



L'École Nationale Supérieure des Mines de Nancy est une grande école d'ingénieurs publique, appartenant à l'Université de Lorraine, dont la mission est de former des ingénieurs responsables et humanistes, capables d'innover et de répondre aux défis industriels, énergétiques, technologiques et environnementaux, pour ainsi mettre l'ingénierie au service du bien commun.

Contact : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy

92, rue du Sergent Blandan  
 54042 Nancy cedex - France  
 T +33 (0)3 72 74 48 00

[Mines Nancy : École d'ingénieurs, recherche, formation](https://www.mines-nancy.fr)

## Le point de vue de 3 étudiants à l'école Nationale Supérieure des Mines de Nancy

### EN BREF.

Dans le cadre de la transformation du réseau de transport d'électricité, RTE fait face à de nombreux enjeux tel que l'approvisionnement et l'augmentation de l'empreinte carbone du réseau. En tant qu'étudiants ingénieurs spécialisés dans les ressources et l'énergie, nous avons décidé d'orienter notre travail vers la question de l'intégration du concept d'économie circulaire et plus particulièrement du recyclage des matériaux. L'empreinte carbone de la construction et de l'exploitation du réseau y étant fortement liée, nous nous intéressons à son calcul et à sa réduction.

A l'issue de notre travail, nous avons conclu que RTE mettait tous les moyens en œuvre afin d'intégrer le recyclage des matériaux dans la transformation du réseau. Celui-ci reste cependant limité pour des raisons techniques et économiques mais également car il fait encore l'objet de recherches ou d'expérimentations. Par ailleurs, RTE montre une réelle volonté d'intégrer davantage les critères environnementaux dans le choix de ses fournisseurs. Concernant l'empreinte carbone du réseau, son analyse nous permet de mettre en parallèle les émissions liées à la construction et à l'exploitation du réseau et les émissions évitées liées à la sortie des énergies fossiles. Tous ces éléments sont discutés afin d'identifier les pistes d'amélioration possibles pour le SDDR.



## Intégrer le recyclage des matériaux dans l'évolution du réseau

La question de l'aluminium occupe une place centrale dans le SDDR de RTE. Du point de vue de sa production, il reste aujourd'hui particulièrement difficile à décarboner. L'aluminium est majoritairement issu de gisements de bauxite -essentiellement situés dans les régions tropicales et subtropicales- transformés en alumine puis en aluminium par électrolyse. L'étape de l'électrolyse est à la fois très énergivore et fortement émettrice de CO<sub>2</sub>, car elle repose sur l'utilisation d'anodes en carbone. Des recherches sont toutefois en cours, notamment par Elysis et Trimet, sur l'utilisation d'anodes inertes produisant de l'O<sub>2</sub> au lieu de CO<sub>2</sub>. Cela constituerait un levier majeur de décarbonation de la filière. Face à l'impact carbone de l'aluminium primaire, le recyclage apparaît également comme un levier essentiel. Dans ce cadre, RTE a contractualisé avec Nexans afin de valoriser les déchets en aluminium issus des lignes aériennes. Toutefois, le recyclage de l'aluminium destiné aux usages électriques présente des contraintes techniques importantes. Les câbles électriques requièrent en effet des degrés de pureté très élevés mais l'aluminium provenant d'anciens câbles électriques peut contenir des éléments indésirables, qualifiés de « poisons électriques », susceptibles d'altérer les propriétés conductrices du matériau. La filière de recyclage de l'aluminium fait également face à des contraintes d'approvisionnement. En effet, les volumes d'aluminium recyclables, compatibles avec les exigences du réseau électrique demeurent insuffisants. Actuellement, la part d'aluminium recyclé intégrée dans les nouveaux câbles est limitée à environ 10 %, mais RTE et Nexans ambitionnent d'atteindre jusqu'à 30 % à moyen terme, selon des expérimentations menées avec Trimet et MTB Recycling, une entreprise française spécialisée dans le recyclage industriel.

