

ECOCONCEPTION DANS L'HYDROMECHANIQUE

Ecoconception in hydro-mechanical engineering

Pierre-Guilhem BOUQUIER
EDF CIH – 73290 La Motte Servolex
pierre-guilhem.bouquier@edf.fr

MOTS CLEFS

Ecoconception – acier - hydromécanique – Gaz à effet de serre

KEY WORDS

Ecoconception – steel – hydro-mechanical – Greenhouse Gases

RÉSUMÉ

L'hydroélectricité produit une électricité renouvelable et parmi les moins carbonées (6 à 11 gCO₂eq/kWh). Toutefois la construction des ouvrages fait appel à des matériaux (béton et acier) qui sont parmi les premiers émetteurs de GES (gaz à effet de serre) à l'échelle mondiale. Il est donc nécessaire de chercher à en réduire ou optimiser l'usage, ce qui concourra à l'atteinte de l'objectif affiché par EDF de baisser de 4% par an ses émissions de GES. De nombreuses pistes sont proposées dans le présent article avec une vision pragmatique.

ABSTRACT

Hydroelectricity produces renewable electricity that is among the least carbon-intensive (6 to 11 gCO₂/kWh). However, the construction of the structures uses materials (concrete and steel) which are among the largest emitters of GHG on a global scale. It is therefore necessary to seek to reduce or optimize its use, which will contribute to achieve the objective stated by EDF of reducing its GHG emissions by 4% per year. Many tracks to explore are proposed in this article with a pragmatic vision.

1. L'ÉCOCONCEPTION DANS LE DOMAINE DE L'HYDROMÉCANIQUE

La norme ISO 14006 définit l'éco-conception comme une « approche méthodique qui prend en considération les aspects environnementaux du processus de conception et développement dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie d'un produit ».

Les « impacts environnementaux négatifs » sont définis dans les normes de référence (p.ex. la norme NF EN 12804 qui définit les FDES cf. infra) ; ils sont au nombre de 13 à 20. Toutefois dans un premier temps, le focus a été fait sur le seul impact sur le climat (GES), à la fois à cause de l'urgence à contenir ces émissions, et du fait que le risque Climatique lié au GES est désormais bien connu des ingénieurs et de la population en général. En outre, EDF affiche l'objectif de réduire ses émissions de GES de 4% par an. Mais les autres impacts seront également à prendre en compte dans les études plus complètes à venir.

2. LES OUTILS DE L'ÉCOCONCEPTION

Un des outils fondamentaux pour évaluer l'impact d'un matériel est la fiche FDES (fiche de données environnementales et sanitaires disponibles sur le site <https://www.inies.fr/ressources-documentaires/>) ou son équivalent international EPD (environmental product declaration disponible en différentes langues sur le site <https://www.environdec.com/library> mais il est plus simple de les chercher directement dans un moteur de recherche.

Dans le domaine de l'hydromécanique, à défaut de FDES/EPD portant sur les vannes, les conduites forcées... le document « de référence » est la FDES qui concerne les PRS (profilés reconstitués soudés, utilisés dans le bâtiment comme dans nos structures mécano-soudées) qui a été établie par le CTICM (centre technique industriel de la construction métallique) sur la base de valeurs moyennes françaises.

Cette fiche en français permet de bien comprendre les enjeux suivants :

- Le périmètre
- Les étapes du cycle de vie désignées par les 4 lettres A, B, C et D
- La distinction entre le cycle « from cradle to gate » (du berceau à la porte de l'atelier, qui ne comprend que le début du cycle de vie [étape A] mais qui est bien adaptée aux fabricants de produits) et celui de « from cradle to grave » (du berceau à la tombe, qui comprend donc tout le cycle de vie de A à D)
- Les bénéfices du recyclage en fin de vie de l'acier,
- L'importance des hypothèses prises (p.ex. pas de peinture, transport sur une certaine distance...) ainsi que de la durée de vie attendue (100 ans pour le PRS, mais 30 ans sur la FDES de produits de peinture).

