

LIVRE BLANC 03 · CAMEROON STEEL

LA SIDÉRURGIE ÉLECTRIQUE EST LA BONNE FILIÈRE POUR L'AFRIQUE CENTRALE

Choisir la filière : pourquoi un four à arc électrique, alimenté d'abord en ferraille et en DRI/HBI importés, puis en fer de réduction directe issu de minerai camerounais concentré, équilibre mieux qu'un haut fourneau le capital, la flexibilité, les émissions et la rapidité.

FICHE DE CONTRÔLE

Référence	CS-WP-03
Édition	10 octobre 2026
Statut	Première édition
Diffusion	Public
Établi par	Cameroon Steel
Série	Livres blancs publics de Cameroon Steel, 03 sur 10
Champ	Filières d'élaboration de la fonte, du fer et de l'acier, charges métalliques, réduction directe et qualité du minerai, aciérie à four à arc électrique, laminage des produits longs, qualité des produits, automatisation, trajectoire par phases et risques technologiques
Date d'arrêt des données	10 octobre 2026
Sources	L'annexe C recense toutes les sources citées avec un renvoi [S-id]
Données	L'annexe D présente les valeurs de chaque graphique ; des fichiers lisibles par machine accompagnent l'édition web
Chiffres du projet	Valeurs prévues, cibles ou indicatives de la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), édition du 10 octobre 2026 ; aucun montant d'investissement n'est donné
Langues	Anglais (texte intégral), français (texte intégral), chinois (synthèse) ; en cas de divergence, l'édition anglaise fait foi
Déclaration d'intérêts	Ce livre blanc est publié par Cameroon Steel, qui développe une usine sidérurgique à Kribi. Il a pour objet d'éclairer le débat public ; son analyse est indépendante de toute offre commerciale, et chaque chiffre est sourcé ou assorti de son statut.

Comment lire ce livre blanc. Chaque chiffre est assorti d'une unité, d'une année et d'un renvoi à une source, par exemple [S03]. Les figures portent une pastille de statut : sourcé (lu dans une source publiée), dérivé (notre calcul sur des données sourcées, présenté à l'annexe A), hypothèse (une hypothèse de planification explicite) ou illustratif (un schéma ou un scénario, et non une prévision). Les images générées portent la mention « Vue d'illustration » et ne sont pas des photographies d'un quelconque projet.

Ce que ce livre blanc n'est pas. Ce n'est ni une étude de faisabilité, ni une base de conception, ni une offre, ni un engagement. Les valeurs du projet sont des chiffres de planification qui évolueront avec l'avancement de l'ingénierie, des autorisations et du financement.

SOMMAIRE

SYNTHÈSE : COMMENCER PAR LE FOUR QUI ACCEPTE TOUT FER 8

ES.1 Le constat en bref	8
ES.2 Dix constats	9
ES.3 La trajectoire par phases appliquée à Kribi	11
ES.4 Pourquoi les autres options ne conviennent pas	11
ES.5 Critères de décision	12
ES.6 Ce qui reste incertain	12
ES.7 Ce que la trajectoire attend des partenaires publics	12
ES.8 Organisation du livre blanc	13

CHAPITRE 1 - COMMENT L'ACIER EST PRODUIT : DEUX FAÇONS DE FAIRE LE FER, DEUX FAÇONS DE FAIRE L'ACIER 14

1.1 L'acier est du fer affiné : la chimie est simple, l'échelle ne l'est pas	14
1.2 Élaborer le fer, c'est retirer l'oxygène du minerai	15
1.3 L'aciérie brûle le carbone ou fond du fer solide	17
1.4 La métallurgie secondaire fixe la composition finale dans la poche	18
1.5 La coulée continue transforme l'acier liquide en billettes	18
1.6 Le laminage donne sa forme à l'acier et fixe une grande part de sa résistance	18
1.7 L'énergie intervient à chaque étape, sous des formes différentes	18
1.8 Les unités de fer sont la monnaie d'une aciérie électrique	19
1.9 Ce que ces notions impliquent pour l'Afrique centrale	20

CHAPITRE 2 - LES FILIÈRES COMPARÉES : LES FILIÈRES ÉLECTRIQUES L'EMPORTENT SUR LE CARBONE, L'ÉCHELLE ET LA RAPIDITÉ 21

2.1 Cinq filières, dont trois fonctionnent à l'échelle commerciale dans le monde	21
2.2 Énergie et CO2 : l'acier du FAE à ferraille émet environ 30 % du CO2 du haut fourneau	22
2.3 Le capital par tonne est du même ordre ; ce qui diffère, c'est l'échelle à laquelle il est engagé	24
2.4 La filière du haut fourneau convient à de très grandes usines adossées au charbon	25
2.5 La filière DRI-FAE au gaz est la filière à partir de minerai qui convient à l'Afrique centrale	25
2.6 Le FAE à ferraille est le démarrage le plus rapide, mais la ferraille seule ne peut alimenter 1 Mt/an	26

2.7 Les fours à induction et la réduction-fusion n'atteignent pas le niveau requis pour l'acier de construction à grande échelle	26
2.8 L'expérience africaine va dans le même sens	26
2.9 La comparaison en un tableau	27
2.10 Pourquoi la filière électrique par phases équilibre les quatre critères	28

CHAPITRE 3 · CHARGES MÉTALLIQUES : LE CAMEROUN MANQUE D'UNITÉS DE FER, NON DE CAPACITÉ DE LAMINAGE

3.1 Les billettes montrent où se situe le déficit	29
3.2 La ferraille nationale ne représente qu'une fraction des besoins d'une aciérie	30
3.3 La ferraille, le DRI, le HBI et la fonte brute importés comblent l'écart	31
3.4 Comment les unités de fer modifient les performances de l'aciérie	32
3.5 La qualité et la préparation de la ferraille déterminent le rendement	33
3.6 Recevoir les unités de fer par Kribi	33
3.7 Une stratégie des charges métalliques, et non un fournisseur unique	34
3.8 Ce que le bilan des charges métalliques implique pour la trajectoire	34

CHAPITRE 4 · RÉDUCTION DIRECTE ET QUALITÉ DU MINÉRAI : LE FER CAMEROUNAIS EXIGE D'ABORD UNE USINE DE CONCENTRATION ET UNE USINE DE BOULETAGE

4.1 Un four à cuve retire l'oxygène de boulettes solides	35
4.2 La charge de qualité réduction directe est rare, et se raréfie	37
4.3 Ce que disent les données publiées sur le minerai camerounais	37
4.4 Du minerai à la boulette : trois usines avant l'aciérie	39
4.5 Le gaz est la deuxième condition préalable	40
4.6 Les fours à cuve compatibles hydrogène gardent ouverte l'option de la décarbonation	41
4.7 Ce qu'enseignent les usines de réduction directe existantes en Afrique	42
4.8 Dimensionner le module de réduction directe	42
4.9 Ce qui doit être acquis avant que Kribi produise son propre fer	42

CHAPITRE 5 · L'ACIÉRIE ÉLECTRIQUE : UN SEUL FOUR DE LA CLASSE 40 T PEUT PORTER L'ESSENTIEL DE LA PHASE 1 SI LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE EST CONÇU AVEC LUI

5.1 Une aciérie est un système électrique et une ligne de matière	45
5.2 Dimensionner le four à partir du tonnage	46
5.3 L'énergie et les consommables dépendent de la charge	48

5.4 Le four-poche et la coulée continue rythment l'aciérie	49
5.5 Qualité de l'électricité : papillotement, harmoniques et puissance réactive	50
5.6 Le contrat d'électricité détermine la manière dont le four fonctionne	51
5.7 La sécurité et l'environnement se conçoivent dès l'origine, ils ne s'ajoutent pas	51
5.8 Ce que la conception de l'aciérie implique pour les décideurs	52

CHAPITRE 6 · LAMINAGE DES PRODUITS LONGS : BILLETES CHAUDES ET CHAUFFAGE PAR INDUCTION FONT DE LA PHASE 1 UNE LIGNE ENTièrement ÉLECTRIQUE

53

6.1 Le laminage transforme les billettes en produits spécifiés par les clients	53
6.2 Chaque phase ajoute un laminoir pour des produits que la région importe encore	55
6.3 Le chauffage est la principale décision énergétique du laminoir	55
6.4 Le rendement et la qualité se font au laminoir autant qu'à l'aciérie	57
6.5 Le fil machine alimente une filière aval	57
6.6 L'eau, la calamine et les utilités du laminoir	58
6.7 La mise en service et la montée en cadence prennent des mois, non des semaines	58
6.8 La flexibilité du laminoir garde le marché ouvert	58

CHAPITRE 7 · LA QUALITÉ DES PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION TROPICALE : UN ROND À BÉTON DUCTILE ET CERTIFIÉ COMPTE D'AVANTAGE QUE LA SEULE RÉSISTANCE

59

7.1 Une norme obligatoire encadre le marché camerounais du rond à béton	59
7.2 La résistance est nécessaire ; la ductilité est décisive	60
7.3 Comment l'aciérie et le laminoir garantissent les propriétés	61
7.4 Le laboratoire de l'usine et le régime d'essais	62
7.5 Les pratiques de chantier protègent le produit	63
7.6 Le fil machine et les profilés ont leurs propres déterminants de qualité	63
7.7 Corrosion : le climat de Kribi fixe la stratégie de protection	63
7.8 L'usine elle-même vit dans le même climat	65
7.9 Ce que la qualité implique pour le choix de la filière	65

CHAPITRE 8 · NUMÉRISATION ET AUTOMATISATION : LES SYSTÈMES DE CONDUITE FONT PARTIE DU PROCÉDÉ, ILS NE S'Y AJOUTENT PAS

66

8.1 Cinq niveaux de conduite, chacun avec sa propre horloge	66
8.2 Niveaux 1 et 2 à l'aciérie : des modèles qui économisent des minutes et des kilowattheures	67

8.3 Le niveau 2 au laminoir : programmes de passes, conduite de la trempe et mesure	68
8.4 Le management de l'énergie transforme le comptage en économies	68
8.5 Traçabilité : chaque botte remonte à sa coulée	68
8.6 La comptabilité carbone dès la première coulée	70
8.7 La simulation avant la construction, et pour la formation	70
8.8 Échelonner l'investissement numérique	70
8.9 Fiabilité : une maintenance guidée par les données	70
8.10 Cybersécurité et architecture	71
8.11 Ce sont les personnes qui font fonctionner les systèmes	71
8.12 Des enregistrements qui survivent aux premiers propriétaires de l'usine	71
8.13 Ce que la numérisation implique pour la décision	71

CHAPITRE 9 · LA TRAJECTOIRE PAR PHASES APPLIQUÉE : COMMENT RC-1 ATTEINT 1 MT/AN EN QUATRE ÉTAPES 72

9.1 Le projet tel qu'il ressort des sources publiques	72
9.2 Quatre étapes, une même logique d'aciérie	73
9.3 Le calendrier : une première coulée en 2030, le DRI national comme option après 2034	73
9.4 Les utilités par phase : la phase 1 est entièrement électrique et tient dans les 100 premiers MW de la zone	74
9.5 La logistique, les emplois et le foncier suivent le même échelonnement	76
9.6 Comment RC-1 se comporte au regard des quatre critères	77
9.7 Les interfaces avec les infrastructures de la zone	77
9.8 Les compétences et les emplois suivent la technologie	78
9.9 Ce qui est arrêté et ce qui reste ouvert	78
9.10 Où va le tonnage de la phase 1 : billettes, produits laminés et exportations	78

CHAPITRE 10 · RISQUES TECHNOLOGIQUES ET CRITÈRES DE DÉCISION : LEVER LES GRANDS RISQUES AVANT CHAQUE ENGAGEMENT 80

10.1 Le risque technologique se concentre sur quelques interfaces	80
10.2 Quatre jalons, chacun franchi sur preuves plutôt qu'à date fixe	82
10.3 Les autres options comportent des risques plus grands	83
10.4 Qui porte quel risque	84
10.5 Les indicateurs à suivre après le démarrage	84
10.6 Une liste de contrôle pour les décideurs	84

10.7 Ce que les critères de décision impliquent pour le choix de la filière	85
10.8 Ce qui changerait la conclusion	86
CHAPITRE 11 - LACUNES DE CONNAISSANCE : CE QUE L'ON NE SAIT PAS ENCORE, ET COMMENT ON L'ÉTABLIRA	87
11.1 Lacunes relatives au réseau et à l'électricité	87
11.2 Lacunes relatives aux unités de fer	87
11.3 Lacunes relatives au minerai et à l'élaboration du fer	88
11.4 Lacunes relatives au site, au climat et aux produits	88
11.5 Lacunes relatives aux coûts des technologies	88
11.6 Comment les lacunes seront comblées et rendues publiques	89
ANNEXE A - MÉTHODE, HYPOTHÈSES ET CALCULS	90
A.1 Démarche et conventions	90
A.2 Hypothèses de planification de RC-1	91
A.3 Calculs	92
A.4 Limites de l'analyse	94
ANNEXE B - GLOSSAIRE	95
ANNEXE C - SOURCES	98
ANNEXE D - TABLEAUX DE DONNÉES	104
D.1 Synthèse et chapitres 1 à 3 : filières, énergie et capital	104
D.2 Chapitres 3 et 4 : charges métalliques, minerai et gaz	106
D.3 Chapitres 5 à 7 : aciérie, laminage et qualité des produits	107
D.4 Chapitre 9 : la trajectoire par phases	109

SYNTHÈSE : COMMENCER PAR LE FOUR QUI ACCEPTE TOUT FER

Pour un nouveau producteur d'acier en Afrique centrale, un four à arc électrique alimenté d'abord en ferraille et en fer de réduction directe (DRI) ou en fer briqueté à chaud (HBI) importés, puis en DRI produit à partir de minerai camerounais concentré, offre le meilleur équilibre entre intensité capitalistique, flexibilité, émissions et rapidité. Il émet une fraction du CO₂ du haut fourneau, peut être construit par tranches de quelques centaines de milliers de tonnes, commence à produire sans attendre une mine, une usine de bouletage et un contrat de gaz, et garde ouverte la voie du fer camerounais. Les filières à haut fourneau conviennent à de très grandes usines intégrées adossées au charbon à coke, dont le Cameroun ne dispose pas. Ce livre blanc expose les choix technologiques qui fondent cette conclusion et les applique au complexe que Cameroon Steel prévoit à Mboro, dans la Zone industrialo-portuaire de Kribi.

37 à 71 %

CO₂ en moins par tonne sur les filières électriques par rapport au haut fourneau (worldsteel, données 2024)

1,2 Mt/an

Unités de fer nécessaires à une aciérie de 1 Mt/an, environ dix fois la ferraille collectée au Cameroun (dérivé)

62,2 / 68 % Fe

Minerai à expédition directe de Mbalam face à son concentré d'essai de qualité réduction directe

55 MVA

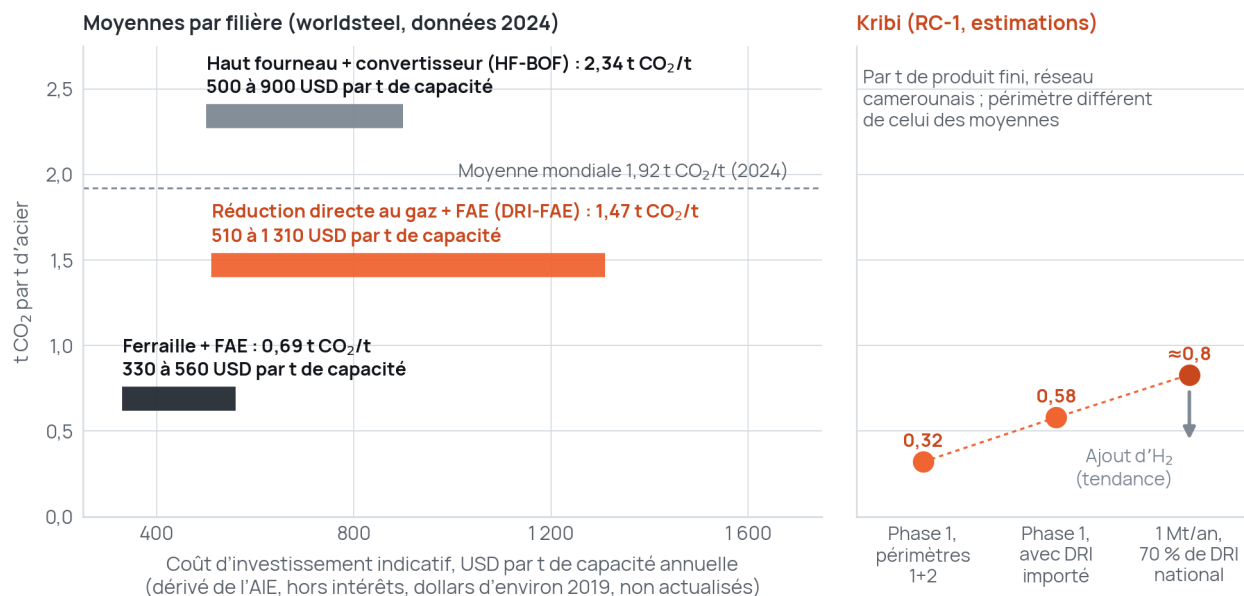
Appel maximal de la phase 1 (hypothèse), dans la limite de la première étape de 100 MW de la ligne de la zone

Le constat en bref

Les filières sidérurgiques se distinguent avant tout par l'origine de leur fer. Le haut fourneau produit de la fonte à partir de minerai et de coke, à l'échelle de plusieurs millions de tonnes par an ; le four à cuve de réduction directe au gaz produit du fer solide à partir de boulettes à haute teneur, avec du gaz naturel ou de l'hydrogène, en modules de 0,25 à 2,5 Mt par an [S04] ; le four à arc électrique fond toutes les unités de fer qu'on lui fournit, ferraille, DRI, HBI ou fonte brute. Une aciérie électrique peut donc démarrer avec des unités de fer achetées et ajouter plus tard une production nationale de fer, sans changer le four, la coulée continue ni les laminoirs. La filière du haut fourneau n'offre aucun séquençement de ce type.

Les filières électriques réduisent le CO₂ par tonne de 37 à 71 % par rapport au haut fourneau

Coûts d'investissement : repères en dollars de 2019 ; la fourchette du haut fourneau ne vaut qu'à plusieurs Mt/an, avec du charbon à coke



DÉRIVÉ Figure ES.1. Intensité en CO₂ et coût d'investissement indicatif par tonne de capacité des trois principales filières (dollars de 2019), avec les intensités estimées de la trajectoire par phases proposée dans ce livre blanc.

Source : worldsteel, Sustainability Indicators 2025, données 2024 [S01] ; fourchettes de coût d'investissement calculées à partir des coûts annualisés de l'AIE, en USD d'environ 2019, non actualisés [S02] ; intensités de la trajectoire tirées de la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), par tonne de produit fini, un périmètre différent de celui des moyennes par filière [S03] ; méthode à l'annexe A.

Dix constats

- 01 Choisir la filière, c'est choisir ses unités de fer.** Le laminage, la coulée et l'affinage sont communs à toutes les filières ; ce qui diffère, c'est la manière d'obtenir le fer. Le déficit du Cameroun porte sur le fer, non sur le laminage : les billettes sont devenues la première importation d'acier du pays, avec 161 400 t en 2023, trois fois le niveau de 2019 [S05], alors que la capacité nationale de laminage dépasse la demande [S06].
- 02 Les filières électriques réduisent le CO₂ par tonne de 37 à 71 %.** Les moyennes 2024 de worldsteel s'établissent à 2,34 t de CO₂ par tonne d'acier brut pour le haut fourneau associé au convertisseur à oxygène, 1,47 t pour la filière DRI-FAE et 0,69 t pour le FAE à ferraille [S01]. Sur le réseau camerounais, dominé par l'hydroélectricité, à environ 226 g CO₂/kWh en 2024 [S07], l'avantage des filières électriques est plus grand encore.
- 03 Ce n'est pas le capital par tonne qui sépare les filières, mais la taille de la tranche indivisible.** Selon des repères dérivés de l'AIE en dollars de 2019, le coût d'investissement indicatif est d'environ 500 à 900 USD par tonne de capacité pour une nouvelle usine à haut fourneau, de 510 à 1 310 USD pour la filière DRI-FAE au gaz et de 330 à 560 USD pour le FAE à ferraille [S02] ; les budgets annoncés de 2020 à 2026, qui incluent laminoirs et aménagements, sont plus élevés, d'environ 660 à 1 560 USD par tonne (chapitre 2). Mais un haut fourneau n'est rentable qu'à plusieurs millions de tonnes par an, alors que des aciéries et des laminoirs d'environ 0,3 Mt par an sont commandés aujourd'hui en Afrique [S08, S09].
- 04 Les fours à induction et la réduction-fusion ne conviennent pas.** Les fours à induction affinent mal ; la plupart des aciers indiens élaborés au four à induction à partir de DRI dépassaient les limites de phosphore des normes nationales et ASTM [S10]. La réduction-fusion alimente toujours un convertisseur à oxygène, dépend du charbon et n'est exploitée commercialement que sur quelques sites [S11, S12].

-
- 05 Une aciérie de 1 Mt/an a besoin d'environ 1,2 Mt d'unités de fer par an.** RC-1, la configuration de référence de Cameroon Steel, implique environ 363 000 t en phase 1 et 1,21 Mt à plein développement (dérivé) [S03]. Le Cameroun collecte de l'ordre de 0,1 Mt de ferraille par an (dérivé), déjà utilisée par les usines existantes ; la seule étude nationale estimait le gisement de ferraille entre 53 000 et 61 833 t par an [S13]. RC-1 suppose donc que l'usine ne pourra acheter qu'environ 30 000 t de ferraille nationale par an (fourchette de 0 à 60 000 t) [S03].
-
- 06 La phase 1 doit fonctionner avec de la ferraille et du DRI ou du HBI importés.** RC-1 retient environ 30 % de DRI ou de HBI dans la charge de la phase 1, dans une fourchette de 20 à 50 % [S03]. Le HBI est la forme commerciale la plus pratique, car il se transporte avec une simple ventilation de surface, alors que le DRI froid doit voyager sous gaz inerte [S14, S15]. Deux fournisseurs par unité de fer et un stockage couvert constituent le minimum.
-
- 07 Le minerai camerounais exige une usine de concentration et une usine de bouletage avant de pouvoir alimenter un four à cuve.** La réduction directe exige un minerai titrant au moins 64 % de fer [S16], et la qualité réduction directe négociée titre généralement 67 à 68 % [S17]. La réserve JORC de Mbalam titre 62,2 % de fer avec 7,3 % de silice et d'alumine [S18] ; des essais sur l'itabirite de Mbalam ont produit un concentré de qualité réduction directe à 68 % de fer [S19]. Ce produit n'existe qu'à l'échelle des essais.
-
- 08 Le gaz et l'hydrogène fixent le rythme de la production nationale de fer.** Un module DRI de 1 Mt/an consommerait environ 9 milliards de pieds cubes (bcf) de gaz par an, soit environ 12 % de la production camerounaise de 2025 (dérivé) [S20, S21]. Les fours à cuve compatibles hydrogène peuvent fonctionner avec n'importe quel mélange de gaz et d'hydrogène sans modification fondamentale du four [S22], mais un fonctionnement intégral à l'hydrogène pour 1 Mt de DRI exigerait environ 2,7 TWh d'électricité par an (dérivé) : le mélange doit donc suivre l'arrivée de nouvelles capacités électriques bas carbone.
-
- 09 Un seul four de la classe 40 t peut porter l'essentiel de la phase 1 ; la totalité des 0,3 Mt/an exige une forte disponibilité ou un transformateur plus puissant.** À la valeur de planification RC-1 de 450 kWh par tonne d'acier liquide, une coulée d'environ 40 t demande environ 55 minutes de coulée à coulée ; à environ 490 kWh/t, valeur haute de planification avec 30 % de DRI ou de HBI dans la charge, environ 59 minutes. La capacité nominale, soit environ 8 000 coulées par an, occupe alors environ 7 300 à 7 900 des 8 760 heures de l'année ; avec 7 000 à 7 700 heures de marche, hypothèse réaliste, la phase 1 livre environ 270 000 à 300 000 t de produits finis (dérivé) [S03]. Le four offre une charge programmable, qui décale ses fusions hors des pointes du réseau, et non une charge interruptible. Les fours à arc provoquent du papillotement (flicker) ; d'autres aciéries de ronds à béton ont dû installer a posteriori des compensateurs STATCOM sous la pression des régulateurs [S23, S24]. L'appel maximal de la phase 1, environ 55 MVA (hypothèse), tient dans la première étape de 100 MW de la ligne 225 kV de la zone [S03, S25].
-
- 10 La qualité et les données font partie du produit.** La norme camerounaise des ronds à béton, NC 236, est obligatoire et appliquée [S26, S27]. Un FAE associé à un four-poche et à un laminoir équipé d'une trempe et autorevenu en ligne produit des barres ductiles et soudables conformes à NC 236, BS 4449 et ASTM A615 [S28, S29, S30]. La traçabilité de la coulée à la botte, le management de l'énergie (environ 4 % d'économies dès la première année dans les usines certifiées ISO 50001 [S31]) et la mesure du CO₂ par produit complètent la conception.
-

La trajectoire par phases appliquée à Kribi

La configuration de référence de Cameroon Steel, RC-1, applique la trajectoire en quatre étapes [S03] :

- **Phase 1 (prévue)** : un four à arc électrique de la classe 40 t avec un four-poche, une coulée continue de billettes, un chauffage des billettes par induction et un laminoir à barres et fil machine ; capacité nominale de 0,3 Mt/an, pour une production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t par an de billettes, de ronds à béton (8 à 32 mm) et de fil machine (5,5 à 12 mm). Les travaux doivent démarrer en 2029, après le certificat environnemental, avec une première coulée au second semestre 2030 et une montée en cadence en 2031.
- **Phase 2 (indicative)** : une deuxième ligne de fusion et un laminoir à profilés légers et moyens pour environ 0,2 Mt/an de cornières, de profilés en U et de plats, à titre indicatif de 2032 à 2034.
- **Phase 3 (indicative)** : l'extension de l'aciérie et un laminoir à profilés lourds pour les poutrelles H, après 2034, portant l'usine à sa capacité de conception d'environ 1 Mt/an, sous réserve des marchés et du financement.
- **Réserve (indicative)** : un module de réduction directe (DR) compatible hydrogène d'environ 1 Mt de DRI par an pour le minerai camerounais, plus tard, sous réserve de la qualité du minerai, de l'approvisionnement en gaz et des autorisations.

L'aciérie de la phase 1 produit des billettes, et sa production peut aller soit aux produits laminés (fil machine et ronds à béton), soit à des billettes marchandes vendues aux relamineurs existants, dont la ferraille locale ne couvre qu'environ 40 % des besoins et qui ont importé 161 400 t de billettes en 2023 [S05, S32, S33]. Le déficit ne se situe pas dans le rond à béton : la capacité nationale, d'environ 627 000 t par an (lecture d'une source qui imprime 627 tonnes ; livre blanc 04, chapitre 5), dépasse de plus de trois fois une demande d'environ 180 000 t [S06]. Le tonnage de la phase 1 vise donc à remplacer les billettes et le fil machine importés et à exporter dans la CEMAC, et non à ajouter du rond à béton à un marché saturé. Le livre blanc 04 présente les données de marché et un coût indicatif d'une billette produite à Kribi face à une billette importée rendue.

La phase 1 est entièrement électrique : le chauffage par induction supprime le besoin de gaz jusqu'au laminoir à profilés de la phase 2 [S03]. Ses émissions des périmètres 1 et 2 sont estimées à environ 0,32 t de CO₂ par tonne de produit fini (0,33 t à la valeur haute d'électricité), et à environ 0,58 t en incluant les émissions amont du DRI importé (dérivé) [S03]. Le plein développement exige l'étape ultérieure de la ligne de la zone, de 330 à 400 MW [S25, S34]. Ce livre blanc ne donne aucun montant d'investissement ; ceux-ci seront établis par l'ingénierie et le financement.

COMMENCER PAR LE FOUR QUI ACCEPTE TOUT FER ; AJOUTER L'USINE QUI PRODUIT LE FER CAMEROUNAIS LORSQUE LE MINERAI, LE GAZ ET L'ÉLECTRICITÉ SERONT PRÊTS.

Cameroon Steel, trajectoire technologique

Pourquoi les autres options ne conviennent pas

Chaque option alternative échoue à l'un au moins des quatre critères : capital, flexibilité, émissions et rapidité. Une usine à haut fourneau devrait produire plusieurs millions de tonnes par an pour être efficace, importer du charbon à coke et supporter l'intensité carbone la plus élevée de toutes les filières ; elle engagerait tout son capital avant de produire une seule tonne. Un relamineur sans aciérie serait rapide et peu coûteux, mais il ajouterait des capacités de laminage qui dépassent déjà la demande [S06] et laisserait l'usine dépendante des billettes importées, c'est-à-dire de l'importation même qu'il importe le plus de remplacer [S05]. Les fours à induction ne peuvent satisfaire de manière fiable les exigences de phosphore et de ductilité des normes modernes de ronds à béton sans affinage complémentaire [S10], sur un marché dont les régulateurs font res-

pecter la qualité [S26, S27]. Une usine de réduction directe construite en premier lierait le démarrage de la production à une usine de concentration, à une usine de bouletage et à un contrat de gaz qui n'existent pas encore. Seule la filière électrique par phases démarre en quelques années, dépense le capital par tranches, respecte les normes de qualité avec des équipements éprouvés et garde ouverte la voie du fer camerounais.

Critères de décision

Les principaux risques technologiques de la trajectoire se situent à ses interfaces avec le réseau électrique, les marchés des unités de fer, la mine et l'approvisionnement en gaz. Chacun peut être réduit avant l'engagement des fonds correspondants. Le chapitre 10 propose quatre jalons, chacun franchi sur la foi de preuves plutôt qu'à une date fixée :

1. **Investissement de la phase 1** : un raccordement ferme en 225 kV assorti d'une étude de papillotement acceptée ; deux sources pour chaque unité de fer ; un parcours de certification pour NC 236 et les nuances internationales ; des garanties de performance portant sur l'électricité par tonne et la disponibilité du four ; une étude d'impact approuvée et publiée dans le délai que les prêteurs exigent avant l'approbation par leur conseil.
2. **Phase 2** : douze mois de phase 1 au rendement, à la consommation d'énergie et à la production nominaux ; une demande de profilés confirmée ; une marge de puissance électrique.
3. **Phase 3** : l'étape ultérieure de la ligne de la zone contractée ; un marché des profilés lourds démontré ; un plan d'unités de fer pour 1,2 Mt par an.
4. **DRI national** : un concentré de qualité réduction directe titrant au moins 67 % de fer démontré à l'échelle pilote ; un approvisionnement en boulettes ; des réserves de gaz auditées et un contrat de long terme ; une conception compatible hydrogène avec mesure du CO₂.

Ce qui reste incertain

Le livre blanc dit explicitement ce que l'on ne sait pas encore (chapitre 11). Les questions ouvertes les plus importantes sont la puissance de court-circuit du réseau au point de raccordement de l'usine ; les réserves restantes du gisement de gaz en production au Cameroun ; la question de savoir si, quand et où seront construites une usine de concentration de qualité réduction directe et une usine de bouletage ; la corrosivité atmosphérique mesurée à Kribi ; et les prix auxquels le HBI et la ferraille importés pourront être contractés sur la durée de la phase 1. Aucune de ces incertitudes ne plaide pour une autre filière ; chacune plaide pour l'approche par phases et par jalons.

Ce que la trajectoire attend des partenaires publics

La trajectoire par phases dépend de décisions qui n'appartiennent pas à Cameroon Steel seul. Six d'entre elles déterminent son calendrier et sa valeur pour le pays.

- **Un raccordement ferme au réseau, avec des règles claires de qualité de l'électricité.** La ligne 225 kV et le poste de la zone [S25] doivent être mis en service, et la convention de raccordement de l'usine doit fixer les limites de papillotement et d'harmoniques que son compensateur est conçu pour respecter.
- **Un cadre pour le gaz industriel.** Avant tout module de réduction directe, l'État, la société pétrolière nationale et les producteurs devront préciser comment le gaz est alloué, tarifé et fiscalisé pour les utilisateurs industriels sur des durées de vingt ans ou plus [S21, S35].

- **Un pont entre la mine et l'aciérie.** La clause de transformation locale de 15 % de la convention de Cameroon Mining Company [S36] ne prend de valeur pour la sidérurgie que si un concentré de qualité réduction directe est démontré et bouleté. Un programme pilote commun est la première étape logique.
- **Une capacité portuaire pour les unités de fer en vrac.** La phase 1 importera par Kribi environ 351 000 t par an d'unités de fer et de consommables (dérivé) [S03]. Le terminal minéralier, objet d'un protocole d'accord signé le 4 novembre 2025 et dont le directeur général du port prévoyait en mars 2026 l'achèvement d'ici cinq à six ans [S37, S38], compte autant pour une aciérie que pour une mine ; la phase 1 utilisera les terminaux existants.
- **Une application constante des normes de produits.** La norme obligatoire des ronds à béton et son application [S26, S27] protègent les producteurs qui investissent dans la qualité, ainsi que le public qui occupe les bâtiments.
- **Les compétences.** Les écoles d'ingénieurs du Cameroun n'ont pas de département de métallurgie [S39] ; un programme sidérurgique associant les écoles et les fournisseurs de technologie sera nécessaire dès la phase 1.

Aucune de ces décisions n'est un préalable à chaque étape. Ensemble, elles déterminent la vitesse à laquelle la trajectoire passe du fer acheté au fer camerounais.

Organisation du livre blanc

Le chapitre 1 explique comment l'acier est produit, à l'intention des lecteurs extérieurs au secteur. Le chapitre 2 compare les cinq filières. Le chapitre 3 examine les unités de fer et le déficit de ferraille du Cameroun. Le chapitre 4 traite de la réduction directe et de la qualité du minerai. Les chapitres 5 et 6 décrivent l'aciérie et les laminoirs. Le chapitre 7 aborde la qualité des produits pour la construction en climat tropical, et le chapitre 8 l'automatisation et les données. Le chapitre 9 applique la trajectoire à RC-1, et le chapitre 10 expose les risques et les critères de décision. Le chapitre 11 recense les lacunes de connaissance. Les annexes présentent la méthode et les hypothèses, un glossaire, la liste complète des sources et les données de chaque graphique.

Déclaration d'intérêts. Ce livre blanc est publié par Cameroon Steel, qui développe une usine sidérurgique à Kribi. Il a pour objet d'éclairer le débat public ; son analyse est indépendante de toute offre commerciale, et chaque chiffre est sourcé ou assorti de son statut.

CHAPITRE 1

COMMENT L'ACIER EST PRODUIT : DEUX FAÇONS DE FAIRE LE FER, DEUX FAÇONS DE FAIRE L'ACIER

Toute aciérie répond d'abord à une question : d'où viennent ses unités de fer ? Le fer peut être extrait du minerai dans un haut fourneau ou dans une usine de réduction directe, ou bien récupéré à partir de ferraille. L'acier est ensuite élaboré soit en insufflant de l'oxygène dans du fer liquide, soit en fondant du fer solide dans un four électrique. Tout ce qui suit, de la poche au laminoir, est pour l'essentiel commun à toutes les filières. Ce chapitre explique chaque étape en termes simples, afin que les lecteurs qui ne travaillent pas dans le secteur puissent suivre la comparaison des filières du chapitre 2 et les choix présentés dans la suite de ce livre blanc.

1.1 L'acier est du fer affiné : la chimie est simple, l'échelle ne l'est pas

L'acier est du fer affiné jusqu'à une teneur en carbone faible et maîtrisée, et allié en quantités réduites et précises pour être résistant, tenace et soudable. La matière première du fer neuf est le minerai de fer, une roche dans laquelle le fer est chimiquement lié à l'oxygène. Produire de l'acier à partir de minerai suppose donc toujours deux opérations : retirer l'oxygène du minerai (la réduction, ou élaboration du fer), puis ajuster la teneur en carbone et en impuretés du fer et le couler sous une forme qui puisse être laminée (l'élaboration de l'acier et la coulée). La ferraille d'acier recyclée saute la première opération, car son fer est déjà métallique.

Le secteur est vaste et ses filières sont bien établies. Le monde a produit 1 849,4 millions de tonnes (Mt) d'acier brut en 2025, 2,0 % de moins qu'en 2024 [S40]. Environ 69,4 % de ce tonnage ont été élaborés par la filière à l'oxygène et 30,3 % dans des fours électriques [S41]. L'Afrique a produit 29,8 Mt, dont 89,0 % sont sortis de fours à arc électrique [S41]. Le monde a également produit 151,0 Mt de fer de réduction directe (DRI) en 2025, pour deux tiers au gaz naturel et pour un tiers au charbon [S04].

La chaîne de valeur de la figure 1.1 comporte six étapes. Les matières premières (minerai ou boulettes, un réducteur tel que le coke ou le gaz naturel, ferraille, fondants et ferroalliages) alimentent l'élaboration du fer. Celle-ci produit soit de la « fonte liquide » au haut fourneau, soit du DRI solide dans un four à cuve de réduction directe. L'aciérie transforme la fonte liquide dans un convertisseur à oxygène (BOF), ou fond le DRI et la ferraille dans un four à arc électrique (FAE). La métallurgie secondaire, généralement un four-poche, fixe la composition et la température finales. Une machine de coulée continue solidifie l'acier liquide en billettes, blooms ou brames. Les laminoirs réchauffent et déforment ensuite ces demi-produits pour en faire des produits finis : ronds à béton, fil machine, cornières, profilés en U, poutrelles, tôles fortes ou bobines.

Les produits longs, objet de ce livre blanc, sont fabriqués à partir de billettes et de blooms sur des laminoirs à barres, à fil machine et à profilés. Les produits plats (tôles fortes, bobines laminées à chaud, tôles fines) exigent une coulée continue de brames et un train à bandes, des investissements bien plus lourds qui sortent du périmètre prévu par Cameroon Steel.

Du minerai à la barre : six étapes, deux voies pour le fer, deux pour l'acier

En orange, la filière électrique prévue par Cameroon Steel ; en gris, les autres options

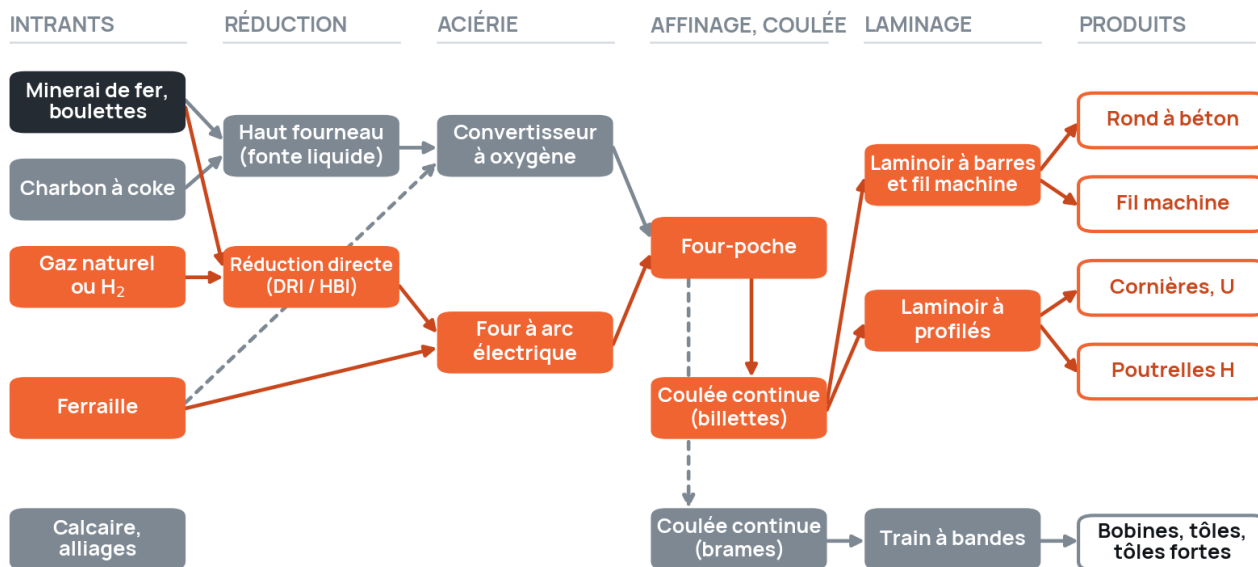


Schéma de procédé illustratif. Les produits plats (bobines, tôles) exigent une coulée de brames et un train à bandes, hors du périmètre prévu.

ILLUSTRATIF Figure 1.1. La chaîne de valeur de l'acier. Deux filières d'élaboration du fer (haut fourneau, réduction directe) et deux filières d'élaboration de l'acier (convertisseur à oxygène, four à arc électrique) convergent vers les mêmes étapes d'affinage, de coulée et de laminage. Le tracé orange est la filière électrique prévue par Cameroon Steel.

Source : Cameroon Steel ; étapes du procédé telles que décrites dans l'Iron and Steel Technology Roadmap de l'AIE [S02] et dans le document de référence de l'UE sur la production sidérurgique [S42].

1.2 Élaborer le fer, c'est retirer l'oxygène du minerai

Le fer des minerais commerciaux se présente surtout sous forme d'hématite (Fe_2O_3) ou de magnétite (Fe_3O_4). L'hématite pure contient 69,9 % de fer en masse, la magnétite pure 72,4 % (figure 1.2). Les minerais naturels titrent moins, car ils contiennent aussi une gangue, principalement de la silice et de l'alumine, chimiquement inerte dans le four et qui doit finalement être évacuée sous forme de laitier. Retirer l'oxygène exige un agent réducteur qui, à haute température, a plus d'affinité pour l'oxygène que le fer. Le carbone, sous forme de monoxyde de carbone, et l'hydrogène sont les deux réducteurs employés à l'échelle industrielle. Le carbone repart sous forme de dioxyde de carbone, l'hydrogène sous forme de vapeur d'eau.

Produire du fer, c'est retirer l'oxygène : l'hématite contient 70 % de fer, le fer métallique 100 %

Chaque étape retire de l'oxygène ; le carbone l'emporte sous forme de CO₂, l'hydrogène sous forme d'eau



Au carbone (coke) : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$

À l'hydrogène : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{H}_2\text{O}$

Teneurs en fer stœchiométriques (masses atomiques Fe 55,845, O 15,999). Les minerais réels contiennent aussi une gangue (silice, alumine) qui abaisse la teneur.

La réduction directe au gaz naturel utilise un mélange de CO et d'H₂ : elle émet moins de CO₂ que le coke.

DÉRIVÉ Figure 1.2. Teneur en fer des oxydes de fer et les deux réactions de réduction. Les teneurs sont stœchiométriques ; les minerais réels contiennent une gangue qui abaisse la teneur.

Source : Cameroon Steel, d'après les masses atomiques (Fe 55,845, O 15,999) ; schéma réactionnel conforme à la feuille de route de l'AIE [S02].

Le haut fourneau

Un haut fourneau est une haute cuve exploitée en continu, chargée par le haut en aggloméré ou en boulettes, en minerai calibré et en coke, tandis que de l'air chaud est insufflé près de sa base. Le coke brûle en monoxyde de carbone, qui réduit le minerai au cours de sa descente ; le fer fond, absorbe du carbone et s'accumule dans le creuset sous forme de fonte liquide. La fonte liquide solidifiée est la fonte brute, qui contient généralement 3,5 à 4,5 % de carbone [S43]. Le haut fourneau est efficace et éprouvé, mais il dépend du charbon à coke (et donc de cokeries) et de minerai aggloméré (usines d'agglomération ou boulettes), et il n'est rentable qu'à très grande échelle. Une usine intégrée moderne s'organise autour d'un ou de plusieurs fourneaux produisant plusieurs millions de tonnes par an.

La réduction directe

La réduction directe retire l'oxygène des boulettes ou du minerai calibré sans les fondre. Dans les fours à cuve au gaz, qui dominent cette technologie, un gaz réducteur chaud riche en hydrogène et en monoxyde de carbone, produit à partir de gaz naturel, remonte à travers un lit de boulettes qui descend. Les usines MIDREX et HYL/ENERGIRON ont produit ensemble 64,5 % du DRI mondial en 2025, et les fours rotatifs au charbon, essentiellement en Inde, 33,1 % [S04]. Le produit, le DRI, est un fer métallique poreux qui conserve la forme de la boulette. Un DRI type est métallisé entre 92 et 96 % et contient 1,0 à 4,5 % de carbone [S14]. Comprimé à chaud en briquettes denses, il devient du fer briqueté à chaud (HBI), d'une densité apparente supérieure à 5,0 t/m³, plus facile et plus sûr à transporter [S15].

Comme le minerai ne fond jamais dans un four à cuve, rien n'en retire la gangue. Chaque point de silice et d'alumine présent dans la boulette reste dans le DRI et doit être fondu puis évacué dans le laitier du four électrique. C'est pourquoi la réduction directe exige une charge plus riche et plus pure qu'un haut fourneau. Le chapitre 4 explique pourquoi ce seul fait détermine le moment où le minerai camerounais pourra être utilisé.

LE HAUT FOURNEAU FOND LE MINÉRAI ET DISSOUT LE CARBONE ; LE FOUR À CUVE RETIRE L'OXYGÈNE ET LAISSE LE MINÉRAI SOLIDE. CETTE DIFFÉRENCE DÉTERMINE LE MINÉRAI, LE COMBUSTIBLE ET L'ÉCHELLE QU'EXIGE CHAQUE FILIÈRE.

Cameroon Steel, trajectoire technologique

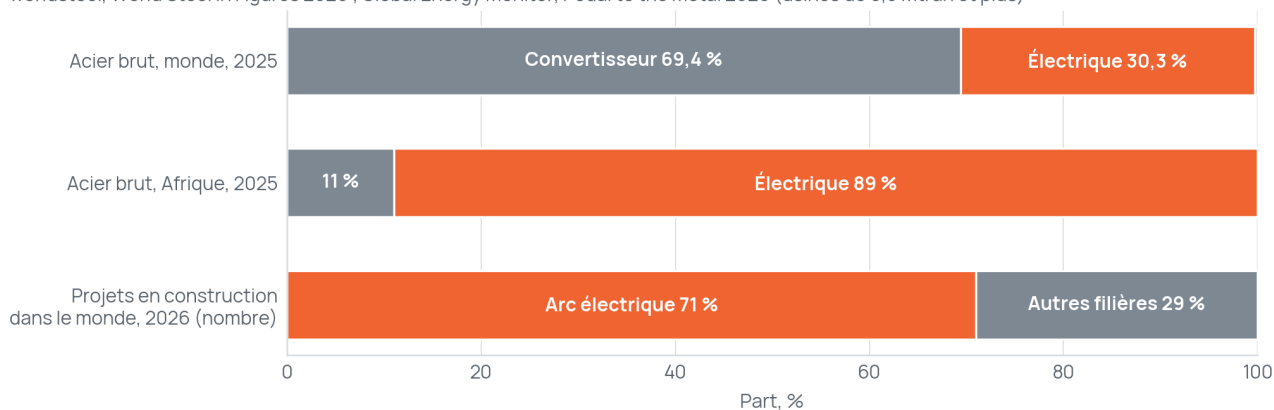
1.3 L'aciérie brûle le carbone ou fond du fer solide

La fonte liquide issue d'un haut fourneau contient trop de carbone, de silicium et de phosphore pour constituer un acier utilisable. Dans un convertisseur à oxygène, de l'oxygène pur est soufflé sur le métal liquide et oxyde ces éléments en quelques minutes ; les réactions dégagent tant de chaleur que le convertisseur n'a besoin d'aucune énergie extérieure et peut fondre une part de ferraille comme agent de refroidissement. La moyenne de worldsteel pour la filière haut fourneau et convertisseur à oxygène suppose environ 10 % de ferraille [S01].

