

Comparaison des Impacts Environnementaux des Réseaux de Distribution AC, DC et Mixte

L. CAFRAN^[1], V. GRECO^[2], B. TAULOIS BRAGA^[2], R. LE GOFF LATIMIER^[2], G. JODIN^[2], H. BEN AHMED^[2],
T. SIMON^[3], J.-Y. GAUTHIER^[1], J.-F. TRÉGOUËT^[1], X. LIN-SHI^[1]

1. INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère, UMR5005, 69621 Villeurbanne, France.
2. Univ Rennes, ENS Rennes, CNRS, IETR UMR 6164.
3. Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, LAGEPP UMR 5007, 43 boulevard du 11 novembre 1918, F-69100, Villeurbanne, France

RESUME – La croissance des besoins en électricité a entraîné une augmentation du nombre d'appareils à courant continu (DC), tels que les panneaux photovoltaïques et les chargeurs de véhicules électriques. Cela ravive la recherche autour d'un réseau de distribution DC, ou du moins dans un premier temps mixte AC/DC. La comparaison entre ces alternatives doit prendre en compte les impacts environnementaux associés aux dispositifs d'électronique de puissance spécifiques nécessaires pour ces nouveaux réseaux. Cet article propose une comparaison des impacts d'installation et d'exploitation de trois choix techniques pour les réseaux électriques à basse tension : DC, AC et mixte AC/DC. Une étude de cas est choisie sur la base de sources d'énergie distribuées mixtes représentatives des consommations et productions. Des simulations sont effectuées sur une période de 20 ans pour chacune des trois architectures. Cette étude montre qu'une topologie mixte peut être une alternative prometteuse aux réseaux traditionnels à courant alternatif (AC), car elle réduit l'impact des convertisseurs, en particulier pour les réseaux peu étendus géographiquement. Cependant, l'architecture optimale pour un système donné peut varier en fonction de facteurs tels que la puissance nominale, la longueur des lignes et le profil de consommation. Pour explorer cette variabilité, une analyse de sensibilité détaillée est réalisée.

Mots-clés – réseau DC, réseau AC, réseau mixte AC/DC, impacts environnementaux, éco-conception, éco-dimensionnement.

1. INTRODUCTION

Les ressources énergétiques décentralisées (DER), telles que les panneaux photovoltaïques (PV), les véhicules électriques (VE) et les systèmes de stockage d'énergie statique (ESS), sont connectées aux systèmes de distribution basse tension (BT) et fournissent des services tels que la production et le stockage d'énergie [1][2]. Ces ressources basées sur le courant continu (DC) nécessitent des convertisseurs de puissance (par exemple, des onduleurs et des redresseurs), qui entraînent des pertes supplémentaires et augmentent ainsi l'impact des systèmes à courant alternatif (AC) actuels. En outre, l'utilisation croissante d'appareils à courant continu dans les ménages motive la conception de nouveaux systèmes électriques mieux adaptés à la production décentralisée et à la consommation DC. Des architectures de réseaux mixtes AC/DC et entièrement DC sont explorées pour réduire l'utilisation de convertisseurs, minimiser les pertes électriques et créer des systèmes plus écologiques, flexibles et résilients [3]. A notre connaissance, le principal critère sur lequel ces architectures sont comparées est leur rendement énergétique [4].

Comme indiqué précédemment, l'électronique de puissance joue un rôle crucial dans la croissance de l'électrification en permettant l'intégration efficace des ressources renouvelables dans les réseaux de transmission et de distribution grâce à la conversion et au contrôle de l'énergie à l'aide de dispositifs à semi-conducteurs. Cependant, la fabrication de ces composants est complexe et implique de multiples processus industriels, qui contribuent aux impacts environnementaux tout au long de leur

cycle de vie [5][6]. Alors que de nombreuses études donnent la priorité à la rentabilité économique des composants et des systèmes, cette contribution se concentre sur la minimisation de leurs impacts environnementaux. L'objectif est de comparer trois architectures de système de distribution BT : AC, DC, et mixte AC/DC pour évaluer et minimiser les impacts environnementaux de chaque composant. L'évaluation et la comparaison de ces impacts nécessitent une approche systématique et multicritères sur l'ensemble du cycle de vie de chaque système. L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode qui quantifie les impacts environnementaux depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination en fin de vie, en passant par la fabrication, le transport et l'utilisation. Cette approche semble encore difficile à mettre en œuvre pour un objet complexe tel qu'un réseau. La quantification des impacts reste incomplète. En outre, la documentation des phases de fin de vie est encore imparfaite, d'autant plus pour une infrastructure à si long terme. Néanmoins, même si les valeurs absolues des impacts sont à prendre avec prudence, une comparaison des architectures reste possible.

Considérant un quartier européen typique avec une adoption croissante de panneaux photovoltaïques (PV) et de véhicules électriques (VE), cette étude évalue l'architecture de réseau la plus respectueuse de l'environnement (en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) exprimées en $\text{kgCO}_2^{\text{eq}}$) pour un profil de consommateur fixe, en mettant l'accent sur la durabilité plutôt que sur la viabilité économique [7]. Pour ce faire, une étude de cas est introduite pour modéliser un réseau électrique BT et évaluer les impacts de GES découlant de la fabrication et de l'utilisation de ses composants, ce qui facilite la comparaison des architectures.