Cette fiche permet également de fixer des ordres de grandeur importants :

- La fabrication du PRS (étapes A1+A2+A3) émet 2030 kg CO₂/t
- La mise en œuvre (transport et montage sur chantier, étapes A4+A5) émet « seulement » 86 kg de CO₂/t !
- Les transports (A2 = minerais ; A4 = tôles) émettent « seulement » 30 à 50 kg de CO₂/t chacun.

Dans le cas de structures « passives » telles les poutres PRS utilisées dans le bâtiment, l'étape de vie « B » (« vie en œuvre ») est prise à zéro. Pour une structure plus complexe telle qu'une vanne charpentée, cette étape n'est pas nulle car elle devrait inclure les consommations d'énergie lors des manœuvres (a priori négligeable sauf pour quelques vannes faisant de la régulation ou pour des écluses) mais aussi les impacts des maintenances ; or il s'avère qu'une remise en peinture sur site peut émettre autant de CO₂, si elle est faite à l'aide de compresseurs thermiques, que ce que la construction de la vanne a émis ! Ce sujet est en cours d'investigations par EDF Hydro.

Cependant du point de vue de la seule étape de la construction de nos structures mécanosoudées, c'est la fabrication même de l'acier (tôles et profilés) qui est le premier poste d'émission de gaz à effet de serre, et qui va être abordée ci-dessous.

3. LA FABRICATION DE L'ACIER

3.1. Les deux filières d'élaboration

Le mode traditionnel (multimillénaire) de fabrication de l'acier est le haut-fourneau dans lequel un empilage de couches de minerai de fer et de charbon/coke voit l'oxygène du minerai de fer quitter ce dernier et s'associer au carbone en rejetant du CO₂. Le produit de sortie du haut-fourneau est la fonte qui doit encore être affinée dans un convertisseur à oxygène afin de réduire sa teneur en carbone.

Dans ce convertisseur, l'aciériste réalise des mesures de la composition chimique de son bain de fusion, et il effectue les corrections qui lui permettront de respecter les exigences de composition des nuances qu'il va fabriquer.

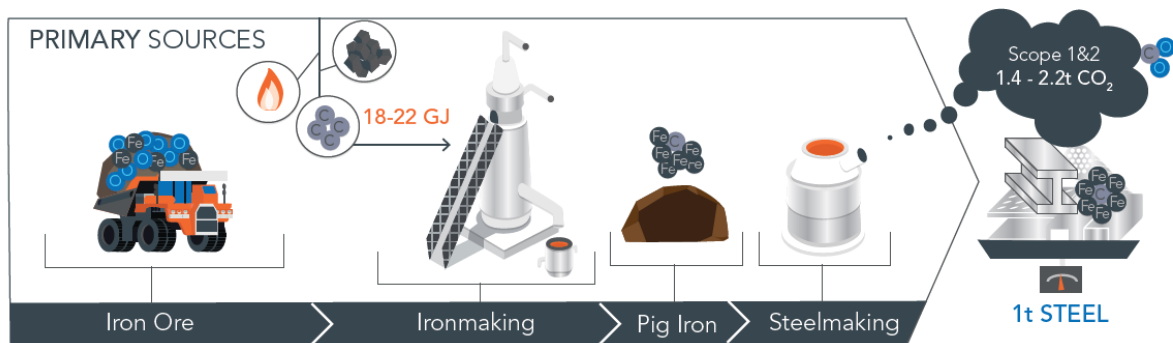


Figure 1 : filière d'élaboration d'acier par haut fourneau

Par ce procédé, on obtient des émissions de l'ordre de 1400 à 2200 kg CO₂eq/t acier.

Environ 70% des aciers mondiaux sont produits par cette filière qui offre les prix les plus compétitifs.