Le four à arc électrique fonctionne autrement. Trois électrodes en graphite (dans la conception à courant alternatif la plus répandue) font jaillir des arcs sur une charge de ferraille, de DRI, de HBI ou de fonte brute et la fondent par l'énergie électrique, avec l'appoint d'oxygène et de carbone injectés pour former un laitier moussant qui protège l'arc et apporte de l'énergie chimique. Le four affine le bain par son laitier (il en retire par exemple le phosphore) et coule l'acier liquide dans une poche. Les aciéries de l'UE consomment de 404 à 748 kWh d'électricité par tonne d'acier liquide [S42] ; les références de la Société financière internationale (SFI) donnent 1 250 à 1 800 MJ par tonne, soit 347 à 500 kWh [S44]. Le FAE n'a besoin d'aucune étape propre d'élaboration du fer et peut démarrer ou s'arrêter en quelques heures, ce qui en fait le partenaire naturel de la ferraille et du DRI.

L'Afrique produit déjà 89 % de son acier au four électrique ; les nouvelles capacités mondiales suivent

worldsteel, World Steel in Figures 2026 ; Global Energy Monitor, Pedal to the Metal 2026 (usines de 0,5 Mt/an et plus)



SOURCÉ Figure 1.3. Acier brut par procédé, monde et Afrique, 2025, et part des projets de fours à arc électrique parmi les usines sidérurgiques en construction dans le monde en 2026.

Source : worldsteel, World Steel in Figures 2026 [S41] ; Global Energy Monitor, Pedal to the Metal 2026, usines de 0,5 Mt/an et plus [S45].

Les fours à induction constituent une troisième technologie de fusion, plus simple. Ils chauffent le métal par induction électromagnétique dans un creuset et sont très répandus en Asie du Sud pour une sidérurgie de petite taille à partir de ferraille et de fer spongieux produit au charbon. Comme le laitier est froid et difficile à maintenir fluide dans un creuset à induction, ils affinent mal. Le chapitre 2 revient sur ce point.

1.4 La métallurgie secondaire fixe la composition finale dans la poche

L'acier coulé par un convertisseur ou un four électrique n'est pas encore une nuance finie. Dans un four-poche, un arc plus petit réchauffe l'acier dans la poche pendant que les opérateurs ajoutent les éléments d'alliage (manganèse, silicium et, pour certaines nuances, vanadium ou niobium), désulfurent le métal sous un laitier basique, font remonter les inclusions non métalliques et amènent la température dans la plage qu'exige la coulée continue. Un four-poche peut élever la température de l'acier d'environ 4 °C par minute ; une unité à double poste mise en service chez ArcelorMittal à Brême en 2013 a atteint ce rythme sur 30 minutes [S46]. Séparer ces tâches du four de fusion permet au FAE de faire ce qu'il fait le mieux, fondre vite, et rend l'usine plus productive.

1.5 La coulée continue transforme l'acier liquide en billettes

Une machine de coulée continue verse l'acier liquide de la poche dans un répartiteur, un distributeur garni de réfractaire, puis dans des lingotières en cuivre refroidies à l'eau. Une peau solide se forme contre la paroi de la lingotière, et la barre est tirée vers le bas puis cintrée jusqu'à l'horizontale pendant que des jets d'eau achèvent la solidification. Des chalumeaux ou des cisailles coupent la barre à longueur. Pour les produits longs, la coulée produit des billettes, généralement de section carrée ; un laminoir à barres et fil machine de 300 000 t/an commandé en Tanzanie en septembre 2026 est conçu pour des billettes de 150 mm sur 150 mm, à raison de 50 t par heure au plus [S08, S47]. La coulée continue a remplacé la coulée en lingots parce qu'elle améliore le rendement et la régularité et permet aux billettes de rejoindre le laminoir encore chaudes, ce qui économise de l'énergie (chapitre 6).

1.6 Le laminage donne sa forme à l'acier et fixe une grande part de sa résistance

Un laminoir réchauffe les billettes jusqu'à un état plastique et les fait passer dans une série de cages, chaque paire de cylindres réduisant la section et allongeant la barre. Un laminoir à barres comporte généralement des groupes dégrossisseur, intermédiaire et finisseur. Pour le rond à béton, les derniers cylindres gravent les nervures qui assurent l'adhérence de la barre au béton, et un caisson à eau placé juste après la cage finisseuse trempe la surface : le traitement de trempe et autorevenu décrit au chapitre 7 donne une résistance de 500 MPa à partir d'un simple acier au carbone-manganèse [S28]. Pour le fil machine, un bloc finisseur à grande vitesse livre de petites sections à une tête de pose qui forme des spires ; celles-ci refroidissent de façon contrôlée sur un convoyeur et sont rassemblées en couronnes. Les laminoirs à profilés et à poutrelles suivent la même logique avec des cylindres profilés et, pour les poutrelles à larges ailes, des cages universelles.

Le laminage est le point de rencontre entre une usine de produits longs et ses clients : la gamme de dimensions, les tolérances, l'état de surface et les propriétés mécaniques des barres et des profilés y sont fixés, de même qu'une grande part de la consommation d'énergie de l'usine hors aciérie. Une billette qui entre chaude au laminoir demande beaucoup moins de chauffage qu'une billette froide.

1.7 L'énergie intervient à chaque étape, sous des formes différentes

La sidérurgie est intensive en énergie, et chaque étape l'utilise sous une forme différente : c'est pourquoi le choix d'une filière est aussi un choix d'approvisionnement énergétique. L'élaboration du fer en consomme le plus : une usine de réduction directe au gaz brûle et reforme environ 9,2 à 10 GJ de gaz naturel par tonne de DRI [S20, S48], tandis qu'un haut fourneau tire son énergie du coke produit à partir de charbon à coke. La fusion au four à arc électrique consomme de l'électricité, 347 à 500 kWh par tonne d'acier liquide selon les références de la SFI [S44], complétée par l'énergie chimique de l'oxygène et du carbone. Le réchauffage des billettes avant

laminage consomme 0,6 à 1,9 GJ par tonne dans les laminoirs à barres et à fil de l'UE, alors que le laminage proprement dit ne demande que 0,1 à 0,5 GJ par tonne [S49]. La coulée et l'affinage en poche consomment relativement peu.

Deux conséquences en découlent pour un pays qui choisit sa filière. Premièrement, une filière qui commence par la ferraille ou le fer acheté et un four électrique a surtout besoin d'électricité : sa faisabilité dépend donc du réseau ; une filière qui comprend l'élaboration du fer a aussi besoin d'un combustible, gaz naturel ou charbon, en quantités importantes et régulières. Deuxièmement, la chaleur qui n'est pas perdue n'a pas à être rachetée : des billettes qui passent chaudes de la coulée continue au laminoir, et un DRI qui passe chaud du four à cuve au four à arc, économisent une grande part de l'énergie que le refroidissement puis le réchauffage gaspilleraient [S50]. Ces deux points expliquent pourquoi la trajectoire proposée dans ce livre blanc commence entièrement électrique, n'ajoute le gaz que lorsqu'un laminoir ou une usine de réduction directe l'exige, et place chaque installation à côté de celle qu'elle alimente.

1.8 Les unités de fer sont la monnaie d'une aciérie électrique

Une aciérie électrique ne produit pas de fer : elle achète ou produit des unités de fer et les fond. Les termes « unités de fer » ou « charges métalliques » couvrent toutes les matières contenant du fer qui peuvent être enfournées. Leurs propriétés déterminent le rendement, la consommation d'énergie, la composition chimique et, en définitive, la qualité des produits. Le tableau 1.1 résume les principales.

Tableau 1.1 Les principales unités de fer d'un four à arc électrique et ce que chacune apporte au bain

Unité de fer	Nature	Teneurs types en fer et en carbone	Atouts	Limites et manutention
Ferraille d'acier	Acier recyclé : chutes internes, chutes neuves de fabrication, ferraille de récupération issue de la démolition et des biens en fin de vie	Fer métallique ; carbone faible ; cuivre, étain et zinc résiduels variables selon la qualité	Filière la plus sobre en énergie et en CO ₂ ; aucune élaboration du fer nécessaire	Offre limitée par le stock d'acier ancien d'un pays ; les résiduels s'accumulent dans la ferraille de récupération ; tri et préparation nécessaires
DRI (froid)	Boulettes poreuses de fer réduit à l'état solide	Métallisation de 92 à 96 % ; 1,0 à 4,5 % de carbone [S14]	Fer propre, pauvre en résiduels ; dilue les impuretés de la ferraille ; peut être chargé en continu	Se réoxyde et s'échauffe spontanément s'il est mouillé ; transporté sous gaz inerte ; la gangue accroît le laitier [S14]
HBI	DRI compacté à chaud en briquettes	Métallisation de 94 % ; 0,5 à 1,6 % de carbone ; densité apparente supérieure à 5,0 t/m ³ [S15]	Plus sûr et plus dense que le DRI à transporter et à stocker ; produit négocié	Ventilation de surface nécessaire pendant le transport ; même pénalité de gangue que le DRI [S15]
Fonte brute	Fonte liquide de haut fourneau solidifiée	Au moins 92 % de fer ; 3,5 à 4,5 % de carbone [S43]	Le carbone apporte de l'énergie chimique ; résiduels très faibles	Produite par la filière du haut fourneau, avec ses émissions ; offre concentrée chez quelques exportateurs
Billettes (demi-produits)	Barres d'acier coulées prêtes à laminar	Composition de l'acier fini	Permettent de laminar sans aciérie	Aucune maîtrise de la composition ; exposent le laminoir aux prix à l'importation et au fret

Source : fiches techniques de l'International Iron Metallurgy Association [S14, S15, S43] ; Cameroon Steel. Les valeurs sont des fourchettes types, non des spécifications.

La ferraille est l'unité de fer la moins chère et la moins carbonée partout où elle abonde. Le DRI et le HBI sont du fer « vierge » pauvre en éléments résiduels, utilisé pour pallier le manque de ferraille et en diluer les impuretés. La fonte brute joue le même rôle, mais porte les émissions du haut fourneau. Les billettes ne sont pas une unité de fer pour une aciérie, mais l'intrant d'un relamineur, qui achète de l'acier déjà élaboré ailleurs. Le chapitre 3 montre que les billettes sont désormais la première importation d'acier du Cameroun.

CE QUE CES NOTIONS IMPLIQUENT POUR LE CHOIX DE LA FILIÈRE

Un nouveau producteur en Afrique centrale n'a pas à choisir d'emblée une technologie pour chaque étape. Il doit choisir comment il élaborera l'acier (à l'oxygène ou à l'électricité) et d'où viendront ses unités de fer à chaque période. Une aciérie électrique peut démarrer avec de la ferraille et du DRI ou du HBI importés, puis ajouter une production nationale de fer, sans changer le four, la coulée continue ni les laminoirs. La filière du haut fourneau n'offre aucun séquençement de ce type : l'élaboration du fer doit venir en premier, à pleine échelle.

1.9 Ce que ces notions impliquent pour l'Afrique centrale

Quatre conséquences pratiques découlent de la description des procédés et structurent la suite de ce livre blanc.

Premièrement, la variable décisive est l'origine des unités de fer, et non le four d'aciérie en tant que tel. La ferraille est bon marché et propre, mais rare dans une économie dont le stock d'acier ancien est faible. Le DRI peut être importé aujourd'hui et produit localement demain à partir de minerai camerounais, à condition que ce minerai soit enrichi jusqu'à la qualité réduction directe. La fonte brute et les billettes peuvent s'acheter, mais chacune porte les émissions et les marges d'un autre.

Deuxièmement, la coulée et le laminage sont communs à toutes les filières : ils peuvent donc être construits en premier et conservés à mesure que la filière évolue. Une coulée continue de billettes et un laminoir à barres et fil machine servent aussi bien un FAE alimenté en ferraille aujourd'hui qu'un FAE alimenté en DRI demain.

Troisièmement, l'échelle joue différemment selon la filière. Une aciérie à FAE est rentable à quelques centaines de milliers de tonnes par an ; les laminoirs à barres et à fil récemment commandés en Tanzanie et en Côte d'Ivoire représentent chacun environ 300 000 t par an [S08, S09]. Un haut fourneau, avec ses cokeries et son usine d'agglomération, n'a de sens qu'à plusieurs millions de tonnes par an. Pour un marché de la taille du Cameroun, cette seule différence réduit le choix, comme le montre le chapitre 2.

Quatrièmement, chaque filière demande quelque chose de différent au système énergétique national. Une aciérie fonctionnant avec des unités de fer achetées a besoin d'une électricité ferme et de bonne qualité, et de peu d'autre chose ; une usine de réduction directe y ajoute une demande de long terme en gaz naturel ou, plus tard, en très grandes quantités d'électricité bas carbone pour produire de l'hydrogène ; un haut fourneau exige une chaîne d'approvisionnement en charbon et les installations portuaires correspondantes. Choisir une filière, c'est donc aussi s'engager sur l'infrastructure énergétique que le pays construira autour de l'usine, et sur son calendrier.

Ces quatre points expliquent la structure des chapitres suivants. Le chapitre 2 compare les filières sur l'énergie, le carbone, le capital, l'échelle et les matières premières. Les chapitres 3 et 4 examinent les unités de fer qu'utiliserait une aciérie électrique, de la ferraille et du DRI importé jusqu'au minerai camerounais. Les chapitres 5 à 8 décrivent le fonctionnement de l'aciérie, des laminoirs, des produits et des systèmes de conduite, et les chapitres 9 et 10 appliquent ces résultats au complexe prévu par Cameroon Steel et aux décisions qui restent à prendre.

CHAPITRE 2

LES FILIÈRES COMPARÉES : LES FILIÈRES ÉLECTRIQUES L'EMPORTENT SUR LE CARBONE, L'ÉCHELLE ET LA RAPIDITÉ

Des cinq façons de produire l'acier, deux conviennent à un nouveau producteur en Afrique centrale : le four à arc électrique alimenté en ferraille et en fer acheté, et le four à arc électrique alimenté en fer de réduction directe au gaz. Selon les moyennes 2024 de worldsteel par filière, elles émettent 0,69 et 1,47 t de CO₂ par tonne d'acier brut, contre 2,34 t pour le haut fourneau associé au convertisseur à oxygène [S01]. Selon des repères dérivés de l'AIE en dollars de 2019, leur coût d'investissement indicatif par tonne est du même ordre que celui du haut fourneau, mais elles peuvent être construites en modules de quelques centaines de milliers de tonnes et mises en service en une fraction du temps. La filière du haut fourneau relève de très grandes usines adossées au charbon à coke et à des usines d'agglomération ; les fours à induction et la réduction-fusion n'atteignent pas le niveau de qualité ou de maturité requis pour les produits de construction.

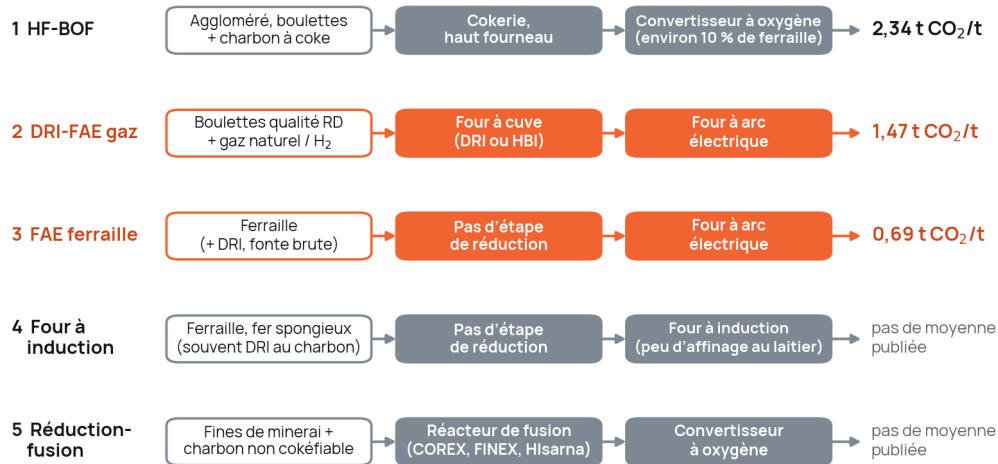
2.1 Cinq filières, dont trois fonctionnent à l'échelle commerciale dans le monde

La figure 2.1 présente les cinq filières telles qu'un décideur les rencontre : ce que chacune consomme, l'installation principale qu'elle exige et le CO₂ qu'elle émet en moyenne. Trois d'entre elles (haut fourneau et convertisseur à oxygène, réduction directe au gaz associée à un four à arc électrique, four à arc électrique à ferraille) représentent la quasi-totalité de l'acier brut mondial. Les fours à induction sont une niche concentrée en Asie du Sud ; la réduction-fusion est exploitée commercialement sur une poignée de sites et reste par ailleurs au stade pilote.

La comparaison qui suit retient quatre critères qui comptent pour un nouveau producteur sur un marché de taille moyenne : l'énergie et le CO₂ par tonne ; le capital par tonne de capacité ; l'échelle économique minimale ; les matières premières qu'exige chaque filière. Un cinquième critère, la flexibilité (la capacité à changer d'intrants et de production au gré des marchés et des chaînes d'approvisionnement), traverse les quatre autres.

Cinq façons de produire l'acier, et ce que chacune exige

Intrants (à gauche), unités principales (au centre), intensité en CO₂ lorsqu'une moyenne publiée existe (à droite)



CO₂ : moyennes worldsteel par filière, données 2024 (périmètres 1, 2 et amont). Réduction-fusion : commerciale sur quelques sites (FINEX, COREX) ; HIsarna au stade pilote.

ILLUSTRATIF **Figure 2.1.** Les cinq filières sidérurgiques : intrants, unités principales et moyennes de CO₂ publiées.

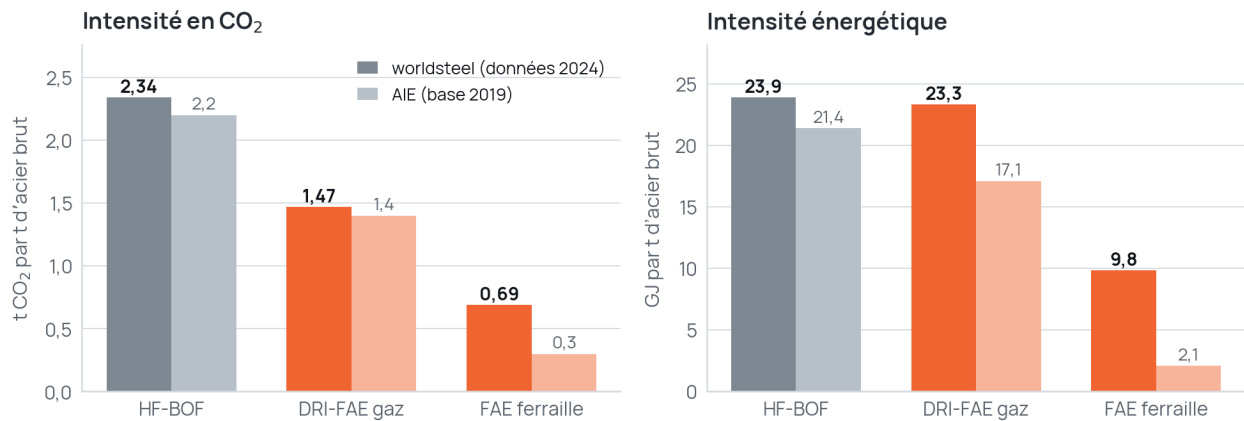
Source : Cameroon Steel ; valeurs de CO₂ tirées de worldsteel, Sustainability Indicators 2025 (données 2024) [S01] ; état de la réduction-fusion d'après [S11, S12].

2.2 Énergie et CO₂ : l'acier du FAE à ferraille émet environ 30 % du CO₂ du haut fourneau

worldsteel publie des moyennes par filière qui incluent les émissions directes, les émissions liées à l'électricité achetée et les émissions amont des matières. Sur les données 2024, la filière haut fourneau et convertisseur a émis 2,34 t de CO₂ par tonne d'acier brut, la filière DRI-FAE 1,47 t et la filière FAE à ferraille 0,69 t ; la moyenne mondiale était de 1,92 t [S01]. Les intensités énergétiques étaient respectivement de 23,88, 23,30 et 9,84 GJ par tonne, l'électricité étant comptée en énergie primaire [S01]. L'AIE, qui mesure l'énergie finale et retient un facteur d'émission moyen mondial du réseau de 538 g CO₂/kWh en 2019, donne 21,4, 17,1 et 2,1 GJ par tonne, et des émissions directes et indirectes de 2,2, 1,4 et 0,3 t de CO₂ par tonne [S02]. Les deux sources diffèrent par leur périmètre, non par le classement (figure 2.2).

L'acier FAE à ferraille porte environ 30 % du CO₂ du haut fourneau ; le DRI-FAE au gaz environ 63 %

Barres foncées : moyennes worldsteel 2024 (périmètres 1, 2, amont ; électricité en énergie primaire). Barres claires : AIE, CO₂ direct + indirect et énergie finale.



SOURCE Figure 2.2. Intensité en CO₂ et intensité énergétique par filière, sur deux bases publiées.

Source : worldsteel, Sustainability Indicators 2025, données 2024 [S01] ; AIE, Iron and Steel Technology Roadmap, base 2019 [S02].

Trois caractéristiques de ces chiffres comptent pour le Cameroun.

Premièrement, les émissions des filières électriques dépendent fortement du réseau. Le Cameroun a produit environ 90 % de son électricité à partir de l'hydroélectricité en 2025 [S51], et Our World in Data, à partir des données d'Ember, situe l'intensité carbone moyenne de l'électricité du pays à environ 226 g CO₂/kWh en 2024 [S07], bien moins de la moitié de la moyenne mondiale retenue par l'AIE. Un FAE consommant 450 kWh par tonne sur ce réseau ajoute environ 0,10 t de CO₂ par tonne d'acier (dérivé). Une usine DRI-FAE au gaz au Cameroun se situerait donc en dessous de la moyenne worldsteel de la filière DRI-FAE, et plus près du chiffre d'émissions directes de l'AIE, environ 1,0 t [S02].

Deuxièmement, les émissions de la filière DRI-FAE proviennent surtout du gaz naturel brûlé et reformé dans le four à cuve. Remplacer une partie de ce gaz par de l'hydrogène les réduit à proportion. ENERGIIRON fait état de réductions d'environ 53 % par rapport à la filière du haut fourneau avec du gaz naturel, et d'environ 86 % avec 100 % d'hydrogène [S20]. La filière DRI-FAE est donc la seule filière à partir de minerai qui offre une voie crédible vers un acier quasi nul en émissions ; le seuil « quasi nul » de l'AIE pour l'acier produit entièrement à partir de minerai est de 0,40 t CO₂e par tonne [S52].

Troisièmement, le carbone devient un coût à la frontière européenne. Le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'UE, MACF (CBAM), est entré dans sa phase définitive le 1er janvier 2026 et couvre le fer et l'acier, y compris le DRI, les billettes, le rond à béton et le fil machine, ainsi que le minerai de fer aggloméré [S53]. Le prix des certificats pour le troisième trimestre 2026 était de 82,32 euros par tonne de CO₂e [S54]. Appliqué aux moyennes de worldsteel par filière, ce prix donnerait une charge brute d'environ 193 euros par tonne pour l'acier de haut fourneau, 121 euros pour l'acier DRI-FAE et 57 euros pour l'acier de FAE à ferraille, avant toute déduction au titre des allocations gratuites de l'UE (dérivé). Ces chiffres sont un plafond, non une estimation de ce que paierait un exportateur : les moyennes de worldsteel incluent l'électricité achetée et les intrants amont, que le MACF ne tarife pas pour le fer et l'acier, et surestiment donc les émissions pertinentes pour le MACF, en particulier pour les filières électriques. Le livre blanc 06 (chapitre 5, tableau 5.2) calcule la charge sur le périmètre du MACF. Les allocations gratuites des producteurs de l'UE passent de 97,5 % en 2026 à zéro en 2034 [S55] : la charge supportée par les exportateurs augmentera donc chaque année.

SUR UN MÊME RÉSEAU, LES FILIÈRES ÉLECTRIQUES RÉDUISENT LE CO₂ PAR TONNE DE 37 À 71 % PAR RAPPORT AU HAUT FOURNEAU. SUR LE RÉSEAU CAMEROUNAIS, DOMINÉ PAR L'HYDROÉLECTRICITÉ, L'AVANTAGE EST PLUS GRAND ENCORE.

Cameroon Steel, d'après les moyennes 2024 de worldsteel par filière

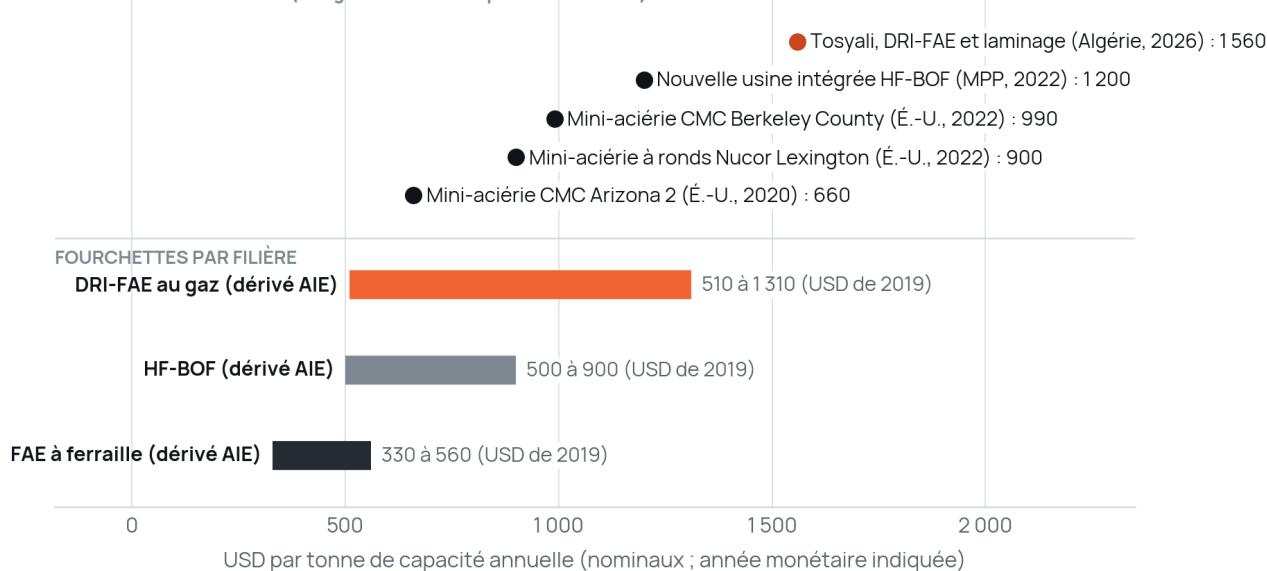
2.3 Le capital par tonne est du même ordre ; ce qui diffère, c'est l'échelle à laquelle il est engagé

Les coûts d'investissement publiés des usines sidérurgiques sont difficiles à comparer : ils diffèrent par leur périmètre (avec ou sans laminoirs, utilités, installations portuaires et logements), leur année monétaire et leur localisation. La base publique la plus cohérente est l'ensemble des coûts d'investissement annualisés de l'AIE, qui se traduit en coûts indicatifs hors intérêts par tonne de capacité annuelle d'environ 500 à 900 USD pour un nouveau haut fourneau avec convertisseur, de 510 à 1 310 USD pour une usine DRI-FAE au gaz et de 330 à 560 USD pour une aciérie à FAE à ferraille, en USD d'environ 2019 (dérivé ; méthode à l'annexe A) [S02]. Ces fourchettes ne sont pas actualisées aux prix courants : les budgets annoncés entre 2020 et 2026, qui incluent aussi laminoirs et aménagements, vont d'environ 660 à 1 560 USD par tonne (figure 2.3) ; elles servent donc à comparer les filières, non à chiffrer une usine. La Mission Possible Partnership évalue une nouvelle usine intégrée à haut fourneau à environ 1,2 milliard USD par million de tonnes [S56].

Le coût d'investissement par tonne dépend davantage du périmètre et du site que de la filière

Fourchettes et références : pas des estimations de Cameroon Steel ; le périmètre (laminage, utilités, réduction) explique l'écart

RÉFÉRENCES DE PROJETS (budget annoncé ÷ capacité annoncée)



DÉRIVÉ Figure 2.3. Coût d'investissement indicatif par tonne de capacité annuelle par filière, avec des références de projets annoncés.

Source : fourchettes dérivées de l'AIE [S02] ; Mission Possible Partnership [S56] ; Nucor [S57] ; projets CMC [S58, S59] ; Tosyali Algérie [S60]. Les valeurs de projets sont des budgets annoncés divisés par la capacité annoncée, les tonnes courtes américaines étant converties en tonnes, et ne sont pas comparables en périmètre.

Les références de projets de la figure 2.3 montrent pourquoi la filière n'est pas le principal déterminant. Trois « micro-aciéries » américaines qui fondent de la ferraille et laminent des barres sur une seule ligne ont été annoncées entre 2020 et 2022 pour environ 660, 900 et 990 USD par tonne de capacité annoncée, une fois leurs tonnes courtes converties en tonnes (annexe A) [S57, S58, S59]. Un nouveau complexe algérien associant

réduction directe, aciérie électrique et laminage a été annoncé en avril 2026 pour environ 2,5 milliards USD pour 1,6 Mt, soit environ 1 560 USD par tonne [S60]. Les usines à hydrogène sont plus coûteuses encore : la première phase de l'usine DRI-FAE à hydrogène de Stegra en Suède a été financée à hauteur de 6,5 milliards d'euros pour 2,5 Mt par an [S61], et l'entreprise cherchait des financements complémentaires en octobre 2026 face à la hausse des coûts [S62].

Ce qui distingue les filières, c'est la taille de la tranche indivisible. Un haut fourneau, avec ses cokeries, son usine d'agglomération et son convertisseur à oxygène, n'est rentable qu'à plusieurs millions de tonnes par an ; la fourchette dérivée de l'AIE suppose cette échelle. Une aciérie électrique et sa coulée continue sont efficaces à quelques centaines de milliers de tonnes : les micro-aciéries américaines sont dimensionnées pour 0,39 à 0,45 Mt par an (430 000 à 500 000 tonnes courtes) [S57, S58, S59], et les laminoirs à barres et à fil africains récents pour environ 0,3 Mt [S08, S09]. Les modules de réduction directe vont de 0,25 Mt par an, la taille du micro-module ENERGIRON ZR mis en service à Mutún en Bolivie en octobre 2025, jusqu'à 2,5 Mt dans un seul four à cuve [S04]. Un producteur d'Afrique centrale peut donc engager son capital par tranches adaptées à la demande, et ajouter l'élaboration du fer lorsque son minerai et son gaz sont prêts.

2.4 La filière du haut fourneau convient à de très grandes usines adossées au charbon

Le haut fourneau reste la principale technologie d'élaboration du fer dans le monde, et 319 Mt/an de nouvelles capacités de haut fourneau étaient en développement en 2026, surtout en Inde et en Chine [S45]. Il convient aux pays qui réunissent un très grand marché de l'acier, un accès au charbon à coke et une chaîne du minerai et de la logistique conçue pour des dizaines de millions de tonnes de matières premières. La consommation apparente d'acier du Cameroun est d'environ 450 000 t par an selon les estimations du secteur [S32], très en deçà de la production d'un seul haut fourneau moderne. Un haut fourneau dépendrait de charbon à coke importé, car aucune production camerounaise de charbon à coke n'est en exploitation ni en développement dans les sources examinées pour ce livre blanc. Il porterait aussi la charge carbone la plus élevée de toutes les filières sur les marchés d'exportation qui appliquent des mesures carbone aux frontières.

Le haut fourneau est aussi la filière la moins flexible. Il fonctionne en continu sur des campagnes de nombreuses années ; l'arrêter coûte cher et le redémarrer prend du temps. Lorsque la demande baisse, une usine intégrée ne peut guère réduire son allure, alors qu'une aciérie électrique peut supprimer des postes. Pour un producteur dont le marché est encore en formation, cette rigidité est un risque sérieux.

2.5 La filière DRI-FAE au gaz est la filière à partir de minerai qui convient à l'Afrique centrale

La réduction directe au gaz associée à un four électrique est la voie par laquelle l'Afrique du Nord a bâti sa sidérurgie. L'Algérie, l'Égypte et la Libye ont produit ensemble environ 14,5 Mt de DRI en 2025 selon les statistiques d'usines de Midrex [S04], et l'Algérie est passée d'un déficit net d'acier à un excédent net grâce à de grands complexes DRI-FAE [S63]. La filière utilise du gaz naturel plutôt que du charbon à coke, accepte des boulettes ou du minerai calibré de qualité réduction directe, et ses modules peuvent être dimensionnés selon le marché. Une usine MIDREX ou ENERGIRON moderne consomme environ 9,2 à 10 GJ de gaz naturel par tonne de DRI ; Suez Steel a fait état d'une consommation durablement inférieure à 2,2 Gcal (environ 9,2 GJ) par tonne en 2026 [S48], et la référence ENERGIRON est d'environ 10 GJ et 73 kWh par tonne de DRI [S20].

L'Afrique subsaharienne ne compte presque aucune unité de réduction directe au gaz en fonctionnement : selon les statistiques d'usines de Midrex, la région a produit 0,09 Mt de DRI en 2025, et ses deux usines de réduction directe à four à cuve, à Warri au Nigeria (1,02 Mt/an) et à Saldanha en Afrique du Sud (0,80 Mt/an), étaient à l'arrêt [S04]. worldsteel, dont les chiffres incluent des estimations pour des usines extérieures à ce

recensement, évalue la production de DRI d'Afrique de l'Est à environ 2,7 Mt en 2025, en Ouganda, au Kenya et en Tanzanie (chapitre 4) [S41]. Un module DRI à Kribi serait donc l'une des premières usines de réduction directe au gaz en fonctionnement dans la région. Il serait aussi soumis aux deux conditions préalables examinées au chapitre 4 : un minerai de qualité réduction directe et un approvisionnement en gaz de long terme.

2.6 Le FAE à ferraille est le démarrage le plus rapide, mais la ferraille seule ne peut alimenter 1 Mt/an

Le four électrique alimenté en ferraille est la filière la moins carbonée, la moins capitalistique et la plus rapide à construire. Sa limite est l'offre de ferraille, qui dépend de la quantité d'acier qu'une économie a accumulée dans ses bâtiments, ses véhicules et ses machines. L'utilisation mondiale de ferraille en sidérurgie est d'environ 630 Mt par an, selon le Bureau of International Recycling [S64], mais elle est concentrée dans les économies matures. L'Afrique était importatrice nette de ferraille ferreuse en 2025, avec 3,4 Mt importées et 1,2 Mt exportées [S41]. Le chapitre 3 montre que la ferraille nationale du Cameroun ne représente qu'une fraction de ce dont une usine de 1 Mt/an aurait besoin. Le FAE à ferraille est la bonne manière de démarrer, mais non une manière suffisante de croître.

2.7 Les fours à induction et la réduction-fusion n'atteignent pas le niveau requis pour l'acier de construction à grande échelle

Les fours à induction fondent ferraille et fer spongieux à bas coût dans de petites unités, ce qui explique leur succès en Asie du Sud. Global Energy Monitor recense environ 27 Mt/an de capacités de fours à induction, soit environ 1 % des capacités en exploitation, surtout en Inde, au Vietnam, au Bangladesh et au Pakistan ; les fours suivis utilisent en moyenne 73 % de fer spongieux (souvent produit au charbon) et seulement 19 % de ferraille [S45]. L'AIE décrit les fours à induction comme généralement moins efficaces énergétiquement que les fours à arc et note que la Chine a fermé des dizaines d'usines illégales à four à induction [S02]. Leur faiblesse métallurgique est l'affinage : sans laitier chaud et réactif, ils ne peuvent éliminer efficacement le phosphore et le soufre. Le National Metallurgical Laboratory indien a constaté qu'environ 90 % de près de 15 Mt d'acier élaboré au four à induction à partir de DRI contenaient 0,08 à 0,11 % de phosphore, contre 0,03 à 0,06 % autorisés par les normes indiennes et ASTM [S10]. Pour des ronds à béton et des profilés soumis à des exigences de ductilité et de soudabilité, c'est un risque rédhibitoire, sauf à ajouter un affinage en poche.

Les procédés de réduction-fusion réduisent et fondent le minerai dans un ou deux réacteurs au moyen de charbon non cokéifiable, en évitant les cokeries et, dans certaines conceptions, l'agglomération. COREX et FINEX sont exploités commercialement ; POSCO a construit à Pohang sa première usine FINEX commerciale, pour 1,5 Mt de fonte liquide par an [S11]. Hlsarna a fait l'objet d'essais pilotes aux Pays-Bas, et Tata Steel prévoit une usine industrielle d'environ 1 Mt par an à Jamshedpur d'ici 2030 [S12]. Ces procédés produisent toujours de la fonte liquide pour un convertisseur à oxygène, dépendent toujours du charbon et, à l'échelle commerciale, ont toujours besoin du captage du carbone pour atteindre de faibles émissions. Ils ne constituent pas une option pour un nouveau producteur dont le minerai n'est pas encore enrichi et dont le marché se mesure en centaines de milliers de tonnes.

2.8 L'expérience africaine va dans le même sens

L'histoire récente du continent offre une expérience naturelle de choix de filière. L'Afrique a produit 89,0 % de son acier brut dans des fours électriques en 2025 [S41]. L'Afrique du Nord a bâti sa sidérurgie sur la réduction directe au gaz et sur des aciéries électriques, à l'abri d'une protection commerciale : l'Algérie est passée d'un déficit net d'acier d'environ 1 Mt en 2021 à un excédent net d'environ 1 Mt en 2025, et la part des importations

dans sa consommation d'acier est tombée de 35 % à 16 % [S63, S65]. L'Afrique du Sud offre une autre leçon : en février 2025, ArcelorMittal South Africa a confirmé l'arrêt progressif de son activité de produits longs, invoquant le coût de l'énergie, la logistique, la politique de la ferraille et une protection insuffisante contre les importations [S66].

Les nouvelles capacités suivent le modèle électrique. Global Energy Monitor recense des projets de fours à arc électrique en développement en Namibie, en Algérie, au Nigeria, en Libye, en Égypte, en Afrique du Sud, au Zimbabwe, en Angola et au Mozambique, et des projets de réduction directe en Libye, en Algérie, en Égypte, en Angola et au Mozambique [S45]. Les laminoirs à barres et fil machine commandés en Tanzanie et en Côte d'Ivoire en septembre 2026 représentent chacun environ 300 000 t par an [S08, S09]. Une aciérie à Kribi rejoindrait une industrie régionale qui a déjà choisi l'électricité ; ce qui la distinguerait, c'est la perspective d'alimenter ce four, à terme, avec du fer produit à partir du minerai du pays.

2.9 La comparaison en un tableau

Tableau 2.1 Comparaison des filières pour un nouveau producteur de produits longs en Afrique centrale

Critère	HF-BOF	DRI-FAE au gaz	FAE à ferraille (avec DRI/HBI acheté)	Four à induction	Réduction-fusion
CO ₂ , t par t d'acier brut	2,34 [S01]	1,47 [S01] ; environ 1,0 en direct [S02]	0,69 [S01]	Aucune moyenne publiée	Non publié à l'échelle commerciale ; captage du carbone nécessaire pour de faibles émissions [S12]
Énergie, GJ par t	23,88 (worldsteel) ; 21,4 (AIE) [S01, S02]	23,30 ; 17,1 [S01, S02]	9,84 ; 2,1 [S01, S02]	Généralement moins efficace que le FAE [S02]	n.d.
Coût d'investissement indicatif, USD par t de capacité	500 à 900 (dérivé AIE) ; environ 1 200 (MPP) [S02, S56]	510 à 1 310 (dérivé AIE) [S02]	330 à 560 (dérivé AIE) [S02]	Faible, petites unités	n.d.
Échelle économique	Plusieurs Mt par an	Modules RD de 0,25 à 2,5 Mt [S04]	0,3 à 0,45 Mt par ligne de fusion [S08, S57, S58]	Moins de 0,5 Mt [S45]	Environ 1 à 1,5 Mt par unité [S11, S12]
Principales matières premières	Aggloméré ou boulettes, charbon à coke	Boulettes de qualité RD, gaz naturel ou hydrogène	Ferraille, DRI/HBI, fonte brute	Ferraille, fer spongieux	Fines de minerai, charbon non cokéifiable
Flexibilité	Faible : campagnes continues	Moyenne : usine RD continue, FAE flexible	Élevée : démarrage, arrêt, changement de charge	Élevée	Faible
Adéquation pour un nouveau producteur d'Afrique centrale	Mauvaise : échelle, charbon, carbone	Meilleure adéquation à long terme, une fois sécurisés le minerai de qualité RD et le gaz	Meilleur point de départ ; exige des unités de fer achetées	Inadaptée aux nuances de construction à grande échelle	Pas assez mature pour ce contexte

Source : selon les renvois de chaque cellule ; appréciation de Cameroon Steel pour les deux dernières lignes.

2.10 Pourquoi la filière électrique par phases équilibre les quatre critères

La question pour le Cameroun n'est pas de savoir quelle filière est la meilleure dans l'absolu, mais quelle séquence d'installations offre le meilleur équilibre entre capital, flexibilité, émissions et rapidité, compte tenu du marché et des ressources qui existent aujourd'hui, et de ceux qui pourraient exister dans dix ans.

Sur le capital, la filière électrique permet au producteur de s'engager par tranches de quelques centaines de milliers de tonnes, chaque tranche générant des recettes avant la suivante. Sur la flexibilité, le four électrique accepte tout mélange de ferraille, de DRI, de HBI et de fonte brute, de sorte que l'usine peut changer de fournisseurs et s'adapter aux prix ; il peut aussi moduler son allure selon la demande. Sur les émissions, il démarre au niveau du FAE à ferraille et ne monte qu'à mesure que la part du fer issu du minerai augmente, tandis que le réseau camerounais, dominé par l'hydroélectricité, maintient basse la composante électrique. Sur la rapidité, une aciérie et un laminoir peuvent être construits et mis en service sans attendre qu'une mine, une usine de concentration, une usine de bouletage et un contrat de gaz soient prêts en même temps.

Le capital et le carbone ne font pas tout. Une aciérie ne trouve sa place que si les billettes qu'elle coule coûtent moins cher que des billettes achetées à l'étranger et rendues à Kribi. Son premier poste de coût est la charge métallique : au rendement métallique de 0,88 retenu par RC-1, chaque tonne de billette exige environ 1,15 t de ferraille, de HBI ou de fonte brute [S03]. L'écart entre le prix rendu d'une billette importée (prix FOB, plus fret, frais portuaires et droits) et le coût de cette charge doit payer 450 à 490 kWh d'électricité par tonne au four, les électrodes, les réfractaires, les ferro-alliages, la main-d'œuvre et la maintenance. Cet écart suit les prix mondiaux de la ferraille, du HBI et des billettes ainsi que le fret ; c'est la variable que la décision d'investissement de la phase 1 doit éprouver. Le livre blanc 04 (chapitre 8) présente un coût indicatif d'une billette produite à Kribi face à une billette importée rendue, en fourchettes, avec leurs sources et leur incertitude ; ce livre blanc ne reprend pas ces chiffres.

L'étape de réduction directe s'ajoute ensuite, lorsque ses conditions préalables sont réunies. C'est la trajectoire examinée dans la suite de ce livre blanc : un four à arc électrique alimenté d'abord en ferraille et en DRI ou HBI importés, puis en fer de réduction directe produit à Kribi à partir de minerai camerounais concentré.

CHAPITRE 3

CHARGES MÉTALLIQUES : LE CAMEROUN MANQUE D'UNITÉS DE FER, NON DE CAPACITÉ DE LAMINAGE

La sidérurgie camerounaise lamine déjà plus que ce que le pays consomme ; ce qui lui manque, c'est le fer pour alimenter ses laminoirs. Les billettes sont devenues la première importation d'acier du pays, avec 161 400 t en 2023 [S05], et la ferraille locale ne couvre plus qu'environ 40 % des besoins des usines existantes [S32, S33]. Une aciérie électrique de 1 Mt/an aurait besoin d'environ 1,2 Mt d'unités de fer par an, soit à peu près dix fois la ferraille collectée aujourd'hui au Cameroun. La première phase doit donc être conçue sur de la ferraille et du DRI ou du HBI importés, en complément de la ferraille nationale, et la réponse de long terme est un fer produit au Cameroun à partir de minerai camerounais.

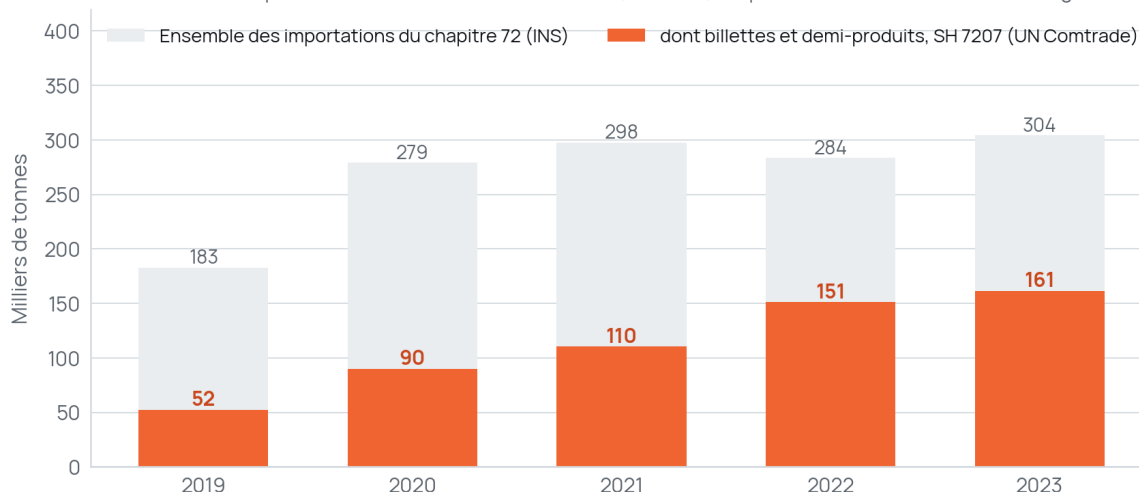
3.1 Les billettes montrent où se situe le déficit

Les importations de fer et d'acier du Cameroun (chapitre 72 de la nomenclature douanière) sont passées de 182 890 t en 2019 à 412 049 t en 2025, selon l'Institut national de la statistique ; en 2025, elles ont augmenté de 33 % [S67, S68]. La composition de ces importations est plus révélatrice que leur total. En 2023, dernière année déclarée à la base de données UN Comtrade, les demi-produits en acier (SH 7207, principalement des billettes) ont atteint 161 400 t pour 151,7 millions USD, trois fois le niveau de 2019 [S05]. L'Indonésie en a fourni 125 500 t, soit 78 % [S05]. Les importations de ronds à béton, en revanche, étaient marginales, car elles sont interdites depuis 2016, interdiction que la Douane a confirmée en avril 2023 [S69].

C'est le profil d'une industrie qui possède des laminoirs, mais pas assez d'aciéries. Cameroon Tribune, citant l'association professionnelle, rapportait en mai 2026 que la capacité nationale de production de ronds à béton dépasse largement le marché [S06]. Des sources du secteur font état d'environ 1,2 Mt par an de capacités installées de transformation de l'acier fonctionnant à environ la moitié de leur potentiel, et notent que la ferraille locale ne couvre plus qu'environ 40 % des besoins des usines [S32, S33]. En septembre 2026, un grand producteur national a obtenu d'Afreximbank une facilité renouvelable de 40 millions d'euros, destinée selon la presse financière à importer des billettes [S33, S72].

Les billettes sont devenues la première importation d'acier du Cameroun : 161 kt en 2023, le triple de 2019

L'acier semi-fini importé alimente les relamineurs locaux ; en 2023, il représentait environ 53 % du tonnage du chapitre 72



SOURCÉ Figure 3.1. Importations du chapitre 72 du Cameroun et part des billettes, 2019 à 2023.

