

## **Système de transport d'énergie électrique en courant alternatif et en courant continu: Avantages, Inconvénients, Critères de choix**

### **[ Alternating current and direct current electrical energy transport system: Advantages, Disadvantages, Selection criteria ]**

**KADIATA MUTEBA Jean De Dieu<sup>1</sup> and KASONGO MONGA MUSWA Daniel<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ingénieur en techniques appliquées, option électrotechnique de l'ISTA, Kolwezi, Assistant à l'Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

<sup>2</sup>Ingénieur en techniques appliquées, option électrotechnique de l'ISTA, Kolwezi, Assistant à l'Institut Supérieur des Techniques Appliquées de Kolwezi, RD Congo

---

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** Electric energy is an essential factor in the economic development of a country. It is generally produced in power plants located at points more or less distant from consumption centers. To reach consumers, this energy must go through several stages including transport, allocation and distribution.

Formerly carried out almost exclusively with alternating current, the transport of electricity over long distances has increasingly been done with direct current over the last few decades.

Each mode of transporting electrical energy has certain advantages over others which militate in its favor when it comes to transporting electrical energy over long distances.

This article aims to analyze HVAC and HVDC systems from a technical, economic and environmental point of view in order to identify for each system its strengths as well as its weaknesses, and also to define the criteria on which we are based. basis for choosing one or another mode of energy transport, depending on the constraints imposed.

**KEYWORDS:** HVAC and HVDC systems, electrical energy transport, environmental impact, technical-economic impact, advantages, disadvantages, selection criteria.

**RESUME:** L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement économique d'un pays. Elle est généralement produite dans des centrales électriques situées en des points plus ou moins éloignés des centres de consommation. Pour parvenir aux consommateurs, cette énergie doit franchir plusieurs étapes dont le transport, la répartition et la distribution.

Jadis effectué presque exclusivement en courant alternatif, le transport de l'électricité sur des grandes distances se fait de plus en plus en courant continu au cours des dernières décennies.

Chaque mode de transport d'énergie électrique présente par rapport à d'autres certains avantages qui militent en sa faveur lorsqu'il s'agit d'acheminer de l'énergie électrique sur des grandes distances.

Cet article se propose comme objectifs l'analyse des systèmes HVAC et HVDC du point de vue technique, économique et environnemental afin de dégager pour chaque système ses points forts ainsi que ses faiblesses, et aussi définir les critères sur lesquels l'on se base pour faire le choix de l'un ou l'autre mode de transport d'énergie, en fonction des contraintes imposées.

**MOTS-CLEFS:** Systèmes HVAC et HVDC, transport d'énergie électrique, impact environnemental, impact technico-économique, avantages, inconvénients, critères de choix.

## 1 INTRODUCTION

Vers la fin des années 1880 aux Etats-Unis, à l'électrification naissante, il y eut bagarre entre Nicolas Tesla et Thomas Edison pour déterminer si le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique devait se faire en courant alternatif (AC) ou en courant continu (DC).

C'est à Thomas Alva Edison que sont dues les premières applications de l'énergie électrique en courant continu dans l'industrie et les usages domestiques.

Après la découverte du courant alternatif et du transformateur, Edison ne croyait pas en l'avenir du courant alternatif que lui proposait son collaborateur Nicolas Tesla dès lors que cette forme d'énergie n'a pas tardée à supplanter le courant continu dans la production, le transport, la distribution et les usages de l'électricité.

Ce fut l'émergence du courant alternatif comme technologie dominante dans le transport et la distribution de l'énergie électrique.

Ce choix du courant alternatif est basé sur trois considérations majeures:

- La possibilité de changer facilement le niveau de la tension en utilisant les transformateurs statiques,
- La plus grande facilité de couper le courant avec les disjoncteurs ou les interrupteurs,
- La facilité de production d'un champ électromagnétique tournant. D'où la mise au point des machines asynchrones et synchrones.

Et pourtant, au cours des deux dernières décennies, nous assistons de plus en plus à la recrudescence des lignes de transport d'énergie électrique en courant continu alors qu'au tout début de la production et du transport de l'énergie électrique, cette forme d'énergie fut rejetée au détriment du courant alternatif. Pourquoi ce revirement de situation ? Quelles sont les raisons qui font que les compagnies d'électricité font de plus en plus recours au courant continu pour effectuer le transport de l'électricité sur des grandes distances ? En quoi l'usage du courant continu est-il avantageux par rapport au courant alternatif ? Sur quels critères se base-t-on pour faire le choix entre les systèmes HTCA ? C'est en voulant répondre à toutes ces préoccupations que nous avons jugé opportun de faire une analyse objective entre ces deux modes de transport de l'énergie électrique afin d'en dégager pour chacun d'eux ses points forts ainsi que ses faiblesses.