Toutefois, il existe une seconde filière d'élaboration, apparue à la fin du XIX^{ème} siècle, basée cette fois non plus sur des minerais mais sur des ferrailles recyclées (scrap en anglais) fondues dans des fours à arc électrique (EAF).



Figure 2 : filière d'élaboration d'acier par le four à arc électrique (EAF)

Dans ce schéma, la quantité de CO₂ émise n'est plus que de 340 kg de CO₂/t acier ce qui semble un peu optimiste car on relève entre 300 et 600 kg dans les EPD disponibles (soit 4 à 5 fois moins que la filière traditionnelle au haut fourneau).

En revanche, ce procédé faisant appel à une quantité importante d'électricité, il n'est avantageux qu'en présence d'une électricité abondante et décarbonée comme c'est le cas en Suède, Norvège, Québec (dont le kWh électrique émet moins de 30g CO₂) et ... en France (électricité consommée <70 gCO₂/kWh). A titre d'information il y a 20 fours à arc électrique produisant environ 30% de l'acier en France [*source rapport du Sénat : Rapport d'information n° 649 (2018-2019), tome I, déposé le 9 juillet 2019*].

De la même manière que dans le convertisseur, l'aciériste mesure la composition de son bain de fusion et il effectue les corrections pour mettre sa nuance en conformité avec les exigences des normes. Bien qu'élaborés avec des « déchets », ces aciers électriques ont le même niveau de qualité que ceux qui sont issus des hauts fourneaux et ils respectent les mêmes normes.

Et concernant un risque d'épuisement de la ressource « ferraille » il faut savoir que la France et plus globalement l'Europe sont exportatrices nettes de ferrailles ; donc pour le moment il n'y a pas de pénurie à redouter.

3.2. Les produits en acier

Si l'on exclut les pièces moulées ou forgées qui suivent des processus particuliers, mais qui ne représentent qu'un faible tonnage de nos constructions hydrauliques, il faut observer que le marché de l'acier est segmenté de manière assez étanche :

- Les produits dits « longs » comme les poutrelles (I, H, cornières...) et les ronds (fers à béton, ancrages, axes, galets...) sont fréquemment élaborés par la filière à arc électrique,
- Par contre les tôles sont exclusivement (en France et c'est également vrai dans toute l'Europe, mais pas aux Etats-Unis) produites par les hauts fourneaux couplés à la « coulée continue » qui permet d'obtenir les prix les plus compétitifs.

3.3. La situation française

En 2023, on pouvait trouver en France :

- Des fers à béton élaborés par la filière électrique à partir de ferrailles, émettant 280 kg de CO₂/t acier (étapes A1+A2+A3) fabriqués par la société RIVA (propriété du groupe allemand KIWA) et qui a publié leur EPD :
<https://www.kiwa.com/4ad7f7/globalassets/germany/veroeffentlichte-epds/2022/01-0322/epd-riva-acier-175-en.pdf>
- Des profilés élaborés par la filière électrique à partir de ferrailles, émettant 370 kg de CO₂/t acier (étapes A1+A2+A3) fabriqués par la société « Laminés Marchands Européens (propriété du groupe italien Beltrame) et qui a publié leur EPD :
<https://www.environdec.com/library/epd2023>

Par contre en 2023, il n'était pas possible de trouver des tôles élaborées au four électrique, dans les épaisseurs habituellement utilisées pour les vannes (8 à 20 mm). C'est pourquoi EDF Hydro s'est rapproché de l'aciériste Industeel (filiale d'Arcelor Mittal) qui possède deux installations de fours électriques (au Creusot et à Rive de Gier) mais qui s'était jusqu'à présent spécialisé dans les tôles de très forte épaisseur et les nuances spéciales pour l'armement. Les tôles pour EDF Hydro (acier S355J2, qualité Z35, épaisseurs 10 et 12mm dans un premier temps) seront élaborées en 2024 et seront disponibles pour les fournisseurs de la PRIA (politique de relations industrielles et d'achats ≈ système de qualification) vannes charpentées d'EDF Hydro, via un distributeur (Vulcain Aciers). Industeel a annoncé qu'en 2025 ils vont investir dans une coulée continue afin d'augmenter leur productivité pour cette niche (en développement) des tôles élaborées au four électrique.