Source : notes de l'INS Cameroun sur le commerce extérieur pour le tonnage du chapitre 72 [S67, S70, S71] ; UN Comtrade pour la position SH 7207 [S05]. La part des billettes dans le tonnage du chapitre 72 en 2023 (environ 53 %) est dérivée.

Le Cameroun n'est pas novice en matière d'aciérie électrique : en 2023, Cameroon Tribune présentait le four à arc électrique d'un producteur de Douala, d'environ 200 000 t de ronds à béton par an, comme le premier du genre en Afrique centrale [S73]. Mais la fusion nationale reste très inférieure au laminage national.

La conséquence technologique est directe. Un nouveau producteur ajoute le moins de valeur, et prend le plus de risque de marché, s'il construit un relamineur de plus, acheteur de billettes importées. Il ajoute le plus de valeur en élaborant l'acier, l'étape qui manque au pays. Une aciérie dotée d'une coulée continue de billettes dispose en outre d'une option qu'un relamineur n'a pas : elle peut fournir des billettes à d'autres laminaires.

LA CONTRAINTE EST LE FER, NON LE LAMINAGE

Au Cameroun, la capacité de laminage dépasse la demande ; les unités de fer, non. La valeur d'une nouvelle usine sidérurgique tient à son aciérie, et la valeur de son aciérie dépend de la sécurité de ses unités de fer. Tous les choix ultérieurs de ce livre blanc en découlent.

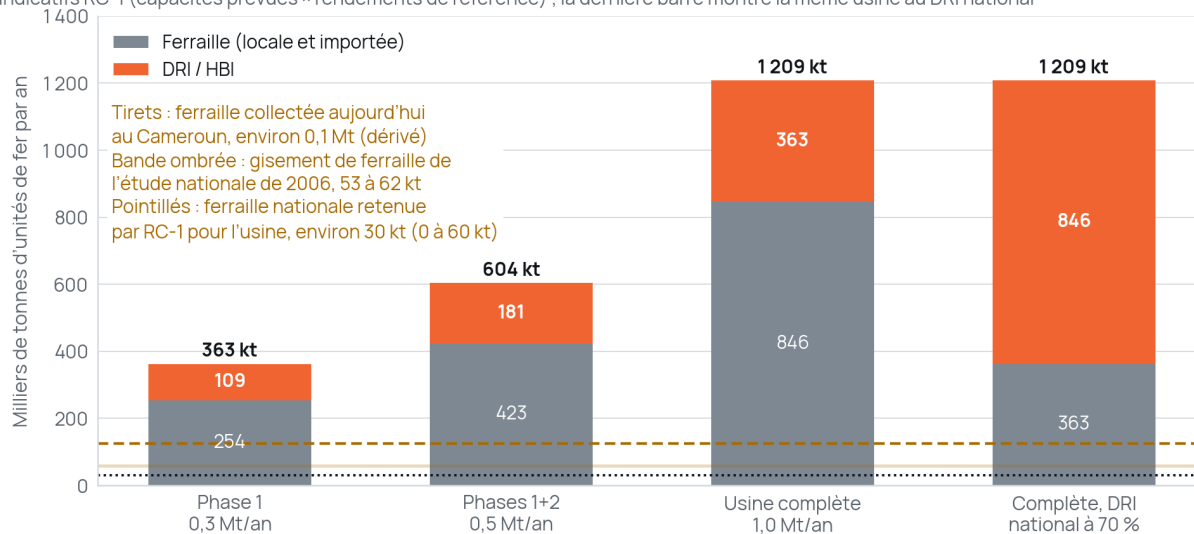
3.2 La ferraille nationale ne représente qu'une fraction des besoins d'une aciérie

L'offre de ferraille croît avec le stock d'acier en usage accumulé par un pays : bâtiments, ponts, véhicules, machines et emballages qui arrivent en fin de vie. Le stock du Cameroun est faible, et sa ferraille l'est aussi. La seule étude nationale chiffrée, publiée en 2007 par des chercheurs de l'ENSPY (École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé), estimait le gisement annuel de ferraille ferreuse entre 53 000 et 61 833 t, dont 53 % étaient collectés par les recycleurs, 29 % par des démantelateurs informels et 15 % par des exportateurs [S13]. Les exportations de ferraille enregistrées sont depuis tombées presque à zéro : 3 675 t en 2019 et 15 t en 2023 [S05]. Selon la presse, les prix d'achat de la ferraille ont augmenté d'environ 30 % sur les douze mois précédant septembre 2026 [S32].

Aucune enquête plus récente n'existe. Un recoupement approximatif est possible : les usines nationales ont produit environ 260 000 t en 2022 [S74] ; si elles consomment environ 1,2 t de charge métallique par tonne de produit (les rendements de RC-1) et que la ferraille locale en couvre environ 40 %, la ferraille collectée dans le pays est de l'ordre de 0,1 Mt par an (dérivé ; annexe A). Cette ferraille est déjà consommée par les usines existantes. Une nouvelle aciérie qui se la disputerait en ferait surtout monter le prix.

À 1 Mt/an, l'aciérie a besoin d'environ 1,2 Mt d'unités de fer par an, dix fois la ferraille collectée au Cameroun

Bilans indicatifs RC-1 (capacités prévues × rendements de référence) ; la dernière barre montre la même usine au DRI national



DÉRIVÉ Figure 3.2. Unités de fer nécessaires aux phases de RC-1, comparées à la ferraille nationale ; la dernière barre représente l'usine complète avec 70 % de DRI national dans la charge.

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), bilans indicatifs [S03] ; étude sur la ferraille [S13] ; données de production et de part de la ferraille [S32, S74] ; calculs à l'annexe A.

La figure 3.2 montre l'ampleur de l'écart. La configuration de référence de Cameroon Steel (RC-1) prévoit 0,3 Mt/an de produits finis en phase 1, puis 0,5 Mt/an et enfin 1 Mt/an [S03]. Avec un rendement métallique de 0,88 t d'acier liquide par tonne enfournée et un rendement de coulée et de laminage de 0,94, ces capacités exigent environ 363 000 t, 604 000 t et 1,21 Mt d'unités de fer par an (dérivé des hypothèses de RC-1) [S03]. Même la phase 1 aurait besoin de trois à quatre fois la ferraille que le Cameroun collecte aujourd'hui, et d'environ six fois le gisement estimé par l'étude nationale de 2006.

3.3 La ferraille, le DRI, le HBI et la fonte brute importés comblent l'écart

Une aciérie électrique implantée près d'un port en eau profonde peut acheter ses unités de fer sur le marché international. Chacune présente un profil différent.

La ferraille importée est l'unité de fer la moins chère par tonne de fer là où elle est disponible, mais l'Afrique dans son ensemble était importatrice nette de ferraille ferreuse en 2025, avec 3,4 Mt importées et 1,2 Mt exportées [S41]. Les grandes régions exportatrices sont l'Union européenne et les États-Unis, qui ont expédié respectivement 16,7 Mt et 11,8 Mt en 2025, tandis que la Türkiye en importait 18,8 Mt [S64]. Les prix de la ferraille suivent ces flux, et la qualité de la ferraille importée (cuivre et étain résiduels, densité, contamination) varie fortement.

Le fer de réduction directe et le fer briqueté à chaud sont les unités de fer vierges négociées. Le commerce international de DRI était d'environ 10,8 Mt en 2025 selon les données commerciales, ou d'environ 13,2 Mt en incluant les origines sous sanctions ; la Russie a exporté plus de 2,0 Mt de HBI et l'Inde 1,6 Mt, tandis que les États-Unis, la Türkiye, l'Inde, le Népal et l'Italie étaient les principaux importateurs [S04]. Le HBI a représenté 11,6 Mt, soit 7,7 % de la production mondiale de DRI [S04]. Pour un acheteur sans usine de réduction propre, le HBI est la forme la plus pratique : il peut être transporté avec une ventilation de surface, alors que le DRI froid doit voyager sous atmosphère inerte, car il se réoxyde et s'échauffe spontanément lorsqu'il est mouillé [S14, S15].

La fonte brute marchande offre un fer propre à forte teneur en carbone, qui apporte de l'énergie chimique au FAE [S43]. Son offre est concentrée dans quelques pays exportateurs, et elle porte les émissions du haut fourneau qui l'a produite.

Tableau 3.1 Options d'unités de fer pour l'aciérie de Kribi, par rôle et par risque

Option	Rôle dans la charge	Profil de qualité	Approvisionnement et logistique	Principal risque	Place dans la trajectoire
Ferraille nationale	Charge de base lorsqu'elle est disponible	Variable ; tri, broyage et contrôle nécessaires	Environ 0,1 Mt collectée par an (dérivé), déjà utilisée par les usines existantes ; RC-1 retient environ 30 000 t par an pour l'usine (0 à 60 000) [S03]	Concurrence et prix ; qualité	Achat lorsqu'il est rentable ; soutien à la collecte formelle
Ferraille importée	Charge de base	Selon la catégorie ; résiduels variables	Expéditions en vrac ou en conteneurs par Kribi	Volatilité des prix ; résiduels	Principale source de ferraille en phase 1
HBI importé	Fer propre pour diluer les résiduels et stabiliser la composition	Métallisation de 94 % ; briquettes denses [S15]	Négocié à l'international ; cales ventilées [S15]	Prix ; concentration des fournisseurs	20 à 50 % de la charge en phase 1 (hypothèse RC-1) [S03]
DRI froid importé	Comme le HBI	Métallisation de 92 à 96 % [S14]	Transport sous gaz inerte ; stockage couvert et sec [S14]	Réoxydation, risque d'incendie	Seulement si le HBI n'est pas disponible
Fonte brute	Carbone et fer propre	3,5 à 4,5 % de C [S43]	Peu d'exportateurs	Prix ; émissions du haut fourneau	Ajout d'appoint
DRI national (Kribi)	Principale unité de fer vierge	Dépend de la gangue des boulettes (chapitre 4)	Enfournement à chaud possible	Maturité du minerai, du gaz et de l'usine de bouletage	Phase ultérieure, sous réserve du jalon du chapitre 10

Source : Cameroon Steel ; [S03, S04, S14, S15, S41, S43, S64].

3.4 Comment les unités de fer modifient les performances de l'aciérie

Le choix des unités de fer n'est pas seulement une question d'approvisionnement ; il modifie le fonctionnement du four.

La ferraille est déjà métallique et fond avec le moins d'énergie, mais ses éléments résiduels (cuivre, étain, nickel, chrome) ne peuvent être éliminés dans le four et s'accumulent à chaque cycle de recyclage. Pour le rond à béton, ces résiduels sont tolérables dans certaines limites ; pour le fil machine destiné au tréfilage fin, ils comptent davantage. Le DRI et le HBI diluent les résiduels, car ils n'en contiennent presque pas.

Le DRI et le HBI apportent de la gangue (silice et alumine du minerai) et un peu d'oxyde de fer non réduit. Le four doit fondre cette gangue et la fluxer avec de la chaux, ce qui augmente le volume de laitier, l'énergie électrique et l'usure des réfractaires, et réduit le rendement métallique. La référence ENERGIRON indique que chaque tranche supplémentaire de 10 % de DRI dans la charge ajoute environ 14,5 kWh par tonne d'acier liquide (chapitre 5) [S20]. Cette pénalité est le prix de l'indépendance vis-à-vis de la ferraille.

La fonte brute et le carbone du DRI apportent de l'énergie chimique lorsqu'ils sont oxydés par l'oxygène injecté, ce qui compense en partie la pénalité électrique et contribue à former le laitier moussant qui protège les parois du four.

L'hypothèse de planification de RC-1 est que le DRI ou le HBI importé représente environ 30 % de la charge de la phase 1, dans une fourchette de 20 à 50 %, le solde étant de la ferraille [S03]. Sur cette base, la phase 1 consommerait environ 109 000 t de DRI ou de HBI et 254 000 t de ferraille par an (dérivé) [S03]. Comme la ferraille nationale est rare et déjà utilisée, RC-1 suppose que l'usine ne pourra en acheter qu'environ 30 000 t par an, dans une fourchette de 0 à 60 000 t bornée par l'estimation nationale de 2006 du gisement de ferraille [S03,

S13] ; environ 224 000 t de ferraille, et la totalité du DRI ou du HBI, seraient importées. Une configuration qui reposerait sur plus d'environ 60 000 t par an de ferraille nationale ne serait pas réalisable au vu des données actuelles. RC-1 estime le tonnage entrant au port à environ 351 000 t par an en phase 1 pour les charges métalliques et les consommables importés (dérivé) [S03].

UNE ACIÉRIE CÔTIÈRE PEUT ACHETER SON FER AU MONDE ENTIER ; UNE ACIÉRIE QUI PRODUIT SON PROPRE FER À PARTIR DE MINÉRAI CAMEROUNAIS GARDE LA VALEUR AJOUTÉE, ET LES DEVISES, AU PAYS.

Cameroon Steel, trajectoire technologique

3.5 La qualité et la préparation de la ferraille déterminent le rendement

La ferraille n'est pas un produit unique. Elle arrive sous forme de ferraille lourde de démolition, de tôles légères et d'emballages, de tournures et copeaux d'usinage, et de ferraille broyée issue des véhicules et appareils en fin de vie. Chaque catégorie a sa densité, sa propreté et sa teneur en résiduels, et le rendement de l'aciérie, sa consommation d'énergie et son temps de chargement dépendent du mélange. Une ferraille dense remplit le four en moins de chargements : un grand four moderne présenté en 2026 est conçu pour fonctionner avec deux paniers, pour des densités de ferraille descendant jusqu'à 550 kg/m³ [S75]. Une ferraille légère, sale ou humide exige davantage de chargements, d'énergie et de traitement des fumées.

La préparation fait donc partie de la conception de l'aciérie. Un parc à ferraille doit disposer d'espace pour séparer les catégories, de cisailles ou de presses pour couper et compacter les matériaux trop grands ou trop légers, d'électroaimants et de ponts roulants pour composer les paniers selon une recette, et d'un contrôle à l'entrée pour détecter les conteneurs scellés, les explosifs et les sources radioactives, risques classiques du négoce de la ferraille. La ferraille importée doit être achetée selon des spécifications de catégories reconnues et contrôlée à l'arrivée ; la ferraille nationale, en grande partie collectée de manière informelle [S13], devra être triée et nettoyée avant de pouvoir être enfournée sans danger.

3.6 Recevoir les unités de fer par Kribi

Comme la plupart des unités de fer de la phase 1 seront importées, la chaîne des charges métalliques de l'usine commence au port. Le Port Autonome de Kribi a inauguré son deuxième terminal à conteneurs, doté d'un quai de 715 m et d'un tirant d'eau de 16 m, en mai 2025 [S76]. Un terminal minéralier de 125 Mt par an a fait l'objet d'un protocole d'accord signé le 4 novembre 2025 [S37], et en mars 2026 le directeur général du port prévoyait l'achèvement des terminaux minéralier et pétrolier d'ici cinq à six ans [S38]. La phase 1 s'appuie donc sur les terminaux existants de marchandises diverses et de conteneurs ; le livre blanc 02 examine la capacité du port pour le vrac. Le HBI et la ferraille voyagent en vraquiers ou en conteneurs ; tous deux exigent un stockage couvert ou bien drainé, au port comme à l'usine. RC-1 estime que la phase 1 ferait entrer environ 351 000 t par an de charges métalliques et de consommables importés, soit environ 74 camions par jour si tous les mouvements se font par la route avant la mise en place d'un embranchement ferroviaire (dérivé) [S03]. Le plan de masse réserve un emplacement pour un embranchement ferroviaire et un corridor logistique [S03]. Lorsqu'un module de réduction directe sera construit, la même chaîne logistique traitera environ 1,45 t de boulettes par tonne de DRI (chapitre 4).

3.7 Une stratégie des charges métalliques, et non un fournisseur unique

La sécurité des unités de fer sera l'un des principaux risques d'exploitation de l'aciérie de Kribi, et elle peut être maîtrisée par un petit nombre de pratiques rigoureuses.

Deux sources pour chaque unité de fer. La phase 1 devrait être approvisionnée par des contrats à terme avec au moins deux fournisseurs pour la ferraille et deux pour le HBI, de régions différentes, avec des achats ponctuels en complément. Cela réduit l'exposition à un fournisseur, à une route maritime ou à un régime de sanctions unique.

Un stockage dimensionné pour les perturbations. Le HBI et le DRI doivent être stockés au sec et à couvert ; les parcs à ferraille ont besoin d'espace pour le classement et la préparation. RC-1 prévoit en phase 1 un parc à ferraille et à charges métalliques doté d'un stockage couvert pour le DRI et le HBI [S03].

La qualité dès l'entrée. Chaque livraison doit être échantillonnée pour la métallisation, le carbone et la gangue (pour le DRI et le HBI) ou contrôlée et classée (pour la ferraille), et les résultats rattachés aux coulées dans lesquelles la matière est utilisée (chapitre 8).

Une collecte nationale formelle. Soutenir une filière formelle de collecte et de préparation de la ferraille, avec ponts-basculés, cisailles et manutention sûre, améliore la qualité et la traçabilité et garde la ferraille nationale au Cameroun.

Une voie claire vers le fer national. L'étape décisive consiste à produire du DRI à Kribi à partir de minerai camerounais. La convention minière de Cameroon Mining Company, société sœur de Cameroon Steel et titulaire du permis de Mbalam [S77], prévoirait, selon la presse, la transformation locale de 15 % de la production ; le même article présente Cameroon Steel comme le pôle sidérurgique national du programme [S36]. Le chapitre 4 examine ce qu'il faut faire subir au minerai avant que cette clause puisse alimenter un four à cuve.

3.8 Ce que le bilan des charges métalliques implique pour la trajectoire

Le bilan des charges métalliques explique la forme de la trajectoire. La phase 1 peut être construite et exploitée avec des unités de fer achetées, car une aciérie de 0,3 Mt/an en consomme environ 0,36 Mt par an, quantité que le marché international peut fournir. À 1 Mt/an, le besoin passe à environ 1,2 Mt par an. Acheter durablement cette quantité exposerait l'usine aux prix à l'importation, au fret et au risque de change pour l'essentiel de ses coûts ; en produire une grande partie au Cameroun conserverait la valeur ajoutée et réduirait les importations. La figure 3.2 montre qu'avec 70 % de DRI national dans la charge, l'usine complète aurait besoin d'environ 846 000 t de DRI et d'environ 363 000 t de ferraille par an (dérivé) [S03]. C'est pourquoi RC-1 réserve un emplacement pour un module de réduction directe d'environ 1 Mt de DRI par an à plein développement, sous réserve de la qualité du minerai et de l'approvisionnement en gaz [S03].

CHAPITRE 4

RÉDUCTION DIRECTE ET QUALITÉ DU MINERAI : LE FER CAMEROUNAIS EXIGE D'ABORD UNE USINE DE CONCENTRATION ET UNE USINE DE BOULETAGE

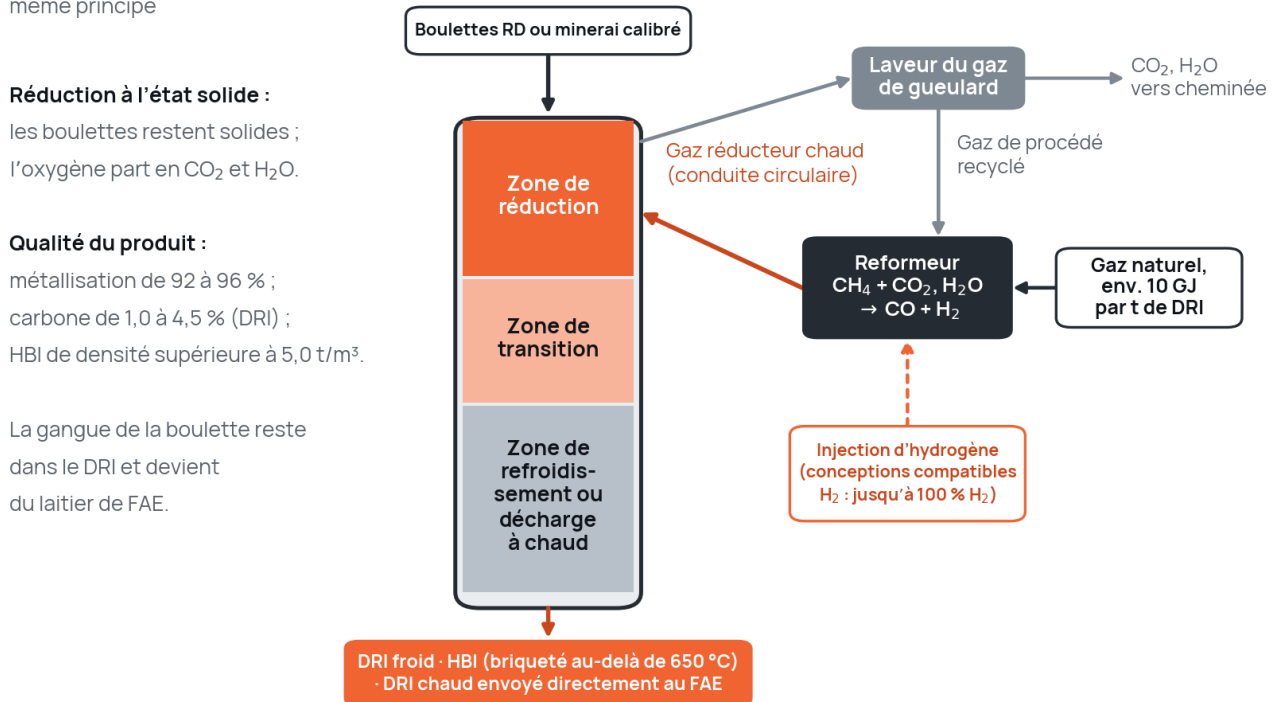
La réduction directe peut transformer le minerai camerounais en fer propre à Kribi, mais seulement une fois ce minerai enrichi jusqu'à la qualité réduction directe. worldsteel indique que les procédés de réduction directe exigent un minerai titrant au moins 64 % de fer [S16], et les boulettes de qualité réduction directe négociées titrent généralement 67 à 68 % de fer, avec peu de gangue [S17]. La réserve publiée de Mbalam titre 62,2 % de fer avec 7,3 % de silice et d'alumine [S18], soit une qualité haut fourneau ; des essais métallurgiques sur l'itabirite de Mbalam ont produit un concentré à 68 % de fer avec 2,0 % de silice et d'alumine [S19], soit une qualité réduction directe. Entre les deux se trouvent une usine de concentration et une usine de bouletage. Un module DRI de 1 Mt/an consommerait aussi environ 9 milliards de pieds cubes (bcf) de gaz naturel par an, soit environ 12 % de la production camerounaise de gaz de 2025 (dérivé). Les fours à cuve compatibles hydrogène permettent de remplacer ce gaz progressivement. Le DRI national est donc une phase ultérieure, aux conditions préalables claires, et non un point de départ.

4.1 Un four à cuve retire l'oxygène de boulettes solides

Une usine de réduction directe au gaz s'organise autour d'un four à cuve vertical (figure 4.1). Des boulettes d'oxyde ou du minerai calibré sont chargés au sommet à travers un sas étanche au gaz et descendent par gravité. Un gaz réducteur chaud, obtenu par reformage du gaz naturel en un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone, entre par une conduite circulaire à la base de la zone de réduction et remonte à contre-courant de la charge. À son passage, il arrache l'oxygène de l'oxyde de fer, qui repart sous forme de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. Le « gaz de gueulard » épuisé est épuré, recyclé vers le reformeur et en partie brûlé comme combustible. Sous la zone de réduction, le fer soit refroidit dans une zone de refroidissement et sort sous forme de DRI froid, soit est déchargé à chaud et briqueté en HBI, ou acheminé directement vers un four électrique voisin sous forme de DRI chaud.

Un four à cuve au gaz retire l'oxygène de boulettes solides sans les fondre

Schéma simplifié de type MIDREX ; les usines de type ENERGIRON diffèrent par la boucle de gaz et la pression, mais suivent le même principe



ILLUSTRATIF Figure 4.1. Four à cuve au gaz simplifié (type MIDREX). Les usines de type ENERGIRON utilisent une boucle de gaz et une pression différentes, mais le même principe de réduction.

Source : Cameroon Steel, d'après les descriptions de procédé de Midrex [S22] et d'ENERGIRON [S20] ; propriétés des produits selon l'IIMA [S14, S15].

Deux caractéristiques rendent le procédé attrayant pour le Cameroun. Il utilise du gaz naturel plutôt que du charbon à coke ; et le gaz réducteur d'une usine au gaz naturel est déjà riche en hydrogène. Lors d'essais en laboratoire de Midrex représentatifs d'un fonctionnement au gaz naturel, le gaz réducteur contenait environ 55 % d'hydrogène, 36 % de monoxyde de carbone, 5 % de dioxyde de carbone et 4 % de méthane [S22]. Évoluer vers l'hydrogène est donc un changement de degré, et non de nature.

La qualité du produit est fixée par la charge. Un four à cuve moderne livre un DRI métallisé entre 92 et 96 % [S14], mais il ne peut pas éliminer la gangue. Un DRI produit à partir de minerai titrant 65,5 à 68 % de fer contient 3,9 à 8,4 % de gangue [S14]. Cette gangue devient du laitier dans le four électrique, où elle coûte de l'électricité, de la chaux, des réfractaires et du rendement.



ILLUSTRATIF Vue d'illustration. Image générée de boulettes d'oxyde de fer, l'alimentation habituelle d'un four à cuve de réduction directe ; il ne s'agit pas d'une photographie d'un projet, d'un lieu ou d'une personne réels.

4.2 La charge de qualité réduction directe est rare, et se raréfie

Le document de worldsteel sur la politique climatique relève que les procédés actuels de réduction directe exigent un minerai à haute teneur, de 64 % de fer ou plus [S16]. En pratique, le marché maritime de la qualité réduction directe porte sur des teneurs plus élevées : les principales matières de qualité réduction directe décrites par l'IEEFA titrent environ 67 à 68 % de fer, avec peu de silice et d'alumine [S17]. Seuls environ 31 % de l'offre mondiale de boulettes de qualité réduction directe provenaient du marché maritime en 2024 ; le reste était produit et consommé régionalement [S17].

La demande de ces matières augmente plus vite que l'offre. Selon l'IEEFA, BloombergNEF prévoit un déficit de boulettes maritimes de qualité réduction directe de 15 Mt par an d'ici 2030, porté à 133 Mt par an d'ici 2040, et Midrex a signalé un déficit possible pouvant atteindre 16,4 Mt par an d'ici 2034 [S17]. Agora Industry parvenait à une conclusion semblable en 2023, en avertissant que l'offre de minerai de qualité réduction directe serait en retard sur la demande d'ici 2030 [S78]. Pour Cameroon Steel, ce constat joue dans les deux sens. Il signifie que les boulettes importées de qualité réduction directe pourraient devenir chères et disputées, de sorte qu'un plan qui en dépendrait pendant des décennies serait fragile. Il signifie aussi qu'une source camerounaise de concentré de qualité réduction directe aurait de la valeur en soi, pour l'usine de Kribi comme à l'exportation.

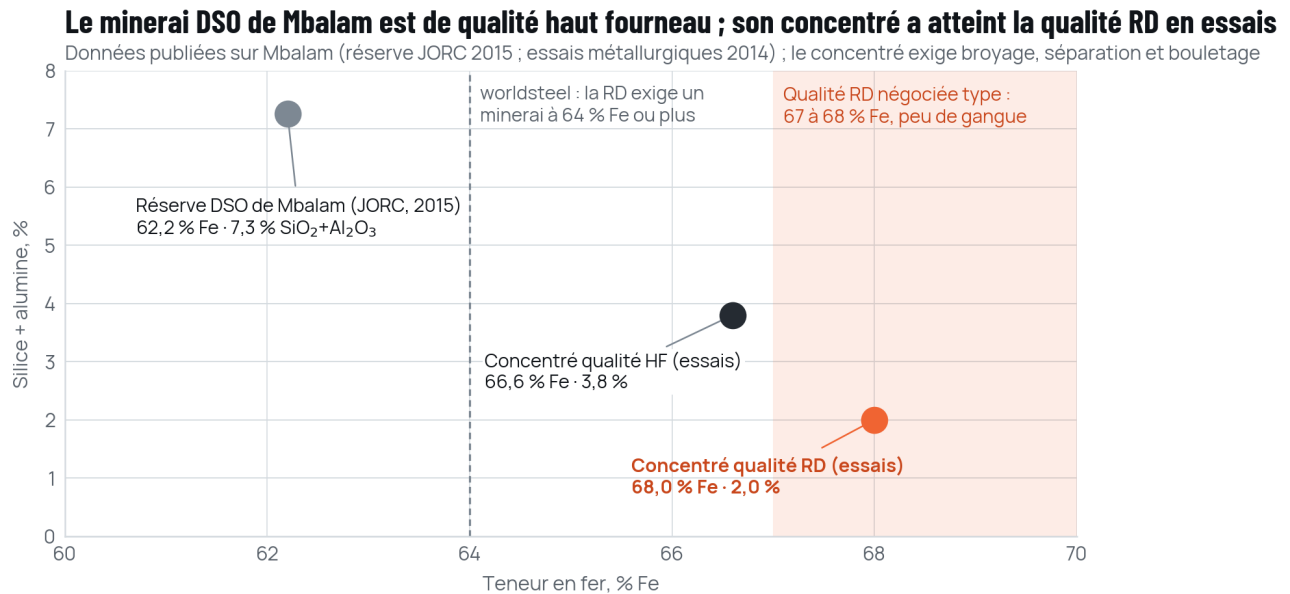
UN FOUR À CUVE NE PEUT PAS ÉLIMINER LA GANGUE. CHAQUE POINT DE SILICE DE LA BOULETTE SE PAIE UNE SECONDE FOIS DANS LE FOUR ÉLECTRIQUE.

Cameroon Steel, trajectoire technologique

4.3 Ce que disent les données publiées sur le minerai camerounais

Le Cameroun compte plusieurs gisements de minerai de fer à des stades différents. Le plus étudié est Mbalam, dont le permis d'exploitation est détenu par Cameroon Mining Company, société sœur de Cameroon Steel [S77]. Le seul jeu de données conforme à un code de déclaration pour Mbalam a été publié selon le code JORC par le précédent titulaire du permis en 2015. Il fait état d'une réserve probable de 517 Mt titrant 62,2 % de fer, 4,46 % de silice, 2,80 % d'alumine et 0,09 % de phosphore, d'hématite à expédition directe ; d'une ressource complémentaire d'hématite à haute teneur de 805,7 Mt à 57,3 % de fer ; et d'une ressource d'itabirite de 5 638 Mt à 33,4 % de fer [S18]. L'itabirite est une formation ferrifère rubanée dans laquelle de fines hématites ou magnétites alternent avec de la silice ; elle doit être broyée et concentrée avant usage.

Des essais métallurgiques sur l'itabirite de Mbalam, publiés en 2014, ont produit deux concentrés : un produit de qualité haut fourneau à 66,6 % de fer et 3,5 % de silice, et un produit de qualité réduction directe à 68 % de fer, 1,8 % de silice, 0,2 % d'alumine et 0,03 % de phosphore, après broyage à un P80 de 53 µm, avec un rendement massique de 45 % et une récupération du fer de 81 % [S19]. La figure 4.2 situe ces produits par rapport aux seuils de qualité réduction directe.



SOURCÉ Figure 4.2. Produits de Mbalam au regard des seuils de qualité réduction directe : teneur en fer en fonction de la teneur en silice et alumine.

Source : déclaration de réserves JORC, 2015 [S18] ; essais métallurgiques, 2014 [S19] ; seuil de worldsteel [S16] ; qualité réduction directe négociée type [S17].

La figure établit clairement le point central. Le minerai à expédition directe de Mbalam, la matière que le plan minier actuel exportera en premier, est une bonne charge de haut fourneau et d'agglomération, mais il n'est pas de qualité réduction directe : sa teneur en fer est inférieure même au minimum de worldsteel, et sa gangue représente trois à quatre fois celle des boulettes de réduction directe. Le produit de qualité réduction directe n'existe qu'à l'échelle des essais, à partir d'un autre type de minerai qui exige une usine de concentration.

L'état actuel des autres projets camerounais va dans le même sens. Cameroon Mining Company indiquait en décembre 2025 que son usine de traitement aurait une capacité de 3,6 Mt par an, portée à 10 Mt d'ici 2027, les premières exportations étant alors attendues début 2026 [S36, S79] ; en mai 2026, Cameroon Tribune rapportait que des incertitudes pourraient repousser le démarrage à 2027 [S80]. Le projet de magnétite de Kribi-Lobé prévoit un concentré titrant plus de 60 % de fer, et ses exportations ont été reportées à juillet 2027 [S81]. Aucun de ces plans, tels que publiés, ne prévoit de concentré de qualité réduction directe ni d'usine de bouletage.

Tableau 4.1 Produits de minerai de fer camerounais au regard des exigences de la réduction directe

Produit	Fer, %	Silice + alumine, %	Statut	Qualité RD ?
Boulette RD négociée type	67 à 68	Faible	Commercial	Référence [S17]
Minimum de worldsteel pour les procédés RD	64	Non précisé	Prise de position	Seuil [S16]
Minerai à expédition directe de Mbalam (réserve probable JORC, 2015)	62,2	7,26	Démarrage minier attendu en 2026 ou 2027	Non : qualité haut fourneau et agglomération [S18, S80]

Produit	Fer, %	Silice + alumine, %	Statut	Qualité RD ?
Itabirite de Mbalam, concentré haut fourneau (essais, 2014)	66,6	3,8	Essais seulement	Limite : gangue trop élevée [S19]
Itabirite de Mbalam, concentré RD (essais, 2014)	68,0	2,0	Essais seulement ; ni usine de concentration ni usine de bouletage prévues	Oui, sur spécification [S19]
Concentré de magnétite de Kribi-Lobé (prévu)	Plus de 60	Non publié	Exportations reportées à juillet 2027	Non, tel que prévu [S81]

Source : selon les renvois ; appréciation de Cameroon Steel pour la dernière colonne.

LE MINÉRAI EXISTE ; LE PRODUIT DE QUALITÉ RÉDUCTION DIRECTE, PAS ENCORE

Le Cameroun dispose de vastes ressources en fer, et des essais montrent que l'itabirite de Mbalam peut être enrichie en un concentré de réduction directe à 68 % de fer. Aucune usine de concentration ni aucune usine de bouletage capable de fabriquer ce produit n'est encore prévue. Tant qu'elles ne seront pas construites et éprouvées, l'aciérie de Kribi doit être conçue pour fonctionner avec de la ferraille et du DRI ou du HBI importés, avec un emplacement réservé pour un module de réduction directe.

4.4 Du minerai à la boulette : trois usines avant l'aciérie

Transformer l'itabirite en DRI exige trois étapes industrielles avant le four à cuve (figure 4.3).

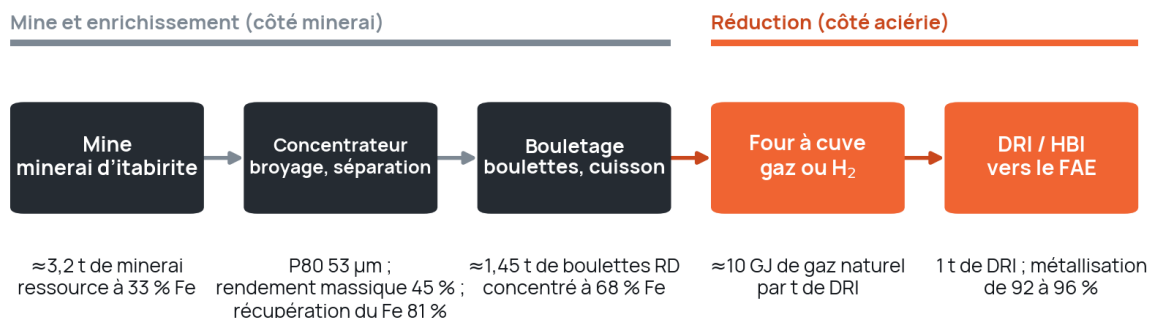
Extraction et concassage. L'itabirite, à environ 33 % de fer, est extraite, concassée et broyée. Comme la roche est en grande partie de la silice, il faut déplacer de gros tonnages : avec le rendement massique de 45 % des essais, il faut environ 2,2 t de minerai par tonne de concentré (dérivé) [S19].

Concentration. Le minerai broyé, à un P80 de 53 µm dans les essais de Mbalam, est séparé en un concentré riche en fer et en stériles riches en silice [S19]. Le broyage fin consomme beaucoup d'électricité et les résidus exigent un stockage aménagé. Ces coûts relèvent de la partie minière de la chaîne et doivent être convenus entre la mine et l'aciérie.

Bouletage. Le concentré fin ne peut pas être chargé en poudre dans un four à cuve. Il est mélangé à un liant, roulé en boulettes crues de la taille d'une bille, puis durci par cuisson (induration) en boulettes assez résistantes pour supporter la descente dans la cuve. Une usine de réduction directe consomme environ 1,45 t de boulettes par tonne de DRI, d'après les chiffres de BloombergNEF sur les boulettes et le DRI cités par l'IEEFA (dérivé) [S17].

Transformer l'itabirite camerounaise en DRI exige trois usines avant l'aciérie

Flux de matière indicatif par tonne de DRI, d'après les essais publiés sur Mbalam et des ratios industriels



Dérivé : minéral par t de DRI = boulettes par t de DRI × rendement massique ; liant, humidité et pertes de bouletage ignorés.

Boulettes par t de DRI ≈ 1,45 selon les chiffres BNEF cités par l'IEEFA (2026). Essais : itabirite de Mbalam, 2014. Gaz : référence ENERGIRON, env. 10 GJ par t de DRI.

DÉRIVÉ Figure 4.3. De l'itabirite au DRI : flux de matière indicatif par tonne de DRI.

Source : Cameroon Steel, d'après les essais de Mbalam [S19], le ratio de boulettes déduit de [S17], la consommation de gaz [S20] et la métallisation du DRI [S14]. Liant, humidité et pertes de l'usine de bouletage ignorés ; annexe A.

À l'échelle de la réserve de RC-1, environ 1 Mt de DRI par an [S03], la chaîne exigerait environ 1,45 Mt de boulettes de qualité réduction directe et, à partir d'itabirite, de l'ordre de 3,2 Mt de minéral par an (dérivé). Ces quantités sont faibles au regard des volumes d'exportation prévus pour Mbalam : c'est pourquoi la clause de transformation locale de 15 % de la convention de Cameroon Mining Company [S36] pourrait en principe les couvrir plusieurs fois. La difficulté ne tient pas au volume, mais à l'investissement et à la preuve technique nécessaires pour une usine de concentration et une usine de bouletage produisant un produit de qualité réduction directe.

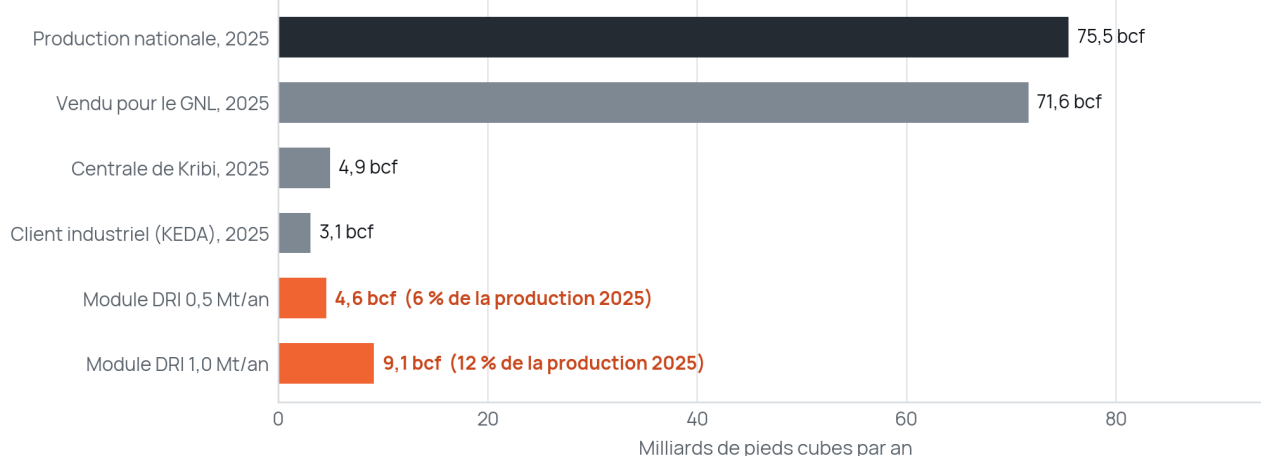
4.5 Le gaz est la deuxième condition préalable

Une usine de réduction directe au gaz consomme environ 10 GJ de gaz naturel par tonne de DRI selon la référence ENERGIRON [S20] ; la meilleure performance durable publiée, chez Suez Steel en Égypte, est d'environ 9,2 GJ [S48]. À 10 GJ par tonne, un module de 1 Mt/an consommerait environ 10 PJ de gaz par an, soit environ 9,1 bcf ; un module de 0,5 Mt environ 4,6 bcf (dérivé ; conversion à l'annexe A).

Le Cameroun a produit 75,5 bcf de gaz naturel en 2025, presque entièrement à partir du gisement de Sanaga Sud, au large de Kribi ; environ 95 % ont été vendus pour alimenter une unité flottante de liquéfaction, 4,9 bcf sont allés à la centrale de Kribi à environ 1 810 à 1 858 FCFA par millier de pieds cubes et 3,1 bcf à un client industriel à 3 135 FCFA [S21]. L'unité de liquéfaction a quitté le Cameroun en juillet 2026, au terme de son affrètement [S82] ; le livre blanc 05 (chapitres 6 et 7) analyse ce que ce départ implique pour l'approvisionnement de l'industrie en gaz. À première vue, du gaz se trouve donc disponible près de Kribi. Mais les réserves certifiées restantes du gisement en production ne sont pas publiques, et la principale ressource non développée, la découverte transfrontalière de Yoyo-Yolanda, d'environ 2 500 milliards de pieds cubes, exigerait environ 4 milliards USD de développement et n'avait fait l'objet d'aucune décision finale d'investissement en juillet 2026 [S35].

Un module DRI de 1 Mt/an consommerait environ 9 bcf de gaz par an, 12 % de la production de 2025

Ventes SNH 2025 ; DRI à environ 10 GJ par t. L'essentiel de la production 2025 alimentait une unité GNL partie de Kribi en juillet 2026



DÉRIVÉ Figure 4.4. Besoin en gaz d'un module DRI comparé à la production camerounaise de gaz de 2025 et à ses principaux usages.

Source : SNH, Données pétrolières 2025 [S21] ; besoin en gaz du DRI d'environ 10 GJ par tonne [S20] ; départ de l'unité flottante de liquéfaction [S82]. L'annexe A donne la conversion.

Aux prix de 2025 payés par le client industriel de la SNH et par la centrale, le gaz coûterait environ 27 à 51 USD par tonne de DRI (dérivé au chapitre 7 du livre blanc 05, pour 9,2 à 10 GJ par tonne, aux taux de change trimestriels de la SNH ; pour 10 GJ et au taux de planification de 600 FCFA par USD, environ 17 000 à 29 000 FCFA, soit 28 à 48 USD, annexe A) [S03, S21]. C'est compétitif à l'échelle internationale, mais seulement si ce gaz peut être contracté pour toute la durée de vie de l'usine. Un module de réduction directe exige donc une réserve audité, un contrat de vente de gaz de long terme et une fiscalité gazière clarifiée avant toute décision finale d'investissement.

4.6 Les fours à cuve compatibles hydrogène gardent ouverte l'option de la décarbonation

La réduction directe est la seule filière à partir de minerai dont les émissions peuvent être réduites progressivement sans reconstruire l'usine. Midrex conçoit ses usines MIDREX Flex pour fonctionner avec tout mélange allant de 100 % de gaz naturel à 100 % d'hydrogène ; sur la plus grande partie de cette plage, l'hydrogène est ajouté en aval du reformeur, et le four à cuve lui-même n'exige aucune modification fondamentale, les réfractaires existants convenant à un fonctionnement à l'hydrogène [S22]. En juin 2025, un promoteur malaisien a retenu cette technologie pour une usine de HBI de 2,0 Mt/an dont le démarrage est prévu en 2029, avec un fonctionnement initial sur un mélange de gaz et d'hydrogène [S83]. ENERGIRON fait état de réductions de CO₂ d'environ 86 % par rapport à la filière du haut fourneau en fonctionnement à 100 % d'hydrogène [S20]. En Allemagne, le projet Power4Steel de Saarlouis et Dillinger prévoit une baisse des émissions de 1,921 t CO₂e par tonne sur la filière du haut fourneau à 1,098 t avec une filière DRI-FAE au gaz, et à 0,339 t avec de l'hydrogène et de l'électricité verts [S84].

La limite est l'approvisionnement en hydrogène. Réduire une tonne de DRI avec de l'hydrogène seul exige environ 54 kg d'hydrogène [S85]. Avec une consommation d'électrolyseur d'environ 50 MWh par tonne d'hydrogène (hypothèse comprise dans les fourchettes publiées ; annexe A), un module de 1 Mt/an fonctionnant à 100 % d'hydrogène aurait besoin d'environ 2,7 TWh d'électricité par an, soit environ un tiers de la production électrique totale du Cameroun, 8,12 TWh en 2025 [S51] (dérivé). Ce n'est pas une option de court terme. Le potentiel hydroélectrique du Cameroun est considérable, environ 115 TWh par an, dont environ 4 % seraient développés selon l'International Trade Administration des États-Unis [S86], et la première usine africaine de fer vert

alimentée par des énergies renouvelables a ouvert en Namibie en avril 2025 [S87]. Une voie raisonnable consiste à spécifier un four à cuve compatible hydrogène, à démarrer au gaz naturel et à incorporer de l'hydrogène à mesure que l'électricité bas carbone devient disponible.

4.7 Ce qu'enseignent les usines de réduction directe existantes en Afrique

L'Afrique n'est pas novice en matière de réduction directe. Selon les chiffres de worldsteel, le continent a produit 16,3 Mt de DRI en 2025, avec en tête l'Égypte (6,6 Mt) et l'Algérie (environ 5,0 Mt), suivies de la Libye (1,7 Mt) et, selon les estimations de worldsteel, de l'Ouganda (1,5 Mt), du Kenya (1,0 Mt) et de la Tanzanie (0,2 Mt) [S41]. Les statistiques d'usines de Midrex, qui couvrent les usines de son recensement, placent l'Algérie en tête (6,70 Mt) devant l'Égypte (6,06 Mt) et attribuent 67,7 Mt au Moyen-Orient et à l'Afrique du Nord réunis [S04]. Les deux séries diffèrent par leur couverture et par leur manière d'estimer les usines non déclarées ; ce livre blanc précise donc la base chaque fois qu'il cite un chiffre national. Les usines d'Afrique du Nord sont des fours à cuve au gaz qui fonctionnent avec des boulettes de réduction directe importées ou nationales et alimentent des aciéries électriques voisines, soit exactement la configuration envisagée pour Kribi dans sa phase ultérieure.

Le bilan comporte aussi des mises en garde. Fin 2025, trois grandes usines africaines de réduction directe étaient à l'arrêt : Delta Steel à Warri au Nigeria (1,02 Mt par an, construite en 1982), l'usine de Saldanha d'Arcelor-Mittal South Africa (0,80 Mt) et ESISCO en Égypte (1,76 Mt) [S04]. Un four à cuve est un procédé continu qui exige un approvisionnement régulier en boulettes et en gaz, une aciérie ou un marché d'exportation qui absorbe sa production chaque jour, et les compétences nécessaires pour le maintenir en marche. Lorsque l'un de ces éléments fait défaut, l'usine s'arrête, et redémarrer un module à l'arrêt coûte cher. La leçon pour le Cameroun n'est pas d'éviter la réduction directe, mais de ne la construire que lorsque sa chaîne d'approvisionnement, son contrat de gaz et son aciérie aval sont déjà sécurisés : c'est la logique du jalon décrit au chapitre 10.

