coke (93) -->HFO (77) -->Nat gas (56))	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		new build only	Thermal (traditional) fuel transition (Hydrogen)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		8	Thermal energy Substitution (Fossil based AF (industrial & municipal streams)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		3	Thermal energy Substitution (Biomass based AF - agricultural streams)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		new build only	Thermal energy Substitution (Direct Electrification based)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		9	Electrical Energy Substitution Waste energy recovery (Electrical WHRS)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		31	Green sourcing (away from CPP to Grid (increased green energy contribution i.e. Hydroelectric, Wind, Solar, Nuclear)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
3	40-45%	~3-40 USD/t-cem	New Technologies												
		16	CCUS (Carbon Capture, Utilization & Storage) carbon concentration through indirect calcination	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		new build only	Pre-combustion tech. - Hydrogen fuels	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		3	Combustion tech. - Oxygen enrichment through Oxyfuel	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		13	Post-combustion CC tech. e.g. chemical, membrane, etc.	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		11	Post combustion CC tech. - CO2 geological sequestration	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		42	Post combustion CC tech. - HC Brevik/Alstom (Chilled Ammonia process (CAP) & Carbonate Looping Process)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
		new build only (cross industrial)	Post combustion CC tech. - LH Cross industrial / hybrid energy systems (CO2 and H2 (electrolysis) --> methanol C3OH/MeOH)	[Bar chart: Short Term]				[Bar chart: Mid-Term]				[Bar chart: Long Term]			
4	7-10%	undefined	Building Materials & Methods												

* McKinsey & Co.- Cement Industr CO2 emission reduction estimates by 2050

Figure 11 - Aperçu des leviers de réduction du CO2, du coût d'investissement et de la période de mise en œuvre.

Il est important de noter que ce tableau contient des approximations effectuées sur la base du nombre restreints d'informations reçues des cimenteries.

Pour les leviers principaux, les précisions suivantes ont été apportées.

3.1. Levier d'efficacité énergétique applicable au Congo

La seule société qui dispose d'une usine moderne avec un système de préchauffage de pré-calcination à 5 étages avec un refroidisseur de clinker moderne et des unités de broyage efficaces en énergie électrique est Dangote. Sans investissement supplémentaire dans des énergies électriques ou thermiques alternatives, par exemple les AFR ou la récupération, par

exemple les systèmes de récupération de la chaleur résiduelle thermique, une augmentation significative de l'efficacité énergétique est peu probable pour cette usine.

FORSPAK, SONOCC et Diamond présentent également des systèmes de fours de précalcination à préchauffage à 5 étages, mais probablement avec des refroidisseurs de clinker de type alternatif à grille plus anciens. Du point de vue de l'énergie électrique, ces trois producteurs utilisent de l'énergie électrique dans des unités de broyage de matières premières et de ciment consistant en une combinaison de broyeurs à boulets à balayage d'air et à décharge finale. L'efficacité est de nature structurelle et résulte directement des technologies de broyage choisies par ces producteurs de ciment. Outre les mesures susmentionnées pour Dangote, les trois autres producteurs devront réaliser d'importants investissements dans des systèmes de broyage économes en énergie, par exemple en les remplaçant ou en les modernisant par des systèmes de pré-broyage. L'ajout de systèmes de pré-broyage, par exemple des rouleaux de broyage à haute pression en circuit fermé (presses à rouleaux), permet à la fois d'augmenter la capacité jusqu'à 50 % et de réduire l'énergie électrique spécifique de 20 %. Toutefois, cela représente un coût d'investissement qui pourrait être compris entre 30 et 50 USD par tonne de capacité supplémentaire.

3.2. Levier de facteur clinker applicable au Congo

Nous notons cependant que des mesures opérationnelles visant à améliorer l'efficacité énergétique, avec un investissement en capital limité ou nul, peuvent entraîner des améliorations de 5 à 10% des STEC et SEEC par rapport aux niveaux actuels, et une réduction correspondante des émissions de CO₂. Ceci s'appliquerait à tous les producteurs du Congo

Sur la base des informations fournies et de celles identifiées à travers les sources publiques, le ratio moyen clinker/ciment pour les différents producteurs au Congo se situe entre 81% et 90%, ce qui est considéré comme élevé (se référer au livrable 2.2). Une diminution potentielle du facteur clinker serait un levier important pour réduire le SEEC ainsi que l'émission spécifique de CO₂ par tonne de ciment produite. Dans le contexte congolais, les types de ciment 32.5 et 42.5 bien connus (généralement avec du gypse et du calcaire comme additifs) reflètent un type de ciment Cem II B conforme aux normes européennes du ciment, avec un ratio clinker/ciment autorisé de 65%. Un clinker de haute qualité, une chaux de haute qualité et des systèmes de broyage du ciment adaptés sont généralement des conditions préalables à l'obtention d'un rapport clinker/ciment aussi faible. Une réduction supplémentaire du ratio clinker/ciment au Congo nécessiterait probablement une modification des normes nationales sur le ciment, par exemple pour tenir compte du Cem II C (expansion alternative des produits Cem III, IV et V).