## 2 CONSIDERATIONS TECHNIQUES

### 2.1 SYSTÈME HVAC

#### 2.1.1 DÉFINITION

Un système HVAC est un ensemble d'équipements électromagnétiques fonctionnant en courant alternatif triphasé à haute tension et destinés au transport de l'énergie électrique des centres de production vers les lieux de consommation.

HVAC est le sigle en français pour High voltage Alternating current

#### 2.1.2 CONSTITUTION

La structure générale d'un système HVAC est la suivante.

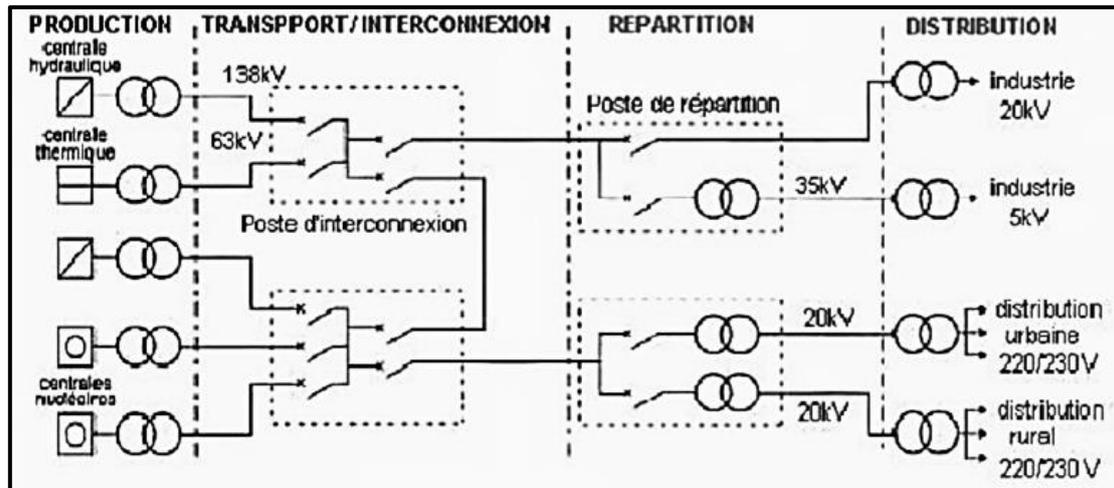
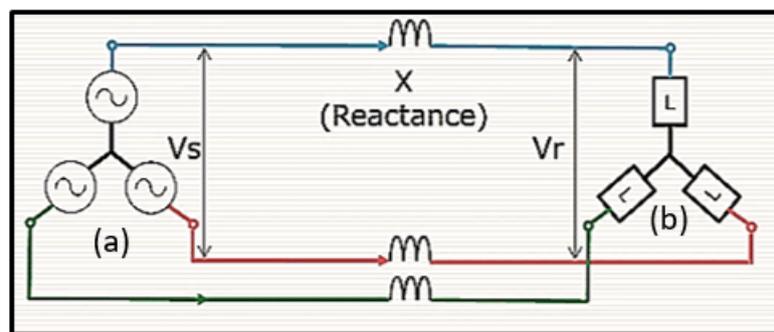


Fig. 1. Structure générale d'un Système HVAC

### 2.1.3 CHOIX DU MONOPHASÉ OU DU TRIPHASÉ DANS LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

De manière économique, le transport de l'énergie électrique se fait en triphasé plutôt qu'en monophasé pour des raisons ci-après:

- En triphasé, dans les mêmes conditions de transport (puissance, tension, pertes en lignes, facteur de puissance), on réalise une économie sur le volume de cuivre de 25% sur les lignes électriques;
- A puissances égales, les machines électriques monophasées sont plus volumineuses et coûtent plus chers que les machines électriques triphasées utilisées dans l'industrie.
- Facilité de production d'un champ électromagnétique tournant nécessaire au fonctionnement des machines asynchrones et synchrones.



(a) Station émettrice

(b) Station Réceptrice

Fig. 2. Modélisation d'une liaison à courant alternatif triphasé.