4.8 Dimensionner le module de réduction directe

La taille des modules de réduction directe a augmenté régulièrement : le premier module MIDREX MEGAMOD, de 1,0 Mt par an, a été construit pour JSW à Dolvi en Inde, et le plus grand module unique, de 2,5 Mt par an, a démarré chez Tosyali Algérie en 2018 [S88]. Les modules sont désormais proposés de 0,25 Mt par an (le micro-module ENERGIRON ZR de Mutún, en Bolivie, mis en service en octobre 2025) à 2,5 Mt par an dans une seule cuve, les modules africains se situant entre 0,65 et 2,5 Mt [S04]. RC-1 réserve un emplacement pour un module d'environ 1 Mt de DRI par an, dans une fourchette de 0,8 à 1,1 Mt, dimensionné selon les besoins en unités de fer de l'aciérie à 1 Mt/an et sous réserve de la qualité du minerai et de l'approvisionnement en gaz [S03]. Un premier module plus petit, d'environ 0,5 Mt, diviserait par deux le besoin en gaz et pourrait se justifier si l'approvisionnement en boulettes ou le contrat de gaz sont initialement limités. Dans les deux cas, le module serait placé à côté de l'aciérie, afin que le DRI chaud puisse être chargé directement dans le four, ce qui économise de l'électricité et évite le risque de réoxydation lié au stockage du DRI froid.

4.9 Ce qui doit être acquis avant que Kribi produise son propre fer

Quatre conditions, vérifiées au jalon décrit au chapitre 10, déterminent le moment où le module de réduction directe peut être engagé :

1. **Un concentré de qualité réduction directe démontré à l'échelle pilote.** Un concentré camerounais titrant au moins 67 % de fer, pauvre en silice et en alumine, produit en continu dans une usine pilote à partir d'un corps minéralisé défini, avec des boulettes testées pour leur résistance et leur réductibilité.

2. **Un approvisionnement en boulettes.** Une usine de bouletage à la mine, à Kribi ou chez un tiers, contractée pour la durée de vie du module de réduction directe ; ou un contrat transitoire de boulettes de réduction directe importées.
3. **Du gaz pour la durée de vie de l'usine.** Une réserve audité de manière indépendante et un contrat de vente de gaz de long terme portant sur environ 4,6 à 9,1 bcf par an selon la taille du module, avec un prix et une fiscalité convenus.
4. **Une conception compatible hydrogène et un plan carbone.** Un four à cuve spécifié pour un usage progressif de l'hydrogène, et un système de mesure, de déclaration et de vérification du CO₂ dès le premier jour d'exploitation.

Aucune de ces conditions n'est inhabituelle ; chacune est la norme pour tout projet de réduction directe dans le monde. Prises ensemble, elles expliquent pourquoi le DRI national est la bonne orientation de long terme pour Cameroon Steel, et pourquoi il ne doit pas être une condition du démarrage.



**LE FOUR FOND EN QUELQUES MINUTES CE QUE LE
RÉSEAU DOIT PORTER PENDANT DES ANNÉES :
CONCEVOIR ENSEMBLE L'ARC, LE COMPENSATEUR
ET LA LIGNE.**

Vue d'illustration. Image générée d'une surface d'acier en fusion ; il ne s'agit pas d'une photographie d'un projet, d'un lieu ou d'une personne réels.

CHAPITRE 5

L'ACIÉRIE ÉLECTRIQUE : UN SEUL FOUR DE LA CLASSE 40 T PEUT PORTER L'ESSENTIEL DE LA PHASE 1 SI LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE EST CONÇU AVEC LUI

Un seul four à arc électrique de la classe 40 t, associé à un four-poche et à une coulée continue de billettes, peut porter l'essentiel de la phase 1, mais la totalité de la capacité nominale de 0,3 Mt/an exige une forte disponibilité ou un transformateur plus puissant. À la valeur de planification RC-1 de 450 kWh par tonne d'acier liquide, une coulée d'environ 40 t demande environ 55 minutes de coulée à coulée ; à environ 490 kWh par tonne, valeur haute de planification avec 30 % de DRI ou de HBI dans la charge, environ 59 minutes. La capacité nominale, soit environ 8 000 coulées par an, occupe alors environ 7 300 à 7 900 des 8 760 heures de l'année, et avec 7 000 à 7 700 heures de marche, hypothèse réaliste, l'aciérie livre environ 270 000 à 300 000 t de produits finis (le tout dérivé de la base de planification RC-1) [S03]. Le problème de conception le plus difficile de l'aciérie n'est pas métallurgique mais électrique. Un four à arc appelle une charge importante, aux fluctuations rapides, qui provoque du papillotement de tension et des harmoniques, et le réseau camerounais laisse déjà 150 MW de demande industrielle insatisfaite [S89]. Le four, son compensateur (un SVC ou, de préférence, un STATCOM) et le raccordement en 225 kV doivent être spécifiés comme un seul système dès le départ.

5.1 Une aciérie est un système électrique et une ligne de matière

La figure 5.1 présente l'aciérie comme deux chaînes couplées. La ligne de matière va du parc à ferraille et des silos de DRI ou de HBI au laminoir, en passant par le chargement, le four à arc électrique, la poche, le four-poche et la coulée continue de billettes. La chaîne électrique va de l'alimentation en 225 kV aux transformateurs du four et du four-poche, aux laminoirs et aux utilités, en passant par le poste de l'usine et le compensateur. Les sous-produits quittent le four sous forme de laitier, de fumées et de poussières.

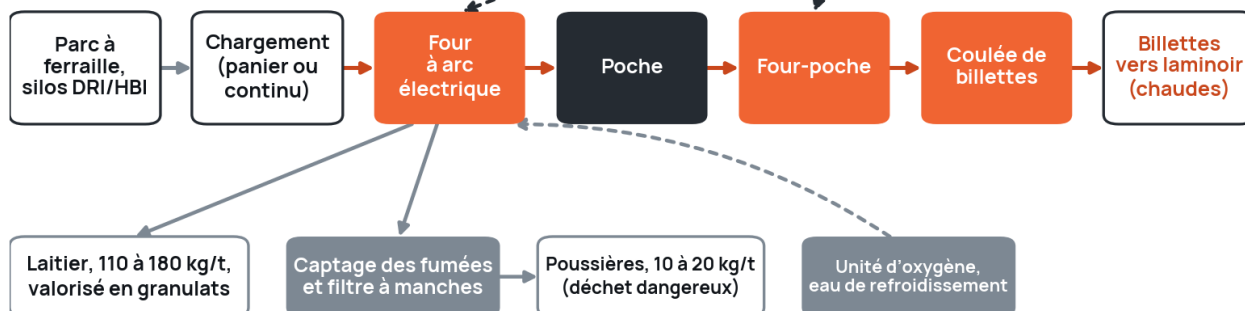
L'aciérie : un système électrique et une ligne de matière à concevoir ensemble

Disposition indicative d'une aciérie à un seul four (phase 1) ; ce n'est pas un plan d'implantation

ÉLECTRICITÉ



MATIÈRE



Références : directives EHS de la SFI pour les aciéries. Le compensateur est raccordé au jeu de barres moyenne tension qui alimente le transformateur du four, afin d'absorber ses variations rapides de puissance réactive avant qu'elles n'atteignent le réseau.

ILLUSTRATIF Figure 5.1. L'aciérie comme système électrique et ligne de matière, avec ses flux de sous-produits.

Source : Cameroon Steel. La fourchette du laitier est la référence de la SFI pour les résidus solides d'un four à arc électrique, pour l'essentiel du laitier [S44] ; celle des poussières est une plage de planification (le document de référence européen indique 10 à 30 kg) [S42].

RC-1, la configuration de référence de Cameroon Steel, définit la phase 1 comme un four à arc électrique de la classe 40 t, un four-poche, une coulée continue de billettes, un chauffage des billettes par induction, un laminier à ronds à béton et un laminier à fil machine à grande vitesse, avec une capacité nominale d'environ 300 000 t par an de produits finis, soit environ 320 000 t d'acier liquide, et une production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t de produits finis [S03]. Ce sont des valeurs de planification ; l'ingénierie d'avant-projet du fournisseur fixera les caractéristiques des équipements.

5.2 Dimensionner le four à partir du tonnage

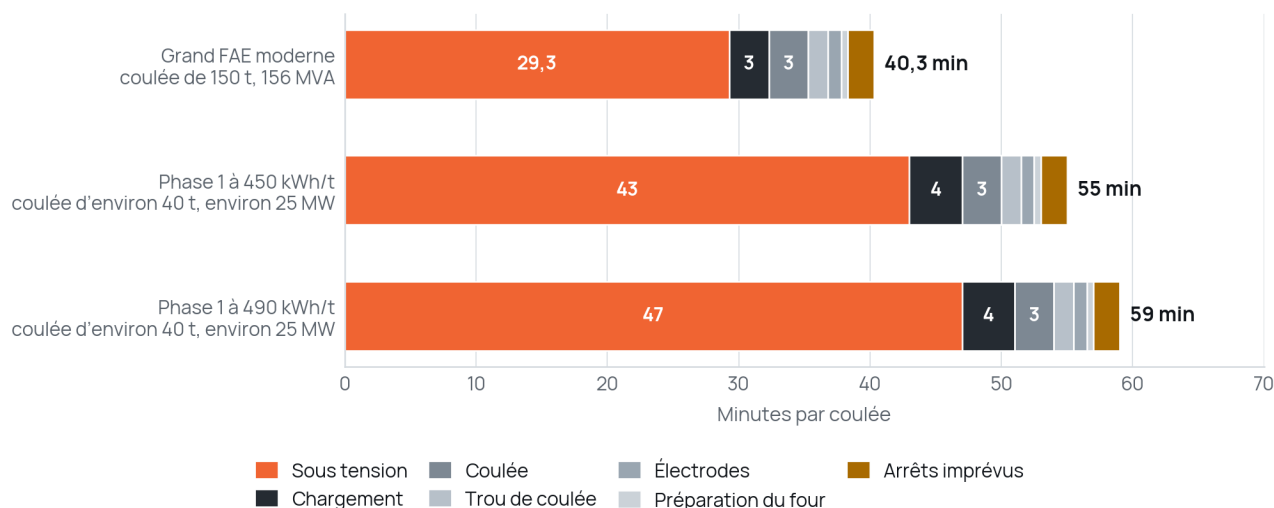
Le dimensionnement du four part du tonnage dont ont besoin la coulée continue et les laminiers, et remonte la chaîne. À la capacité nominale, la phase 1 a besoin d'environ 320 000 t d'acier liquide par an [S03]. Avec des coulées d'environ 40 t, cela représente environ 8 000 coulées par an. La durée de chaque coulée dépend de l'énergie que demande chaque coulée et de la vitesse à laquelle le transformateur peut la fournir. RC-1 retient 450 kWh par tonne, valeur de planification comprise dans la fourchette de la SFI de 347 à 500 kWh [S03, S44]. Lue comme une valeur en tout-ferraille, elle augmente d'environ 14,5 kWh par tonne pour chaque tranche de 10 % de DRI dans la charge [S20], ce qui donne environ 490 kWh par tonne avec les 30 % de DRI ou de HBI prévus. Ce livre blanc retient donc 450 kWh par tonne comme valeur de planification et environ 490 kWh comme valeur haute de planification (tableau 5.1).

Une coulée d'environ 40 t demande environ 18 MWh à 450 kWh par tonne et environ 19,6 MWh à 490 kWh. Un transformateur de four de la classe 30 à 33 MVA, exploité à un facteur de puissance moyen d'environ 0,8, fournit environ 25 MW de puissance active : le temps sous tension est donc d'environ 43 minutes dans le premier cas et d'environ 47 minutes dans le second. En y ajoutant le chargement, la coulée, la préparation du trou de coulée, la

manutention des électrodes, la préparation du four et une marge pour les aléas, soit environ 12 minutes au total, on obtient un temps de coulée à coulée d'environ 55 et 59 minutes. Environ 8 000 coulées de ce type occupent alors environ 7 300 ou 7 900 heures de four, sur les 8 760 heures de l'année (le tout dérivé ; annexe A).

Un four de la classe 40 t demande 55 à 59 minutes par coulée : la capacité nominale occupe 7 300 à 7 900 heures par an

Environ 8 000 coulées à la capacité nominale ; 7 000 à 7 700 heures de marche donnent environ 270 à 300 kt de produits ;
barre du haut : conception publiée de 150 t



DÉRIVÉ Figure 5.2. Décomposition du temps de coulée à coulée : le four indicatif de la phase 1 à 450 et 490 kWh par tonne face à une conception publiée de grand FAE moderne.

Source : phase 1 indicative dérivée de la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification) [S03] et des références énergétiques de la SFI [S44] ; conception de référence publiée par Badische Stahl-Engineering dans La Metallurgia Italiana, juin 2026 [S75].

Un tel taux d'utilisation est exigeant pour une première aciérie à un seul four, sur un réseau qui laisse déjà une partie de la demande industrielle insatisfaite [S89] ; une fourchette de planification réaliste est de 7 000 à 7 700 heures de marche par an. Dans cette fourchette, le four coule environ 305 000 à 336 000 t d'acier liquide à 450 kWh par tonne et environ 285 000 à 313 000 t à 490 kWh. Après les pertes de coulée et de laminage, et dans la limite de la capacité nominale du laminoir, cela donne environ 270 000 à 300 000 t de produits finis (dérivé ; annexe A), soit la production soutenue attendue dans RC-1 [S03]. Un seul four peut donc porter l'essentiel de la phase 1 ; atteindre la pleine capacité nominale exige une forte disponibilité, davantage d'énergie chimique ou un transformateur plus puissant. Livrer 320 000 t d'acier liquide en 7 000 heures à 490 kWh par tonne exigerait un transformateur d'environ 36 à 40 MVA (dérivé). Ce choix relève de l'ingénierie d'avant-projet et de la garantie de capacité du fournisseur, que le jalon 1 exige (chapitre 10).

Quoi qu'il en soit, ce taux d'utilisation explique deux priorités de conception. Premièrement, le temps sous tension domine le cycle : tout ce qui le raccourcit (énergie chimique de l'injection d'oxygène et de carbone, brûleurs, laitier bien moussé, préchauffage de la ferraille ou chargement continu) accroît directement la capacité. Deuxièmement, le four dispose de peu de temps disponible pour des arrêts imprévus : la planification de la maintenance, la pratique des réfractaires et les pièces de rechange pour les transformateurs, les électrodes et les panneaux refroidis à l'eau comptent autant que les caractéristiques nominales.

La comparaison de la figure 5.2 est instructive. Un grand four moderne présenté en juin 2026 associe une coulée de 150 t à un transformateur de 156 MVA, soit environ 1,04 MVA par tonne, et atteint un temps net de coulée à coulée de 40,3 minutes, avec 29,3 minutes sous tension et une productivité de 224 t d'acier liquide par heure [S75]. Le four de la phase 1 présente une puissance spécifique plus faible, qui allonge la coulée mais limite

aussi la perturbation imposée au réseau. Une aciérie de ronds à béton américaine, à Charlotte (Caroline du Nord), exploite un four de 30 à 33 MVA de la même classe de transformateur, avec un four-poche de 18 MVA, sur une alimentation en 100 kV [S23].

Le chargement continu est un moyen éprouvé d'accroître la production et de réduire la consommation d'énergie avec le même transformateur. Le centre d'innovation de la Commission européenne indique que le procédé Consteel, qui préchauffe la ferraille sur un convoyeur à l'aide des fumées du four et l'introduit en continu dans un bain plat, a atteint 321 kWh par tonne chez Pomina au Vietnam, réduit la consommation d'électricité de 10 à 15 % et celle d'électrodes à moins de 1 kg par tonne [S90]. Le DRI et le HBI se prêtent à une alimentation continue par la voûte, ce qui stabilise l'arc.

Tableau 5.1 Paramètres indicatifs de l'aciérie de la phase 1 (valeurs de planification, à confirmer lors de l'ingénierie d'avant-projet)

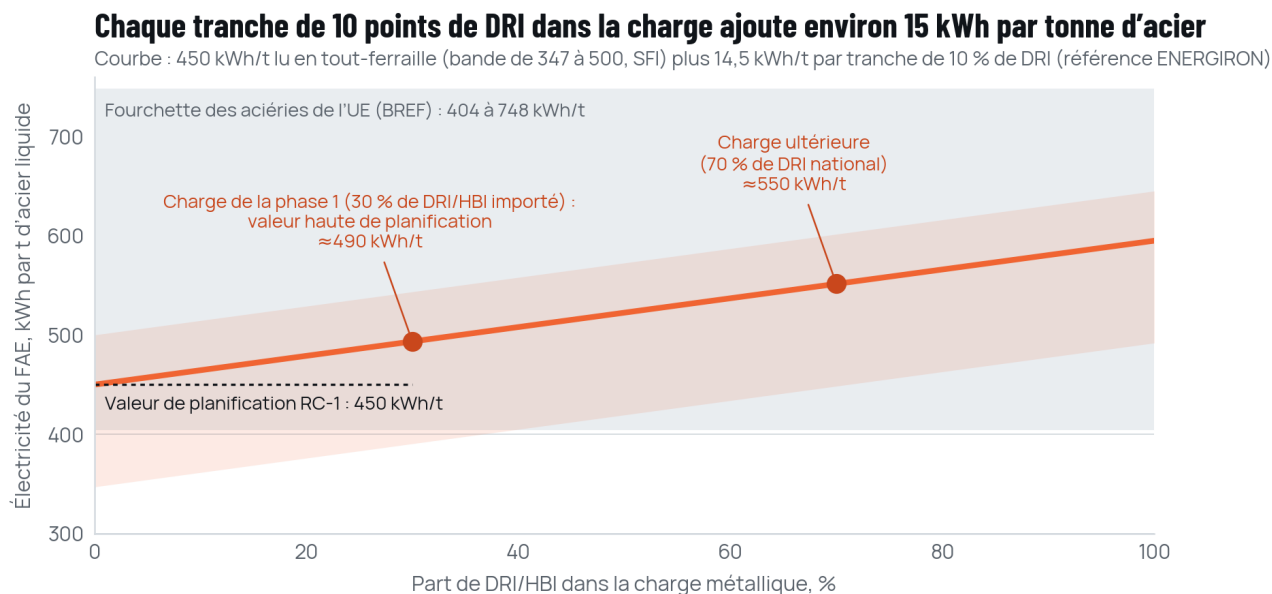
Paramètre	Valeur indicative	Statut	Fondement
Produits finis	Capacité nominale d'environ 300 000 t/an ; production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t/an	Prévu ; dérivé	RC-1 [S03] ; annexe A
Acier liquide	Environ 320 000 t/an à la capacité nominale	Prévu	RC-1 [S03]
Four à arc électrique	Un four de la classe 40 t	Indicatif	RC-1 [S03]
Transformateur du four	Classe 30 à 33 MVA (environ 25 MW de puissance active)	Hypothèse	Annexe A ; classe comme en [S23]
Four-poche	Un, adapté aux coulées du four	Indicatif	RC-1 [S03]
Coulées par an ; temps de coulée à coulée	Environ 8 000 à la capacité nominale ; environ 55 minutes (450 kWh/t) à 59 minutes (490 kWh/t)	Dérivé	Annexe A
Heures de four pour environ 8 000 coulées	Environ 7 300 à 7 900, sur les 8 760 de l'année	Dérivé	Annexe A
Heures de marche pour la planification	7 000 à 7 700 par an, soit 270 000 à 300 000 t/an de produits finis	Hypothèse ; dérivé	Annexe A
Électricité du FAE	450 kWh/t liquide, valeur de planification (fourchette SFI de 347 à 500) ; environ 490 kWh/t, valeur haute de planification avec 30 % de DRI/HBI	Sourcé ; dérivé	[S03, S20, S44]
Électrodes	2 à 6 kg/t (fourchette des aciéries de l'UE)	Référence	[S42]
Oxygène	35 Nm³/t liquide (25 à 45)	Hypothèse	RC-1 [S03]
Rendement métallique	0,88 t liquide par t enfournée (0,85 à 0,91)	Hypothèse	RC-1 [S03]
Résidus solides, pour l'essentiel du laitier	110 à 180 kg/t de produit	Référence	SFI [S44]
Poussières de FAE (gérées comme déchet dangereux)	10 à 20 kg/t liquide, plage de planification (le document de référence européen indique 10 à 30)	Hypothèse	RC-1 [S03] ; [S42]
Appel électrique maximal de la phase 1	Environ 55 MVA (45 à 65)	Hypothèse	RC-1 [S03]

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification) [S03] et références citées.

5.3 L'énergie et les consommables dépendent de la charge

L'électricité est le premier intrant de l'aciérie après les unités de fer. Les aciéries de l'UE consomment de 404 à 748 kWh par tonne d'acier liquide [S42] ; la référence de la SFI est de 347 à 500 kWh [S44]. L'écart reflète la conception du four, la charge et les pratiques. La part de DRI ou de HBI dans la charge en est l'un des principaux

déterminants : la référence ENERGIRON indique que chaque tranche supplémentaire de 10 % de DRI accroît l'électricité du FAE d'environ 14,5 kWh par tonne, car le four doit fondre la gangue et achever la réduction de l'oxyde de fer résiduel [S20]. Rapportée à une base de 450 kWh en tout-ferraille, une charge à 30 % de DRI, hypothèse de planification de la phase 1, demande environ 490 kWh par tonne, valeur haute de planification retenue dans ce livre blanc, et une charge à 70 % de DRI national environ 550 kWh (dérivé) (figure 5.3).



DÉRIVÉ Figure 5.3. Électricité du FAE en fonction de la part de DRI/HBI dans la charge.

Source : Cameroon Steel, d'après la fourchette de la SFI [S44], la pénalité DRI d'ENERGIRON [S20] et la fourchette du BREF de l'UE [S42] ; annexe A.

Le DRI chaud change le calcul. Lorsqu'un module de réduction directe jouxte l'aciérie, le DRI peut être enfourné chaud plutôt que froid, ce qui récupère une partie de l'énergie dépensée dans le four à cuve et évite le risque de réoxydation lié au stockage. C'est l'une des raisons de réserver l'emplacement du module de réduction directe à côté de l'aciérie plutôt qu'à la mine.

Les électrodes en graphite, les réfractaires, la chaux et les ferroalliages complètent la liste des consommables. Les aciéries de l'UE consomment de 2 à 6 kg d'électrodes par tonne [S42] ; le chargement continu peut ramener ce chiffre sous 1 kg [S90]. La plupart de ces consommables seront importés en phase 1, et leur chaîne d'approvisionnement relève de la même stratégie d'achat que les unités de fer (chapitre 3).

5.4 Le four-poche et la coulée continue rythment l'aciérie

Le four-poche découple l'affinage de la fusion. Pendant que la coulée suivante fond dans le FAE, la précédente est réchauffée, alliée, désulfurée et épurée dans la poche. Un four-poche élève généralement la température d'environ 4 °C par minute [S46] : un four-poche adapté à des coulées d'environ 40 t dispose donc d'une marge ample pour maintenir l'acier à la température de coulée et absorber de petits décalages entre le four et la coulée continue. Pour les nuances de ronds à béton, le four-poche ajuste le manganèse et le silicium et, si nécessaire, les ajouts de microalliage ; pour le fil machine destiné au tréfilage, il maîtrise le soufre, l'oxygène et les inclusions, qui déterminent l'aptitude du fil à être tréfilé finement.

La coulée continue de billettes doit être adaptée à la production du four et fonctionner en longues séquences, coulant les coulées les unes après les autres sans s'arrêter, car chaque redémarrage coûte du rendement et du temps. La section des billettes est choisie avec le laminoir : des billettes carrées de 150 mm conviennent à un laminoir à barres et fil machine de 300 000 t/an, comme celui commandé en Tanzanie en septembre 2026 [S47]. La vitesse de coulée et le nombre de lignes sont ensuite fixés de sorte que la coulée continue puisse absorber

une coulée en moins de temps que le cycle de coulée à coulée du four. L'acier coulé quitte une coulée continue à environ 1 200 à 1 250 °C [S50] : les billettes envoyées directement au laminoir conservent donc une grande part de cette chaleur, ce qui fonde la logique énergétique du chapitre 6.

5.5 Qualité de l'électricité : papillotement, harmoniques et puissance réactive

Un four à arc est l'une des charges les plus perturbatrices qu'un système électrique puisse supporter. Pendant la fusion, les arcs se déplacent, s'éteignent et se réamorcent à mesure que la ferraille s'effondre, de sorte que la puissance réactive du four varie en quelques fractions de seconde. Ces variations provoquent des fluctuations de tension perçues comme un papillotement (flicker) de l'éclairage, et les arcs injectent des courants harmoniques. Les gestionnaires de réseau fixent des limites pour les deux au point de raccordement de l'usine. Dans le cas serbe décrit ci-dessous, les limites au poste du propriétaire du réseau étaient une sévérité de papillotement de courte durée (Pst, 95e centile) inférieure à 1,0 et une sévérité de longue durée (Plt) inférieure à 0,75, avec un déséquilibre de tension inférieur à 1 % et un taux de distorsion harmonique total inférieur à 3 % [S24].

L'ampleur de la perturbation dépend du rapport entre la puissance du four et la robustesse (puissance de court-circuit) du réseau au point de raccordement. Un réseau robuste absorbe les variations ; un réseau faible les transmet aux consommateurs voisins. Deux cas publiés montrent ce qui se passe lorsque le réseau n'est pas assez robuste.

Chez Metalfer, une mini-acierie de 400 000 t/an à FAE alimenté en ferraille, seul producteur de ronds à béton de Serbie, le four provoquait un papillotement que le compensateur statique de puissance réactive (SVC) classique existant ne parvenait pas à réduire suffisamment ; le gestionnaire du réseau de transport a sommé l'usine de résoudre le problème sous peine de coupure. Un STATCOM multiniveau modulaire de moins 49 à plus 121 Mvar sous 20 kV, mis en service en mars 2023, a atteint un facteur de réduction du papillotement supérieur à 5 malgré un niveau de court-circuit relativement faible [S24]. À l'aciérie de Gerdau à Charlotte, aux États-Unis, équipée d'un four de 30 à 33 MVA, des exigences de papillotement plus strictes ont suivi l'urbanisation autour de l'usine ; le SVC existant ne suffisait plus, et un SVC Light (un STATCOM) de 0 à 64 Mvar a été spécifié pour un facteur de réduction du papillotement supérieur à 5 ; le fournisseur en attend aussi des gains de productivité [S23].

Tableau 5.2 Limites de qualité de l'électricité et résultats dans une aciérie de ronds à béton à FAE de 400 kt/an après compensation par STATCOM

Indicateur	Limite appliquée	Mesure avec STATCOM	Point de mesure
Facteur de puissance de la charge du FAE	0,98 ou plus	0,999	Poste du client
Papillotement de courte durée, Pst (95 %)	Inférieur à 1,0	0,653	Poste du propriétaire du réseau
Papillotement de longue durée, Plt (95 %)	Inférieur à 0,75	0,569	Poste du propriétaire du réseau
Déséquilibre de tension (95 %)	Inférieur à 1 %	0,25 %	Poste du client
Distorsion harmonique totale de tension (95 %)	Inférieure à 3 %	Inférieure à 0,7 %	Poste du client

Source : GE Vernova Power Conversion, étude de cas de l'aciérie Metalfer, Serbie, révisée en février 2024 [S24].

Les deux cas conduisent à la même règle de conception pour Kribi : partir du principe qu'un compensateur rapide sera nécessaire, le spécifier avec le four et le vérifier par une étude de papillotement fondée sur le niveau de court-circuit réel au point de raccordement de l'usine.

Ce point de raccordement est encore en construction. Le Cameroun disposait de 2 033 MW de puissance installée pour une pointe de 1 278 MW en 2025, mais environ 90 % de son électricité provenait de l'hydroélectricité [S51], et en octobre 2026, les retards de la ligne d'évacuation de Nachtigal laissaient 150 MW de demande industrielle insatisfaite, la ligne 400 kV étant alors attendue pour novembre 2026 [S89]. Le Port Autonome de

Kribi construit une ligne 225 kV à double terre entre la centrale à gaz de Kribi et le port, avec un poste 225/30 kV, conçue pour fournir 100 MW dans un premier temps et 330 à 400 MW à une étape ultérieure [S25, S34]. RC-1 estime l'appel maximal de la phase 1 à environ 55 MVA [S03], ce qui tient dans la première étape. L'électricité pèse déjà lourd pour la sidérurgie camerounaise : le plus gros consommateur parmi les aciéries de Douala a payé 8,37 milliards de FCFA d'électricité en 2024 [S91]. Un précédent national de solution en haute tension existe : un producteur d'acier de Douala est passé à un raccordement en haute tension avec un transformateur dédié de 50 MVA [S51]. Le livre blanc 05 (chapitres 2 et 3) analyse en détail le système électrique et l'alimentation des gros consommateurs.

SPÉCIFIER LE COMPENSATEUR AVEC LE FOUR

Pour le four de la phase 1, le cas de base devrait être un compensateur de type STATCOM avec filtres d'harmoniques sur le jeu de barres moyenne tension, dimensionné après une étude de papillotement au point de raccordement réel en 225 kV. Traiter la qualité de l'électricité comme une question secondaire a conduit d'autres aciéries de ronds à béton à installer des compensateurs a posteriori sous la pression des régulateurs.

5.6 Le contrat d'électricité détermine la manière dont le four fonctionne

La tarification de l'électricité influe sur la conduite d'une aciérie, et pas seulement sur son coût. Le Cameroun n'a pas de tarif réglementé publié au-delà de 10 MW : les six clients haute tension du pays sont alimentés par contrats bilatéraux, et leur prix moyen réalisé en 2025 était d'environ 18,4 FCFA par kWh, un niveau hérité du passé (dérivé du rapport du régulateur) [S51]. La tranche moyenne tension la plus élevée publiée, pour des charges de 9 à 10 MW, combine une prime de puissance mensuelle par kW et un prix de l'énergie bas, de sorte qu'un client qui utilise sa puissance souscrite pendant de nombreuses heures paie moins par kWh [S92]. La moyenne reflétant les coûts calculée par le régulateur pour 2025 était de 105,46 FCFA par kWh, contre 83,46 FCFA effectivement perçus auprès des clients moyenne et basse tension [S93].

Un nouveau contrat de grande taille sera donc probablement négocié, et sa structure compte pour le four. Une prime de puissance récompense un facteur de charge élevé et stable, ce qu'offre un four unique fonctionnant environ 7 300 à 7 900 heures par an. Ce même taux d'utilisation définit la flexibilité que le four peut offrir au réseau. Il offre une charge programmable : au cours de la journée, le système de management de l'énergie décrit au chapitre 8 peut décaler les périodes sous tension de quelques minutes à quelques heures, retarder une coulée ou maintenir l'acier au four-poche afin que la fusion évite la pointe du soir, ce qu'une tarification horo-saisonnière, si elle était introduite, récompenserait. Il n'offre pas de charge interruptible au sens d'un effacement durable. Le tonnage de la phase 1 mobilise déjà l'essentiel des heures de l'année : chaque heure d'effacement coûte à peu près une coulée, soit environ 40 t d'acier liquide, qui ne peut être rattrapée plus tard. Les clauses contractuelles devraient donc rémunérer le décalage hors pointe plutôt que l'effacement, et limiter tout délestage d'urgence à des événements rares qui permettent d'achever en sécurité la coulée en cours. Ces conditions devraient être convenues en même temps que la convention de raccordement, avant le jalon 1.

5.7 La sécurité et l'environnement se conçoivent dès l'origine, ils ne s'ajoutent pas

Les principaux dangers de l'aciérie sont le métal en fusion, l'eau (qui explose au contact de l'acier liquide), l'oxygène et les gaz combustibles, les levages lourds et les équipements à haute tension. Les incendies et les explosions sont un risque reconnu des aciéries. Les pratiques internationales traitent ces dangers par l'implantation (séparer les circuits d'eau des zones de coulée), la détection des fuites d'eau dans les panneaux refroidis, les verrouillages des lances à oxygène et la formation. Les directives EHS de la SFI pour les aciéries fixent le niveau de référence attendu par les prêteurs du développement [S44].

Sur le plan environnemental, les fumées du four sont captées par un système d'aspiration directe et une hotte, puis épurées dans un filtre à manches. Les meilleures techniques disponibles de l'UE fixent un niveau d'émission de poussières inférieur à 5 mg/Nm³ pour le traitement des fumées de FAE [S94]. Les poussières de FAE collectées, de 10 à 20 kg par tonne d'acier liquide (plage de planification ; le document de référence européen indique 10 à 30 kg) [S42], contiennent du zinc, du plomb et du cadmium issus de la ferraille [S44] et doivent être gérées comme un déchet dangereux : stockées en sécurité, puis traitées ou exportées pour la récupération du zinc. Les résidus solides du four, pour l'essentiel du laitier, représentent 110 à 180 kg par tonne de produit [S44] ; le laitier peut être transformé en granulats pour les routes et le béton une fois sa stabilité vérifiée. L'eau circule en boucles de refroidissement fermées : RC-1 retient un appoint de 1,5 à 3,0 m³ par tonne de produit [S03], contre une consommation moyenne d'eau du secteur de 2,3 m³ par tonne en 2024 selon worldsteel [S01].

5.8 Ce que la conception de l'aciérie implique pour les décideurs

Trois conclusions en découlent. Premièrement, un four unique de la taille retenue par RC-1 peut porter l'essentiel de la phase 1, avec une production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t de produits finis ; la pleine capacité nominale exige une forte disponibilité ou un transformateur plus puissant. Cela donne tout son prix à la fiabilité, à la maintenance et à l'approvisionnement en consommables, et fait de la puissance du transformateur une décision d'ingénierie d'avant-projet plutôt qu'une donnée. Deuxièmement, la conception électrique est une tâche commune de l'aciérie, du gestionnaire du réseau de transport et de l'infrastructure électrique de la zone, et elle doit commencer avant la commande du four. Troisièmement, les choix faits dès maintenant (aptitude au chargement continu, compensateur dimensionné pour la croissance future, place pour un second transformateur de four et pour un module de réduction directe à côté de l'aciérie) gardent ouvertes les phases ultérieures pour un faible surcoût.

CHAPITRE 6

LAMINAGE DES PRODUITS LONGS : BILLETES CHAUDES ET CHAUFFAGE PAR INDUCTION

FONT DE LA PHASE 1 UNE LIGNE ENTIÈREMENT ÉLECTRIQUE

Les laminoirs déterminent ce que vend Cameroon Steel, et une grande part de l'énergie qu'elle consomme hors aciérie. La phase 1 prévoit un laminoir à barres et fil machine pour des ronds à béton de 8 à 32 mm et du fil machine de 5,5 à 12 mm, chauffé par induction à partir de billettes qui arrivent chaudes de la coulée continue [S03]. Les phases ultérieures ajoutent un laminoir à profilés légers et moyens pour les cornières, les profilés en U et les plats, puis un laminoir à profilés lourds pour les poutrelles H, tous deux équipés de fours de réchauffage au gaz [S03]. Enfourner les billettes à chaud économise environ 0,55 GJ par tonne à 700 °C par rapport à un enfournement à froid [S50], et un laminoir italien a réduit de 40 % son combustible de réchauffage après être passé à l'enfournement à chaud [S95]. Sur le réseau camerounais de 2024, le chauffage par induction émet à peu près autant de CO₂ par tonne qu'un four à gaz performant, tout en supprimant le besoin de gaz en phase 1 (dérivé).

6.1 Le laminage transforme les billettes en produits spécifiés par les clients

Un laminoir de produits longs reçoit des billettes (ou, pour les gros profilés, des blooms et des ébauches de poutrelles) et les transforme en barres, couronnes et profilés par déformations successives à chaud. Chaque cage de cylindres réduit la section et allonge le produit ; la forme des cylindres (le « calibre ») détermine le profil final. La figure 6.1 présente la logique du laminoir de la phase 1 : un train commun de chauffage et de dégrossissage, puis deux voies de finition, l'une produisant des ronds à béton droits en bottes, l'autre du fil machine en couronnes.

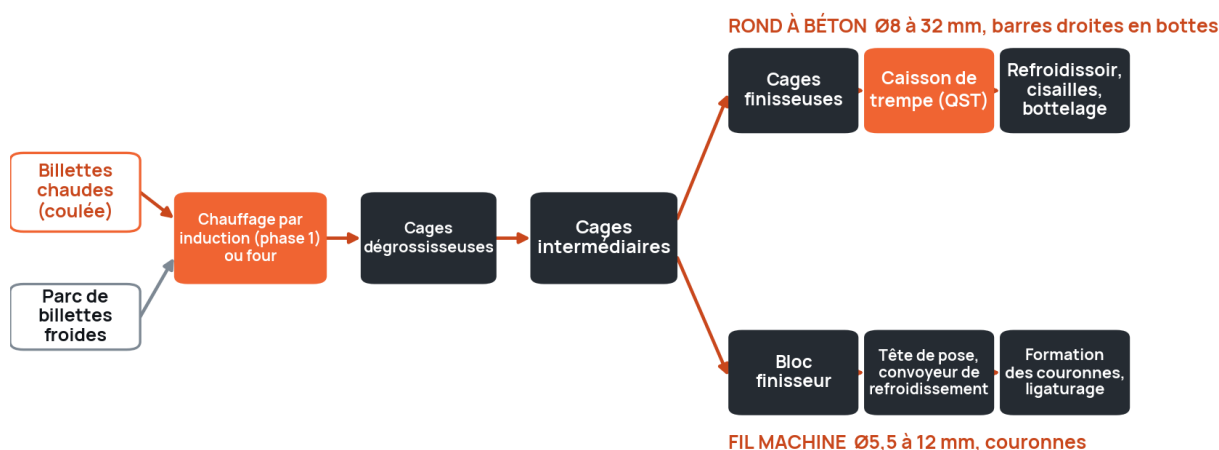
La voie du rond à béton

Après les cages dégrossisseuses et intermédiaires, la barre passe dans les cages finisseuses, dont la dernière passe lamine les nervures. Juste après la dernière cage, un caisson à eau trempe la surface de la barre. Ce traitement de trempe et autorevenu, connu sous des noms commerciaux tels que TEMPCORE, donne une peau dure en martensite revenue et un cœur ductile en ferrite et perlite, et produit des barres soudables à haute résistance à partir d'un simple acier bas carbone et bas manganèse, sans vanadium ni niobium coûteux [S28]. Le CRM Group, qui a mis au point le procédé, fait état de plus de 100 installations industrielles, pour des barres d'un diamètre allant jusqu'à 75 mm [S28]. Les barres refroidissent ensuite sur un refroidisseur, sont coupées aux longueurs commerciales par des cisailles à froid, comptées et mises en bottes.

Les petits diamètres de ronds à béton sont souvent laminés sur deux brins ou plus à la fois, grâce à un refendage longitudinal de la barre dans le train finisseur, ce qui accroît la production du laminoir pour les diamètres les plus demandés. Le laminoir de 300 000 t/an commandé par GSM en Tanzanie en septembre 2026 associe 14 cages à cartouche, un bloc finisseur de 10 passes pour le fil machine et une trempe et un revenu en ligne, et produit des ronds à béton de 8 à 32 mm et du fil machine de 5,5 à 6,5 mm à partir de billettes de 150 mm, à raison de 50 t par heure au plus [S08, S47].

Une billette, deux finitions : barres droites pour le rond à béton, couronnes pour le fil machine

Laminoir à barres et fil machine indicatif, du type de la phase 1 ; les laminoirs à profilés suivent la même logique avec des cylindres profilés



Boucle qualité :

température, dimensions et paramètres de trempe sont enregistrés par billette et par botte ou couronne ; les essais de traction, de pliage et d'analyse par lot de coulée alimentent le certificat d'essai (chapitres 7 et 8).

Indicatif. Gammes de produits : base de planification RC-1, phase 1. QST : trempe et autorevenu.

ILLUSTRATIF Figure 6.1. Implantation indicative d'un laminoir à barres et fil machine du type de la phase 1.

Source : Cameroon Steel ; gammes de produits selon la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification) [S03] ; architecture du laminoir conforme aux commandes africaines de 2026 [S08, S47].

La voie du fil machine

Le fil machine est laminé à de petits diamètres dans un bloc finisseur à grande vitesse, groupe compact de cages entraînées ensemble, puis mis en spires par une tête de pose et refroidi de façon contrôlée sur un convoyeur avant d'être rassemblé en couronnes. Le programme de refroidissement détermine la microstructure du fil et donc sa facilité de tréfilage en fils, treillis, pointes et fils de ligature. Le fil machine destiné au tréfilage fin exige un acier propre, pauvre en résiduels : c'est l'une des raisons pour lesquelles le DRI et le HBI présents dans la charge de l'aciérie comptent pour le fil machine (chapitre 3).

LE LAMINAGE EST LE POINT DE RENCONTRE ENTRE UNE ACIÉRIE ET SES CLIENTS : DIMENSIONS, TOLÉRANCES, ÉTAT DE SURFACE ET RÉSISTANCE SE JOUENT DANS LES DERNIERS MÈTRES DU LAMINOIR.

Cameroon Steel, trajectoire technologique

6.2 Chaque phase ajoute un laminoir pour des produits que la région importe encore

RC-1 ordonne les laminoirs de sorte que chaque phase ajoute des produits plutôt que davantage des mêmes [S03]. La phase 1 sert le marché de la construction avec des ronds à béton et du fil machine, mais son laminoir n'est pas le seul débouché de son acier : la capacité nationale de ronds à béton dépasse déjà de plus de trois fois la demande [S06] ; la production de la phase 1 est donc prévue pour aller, selon les cas, aux produits laminés ou à des billettes marchandes destinées aux relamineurs existants, et pour remplacer les billettes et le fil machine importés et atteindre les marchés de la CEMAC plutôt que d'ajouter du rond à béton à un marché saturé (chapitre 9). La phase 2 ajoute un laminoir à profilés légers et moyens pour les cornières, les profilés en U et les plats, utilisés dans les ossatures de bâtiments, les toitures, les pylônes, les structures de transport d'électricité et la construction métallique. La phase 3 ajoute un laminoir à profilés lourds pour les poutrelles H et I, utilisées dans les bâtiments industriels, les ponts et les ouvrages portuaires. Les profilés et les constructions métalliques sont encore largement importés au Cameroun : en 2023, le pays a importé pour 26,3 millions USD de profilés (SH 7216) et 25 700 t de constructions métalliques (SH 7308) [S05].

Tableau 6.1 Laminoirs par phase de RC-1 (indicatif)

Phase	Laminoir	Produits	Capacité indicative de produits finis	Alimentation	Chauffage
Phase 1	Laminoir à barres et à fil machine à grande vitesse	Ronds à béton Ø8 à 32 mm en bottes ; fil machine Ø5,5 à 12 mm en couronnes	Capacité nominale d'environ 300 000 t/an ; production soutenue attendue de 270 000 à 300 000	Billettes, chaudes de la coulée continue ou froides du parc	Chauffage des billettes par induction, en partie enfournées à chaud
Phase 2	Laminoir à profilés légers et moyens	Cornières, profilés en U, plats	Environ 200 000 t/an (150 000 à 200 000)	Billettes d'une deuxième ligne de fusion	Four à longerons mobiles au gaz
Phase 3	Laminoir à profilés lourds	Poutrelles H et I, profilés lourds	Environ 500 000 t/an	Blooms ou ébauches de poutrelles d'une aciérie agrandie	Four à longerons mobiles au gaz
Réserve	Transformation aval	Tréfilage, treillis soudés, façonnage des armatures	À définir	Fil machine, ronds à béton	Sans objet

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), édition du 10 octobre 2026 [S03]. Les capacités sont prévues (phase 1) ou indicatives (phases 2 et 3).

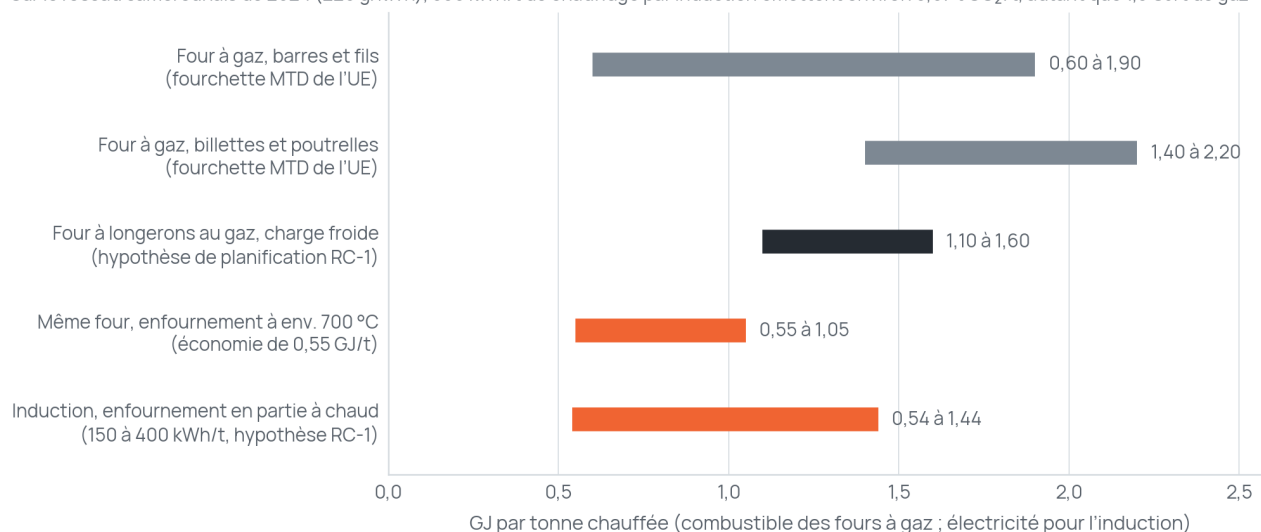
Le laminoir à profilés lourds impose des exigences en amont. Les poutrelles à larges ailes sont laminées à partir de demi-produits plus grands et profilés : la phase 3 exige donc une coulée continue de blooms ou d'ébauches de poutrelles en plus des billettes, ainsi qu'un agrandissement de l'aciérie. C'est l'une des raisons pour lesquelles la phase 3 est la plus grande étape de la trajectoire et vient après que les phases 1 et 2 ont démontré le marché et l'équipe d'exploitation.

6.3 Le chauffage est la principale décision énergétique du laminoir

Avant le laminage, l'acier doit être ramené à une température à laquelle il se déforme facilement ; les fours de réchauffage défournent généralement à environ 1 250 °C [S50]. La manière de fournir cette chaleur est la principale décision énergétique du laminoir. Les meilleures techniques disponibles de l'UE associent au réchauffage des barres et des fils 0,6 à 1,9 GJ par tonne, et au réchauffage des billettes, blooms et poutrelles 1,4 à 2,2 GJ par tonne, alors que le laminage proprement dit ne demande que 0,1 à 0,5 GJ par tonne [S49]. RC-1 retient un four à longerons mobiles au gaz consommant 1,1 à 1,6 GJ par tonne pour les laminoirs à profilés ultérieurs [S03].

Enfournement à chaud et chauffage par induction réduisent l'énergie dépensée entre coulée et laminoir

Sur le réseau camerounais de 2024 (226 g/kWh), 300 kWh/t de chauffage par induction émettent environ 0,07 t CO₂/t, autant que 1,3 GJ/t de gaz



DÉRIVÉ Figure 6.2. Énergie nécessaire au chauffage des billettes avant laminage : fourchettes de réchauffage au gaz, enfournement à chaud et chauffage par induction.

Source : conclusions MTD de l'UE pour la transformation des métaux ferreux [S49] ; hypothèses de planification de la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification) [S03] ; économie due à l'enfournement à chaud [S50] ; comparaison de CO₂ fondée sur le facteur par défaut du GIEC pour le gaz naturel [S96] et sur l'intensité du réseau camerounais en 2024 [S07].

Deux techniques réduisent sensiblement l'énergie de chauffage.