De même, dans un contexte de transition énergétique, le cuivre fait lui aussi face à des enjeux majeurs d'approvisionnement. Selon l'IFPEN, la demande mondiale en cuivre liée aux réseaux électriques devrait passer de quelques millions de tonnes par an en 2020 à plus de 30 Mt/an à l'horizon 2050. Constituant essentiel des câbles électriques, il est en effet le 2<sup>e</sup> meilleur conducteur de l'électricité derrière l'argent, ce qui en fait un matériau difficilement substituable pour le transport d'électricité. Le recyclage du cuivre est, d'un point de vue technique, plus simple que celui

de l'aluminium. Cependant, ce métal doit être particulièrement pur pour être intégré dans les câbles, ce qui limite son utilisation sous forme recyclé. La fiche 14 du SDDR souligne la nécessité de prioriser et d'accélérer les recherches à ce sujet. Par ailleurs, selon les travaux de Marie Bonnin sur les flux de cuivre en France, une part significative des déchets contenant du cuivre est exportée, entraînant une perte de matière potentiellement stratégique pour la France. Cela met en évidence la nécessité de mieux structurer et consolider la filière française de récupération des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Cependant, même avec une amélioration des filières de recyclage, le cuivre recyclé ne permettra pas de couvrir l'ensemble des besoins futurs liés au développement du réseau électrique prévu par le SDDR. La question de l'accessibilité future des matières premières apparaît ainsi centrale : dans quelle mesure les tensions sur les chaînes d'approvisionnement des métaux ont-elles été intégrées dans la planification du développement du réseau électrique français ?

Le cuivre et l'aluminium ne sont pas les seuls constituants des câbles électriques. D'après Nexans, près de 50 % du coût d'un câble est lié aux matériaux d'isolation (PVC, polyéthylène, caoutchouc). Le fournisseur de câbles indique par ailleurs l'existence d'études sur l'intégration d'isolants recyclés. Toutefois, ces matériaux doivent répondre ici aussi à des exigences de pureté très élevées. La présence de polluants ou d'impuretés peut en effet induire des contraintes électriques importantes, accélérer le vieillissement des câbles et augmenter les risques de claquage de l'isolant. Ces contraintes sont d'autant plus fortes que le niveau de tension du câble est élevé, ce qui concerne directement les nouvelles lignes prévues dans le cadre du SDDR. Cette problématique revêt une importance particulière dans la mesure où l'industrie des isolants repose largement sur la pétrochimie, un secteur à fort impact environnemental. Lorsque les isolants issus du démantèlement des anciens câbles ne peuvent pas être réintégrés dans la fabrication de nouveaux câbles électriques, leur valorisation doit *a minima* être assurée par un recyclage pour d'autres usages.

La dynamique de transformation du réseau électrique coïncide avec une évolution profonde des exigences environnementales imposées aux gestionnaires d'infrastructures. RTE compare désormais systématiquement les bilans carbonés de ses fournisseurs afin

d'orienter ses choix vers les solutions présentant l'empreinte environnementale la plus faible. Globalement, le poids des critères environnementaux est maintenant de minimum 10% dans les achats, contre 2 à 5% auparavant (Fiche 14). Cette logique n'est pas propre à la France : d'autres gestionnaires d'électricité européens, comme Tennet aux Pays-Bas, ont adopté des démarches similaires.

Dans ce contexte, les outils d'évaluation de l'impact environnemental jouent un rôle central. Nexans réalise des Analyses de Cycle de Vie (ACV) depuis plus de quinze ans. Cependant, la comparaison de ces analyses demeure complexe, car les résultats dépendent fortement des hypothèses et des périmètres méthodologiques retenus. Pour renforcer la robustesse et la comparabilité des données, Nexans incite désormais ses propres fournisseurs à faire vérifier leurs déclarations environnementales par des cabinets externes. Une démarche similaire de la part de RTE contribuerait à homogénéiser les référentiels et à sécuriser les choix technico-environnementaux futurs.