## 2.2 SYSTÈME HVDC

### 2.2.1 DÉFINITION

Un système HVDC est un ensemble d'équipements de l'électronique de puissance utilisé pour la transmission de l'énergie électrique en courant continu en haute tension.

L'appellation HVDC est l'abréviation pour High Voltage Direct Current.

Les systèmes HVDC représentent certainement le summum de l'électronique de puissance puisque les puissances unitaires se comptent couramment en Gigawatts.

2.2.2 CONSTITUTION

Un système HVDC comprend:

- Des stations de conversion, l’une émettrice et l’autre réceptrice.
- Des lignes de transmission de puissance;
- Des filtres harmoniques à courant alternatif et à courant continu;
- Des dispositifs de compensation des puissances réactives;
- Des équipements de contrôle, de commande, de protection, de supervision, etc.

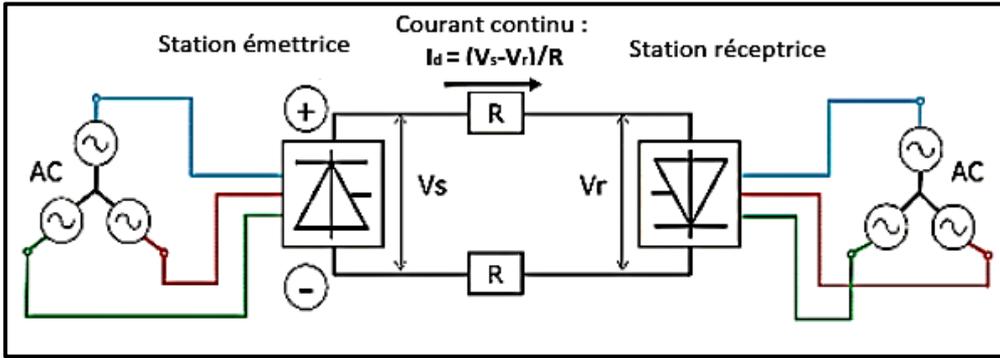


Fig. 3. Modélisation d’une liaison à courant continu.

On distingue deux grandes familles technologiques des convertisseurs dans les liaisons HVDC [17]:

- L’une fonctionnant en source de courant, utilisant des thyristors, appelé « Convertisseurs Commutés par la Ligne ». (LCC)
- L’autre fonctionnant en source de tension, utilisant des IGBT et appelés « Convertisseur Source de Tension ». (VSC)

2.2.3 PRINCIPAUX TYPES DES LIAISONS DE TRANSPORT EN COURANT CONTINU

Le transport de l’énergie électrique en courant continu est effectué par différents types de liaison à courant continu[6].