L'enfournement à chaud. Des billettes qui passent de la coulée continue au four avant de refroidir demandent beaucoup moins de combustible. Une analyse sectorielle de 2025 estime l'économie à environ 0,55 GJ par tonne pour de l'acier enfourné à 700 °C, avec une hausse de la productivité du four d'environ 28 % et une économie de CO₂ d'environ 27 kg par tonne ; elle relève aussi que les fours au gaz perdent 0,5 à 1,0 % de l'acier sous forme de calamine [S50]. En 2023, Acciaierie di Sicilia, en Italie, a fait état d'une réduction de 40 % de la consommation de combustible de son four poussant de 80 t par heure après l'installation par Danieli d'un enfournement direct des billettes chaudes [S95]. L'enfournement à chaud exige que la coulée continue et le laminoir soient implantés et programmés ensemble, avec une table de transfert courte et un tampon pour les interruptions.

Le chauffage par induction. Les inducteurs chauffent les billettes électriquement au moyen de bobines dont la puissance peut être réglée une à une, ce qui convient au transfert direct depuis la coulée continue : la billette n'a besoin que de retrouver et d'homogénéiser sa température, non d'être chauffée depuis l'état froid. Danieli décrit des lignes de coulée-laminage directes dans lesquelles les billettes passent de la coulée continue au laminoir à travers des inducteurs, sans aucun four au gaz, ce qui réduit la formation de calamine et les émissions [S97]. RC-1 retient 150 à 400 kWh par tonne pour le chauffage par induction avec enfournement partiellement à chaud en phase 1, avec une valeur centrale de 300 kWh [S03].

Sur le réseau camerounais, la comparaison carbone est serrée. À l'intensité moyenne de 2024, d'environ 226 g CO₂/kWh [S07], 300 kWh de chauffage par induction émettent environ 0,068 t de CO₂ par tonne, tandis que 1,3 GJ de gaz naturel dans un four de réchauffage émettent environ 0,073 t au facteur par défaut du GIEC de 56,1 t CO₂ par TJ [S96] (tous deux dérivés). L'intérêt de l'induction en phase 1 tient donc moins au carbone qu'à la simplicité : elle ne demande aucun raccordement au gaz, démarre et s'arrête rapidement, réduit les pertes en calamine et se couple naturellement à une coulée continue voisine. RC-1 prévoit en conséquence une phase 1 sans aucune consommation de gaz, puis environ 260 000 GJ de gaz par an avec le laminoir à profilés de la phase 2 et environ 910 000 GJ à plein développement [S03].

UNE PHASE 1 ENTIÈREMENT ÉLECTRIQUE

Avec le chauffage des billettes par induction et l'enfournement à chaud, la phase 1 n'a besoin d'aucun gaz naturel : sa fusion, son affinage, son chauffage et son laminage fonctionnent tous à l'électricité. Cela retire de la première phase l'une des deux conditions préalables d'utilités (le gaz) et concentre le risque d'utilités sur le raccordement en 225 kV, en cours de construction pour la zone.

6.4 Le rendement et la qualité se font au laminoir autant qu'à l'aciérie

Chaque tonne perdue entre la coulée continue et la botte finie est une tonne d'unités de fer, d'énergie et de travail gaspillée. Les pertes proviennent de la calamine à la surface des billettes, des chutes coupées en bout de chaque barre, des « bouchons » (barres qui se coincent dans le laminoir) et des produits hors tolérance. RC-1 retient un rendement combiné de coulée et de laminage de 0,94 t de produit fini par tonne d'acier liquide, dans une fourchette de 0,92 à 0,96, et environ 20 kg de calamine par tonne de produit, collectée et recyclée [S03]. L'enfournement à chaud et le chauffage par induction réduisent tous deux la calamine ; un bon calibrage, de bons guidages et l'automatisation réduisent les bouchons et les chutes.

La qualité se maîtrise par la mesure. Les laminoirs modernes mesurent en continu les dimensions des barres par des jauges laser après les cages finisseuses, enregistrent le débit et la température de l'eau de trempe pour chaque barre, et testent des échantillons de chaque lot de coulée en résistance à la traction, en allongement et en pliage avant l'émission du certificat d'essai (chapitres 7 et 8). Pour le fil machine, les réglages du convoyeur de refroidissement et les propriétés des couronnes sont enregistrés couronne par couronne. Ces enregistrements ne sont pas une charge administrative : ce sont eux qui permettent à un client, à un inspecteur ou à un tribunal de remonter d'une barre à la coulée dont elle provient.



ILLUSTRATIF Vue d'illustration. Image générée d'une barre chaude sur la table à rouleaux d'un laminoir ; il ne s'agit pas d'une photographie d'un projet, d'un lieu ou d'une personne réels.

6.5 Le fil machine alimente une filière aval

Le fil machine est un produit intermédiaire. Il est tréfilé en fils de ligature, pointes, grillages et treillis soudés, et ses clients sont de petites et moyennes entreprises dont la productivité dépend d'un fil qui se tréfile sans casser. Les importations enregistrées de fil machine du Cameroun sont tombées de 50 800 t en 2019 à 7 800 t en 2023 [S05], et le secteur fait désormais état de capacités nationales de fil machine et de pointes bien supérieures à la demande [S06]. Un nouveau laminoir à fil machine se distinguera donc par la qualité, la régularité et la gamme de nuances qu'il peut fournir, et non par le seul volume. Les treillis soudés et les armatures façonnées en sont un prolongement naturel : ils déplacent la valeur ajoutée des chantiers vers les usines, réduisent les déchets et améliorent la précision sur chantier. RC-1 réserve un emplacement pour une transformation aval de ce type [S03]. Un laminoir à fil machine à Kribi approvisionnerait à la fois ses propres unités aval et les tréfileurs indépendants de la région.

6.6 L'eau, la calamine et les utilités du laminoir

Un laminoir utilise de l'eau pour refroidir les cylindres, pour décalaminer les billettes par jets à haute pression et, pour le rond à béton, pour tremper la barre après la dernière cage. Les références de la SFI pour les laminoirs donnent une large fourchette de consommation d'eau, selon le degré de recirculation [S44]. L'eau se charge de calamine et d'huile et doit être décantée, déshuilée et refroidie avant d'être réutilisée ; la calamine est récupérée et peut être vendue ou recyclée à l'aciérie. RC-1 retient des boucles de refroidissement fermées et un appoint de 1,5 à 3,0 m³ d'eau par tonne de produit pour l'ensemble de l'usine [S03]. L'air comprimé, la lubrification et les circuits hydrauliques complètent les utilités du laminoir ; tous sont électriques en phase 1.

6.7 La mise en service et la montée en cadence prennent des mois, non des semaines

Un nouveau laminoir n'atteint pas sa production nominale dès le premier jour. Les essais à froid de chaque cage et de chaque entraînement, les essais à chaud avec les premières billettes, l'étalonnage des programmes de passes et des réglages de trempe pour chaque produit, et la formation des équipes sur les équipements en fonctionnement prennent du temps. Les contrats avec les fournisseurs devraient prévoir une montée en cadence par paliers, des essais de performance à des niveaux définis de production, de rendement et d'énergie, et la présence du fournisseur sur site jusqu'à la réussite de ces essais. Le critère du jalon 2 au chapitre 10, douze mois à la performance nominale ou à un niveau proche, en tient compte.

6.8 La flexibilité du laminoir garde le marché ouvert

Un laminoir de produits longs est plus flexible que son nom ne le laisse penser. Le laminoir à barres peut changer de diamètre de rond à béton au cours d'un même poste, laminier des ronds lisses ou de petits plats, et fournir du fil machine au tréfilage aval. Les laminoirs à profilés peuvent suivre la demande entre cornières, profilés en U et plats. Les billettes elles-mêmes sont un produit vendable : lorsqu'un laminoir est en maintenance ou que la demande est faible, l'aciérie peut vendre des billettes à d'autres laminoirs qui les importent aujourd'hui (chapitre 3).

Trois choix de conception protègent cette flexibilité pour un coût modeste : un parc à billettes froides et une table de chargement à côté de la ligne d'enfournement à chaud, afin que le laminoir puisse tourner lorsque l'aciérie est arrêtée ; de l'espace et des fondations pour la transformation aval (tréfilage, treillis soudés, façonnage des armatures), que RC-1 réserve [S03] ; et un système d'automatisation du laminoir qui mémorise les programmes de passes et les recettes de trempe de chaque produit, afin que les changements soient rapides et reproductibles.

CHAPITRE 7

LA QUALITÉ DES PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION TROPICALE : UN ROND À BÉTON DUCTILE ET CERTIFIÉ COMPTE DAVANTAGE QUE LA SEULE RÉSISTANCE

Le rond à béton destiné à l'Afrique centrale doit satisfaire deux ensembles de règles : la norme nationale obligatoire du Cameroun pour les aciers pour béton armé, NC 236 [S26, S27], et les nuances internationales que spécifient les entreprises et les prêteurs, principalement BS 4449 B500B ou B500C et ASTM A615 Grade 60 [S29, S30]. Toutes fixent une résistance minimale ; les meilleures fixent aussi une ductilité minimale, c'est-à-dire l'aptitude d'une barre à s'allonger et à s'écrouir avant de rompre, qui donne à une structure en béton sa capacité d'alerte et sa résilience. Une aciérie électrique dotée d'un four-poche et d'un laminier avec trempe et autorevenu en ligne peut produire, à partir d'un simple acier au carbone-manganèse, des barres soudables conformes à ces nuances [S28]. Dans le climat côtier humide et salin de Kribi, la durabilité dépend surtout de la protection de la barre dans le béton ; les barres revêtues ou inoxydables restent une niche réservée aux ouvrages les plus exposés.

7.1 Une norme obligatoire encadre le marché camerounais du rond à béton

Le Cameroun réglemente étroitement le rond à béton. La norme nationale des aciers pour béton armé, en vigueur sous la référence NC 236/2024/06, est obligatoire depuis un arrêté ministériel du 20 avril 2022, et la nuance Fe450 ne figure pas à son catalogue [S26, S27]. En octobre 2024, l'agence nationale de normalisation, l'ANOR, a retiré à un producteur son certificat de conformité pour des barres Fe450 et a ordonné le rappel du produit, après la plainte d'une association professionnelle [S26, S27]. En janvier 2026, les services du Premier ministre ont rejeté une demande de révision de la norme, alors que la mauvaise qualité de certains matériaux de construction, rond à béton compris, était mise en cause dans des effondrements de bâtiments [S26, S27]. Les importations de ronds à béton sont interdites depuis 2016, position que la Douane a confirmée en avril 2023 [S69].

Le message réglementaire est clair et favorable à un producteur qui investit dans la qualité : le marché récompense les barres conformes à la norme et sanctionne celles qui ne le sont pas. Pour un nouveau producteur qui entend aussi approvisionner les travaux publics, les entreprises internationales et les pays voisins, la certification NC 236 est un minimum ; l'aptitude à certifier les principales nuances internationales est l'objectif de conception.

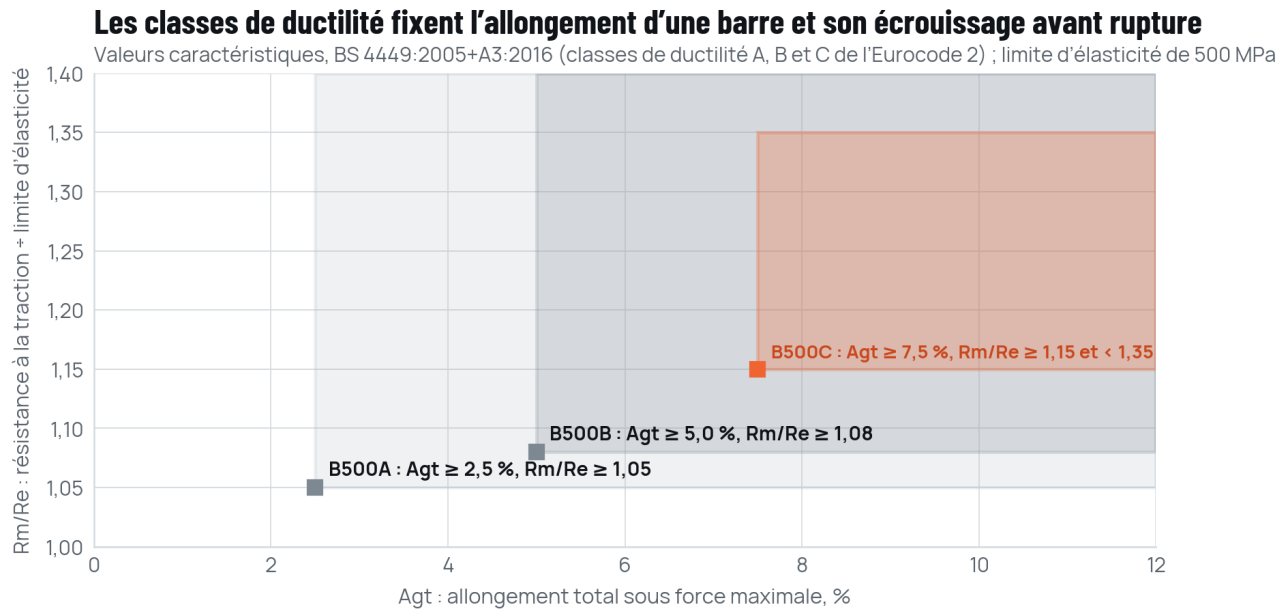
Tableau 7.1 Nuances de ronds à béton qu'un producteur d'Afrique centrale doit pouvoir satisfaire

Norme et nuance	Limite d'élasticité	Exigences de ductilité	Observations
NC 236/2024/06 (Cameroun)	Nuances listées dans la norme	Selon la norme	Obligatoire depuis le 20 avril 2022 ; Fe450 absente de la norme [S26, S27]
BS 4449:2005+A3:2016, B500A	500 MPa (caractéristique)	Rm/Re au moins 1,05 ; Agt au moins 2,5 %	Classe de faible ductilité [S29]
BS 4449:2005+A3:2016, B500B	500 MPa	Rm/Re au moins 1,08 ; Agt au moins 5,0 %	Classe de ductilité normale, la plus spécifiée [S29]
BS 4449:2005+A3:2016, B500C	500 MPa	Rm/Re au moins 1,15 et inférieur à 1,35 ; Agt au moins 7,5 %	Classe de haute ductilité [S29]
ASTM A615/A615M Grade 60 (420)	420 MPa minimum ; traction 620 MPa minimum	Allongement de 7 à 9 % selon le diamètre ; essai de pliage à 180°	Phosphore au plus 0,060 % (sur coulée) [S30]

Source : norme camerounaise telle que rapportée par Business in Cameroon et EcoMatin [S26, S27] ; synthèse de BS 4449 par The Concrete Centre [S29] ; spécification technique d'une barre TEMPCORE ASTM A615 Grade 60 [S30]. Rm/Re : rapport de la résistance à la traction à la limite d'élasticité ; Agt : allongement total sous force maximale.

7.2 La résistance est nécessaire ; la ductilité est décisive

Deux valeurs d'un certificat de rond à béton en disent plus sur le comportement d'une barre que sa limite d'élasticité. L'Agt, allongement total sous force maximale, mesure jusqu'où la barre s'allonge avant l'apparition de la striction. Le rapport Rm/Re, de la résistance à la traction à la limite d'élasticité, mesure combien la barre gagne en résistance après avoir plastifié. Une barre aux bonnes valeurs pour ces deux grandeurs cède progressivement, répartit l'endommagement sur sa longueur et donne une alerte visible avant la rupture ; une barre fragile peut casser presque sans prévenir.



SOURCÉ Figure 7.1. Les trois classes de ductilité de BS 4449, alignées sur les classes A, B et C de l'Eurocode 2.

Source : The Concrete Centre, Standards for reinforcement, synthèse de BS 4449:2005+A3:2016 [S29].

Les trois classes de la figure 7.1 partagent la même limite d'élasticité de 500 MPa, mais diffèrent par leur ductilité : la classe A exige un A_{gt} d'au moins 2,5 %, la classe B de 5,0 % et la classe C de 7,5 %, avec des rapports minimaux croissants entre résistance à la traction et limite d'élasticité [S29]. Les trois nuances sont conformes aux classes de ductilité recommandées par l'Eurocode 2 [S29]. La classe C plafonne aussi R_m/R_e en dessous de 1,35, afin que la barre ne devienne pas, après plastification, résistante au point de surcharger le béton environnant ou les assemblages.

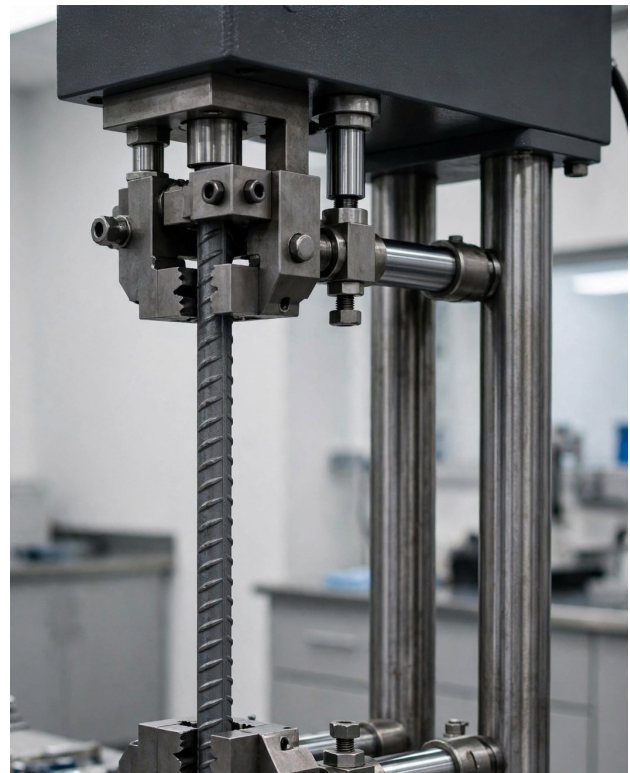
Pour la construction tropicale, la ductilité compte pour des raisons qui vont au-delà des séismes. Les bâtiments des villes en forte croissance subissent des surcharges, des tassements différentiels sur sols meubles, des chocs et des transformations ultérieures jamais prévues à la conception. Des barres capables de s'allonger avant de rompre donnent à une structure la robustesse nécessaire pour y résister, et laissent aux inspecteurs et aux occupants le temps de remarquer les désordres. La préoccupation des autorités camerounaises face aux effondrements de bâtiments [S26, S27] porte, au fond, sur ce type de résilience.

7.3 Comment l'aciérie et le laminoir garantissent les propriétés

La qualité du rond à béton résulte de trois maîtrises que la filière électrique assure bien.

La composition chimique. L'aciérie règle le carbone, le manganèse et le silicium au four-poche et maintient bas le phosphore et le soufre par la conduite du laitier au four à arc et par la désulfuration en poche. L'ASTM A615 limite le phosphore à 0,060 % sur coulée [S30]. Les fours à induction alimentés en DRI peinent sur ce point : le National Metallurgical Laboratory indien a relevé 0,08 à 0,11 % de phosphore dans la plupart des aciers élaborés au four à induction à partir de DRI, contre 0,03 à 0,06 % exigés par les normes indiennes et ASTM [S10]. Le DRI et le HBI de la charge du FAE diluent aussi le cuivre et l'étain de la ferraille, qui fragilisent l'acier à teneur élevée.

Le traitement thermomécanique. Le procédé de trempe et autorevenu donne à la barre sa résistance sans éléments d'alliage coûteux (figure 7.2). Des jets d'eau refroidissent brutalement la surface juste après la dernière cage, formant de la martensite dans un anneau extérieur ; la chaleur du cœur, encore chaud, revient ensuite cet anneau ; et le cœur se transforme en ferrite et perlite ductiles sur le refroidisseur [S28]. Le résultat est une barre à peau résistante et à cœur ductile, élaborée à partir d'un acier bas carbone et bas manganèse qui reste soudable [S28]. Le laminoir commandé en Tanzanie en septembre 2026 comprend pour cette raison une trempe et un revenu en ligne [S47].

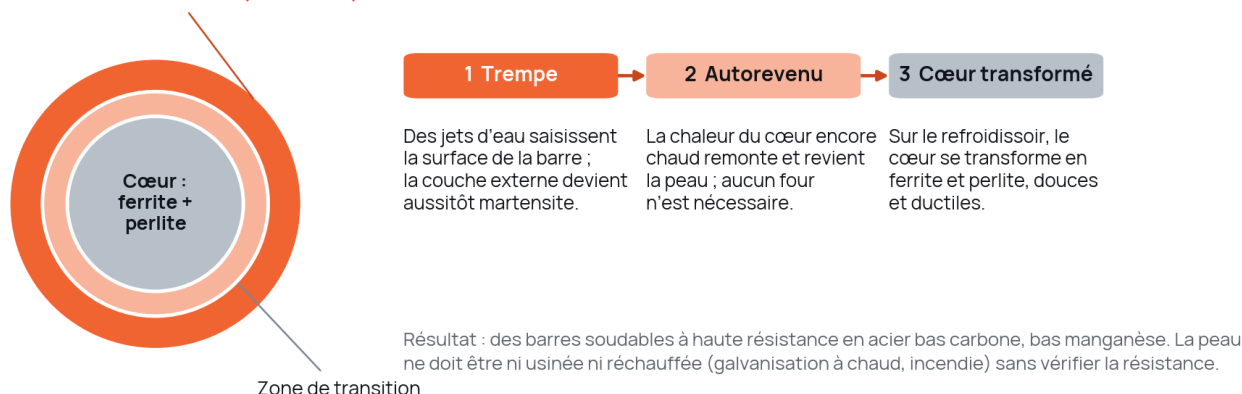


ILLUSTRATIF Vue d'illustration. Image générée d'un essai de traction sur un rond à béton ; il ne s'agit pas d'une photographie d'un projet, d'un lieu ou d'une personne réels.

Trempe et autorevenu : une peau dure et un cœur ductile à partir d'un simple acier au carbone-manganèse

Traitement en ligne de type TEMPCORE après la dernière cage ; ni vanadium ni niobium pour les nuances à 500 MPa

Peau : martensite revenue (résistance)



ILLUSTRATIF Figure 7.2. Le traitement de trempe et autorevenu : étapes du procédé et section obtenue.

Source : Cameroon Steel, d'après la description du procédé TEMPCORE par le CRM Group [S28].

Le traitement comporte une réserve pratique : les propriétés d'une barre dépendent de son historique thermique. Une chaleur apportée ultérieurement, par exemple par une galvanisation à chaud à environ 450 °C, peut réduire la résistance des aciers dont les propriétés proviennent d'un traitement thermomécanique [S98]. Les barres trempées et autorevenues galvanisées doivent donc être testées après revêtement, et la même considération vaut pour l'évaluation des dommages après incendie.

Les essais et la certification. Chaque lot de coulée est échantillonné pour l'analyse chimique et pour les essais de traction, d'allongement et de pliage, et les résultats alimentent un certificat d'essai qui accompagne les bottes (chapitre 8). La certification par l'ANOR pour le marché national, et par des organismes tiers reconnus pour les marchés d'exportation qui l'exigent, boucle la boucle entre les enregistrements de l'usine et l'acceptation par le client.

UN CERTIFICAT AUQUEL UNE ENTREPRISE PEUT SE FIER, COULÉE PAR COULÉE, FAIT PARTIE DU PRODUIT. SUR UN MARCHÉ QUI A CONNU DES EFFONDREMENTS DE BÂTIMENTS, C'EN EST LA PARTIE LA PLUS PRÉCIEUSE.

Cameroon Steel, trajectoire technologique

7.4 Le laboratoire de l'usine et le régime d'essais

Le laboratoire d'une usine de ronds à béton est le lieu où la qualité devient preuve. Pour chaque lot de coulée, l'usine analyse la composition chimique au spectromètre d'émission optique et teste des échantillons de chaque diamètre en limite d'élasticité, en résistance à la traction et en allongement (Agt compris), en pliage ou pliage-dépliage, en masse linéique et en géométrie des nervures, qui détermine l'adhérence entre la barre et le béton. Les résultats sont comparés aux limites de la norme selon laquelle le lot est certifié, enregistrés sous les numéros de coulée et de lot de laminage, et imprimés sur le certificat de contrôle qui accompagne les bottes (chapitre 8). Des audits indépendants de l'organisme de certification vérifient que les équipements du laboratoire sont étalonnés et que ses procédures sont respectées.

Pour la phase 1, cela signifie un laboratoire spécifié avec le laminoir, et non après lui : des machines de traction équipées d'extensomètres capables de mesurer l'Agt, des bancs de pliage couvrant toute la gamme de diamètres, un spectromètre, une préparation des échantillons et un système de données relié à la production. Cela signifie aussi un personnel formé et l'accréditation du laboratoire selon des normes reconnues, afin que les certificats de l'usine inspirent confiance aux entreprises et aux prêteurs.

7.5 Les pratiques de chantier protègent le produit

Des barres sorties conformes du laminoir peuvent être endommagées sur chantier. Trois pratiques comptent le plus. Les barres doivent être coupées et façonnées à froid, sur des mandrins du diamètre spécifié par la norme, et non chauffées pour faciliter le pliage, car la chaleur modifie les propriétés des barres trempées et autorevenues [S28, S98]. Le soudage des armatures doit suivre des modes opératoires qualifiés, adaptés à la composition de la barre. Enfin, les barres doivent être stockées hors sol, à couvert et à l'abri des embruns jusqu'à leur mise en place, en particulier sur les sites côtiers comme Kribi. Les recommandations de Cameroon Steel sur ses produits et ses formations à l'intention des entreprises devraient couvrir ces trois points.

7.6 Le fil machine et les profilés ont leurs propres déterminants de qualité

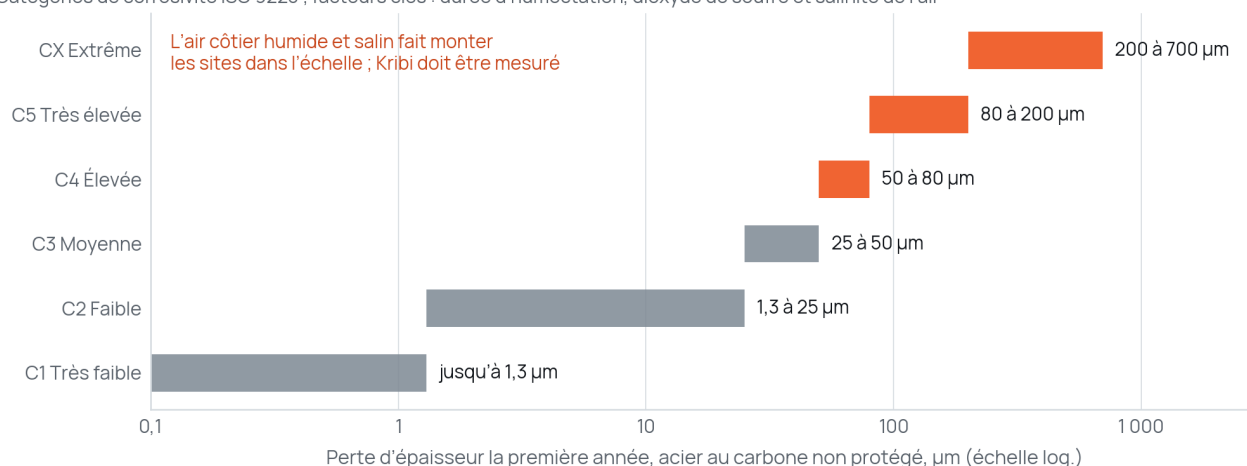
Le fil machine est vendu à des tréfileurs qui fabriquent des fils, des pointes, des treillis et des fils de ligature. Leurs principales exigences sont un acier propre (peu d'inclusions et de résiduels, qui provoquent des casses au tréfilage), une composition régulière d'une couronne à l'autre et une microstructure fixée par le refroidissement contrôlé après la tête de pose. Les profilés et les poutrelles sont jugés sur leurs tolérances dimensionnelles (épaisseur des ailes et de l'âme, rectitude, équerrage) et sur des nuances de construction selon l'EN 10025 ou les normes ASTM, qui fixent la résistance, la ténacité et la soudabilité. Dans chaque cas, c'est la maîtrise de la composition à l'aciérie et la mesure des dimensions et des températures au laminoir qui rendent possible une qualité régulière.

7.7 Corrosion : le climat de Kribi fixe la stratégie de protection

Kribi a un climat équatorial côtier, avec environ 2 836 mm de pluie par an et une humidité relative maximale journalière de 92 à 96 % [S99]. L'acier se corrode dans l'atmosphère lorsque sa surface est humide et en présence de chlorures apportés par les embruns ou de dioxyde de soufre issu de la pollution. L'ISO 9223 classe la corrosivité des atmosphères de C1 (très faible) à CX (extrême) à partir de ces mêmes facteurs : durée d'humectation, dioxyde de soufre et salinité de l'air [S100]. La perte d'épaisseur de l'acier au carbone non protégé la première année va de 1,3 µm au plus en catégorie C1 à une fourchette de 200 à 700 µm en catégorie CX, soit un rapport de plus de 500 (figure 7.3) [S98].

La corrosivité atmosphérique varie dans un rapport de plus de 500 ; les côtes humides et salées sont au sommet

Catégories de corrosivité ISO 9223 ; facteurs clés : durée d'humectation, dioxyde de soufre et salinité de l'air



SOURCE Figure 7.3. Catégories de corrosivité atmosphérique de l'ISO 9223 et perte d'épaisseur correspondante de l'acier au carbone la première année.

Source : Šmak et al. (2021), tableau 1, reprenant l'EN ISO 9223 [S98] ; facteurs selon la description de l'ISO 9223 [S100].

Aucune classification mesurée de la corrosivité à Kribi n'a été publiée. La combinaison d'une forte humidité et de la proximité de la mer oriente vers les catégories supérieures, mais la classification devrait être mesurée sur site au moyen d'éprouvettes d'exposition normalisées pendant un an, comme le permet l'ISO 9223 [S100]. Cette mesure compte pour trois choses : la protection des propres structures et équipements de l'usine, le stockage des produits avant expédition et les conseils donnés aux clients.

Pour les armatures noyées dans le béton, l'atmosphère n'est qu'une partie de la question. Un béton sain et compact protège chimiquement l'acier pendant des décennies ; la corrosion commence lorsque les chlorures ou la carbonatation traversent l'enrobage et atteignent la barre. La durabilité dépend donc d'abord de l'épaisseur et de la qualité du béton d'enrobage, de son rapport eau-ciment, de sa cure et de la maîtrise de la fissuration, autant d'aspects que l'Eurocode 2 et la norme béton associée, l'EN 206, encadrent au moyen de classes d'exposition pour les environnements chargés en chlorures et marins. Les barres revêtues ou résistantes à la corrosion constituent une seconde ligne de défense pour les ouvrages les plus exposés :

- **Le rond à béton galvanisé à chaud** (ISO 14657, ASTM A767) ajoute une couche de zinc sacrificielle ; pour les barres trempées et autorevenues, la résistance doit être vérifiée après revêtement [S98].
- **Le rond à béton revêtu d'époxy fusionné** (ASTM A775) forme une barrière, mais doit être manipulé avec soin pour éviter d'endommager le revêtement sur chantier.
- **Le rond à béton en acier inoxydable** (BS 6744) offre la plus haute résistance pour un prix bien supérieur et s'emploie de manière sélective dans les zones de marnage et les éléments critiques.

PROTÉGER LA BARRE AVANT QU'ELLE N'ATTEIGNE LE BÉTON

Dans le climat de Kribi, un rond à béton stocké à découvert sur le sol se corrompt rapidement. Les recommandations de Cameroon Steel sur ses produits devraient couvrir le stockage couvert à l'usine et sur chantier, un étiquetage des bottes qui résiste aux intempéries, ainsi que l'enrobage et la qualité du béton pour les ouvrages côtiers, afin que des barres sorties conformes du laminier arrivent conformes dans la structure.

7.8 L'usine elle-même vit dans le même climat

La corrosivité qui menace les ouvrages des clients menace aussi l'usine. Les halls de l'aciérie et du laminoir, les chemins de roulement des ponts, les convoyeurs, les tours de refroidissement, les racks de tuyauteries et le poste haute tension sont exposés au même air humide et salin, souvent avec en plus de la chaleur, de la vapeur et des poussières. Leurs systèmes de peinture et de protection devraient être spécifiés pour la catégorie de corrosivité mesurée plutôt que pour une valeur par défaut valable à l'intérieur des terres, avec une inspection et une maintenance budgétées dès l'origine. Les produits finis exigent le même soin : les bottes et les couronnes en attente d'expédition doivent être stockées à couvert et hors sol, et le parc d'expédition conçu pour se drainer rapidement sous les pluies de septembre et d'octobre. Ce sont de petits choix de conception qui protègent le rendement, la qualité et les actifs de l'usine pendant des décennies.

7.9 Ce que la qualité implique pour le choix de la filière

La qualité renforce l'argument en faveur de la filière électrique avec four-poche. Un four à arc avec laitier d'affinage, un four-poche et un laminoir à trempe et autorevenu peuvent produire de manière régulière des nuances NC 236, BS 4449 et ASTM A615 à partir d'un mélange de ferraille et de DRI ; un four à induction sans affinage en poche a du mal à respecter les limites de phosphore [S10] ; et un relamineur qui achète des billettes ne peut maîtriser la composition de l'acier qu'il lamine. À mesure que le DRI national entre dans la charge, l'aciérie dispose d'un fer propre, pauvre en résiduels, qui améliore l'aptitude au tréfilage du fil machine et donne plus de marge sur la composition. La spécification du laminoir de la phase 1 devrait donc inclure la trempe en ligne, la mesure dimensionnelle continue et un laboratoire capable de tester chaque lot de coulée, dès le premier jour de production.

CHAPITRE 8

NUMÉRISATION ET AUTOMATISATION : LES SYSTÈMES DE CONDUITE FONT PARTIE DU PROCÉDÉ, ILS NE S'Y AJOUTENT PAS

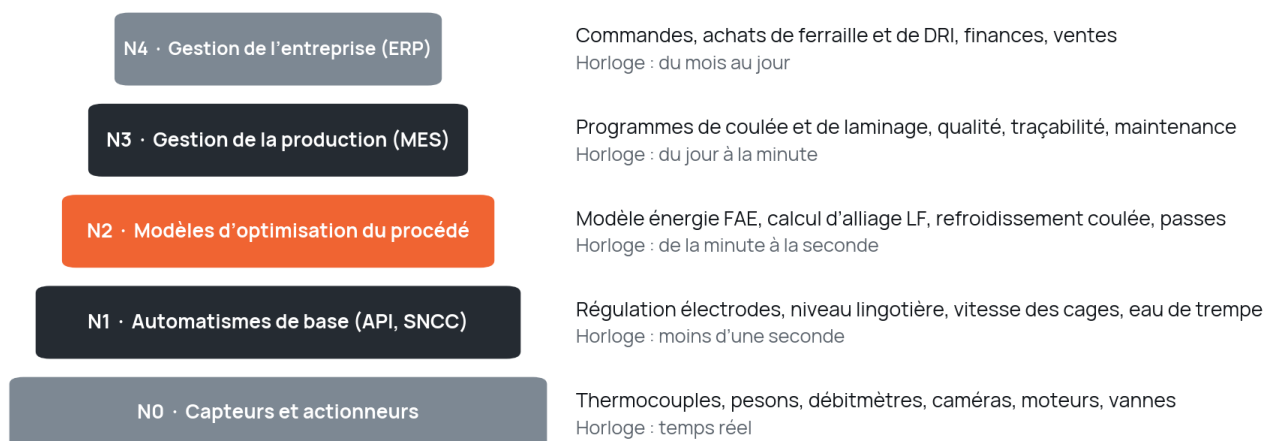
Une aciérie et un laminoir modernes ne peuvent atteindre leur rendement, leur consommation d'énergie et leur qualité nominaux sans automatisation, et une usine neuve a l'avantage de pouvoir l'intégrer dès la conception. Les automatismes de base (niveau 1) et les modèles de procédé (niveau 2) conduisent le four, la poche, la coulée continue et le laminoir seconde par seconde ; un système d'exécution de la production (niveau 3) rattache chaque botte à la coulée dont elle provient ; et un système de management de l'énergie transforme le comptage en économies. Les usines manufacturières certifiées ISO 50001 ont amélioré leur performance énergétique d'environ 4,1 % la première année, et encore d'environ 3,4 % par an douze ans plus tard [S31]. Pour la consommation d'électricité prévue de la phase 1, environ 289 GWh par an (environ 302 GWh à la valeur haute d'électricité), une amélioration de 4 % représenterait environ 12 GWh par an (dérivé) [S03]. C'est ce même fil de données qu'exigent de plus en plus les clients, les régulateurs et, pour les exportations vers l'Europe, les règles d'ajustement carbone aux frontières.

8.1 Cinq niveaux de conduite, chacun avec sa propre horloge

L'automatisation industrielle se décrit généralement au moyen de la hiérarchie fonctionnelle de la norme ISA-95 (IEC 62264), présentée à la figure 8.1. Le niveau 0 est le procédé physique, avec ses capteurs et ses actionneurs. Le niveau 1 est la conduite de base dans les automates programmables et les systèmes numériques de contrôle-commande, qui réagissent en fractions de seconde. Le niveau 2 est la supervision et l'optimisation du procédé. Le niveau 3, la gestion des opérations de production, travaille à l'échelle des jours, des postes, des heures et des minutes et couvre l'ordonnancement, la qualité, la maintenance et les stocks. Le niveau 4, la planification et la logistique de l'entreprise, travaille à l'échelle des mois, des semaines et des jours au moyen du progiciel de gestion intégré [S101].

Cinq niveaux de conduite, chacun avec sa propre horloge

Hierarchie fonctionnelle ISA-95 / IEC 62264 appliquée à une aciérie et à un laminoir



Définitions : OPC Foundation, modèle objet commun ISA-95. Les exemples sidérurgiques sont indicatifs.

ILLUSTRATIF **Figure 8.1.** La hiérarchie fonctionnelle ISA-95 appliquée à une aciérie et à un laminoir.

Source : Cameroon Steel ; définitions des niveaux selon le modèle objet commun ISA-95 de l'OPC Foundation [S101].

L'intérêt de cette hiérarchie est pratique : elle indique aux concepteurs de l'usine quel système détient quelle décision et comment les données doivent circuler entre eux. Une défaillance récurrente dans les usines sidérurgiques est une rupture entre niveaux, par exemple une coulée continue qui enregistre des données de billettes qui ne parviennent jamais au laminoir, ou un laboratoire dont les résultats d'essais sont ressaisis à la main dans un certificat.

8.2 Niveaux 1 et 2 à l'aciérie : des modèles qui économisent des minutes et des kilowattheures

Dans un four à arc électrique, le niveau 1 régule en continu les électrodes pour maintenir des arcs stables, pilote les injecteurs d'oxygène et de carbone et les brûleurs, et protège les panneaux refroidis à l'eau. Le niveau 2 ajoute des modèles : un bilan matière et énergie qui estime la température et la composition du bain entre deux mesures, un programme électrique qui choisit les prises du transformateur au cours de la coulée et, au four-poche, un calcul d'alliage qui détermine les ajouts les moins coûteux pour atteindre la composition visée. À la coulée continue, le niveau 1 pilote le niveau en lingotière et la vitesse d'extraction, tandis que le niveau 2 calcule le refroidissement secondaire pour éviter les fissures.

Plusieurs fournisseurs proposent ces fonctions sous forme de solutions intégrées. Tenova, par exemple, présente son système iEAF comme une solution modulaire fondée sur l'analyse complète des fumées, des capteurs, des modèles de procédé et une conduite avancée, et revendique des économies d'électricité, de combustible, de temps sous tension, de temps de coulée à coulée, de rendement, d'électrodes et de réfractaires [S102]. Ce type d'affirmations varie fortement d'une usine à l'autre ; pour une usine neuve, la bonne approche consiste à spécifier les mesures et les modèles dans le contrat du four et à convenir d'essais de performance.

Pour le four de la phase 1, où un seul FAE doit fonctionner environ 7 300 à 7 900 heures par an pour atteindre la capacité nominale (chapitre 5), chaque minute de temps sous tension économisée est de la capacité gagnée. Un modèle qui aide l'opérateur à couler à la bonne température, à éviter la surchauffe et à charger le bon mélange de ferraille et de DRI vaut davantage dans une aciérie à un seul four que dans une grande usine à plusieurs fours.

8.3 Le niveau 2 au laminoir : programmes de passes, conduite de la trempe et mesure

Au laminoir, le niveau 2 mémorise un programme de passes pour chaque produit, règle les écartements et les vitesses des cylindres, contrôle la traction entre les cages et pilote l'eau de trempe du rond à béton selon le diamètre et les propriétés visées. Des jauges laser placées après les cages finisseuses mesurent les dimensions de chaque barre ; des pyromètres mesurent la température avant et après la trempe. Pour le fil machine, le convoyeur de refroidissement contrôlé applique une recette par nuance. Ces systèmes rendent les changements de produit rapides et reproductibles, ce qui permet à un laminoir de servir un marché de nombreux diamètres sans longs arrêts.



ILLUSTRATIF Vue d'illustration. Image générée de la salle de conduite d'une usine sidérurgique ; il ne s'agit pas d'une photographie d'un projet, d'un lieu ou d'une personne réels.

8.4 Le management de l'énergie transforme le comptage en économies

L'énergie est le premier coût variable d'une aciérie électrique après les unités de fer, et aussi la première source de ses émissions. Un système de management de l'énergie compte l'électricité par unité (four, four-poche, coulée continue, inducteur, laminoir, utilités), rapproche la consommation de la production et repère les écarts. La certification ISO 50001 formalise la démarche. Une étude portant sur 83 sites manufacturiers certifiés a constaté des améliorations moyennes de la performance énergétique d'environ 4,1 % la première année et d'environ 3,4 % par an douze ans après la mise en œuvre [S31].

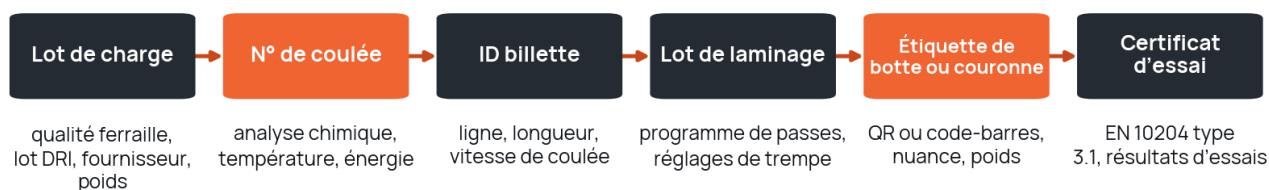
RC-1 estime la consommation d'électricité de la phase 1 à environ 289 GWh par an, pour une charge moyenne d'environ 36 MW, à la valeur de planification de 450 kWh par tonne au four, ou à environ 302 GWh et 38 MW à la valeur haute de 490 kWh [S03]. Sur cette base, une amélioration de 4 % économiserait environ 12 GWh par an (dérivé). Le même système sert la relation avec le système électrique décrite au chapitre 5 : il peut programmer les périodes sous tension du four hors des pointes du réseau et dans la limite de la puissance souscrite de l'usine sur la ligne 225 kV, se coordonner avec le compensateur et rendre compte de la qualité de l'électricité au point de raccordement.

8.5 Traçabilité : chaque botte remonte à sa coulée

La traçabilité est le point de rencontre entre l'automatisation et le client. La figure 8.2 présente la chaîne d'identifiants que tient une usine de produits longs : le lot de charge de ferraille et de DRI, le numéro de coulée avec sa composition et ses températures, la billette avec ses données de ligne et de coulée, le lot de laminage avec ses réglages de passes et de trempe, l'étiquette de chaque botte ou couronne, et le certificat d'essai, généralement un certificat de contrôle de type 3.1 selon l'EN 10204, qui accompagne la livraison.

Chaque botte remonte à une coulée : le fil des données, du parc à ferraille au chantier

Identifiants et enregistrements indicatifs ; chaque flèche est un transfert de données qui ne doit pas se rompre



Enjeu : un essai non conforme sur chantier renvoie à sa coulée et à sa billette, et chaque barre de cette coulée peut être retrouvée. Régulateurs et prêteurs demandent de plus en plus que ce fil porte aussi l'énergie et le CO₂ par tonne.

ILLUSTRATIF Figure 8.2. Le fil de la traçabilité, du lot de charge au certificat d'essai.

Source : Cameroon Steel.

Au Cameroun, où l'agence de normalisation a retiré un certificat de conformité et ordonné le rappel de ronds à béton non conformes [S26, S27], la traçabilité protège le producteur honnête : un essai non conforme sur chantier peut être rattaché à sa coulée, les autres barres de cette coulée localisées et testées, et la cause identifiée. Elle soutient aussi la certification par l'ANOR et par les organismes de certification des marchés d'exportation.

Le même fil portera les données carbone. Le MACF de l'UE, dans sa phase définitive depuis le 1er janvier 2026, impose aux importateurs de produits en fer et en acier de déclarer leurs émissions intrinsèques [S53]. Les producteurs capables de déclarer des émissions vérifiées et propres à leur installation, par tonne, évitent d'être évalués sur des valeurs par défaut, et la charge de l'importateur dépend de ces émissions. Mesurer le CO₂ par coulée et par produit dès le premier jour d'exploitation est donc un atout commercial pour toute exportation vers l'Europe, et une exigence que les prêteurs poseront probablement de toute façon.

Tableau 8.1 Systèmes numériques de l'usine de Kribi, par niveau et par valeur

Niveau	Système	Principales fonctions	Valeur pour l'usine	Phase
0 et 1	Capteurs, régulation des électrodes, automates et contrôle-commande	Arcs stables, niveau en lingotière, vitesse des cages, eau de trempe, verrouillages de sécurité	Exploitation sûre et stable ; socle de tous les autres niveaux	Phase 1, intégré
2	Modèles de procédé du FAE et du four-poche	Bilan matière et énergie, programme électrique, calcul d'alliage	Temps sous tension réduit, moins de resoufflages, coût d'alliage plus bas	Phase 1
2	Modèles de la coulée continue et du laminage	Refroidissement secondaire, programmes de passes, recettes de trempe, mesure laser	Rendement, qualité dimensionnelle, changements de produit reproductibles	Phase 1
2 et 3	Qualité de l'électricité et management de l'énergie (ISO 50001)	Comptage par unité, maîtrise de la demande, surveillance du papillotement et des harmoniques	Environ 4 % d'amélioration énergétique la première année dans les usines certifiées [S31] ; conformité au réseau	Phase 1
3	Système d'exécution de la production et système de laboratoire	Programmes de coulée et de laminage, traçabilité, certificats, maintenance	Produit certifié, capacité de rappel, fiabilité	Phase 1
3	Surveillance, déclaration et vérification des émissions	CO ₂ par coulée et par produit, empreinte carbone	Déclarations MACF fondées sur des données réelles [S53] ; information des prêteurs	Phase 1, étendu avec le DRI

Niveau	Système	Principales fonctions	Valeur pour l'usine	Phase
4	Progiciel de gestion intégré	Commandes, achats de charges métalliques, finances, logistique	Besoin en fonds de roulement, sécurité d'approvisionnement	Phase 1

Source : Cameroon Steel ; fonctions selon les niveaux ISA-95 [S101].

8.6 La comptabilité carbone dès la première coulée

Mesurer le CO₂ est une tâche d'ingénierie avant d'être une tâche de déclaration. La méthode internationale de calcul de l'intensité en CO₂ de la production d'acier, l'ISO 14404, comptabilise le carbone de chaque intrant (électrodes, carbone de charge, gaz naturel, DRI acheté et électricité) et de chaque extrant (acier, laitier, poussières), et répartit les émissions selon le périmètre de l'usine. Une usine qui compte chaque intrant, pèse chaque extrant et rattache l'un et l'autre aux coulées et aux lots de laminage peut établir une empreinte pour chaque produit, plutôt qu'une moyenne du site.