Le reste du document est structuré comme suit : la section 2 décrit la sélection des paramètres utilisés pour modéliser le système et le traitement des données de simulation. Dans la section 3, des modèles de coûts d'installation et des modèles de coûts d'exploitation sont d'abord développés pour les composants étudiés. Les résultats sont présentés et discutés dans la section 4, y compris le dimensionnement du système et les impacts globaux sur l'environnement de chaque topologie. Ensuite, la section 5 contient une analyse détaillée qui explore les variations de paramètres dans l'étude de cas et estime le comportement du système en fonction de différentes distances et parts de consommation DC présente dans le réseau. Enfin, la section 6 résume le travail effectué et fournit une réflexion générale sur les résultats.

2. ÉTUDE DE CAS

Afin d'incarner l'approche proposée, une étude de cas académique minimaliste et représentative doit être définie. Une telle approche nécessite en effet l'accès à des données habituellement confidentielles sur un réseau réel. Elle se heurte en outre à des difficultés de modélisation et à des choix méthodologiques qui doivent être facilement testables et critiquables. Cette section

décrit donc l'étude de cas proposée, qui n'a pas vocation à être réaliste, mais à reproduire des difficultés représentatives.

Les éléments suivants constituent les fondements de l'étude.

- Des consommateurs avec une demande de puissance crête notée $P_{\text{cons,max}}$, dont une fraction w est en DC et la fraction restante $(1 - w)$ est en AC; ii) une production photovoltaïque (PV) avec une capacité de $P_{\text{PV,max}}$; iii) une station de recharge de véhicule électrique (VE) avec une capacité de $P_{\text{VE,max}}$; iv) des convertisseurs DC/DC connectés à ces composants pour assurer le contrôle de la tension; v) un réseau BT avec une topologie radiale, où chaque ligne a une longueur l . Comme les impacts des onduleurs triphasés sont mieux documentés [8, 9], trois câbles sont considérés pour les lignes AC (en négligeant le câble neutre) et deux câbles sont considérés pour les lignes DC. Pour les besoins méthodologiques de cette contribution, les autres équipements ne sont pas pris en compte. Leur impact est supposé négligeable ou identique d'une architecture à l'autre. Mentionnons le cas particulier des éléments de protection qui sont exclus de cette étude alors que leurs schémas et types varient largement entre les trois architectures et que leurs impacts sont certainement loin d'être négligeables. Cette hypothèse restrictive résulte à la fois de la nécessité d'établir une méthodologie sur un cas simple et de la documentation actuellement incomplète sur les impacts environnementaux des autres composants. Elle nécessitera d'autres extensions de la présente étude préliminaire afin de consolider les résultats. Le tableau 1 rassemble les valeurs des paramètres pour le scénario de l'étude de cas. Aucun de ces choix ne limite l'approche suivante à cette étude. La sensibilité de la méthode aux paramètres les plus importants est analysée à la section 5.

Trois architectures présentées dans les Fig. 1, 2 et 3 sont comparées. L'architecture AC (Fig. 1) comporte un bus de courant alternatif (lignes bleues) alimenté par le transformateur, ainsi que de petits convertisseurs pour fournir du courant continu aux composants du réseau qui en ont besoin. L'architecture DC (Fig. 2) comprend un bus de courant continu (lignes vertes) alimenté par un grand convertisseur AC/DC, avec de petits convertisseurs DC/AC fournissant du courant alternatif aux composants du réseau qui en ont besoin. L'architecture mixte (AC/DC) (Fig. 3) comporte deux bus, l'un à courant alternatif et l'autre à courant continu, ce qui élimine le besoin de petits convertisseurs. Le point de vue adopté est celui d'un opérateur de réseau, et non celui des agents qui y sont connectés. Par conséquent, la puissance échangée est supposée incontrôlable. Ainsi, seuls les composants situés dans la zone rouge de ces figures ont été modélisés, comme nous le verrons dans la section suivante. Les convertisseurs (DC/DC, transformateur moyenne tension MT vers BT, etc.) et les lignes à l'extérieur de la zone rouge sur ces figures dépassent donc le cadre de cette étude. Leurs impacts sont supposés être les mêmes dans les trois architectures et ne sont pas pris en compte.

Les séries temporelles annuelles de 2019 sont utilisées pour la consommation car elles fournissent des données consolidées qui ne sont pas affectées par les impacts de la COVID-19. Les données horaires pour la consommation domestique (et la production PV, respectivement) ont été extraites de [10] (resp. [11]). Le profil horaire de la consommation des VE a été généré à l'aide des statistiques de [12]. Tous les logiciels et les données permettant de reproduire les résultats sont documentés sur un dépôt GitLab open source¹. Un sous-ensemble des séries tempo-

1. https://gitlab.com/satie.sete/comparison_environmental_costs_ac_dc_mixed_distribution

TABEAU 1. Les paramètres de l'étude de cas

Paramètre	$P_{\text{cons,max}}$	w	$P_{\text{PV,max}}$	$P_{\text{VE,max}}$	l
Valeur	440 kW	0.33	440 kW	300 kW	0.02 km

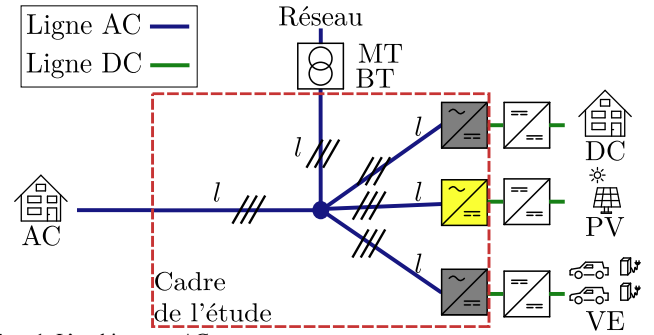


FIG. 1. L'architecture AC.