LIAISON CCHT MONOPOLAIRE

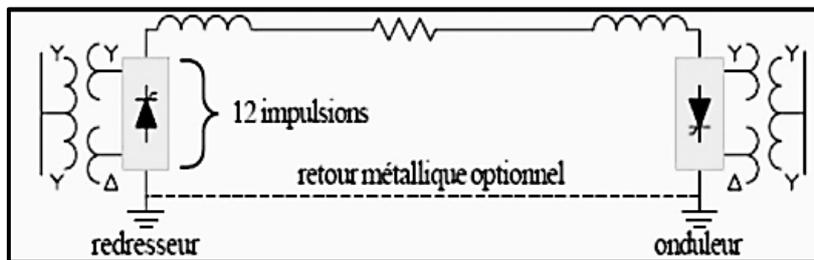


Fig. 4. Liaison HVDC monopolaire

LIAISON CCHT BIPOLAIRE

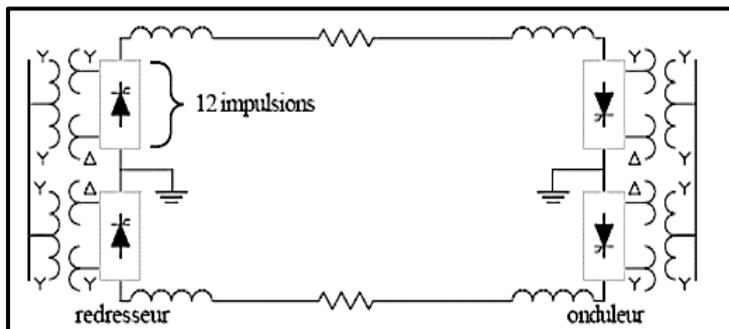


Fig. 5. Liaison HVDC bipolaire

LIAISON HVDC HOMOPOLAIRE

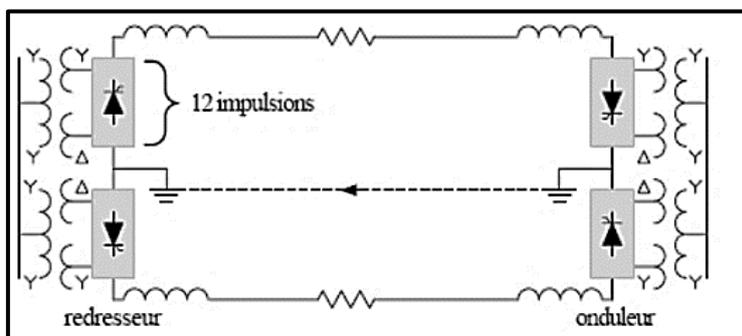


Fig. 6. Liaison HVDC homopolaire

LIAISON HVDC MULTI TERMINAUX (MTDC)

Une liaison MTDC est un ensemble constitué de plusieurs terminaux HVDC connectés entre eux suivant une certaine topologie. Grâce à cette avancée, il est admis que des systèmes multi terminaux (MTDC) seront plus aisés à mettre en place.

La figure ci-dessous montre un exemple de liaison MTDC

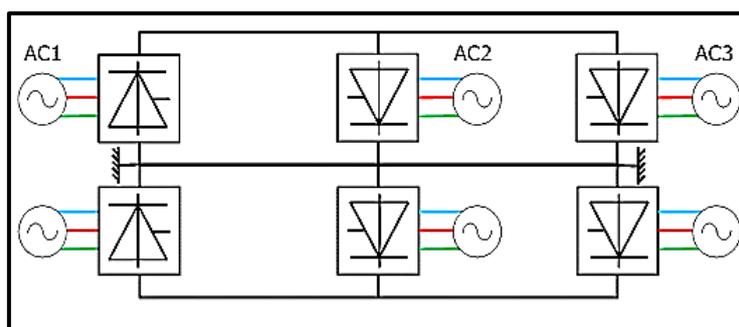


Fig. 7. Liaison HVDC multi terminal (MTDC)

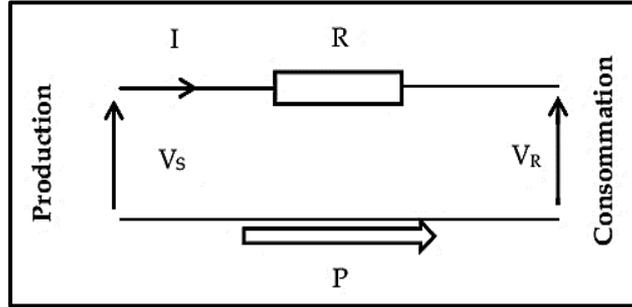
2.3 NÉCESSITÉ DE LA HAUTE TENSION DANS LA TRANSMISSION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

L'un des problèmes rencontrés lors du transport de l'énergie électrique est celui des pertes en lignes.

Considérons le cas d'une ligne électrique devant transporter une puissance électrique  $P$  exprimée en watts (W) sous une tension  $U$  exprimée en volts (V).

**2.3.1 SYSTÈME DE TENSION CONTINUE**

Le transport se fait par une ligne électrique bipolaire dont chaque pôle présente une résistance R



*Fig. 8. Modélisation d'une ligne à courant continu*

a) Courant en ligne:

$$I = (V_s - V_r) / R$$

b) Puissance maximale transmise

On démontre que la puissance maximale transmise s'exprime par la relation:

$$P_{\text{cmax}} = V_s^2 / 4 R \tag{1}$$

c) Puissance dissipée

Les pertes en lignes sont exprimées par:

$$p = \rho \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{P^2}{U^2} \tag{2}$$

d) Chute de tension

Elle est définie par:

$$u = R \cdot I = \rho \cdot \frac{1}{s} \cdot I = \rho \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{P}{U} \tag{3}$$

Pour une puissance et distance données, les pertes et la chute de tension en ligne sont réduites à tension croissante. D'où l'intérêt d'utiliser des très hautes tensions pour le transport de l'énergie électrique.

**2.3.2 SYSTÈME DE TENSION TRIPHASÉE**

Le transport s'effectue par une ligne électrique triphasée à 3 fils de résistance R chacun.