Cette capacité compte pour trois publics. Les importateurs de l'UE doivent déclarer les émissions intrinsèques des produits en fer et en acier en vertu du règlement MACF, et des données réelles et vérifiées sont préférables aux valeurs par défaut [S53]. Les prêteurs du développement exigent de plus en plus une déclaration des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle du projet. Et les acheteurs nationaux, notamment les travaux publics et les entreprises internationales, commencent à demander l'empreinte carbone des produits. Les intensités estimées de RC-1, environ 0,32 à 0,33 t de CO₂ par tonne de produit fini pour les périmètres 1 et 2 en phase 1 [S03], seront remplacées par des valeurs mesurées une fois l'usine en marche.

8.7 La simulation avant la construction, et pour la formation

Deux types de modèles réduisent les risques avant la construction de l'usine. Le premier est un modèle électrique du raccordement au réseau, du four et de son compensateur, utilisé pour l'étude de papillotement et d'harmoniques qu'exige le jalon 1 (chapitre 10). Le second est un ensemble de simulateurs de procédé pour le four, la coulée continue et le laminoir, que les fournisseurs utilisent pour former les opérateurs avant la mise en service à chaud. Des opérateurs qui se sont exercés sur simulateur aux programmes électriques, aux percées et aux bouchons commettent moins d'erreurs coûteuses sur les équipements en fonctionnement.

8.8 Échelonner l'investissement numérique

Tous les systèmes n'ont pas besoin d'être complets dès le premier jour. Le socle de la phase 1 n'est pas négociable : conduite de niveau 1 et systèmes de sécurité, modèles de niveau 2 pour le four, le four-poche, la coulée continue et le laminoir, système d'information du laboratoire, traçabilité du lot de charge au certificat, et comptage de l'énergie et des émissions. L'analytique avancée, les modèles de maintenance prédictive et l'optimisation à l'échelle de l'usine peuvent suivre une fois que l'usine dispose d'une année de données fiables. Ce qui doit être juste dès le départ, c'est l'architecture : des identifiants cohérents, un modèle de données unique et la segmentation des réseaux, afin que des systèmes ultérieurs puissent être ajoutés sans reconstruire les fondations.

8.9 Fiabilité : une maintenance guidée par les données

Une aciérie à un seul four fortement utilisée est vulnérable aux arrêts imprévus. La surveillance de l'état du transformateur du four, des panneaux et de la voûte refroidis à l'eau, des circuits hydrauliques et des entraînements du laminoir permet de programmer la maintenance avant la défaillance. Un système de gestion de la maintenance assistée par ordinateur, relié au niveau 3, enregistre chaque intervention et chaque pièce de rechange. Le même principe s'applique au compensateur et au poste haute tension, dont la défaillance arrêterait toute l'usine.

8.10 Cybersécurité et architecture

Relier les systèmes de conduite aux systèmes de gestion et aux plateformes d'assistance à distance des fournisseurs expose l'usine aux cyberattaques. La hiérarchie ISA-95 fournit une architecture naturelle de défense : des réseaux séparés pour la conduite (niveaux 0 à 2) et pour la gestion (niveaux 3 et 4), des interfaces contrôlées entre eux, et un accès à distance uniquement par des passerelles surveillées. La série de normes IEC 62443 sur la sécurité des automatismes industriels devrait faire partie de la spécification de l'automatisation dès le départ, car ajouter la sécurité à une usine en marche coûte cher.

8.11 Ce sont les personnes qui font fonctionner les systèmes

L'automatisation ne réduit pas le besoin de personnel qualifié ; elle en change les compétences. Une usine de ce type a besoin d'ingénieurs en automatisation, de techniciens en instrumentation et en électricité, d'ingénieurs de procédé qui maîtrisent à la fois la métallurgie et les modèles, et de spécialistes des données. Le Cameroun dispose d'une base sur laquelle s'appuyer : l'ENSPY (École nationale supérieure polytechnique de Yaoundé) enseigne le génie industriel et mécanique, le génie électrique et le génie civil, mais n'a pas de département de métallurgie [S39], et l'Institut universitaire de technologie de Douala forme des techniciens en génie mécanique et productique, en maintenance industrielle, en génie thermique et en génie électrique [S103]. Les formations des fournisseurs, la formation sur simulateur des opérateurs du four et du laminoir et les partenariats avec ces établissements devraient faire partie du contrat technologique.

LE CERTIFICAT D'ESSAI EST LE DERNIER MAILLON D'UN FIL DE DONNÉES QUI COMMENCE AU PARC À FERRAILLE. S'IL MANQUE UN MAILLON, LE CERTIFICAT N'EST QU'UNE PROMESSE.

Cameroon Steel, trajectoire technologique

8.12 Des enregistrements qui survivent aux premiers propriétaires de l'usine

Les enregistrements d'une usine de ronds à béton sont nécessaires aussi longtemps que restent debout les bâtiments qui contiennent ses barres. Un ingénieur structure qui évalue un bâtiment endommagé, ou un enquêteur après un effondrement, peut avoir besoin de connaître la composition et les résultats de traction d'une barre des décennies après son laminage. La politique de données de l'usine doit donc définir ce qui est conservé (composition des coulées, résultats d'essais, certificats, paramètres de trempe), pour combien de temps, sous quel format et avec quelle sauvegarde, et qui peut y accéder. La même politique doit régir les données de procédé que les fournisseurs de technologie collectent par leurs connexions d'assistance à distance : Cameroon Steel doit être propriétaire de ses données d'exploitation, décider de ce qui sort de l'usine et exiger des fournisseurs qu'ils les protègent.

8.13 Ce que la numérisation implique pour la décision

Les systèmes numériques représentent une faible part du coût d'investissement d'une usine sidérurgique, mais une grande part de sa performance. La liste de contrôle du décideur est courte : les fonctions de niveaux 1 et 2 et leurs essais de performance inscrits dans les contrats du four, de la coulée continue et du laminoir ; un schéma unique d'identifiants à l'échelle de l'usine, du lot de charge au certificat ; un comptage suffisant pour l'ISO 50001 et pour l'empreinte carbone des produits ; et une architecture d'automatisation conçue pour la sécurité. Tous ces éléments coûtent moins cher à spécifier au début de la phase 1 qu'à ajouter plus tard.

CHAPITRE 9

LA TRAJECTOIRE PAR PHASES APPLIQUÉE : COMMENT RC-1 ATTEINT 1 MT/AN EN QUATRE ÉTAPES

La configuration de référence de Cameroon Steel, RC-1, applique la trajectoire électrique par phases au projet de Kribi. La phase 1 (prévue) comprend un seul four à arc électrique avec un four-poche, une coulée continue de billettes et un laminoir à barres et fil machine, avec une capacité nominale de 0,3 Mt/an et une production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t par an ; les travaux doivent démarrer en 2029, avec une première coulée au second semestre 2030 et une montée en cadence en 2031 [S03]. La phase 2 (indicative) ajoute une deuxième ligne de fusion et un laminoir à profilés légers et moyens pour environ 0,2 Mt/an de cornières, de profilés en U et de plats, à titre indicatif de 2032 à 2034. La phase 3 (indicative) ajoute de la capacité d'aciérie et un laminoir à profilés lourds après 2034, pour porter l'usine à sa capacité de conception d'environ 1 Mt/an, sous réserve des marchés et du financement. Un emplacement est réservé sur le site pour un module de réduction directe (DR) destiné au minerai camerounais, qui viendrait plus tard, sous réserve du minerai, du gaz et des autorisations [S03]. La phase 1 tient dans la première étape de 100 MW de la ligne 225 kV de la zone et n'a besoin d'aucun gaz naturel ; le plein développement exige l'étape ultérieure de 330 à 400 MW de la ligne [S03, S25]. Ce chapitre présente ces valeurs de planification avec leur statut, explique où le tonnage de la phase 1 peut être vendu et ne donne aucun montant d'investissement, ceux-ci devant être fixés par l'ingénierie et le financement.

9.1 Le projet tel qu'il ressort des sources publiques

Cameroon Steel développe un complexe sidérurgique à Mboro, dans la Zone industrialo-portuaire de Kribi. La première pierre a été posée le 30 décembre 2024 par le Premier ministre, représentant le Chef de l'État [S77, S104]. La capacité nominale rapportée par Cameroon Tribune en janvier 2025 est de 1 Mt d'acier par an, à atteindre par phases [S105], et la première phase porte sur le rond à béton et le fil machine élaborés dans une aciérie à four à arc électrique. Cameroon Mining Company, société sœur de Cameroon Steel, détient le permis d'exploitation de Mbalam [S77]. La société de développement de la zone range « la sidérurgie liée aux exportations minérales » parmi les pôles industriels qu'elle prévoit pour la zone [S38].

RC-1, citée dans ce livre blanc comme la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), est la base d'ingénierie qui traduit cette description publique en unités, capacités et utilités. Il s'agit d'une configuration de planification de classe 5 (une définition en ordre de grandeur, utilisée avant l'ingénierie

d'avant-projet), et chacune de ses valeurs porte un qualificatif, prévu, cible ou indicatif, défini à l'annexe A [S03]. Cette édition utilise les valeurs révisées le 10 octobre 2026, dont une hypothèse de ferraille nationale d'environ 30 000 t par an et le calendrier ci-dessous.

9.2 Quatre étapes, une même logique d'aciérie

Tableau 9.1 Phases de RC-1 (base de planification de Cameroon Steel, édition du 10 octobre 2026)

Étape	Principales unités	Produits	Capacité de produits finis	Acier liquide	Statut
Phase 1 : usine de barres et de fil machine	Un FAE de la classe 40 t ; un four-poche ; coulée continue de billettes ; chauffage des billettes par induction ; laminoir à ronds à béton ; laminoir à fil machine à grande vitesse	Billettes ; ronds à béton Ø8 à 32 mm ; fil machine Ø5,5 à 12 mm	Capacité nominale d'environ 300 000 t/an ; production soutenue attendue de 270 000 à 300 000	Environ 320 000 t/an à la capacité nominale	Prévu
Phase 2 : profilés	Deuxième ligne de fusion (FAE, four-poche, coulée continue) ; laminoir à profilés légers et moyens	Cornières, profilés en U, plats	Environ 200 000 t/an (150 000 à 200 000)	Environ 215 000 t/an	Indicatif
Phase 3 : profilés lourds jusqu'à 1 Mt/an	Agrandissement de l'aciérie ; laminoir à poutrelles H et profilés lourds	Poutrelles H et I, profilés lourds	Environ 500 000 t/an	Environ 535 000 t/an	Indicatif
Réserve : réduction directe	Module de réduction directe au gaz, compatible hydrogène ; parc à boulettes	DRI ou DRI chaud pour l'aciérie	Environ 1 Mt de DRI/an (0,8 à 1,1)	Sans objet	Indicatif ; sous réserve de la qualité du minerai, du gaz et des autorisations

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification) [S03]. Les valeurs sont des chiffres de planification, à confirmer lors de l'ingénierie d'avant-projet.

Chaque étape réutilise ce que la précédente a construit. La coulée continue et le laminoir de la phase 1 continuent de fonctionner à l'arrivée de la deuxième ligne de fusion ; la charge de l'aciérie passe d'unités de fer achetées à des unités de fer nationales sans aucune modification des fours ; le poste et le compensateur sont dimensionnés pour qu'un second transformateur de four puisse être ajouté. La trajectoire n'est donc pas une série de projets distincts, mais une seule usine qui croît par ajout de modules.

9.3 Le calendrier : une première coulée en 2030, le DRI national comme option après 2034

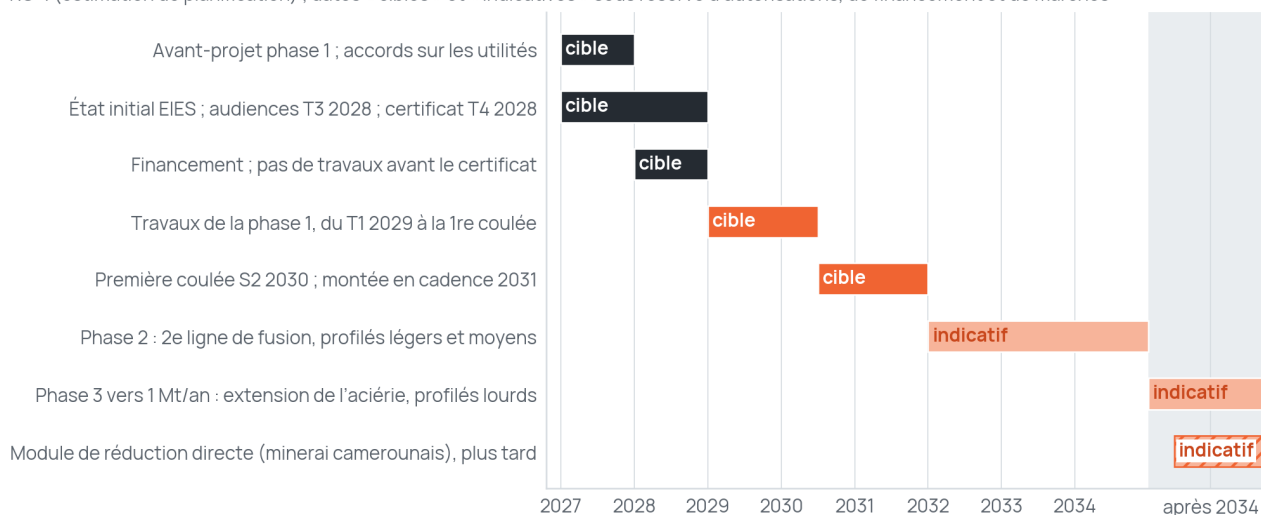
La figure 9.1 présente le calendrier de RC-1. L'ingénierie d'avant-projet de la phase 1 et les accords sur les utilités sont visés pour 2027. L'état initial de terrain de l'étude d'impact environnemental et social couvre les saisons des pluies et sèche de 2027 et 2028, avec des audiences publiques au troisième trimestre 2028 et le certificat de conformité environnementale au quatrième trimestre ; le financement est visé pour 2028, et aucun chantier ne démarre avant le certificat [S03]. Les travaux de la phase 1 doivent démarrer au premier trimestre 2029, avec une première coulée au second semestre 2030 et une montée en cadence tout au long de 2031 vers la capacité nominale de 0,3 Mt/an [S03]. La phase 2 (deuxième ligne de fusion et laminoir à profilés légers et moyens) est indicative de 2032 à 2034, et la phase 3 (extension de l'aciérie et laminoir à profilés lourds), qui porte l'usine à

1 Mt/an, après 2034, toutes deux sous réserve du marché et du financement ; le module de réduction directe viendrait plus tard, sous réserve de la qualité du minerai, de l'approvisionnement en gaz et des autorisations [S03].

Trois caractéristiques de ce calendrier méritent examen. Premièrement, il prévoit environ 18 à 24 mois entre le début des travaux et la première coulée pour une aciérie, une coulée continue et deux laminoirs neufs. Ce délai n'est tenable que si les équipements à long délai (le transformateur du four, la coulée continue et les cages de laminoir) sont commandés au bouclage financier et si l'alimentation en 225 kV est disponible à temps ; une construction plus longue reporterait la première coulée en 2031 sans changer la trajectoire. Deuxièmement, les prêteurs du développement publient l'examen environnemental et social d'un projet avant que leur conseil ne l'approuve : la SFI, par exemple, le fait 60 jours avant l'examen par son conseil pour sa catégorie de risque la plus élevée et 30 jours pour les autres [S106]. Un certificat au quatrième trimestre 2028 laisse peu de marge avant le financement ; ce délai de publication figure donc parmi les conditions du jalon 1 (chapitre 10). Troisièmement, le jalon 2 exige douze mois de phase 1 à la performance nominale ; une décision d'investissement pour la phase 2 est donc peu probable avant 2032, ce qui place la phase 2 vers la fin de sa fenêtre indicative de 2032 à 2034.

Première coulée en 2030, montée en cadence en 2031 ; le DRI national, une option après 2034

RC-1 (estimation de planification) ; dates « cibles » et « indicatives » sous réserve d'autorisations, de financement et de marchés



HYPOTHÈSE Figure 9.1. Calendrier de RC-1 par statut : dates cibles pour la phase 1, dates indicatives pour les étapes ultérieures.

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), calendrier [S03]. Les dates « cibles » et « indicatives » dépendent des autorisations, du financement et des marchés.

L'ordre compte. Les étapes qui ne dépendent que de Cameroon Steel et de ses fournisseurs (ingénierie, aciérie, laminoir) viennent en premier. Les étapes qui dépendent des projets d'autres acteurs (une usine de concentration et une usine de bouletage, un approvisionnement en gaz de long terme, l'étape ultérieure de la ligne 225 kV) viennent plus tard et sont conditionnées par des preuves (chapitre 10). Rien dans la phase 1 ne dépend du calendrier de la mine de Mbalam ni de nouveaux développements gaziers.

9.4 Les utilités par phase : la phase 1 est entièrement électrique et tient dans les 100 premiers MW de la zone

RC-1 établit des bilans indicatifs d'utilités en multipliant les capacités prévues par des valeurs de consommation de référence [S03]. Ils sont résumés au tableau 9.2 et à la figure 9.2.

Tableau 9.2 Bilans indicatifs d'utilités, de sous-produits et d'émissions par phase de RC-1 (dérivés)

Poste	Phase 1	Phases 1 et 2	Usine complète, 1 Mt/an
Produits finis, t/an	300 000	500 000	1 000 000
Acier liquide, t/an	319 000	532 000	1 064 000
Unités de fer (charges métalliques), t/an	363 000	604 000	1 209 000
dont DRI/HBI à 30 % de la charge, t/an	109 000	181 000	363 000
Électricité, GWh/an	289	422	753
Électricité à la valeur haute de 490 kWh/t, GWh/an	302	443	796
Charge électrique moyenne, MW (valeur haute entre parenthèses)	36 (38)	53 (55)	94 (99)
Appel maximal, MVA (hypothèse : phases 1 et 2 interpolées)	Environ 55 (45 à 65)	Environ 100 (85 à 110), dérivé	Environ 160 (130 à 190)
Gaz naturel pour le réchauffage, GJ/an	0	260 000	910 000
Appoint d'eau, m³/an	600 000	1 000 000	2 000 000
Oxygène, millions de Nm³/an	11,2	18,6	37,2
Laitier de FAE, t/an	44 700	74 500	148 900
Poussières de FAE (dangereuses), t/an	4 800	8 000	16 000
CO ₂ des périmètres 1 et 2, t par t de produit fini (valeur haute entre parenthèses)	0,32 (0,33)	0,33 (0,34)	0,33 (0,34)
Y compris l'amont du DRI importé, t par t de produit fini	0,58 (0,59)	0,58 (0,59)	0,58 (0,59)

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), bilans indicatifs à 450 kWh par tonne au four [S03] ; lignes et valeurs entre parenthèses à la valeur haute de 490 kWh par tonne (dérivé) ; l'appel maximal des phases 1 et 2 est interpolé (dérivé) : environ 85 MVA au prorata de la production entre les valeurs de la phase 1 et de l'usine complète, et jusqu'à environ 110 si la deuxième ligne de fusion appelle autant que la première ; la figure 9.2 retient environ 100 MVA. Valeurs de référence énumérées à l'annexe A. Valeurs arrondies.

Trois points ressortent. Premièrement, la charge moyenne de la phase 1, environ 36 à 38 MW, et son appel maximal, environ 55 MVA, tiennent dans les 100 MW que la ligne 225 kV du Port Autonome de Kribi est conçue pour fournir dans un premier temps [S25]. Le plein développement, avec environ 94 à 99 MW en moyenne et environ 160 MVA d'appel maximal, exige l'étape ultérieure de la ligne, de 330 à 400 MW [S25, S34]. L'alimentation électrique est donc échelonnée de la même manière que l'usine.

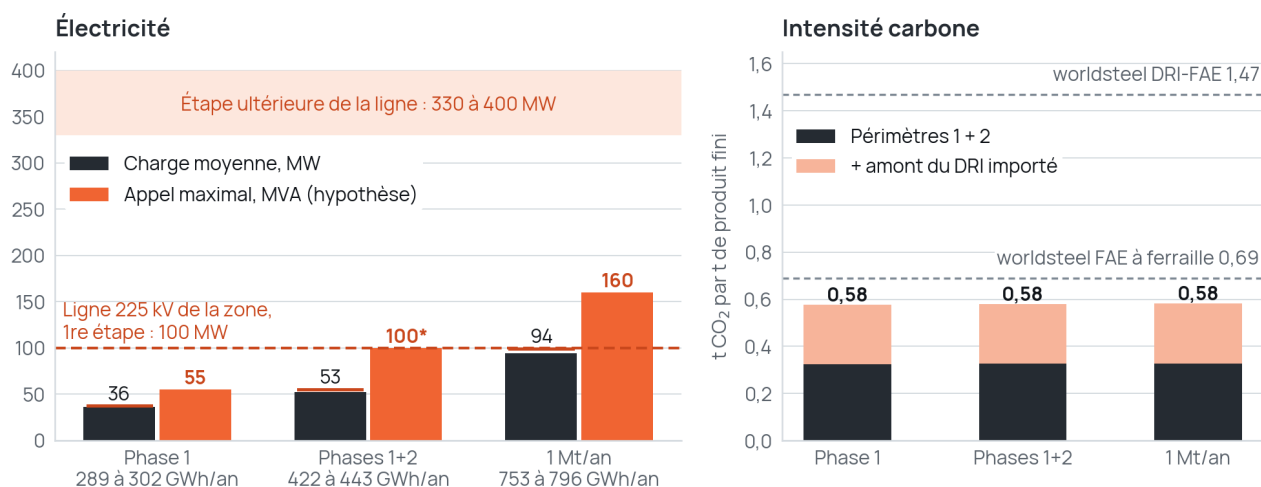
Deuxièmement, la phase 1 n'a besoin d'aucun gaz naturel : le chauffage par induction remplace un four de réchauffage au gaz (chapitre 6). Le gaz n'intervient qu'avec le laminoir à profilés de la phase 2, à raison d'environ 260 000 GJ par an, et atteint environ 910 000 GJ à plein développement, avant tout module de réduction directe [S03]. Un module de réduction directe de 1 Mt par an aurait besoin d'environ dix fois cette quantité (chapitre 4).

Troisièmement, l'intensité carbone de la gamme de produits prévue est faible selon les références internationales. Avec 30 % de DRI ou de HBI importé dans la charge, RC-1 estime les émissions des périmètres 1 et 2 à environ 0,32 à 0,34 t de CO₂ par tonne de produit fini, et à environ 0,58 à 0,59 t en incluant les émissions amont du DRI importé, les chiffres les plus élevés correspondant à la valeur haute d'électricité [S03]. Ces chiffres se comparent aux moyennes 2024 de worldsteel, 0,69 t pour l'acier brut du FAE à ferraille et 1,47 t pour celui de la filière DRI-FAE [S01], bien que les périmètres diffèrent (annexe A).

La phase 1 tient dans les 100 MW initiaux de la zone ; 1 Mt/an exige l'étape ultérieure de 330 à 400 MW

Bilans indicatifs RC-1 à 450 kWh/t ; traits rouges et GWh hauts à 490 kWh/t.

*Appel maximal phases 1+2 interpolé (dérivé ; 85 à 110). Intensités hors module DRI national.



DÉRIVÉ Figure 9.2. Demande d'électricité et intensité carbone par phase de RC-1, au regard des étapes de la ligne 225 kV de la zone et des moyennes worldsteel par filière.

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), bilans indicatifs [S03] ; étapes de la ligne 225 kV et du poste de la zone [S25, S34] ; moyennes worldsteel par filière [S01].

Lorsque le module de réduction directe fonctionnera, ses émissions entreranno dans le périmètre de l'usine. Selon les valeurs de référence de RC-1, une usine complète avec 70 % de DRI national au gaz dans la charge émettrait environ 0,8 t de CO₂ par tonne de produit fini, hors production des boulettes et extraction minière (dérivé ; annexe A). Incorporer de l'hydrogène dans le four à cuve, à mesure que l'électricité d'origine hydraulique le permet, ferait baisser ce chiffre progressivement (chapitre 4).

9.5 La logistique, les emplois et le foncier suivent le même échelonnement

RC-1 estime le tonnage entrant au port à environ 351 000 t par an en phase 1 pour les charges métalliques et les consommables importés, puis à environ 1,24 Mt à plein développement avant tout DRI national, et les produits finis sortants à 0,3 Mt puis 1 Mt ; si tout était transporté par la route avant la mise en place d'un embranchement ferroviaire, la phase 1 générerait environ 74 camions par jour [S03] (le tout dérivé). Un embranchement ferroviaire et un corridor logistique sont prévus dans la réserve foncière du site [S03].

RC-1 prévoit environ 500 emplois directs en phase 1 (450 à 550) et environ 1 000 emplois indirects, pour atteindre environ 1 100 emplois directs à plein développement (fourchette indicative de 900 à 1 300), avec un objectif d'environ 90 % de ressortissants camerounais dans l'exploitation dès la cinquième année [S03]. Ces chiffres sont des valeurs de planification que l'étude sur l'emploi affinera.

Le plan de masse réserve de l'espace pour chaque étape ultérieure : agrandissement de l'aciérie, laminoirs à profilés et à profilés lourds, extension du parc de stockage, module de réduction directe et parc à boulettes à côté de l'aciérie, transformation aval, embranchement ferroviaire et zone tampon environnementale permanente [S03].



ILLUSTRATIF Vue d'illustration. Image générée de profilés de construction dans un parc de stockage ; il ne s'agit pas d'une photographie d'un projet, d'un lieu ou d'une personne réels.

9.6 Comment RC-1 se comporte au regard des quatre critères

La trajectoire par phases a été choisie pour équilibrer intensité capitalistique, flexibilité, émissions et rapidité (chapitre 2). RC-1 montre à quoi ressemble cet équilibre en pratique.

Le capital. Le premier engagement porte sur une seule ligne de fusion et un seul laminoir pour environ 0,3 Mt/an [S03], une échelle à laquelle des laminoirs à barres et à fil comparables sont commandés aujourd'hui en Afrique [S08, S09]. Chaque étape ultérieure est une décision distincte, financée sur les résultats de la précédente.

La flexibilité. L'aciérie accepte tout mélange de ferraille, de DRI, de HBI et de fonte brute ; le laminoir peut passer d'un diamètre de rond à béton à un autre et au fil machine ; et la production de la phase 1 peut aller aux produits laminés ou à des billettes marchandes pour les relamineurs existants, qui importent l'essentiel de leur charge, de sorte que la phase 1 ne dépend pas de l'ajout de rond à béton à un marché dont la capacité dépasse déjà de plus de trois fois la demande [S06]. Chaque phase ultérieure ajoute une famille de produits (les profilés, puis les profilés lourds) plutôt que davantage des mêmes.

Les émissions. Avec 30 % de DRI ou de HBI importé et le réseau camerounais, RC-1 estime les émissions à environ 0,32 t de CO₂ par tonne de produit fini pour les périmètres 1 et 2, et à environ 0,58 t en incluant l'amont du DRI importé [S03], bien en dessous des moyennes worldsteel par filière [S01]. Le DRI national accroît les émissions propres de l'usine, mais remplace un fer importé dont les émissions ont lieu ailleurs ; l'incorporation d'hydrogène les réduit ensuite.

La rapidité. La première coulée de la phase 1 est visée pour le second semestre 2030 [S03] et ne dépend que de l'usine, de ses fournisseurs, de ses autorisations et de la ligne 225 kV de la zone, non d'une mine, d'une usine de bouletage ou d'un gisement de gaz.

9.7 Les interfaces avec les infrastructures de la zone

L'usine est conçue pour s'insérer dans les infrastructures que la zone est en train de construire. La ligne 225 kV et le poste 225/30 kV du Port Autonome de Kribi sont conçus pour 100 MW dans un premier temps et 330 à 400 MW ensuite [S25] ; en août 2026, le port faisait aussi état d'une usine de traitement d'eau pour le secteur de Mboro, attendue début 2027 [S34]. Les terminaux existants du port en eau profonde peuvent traiter les unités de fer et les consommables importés de la phase 1 ; un terminal minéralier de 125 Mt par an en est au stade d'un protocole d'accord signé le 4 novembre 2025, dont l'achèvement est attendu d'ici cinq à six ans [S37,

S38]. La société de développement de la zone range la sidérurgie liée aux exportations minérales parmi ses pôles prévus [S38], ce qui inscrit une aciérie et une future usine de réduction directe dans la logique propre de la zone. RC-1 réserve un embranchement ferroviaire pour le jour où une liaison ferroviaire atteindra le port [S03].

9.8 Les compétences et les emplois suivent la technologie

La filière électrique façonne les effectifs de l'usine autant que ses équipements. Une aciérie et un laminoir ont besoin d'opérateurs du four et de la coulée continue, de techniciens de l'atelier des cylindres, de techniciens en électricité et en instrumentation capables d'entretenir des équipements haute tension et d'électronique de puissance, d'analystes de laboratoire et d'ingénieurs de procédé. RC-1 prévoit environ 500 emplois directs en phase 1 [S03], pour la plupart dans ces métiers. Les écoles d'ingénieurs du Cameroun forment des ingénieurs en mécanique, en électricité et en génie industriel, mais n'ont pas de département de métallurgie [S39], et l'Institut universitaire de technologie de Douala forme des techniciens en maintenance, en génie thermique et en électricité [S103]. Le déficit porte donc sur les compétences de procédé propres à la sidérurgie, que les programmes de formation des fournisseurs, les simulateurs et un centre de formation de l'usine peuvent combler. Le Code minier du Cameroun réserve par ailleurs aux nationaux 95 % des emplois non qualifiés des sociétés minières [S107] ; bien qu'il régisse les mines et non les aciéries, il signale les attentes en matière de contenu local auxquelles fera face la filière sidérurgique liée au minerai camerounais. Chaque phase ultérieure ajoute des métiers : les fours au gaz avec la phase 2, le laminage des profilés lourds avec la phase 3, et les compétences en gaz de procédé, en reformage et en manutention des boulettes avec un module de réduction directe.

9.9 Ce qui est arrêté et ce qui reste ouvert

La trajectoire arrête les décisions difficiles à défaire et laisse ouvertes celles qui dépendent de preuves extérieures.

Arrêtés dès la phase 1 : la filière électrique ; le bâtiment de l'aciérie, les ponts roulants et l'implantation de la coulée continue, avec de la place pour un second four ; un poste et un compensateur conçus pour la croissance ; le laminoir à ronds à béton et fil machine avec trempe en ligne ; l'architecture d'automatisation et de traçabilité ; et la réserve foncière pour un module de réduction directe à côté de l'aciérie.

Ouverts jusqu'à leurs jalons : la taille et le calendrier de la deuxième ligne de fusion ; la gamme de produits du laminoir à profilés lourds et la coulée continue de blooms ou d'ébauches de poutrelles ; et tous les éléments de la production nationale de fer (source des boulettes, fournisseur de la technologie de réduction directe, taille du module, contrat de gaz et calendrier d'incorporation de l'hydrogène).

UNE SEULE USINE QUI CROÎT PAR MODULES

RC-1 n'est pas une succession de projets distincts. La phase 1 apporte l'aciérie, la coulée continue, le laminoir, le poste et les systèmes de données que réutilisent toutes les phases ultérieures ; celles-ci ajoutent des laminoirs et des fours ; la production nationale de fer remplace les unités de fer achetées sans changer l'aciérie. Chaque étape peut être financée et justifiée sur ses propres résultats.

9.10 Où va le tonnage de la phase 1 : billettes, produits laminés et exportations

Une aciérie dotée d'une coulée continue peut vendre des billettes aussi bien que les laminier, et sur le marché camerounais cette option est centrale plutôt qu'accessoire. La capacité nationale de ronds à béton, d'environ 627 000 t par an, dépasse de plus de trois fois une demande d'environ 180 000 t, et la capacité de fil machine et de pointes, d'environ 72 000 t, représente le double de la demande [S06]. Le rond à béton est donc un marché

saturé, où une capacité nouvelle ne comble à elle seule aucun déficit. Ce qui manque au pays, c'est de l'acier à laminier : la ferraille locale ne couvre qu'environ 40 % des besoins des usines existantes, qui importent donc l'essentiel de leur charge [S32, S33], et le Cameroun a importé 161 400 t de billettes en 2023 [S05].

L'aciérie de la phase 1 produit des billettes, et sa production est prévue pour aller, selon les cas, vers trois débouchés : des billettes marchandes vendues aux relamineurs existants en remplacement des importations ; du fil machine et des ronds à béton issus de son propre laminoir, certifiés selon NC 236 et selon les nuances internationales qu'exigent les entreprises et les prêteurs ; et des exportations de billettes et de produits laminés dans la CEMAC. La répartition entre ces débouchés suivra les prix et les contrats, non un plan figé. Le tableau 9.3 en résume la logique ; le livre blanc 04 examine chaque marché et donne un coût indicatif d'une billette produite à Kribi face à une billette importée rendue.

Tableau 9.3 Débouchés possibles de la production de la phase 1 (illustratif)

Débouché	Données de marché	Offre de la phase 1	Condition
Billettes marchandes pour les relamineurs existants	161 400 t de billettes importées en 2023 ; la ferraille locale couvre environ 40 % des besoins des usines [S05, S32, S33]	Billettes coulées à Kribi, livrées par la route	Prix égal ou inférieur à celui des importations rendues ; accords de qualité
Fil machine	Importations tombées à 7 800 t en 2023 ; capacité nationale supérieure à la demande [S05, S06]	Fil propre pour le tréfilage, issu d'une charge comportant du DRI ou du HBI	Aptitude au tréfilage et régularité
Ronds à béton certifiés	NC 236 obligatoire ; capacité supérieure à plus de trois fois la demande [S06, S26]	Barres certifiées NC 236, BS 4449 et ASTM A615	Remplace des produits importés ou non conformes, non l'offre nationale conforme
Exportations dans la CEMAC	Les marchés voisins importent des produits longs (livre blanc 04, chapitre 6)	Billettes et produits laminés par route et par mer	Coût logistique et règles commerciales régionales

Source : évaluation de Cameroon Steel à partir des sources citées ; illustratif, ce n'est pas un plan commercial.

Conserver cette option coûte peu : un stockage de billettes, une pesée et un point de chargement. Elle renforce aussi l'argument qui fait de l'aciérie le cœur de l'usine : quel que soit le débouché le plus rémunérateur, la valeur réside dans la production d'acier, l'étape qui manque au pays.

CHAPITRE 10

RISQUES TECHNOLOGIQUES ET CRITÈRES DE DÉCISION : LEVER LES GRANDS RISQUES AVANT CHAQUE ENGAGEMENT

La filière électrique par phases est moins risquée que les autres options, mais elle n'est pas sans risque. Ses risques technologiques se concentrent sur quelques interfaces : le raccordement de l'usine à un réseau qui laisse déjà 150 MW de demande industrielle insatisfaite [S89] ; l'approvisionnement en unités de fer sur un marché où la charge de qualité réduction directe devrait se tendre [S17] ; la qualité du minerai camerounais, qui n'atteint la qualité réduction directe qu'en essais [S19] ; l'approvisionnement en gaz dont aurait besoin un module de réduction directe ; et la fiabilité d'un four unique qui doit fonctionner la majeure partie de l'année. Chacun de ces risques peut être réduit avant l'engagement des fonds, par des études, des essais pilotes et des contrats. Ce chapitre présente un registre des risques technologiques, un processus de décision en quatre jalons et une liste de contrôle que les conseillers des ministres, les prêteurs, les ingénieurs et les journalistes peuvent utiliser pour évaluer l'avancement du projet.

10.1 Le risque technologique se concentre sur quelques interfaces

La plupart des équipements d'une usine de produits longs sont matures : fours à arc, fours-poches, coulées continues de billettes et laminoirs à barres sont construits en grand nombre depuis des décennies, y compris récemment en Afrique [S08, S09]. Les risques se situent là où l'usine dépend de systèmes extérieurs à son enceinte (le réseau électrique, le réseau de gaz, la mine, le port) et là où une organisation nouvelle doit apprendre à exploiter des équipements complexes. Le tableau 10.1 recense les principaux risques technologiques, les éléments qui les fondent, les signaux précoces à surveiller et les mesures d'atténuation.

Tableau 10.1 Registre des risques technologiques de la trajectoire électrique par phases

Risque	Pourquoi il compte (éléments)	Indicateur précoce	Atténuation	Décidé au
Robustesse du réseau et qualité de l'électricité	Les fours à arc provoquent papillotement et harmoniques ; d'autres aciéries de ronds à béton à FAE ont dû installer des compensateurs a posteriori sous la pression des régulateurs [S23, S24]	Niveau de court-circuit au raccordement en 225 kV ; résultats de l'étude de papillotement	Étude de papillotement avant commande ; STATCOM et filtres spécifiés avec le four	Jalon 1

Risque	Pourquoi il compte (éléments)	Indicateur précoce	Atténuation	Décidé au
Fourniture électrique ferme	150 MW de demande industrielle insatisfaite en octobre 2026 [S89] ; production hydraulique variable selon la pluviométrie [S51] ; la ligne de la zone fournit d'abord 100 MW [S25]	Mise en service de la ligne 225 kV et du poste ; conditions du contrat de raccordement	Contrat de puissance sur la ligne de la zone ; fusion programmée hors des pointes plutôt qu'effacement ; alimentation de secours des systèmes critiques	Jalon 1, puis jalon 3
Approvisionnement et prix des unités de fer	Ferraille nationale d'environ 0,1 Mt par an (dérivé), dont RC-1 retient environ 30 000 t pour l'usine [S03] ; déficits prévus de boulettes maritimes de qualité RD [S17] ; prix de la ferraille en hausse d'environ 30 % en un an [S32]	Offres de contrats à terme ; écart entre le prix rendu des billettes et le coût de la charge métallique (livre blanc 04, chapitre 8)	Deux fournisseurs par unité de fer ; stockage couvert ; flexibilité de la charge ; collecte formelle de la ferraille	Jalon 1, revu chaque année
Capacité et fiabilité d'un four unique	Environ 8 000 coulées occupent environ 7 300 à 7 900 heures de four par an pour 450 à 490 kWh/t ; production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t (dérivé)	Décomposition des temps du fournisseur ; arrêts programmés et imprévus pendant la mise en service	Garantie de capacité ; puissance du transformateur fixée en avant-projet ; système de maintenance ; pièces critiques (transformateur, panneaux, électrodes) ; parc à billettes froides pour le laminoir	Jalon 1, démontrée avant le jalon 2
Certification des produits	NC 236 obligatoire ; un certificat retiré et des ronds à béton non conformes rappelés en 2024 [S26, S27]	Accréditation du laboratoire ; premiers audits de certification	Trempe en ligne ; essais de laboratoire sur chaque lot de coulée ; système de traçabilité	Jalon 1
Capacité des fournisseurs et lacunes de périmètre	Les usines de première génération ont dépassé leurs coûts, comme chez Stegra [S62]	Références des fournisseurs sur des usines comparables ; exhaustivité du périmètre	Conceptions éprouvées ; garanties de performance ; ingénieur indépendant du maître d'ouvrage	Jalon 1
Compétences	Pas de département de métallurgie dans la principale école d'ingénieurs [S39]	Avancement du recrutement et de la formation par rapport au plan	Formation par les fournisseurs, simulateurs, partenariats avec les écoles d'ingénieurs [S39, S103]	À partir du jalon 1
Minerai de qualité RD	Le concentré RD de Mbalam n'existe qu'en essais [S19] ; le minerai à expédition directe n'est pas de qualité RD [S18]	Résultats de l'usine pilote ; projets d'usines de concentration et de bouletage	Preuve à l'échelle pilote ; contrat transitoire de boulettes RD importées	Jalon 4
Gaz pour la réduction directe	Réserves du gisement en production non publiques ; principale ressource nouvelle sans décision d'investissement [S35]	Audit des réserves ; conditions du contrat de vente de gaz	Réserves auditées ; contrat de long terme ; premier module plus petit	Jalon 4
Disponibilité de l'hydrogène	100 % d'hydrogène pour 1 Mt de DRI exigerait environ 2,7 TWh par an (dérivé), environ un tiers de la production de 2025 [S51]	Nouveaux projets hydroélectriques et de transport	Four compatible hydrogène ; incorporation à mesure que l'électricité bas carbone devient disponible	Jalon 4 et au-delà
Règles carbone sur les marchés d'exportation	Phase définitive du MACF depuis 2026 ; prix des certificats de 82,32 euros au 3e trimestre 2026 [S53, S54]	Part des exportations vers des marchés à prix du carbone	Émissions mesurées par produit dès le premier jour ; électricité bas carbone	Tous les jalons

Risque	Pourquoi il compte (éléments)	Indicateur précoce	Atténuation	Décidé au
Gestion des sous-produits	Les poussières de FAE contiennent du zinc, du plomb et du cadmium [S44] ; le laitier doit être stable pour être réutilisé	Filière de traitement convenue ; résultats d'essais sur le laitier	Plan de gestion des poussières ; traitement et certification du laitier	Jalon 1

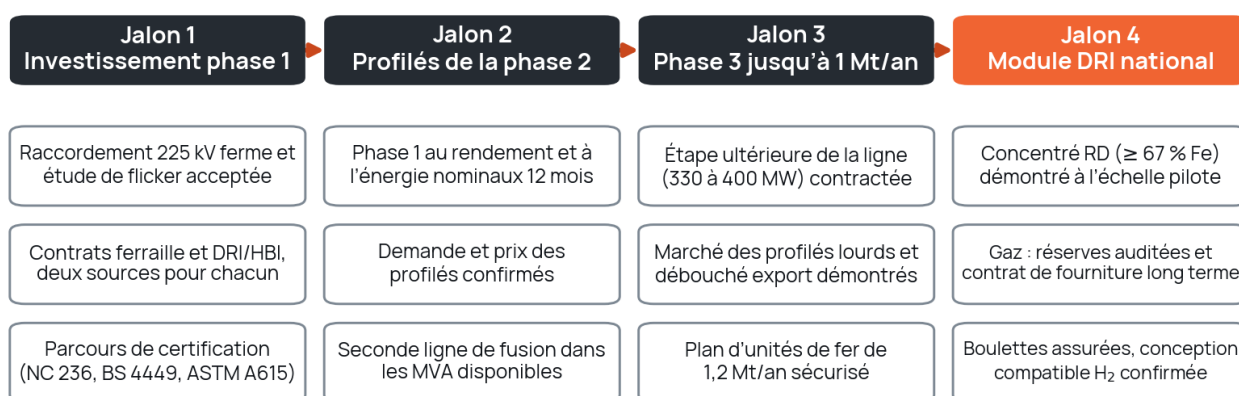
Source : appréciation de Cameroon Steel, à partir des éléments cités dans chaque ligne.

10.2 Quatre jalons, chacun franchi sur preuves plutôt qu'à date fixe

Une trajectoire par phases ne vaut que par la rigueur avec laquelle chacune de ses étapes est décidée. La figure 10.1 présente quatre jalons de décision. À chaque jalon, la décision est « feu vert » si les preuves satisfont aux critères, « attente » si elles sont incomplètes et « reconception » si elles montrent que le plan doit changer. Les jalons sont liés à des preuves, non à des dates : le calendrier du chapitre 9 indique quand chaque jalon est visé, non quand il doit être franchi.

Quatre jalons, chacun franchi sur preuves plutôt qu'à date fixe

Séquence indicative de jalons de la trajectoire par phases ; chaque jalon peut conclure à « feu vert », « attente » ou « reconception »



Les critères illustrent les preuves que les décideurs devraient exiger ; ce ne sont pas des engagements.

ILLUSTRATIF Figure 10.1. Jalons de décision indicatifs de la trajectoire électrique par phases, avec les preuves exigées à chacun.

Source : Cameroon Steel.

Le jalon 1, décision d'investissement de la phase 1, est le plus lourd de conséquences. Il exige un raccordement ferme à l'alimentation 225 kV de la zone, avec une étude de papillotement et d'harmoniques acceptée par le gestionnaire du réseau ; des contrats à terme ou des offres fermes pour la ferraille et pour le DRI ou le HBI, auprès d'au moins deux sources chacun, à des prix qui laissent un écart positif face aux billettes importées rendues ; un parcours de certification des produits pour NC 236 et les principales nuances internationales ; des études de site achevées et une étude d'impact environnemental et social approuvée et publiée dans le délai que les prêteurs exigent avant l'approbation par leur conseil (60 jours pour la catégorie de risque la plus élevée de la SFI) [S106] ; et un périmètre de fourniture assorti de garanties de performance sur l'électricité par tonne à la part de DRI prévue, la disponibilité du four, le rendement et la capacité, avec une puissance de transformateur qui permette d'atteindre la production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t.

Le jalon 2, laminoir à profilés et deuxième ligne de fusion de la phase 2, devrait exiger douze mois d'exploitation de la phase 1 au rendement, à la consommation d'énergie et à la capacité nominaux, ou à un niveau proche ; une demande et des prix confirmés pour les cornières, les profilés en U et les plats ; et la confirmation que la deuxième ligne de fusion tient dans la capacité électrique et le compensateur disponibles.

Le jalon 3, phase 3 jusqu'à 1 Mt/an, exige que l'étape ultérieure de 330 à 400 MW de la ligne de la zone soit contractée [S25] ; un marché et un débouché à l'export démontrés pour les profilés lourds ; une solution de coulée continue pour les blooms ou les ébauches de poutrelles ; et un plan d'approvisionnement d'environ 1,2 Mt d'unités de fer par an.

Le jalon 4, module national de réduction directe, exige un concentré de qualité réduction directe titrant au moins 67 % de fer, pauvre en gangue, démontré à l'échelle pilote à partir d'un corps minéralisé défini ; un approvisionnement en boulettes sécurisé ; des réserves de gaz auditées et un contrat de gaz de long terme couvrant la durée de vie du module ; et une conception de four à cuve compatible hydrogène, assortie d'un plan de surveillance, de déclaration et de vérification du CO₂.

UN JALON EST UN ENGAGEMENT À DÉCIDER SUR PREUVES. SA VALEUR EST DE POUVOIR DIRE « ATTENTE » SANS DIRE « JAMAIS ».

Cameroon Steel, trajectoire technologique

10.3 Les autres options comportent des risques plus grands

Les décideurs devraient comparer les risques de la trajectoire à ceux des autres options, et non à une option imaginaire sans risque.

Un **relamineur sans aciérie** serait moins coûteux et plus rapide, mais il ajouterait des capacités de laminage à un marché qui en a déjà plus qu'il n'en utilise [S06] et dépendrait entièrement de billettes importées, dont il ne peut maîtriser ni l'offre ni les prix [S05, S72]. Il ajouterait le moins de valeur et transférerait le plus de risque sur la balance en devises de l'État.

Une **usine à haut fourneau** aurait besoin de plusieurs millions de tonnes par an de capacité pour être efficace, de charbon à coke importé, et porterait l'intensité carbone la plus élevée de toutes les filières, 2,34 t de CO₂ par tonne selon la moyenne 2024 de worldsteel [S01]. Elle engagerait tout son capital avant de produire une tonne, et ne pourrait guère réduire sa taille si la demande décevait.

Une **usine à fours à induction** serait bon marché, mais elle peinerait à respecter les limites de phosphore et les exigences de ductilité des normes modernes de ronds à béton sans affinage complémentaire [S10], sur un marché dont les régulateurs font activement respecter la qualité [S26, S27].

Une **usine de réduction directe construite en premier** lierait le démarrage de l'aciérie à la disponibilité d'une usine de concentration, d'une usine de bouletage et d'un contrat de gaz, dont aucun n'existe aujourd'hui (chapitre 4). Elle repousserait la production de plusieurs années et accroîtrait le capital nécessaire avant toute recette.

La filière électrique par phases est la seule option qui commence à produire en quelques années, engage le capital par tranches, respecte les normes de qualité avec des équipements éprouvés et garde ouverte la voie du fer camerounais.

10.4 Qui porte quel risque

Un risque est mieux porté par la partie qui peut le maîtriser. Pour la trajectoire par phases, la répartition est globalement claire.