Un facteur de clinker de 65% pourrait être atteint à moyen terme, ce qui représenterait une diminution des émissions spécifiques de CO₂ d'environ 10%. Dans ce cas, des investissements en capital seront nécessaires pour ajuster les unités de broyage et les stocks de matériaux et, dans le cas du ciment Cem II C, par exemple, des types de ciment LC3, des calcinateurs pour préparer l'argile.

Pour mettre pleinement en œuvre les types de ciment à faible teneur en clinker (et les bétons correspondants), une réduction des émissions de CO₂ spécifiques résultant de l'engagement de la chaîne de valeur des matériaux de construction avec le gouvernement (normes et standards pour le ciment et le béton), les ingénieurs (conception technique et spécifications

des matériaux) et l'industrie de la construction (méthodes et pratiques) serait nécessaire. Les pouvoirs publics peuvent accélérer la transition vers une industrie des matériaux de construction à faibles émissions de CO₂ en ciblant les "achats écologiques" dans le cadre de projets de développement parrainés par l'État, par exemple pour la construction d'infrastructures, d'hôpitaux, de logements sociaux, etc.

3.3. Levier d'utilisation des combustibles alternatifs applicable au Congo

Au Congo, le charbon est le principal combustible thermique utilisé pour la production de clinker (à l'exception de la SONOCC qui semble utiliser du fioul lourd ou HFO, plus coûteux).

La substitution du combustible thermique traditionnel par des combustibles alternatifs (AF) provenant de déchets industriels, municipaux ou agricoles se développe rapidement dans l'industrie du ciment avec des taux de substitution de 100% dans certaines installations, mais globalement on observe environ <20% de substitution du combustible thermique traditionnel. Au Congo, Dangote et FORSPAK ont lancé des programmes initiaux d'AFR, Dangote utilisant de petits flux intermittents de combustibles alternatifs tels que les huiles usagées, les plastiques et les herbes et Forspak utilisant les pneus et les déchets de bois.

Une mise en œuvre systématique de combustibles alternatifs dans l'industrie congolaise du ciment fournirait un levier économique et potentiellement un levier de réduction de CO₂.

En outre, avec un accent particulier sur l'abondance des déchets solides municipaux (MSW) dans les zones urbaines, une collecte systématique, la préparation et le co-traitement dans les fours à ciment (tous les acteurs du Congo) pourraient grandement bénéficier la République du Congo dans leurs stratégies de gestion des déchets municipaux (et industriels) à plus long terme.

Les déchets agricoles, ou biomasse, sont considérés comme neutres en carbone et peuvent représenter une opportunité pour les cimenteries de réduire leurs émissions spécifiques de CO₂. En outre, une telle utilisation des flux de déchets agricoles permettrait de réduire l'incinération ad hoc de ces derniers dans tout le pays.

Un taux de substitution plus élevé permettrait d'atteindre un potentiel de 15 à 20% d'émissions de CO₂. Le CAPEX ne représenterait qu'environ 3 USD/t de ciment.

Les avantages sociaux et économiques pourraient être énormes au Congo. La création d'une chaîne d'approvisionnement en combustible alternatif permettra de créer des emplois et des petites entreprises qui collecteront, trieront, analyseront et transporteront les flux de déchets préparés vers les cimenteries. Les femmes et les jeunes peuvent être mis en valeur dans ce secteur, car ils doivent gérer des personnes et s'impliquer fortement dans les municipalités.

3.4. Levier CCUS applicable au Congo

Le captage du carbone n'est pas considéré comme faisable dans le contexte du Congo à court ou moyen terme (avant 2035 au moins). Les technologies de captage et de stockage du carbone en sont au stade expérimental et de multiples solutions sont à l'étude, parfois à un niveau industriel à petite échelle.) La faisabilité économique des technologies CCUS reste un

défi en l'absence d'un soutien important de la part des gouvernements et/ou d'un mécanisme mondial de prise en charge du coût environnemental et financier des émissions de CO₂.