4. STRATEGIE D'EDF HYDRO A COURT TERME

Jusqu'en 2023, étant donné qu'il était quasiment impossible de trouver des tôles élaborées au four électrique, mais également avec des visées pédagogiques, EDF Hydro a opté pour la solution de la NTE (notation technico-économique des offres) qui permet de valoriser des offres mieux-disantes en intégrant les impacts environnementaux. Cette NTE porte également le message qu'EDF souhaite valoriser les offres mieux-disantes en termes d'écoconception.

C'est ainsi que sont apparus deux critères :

- La provenance de pays dont le mix électrique émet moins de 500 gCO₂/kWh car les opérations de laminage, manutention etc...consomment de l'électricité et impactent une partie du bilan final des pièces en acier (et l'impacterait bien évidemment à quasiment 100% dans le cas d'aciers élaborés au four électrique) ;
- La part d'aciers provenant de la filière électrique, sachant que c'est dès 2023 possible pour les profilés mais pas encore pour les tôles.

On a ainsi pu observer les bonifications suivantes, qui correspondent en général au quota des points attribués à l'écoconception dans la NTE :

- Pour le mix électrique :
 - o 0 points si aciers provenant de pays émettant plus de 500 gCO₂/kWh
 - o 1 point si aciers provenant de pays émettant entre 200 et 500 gCO₂/kWh
 - o 2 points si aciers provenant de pays émettant moins de 200 gCO₂/kWh
- Pour la part d'aciers provenant de la filière électrique :
 - o 0 point si 0% d'aciers provenant de la filière électrique
 - o 1 point si moins de 10% d'aciers provenant de la filière électrique
 - o 2 points si entre 10 et 30% d'aciers provenant de la filière électrique
 - o 3 points si plus de 30% d'aciers provenant de la filière électrique.

Cette NTE a été rédigée de manière légèrement différente d'un appel d'offres à l'autre.

Pour 2024, des tôles d'acier émettant significativement moins de GES vont donc être disponibles sur le marché ; EDF Hydro a donc modifié ses exigences en commençant par le cahier des charges concernant l'approvisionnement de vannes charpentées neuves (CPC : cahier des prescriptions communes). Ce document exige désormais des aciers (tôles, profilés, galets...) émettant moins de 700 kg de CO₂/t acier ; il s'agit toutefois d'une moyenne pondérée afin de ne pas créer trop de difficultés pour approvisionner des pièces particulières ou des tôles d'épaisseurs supérieures à 20mm (concrètement cette moyenne pondérée admet, si l'on a 95% du tonnage de la fourniture qui émettent 600 kg CO₂, d'avoir les 5% restant qui émettent encore 2200 kgCO₂/t).

Compte tenu du décalage temporel entre l'adoption du nouveau CPC et l'approvisionnement des tôles (délai de 6 à 9 mois entre l'envoi de la consultation et la notification du marché puis les études chez le constructeur) les premières tôles ne devraient être commandées par les constructeurs de vannes qu'au dernier trimestre de 2024.

Donc en 2024 on aura une coexistence au niveau des appels d'offres entre des NTE et des exigences inscrites dans le CPC Vannes.

5. STRATEGIE D'EDF HYDRO A MOYEN TERME

La mise en œuvre d'aciers émettant 4 à 5 fois moins de CO₂ que les aciers issus de hauts-fourneaux aura un impact important sur les émissions de CO₂ d'EDF.