Le **fournisseur de technologie** porte la performance des équipements : capacité, rendement, consommation d'énergie et disponibilité, adossées à des garanties et à des essais. Le **gestionnaire du réseau et la zone** portent la livraison du raccordement à la capacité convenue et, avec l'usine, les limites de qualité de l'électricité convenues. **Cameroon Steel** porte l'exploitation, l'achat des charges métalliques, la qualité des produits, la sécurité et la performance environnementale. La **société minière** porte la preuve d'un concentré de qualité réduction directe, et le **producteur de gaz et l'État** la disponibilité, le prix et la fiscalité du gaz pour tout module de réduction directe. Les **prêteurs** attendront que chacune de ces répartitions soit inscrite dans des contrats avant de s'engager.

Certains risques ne peuvent être transférés : la demande du marché, le prix des unités de fer importées et l'évolution des règles carbone. La trajectoire les traite en maintenant chaque engagement assez limité pour être justifié par ses propres résultats.

10.5 Les indicateurs à suivre après le démarrage

Une fois la phase 1 en marche, un petit ensemble d'indicateurs montrera si le choix technologique tient ses promesses. Ils devraient être communiqués régulièrement au conseil d'administration et, sous forme de synthèse, aux prêteurs et au public :

- l'électricité par tonne d'acier liquide, par rapport à la valeur garantie, et la part de DRI dans la charge ;
- le temps de coulée à coulée et la disponibilité du four, par rapport aux 55 à 59 minutes et aux 7 000 à 7 700 heures de marche par an que retient la planification de la phase 1 ;
- le rendement métallique et le rendement de coulée et de laminage, par rapport aux hypothèses de RC-1 de 0,88 et 0,94 [S03] ;
- le papillotement (Pst et Plt) et la distorsion harmonique au point de raccordement, par rapport aux limites de la convention de raccordement ;
- la part des lots de coulée certifiés du premier coup selon NC 236 et les nuances internationales ;
- le CO₂ par tonne de produit, mesuré, par rapport à l'estimation de RC-1 [S03] ;
- les accidents avec arrêt de travail et les incidents de sécurité des procédés.

10.6 Une liste de contrôle pour les décideurs

Les questions du tableau 10.2 sont conçues pour être posées à tout stade du projet par quiconque doit juger de son avancement technique : un conseiller ministériel examinant des incitations, un chargé d'investissement d'une institution de financement du développement préparant une note de crédit, un ingénieur examinant une conception ou un journaliste qui suit le projet.

Tableau 10.2 Liste de contrôle pour les décideurs qui examinent l'usine sidérurgique de Kribi

Question	Preuves qui y répondent	Jalon concerné
Le raccordement de l'usine au réseau est-il ferme, et s'accompagne-t-il d'une étude de papillotement et d'harmoniques acceptée ?	Convention de raccordement ; rapport d'étude accepté par le gestionnaire du réseau ; spécification du compensateur	Jalon 1

Question	Preuves qui y répondent	Jalon concerné
L'usine dispose-t-elle d'au moins deux sources sous contrat pour chaque unité de fer ?	Contrats à terme ou offres fermes pour la ferraille et le HBI ; conception du stockage	Jalon 1
Le four, la coulée continue et le laminoir peuvent-ils livrer le tonnage prévu avec un taux d'utilisation réaliste ?	Décomposition des temps du fournisseur à la consommation garantie en kWh par tonne ; puissance du transformateur ; garantie de capacité ; plan de maintenance	Jalon 1
Le rond à béton sera-t-il certifié NC 236 dès le premier mois, et apte aux nuances BS 4449 et ASTM A615 ?	Conception du laminoir avec trempe en ligne ; plan du laboratoire ; calendrier de certification avec l'ANOR	Jalon 1
L'énergie, le rendement et la capacité sont-ils garantis par le fournisseur de technologie ?	Annexe de garanties de performance ; protocole d'essais ; revue par l'ingénieur du maître d'ouvrage	Jalon 1
L'étude d'impact environnemental et social et son plan de gestion sont-ils approuvés, y compris pour les poussières et le laitier de FAE, et publiés à temps pour les prêteurs ?	Certificat de conformité environnementale ; plan de gestion des déchets ; preuve de publication auprès des prêteurs	Jalon 1
Existe-t-il un plan de formation qui pourvoira l'usine en nationaux qualifiés ?	Plan de formation ; accords avec les écoles et les fournisseurs ; plan de simulateurs	Jalon 1
La phase 1 a-t-elle atteint pendant douze mois le rendement, la consommation d'énergie et la production nominaux ?	Rapports d'exploitation ; données du management de l'énergie	Jalon 2
La capacité électrique pour 1 Mt/an est-elle contractée ?	Contrat pour l'étape ultérieure de la ligne de la zone ; étude de papillotement actualisée	Jalon 3
Un concentré camerounais de qualité RD a-t-il été démontré à l'échelle pilote ?	Rapport de l'usine pilote avec analyses chimiques, rendement et essais de boulettes à partir d'un corps minéralisé défini	Jalon 4
Le gaz d'un module RD est-il sécurisé pour toute sa durée de vie ?	Audit indépendant des réserves ; contrat de vente de gaz de long terme ; régime fiscal	Jalon 4
Le module RD est-il compatible hydrogène, et les émissions sont-elles mesurées par produit ?	Spécification du four ; plan de surveillance, de déclaration et de vérification	Jalon 4

Source : Cameroon Steel.

LA PLUPART DES RISQUES TECHNOLOGIQUES PEUVENT ÊTRE LEVÉS AVANT L'ENGAGEMENT

Les principaux risques technologiques de la trajectoire par phases sont des risques d'interface : réseau, charges métalliques, minerai et gaz. Chacun peut être réduit par une étude, un essai pilote ou un contrat avant l'engagement de l'investissement correspondant. Les quatre jalons transforment ce principe en règle de décision.

10.7 Ce que les critères de décision impliquent pour le choix de la filière

Les critères de décision renforcent la conclusion de ce livre blanc. La filière électrique permet de fonder le premier engagement du projet sur des preuves qui peuvent être obtenues dès maintenant, sur le réseau, les unités de fer, les équipements et le produit, pendant que se constituent les preuves relatives à la production nationale de fer (minerai, boulettes, gaz). Aucune autre filière ne permet la même dissociation. C'est pourquoi un four à arc électrique, alimenté d'abord en ferraille et en DRI ou HBI importés, puis en fer de réduction directe produit à partir de minerai camerounais concentré, offre le meilleur équilibre entre intensité capitalistique, flexibilité, émissions et rapidité pour un nouveau producteur d'Afrique centrale.

10.8 Ce qui changerait la conclusion

Une recommandation ne vaut que par les conditions dans lesquelles elle tient. Quatre évolutions modifieraient l'équilibre décrit dans ce livre blanc, et les décideurs devraient les surveiller.

Un **marché beaucoup plus vaste, doté d'une chaîne d'approvisionnement en charbon**, rouvrirait le dossier du haut fourneau. Si la demande régionale de produits longs et plats atteignait plusieurs millions de tonnes par an et si une source sûre de charbon à coke et les capacités portuaires correspondantes étaient développées, une usine intégrée pourrait devenir rentable, même si son intensité carbone pèserait chaque année davantage à mesure que se durcissent les mesures carbone aux frontières [S53, S55].

Une **pénurie prolongée d'unités de fer négociées** ralentirait la trajectoire. Si le HBI et la ferraille devenaient rares ou très chers avant que le DRI national soit prêt, la phase 1 fonctionnerait en dessous de sa capacité ou avec une part de DRI plus faible, et l'argument en faveur d'une avancée du jalon de réduction directe se renforcerait, sous réserve des mêmes preuves sur le minerai et le gaz.

L'**absence de gaz à long terme** modifierait la forme de la production nationale de fer plutôt que la filière. Sans contrat de gaz, un module de réduction directe ne pourrait fonctionner qu'à l'hydrogène, ce qui supposerait d'attendre de nouvelles capacités de production bas carbone (chapitre 4).

Un **raccordement au réseau incapable de supporter un four à arc** exigerait une production captive ou dédiée et un compensateur plus important, ce qui augmenterait les coûts sans changer la technologie sidérurgique.

Aucune de ces évolutions ne constitue le scénario central au vu des éléments disponibles en octobre 2026. Chacune serait visible tôt, et la structure en jalons permet au plan d'y répondre sans dévaloriser les investissements déjà réalisés.

CHAPITRE 11

LACUNES DE CONNAISSANCE : CE QUE L'ON NE SAIT PAS ENCORE, ET COMMENT ON L'ÉTABLIRA

Ce livre blanc repose sur des sources publiées et sur la base de planification de Cameroon Steel. Plusieurs faits qui comptent pour les choix technologiques ne sont pas encore connus, ou ne le sont qu'à partir de données anciennes, partielles ou modélisées. Aucun d'eux ne remet en cause la conclusion selon laquelle une filière électrique par phases est la bonne ; chacun influe sur la taille, le calendrier ou la conception d'une étape. Ce chapitre recense ces lacunes, explique pourquoi chacune compte et indique comment, par qui et quand elle sera comblée. Les lacunes correspondent aux jalons de décision du chapitre 10.

11.1 Lacunes relatives au réseau et à l'électricité

La principale inconnue technique de la phase 1 est la puissance de court-circuit du réseau au point de raccordement de l'usine en 225 kV. Elle détermine le papillotement que provoquera le four à arc, et donc la taille et le type du compensateur nécessaire (chapitre 5). Elle ne pourra être établie qu'une fois la ligne 225 kV et le poste de la zone mis en service et modélisés avec le gestionnaire du réseau de transport. Une lacune connexe porte sur la capacité ferme que la ligne de la zone réservera à l'usine à chaque étape, au-delà des valeurs de conception publiées de 100 MW dans un premier temps et de 330 à 400 MW ensuite [S25].

La deuxième lacune est la consommation réelle d'électricité de l'usine. RC-1 retient une valeur de référence de 450 kWh par tonne pour le four, dans une fourchette de 347 à 500 [S03] ; ce livre blanc ajoute une valeur haute de planification d'environ 490 kWh avec 30 % de DRI ou de HBI dans la charge, qui ajoute environ 13 GWh par an à la phase 1 et environ quatre minutes à chaque coulée (chapitre 5). Les valeurs garanties par le fournisseur de technologie et la puissance du transformateur remplaceront ces références lors de l'ingénierie d'avant-projet, et diront si un seul four atteint la capacité nominale de 0,3 Mt/an ou la production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t.

11.2 Lacunes relatives aux unités de fer

Aucune enquête sur le gisement de ferraille du Cameroun n'a été publiée depuis l'étude de 2007, dont les données datent de 2006 [S13]. L'estimation de ce livre blanc selon laquelle environ 0,1 Mt de ferraille est collectée chaque année est un ordre de grandeur dérivé (annexe A) ; RC-1 ne retient qu'environ 30 000 t par an de ferraille nationale pour l'usine, dans une fourchette de 0 à 60 000 t [S03]. Une enquête nationale sur la ferraille, idéalement menée avec les associations professionnelles et l'administration des douanes, établirait les volumes, les catégories et la chaîne de collecte.

Les prix et les conditions contractuelles du HBI et de la ferraille importés sur la durée de la phase 1 ne sont pas connus. Ils dépendent de marchés sur lesquels la charge de qualité réduction directe devrait se tendre [S17] et, avec le prix des billettes importées, ils fixent l'écart sur lequel repose l'intérêt de l'aciérie (livre blanc 04, chapitre 8). Des offres fermes d'au moins deux fournisseurs par unité de fer seront sollicitées avant la décision d'investissement de la phase 1.

11.3 Lacunes relatives au minerai et à l'élaboration du fer

Le concentré de qualité réduction directe qui alimenterait un module de réduction directe à Kribi n'a été produit qu'en essais [S19]. Une production à l'échelle pilote à partir d'un corps minéralisé défini, avec des essais de résistance et de réductibilité des boulettes, est nécessaire. Aucune usine de concentration ni aucune usine de bouletage de qualité réduction directe ne figure dans un plan publié [S36, S81]. L'emplacement, la propriété et le calendrier d'une telle usine restent ouverts.

Les réserves restantes du gisement de gaz en production au Cameroun ne sont pas publiques, et la principale ressource non développée n'a pas fait l'objet d'une décision d'investissement [S35]. La fiscalité du gaz pour les utilisateurs industriels et le prix auquel le gaz pourrait être contracté pour la durée de vie d'un module de réduction directe sont également inconnus. Un audit indépendant des réserves et des négociations avec la société pétrolière nationale combleraient ces lacunes avant le jalon 4.

11.4 Lacunes relatives au site, au climat et aux produits

Aucune classification mesurée de la corrosivité atmosphérique selon l'ISO 9223 n'a été publiée pour Kribi [S100]. L'humidité et la situation côtière laissent présager les catégories supérieures, mais une année d'essais d'exposition sur site est nécessaire pour classer correctement le site, tant pour les structures de l'usine que pour les recommandations aux clients.

La norme nationale des ronds à béton NC 236 est citée par la presse, mais son texte intégral n'a pas été consulté pour ce livre blanc [S26, S27]. Avant la phase 1, Cameroon Steel obtiendra la norme auprès de l'ANOR et mettra ses exigences en regard de BS 4449 et d'ASTM A615 dans les spécifications de conception du laminier.

11.5 Lacunes relatives aux coûts des technologies

Ce livre blanc ne donne délibérément aucun montant d'investissement pour l'usine de Cameroon Steel, et les références publiques qu'il utilise proviennent d'autres régions et d'autres années. Aucune donnée de coût publique et récente n'a été trouvée pour les laminoirs à barres et fil machine de fourniture chinoise en Afrique, pour les modules africains de réduction directe ou pour des usines de bouletage de la taille qu'exigerait un module de réduction directe à Kribi. Ces coûts seront établis par des consultations concurrentielles des fournisseurs lors de l'ingénierie d'avant-projet et revus par un ingénieur indépendant avant chaque jalon, plutôt que déduits de références.

Tableau 11.1 Lacunes de connaissance : portée, résolution, responsables et échéances

Lacune	Pourquoi elle compte	Comment elle sera comblée	Qui	Quand (objectif)	Avant le
Niveau de court-circuit et capacité ferme au raccordement en 225 kV	Détermine le papillotement, la taille du compensateur et la sécurité électrique de la phase 1	Étude de réseau avec le gestionnaire du réseau de transport ; convention de raccordement	Gestionnaire du réseau de transport ; autorité portuaire ; Cameroon Steel	2027 à 2028, avant le financement	Jalon 1
Électricité par tonne (fourchette de planification de 450 à 490 kWh/t), heures de four, rendement et capacité garantis par le fournisseur	Disent si un seul four atteint la capacité nominale ou 270 000 à 300 000 t ; déterminent l'appel de puissance et le coût d'exploitation	Ingénierie d'avant-projet ; annexe de garanties de performance ; puissance du transformateur	Cameroon Steel ; fournisseur de technologie	2027, pendant l'ingénierie d'avant-projet	Jalon 1

Lacune	Pourquoi elle compte	Comment elle sera comblée	Oui	Quand (objectif)	Avant le
Délai de publication de l'étude d'impact exigé par les prêteurs	Un certificat au quatrième trimestre 2028 laisse peu de temps avant le financement [S106]	Plan de publication convenu avec les prêteurs ; étude publiée dès son approbation	Cameroon Steel ; prêteurs	2028	Jalon 1
Gisement et collecte actuels de la ferraille nationale	Fixent la part nationale de la charge et la stratégie de collecte	Enquête nationale sur la ferraille avec le secteur et les douanes	Cameroon Steel ; associations professionnelles ; douanes	2027	Jalon 1
Prix et conditions de long terme du HBI et de la ferraille importés	Fixent l'écart face aux billets importés rendues et la sécurité d'approvisionnement	Offres fermes d'au moins deux fournisseurs par unité de fer	Cameroon Steel ; fournisseurs	2027 à 2028, pendant l'ingénierie d'avant-projet	Jalon 1
Texte intégral et exigences d'essais de NC 236	Définit la certification pour le marché national	Obtention auprès de l'ANOR ; tableau de conformité	Cameroon Steel ; ANOR	2027	Jalon 1
Filière de traitement des poussières de FAE	Un déchet dangereux doit avoir une destination légale et sûre	Plan de gestion des déchets dans l'étude d'impact	Cameroon Steel ; autorité environnementale	2027 à 2028, avec l'étude d'impact	Jalon 1
Corrosivité mesurée à Kribi (ISO 9223)	Durabilité de l'usine, pratiques de stockage, recommandations aux clients	Programme d'exposition sur site d'un an	Cameroon Steel ; laboratoire d'essais	2029 à 2030	Jalon 2
Marché des profilés et des profilés lourds	Dimensionnement et calendrier des phases 2 et 3	Étude de marché ; discussions sur des contrats d'enlèvement	Cameroon Steel	2031 à 2032 (profilés) ; 2033 à 2034 (profilés lourds)	Jalons 2 et 3
Concentré de qualité RD à l'échelle pilote	Condition préalable du DRI national	Usine pilote sur un corps minéralisé défini ; essais de boulettes	Société minière avec Cameroon Steel ; laboratoire indépendant	2027 à 2030	Jalon 4
Usine de bouletage : emplacement, propriétaire, calendrier	Condition préalable du DRI national	Accord entre la mine et l'aciérie ; étude de faisabilité	Société minière ; Cameroon Steel	2028 à 2032	Jalon 4
Réserves de gaz restantes et prix du gaz à long terme	Condition préalable d'un module RD au gaz	Audit indépendant des réserves ; contrat de vente de gaz	Société pétrolière nationale ; opérateur du champ ; Cameroon Steel	2026 à 2028 (audit) ; contrat avant le jalon 4	Jalon 4
Électricité bas carbone pour l'incorporation d'hydrogène	Fixe le rythme de décarbonation du DRI	Planification du secteur électrique ; contrats d'électricité de long terme	Ministère de l'Eau et de l'Énergie ; producteurs d'électricité ; Cameroon Steel	Avec la décision sur le module RD	Après le jalon 4

Source : Cameroon Steel. Les échéances sont des objectifs de planification de Cameroon Steel, liés au calendrier de RC-1 (édition du 10 octobre 2026) ; les dates indiquées pour les organismes publics et les autres parties sont des propositions, non leurs engagements.

11.6 Comment les lacunes seront comblées et rendues publiques

Cameroon Steel entend combler les lacunes du jalon 1 pendant l'ingénierie d'avant-projet et l'étude d'impact, que RC-1 vise pour 2027 à 2028, avec le certificat au quatrième trimestre 2028 [S03], et mettre à jour ce livre blanc lorsque les résultats seront disponibles. Lorsqu'une lacune sera comblée par un tiers (le gestionnaire du réseau de transport, la société pétrolière nationale, la société minière ou l'agence de normalisation), la mise à jour citera le document publié par ce tiers. Lorsqu'une lacune restera ouverte à un jalon, la décision du jalon sera « attente » pour l'étape qui en dépend, comme le décrit le chapitre 10.

Trois principes régissent les mises à jour. Premièrement, les données mesurées remplacent les références dès qu'elles existent, et la pastille de statut de chaque figure change en conséquence. Deuxièmement, une valeur dérivée est toujours présentée avec ses données d'entrée, afin que les lecteurs puissent la recalculer lorsqu'une donnée change. Troisièmement, rien de ce qui ne peut être sourcé n'est publié : lorsque ce livre blanc indique qu'une valeur n'est pas connue, c'est qu'aucune source publique fiable n'a été trouvée.

ANNEXE A

MÉTHODE, HYPOTHÈSES ET CALCULS

Cette annexe explique comment le livre blanc a été préparé, les conventions qu'il utilise, les hypothèses de planification qui sous-tendent chaque chiffre du projet et les calculs qui fondent chaque valeur signalée comme « dérivée ». Un lecteur disposant des sources citées peut reproduire chaque valeur dérivée.

A.1 Démarche et conventions

Le livre blanc a été préparé par Cameroon Steel à partir de sources publiées consultées jusqu'au 10 octobre 2026, recensées à l'annexe C, et de la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (édition du 10 octobre 2026), une base de planification de classe 5 citée comme la configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification). Cette édition utilise les valeurs de RC-1 révisées le 10 octobre 2026 : une ferraille nationale disponible pour l'usine d'environ 30 000 t par an (fourchette de 0 à 60 000) ; une capacité nominale de la phase 1 de 300 000 t de produits finis, pour une production soutenue attendue de 270 000 à 300 000 t ; un tonnage entrant au port d'environ 351 000 t par an en phase 1 ; et un calendrier prévoyant des travaux à partir de 2029, une première coulée au second semestre 2030 et une montée en cadence en 2031. Chaque chiffre est assorti d'une unité, d'une année ou d'une date et d'un renvoi à une source. Les figures portent l'une des quatre pastilles de statut suivantes : sourcé (lu directement dans une source publiée), dérivé (calcul arithmétique sur des données sourcées, présenté ci-dessous), hypothèse (une hypothèse de planification explicite) ou illustratif (un schéma ou un scénario, et non une prévision).

Les chiffres du projet issus de RC-1 portent aussi l'un de trois qualificatifs, réservés aux valeurs de RC-1 et jamais employés comme statut de figure : prévu (une valeur de la configuration actuelle que Cameroon Steel entend construire, comme les unités et la capacité nominale de la phase 1), cible (une date ou une performance visée par le plan mais qui dépend des autorisations, du financement ou des fournisseurs, comme la première coulée) et indicatif (une valeur d'une phase ultérieure ou d'une option non engagée, susceptible de changer sensiblement, comme les phases 2 et 3 et le module de réduction directe).

Les unités sont métriques. « t » désigne la tonne métrique ; « Mt » le million de tonnes ; « Mt/an » le million de tonnes par an ; « kt » le millier de tonnes. L'énergie est exprimée en GJ, MWh, GWh ou TWh ; 1 MWh équivaut à 3,6 GJ. Les volumes de gaz naturel suivent la convention du secteur camerounais en pieds cubes standard : 1 Mscf correspond à mille pieds cubes et 1 bcf à un milliard. Pour les conversions, ce livre blanc retient 1,094 GJ par Mscf (environ 1,037 MMBtu par Mscf à 1,055 GJ par MMBtu), hypothèse adaptée à un gaz de qualité réseau. Les montants sont exprimés dans la monnaie et l'année de la source ; le FCFA n'est converti en USD que lorsque cela est indiqué, au taux de planification de RC-1 de 600 FCFA par USD (fourchette de 560 à 650) [S03]. Le livre blanc ne donne aucun montant d'investissement pour Cameroon Steel.

worldsteel et l'AIE mesurent l'énergie et le CO₂ selon des périmètres différents. Les moyennes par filière de worldsteel incluent les émissions directes, les émissions liées à l'électricité achetée et les émissions amont des matières, et comptent l'électricité en énergie primaire ; l'AIE présente l'énergie finale et, pour les émissions indirectes, retient un facteur d'émission moyen mondial du réseau de 538 g CO₂/kWh en 2019 [S01, S02]. Les intensités de RC-1 sont exprimées par tonne de produit fini, et non par tonne d'acier brut, et utilisent le facteur d'émission du réseau camerounais. Les comparaisons entre ces bases sont indicatives.

A.2 Hypothèses de planification de RC-1

Tableau A.1 Hypothèses de référence et de planification de RC-1 utilisées dans le livre blanc (valeur de planification et fourchette)

Paramètre	Valeur de planification	Fourchette	Statut et fondement
Capacité de produits finis de la phase 1 (nominale)	300 000 t/an	250 000 à 300 000	Prévu [S03]
Production soutenue attendue de la phase 1	285 000 t/an	270 000 à 300 000	Dérivé [S03] ; D18
Capacité supplémentaire de la phase 2	200 000 t/an	150 000 à 200 000	Indicatif [S03]
Capacité supplémentaire de la phase 3	500 000 t/an	Non précisée	Indicatif [S03]
Module DRI (réserve)	1 000 000 t de DRI/an	800 000 à 1 100 000	Hypothèse [S03]
Électricité du FAE, valeur de planification	450 kWh/t liquide	347 à 500	Référence SFI [S03, S44]
Électricité du FAE, valeur haute de planification avec 30 % de DRI/HBI	Environ 490 kWh/t liquide	Sans objet	Dérivé (D9) [S20]
Électricité auxiliaire (four-poche, coulée continue, oxygène, eau, air)	70 kWh/t liquide	50 à 100	Hypothèse [S03]
Électricité de laminage	110 kWh/t de produit	70 à 140	Référence SFI [S03, S44]
Chauffage des billettes par induction (phase 1)	300 kWh/t de produit	150 à 400	Hypothèse [S03]
Réchauffage au gaz (phases 2 et 3)	1,3 GJ/t de produit	1,1 à 1,6	Hypothèse [S03]
Appoint d'eau	2,0 m³/t de produit	1,5 à 3,0	Hypothèse [S03]
Oxygène	35 Nm³/t liquide	25 à 45	Hypothèse [S03]
Laitier de FAE	140 kg/t liquide	110 à 180	Hypothèse [S03] ; plage SFI des résidus solides, pour l'essentiel du laitier [S44]
Poussières de FAE	15 kg/t liquide	10 à 20	Hypothèse [S03] ; BREF de l'UE : 10 à 30 [S42]
Calamine	20 kg/t de produit	15 à 25	Hypothèse [S03]
Rendement métallique	0,88 t liquide/t de charges métalliques	0,85 à 0,91	Hypothèse [S03]
Rendement de coulée et de laminage	0,94 t de produit/t liquide	0,92 à 0,96	Hypothèse [S03]
Part de DRI/HBI dans la charge (phases 1 à 3)	30 %	20 à 50 %	Hypothèse [S03]
Ferraille nationale disponible pour l'usine	30 000 t/an	0 à 60 000	Hypothèse, bornée par l'étude de 2006 [S03, S13]
Intensité carbone du réseau	226 g CO ₂ /kWh	200 à 300	Moyenne 2024 [S03, S07]
Facteur d'émission du gaz naturel	0,0561 t CO ₂ /GJ	Sans objet	Valeur par défaut du GIEC 2006 [S96]
Émissions directes du FAE (électrodes, carbone de charge, chaux)	0,10 t CO ₂ /t liquide	0,06 à 0,15	Hypothèse [S03]
Émissions amont du DRI importé	0,7 t CO ₂ /t de DRI	0,5 à 0,9	Hypothèse [S03]
Gaz pour la réduction directe	10,0 GJ/t de DRI	9,2 à 10,0	Hypothèse [S03] ; fourchette publiée [S20, S48]
FCFA par USD (planification)	600	560 à 650	Hypothèse [S03]

Paramètre	Valeur de planification	Fourchette	Statut et fondement
Facteur de puissance moyen du FAE (présent livre blanc)	Environ 0,8	Non précisé	Hypothèse retenue pour le calcul du temps de coulée à coulée
Puissance active du four (présent livre blanc)	Environ 25 MW	24 à 26 MW (classe 30 à 33 MVA)	Hypothèse retenue pour le calcul du temps de coulée à coulée
Heures de marche du four de la phase 1 (présent livre blanc)	7 000 à 7 700 h/an	Sans objet	Hypothèse retenue pour la fourchette de production (D18)
Consommation de l'électrolyseur (présent livre blanc)	50 MWh/t de H ₂	Non précisée	Hypothèse retenue pour le calcul relatif à l'hydrogène

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), édition du 10 octobre 2026 [S03], et références citées.

A.3 Calculs

D1. Fourchettes de coût d'investissement par filière (chapitre 2, figure ES.1, figure 2.3). L'AIE donne des coûts d'investissement annualisés de 52 à 94 USD par tonne de production annuelle pour la filière du haut four-neau, de 53 à 136 USD pour la filière DRI-FAE au gaz et de 34 à 58 USD pour le FAE à ferraille, avec un taux d'actualisation de 8 %, une durée de 25 ans et un facteur de capacité de 90 % [S02]. Le facteur de recouvrement du capital à 8 % sur 25 ans est de 0,0937. Le coût d'investissement hors intérêts par tonne de capacité annuelle est égal au coût annualisé multiplié par le facteur de capacité et divisé par le facteur de recouvrement : par exemple $52 \times 0,9 \div 0,0937 \approx 500$ USD. Les fourchettes obtenues sont d'environ 500 à 900, 510 à 1310 et 330 à 560 USD par tonne, en USD d'environ 2019. Elles ne sont pas actualisées aux prix courants ; les budgets annoncés entre 2020 et 2026 (figure 2.3), de périmètre plus large, vont d'environ 660 à 1 560 USD par tonne. Ces fourchettes servent à comparer les filières, non à chiffrer une usine. Chaque référence de projet est le budget annoncé divisé par la capacité annoncée. Les trois annonces américaines expriment la capacité en tonnes courtes (1 tonne courte = 0,9072 t), converties ici en tonnes : 300 millions USD pour 500 000 tonnes courtes, soit 0,454 Mt, donnent environ 660 USD par tonne [S58] ; 350 millions USD pour 430 000 tonnes courtes, soit 0,390 Mt, environ 900 USD [S57] ; et 450 millions USD pour 500 000 tonnes courtes, environ 990 USD [S59].

D2. Réduction du CO₂ des filières électriques (figure ES.1, synthèse et chapitre 2). 1 moins $1,47 \div 2,34 = 37\%$; 1 moins $0,69 \div 2,34 = 71\%$ [S01].

D3. Charge brute du MACF (chapitre 2). Intensité moyenne de la filière multipliée par le prix des certificats du troisième trimestre 2026, 82,32 euros par tonne [S54] : $2,34 \times 82,32 \approx 193$ euros ; $1,47 \times 82,32 \approx 121$ euros ; $0,69 \times 82,32 \approx 57$ euros par tonne, avant déduction des allocations gratuites de l'UE et de tout prix du carbone acquitté dans le pays d'origine. Comme les moyennes de worldsteel incluent l'électricité achetée et les matières amont, que le MACF ne tarife pas pour le fer et l'acier, ce sont des plafonds et non des estimations de la charge d'un exportateur ; le livre blanc 06 (tableau 5.2) calcule la charge sur le périmètre du MACF.

D4. Émissions liées à l'électricité du FAE (chapitre 2). $450 \text{ kWh} \times 0,226 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \approx 0,10 \text{ t de CO}_2$ par tonne d'acier liquide [S03, S07].

D5. Ferraille nationale collectée (chapitre 3, figure 3.2). Production nationale d'environ 260 000 t (2022) [S74] $\times$ environ 1,21 t de charge métallique par tonne de produit ($1 \div (0,88 \times 0,94)$, les rendements de RC-1) $\times$ une part de ferraille locale d'environ 40 % [S32, S33] ≈ 125 000 t, présentée comme « de l'ordre de 0,1 Mt ». Le résultat est un ordre de grandeur, sensible à chacune des données d'entrée ; le livre blanc 04 dérive environ 108 kt (80 à 135 kt) des importations de billettes de 2023.

D6. Bilans de RC-1 (chapitres 3 et 9). Acier liquide = produits finis $\div 0,94$; charges métalliques = acier liquide $\div 0,88$; DRI/HBI = 30 % des charges métalliques ; ferraille = le solde. Électricité = acier liquide $\times (450 + 70) \text{ kWh}$ + produits finis $\times 110 \text{ kWh}$ + produits de la phase 1 $\times 300 \text{ kWh}$ pour le chauffage par induction. Gaz = produits des phases 2 et 3 $\times 1,3 \text{ GJ}$. Périmètre 1 = acier liquide $\times 0,10 \text{ t}$ + gaz $\times 0,0561 \text{ t/GJ}$; périmètre 2 = électricité $\times 0,226 \text{ t/}$

MWh ; amont du DRI importé = $\text{DRI} \times 0,7 \text{ t} [\text{S03}]$. Pour la phase 1 : $300\,000 \div 0,94 = 319\,149 \text{ t}$ d'acier liquide ; $\div 0,88 = 362\,669 \text{ t}$ de charges métalliques ; $30\% = 108\,801 \text{ t}$ de DRI ; électricité = $319\,149 \times 0,520 + 300\,000 \times 0,410 = 288\,957 \text{ MWh}$ (moyenne de 33 MW sur 8 760 heures ; RC-1 indique 36 MW sur une base de 8 000 heures de fonctionnement) ; périmètres 1 + 2 = $(31\,915 + 65\,304) \div 300\,000 = 0,324 \text{ t}$ par tonne ; y compris l'amont du DRI ($76\,161 \text{ t}$) = $0,578 \text{ t}$. Les bilans électriques de RC-1 retiennent 450 kWh/t au four. À la valeur haute de planification d'environ 490 kWh/t (D9), l'électricité augmente de 40 kWh par tonne d'acier liquide : environ 13 GWh en phase 1 (302 GWh ; 38 MW sur la base de 8 000 heures), 21 GWh pour les phases 1 et 2 (443 GWh ; 55 MW) et 43 GWh à plein développement (796 GWh ; 99,5 MW). L'intensité des périmètres 1 + 2 augmente de $40 \times 0,226 \div 0,94 \approx 0,01 \text{ t}$ par tonne de produit, à environ 0,33 t en phase 1 et 0,34 t à plein développement, et à environ 0,59 t en incluant l'amont du DRI.

D7. Part des billettes dans les importations du chapitre 72 (figure 3.1). 161 400 t de la position SH 7207 [S05] $\div 304\,062 \text{ t}$ d'importations du chapitre 72 en 2023 [S71] $\approx 53\%$. Les deux sources relèvent de systèmes de déclaration différents : la part est donc indicative.

D8. Temps de coulée à coulée et heures de four (chapitre 5, figure 5.2). Énergie par coulée = environ $40 \text{ t} \times 450 \text{ kWh/t} = 18 \text{ MWh}$ à la valeur de planification, ou environ $40 \text{ t} \times 490 \text{ kWh/t} = 19,6 \text{ MWh}$ à la valeur haute. Puissance active : environ 25 MW, hypothèse retenue pour un transformateur de four de la classe 30 à 33 MVA à un facteur de puissance moyen d'environ 0,8 (24 à 26 MW). Le temps sous tension est d'environ 43 minutes pour 18 MWh et d'environ 47 minutes pour 19,6 MWh. Temps hors tension repris de la conception de référence publiée [S75], avec une minute supplémentaire pour le chargement d'un panier plus petit : 12 minutes. Le temps de coulée à coulée est d'environ 55 ou 59 minutes. Coulées à la capacité nominale = $320\,000 \text{ t} \div \text{environ } 40 \text{ t} = \text{environ } 8\,000$. Heures de four = environ $8\,000 \times \text{temps de coulée à coulée} \div 60 : 8\,000 \times 55 \div 60 \approx 7\,300$ à la valeur de planification et $8\,000 \times 59 \div 60 \approx 7\,900$ à la valeur haute, sur les 8 760 heures de l'année. Puissance spécifique du transformateur de la conception de référence = $156 \text{ MVA} \div 150 \text{ t} \approx 1,04 \text{ MVA}$ par tonne [S75] ; celle du four de la phase 1 est plus faible.

D9. Électricité du FAE et part de DRI (chapitre 5, figure 5.3). Électricité = 450 kWh/t, lus comme une valeur en tout-ferraille, + 14,5 kWh/t par tranche de 10 points de pourcentage de DRI dans la charge, selon la référence ENERGIRON [S20] : 493,5 kWh/t à 30 %, retenus comme valeur haute de planification d'environ 490 kWh/t, et 551,5 kWh/t, environ 550, à 70 %. La valeur de planification de RC-1, 450 kWh/t, est comprise dans la fourchette de la SFI de 347 à 500 kWh/t, qui couvre déjà les charges courantes ; la pénalité ne sert qu'à établir la valeur haute.

D10. Besoin en gaz d'un module DRI (chapitre 4, figure 4.4). Gaz = tonnage de DRI $\times 10 \text{ GJ/t}$ [S20] ; 1 Mt de DRI $\rightarrow 10 \text{ PJ} \div 1,094 \text{ GJ par Mscf} \approx 9,14$ millions de Mscf $\approx 9,1 \text{ bcf}$; 0,5 Mt $\rightarrow 4,6 \text{ bcf}$. Part de la production nationale de 2025 (75,475 bcf) [S21] : $9,14 \div 75,475 \approx 12\%$. Alimentation du GNL en 2025 = $17,905 + 53,716 = 71,6 \text{ bcf} \approx 95\%$ de la production [S21].

D11. Coût du gaz par tonne de DRI (chapitre 4). 9,14 Mscf par tonne $\times 1\,830 \text{ FCFA}$ (prix de la centrale) $\approx 16\,700 \text{ FCFA}$; $\times 3\,135 \text{ FCFA}$ (prix industriel) $\approx 28\,700 \text{ FCFA}$ [S21] ; à 600 FCFA par USD, environ 28 à 48 USD par tonne. Le chapitre 4 cite la fourchette du livre blanc 05 (chapitre 7) : 27 à 51 USD.

D12. Minerai, concentré et boulettes par tonne de DRI (chapitre 4, figure 4.3). Boulettes par tonne de DRI $\approx 1,45$, d'après les chiffres de BloombergNEF cités par l'IEEFA (210 Mt d'offre de boulettes plafonnant le DRI à environ 145 Mt en 2030 ; 252 Mt le plafonnant à environ 174 Mt en 2040) [S17]. Concentré $\approx$ boulettes (liant et humidité ignorés). Minerai = concentré $\div$ rendement massique de 0,45 [S19] $\approx 3,2 \text{ t}$ par tonne de DRI. Pour 1 Mt de DRI : environ 1,45 Mt de boulettes et 3,2 Mt d'itabirite par an.

D13. Électricité nécessaire au DRI à l'hydrogène (chapitre 4). 54 kg d'hydrogène par tonne de DRI [S85] $\times 50 \text{ MWh}$ par tonne d'hydrogène (hypothèse) = 2,7 MWh par tonne de DRI ; pour 1 Mt, 2,7 TWh par an, à comparer à une production nationale de 8,12 TWh en 2025 [S51], soit environ 33 %.

D14. CO₂ du réchauffage (chapitre 6, figure 6.2). Induction : $300 \text{ kWh} \times 0,226 \text{ kg/kWh} \approx 0,068 \text{ t de CO}_2 \text{ par tonne}$. Gaz : $1,3 \text{ GJ} \times 0,0561 \text{ t/GJ} \approx 0,073 \text{ t de CO}_2 \text{ par tonne}$ [S03, S07, S96]. Enfournement à chaud à 700 °C : $1,1 \text{ à } 1,6 \text{ GJ moins } 0,55 \text{ GJ}$ [S50] = $0,55 \text{ à } 1,05 \text{ GJ par tonne}$.

D15. Économie liée au management de l'énergie (chapitre 8). Amélioration de 4,1 % la première année [S31] $\times$ 289 GWh [S03] $\approx$ 12 GWh par an ; présentée comme « environ 4 % ».

D16. Usine complète avec DRI national (chapitre 9). À 1 Mt/an avec 70 % de DRI dans la charge : $\text{DRI} = 0,70 \times 1\,208\,897 \approx 846\,000 \text{ t}$. Émissions du four à cuve dues au gaz = $846\,000 \times 10 \text{ GJ} \times 0,0561 \approx 475\,000 \text{ t}$ [S20, S96] ; son électricité est comptée ci-après, avec celle de l'usine. Émissions directes du FAE = $1\,063\,830 \times 0,10 \approx 106\,000 \text{ t}$. Gaz de réchauffage = $910\,000 \text{ GJ} \times 0,0561 \approx 51\,000 \text{ t}$. Électricité = $753 \text{ GWh (RC-1)} + 1\,063\,830 \times 58 \text{ kWh}$ (quatre tranches supplémentaires de 14,5 kWh/t de 30 à 70 % de DRI) $\approx 62 \text{ GWh} + 846\,000 \times 73 \text{ kWh}$ pour le four à cuve $\approx 62 \text{ GWh} \approx 877 \text{ GWh} \times 0,226 \text{ kg}$ [S07] $\approx 198\,000 \text{ t}$. Total $\approx 830\,000 \text{ t} + 1\,000\,000 \text{ t de produit} \approx 0,83$, présenté comme « environ 0,8 t de CO₂ par tonne », hors production des boulettes et extraction minière.

D17. Unités de fer rapportées à la ferraille nationale (chapitre 3, constats). $1\,208\,897 \text{ t} + \text{environ } 125\,000 \text{ t (D5)} \approx 9,7$, présenté comme « à peu près dix fois ». Phase 1 : $362\,669 \div 125\,000 \approx 2,9$, ou environ 3,6 rapporté à l'ordre de grandeur arrondi de 0,1 Mt, présenté comme « trois à quatre fois » ; $362\,669 \div 53\,000 \text{ à } 61\,833 \approx 5,9 \text{ à } 6,8$ (« environ six fois »).

D18. Fourchette de production de la phase 1 et puissance du transformateur (chapitre 5, constat 9). Coulées = heures de marche $\times$ 60 $\div$ temps de coulée à coulée (D8). Pour 7 000 à 7 700 heures de marche : environ 7 640 à 8 400 coulées à environ 55 minutes, soit environ 305 000 à 336 000 t d'acier liquide ; environ 7 120 à 7 830 coulées à environ 59 minutes, soit environ 285 000 à 313 000 t. Produits finis = acier liquide $\times$ 0,94, plafonné à la capacité nominale du laminoir de 300 000 t : environ 287 000 à 300 000 t à 450 kWh/t et environ 268 000 à 294 000 t à 490 kWh/t, présentés comme environ 270 000 à 300 000 t, en cohérence avec la production soutenue attendue de RC-1 [S03]. Transformateur pour 320 000 t d'acier liquide en 7 000 heures à 490 kWh/t : temps de coulée à coulée = $7\,000 \times 60 \div \text{environ } 8\,000 \approx 52,5 \text{ minutes}$; temps sous tension = 52,5 moins 12 = 40,5 minutes ; puissance active = $19,6 \text{ MWh} \div 0,675 \text{ h} \approx 29 \text{ MW}$; $\div$ environ 0,8 $\approx$ 36 MVA, présenté comme environ 36 à 40 MVA. Effacement : pour 55 à 59 minutes par coulée, une heure de four perdue coûte à peu près une coulée d'environ 40 t.

D19. Tonnage entrant au port (chapitres 3 et 9). Tonnage entrant = charges métalliques moins ferraille nationale (30 000 t) plus environ 6 % des produits finis pour les consommables (chaux, ferro-alliages, électrodes, réfractaires) [S03] : $362\,669 \text{ moins } 30\,000 + 18\,000 \approx 351\,000 \text{ t en phase 1}$; $1\,208\,897 \text{ moins } 30\,000 + 60\,000 \approx 1\,239\,000 \text{ t à plein développement, avant tout DRI national}$. Ferraille importée en phase 1 = $253\,868 \text{ moins } 30\,000 \approx 224\,000 \text{ t}$.

D20. Unités de fer par tonne de billette (chapitre 2). $1 \div 0,88 \text{ de rendement métallique} \approx 1,14 \text{ t d'unités de fer par tonne d'acier liquide}$ [S03] ; avec des pertes de coulée d'environ 1 % (hypothèse), environ 1,15 t par tonne de billette.

A.4 Limites de l'analyse

Le livre blanc utilise des références publiées et une configuration de planification de classe 5. Les conceptions propres aux fournisseurs, les conditions de site et les conditions contractuelles modifieront de nombreuses valeurs, et certaines données reposent sur des sources anciennes ou de presse (par exemple les données de 2006 sur la ferraille et la part de ferraille rapportée par le secteur). Les valeurs de coût d'investissement sont des références destinées à comparer les filières ; ce ne sont pas des estimations du coût de l'usine de Cameroon Steel. Les estimations d'émissions des phases futures dépendent de l'évolution du réseau, de l'incorporation d'hydrogène et du périmètre retenu ; elles seront remplacées par des valeurs mesurées une fois l'usine en exploitation.

ANNEXE B

GLOSSAIRE

Le glossaire explique, en termes simples, les termes techniques et les abréviations utilisés dans ce livre blanc. Le terme anglais figure en italique lorsqu'il aide à la lecture des sources.

Terme	Définition
Agt	Allongement total sous force maximale : allongement, en pour cent, d'une armature avant le début de la striction lors d'un essai de traction. Mesure essentielle de la ductilité.
ANOR	Agence des normes et de la qualité, l'organisme camerounais de normalisation et de qualité, qui certifie la conformité aux normes nationales telles que NC 236.
bcf, Mscf	Milliard de pieds cubes et millier de pieds cubes de gaz naturel, aux conditions normales.
Billette	Demi-produit d'acier coulé, généralement de section carrée, laminé en ronds à béton, en fil machine ou en profilés légers.
Billette marchande	Billette vendue à une autre usine pour y être laminée, plutôt que laminée par l'usine qui l'a coulée.
Bloom, ébauche de poutrelle	Demi-produits de plus grande section utilisés pour laminer les profilés lourds et les poutrelles.
Boulette	Bille durcie de concentré de minerai de fer et de liant, charge habituelle d'un four à cuve.
Charge programmable	Charge électrique dont l'horaire peut être décalé au cours de la journée, par exemple pour fondre hors des pointes du réseau, sans réduire la production annuelle ; à la différence d'une charge interruptible, que le gestionnaire du réseau peut couper sur de longues périodes.
Code JORC	Code australasien de déclaration des ressources minérales et des réserves de minerai.
Concentré	Minerai broyé et séparé afin d'en relever la teneur en fer et d'en éliminer la gangue.
Convertisseur à oxygène (BOF, basic oxygen furnace)	Convertisseur dans lequel de l'oxygène pur est soufflé sur la fonte liquide pour en éliminer le carbone et les impuretés. Associé au haut fourneau.
Enfournement à chaud	Envoi des billettes de la coulée continue à l'étape de chauffage du laminoir encore chaudes, afin d'économiser de l'énergie.
Fer briqueté à chaud (HBI, hot-briquetted iron)	DRI compacté à chaud en briquettes denses, plus sûres à transporter et à stocker.
Fer de réduction directe (DRI, direct-reduced iron)	Fer métallique poreux produit par réduction directe. Aussi appelé fer spongieux.
Ferraille (chutes internes, chutes de fabrication, ferraille de récupération)	Acier destiné au recyclage : produit dans l'aciérie, dans l'industrie manufacturière, ou issu des produits et des bâtiments en fin de vie.
Fil machine	Acier laminé à chaud de petite section ronde livré en couronnes, tréfilé en fils, treillis et pointes.
Fonte brute	Fonte liquide solidifiée, contenant 3,5 à 4,5 % de carbone, utilisée comme unité de fer propre dans les FAE.
Fonte liquide	Fer liquide sortant du haut fourneau, contenant environ 4 % de carbone.
Four à arc électrique (FAE)	Four qui fond la ferraille, le DRI, le HBI ou la fonte brute au moyen d'arcs électriques jaillissant d'électrodes en graphite.

Terme	Définition
Four à cuve	Réacteur vertical d'une usine de réduction directe au gaz.
Four à induction	Four qui fond le métal dans un creuset par induction électromagnétique ; simple, mais limité pour l'affinage.
Four-poche (LF, ladle furnace)	Poste de métallurgie secondaire qui réchauffe l'acier dans la poche et en ajuste la composition.
Gangue	Minéraux non ferreux du minerai, principalement silice et alumine, qui finissent dans le laitier.
Haut fourneau (HF)	Grand four à cuve qui réduit le minerai de fer au moyen de coke et produit de la fonte liquide.
Inducteur de chauffage	Équipement qui chauffe électriquement les billettes par induction avant laminage.
ISA-95	Norme internationale (également IEC 62264) qui définit les niveaux de la conduite de la production, des capteurs (niveau 0) à la planification et à la logistique de l'entreprise (niveau 4).
Itabirite	Formation ferrifère rubanée faite de fins oxydes de fer alternant avec de la silice, qui doit être broyée et concentrée.
Laitier	Couche d'oxydes fondus qui recueille les impuretés ; le laitier de FAE solidifié peut être transformé en granulats.
MACF (CBAM)	Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'UE (Carbon Border Adjustment Mechanism), qui fait payer aux importateurs les émissions intrinsèques des produits couverts, dont le fer et l'acier.
Machine de coulée continue	Installation qui solidifie l'acier liquide en continu sous forme de billettes, de blooms ou de brames.
Métallisation	Part du fer du DRI ou du HBI présente à l'état métallique plutôt qu'à l'état d'oxyde.
Minerai à expédition directe (DSO, direct-shipping ore)	Minerai qui peut être vendu après concassage et criblage, sans concentration.
NC 236	Norme nationale camerounaise obligatoire relative aux aciers pour béton armé.
Papillotement (flicker ; Pst, Plt)	Fluctuations rapides de la tension, visibles sous forme de scintillement de l'éclairage, mesurées par des indices de sévérité de courte durée (Pst) et de longue durée (Plt).
Périmètres 1, 2, 3 (scopes)	Émissions directes ; émissions liées à l'électricité achetée ; autres émissions indirectes, y compris celles des matières amont.
Poussières de FAE	Poussières fines captées dans les fumées du four, riches en zinc et en plomb et classées comme déchet dangereux.
Qualité réduction directe (qualité RD)	Minerai ou boulettes assez riches en fer et assez pauvres en gangue pour la réduction directe ; généralement 67 à 68 % de fer pour les boulettes négociées.
RC-1	Configuration de référence de Cameroon Steel, base de planification de classe 5 de l'usine sidérurgique de Kribi (édition du 10 octobre 2026).
Réduction directe (RD)	Élimination de l'oxygène du minerai de fer à l'état solide, généralement au moyen d'un gaz riche en hydrogène et en monoxyde de carbone.
Réduction-fusion	Procédés (COREX, FINEX, HIsarna) qui réduisent et fondent le minerai au moyen de charbon non cokéifiable.
Relamineur	Laminoir sans aciérie, qui achète des billettes (importées ou marchandes) et les lamine en barres, en fil ou en profilés.
Répartiteur	Récipient garni de réfractaire placé entre la poche et les lingotières de la coulée continue.
Rm/Re	Rapport de la résistance à la traction à la limite d'élasticité d'une barre ; mesure de l'érouissage et de la ductilité.