À l'heure actuelle, nous estimons que les investissements en capital nécessaires pour la mise en œuvre des technologies CCUS vont de 16 USD/t de ciment à 42 USD/t de ciment.

Il est suggéré que le CCUS soit considéré comme la dernière option pour réduire les émissions de CO₂, ce qui signifie que tous les autres leviers doivent être utilisés avant. Le pourcentage de réduction du CO₂ peut atteindre 40 % si l'on considère les technologies CCUS.

Cette option doit également être analysée dans le cadre d'une étude plus large au niveau national et interprofessionnel, avec les possibilités de stockage et d'utilisation dans d'autres secteurs. L'impact social et économique de cette nouvelle technologie n'est pas encore bien défini et devrait être analysé à un stade ultérieur.

3.5. Délai de mise en œuvre des différents leviers

Nous estimons que le délai de mise en œuvre des différents leviers pour le Congo serait comme ce qui suit :

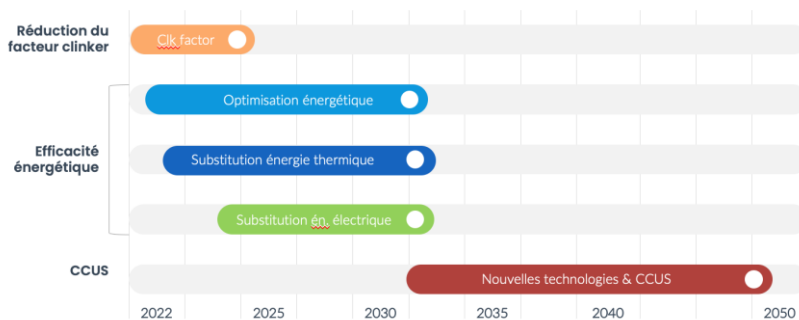


Figure 12: Délai de mise en œuvre pour le Congo

3.6. Les bénéfices potentiels pour les femmes et les jeunes

La proportion des femmes en écoles d'ingénieur n'augmente que légèrement et reste en général bien en dessous de la parité en France et dans le monde.

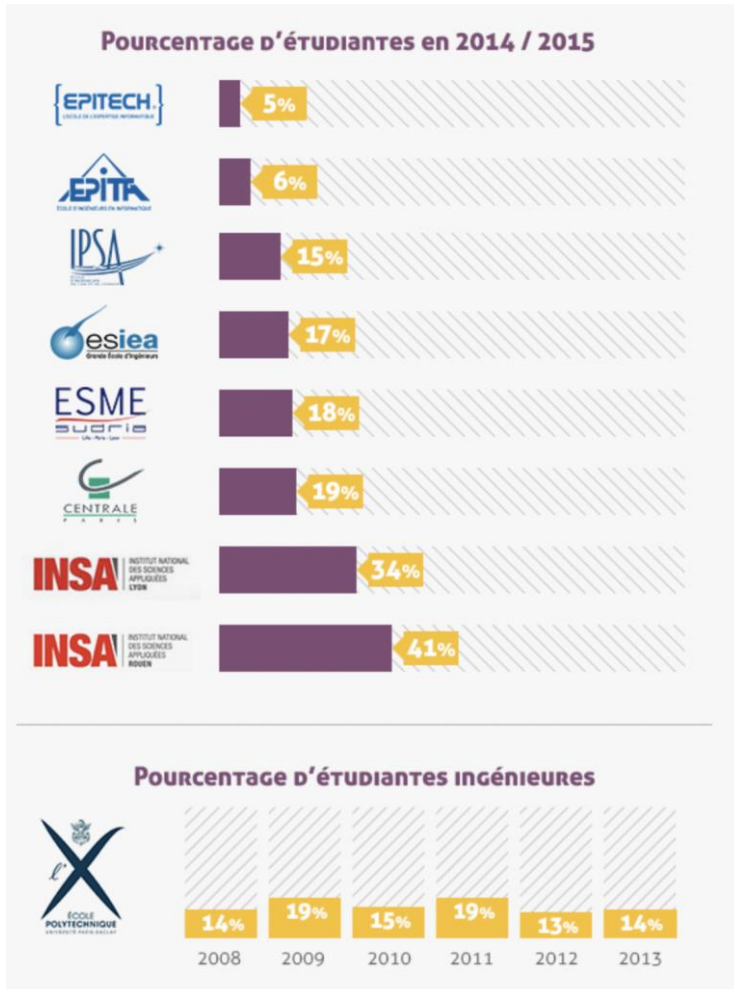


Figure 13: Les étudiantes ingénieures en France (ingenieurs.com, 2014)

Donner aux femmes les moyens de réaliser pleinement leur potentiel dans les carrières d'ingénieur et de dirigeant ; développer l'image des professions de l'ingénierie et de la technologie en tant que force positive pour améliorer la qualité de vie, et démontrer la valeur de la diversité et de l'inclusion doit être un objectif tant auprès du ministère de l'éducation que du ministère de l'industrie.