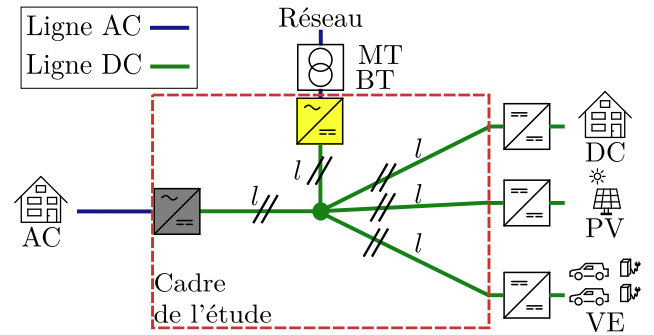


FIG. 2. L'architecture DC.

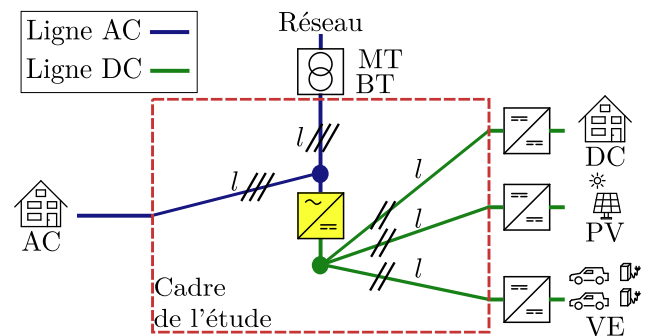


FIG. 3. L'architecture AC/DC.

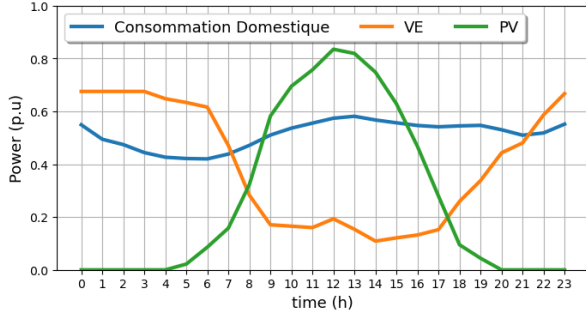


FIG. 4. Extrait de 24h des profils de consommation (domestique et VE) et de production (PV).

relles correspondantes, normalisées par leur maximum, en unité de puissance (p.u), est illustré à la Fig. 4.

A chaque pas de temps t , le réseau MVAC, $P_{MVgrid,t}$, fournit l'équilibre de puissance entre la consommation locale (domestique $P_{cons,t} \geq 0$ et VE $P_{VE,t} \geq 0$) et la production PV $P_{prod,t} \leq 0$ comme dans (1).

$$P_{MVgrid,t} = -(P_{cons,t} + P_{prod,t} + P_{VE,t} + P_{loss,t}) \quad (1)$$

avec $P_{loss,t}$ les pertes totales dans le réseau BT à l'instant t .

L'énergie totale annuelle échangée E_y est définie par (2) :

$$E_y = \Delta T \sum_{t=0}^{1 \text{ an}} (|P_{cons,t}| + |P_{prod,t}| + |P_{VE,t}| + |P_{MVgrid,t}|) \quad (2)$$

avec $\Delta T = 1 \text{ h}$ pour cette étude.

3. MODÉLISATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Étant donné que cette étude vise à évaluer les architectures de réseaux AC, DC et AC/DC d'un point de vue environnemental, il est nécessaire d'introduire une mesure de comparaison. De telles mesures sont nécessairement réductrices, car les impacts environnementaux sont multiples et ne peuvent être assimilés les uns aux autres. Nous avons choisi ici le critère unique des émissions de gaz à effet de serre GES, exprimées en $\text{kgCO}_2^{\text{eq}}$, car il est le plus largement documenté.

Dans le cadre des travaux préliminaires présentés ici, la phase de fin de vie ne sera pas prise en compte. En effet, elle soulève des difficultés méthodologiques spécifiques qui nécessiteront une étude dédiée. Les composants d'un réseau de distribution - même en se limitant aux principaux comme ici - ne subissent pas les mêmes mécanismes de vieillissement, et n'ont pas les mêmes durées de vie. Leurs processus de démantèlement ne sont pas tous documentés, surtout pour les équipements à longue durée de vie. De plus, pour l'électronique de puissance, les impacts du transport et de la fin de vie semblent négligeables [15]. C'est pourquoi cette étude se concentre sur les phases de fabrication et d'utilisation. Elle implique l'analyse des flux de matières et d'énergie à chaque étape et le calcul des impacts à l'aide de bases de données telles qu'Ecoinvent [13].