Toutefois plusieurs autres pistes d'amélioration devront encore être exploitées :

- La réduction des masses d'acier consommées, pour un même service final rendu, reste le moyen le plus efficace pour économiser du CO₂ ; on pourra donc chercher à réduire les masses d'acier employées dès l'étape de la conception et des études (« sobriété » dans les études) ;
- Les process de fabrication de nos structures mécano-soudées peuvent être améliorés en substituant des moyens de découpe électriques (plasma, eau, laser) aux chalumeaux oxyacétyléniques qui utilisent des produits pétroliers ;
- De la même manière, les moyens de préchauffage, de post chauffage ou de détensionnement devraient ne plus être alimentés au gaz ;
- Au niveau des chantiers, la consommation de gazole par les engins de manutention ou les compresseurs et groupes électrogènes, est un poste très important d'émissions de CO₂ ; or on réussit désormais à trouver de plus en plus de matériels électriques équivalents ; mais parfois le chantier EDF n'est pas équipé d'une distribution électrique suffisamment puissante (plusieurs centaines de kVA) pour alimenter ces engins, aussi EDF Hydro doit prévoir en préalable à des gros chantiers, l'implantation d'un poste électrique de distribution de forte puissance (par exemple pour des compresseurs d'air utilisés lors d'un décapage de vanne, il faudrait disposer de près de 600 kVA électriques) ;
- Une fois les matériels hydromécaniques en place, il est souhaitable de prolonger au maximum leur durée de vie (au-delà de 100 ans) ; pour cela :
 - o Dès la phase de conception il faut éviter les zones de rétention d'eau, car il s'y développe un mécanisme de dépôts de sédiments, puis d'apparition de végétation ; et ces végétaux consomment la peinture et favorisent la corrosion de l'acier ;
 - o En exploitation, il convient d'effectuer une maintenance adaptée qui permet d'éviter les agressions (dégradation de la peinture soit à cause de chocs soit du fait de la végétation) conduisant à l'obligation de remplacer ces équipements ;
 - o Pour les vannes, il est important de faire la chasse aux dépôts sédimentaires dans les structures, ainsi qu'aux fuites qui alimentent ces dépôts et dégradent les revêtements ; pour ce faire, toute structure de vanne doit être facilement accessible ;
 - o La peinture (+ métallisation) reste le moyen le plus adapté pour protéger ces structures de la corrosion ; il faut donc veiller à son bon entretien régulier.

S'il se confirme qu'une dynamique de réduction des émissions de GES réussit à être lancée à EDF Hydro, il faudra ensuite se préoccuper des autres impacts environnementaux négatifs tels qu'ils apparaissent listés dans les FDES et EPD. L'utilisation de l'eau semble être devenue une priorité sociétale ces dernières années et pourrait donc constituer la deuxième piste de recherches d'améliorations. L'accès aux matières premières est un enjeu à la fois stratégique et environnemental qu'il convient également d'inclure dans le processus de conception.

6. CONCLUSION

L'analyse du bilan des structures d'hydromécaniques sous l'angle de l'écoconception met en évidence le poids extrêmement important du mode d'élaboration de l'acier. Pourtant, une alternative existe qui réduirait les émissions de CO₂ par un facteur 3 à 5, basée sur les fours à arc électrique.

Par ailleurs, la construction n'est pas la seule étape d'émission de CO₂ de nos structures, et la maintenance apparaît à la fois comme elle aussi une source d'émissions importantes si elle est faite au moyen d'engins thermiques, mais également comme une protection indispensable (peinture, chasse aux dépôts dans les structures) à la prolongation la durée de vie de ces matériels ; là aussi les alternatives aux moyens thermiques existent, mais elles nécessitent l'installation de puissances électriques importantes sur les chantiers.

Enfin, le changement climatique dû aux GES n'est pas le seul impact environnemental négatif qu'il convient de prendre en compte ; cependant leurs indicateurs sont aujourd'hui robustes et éprouvés, et les autres impacts (empreinte eau, épuisement des ressources...) vont peut-être nécessiter une phase de diffusion du savoir avant d'être bien compris par les ingénieurs.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

Les illustrations sont issues de la World Steel Association