Attirer les jeunes et les femmes vers l'industrie du ciment peut être une tâche difficile mais « l'environnement » pourrait être le tremplin. En effet, parmi les différents leviers pour réduire les émissions, l'un d'eux pourrait attirer les jeunes et les femmes. Il s'agit de l'utilisation des déchets en cimenterie. Cette filière concerne les déchets municipaux, agricoles et industriels.

Cette filière requiert d'autres compétences que techniques cimentières, comme des compétences commerciales, ou d'analyse de différents déchets en laboratoires ainsi que la coordination avec les autorités et les communes.

De par leur longue expérience sur le terrain à travers le monde les consultants ont constaté une plus grande ouverture d'esprit et de volonté de changement chez les femmes et les jeunes que chez les hommes en matière d'innovation. Souvent les hommes ayant accumulé plusieurs années d'expérience dans l'industrie souhaitent faire perdurer les procédés de production et

les types de produit dont ils ont l'habitude et seront particulièrement réticents à toute innovation, même à caractère environnemental, qui nécessiterait de leur part une remise en cause des méthodes existantes.

Nous suggérons donc que soit organisé au Congo des ateliers de formation à l'intention des femmes et des jeunes désireux de s'impliquer directement ou indirectement dans l'industrie du ciment et de les former aux nouvelles techniques et produits à caractère plus durable.

BIBLIOGRAPHIE

- GCCA. (2021). *The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*. Retrieved from gccassociation.org:
<https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Overview.pdf>
- IEA. (2021, May). *Net Zero by 2050*. Retrieved from IEA.org: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- LC3. (2021). *lc3.ch*. Retrieved from <https://lc3.ch/>
- LC3. (2019). *Financial attractiveness of LC3*. Retrieved from <https://lc3.ch/financial-attractiveness-of-lc3/>
- Cemnet. (2020, June). *Experiences with alternative fuels*. Retrieved from Cemnet.com:
<https://www.cemnet.com/News/story/169021/experiences-with-alternative-fuels.html>
- ghgprotocol. (2006). *CO2 cement protocol*. Retrieved from
https://ghgprotocol.org/sites/default/files/co2_CSI_Cement_Protocol_V2.0_0.xls
- VDZ. (2020, Nov.). *VDZ*. Retrieved from Decarbonising Cement and Concrete: A CO2 Roadmap for the German cement industry: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/Executive_Summary_VDZ_Study_Decarbonising_Cement_and_Concrete_2020.pdf
- Geocycle. (2021). *Geocycle.com*. Retrieved from FAQ: <https://www.geocycle.com/faq>
- ECRA. (2021, March). *Extensive GHG emission avoidance through carbon capture technologies*. Retrieved from ecra-online.org: <https://ecra-online.org/newsletters/extensive-ghg-emission-avoidance-through-carbon-capture-technologies/>
- Plaza, M., Martínez, S., & Rubiera, F. (2020). *Energies*. Retrieved from CO2 Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations.:
<https://doi.org/10.3390/en13215692>
- GreenFacts. (2021). *CO2 capture and Storage*. Retrieved from GreenFacts:
<https://www.greenfacts.org/en/co2-capture-storage/l-3/5-geological-storage-co2.htm#1p1>
- World Economic Forum. (2019, Sept). *www.weforum.org*. Retrieved from
<https://www.weforum.org/agenda/2019/09/cement-production-country-world-third-largest-emitter/>
- Cembureau. (2019). *www.Cembureau.eu*. Retrieved from key fact figures:
<https://cembureau.eu/about-our-industry/key-facts-figures/>

Eurostat. (2021). *www.ec.europa.eu*. Retrieved from Gas prices by type of user:
<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00118/default/table?lang=en>

Ravikumar, D., Zhang, D., Keoleian, G. et al. . (2021, Feb.). *Nat Commun*. Retrieved from
Carbon dioxide utilization in concrete curing or mixing might not produce a net climate
benefit.: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21148-w>