Les impacts sur la durée de vie d'un système sont regroupés dans un coût nivelé de l'électricité (LCOE pour Levelized Cost Of Electricity) comme dans [7, eq. 1] mais exprimé ici en $\text{kgCO}_2^{\text{eq}}/\text{kWh}$. Comme les impacts sont supposés être équivalents chaque fois qu'ils se produisent, le taux d'intérêt est ici unitaire.

$$\text{LCOE} = \frac{C_0 + N_y C_y}{N_y E_y} \quad (3)$$

avec C_0 , C_y qui sont respectivement le coût d'installation (y compris la fabrication) et le coût d'exploitation annuel de l'architecture. N_y représente la durée de vie du réseau, fixée arbitrairement à 20 ans pour l'étude.

L'étude porte sur C_0 et C_y des convertisseurs, ainsi que sur ceux des lignes pour chaque architecture (Fig. 1, 2 et 3).

3.1. Modélisation des convertisseurs

3.1.1. Coût d'installation

La fabrication fait intervenir de nombreux composants, chacun associé à des coûts environnementaux spécifiques. À notre connaissance, les analyses existantes détaillent les impacts d'un produit particulier. Pourtant, les modèles de dimensionnement qui associent les coûts environnementaux aux caractéristiques de dimensionnement des convertisseurs sont peu courants et nécessairement simplifiés. Ici, un modèle de relation en loi de puissance est proposé comme dans [14] pour estimer la masse d'un onduleur à partir de sa puissance nominale P_{conv} (4). Le modèle a été calibré sur les données de [9, Tab. 2] (Voir Fig. 5a) qui donne $a = 0.76$ et $b = 0.59$. Bien qu'extrêmement simpliste, cette approche permet de saisir les principales tendances.

$$m_{conv}(P_{conv}) = a P_{conv}^b \quad (4)$$

Pour évaluer l'impact environnemental de la fabrication des convertisseurs AC/DC et DC/AC, un onduleur spécifique a été analysé en supposant une relation linéaire entre son impact environnemental et sa masse [8]. Il a été démontré que la fabrication d'un convertisseur de 11,2 kg émet $358 \text{ kgCO}_2^{\text{eq}}$ [8]. Les données ont ensuite été linéarisées pour estimer l'impact de divers convertisseurs de différentes masses. La relation suivante (5) définit le coût d'installation du convertisseur i , avec $K_{conv} = 358/11.2 \text{ kgCO}_2^{\text{eq}}/\text{kg}$:

$$C_{conv,0i}(P_{conv}) = K_{conv} m_{conv}(P_{conv}) \quad (5)$$

3.1.2. Coût d'exploitation

Pour le modèle de pertes du convertisseur, les pertes de conduction (6a), (7a) et de commutation (6b), (7b) des IGBT et des diodes sont prises en compte à chaque instant t et sont basées sur le modèle de [15, Chap. 4]. Les pertes dans les autres composants sont négligées.

$$P_{IGBT,t}^{\text{cond}}(P_{conv}) = V_{IGBT}^{\text{cond}}(P_{conv}) I_t + R_{IGBT}^{\text{cond}}(P_{conv}) I_t^2 \quad (6a)$$

$$P_{IGBT,t}^{\text{comm}}(P_{conv}) = f_{IGBT}^{\text{comm}}(P_{conv}) I_t \quad (6b)$$

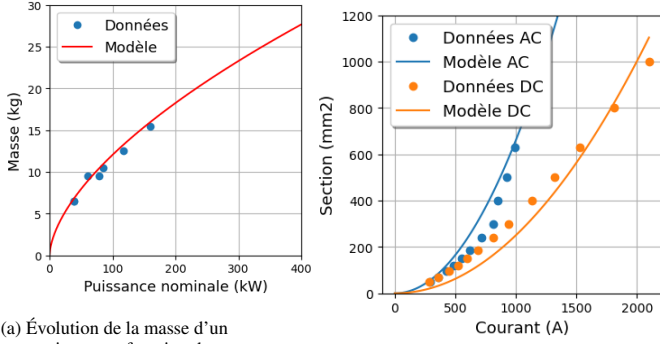
$$P_{diode,t}^{\text{cond}}(P_{conv}) = V_{diode}^{\text{cond}}(P_{conv}) I_t + R_{diode}^{\text{cond}}(P_{conv}) I_t^2 \quad (7a)$$

$$P_{diode,t}^{\text{comm}}(P_{conv}) = f_{diode}^{\text{comm}}(P_{conv}) I_t^{K_{I,diode}} \quad (7b)$$

où V_{IGBT}^{cond} , R_{IGBT}^{cond} , f_{IGBT}^{comm} , V_{diode}^{cond} , R_{diode}^{cond} et f_{diode}^{comm} sont des fonctions de la puissance nominale du convertisseur P_{conv} . Leur expression et la valeur de $K_{I,diode}$ se trouvent dans [15, Chap. 4, équations 4.5 à 4.8]. I_t représente le courant d'entrée et peut être calculé avec la puissance d'entrée P_t comme dans (8). On suppose que le côté AC du convertisseur est à $U_{AC} = 400 \text{ V}_{\text{RMS}}$, tandis que le côté DC est à $V_{DC} = 1000 \text{ V}$.

$$I_t = \begin{cases} \frac{P_t}{U_{AC}\sqrt{3}} & \text{if AC/DC} \\ \frac{P_t}{V_{DC}} & \text{if DC/AC} \end{cases} \quad (8)$$

Chaque convertisseur contient six IGBT et six diodes. Ainsi, le coût d'exploitation du convertisseur i pendant un an est donné



(a) Évolution de la masse d'un convertisseur en fonction de sa puissance nominale (basé sur les données de [9, Tab. 2]). (b) Évolution de la section de câble en fonction du courant maximal.