Terme	Définition
STATCOM, SVC	Compensateur statique synchrone et compensateur statique de puissance réactive : dispositifs d'électronique de puissance qui fournissent rapidement de la puissance réactive pour limiter le papillotement et les variations de tension.
Système d'exécution de la production (MES)	Système de niveau 3 de l'ISA-95 : ordonnancement, enregistrements qualité, traçabilité.
Temps de coulée à coulée (tap-to-tap)	Durée entre deux coulées successives d'un four, temps sous tension et hors tension compris.
Trempe et autorevenu (QST, TEMPCORE)	Trempe à l'eau en ligne du rond à béton après la dernière cage, qui donne une peau dure et un cœur ductile.
Unités de fer, charges métalliques	Ensemble des matières contenant du fer enfournées dans un four d'aciérie : ferraille, DRI, HBI, fonte brute.

Source : Cameroon Steel.

ANNEXE C

SOURCES

Toutes les sources citées dans le texte avec un renvoi [S-id] sont recensées ci-dessous, numérotées dans l'ordre de leur première citation. Les adresses web ont été consultées entre le 1er et le 10 octobre 2026. Les sources de presse et d'entreprises sont utilisées pour les faits qu'elles rapportent, non pour leurs opinions. Les documents du Port Autonome de Kribi sont cités par titre et par date uniquement. Les données du précédent titulaire du permis de Mbalam sont ses publications au titre du code JORC. Les titres sont reproduits dans leur langue d'origine.

Tableau C.1 Sources citées dans ce livre blanc

Id	Titre	Éditeur	Date	Adresse
S01	Sustainability Indicators 2025 report (2024 data ; route table added Feb 2026)	worldsteel	nov. 2025, mis à jour en févr. 2026	https://worldsteel.org/wider-sustainability/sustainability-indicators/
S02	Iron and Steel Technology Roadmap	Agence internationale de l'énergie (AIE)	oct. 2020	https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf
S03	Cameroon Steel reference configuration RC-1 (planning estimate) : phases, benchmarks with ranges and indicative balances for the Kribi steelworks (Class 5), édition 10 October 2026, values as revised on that date	Cameroon Steel	10 oct. 2026	Planning values summarised in this paper (Annex A ; plotted values in Annex D)
S04	2025 World Direct Reduction Statistics	Midrex Technologies	sept. 2026	https://www.midrex.com/world-dri-statistics/world-dri-production-reaches-151-0-mt-in-2025/Midrex-STATS-book-2025-FINAL.pdf
S05	UN Comtrade public API : Cameroon (reporter 120), HS 72 and 73 and six-digit lines, 2019 to 2023	Division de statistique des Nations unies	Consulté le 10 oct. 2026	https://comtradeapi.un.org/public/v1/preview/C/A/HS?reporterCode=120&period=2023&partnerCode=0&flowCode=M&cmdCode=72,73,7207,7213,7214,7216,7308
S06	Production : les acteurs en présence	Cameroon Tribune	11 mai 2026	https://cameroon-tribune.cm/article.html/76600/fr.html/details_2
S07	Carbon intensity of electricity generation (Ember data)	Our World in Data	Jeu de données consulté en oct. 2026	https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity
S08	GSM Tanzania selects Danieli for new rebar and wire-rod mill	Danieli	14 sept. 2026	https://www.danieli.com/en/GSM-Tanzania-selects-Danieli-for-new-rebar-and-wirerod-mill_37_1098.htm
S09	B5Plus Group awards Danieli bar and wire-rod mill project	Danieli	23 sept. 2026	https://www.danieli.com/en/B5Plus-Group-awards-Danieli-bar-and-wirerod-mill-project_37_1099.htm
S10	Development of synthetic flux and a process for de-phosphorization of steel in induction furnace	CSIR National Metallurgical Laboratory, Inde	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.nmliindia.org/node/288
S11	Plaul F. J., Böhm C., Schenk J. L., Fluidized-bed technology for the production of iron products for steelmaking, Journal of the SAIMM 109(2)	Southern African Institute of Mining and Metallurgy	févr. 2009	https://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v109n2/05.pdf
S12	Tata Steel invests \$1.2 billion in green steel technology in Jharkhand	GMK Center	20 janv. 2026	https://gmk.center/en/news/tata-steel-invests-1-2-billion-in-green-steel-technology-in-jharkhand/

Id	Titre	Éditeur	Date	Adresse
S13	Bidoung J., Fomethe A., Yantio G., Melo U., La récupération et le recyclage des déchets ferromagnétiques : analyse de la situation au Cameroun, Déchets, Revue francophone d'écologie industrielle n°48	ENSPY et MIPROMALO	4e trim. 2007	https://eid.episciences.org/7942/pdf
S14	Direct Reduced Iron (DRI) : specifications and handling	International Iron Metallics Association	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.metallics.org/dri.html
S15	Hot Briquetted Iron (HBI) : specifications and handling	International Iron Metallics Association	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.metallics.org/hbi.html
S16	Climate change and the production of iron and steel (policy paper)	worldsteel	Consulté le 10 oct. 2026	https://worldsteel.org/climate-action/climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel/
S17	Global high-grade iron ore market is set to grow (S. Basirat)	Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA)	mars 2026	https://ieefa.org/sites/default/files/2026-03/IEEFA_Global%20high-grade%20iron%20ore%20market%20is%20set%20to%20grow_March%202026_0.pdf
S18	Mbalam-Nabeba resources and reserves as at 20 May 2015 (JORC Code)	Précédent titulaire du permis de Mbalam (publication d'une société cotée à l'ASX)	2015	Publication de la société au titre du code JORC ; citée par titre et par date
S19	Mbalam iron ore project : presentation to Mining Indaba 2014 (metallurgical testwork on itabirite)	Précédent titulaire du permis de Mbalam (publication d'une société cotée à l'ASX)	févr. 2014	Présentation de la société ; citée par titre et par date
S20	ENERGIRON technology : DRI-EAF production route using natural gas or H2	Commission européenne, Innovation Centre for Industrial Transformation	Cité le 12 févr. 2026	https://innovation-centre-for-industrial-transformation.ec.europa.eu/innovative-techniques/energiron-technology-drieaf-production-route-using-natural-gas-or-h2
S21	Données pétrolières 2025	Société Nationale des Hydrocarbures (SNH)	juin 2026	https://snh.cm/wp-content/uploads/2026/06/Donnees-petrolieres-2025.pdf
S22	MIDREX Flex : minimizing technology risks in the transition to carbon-free steelmaking (V. Chevrier), worldsteel Breakthrough Technology Conference	Midrex Technologies, document hébergé par worldsteel	6 déc. 2023	https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Presentation_Vincent-CHEVRIER-Midrex.pdf
S23	Gerdau plant in Charlotte, US : SVC Light for EAF flicker mitigation (customer story)	Hitachi Energy	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.hitachienergy.com/news-and-events/customer-stories/gerdau-plant-in-charlotte-us
S24	Modular multilevel converter based STATCOM for electrical arc furnace application : Metalfer steel mill, Serbia (case study GEA34872)	GE Vernova Power Conversion	Rév. 20 févr. 2024	https://www.governova.com/power-conversion/sites/default/files/2024-02/GEA34872_PowerQ_CS_STATCOM-for-EAF-application-Metalfer_EN_20240220_Rev2.pdf
S25	Kribi franchit la ligne électrique 225 kV	Port Autonome de Kribi	6 août 2025	Cité par titre et par date ; le site web de l'éditeur n'est pas lié
S26	Cameroon rejects fresh push to revise rebar standard	Business in Cameroon	26 janv. 2026	https://www.businessincameroon.com/construction/2601-15657-cameroon-rejects-fresh-push-to-revise-rebar-standard
S27	Cameroun : le gouvernement rejette une demande de révision de la norme du fer à béton	EcoMatin	5 févr. 2026	https://ecomatin.net/cameroun-le-gouvernement-rejette-une-demande-de-revision-de-la-norme-du-fer-a-beton
S28	TEMPCORE : quench and self-tempering process for reinforcing bars	CRM Group	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.old.crmgroup.be/en/industrialised-results/bulk-processes/tempcore
S29	Standards for reinforcement (BS 4449:2005+A3:2016 grades)	The Concrete Centre	Non daté, consulté en oct. 2026	https://concretecentre.com/Codes/European-standards-for-reinforcement.aspx
S30	Technical specification SPB300 : deformed steel bars, ASTM A615 Grade 60	Pittini Group (Siderpotenza)	1er janv. 2020	https://www.pittini.it/wp-content/uploads/Pittini-Group-rebar-SPB300.pdf
S31	Fitzgerald P., Therkelsen P. L., Sheaffer P., Rao P., Deeper and persistent energy savings and carbon dioxide reductions achieved through ISO 50001 in the manufacturing sector, Sustainable Energy Technologies and Assessments	Lawrence Berkeley National Laboratory	2023	https://eta-publications.lbl.gov/publications/deeper-and-persistent-energy-savings

Id	Titre	Éditeur	Date	Adresse
S32	Cameroun : Prometal décroche 26,2 milliards FCFA d'Afreximbank	Camer.be	1er oct. 2026	https://www.camer.be/actualites/economie/cameroun-prometal-decroche-262-milliards-fcfa-dafreximbank.html
S33	40 millions d'euros d'Afreximbank : Prometal sécurise ses billets d'acier alors que la ferraille camerounaise s'épuise	Cameroun24	10 oct. 2026	https://cameroun24.net/article/76267-40-millions-d-euros-d-afreximbank-prometal-securise-ses-billets-d-acier-alors-que-la-ferraille-camerounaise-s-epuise.html
S34	Énergie et infrastructures : un nouvel élan pour la compétitivité du Port de Kribi	Port Autonome de Kribi	19 août 2026	Cité par titre et par date ; le site web de l'éditeur n'est pas lié
S35	Cameroon's SNH eyes Yoyo-Yolanda and new exploration blocks to sustain gas growth	Business in Cameroon	6 juil. 2026	https://www.businessincameroon.com/energy/0607-16422-cameroon-s-snh-eyes-yoyo-yolanda-and-new-exploration-blocks-to-sustain-gas-growth
S36	Cameroon Mining Company confirme l'entrée du projet Mbalam dans sa phase irréversible d'exécution	Camer.be via AllAfrica	12 déc. 2025	https://fr.allafrica.com/stories/202512120475.html
S37	Port de Kribi : un terminal minéralier d'avenir (memorandum of understanding for a 125 Mt a year mineral terminal)	Port Autonome de Kribi	4 nov. 2025	Cité par titre et par date ; le site web de l'éditeur n'est pas lié
S38	Zone industriel-portuaire de Kribi (KPIZ) : jusqu'à +8 points de croissance et 150 000 emplois attendus sur 15 ans	Investir au Cameroun	4 mars 2026	https://www.investiraucameroun.com/gestion-publique/0403-23163-zone-industriale-portuaire-de-kribi-kpiz-jusqu-a-8-points-de-croissance-et-150-000-emplois-attendus-sur-15-ans
S39	École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé : departments	ENSPY	Non daté, consulté en oct. 2026	https://polytechnique.cm/
S40	December 2025 crude steel production and 2025 global totals	worldsteel	23 janv. 2026	https://worldsteel.org/media/press-releases/2026/december-2025-crude-steel-production-2025-global-crude-steel-production/
S41	World Steel in Figures 2026	worldsteel	4 juin 2026	https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2026/
S42	Best Available Techniques Reference Document for Iron and Steel Production (EUR 25521)	Commission européenne, Joint Research Centre	2013	https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/IS_Adopted_03_2012.pdf
S43	Pig iron	International Iron Metallics Association	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.metallics.org/pig-iron.html
S44	Environmental, Health, and Safety Guidelines for Integrated Steel Mills	SFI, Groupe de la Banque mondiale	30 avr. 2007	https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2000/2007-integrated-steel-mills-ehs-guidelines-en.pdf
S45	Pedal to the Metal 2026	Global Energy Monitor	mai 2026	https://globalenergymonitor.org/sites/default/files/2026-05/Pedal%20to%20the%20Metal%202026.pdf
S46	Siemens puts twin ladle furnace into operation for ArcelorMittal Bremen	AIST	avr. 2013	https://www.aist.org/siemens-puts-twin-ladle-furnace-into-operation-for-arcelormittal-bremen
S47	GSM Tanzania selects Danieli Technologies for new rebar and wire rod mill	SteelOrbis	15 sept. 2026	https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/gsm-tanzania-selects-danieli-technologies-for-new-rebar-and-wire-rod-mill-1477389.htm
S48	Suez Steel sets new benchmark in energy consumption for DRI production	Danieli	16 avr. 2026	https://www.danieli.com/en/news-media/news/suez-steel-sets-new-benchmark-energy-consumption-dri-production_37_1051.htm
S49	Commission Implementing Decision (EU) 2022/2110, BAT conclusions for the ferrous metals processing industry	Commission européenne, Journal officiel L 284	11 oct. 2022	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022D2110
S50	Hot charging of steel billets and slabs : impact on energy costs and emissions (S. W. Hesling)	Steelonthenet	1er janv. 2025	http://steelonthenet.com/insights/hot-charging.html
S51	Rapport d'activités 2025	Agence de Régulation du Secteur de l'Électricité (ARSEL)	7 sept. 2026	https://arsel-cm.org/wp-content/uploads/2026/09/Rapport-ARSEL-2025.pdf

Id	Titre	Éditeur	Date	Adresse
S52	Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members	Agence internationale de l'énergie (AIE)	19 mai 2022	https://iea.blob.core.windows.net/assets/c4d96342-f626-4aea-8dac-df1d1e567135/AchievingNetZeroHeavyIndustrySectorsinG7Members.pdf
S53	Regulation (EU) 2023/956 establishing a carbon border adjustment mechanism, Annex I	EUR-Lex, Journal officiel L 130	16 mai 2023	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956
S54	Price of CBAM certificates	Commission européenne, DG TAXUD	5 oct. 2026 (dernier prix trimestriel)	https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism/price-cbam-certificates_en
S55	Directive (EU) 2023/959 amending the EU emissions trading system	EUR-Lex, Journal officiel L 130	16 mai 2023	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L0959
S56	Making Net-Zero Steel Possible	Mission Possible Partnership	sept. 2022	https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2026/10/Making-Net-Zero-Steel-possible-steel.pdf
S57	Nucor to build new rebar micro mill in North Carolina	Nucor Corporation	7 avr. 2022	https://nucor.com/news-release/nucor-to-build-new-rebar-micro-mill-in-north-carolina-122541
S58	Commercial Metals Company to invest \$300 million in its third micro mill (project announced in August 2020)	Steel Technology	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.steel-technology.com/projects/commercial-metals-company-to-invest-300-million-inits-third-micro-mil
S59	West Virginia announces Commercial Metals Company to build \$450 million micro steelmaking mill in Berkeley County	WV Press	8 déc. 2022	https://wvpress.org/breaking-news/west-virginia-announces-commercial-metals-company-to-build-450-million-micro-mill-in-berkeley-county/
S60	Le turc Tosyali va construire un nouveau complexe sidérurgique en Algérie	Managers.tn	27 avr. 2026	https://managers.tn/2026/04/27/lalgerie-attire-les-grands-le-turc-tosyali-va-y-construire-un-nouveau-complexes-siderurgiques/
S61	H2 Green Steel secures EUR 6.5 billion	North Sweden Business	22 janv. 2024	https://northswedenbusiness.com/news/2024/januari/h2-green-steel-secures-eur-6-5-billion/
S62	Stegra requires additional funding for the construction of a green plant	GMK Center	1er oct. 2026	https://gmk.center/en/news/stegra-requires-additional-funding-for-the-construction-of-a-green-plant/
S63	Algeria's steel industry : why is it growing	GMK Center	28 juil. 2026	https://gmk.center/en/posts/algeria-s-steel-industry-why-is-it-growing/
S64	Global scrap consumption rose by 4.5 % y/y in 2025 (BIR World Steel Recycling in Figures)	GMK Center	4 juin 2026	https://gmk.center/en/news/global-scrap-consumption-rose-by-4-5-y-y-in-2025-bir/
S65	Protecting the steel market : how it's done in North Africa	GMK Center	2 sept. 2026	https://gmk.center/en/posts/protecting-the-steel-market-how-it-s-done-in-north-africa/
S66	Update : final wind-down decision relating to the long steel business	ArcelorMittal South Africa	28 févr. 2025	https://arcelormittalsa.com/Portals/0/NEWS%20RELEASE%20-%20UPDATE%20-%20FINAL%20WIND%20DOWN%20DECISION%20RELATING%20TO%20THE%20LONG%20STEEL%20BUSINESS%20%28%E2%80%9CLONGS%20BUSINESS%E2%80%9D%29_v2.pdf
S67	Commerce extérieur du Cameroun en 2020	Institut national de la statistique (INS), Cameroun	juil. 2021	https://ins-cameroun.cm/wp-content/uploads/2025/07/Note-Commerce-exterieur-2020_VF-4.pdf
S68	Évolution du commerce extérieur en 2025 (version provisoire)	Institut national de la statistique (INS), Cameroun	févr. 2026	https://ins-cameroun.cm/wp-content/uploads/2026/04/Note-sur-le-commerce-exterieur-en-2025-version-provisoire_FR.pdf
S69	Métallurgie : les importations du fer à béton interdites jusqu'à nouvel ordre	EcoMatin	10 avr. 2023	https://ecomatin.net/metallurgie-les-importations-du-fer-a-beton-interdites-jusqua-nouvel-ordre
S70	Note sur le commerce extérieur 2022	Institut national de la statistique (INS), Cameroun	déc. 2023, révisé le 13 févr. 2024	https://ins-cameroun.cm/wp-content/uploads/2025/07/Note-sur-le-Commerce-Exterieur-2022_VF-du-13-fev-2024-Rev-DG-1.pdf
S71	Commerce extérieur du Cameroun en 2023	Institut national de la statistique (INS), Cameroun	avr. 2024	https://ins-cameroun.cm/wp-content/uploads/2025/07/Note-sur-le-Commerce-Exterieur-2023-c-1.pdf

Id	Titre	Éditeur	Date	Adresse
S72	Cameroun : le groupe Prometal décroche 26 milliards FCFA auprès d'Afreximbank	Sikafinance	30 sept. 2026	https://www.sikafinance.com/marches/cameroun-le-groupe-prometal-decroche-26-milliards-fcfa-aupres-dafreximbank-pour-renforcer-sa-production-dacier-et-conquerir-de-nouveaux-marches_64623
S73	Matériaux de construction : l'offensive locale	Cameroon Tribune	24 avr. 2023	https://www.cameroon-tribune.cm/article.html/56766/en.html/details_2
S74	Métallurgie : les industriels dénoncent la présence du fer à béton contrefait	EcoMatin	22 juin 2023	https://ecomatin.net/metallurgie-les-industriels-du-secteur-denoncent-la-presence-du-fer-a-beton-contrefait-sur-le-marche-camerounais
S75	BSE-EAF : future-proof melting automated system for safe, reliable and efficient steelmaking (R. Schweikle, J. Apfel, A. Pezza), DOI 10.36146/2026_06_50	La Metallurgia Italiana (AIM)	juin 2026	https://www.aimnet.it/la_metallurgia_italiana/2026/giugno/Aim_giugno2026_6.pdf
S76	La Lettre du PAK n°254	Port Autonome de Kribi	mai 2025	Cité par titre et par date ; le site web de l'éditeur n'est pas lié
S77	Kribi : le Premier ministre, chef du gouvernement est là	Cameroon Tribune	30 déc. 2024	https://cameroon-tribune.cm/article.html/68499/fr.html/details_2
S78	15 Insights on the Global Steel Transformation	Agora Industry	15 juin 2023	https://www.agora-industry.org/publications/15-insights-on-the-global-steel-transformation
S79	Mbalam iron ore mine delays first exports to early 2026	Business in Cameroon	13 déc. 2025	https://www.businessincameroon.com/public-management/1312-15495-mbalam-iron-ore-mine-delays-first-exports-to-early-2026
S80	Exploitations : la revue des gisements	Cameroon Tribune	11 mai 2026	https://www.cameroon-tribune.cm/articles/11125/fr/details_2
S81	Sinosteel reporte les exportations du fer de Kribi-Lobé à 2027 malgré 120 milliards FCFA déjà investis	EcoMatin	11 mars 2026	https://ecomatin.net/cameroun-sinosteel-reporte-les-exportations-du-fer-de-kribi-lobe-a-2027-malgre-120-milliards-fcfa-deja-investis
S82	Le navire usine quitte le Cameroun, le gaz s'arrête	Camer.be	9 juil. 2026	https://www.camer.be/93911/12:1/le-navire-usine-quitte-le-cameroun-le-gaz-sarrete-cameroon.html
S83	MAEGMA Minerals partners with Primetals Technologies for MIDREX Flex plant	Primetals Technologies	10 juin 2025	https://www.primetals.com/en/news/maegma-minerals-partners-with-primetals-technologies-for-midrex-flex-plant/
S84	DRI-EAF implementation at Saarlöh and Dillinger steelworks (POWER4STEEL)	Commission européenne, Innovation Centre for Industrial Transformation	Cité en juil. 2025	https://innovation-centre-for-industrial-transformation.ec.europa.eu/innovative-techniques/drieaf-implementation-saarlöh-dillinger-steelworks-power4steel
S85	Hydrogen uses in ironmaking (V. Chevrier, Midrex), H2@Scale kick-off	Département de l'Énergie des États-Unis	1er août 2018	https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/08/f54/fcto-h2-scale-kickoff-2018-8-chevrier.pdf
S86	Cameroon : Energy (Country Commercial Guide)	International Trade Administration des États-Unis	13 avr. 2026	https://www.trade.gov/country-commercial-guides/cameroon-energy
S87	Global Gateway : Namibia becomes pioneer for Africa's green transition	Commission européenne, DG INTPA	11 avr. 2025	https://international-partnerships.ec.europa.eu/news-and-events/news/global-gateway-namibia-becomes-pioneer-africas-green-transition-2025-04-11_en
S88	Midrex history	Midrex Technologies	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.midrex.com/history/
S89	Nachtigal power line delays leave 150 MW of industrial demand unmet	Business in Cameroon	9 oct. 2026	https://www.businessincameroon.com/public-management/0910-16939-nachtigal-power-line-delays-leave-150-mw-of-industrial-demand-unmet
S90	Enhanced EAF steelmaking through continuous charging, scrap preheating (Consteel)	Commission européenne, Innovation Centre for Industrial Transformation	Non daté, consulté en oct. 2026	https://innovation-centre-for-industrial-transformation.ec.europa.eu/innovative-techniques/enhanced-eaf-steelmaking-through-continuous-charging-scrap-preheating-and

Id	Titre	Éditeur	Date	Adresse
S91	Prometal, Acero Metal, Acieries du Cameroun... qui est le plus gros consommateur d'électricité de la métallurgie camerounaise	EcoMatin	15 juil. 2026	https://ecomatin.net/prometal-acero-metal-acieries-du-cameroun-qui-est-le-plus-gros-consommateur-delectricite-de-la-metallurgie-camerounaise
S92	Tableaux tarifaires, Décision ARSEL N°00000427 (tarifs moyenne tension 2023 à 2025)	Agence de Régulation du Secteur de l'Électricité (ARSEL)	Mis en ligne en janv. 2026	http://arsel-cm.org/wp-content/uploads/2026/01/TABLEAUX-TARIFAIRES-decision-MT-2023-2025.pdf
S93	Décision fixant le montant du revenu maximum autorisé (RMA) d'ENEO au titre de l'exercice 2025 (réajustée)	Agence de Régulation du Secteur de l'Électricité (ARSEL)	19 déc. 2025	http://arsel-cm.org/wp-content/uploads/2026/01/Decision-fixant-le-Montant-de-le-RMA-Eneo-au-titre-de-leexercice-2025-du-19-12-2025.pdf
S94	Commission Implementing Decision 2012/135/EU establishing BAT conclusions for iron and steel production	EUR-Lex	28 févr. 2012	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32012D0135
S95	Danieli implements new hot billet charging system at Acciaierie di Sicilia	AIST	10 août 2023	https://aist.org/danieli-implements-new-hot-billet-charging-system-at-acciaierie-di-sicilia
S96	2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2 (Energy), Chapter 1, default CO2 emission factor for natural gas (56,100 kg/TJ)	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)	2006	https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf
S97	Electric heating systems (Q-Heat induction heaters)	Danieli	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.danieli.com/en/danieli-green-metal/electric-heating-systems.htm
S98	Šmak M., Kubiček J., Kala J., Podaný K., Vaněrek J., The influence of hot-dip galvanizing on the mechanical properties of high-strength steels, Materials 14(18):5219, doi:10.3390/ma14185219	MDPI (via PubMed Central PMC8467660)	2021	https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8467660/
S99	Olivry J.-C., Monographie du Nyong et des fleuves côtiers, tome 1	ORSTOM / IRGM	juil. 1979	https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-03/01948.pdf
S100	ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys : corrosivity of atmospheres (resource description)	Standards New Zealand, Building Code Hub	Consulté en oct. 2026	https://codehub.building.govt.nz/assets/_generated_pdfs/iso-92232012-7236.pdf
S101	OPC UA Common Object Model : ISA-95 concept	OPC Foundation	Non daté, consulté en oct. 2026	https://reference.opcfoundation.org/specs/OPC-10030/4
S102	Intelligent EAF (iEAF) technology	Tenova	Non daté, consulté en oct. 2026	https://tenova.com/technologies/intelligent-eaf-ieaf-technology
S103	Institut Universitaire de Technologie de Douala : departments	IUT Douala	Non daté, consulté en oct. 2026	https://www.iut-dla.cm/
S104	Cameroun : Complexe moderne de sidérurgie de Kribi, le PM Joseph Dion Ngute effectue la pose de la première pierre	Camer.be	5 janv. 2025	https://www.camer.be/87795/12:1/cameroun-complexe-moderne-de-siderurgie-de-kribi-le-pm-joseph-dion-ngute-effectue-la-pose-de-la-premiere-pi-cameroon.html
S105	Industrialisation : la voie royale de l'émergence	Cameroon Tribune	2 janv. 2025	https://cameroon-tribune.cm/article.html/68558/fr.html/details_2
S106	IFC Access to Information Policy : disclosure of the Summary of Investment Information and the Environmental and Social Review Summary 60 days (Category A) or 30 days before Board consideration	SFI, Groupe de la Banque mondiale	Effective 1er janv. 2012	https://www.ifc.org/en/insights-reports/2012/ifc-access-to-information-policy
S107	Mining 2026 : Cameroon (Chazai Wamba), practice guide on Law No. 2023/014 of 19 December 2023 (Mining Code)	Chambers Global Practice Guides	Mis à jour le 27 janv. 2026	https://practiceguides.chambers.com/practice-guides/mining-2026/cameroon

ANNEXE D

TABLEAUX DE DONNÉES

Cette annexe présente les valeurs représentées dans chaque graphique du livre blanc, afin que les lecteurs puissent les vérifier, les réutiliser et reproduire les figures. Chaque tableau indique les unités, le statut des valeurs (sourcé, dérivé, hypothèse ou illustratif, selon les définitions de l'annexe A) et les identifiants des sources recensées à l'annexe C. Les mêmes valeurs sont publiées sous forme de fichiers lisibles par machine avec l'édition web de ce livre blanc. Les schémas qui ne représentent aucune valeur chiffrée (figures 1.1, 2.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.2, 8.1, 8.2 et 10.1) ne sont pas repris ici.

D.1 Synthèse et chapitres 1 à 3 : filières, énergie et capital

Tableau D.1 Données de la figure ES.1 : intensité en CO₂ et coût d'investissement indicatif par filière

Filière	CO ₂ , t par t d'acier brut	Coût d'investissement bas, USD/t de capacité	Coût d'investissement haut, USD/t de capacité	Statut
Haut fourneau + convertisseur à oxygène (HF-BOF)	2,34	500	900	CO ₂ sourcé ; coût d'investissement dérivé
Réduction directe au gaz + FAE (DRI-FAE)	1,47	510	1 310	CO ₂ sourcé ; coût d'investissement dérivé
Ferraille + FAE	0,69	330	560	CO ₂ sourcé ; coût d'investissement dérivé
Moyenne mondiale	1,92			Sourcé
Trajectoire de Kribi (RC-1) : phase 1, périmètres 1+2, t CO ₂ par t de produit fini	0,32	Non indiqué	Non indiqué	Dérivé (estimé)
Trajectoire de Kribi (RC-1) : phase 1, avec DRI importé, t CO ₂ par t de produit fini	0,58	Non indiqué	Non indiqué	Dérivé (estimé)
Trajectoire de Kribi (RC-1) : 1 Mt/an, 70 % de DRI national, t CO ₂ par t de produit fini	0,83	Non indiqué	Non indiqué	Dérivé (estimé)

Source : worldsteel, données 2024 [S01] ; coût d'investissement calculé à partir des coûts annualisés de l'AIE, en USD d'environ 2019, non actualisés [S02] ; méthode D1 à l'annexe A. Valeurs de la trajectoire : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification) [S03], par tonne de produit fini sur le réseau camerounais, un périmètre différent de celui des moyennes par filière ; méthodes D6 et D16 (la dernière valeur, 0,83, est présentée comme environ 0,8). Aucun coût d'investissement n'est donné pour le projet.

Tableau D.2 Données de la figure 1.2 : teneur en fer des oxydes de fer

Phase	Formule	Fer, % en masse	Statut
Hématite	Fe ₂ O ₃	69,9	Dérivé (stœchiométrie)
Magnétite	Fe ₃ O ₄	72,4	Dérivé (stœchiométrie)
Wüstite	FeO	77,7	Dérivé (stœchiométrie)
Fer métallique	Fe	100,0	Définition

Source : Cameroon Steel, à partir des masses atomiques Fe 55,845 et O 15,999.

Tableau D.3 Données de la figure 1.3 : production d'acier par procédé et projets en construction

Série	Procédé	Part, %	Statut
Acier brut, monde, 2025	Convertisseur à oxygène	69,4	Sourcé
Acier brut, monde, 2025	Électrique	30,3	Sourcé
Acier brut, monde, 2025	Autre	0,3	Sourcé
Acier brut, Afrique, 2025	Convertisseur à oxygène	11,0	Sourcé
Acier brut, Afrique, 2025	Électrique	89,0	Sourcé
Projets en construction dans le monde, 2026 (nombre)	Arc électrique	71,0	Sourcé
Projets en construction dans le monde, 2026 (nombre)	Autres filières	29,0	Sourcé

Source : worldsteel, World Steel in Figures 2026 [S41] ; Global Energy Monitor, Pedal to the Metal 2026 [S45].

Tableau D.4 Données de la figure 2.2 : intensité en CO₂ et intensité énergétique par filière

Filière	CO ₂ , worldsteel 2024, t/t	CO ₂ , AIE direct + indirect, t/t	Énergie, worldsteel 2024, GJ/t	Énergie finale, AIE, GJ/t
HF-BOF	2,34	2,2	23,88	21,4
DRI-FAE au gaz	1,47	1,4	23,30	17,1
FAE à ferraille	0,69	0,3	9,84	2,1

Source : worldsteel, Sustainability Indicators 2025 [S01] ; AIE, Iron and Steel Technology Roadmap [S02]. Statut : sourcé. worldsteel compte l'électricité en énergie primaire et inclut les émissions amont ; l'AIE retient l'énergie finale et un réseau à 538 g CO₂/kWh.

Tableau D.5 Données de la figure 2.3 : fourchettes de coût d'investissement et références de projets, USD par tonne de capacité annuelle

Filière ou projet	Valeur	Fondement	Statut et source
FAE à ferraille (dérivé AIE)	330 à 560	Fourchette	Dérivé [S02]
HF-BOF (dérivé AIE)	500 à 900	Fourchette	Dérivé [S02]
DRI-FAE au gaz (dérivé AIE)	510 à 1 310	Fourchette	Dérivé [S02]
Mini-acierie CMC Arizona 2 (États-Unis, 2020)	660	Budget annoncé + capacité annoncée	Dérivé [S58]
Mini-acierie de ronds à béton Nucor Lexington (États-Unis, 2022)	900	Budget annoncé + capacité annoncée	Dérivé [S57]

Filière ou projet	Valeur	Fondement	Statut et source
Mini-acière CMC Berkeley County (États-Unis, 2022)	990	Budget annoncé + capacité annoncée	Dérivé [S59]
Nouvelle usine intégrée HF-BOF (MPP, 2022)	1 200	Budget annoncé + capacité annoncée	Dérivé [S56]
Complexe DRI-FAE Tosyali, laminage inclus (Algérie, 2026)	1 560	Budget annoncé + capacité annoncée	Dérivé [S60]

Source : selon la liste. Les valeurs de projets sont nominales, dans l'année monétaire de chaque annonce ; les capacités américaines, annoncées en tonnes courtes, sont converties en tonnes (1 tonne courte = 0,9072 t ; méthode D1). Aucune n'est une estimation de Cameroon Steel.

D.2 Chapitres 3 et 4 : charges métalliques, minéral et gaz

Tableau D.6 Données de la figure 3.1 : importations du chapitre 72 et importations de billettes du Cameroun, milliers de tonnes

Année	Billettes et demi-produits (SH 7207), kt	Ensemble des importations du chapitre 72, kt	Part des billettes, % (dérivée)
2019	52,5	182,9	28,7
2020	89,9	279,0	32,2
2021	110,5	297,6	37,1
2022	151,2	283,6	53,3
2023	161,4	304,1	53,1

Source : UN Comtrade pour la position SH 7207 [S05] ; INS Cameroun pour le chapitre 72 [S67, S70, S71]. Statut : sourcé ; parts dérivées. Les deux sources relèvent de systèmes de déclaration différents.

Tableau D.7 Données de la figure 3.2 : unités de fer par phase de RC-1 et ferraille nationale, milliers de tonnes par an

Cas	Unités de fer, kt	dont DRI/HBI, kt	dont ferraille, kt
Phase 1, 0,3 Mt/an	362,7	108,8	253,9
Phases 1+2, 0,5 Mt/an	604,4	181,3	423,1
Usine complète, 1,0 Mt/an	1 209	362,7	846,2
Usine complète, DRI national à 70 %	1 209	846,2	362,7
Gisement de ferraille nationale, étude de 2006	53 à 61,8		Sourcé [S13]
Ferraille nationale collectée aujourd'hui (ordre de grandeur)	125		Dérivé (méthode D5)
Ferraille nationale retenue par RC-1 pour l'usine	30 (0 à 60)		Hypothèse [S03]

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), bilans indicatifs [S03] (rendement métallique 0,88, rendement de coulée et de laminage 0,94, DRI à 30 % de la charge ; 70 % pour le dernier cas) ; étude sur la ferraille [S13] ; données d'entrée des calculs [S32, S33, S74]. Statut : dérivé.

Tableau D.8 Données de la figure 4.2 : produits de Mbalam au regard des seuils de qualité réduction directe

Produit ou seuil	Fer, %	Silice + alumine, %
Réserve DSO de Mbalam (JORC, 2015)	62,2	7,26
Itabirite de Mbalam, concentré qualité haut fourneau (essais, 2014)	66,6	3,80
Itabirite de Mbalam, concentré qualité RD (essais, 2014)	68,0	2,00
Minimum de fer de worldsteel pour les procédés RD	64	Non précisé
Qualité RD négociée type	67 à 68	Faible

Source : réserve JORC, 2015 [S18] ; essais, 2014 [S19] ; worldsteel [S16] ; IEEFA [S17]. Statut : sourcé.

Tableau D.9 Données de la figure 4.3 : flux de matière indicatif par tonne de DRI

Poste	Valeur	Unité	Fondement
Minerai d'itabirite	3,2	t par t de DRI	Concentré + rendement massique de 45 % [S19] ; dérivé
Concentré de qualité RD	1,45	t par t de DRI	Égal aux boulettes, liant ignoré ; dérivé
Boulettes RD	1,45	t par t de DRI	D'après les chiffres BNEF cités par l'IEEFA [S17] ; dérivé
Gaz naturel	10	GJ par t de DRI	Référence ENERGIRON [S20]
Finesse de broyage (essais)	53	µm, P80	Essais [S19]
Récupération du fer (essais)	81	%	Essais [S19]
Métallisation du DRI	92 à 96	%	IIMA [S14]

Source : selon la liste. Statut : dérivé de données sourcées ; méthode D12 à l'annexe A.

Tableau D.10 Données de la figure 4.4 : volumes de gaz et besoin en gaz du DRI, milliards de pieds cubes par an

Poste	bcf par an	% de la production nationale de 2025
Production nationale, 2025	75,47	100
Vendu pour alimenter le GNL, 2025	71,62	95
Centrale de Kribi, 2025	4,92	7
Client industriel (KEDA), 2025	3,09	4
Module DRI de 0,5 Mt/an	4,57	6
Module DRI de 1,0 Mt/an	9,14	12

Source : SNH, Données pétrolières 2025 [S21] ; besoin du DRI à 10 GJ par tonne [S20] et 1,094 GJ par millier de pieds cubes. Statut : volumes 2025 sourcés ; besoin du DRI dérivé (méthode D10).

D.3 Chapitres 5 à 7 : aciérie, laminage et qualité des produits

Tableau D.11 Données de la figure 5.2 : décomposition du temps de coulée à coulée, minutes par coulée

Élément	Phase 1 à 450 kWh/t (coulée d'environ 40 t)	Phase 1 à 490 kWh/t (coulée d'environ 40 t)	Conception publiée (150 t, 156 MVA)
Sous tension	43	47	29,3
Chargement	4,0	4,0	3,0

Élément	Phase 1 à 450 kWh/t (coulée d'environ 40 t)	Phase 1 à 490 kWh/t (coulée d'environ 40 t)	Conception publiée (150 t, 156 MVA)
Coulée	3,0	3,0	3,0
Préparation du trou de coulée	1,5	1,5	1,5
Électrodes	1,0	1,0	1,0
Préparation du four	0,5	0,5	0,5
Arrêts imprévus	2,0	2,0	2,0
Temps net de coulée à coulée	55	59	40,3
Heures de four pour environ 8 000 coulées	Environ 7 300	Environ 7 900	
Produits finis pour 7 000 à 7 700 h, t	287 000 à 300 000	268 000 à 294 000	

Source : phase 1 dérivée de RC-1 [S03] : coulées d'environ 40 t ; environ 25 MW de puissance active, hypothèse retenue pour un transformateur de la classe 30 à 33 MVA à un facteur de puissance d'environ 0,8 ; temps arrondis à la minute et heures de four à la centaine ; environ 8 000 coulées à la capacité nominale ; produits finis plafonnés à la capacité nominale de 300 000 t (méthodes D8 et D18) ; conception de référence [S75]. Statut : dérivé et sourcé.

Tableau D.12 Données de la figure 5.3 : électricité du FAE selon la part de DRI dans la charge, kWh par tonne d'acier liquide

Part de DRI/HBI	Courbe (450 plus pénalité DRI)	Basse	Haute
0 %	450	347	500
20 %	479	376	529
30 %	494	390	544
50 %	522	420	572
70 %	552	448	602
100 %	595	492	645

Source : valeur de planification de RC-1 de 450 kWh/t [S03], comprise dans la fourchette de la SFI de 347 à 500 [S44], lue en tout-ferraille, plus 14,5 kWh/t par tranche de 10 % de DRI [S20] ; à 30 % de DRI, le résultat, 493,5, constitue la valeur haute de planification d'environ 490 kWh/t ; fourchette des aciéries de l'UE de 404 à 748 kWh/t indiquée pour référence [S42]. Statut : dérivé (méthode D9).

Tableau D.13 Données de la figure 6.2 : énergie de chauffage avant laminage, GJ par tonne

Option	Basse	Haute	Source
Four de réchauffage au gaz, barres et fils (fourchette MTD de l'UE)	0,60	1,90	S49
Four de réchauffage au gaz, billettes et poutrelles (fourchette MTD de l'UE)	1,40	2,20	S49
Four à longerons mobiles au gaz, charge froide (hypothèse de planification RC-1)	1,10	1,60	S03
Même four, enfournement à chaud à environ 700 °C (économie de 0,55 GJ/t)	0,55	1,05	S50 ; dérivé
Chauffage par induction, enfournement en partie à chaud (150 à 400 kWh/t, hypothèse RC-1)	0,54	1,44	S03
Énergie de laminage (déformation), barres et fils	0,10	0,50	S49

Source : selon la liste ; valeurs d'induction converties à 3,6 GJ par MWh. Comparaison de CO₂ (méthode D14) : gaz à 1,3 GJ/t ≈ 0,073 t CO₂/t ; induction à 300 kWh/t et 226 g/kWh ≈ 0,068 t CO₂/t. Statut : sourcé, hypothèse et dérivé selon les mentions.

Tableau D.14 Données de la figure 7.1 : classes de ductilité de BS 4449

Nuance	Limite d'élasticité caractéristique, MPa	Agt minimal, %	Rm/Re minimal	Rm/Re maximal
B500A	500	2,5	1,05	Sans limite
B500B	500	5,0	1,08	Sans limite
B500C	500	7,5	1,15	1,35

Source : synthèse de BS 4449:2005+A3:2016 par The Concrete Centre [S29]. Statut : sourcé. En dessous de 8 mm de diamètre, les valeurs de la classe A diffèrent.

Tableau D.15 Données de la figure 7.3 : corrosion de l'acier au carbone la première année, par catégorie ISO 9223

Catégorie	Perte d'épaisseur, µm	Perte de masse, g/m²
C1 Très faible	jusqu'à 1,3	jusqu'à 10
C2 Faible	1,3 à 25,0	10 à 200
C3 Moyenne	25,0 à 50,0	200 à 400
C4 Élevée	50,0 à 80,0	400 à 650
C5 Très élevée	80,0 à 200,0	650 à 1 500
CX Extrême	200,0 à 700,0	1 500 à 5 500

Source : Šmak et al. (2021), tableau 1, reprenant l'EN ISO 9223 [S98]. Statut : sourcé. Les bornes inférieures sont exclues.

D.4 Chapitre 9 : la trajectoire par phases

Tableau D.16 Données de la figure 9.1 : calendrier de RC-1 par statut

Étape	Début (année)	Fin de barre (début d'année)	Statut
Ingénierie d'avant-projet de la phase 1 ; accords sur les utilités	2027	2028	cible
État initial EIES ; audiences T3 2028 ; certificat T4 2028	2027	2029	cible
Financement ; pas de travaux avant le certificat	2028	2029	cible
Travaux de la phase 1, du T1 2029 à la première coulée	2029	mi-2030	cible
Première coulée S2 2030 ; montée en cadence en 2031	mi-2030	2032	cible
Phase 2 : deuxième ligne de fusion, profilés légers et moyens	2032	2035	indicatif
Phase 3 vers 1 Mt/an : extension de l'aciérie, profilés lourds	après 2034	ouverte	indicatif
Module de réduction directe pour le minerai camerounais (plus tard)	après 2034	ouverte	indicatif

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), calendrier révisé le 10 octobre 2026 [S03]. Les barres courent jusqu'au début de l'année suivante ; « mi-2030 » marque le second semestre 2030 ; la phase 2 est indicative de 2032 à 2034 ; la phase 3 et le module DRI, qui vient plus tard, sont représentés dans la bande ouverte « après 2034 ».

Tableau D.17 Données de la figure 9.2 : demande d'électricité et intensité carbone par phase de RC-1

Phase	Électricité, GWh/an (à 490 kWh/t)	Charge moyenne, MW (à 490 kWh/t)	Appel maximal, MVA	Périmètres 1 + 2, t CO ₂ /t	Y compris l'amont du DRI importé, t CO ₂ /t
Phase 1	289,0 (301,7)	36,1 (37,7)	55	0,324	0,578
Phases 1+2	421,6 (442,9)	52,7 (55,4)	≈100 (85 à 110 ; interpolé, dérivé)	0,326	0,580
Usine complète, 1 Mt/an	753,2 (795,7)	94,1 (99,5)	160	0,328	0,582

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), bilans indicatifs à 450 kWh/t au four [S03] ; valeurs entre parenthèses à la valeur haute de planification de 490 kWh/t (méthode D6 ; les intensités augmentent alors d'environ 0,01 t) ; charge moyenne sur une base de 8 000 heures ; appel maximal en hypothèse ; ligne 225 kV de la zone : 100 MW dans un premier temps, 330 à 400 MW ensuite [S25, S34] ; références worldsteel de 0,69 et 1,47 t CO₂/t [S01]. Statut : dérivé et hypothèse.

Tableau D.18 Données du tableau 9.2 : bilans indicatifs de RC-1 en valeurs absolues

Poste	Unité	Phase 1	Phases 1 et 2	Usine complète, 1 Mt/an
Produits finis	t/an	300 000	500 000	1 000 000
Acier liquide	t/an	319 149	531 915	1 063 830
Unités de fer (charges métalliques)	t/an	362 669	604 449	1 208 897
DRI/HBI (30 % de la charge)	t/an	108 801	181 335	362 669
Ferraille	t/an	253 868	423 114	846 228
Électricité	MWh/an	288 957	421 596	753 191
Gaz naturel (réchauffage)	GJ/an	0	260 000	910 000
Appoint d'eau	m ³ /an	600 000	1 000 000	2 000 000
Oxygène	millions de Nm ³ /an	11,2	18,6	37,2
Laitier de FAE	t/an	44 681	74 468	148 936
Poussières de FAE	t/an	4 787	7 979	15 957
Calamine	t/an	6 000	10 000	20 000
CO ₂ du périmètre 1	t/an	31 915	67 777	157 434
CO ₂ du périmètre 2	t/an	65 304	95 281	170 221
CO ₂ amont du DRI importé	t/an	76 161	126 934	253 868

Source : configuration de référence RC-1 de Cameroon Steel (estimation de planification), édition du 10 octobre 2026 [S03] ; méthode D6 à l'annexe A. Statut : dérivé des capacités prévues et des hypothèses de référence du tableau A.1, avec le four à 450 kWh/t. Les valeurs sont des résultats de modèle non arrondis et doivent être lues avec deux chiffres significatifs.

CAMEROON STEEL

DE LA RESSOURCE MINÉRALE À LA VALEUR INDUSTRIELLE

Cameroon Steel développe un complexe sidérurgique à Mboro, dans la Zone industrialo-portuaire de Kribi, pour transformer la ferraille, le fer importé puis, à terme, le minerai camerounais en barres, fils et profilés avec lesquels se construit l'Afrique centrale. Ce livre blanc est publié à titre d'information et ne constitue ni une offre ni un engagement.