### **Calculer, comprendre et réduire l'empreinte carbone du réseau**

Depuis 2023, RTE réalise en interne le calcul des émissions du réseau en s'appuyant sur une approche qui comptabilise les émissions liées aux infrastructures construites ou renouvelées au cours de l'année, par opposition à un amortissement des émissions du parc existant. Cela permet de constater plus facilement les progrès réalisés en matière de réduction des émissions, d'une année à l'autre. Ainsi, la Fiche 14 du SDDR indique que les émissions du réseau s'élèvent à 1MtCO<sub>2</sub> eq en 2023, réparties en trois postes. Par ailleurs, RTE a également évalué l'empreinte carbone du réseau projeté à l'issue des évolutions prévues par le SDDR. Ce calcul repose sur un scénario de référence issu des futurs énergétiques 2050, cohérent avec les objectifs de réduction nationales et européennes. Cette approche prospective permet de mener des analyses coûts-bénéfices, en matière d'émissions, mais aussi de mettre en place une stratégie d'évitement, de réduction et de suivi dans le temps. Ainsi, RTE utilise une méthode très pertinente pour évaluer l'empreinte carbone du réseau, en distinguant le réseau existant du réseau projeté, en identifiant les principaux postes d'émissions et en définissant des leviers de réduction associés.

Comme indiqué dans la fiche 14 du SDDR, 60% des émissions du réseau en 2023 sont liées à l'exploitation du système électrique, ce qui nous a conduit à approfondir la question des pertes par effet Joule. Ces émissions résultent du phénomène physique par lequel une partie de l'électricité transportée est dissipée sous forme de chaleur lors de son passage dans les câbles. Ce mécanisme représente environ 10 TWh d'électricité perdue chaque année. Ce volume de pertes est ensuite multiplié par le facteur d'émission du mix électrique français afin d'estimer les émissions carbone associées à l'exploitation du réseau. Dans le cadre de l'évolution du réseau électrique prévue par le SDDR, le taux de ces pertes devrait augmenter, en raison notamment de l'éloignement croissant entre les sites de production et de consommation, ainsi que de l'intensification des flux électriques liée à la volatilité des énergies renouvelables. En parallèle, la sortie des énergies fossiles, rendue possible par le SDDR, devrait conduire à une baisse du facteur d'émission du mix électrique français. Ainsi, malgré une possible augmentation du volume de pertes, les émissions carbone associées aux pertes par effet Joule devraient globalement rester stables dans les années à venir. On peut toutefois s'interroger sur l'existence d'analyses coûts-bénéfices comparant les différentes technologies de câbles étudiées, ainsi que sur la capacité à identifier plus finement les portions du réseau ou les types d'infrastructures les plus exposés aux pertes par effet Joule.

A l'horizon 2030, alors que l'empreinte carbone du réseau pourrait atteindre 1,8 MtCO<sub>2</sub>e par an en l'absence de mesures de réduction, le projet porté par le SDDR permettrait d'éviter environ 63,7 MtCO<sub>2</sub>e par an à l'échelle nationale. D'autres chiffres sont fournis dans la fiche 14 du SDDR. À l'échelle européenne, les interconnexions rendues possibles par l'évolution du réseau contribueraient également à réduire les émissions du système électrique européen d'environ 20 MtCO<sub>2</sub>e par an. Les émissions associées au développement du réseau représentent un volume non négligeable mais leur comparaison avec les émissions évitées à l'échelle française et européenne grâce à l'électrification des usages et la sortie des énergies fossiles, permet de les relativiser.

## CONCLUSION

Si RTE est limitée dans l'intégration du recyclage des matériaux dans la transformation du réseau, nous portons l'attention sur la nécessité de prioriser les recherches à ce sujet, notamment pour les matériaux isolants. De plus, même avec une amélioration des filières de recyclage, celui-ci ne permettra pas de couvrir l'ensemble des besoins futurs liés au développement du réseau électrique. La question d'approvisionnement en matière premières doit donc être anticipée dans la planification du projet. Nous saluons toutefois la démarche engagée par RTE pour l'augmentation du poids des critères environnementaux dans le choix de ses fournisseurs. Enfin, RTE réalise des efforts significatifs pour rendre le calcul de l'empreinte carbone pertinent, même s'il peut être discuté sur certains points.