FIG. 5. Modèles des coûts d'installation des convertisseurs et des câbles.

par (9) :

$$C_{conv,yi}(P_{conv}) = \gamma \cdot 6\Delta T \sum_{t=0}^{1 \text{ an}} (P_{IGBT,t}^{cond} + P_{IGBT,t}^{comm} + P_{diode,t}^{cond} + P_{diode,t}^{comm}) \quad (9)$$

Notons que, pour simplifier la notation, la dépendance de $P_{IGBT,t}^{cond}$, $P_{IGBT,t}^{comm}$, $P_{diode,t}^{cond}$ et $P_{diode,t}^{comm}$ en P_{conv} et I_t est omise. γ est l'émission moyenne de CO₂ du réseau sur l'année 2019 en France : $\gamma = 34 \text{ gCO}_2^{\text{eq}}/\text{kWh}$.

3.2. Modélisation des lignes

3.2.1. Coût d'installation

Les impacts environnementaux de la fabrication des câbles ont été quantifiés à l'aide de la base de données EcoInvent [13] proposée pour les câbles de distribution basse tension de 1 kV. Selon cette base de données, 1040kg de câble émettent 5,188kgCO₂eq. Cet impact est linéarisé et en se basant sur la masse d'une ligne donnée, l'expression pour différentes masses de ligne est déterminée par (10) avec $K_{cable} = 5.188/1040 \text{ kgCO}_2^{\text{eq}}/\text{kg}$:

$$C_{line,0j}(P_{cable}) = K_{cable} N_{cable} \rho l S(P_{cable}) \quad (10)$$

où N_{cable} , ρ , l et S sont respectivement le nombre de câbles qui constituent la ligne, la densité, la longueur et la section transversale d'un câble qui dépend de sa puissance nominale P_{cable} . On suppose qu'il y a 2 câbles pour une ligne DC et 3 pour une ligne AC (le câble neutre n'est pas pris en compte dans ce travail car l'impact environnemental des onduleurs triphasés est mieux documenté). La figure 5b présente la section transversale et le courant des câbles DC et AC extraits de la fiche technique d'Eland Câbles [16]. Il montre que pour une section de câble donnée, les câbles à courant continu peuvent transporter un courant plus élevé que les câbles à courant alternatif. Le modèle $S(P_{cable})$ vérifie [17, eq. 2]. Les autres impacts environnementaux associés à la pose des câbles - travaux de construction, tranchées - ne sont pas pris en compte, car ils sont susceptibles d'être les mêmes pour une puissance ou une architecture donnée.

3.2.2. Coût d'exploitation

L'équation (11) définit le coût d'exploitation de la ligne j . Il correspond à l'effet Joule :

$$C_{line,yj}(P_{cable}) = \gamma N_{cable} \frac{l}{\sigma S(P_{cable})} \Delta T \sum_{t=0}^{1 \text{ an}} I_t^2 \quad (11)$$

avec σ la conductivité du cuivre.

TABLEAU 2. Les contraintes sur P_{conv} et P_{cable} pour chaque architecture

Architecture	P_{conv}	P_{cable}
AC	$P_{PV,max}$	$\max(P_{cons,max} + P_{VE,max}, P_{PV,max})$
DC	$\max(P_{cons,max} + P_{VE,max}, P_{PV,max})$	
AC/DC	$\max(wP_{cons,max} + P_{VE,max}, P_{PV,max})$	

4. DIMENSIONNEMENT OPTIMAL

Les trois architectures diffèrent par le nombre de convertisseurs (N_{conv}) ainsi que par les types, le nombre de lignes (N_{line}) et leur interconnexion (voir Fig. 1, 2 et 3). L'équation (12) illustre le calcul du coût total d'installation (12a) et du coût total d'exploitation (12b).

$$C_0(P_{conv}, P_{cable}) = \sum_{i=1}^{N_{conv}} C_{conv,0i} + \sum_{j=1}^{N_{line}} C_{line,0j} \quad (12a)$$

$$C_y(P_{conv}, P_{cable}) = \sum_{i=1}^{N_{conv}} C_{conv,yi} + \sum_{j=1}^{N_{line}} C_{line,yj} \quad (12b)$$

Notons que, pour simplifier la notation, la dépendance de $C_{conv,0i}$, $C_{line,0j}$, $C_{conv,yi}$ et $C_{line,yj}$ en P_{conv} et P_{cable} est omise.

Pour comparer les différentes architectures en termes d'impacts environnementaux, nous optimisons chaque architecture en minimisant son LCOE tel que défini dans (3).

Comme le nombre de convertisseurs diffère d'une architecture à l'autre ($N_{conv} = 3$ pour AC, $N_{conv} = 2$ pour DC et $N_{conv} = 1$ pour AC/DC) et pour faire la comparaison la plus juste, nous choisissons d'optimiser un convertisseur (jaune dans les Fig. 1, 2 et 3) pour chaque architecture. Pour l'architecture AC, nous étudions l'impact de l'onduleur PV, donc P_{conv} représente l'onduleur PV. La puissance nominale des 2 autres convertisseurs est choisie telle que juste suffisante pour fournir la consommation maximale (rappelons $P_{VE,max}$ pour VE et $wP_{cons,max}$ pour la consommation DC). En ce qui concerne l'architecture DC, nous choisissons le convertisseur situé à côté du transformateur. L'onduleur pour la consommation AC est choisi tel que juste suffisant pour fournir la consommation maximale $((1-w)P_{cons,max})$. Pour l'architecture AC/DC, l'onduleur central AC/DC est considéré. Pour toutes les architectures, nous supposons que tous les câbles ont la même puissance nominale P_{cable} .

Ainsi, il n'y a que deux variables de décision pour chaque architecture : P_{conv} et P_{cable} . Leur impact sur le LCOE est optimisé en résolvant (13).

$$\min_{P_{conv}, P_{cable}} \text{LCOE}(P_{conv}, P_{cable}) \quad (13)$$

$$\text{t.q.} \quad \begin{cases} P_{conv} \geq \underline{P_{conv}} \\ P_{cable} \geq \underline{P_{cable}} \end{cases}$$

avec $\underline{P_{conv}}$ et $\underline{P_{cable}}$ la puissance nominale minimale du convertisseur et des câbles, comme défini dans le Tab. 2 pour les différentes architectures. Il convient de noter que l'écrtage de la puissance photovoltaïque pourrait être envisagé [18] en choisissant $\underline{P_{conv}} < P_{PV,max}$ pour l'architecture AC, mais cet aspect n'est pas pris en compte dans cette étude.

La Fig. 6 montre les résultats du dimensionnement optimal du réseau BT en ce qui concerne la métrique LCOE. Le surdimensionnement des convertisseurs ne semble pas utile car l'optimum se situe à $P_{conv} = \underline{P_{conv}}$. Il existe un optimum en ce

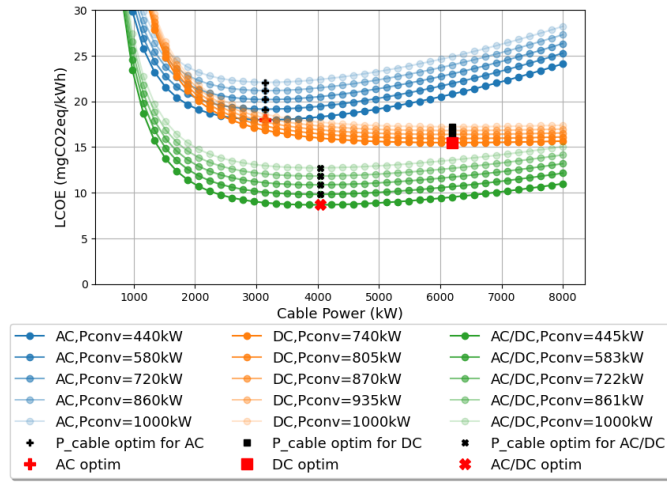


FIG. 6. Dimensionnement optimal des trois architectures.

TABLEAU 3. LCOE et paramètres optimaux pour chaque architecture

Architecture	LCOE (mgCO ₂ ^{eq} /kWh)	Paramètres optimaux (kW)
AC	17.97	$P_{conv} = 440, P_{cable} = 3140$
DC	15.47	$P_{conv} = 740, P_{cable} = 6200$
AC/DC	8.66	$P_{conv} = 445, P_{cable} = 4040$

qui concerne le paramètre P_{cable} bien que les dérivées autour de celui-ci soient très limitées. Compte tenu de ces observations, dans la section suivante, l'analyse est effectuée en fixant $P_{conv} = P_{conv}$ et P_{cable} est toujours une variable de décision.

Le Tab. 3 résume les résultats pour chaque architecture avec ses paramètres optimaux. Pour le scénario donné, l'architecture AC/DC devrait être utilisée pour minimiser l'impact environnemental sur la durée de vie choisie (20 ans) parce qu'elle a le LCOE le plus bas.

5. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Comme le scénario proposé ci-dessus peut différer de la réalité et que certains paramètres sont choisis arbitrairement, cette dernière section étudie la sensibilité de la méthode à deux paramètres : la longueur des câbles l et la fraction de consommation de courant continu w . Dans cette section, suite aux résultats obtenus à dans la section 4, P_{cable} est la seule variable de décision.

5.1. Longueur de câble

En conservant tous les autres paramètres constants, chaque architecture est optimisée comme dans (13) pour différentes longueurs de câble l . Ce paramètre reflète l'étendue géographique du réseau de distribution. Les résultats sont présentés dans la Fig. 7. Il existe une dépendance linéaire du LCOE par rapport à la longueur de câble l . Plus le câble est long, plus les LCOE sont élevés en raison de la résistance linéaire des câbles.

On constate que l'architecture DC est moins sensible que les architectures AC et AC/DC. Le coefficient de sensibilité plus élevé peut s'expliquer par le fait que les lignes AC nécessitent $N_{cable} = 3$ au lieu de 2.

Les résultats montrent qu'il existe un point d'équi-rentabilité environnemental pour lequel les réseaux DC et AC/DC ont le même LCOE. L'architecture AC/DC s'avère être le choix le plus approprié jusqu'à son seuil de rentabilité avec l'architecture DC, autour de 200 m. Au-delà de cette distance, l'architecture à courant continu devient plus favorable à l'environnement. L'architecture AC n'est pas une option favorable pour les longueurs de câble courtes ou longues, ce qui met en évidence les avantages

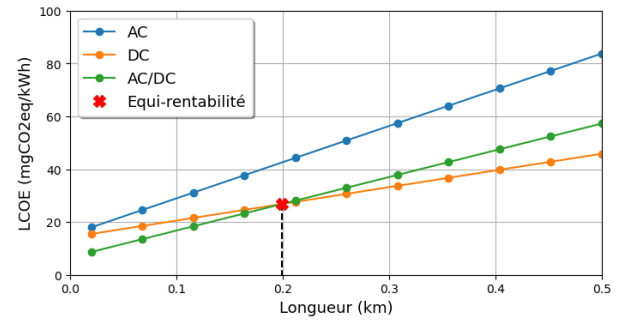


FIG. 7. Sensibilité du LCOE à la longueur des câbles.

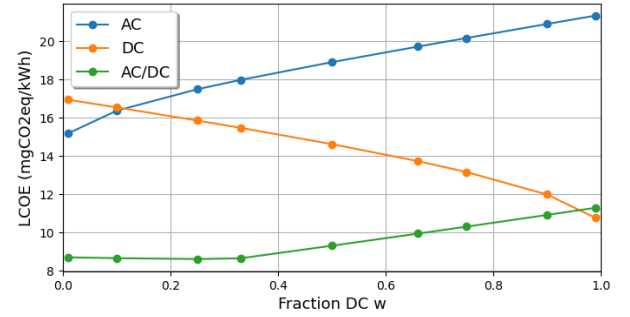


FIG. 8. Sensibilité du LCOE à la fraction DC.

de l'utilisation d'une nouvelle architecture de réseau.

5.2. Fraction DC de la consommation

Pour représenter le taux d'adoption des dispositifs à courant continu, la fraction de la consommation DC w est étudiée. En conservant tous les autres paramètres comme dans le Tab. 1, les résultats sont présentés dans la Fig. 8.

Pour un petit w , le LCOE de l'architecture AC/DC semble quasi-statique (il diminue même légèrement). Le seuil à partir duquel il devient croissant est $w_{thres} = 0.33$. On remarque que $w_{thres} P_{cons,max} + P_{EV,max} \approx P_{PV,max}$. Le même phénomène peut être observé pour différentes valeurs de $P_{PV,max}$. Lorsque la production PV est choisie pour fournir suffisamment de puissance à la partie DC du réseau, le convertisseur central n'est pas beaucoup utilisé. Par conséquent, le LCOE reste faible et n'est pas affecté par une faible variation de w .

Ensuite, le LCOE a tendance à augmenter avec la fraction de courant continu pour les architectures AC et AC/DC car les parties AC de ces réseaux deviennent moins importantes pour la distribution de l'énergie. Il diminue pour l'architecture DC, ce qui en fait l'architecture la plus intéressante pour une fraction DC élevée.

Les deux analyses de sensibilité précédentes – la longueur de

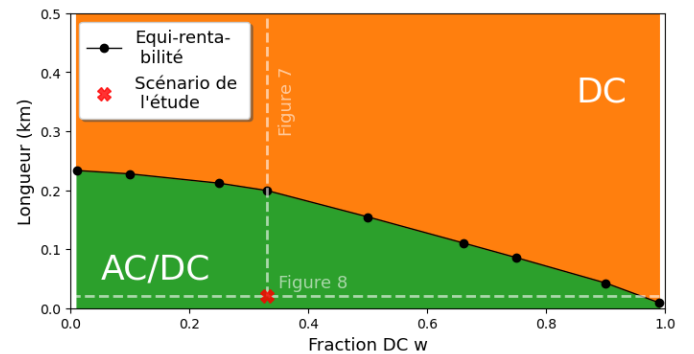


FIG. 9. L'architecture la plus pertinente en fonction de la proportion de consommation domestique DC w et de la longueur des câbles.

câble l (Fig. 7) et la fraction de courant continu w (Fig. 8) – sont répétées et résumées dans la figure 9. Pour chaque configuration, la couleur représente l'architecture qui minimise le LCOE. En fonction de la valeur de ces paramètres, le meilleur choix diffère. Un réseau mixte AC/DC est mieux adapté pour les courtes distances et les faibles fractions de courant continu. L'architecture DC est la meilleure pour une fraction de courant continu élevée et pour les longues distances. Ces résultats soulignent encore les avantages d'une modification du réseau BT actuel.

6. CONCLUSIONS

Cet article propose une analyse comparative des architectures AC, DC et AC/DC pour les réseaux de distribution BT, en se concentrant sur les coûts environnementaux d'installation et d'exploitation. L'impact environnemental est modélisé pour la fabrication des convertisseurs et des câbles. Une étude de cas simple est utilisée pour faciliter l'interprétation. Un LCOE défini en fonction des impacts sur l'environnement est utilisé pour comparer les architectures. En fonction de la longueur des lignes ou de la puissance nominale des agents, les architectures DC ou AC/DC peuvent minimiser l'impact environnemental du réseau. En revanche, le réseau BT traditionnel à courant alternatif semble sous-optimal en présence d'appareils à courant continu. Bien qu'il s'agisse d'un résultat préliminaire basé sur un problème simplifié, il souligne les avantages qu'il y a à reconsidérer la conception et l'architecture du réseau en tenant compte des impacts environnementaux.

Les travaux futurs comprennent l'analyse de la formulation du LCOE afin de généraliser les résultats de cet article à des architectures plus complexes et de compléter l'analyse de sensibilité. En outre, cette étude n'a pas pris en compte le vieillissement des composants. La prise en compte de leur durée de vie permettrait d'inclure les impacts du démantèlement et du remplacement de certains composants du réseau. Par ailleurs, les systèmes de protection ont été exclus du champ de l'étude à ce stade. Cependant, les composants et les schémas pour la protection sont fondamentalement différents entre un réseau à courant alternatif et un réseau à courant continu. Ces composants peuvent également impliquer des coûts environnementaux importants, en raison du recours à des gaz ou à des matériaux spécifiques. Leur prise en compte dans une future étude d'impact sur l'environnement devrait être envisagée.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence 22-PETA-0003.

8. RÉFÉRENCES

- [1] R. Dogga and M. K. Pathak, "Recent trends in solar PV inverter topologies," *Solar Energy*, vol. 183, pp. 57–73, May 2019, doi : 10.1016/j.solener.2019.02.065.
- [2] M. M. Bijaie, W. W. Weaver, and R. D. Robinett, "Energy Storage Requirements for Inverter-Based Microgrids Under Droop Control in d-q Coordinates," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 2, pp. 611–620, Jun. 2020, doi : 10.1109/TEC.2019.2959189.
- [3] Wang, P., Goel, L., Liu, X., and Choo, F. H. (2013). Harmonizing AC and DC : A hybrid AC/DC future grid solution. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(3), 76–83.
- [4] Charadi, S., Chaibi, Y., Redouane, A., Allouhi, A., El Hasnaoui, A., and Mahmoudi, H. (2021). Efficiency and energy-loss analysis for hybrid AC/DC distribution systems and microgrids : A review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(12), e13203.
- [5] F. Salomez *et al.*, "State of the Art of Research towards Sustainable Power Electronics", *Sustainability*, vol. 16, no 5, p. 2221, mars 2024, doi : 10.3390/su16052221.
- [6] Li Fang, Tugce Turkbay Romano, Thecle Alix, Jean-Christophe Crebier, Pierre Lefranc, Maud Rio, and Peggy Zwolinski, "Eco-design implementation in power electronics : a literature review", *International Symposium on Advances Technologies in Electrical Systems (SATES 23)*, 2023.
- [7] H. Canet, A. Guilloré, and C. L. Bottasso, "The eco-conscious wind turbine : design beyond purely economic metrics," *Wind Energ. Sci.*, vol. 8, no. 6, pp. 1029–1047, Jun. 2023, doi : 10.5194/wes-8-1029-2023.
- [8] B. Baudais, H. Ben Ahmed, G. Jodin, N. Degrenne and S. Lefebvre, "Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter", *Energies*, vol. 16, 2023.
- [9] A. Nordelöf, M. Alatalo, and M. L. Söderman, "A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I : design and composition," *Int J Life Cycle Assess.*, vol. 24, no. 1, pp. 78–92, Jan. 2019, doi : 10.1007/s11367-018-1503-3.
- [10] Open Data Réseau-Energies (ODRE), Available online : <https://opendata.reseaux-energies.fr/> (accessed 12 November 2024)
- [11] Renewables.ninja. Available online : <https://www.renewables.ninja/> (accessed on 12 November 2024)
- [12] S. Depoorter and P. Assimon, "Les véhicules électriques en perspective," *Commissariat Général au Développement Durable*, Puteaux, France, no 41, May. 2011.
- [13] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, "The ecoinvent database version 3 (part I) : overview and methodology," *Int J Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016, doi : 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [14] M. Caduff, M. A. J. Huijbregts, H.-J. Althaus, and A. J. Hendriks, "Power-Law Relationships for Estimating Mass, Fuel Consumption and Costs of Energy Conversion Equipments," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 2, pp. 751–754, Jan. 2011, doi : 10.1021/es103095k.
- [15] B. Baudais, "Écoconception en électronique de puissance. Impacts du dimensionnement, de la modularité et de la diagnosticabilité", Ph.D Thesis, ENS Rennes, Rennes, France, 2024.
- [16] Eland Cables, "Copper Conductor Single Core AWA PVC BASEC 0.6/1kV Cable", BS5467.
- [17] R. Benato, L. Colla, S. D. Sessa, and M. Marelli, "Review of high current rating insulated cable solutions," *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp. 36–41, Apr. 2016, doi : 10.1016/j.epsr.2015.12.005.
- [18] L. Micheli, M. Muller, M. Theristis, G. P. Smestad, F. Almonacid, and E. F. Fernández, "Quantifying the impact of inverter clipping on photovoltaic performance and soiling losses," *Renewable Energy*, vol. 225, p. 120317, May 2024, doi : 10.1016/j.renene.2024.120317.