I est le courant de ligne; U: la tension entre fils de phase; P: Puissance transmise

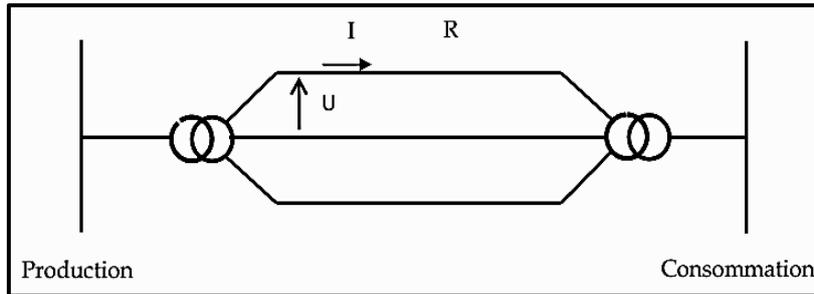


Fig. 9. Modélisation d'un système de transport triphasé

a) Courant en ligne:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

b) Puissance dissipée

Les pertes en lignes sont exprimées par:

$$p = \rho \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (4)$$

c) Chute de tension

En valeur approchée, la chute de tension composée vaut:

$$U = \sqrt{3} (R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi) \quad (5)$$

Avec:  $P = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos \varphi$ : Puissance active en watts et  $Q = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \sin \varphi$ : Puissance réactive en vars

Ce qui donne pour les chutes de tension:

$$U = \sqrt{3} \left( R \cdot \frac{P}{U} + X \cdot \frac{Q}{U} \right) \quad (6)$$

En courant alternatif, l'emploi de la haute tension permet de réduire considérablement les pertes en ligne et il faut aussi que le facteur de puissance soit meilleur (proche de l'unité). De plus à cause du transit des puissances active et réactive dans les fils de ligne, la chute de tension en ligne accuse des valeurs très élevées par rapport au courant continu.

## 2.4 PRODUCTION DE LA HAUTE TENSION

### 2.4.1 EN COURANT ALTERNATIF

Dans les centrales électriques, la production de l'énergie électrique se fait en moyenne tension sous forme alternative par des alternateurs. Deux types d'alternateurs sont utilisés: les hydro alternateurs et les turboalternateurs.

Au départ des centrales électriques, pour avoir la haute tension nécessaire au transport de l'énergie électrique sur des grandes distances, le moyen le plus simple est d'utiliser des transformateurs statiques montés en élévateur de tension. A la consommation, l'usage des transformateurs permet d'avoir facilement plusieurs niveaux de tensions.

### 2.4.2 EN COURANT CONTINU

En courant continu, la production de l'énergie électrique se faisait jadis au moyen des génératrices à courant continu qui sont des machines moins puissantes et moins robustes que les alternateurs à cause de la présence du collecteur qui constitue leur point faible.

Pour avoir la haute tension avec ces machines, l'opération est très compliquée puisqu'il faudra grouper en série un grand nombre de génératrices pour avoir une très grande puissance. Cette technique fut utilisée sur les premières liaisons à courant continu.

Actuellement, avec l'évolution technologique, surtout dans le domaine de l'électronique de puissance, la production du courant continu nécessite le redressement des ondes de courant alternatif et le changement de tension ne peut se concevoir qu'au moyen des dispositifs complexes souvent très coûteux constitués d'une association de transformateurs et de convertisseurs statiques.

**2.5 NÉCESSITÉ D'UNE INTERCONNEXION DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES**

L'interconnexion est la mise en commun des divers moyens de production de l'énergie électrique. Le réseau d'interconnexion permet d'améliorer la disponibilité de l'énergie au meilleur coût.

Lors de l'interconnexion de deux réseaux électriques de taille et de puissance importante par une liaison triphasée, les conditions d'établissement de cette liaison triphasée sont les suivantes:

- Même tension
- Même fréquence
- Un déphasage très limité entre les réseaux au niveau de la liaison.

Dans le cadre d'une liaison à courant continu, l'entraide entre réseaux peut se faire à tout instant sans conditions de tension, de fréquence et de déphasage[17].

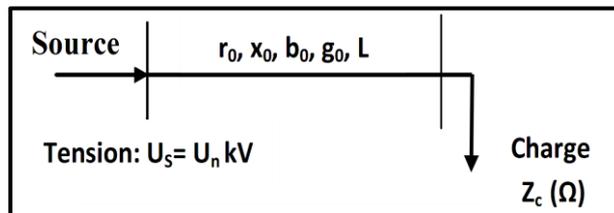
**2.6 COMPARAISON DU TRANSIT DE PUISSANCE DANS LES LIGNES HVAC ET HVDC**

**2.6.1 LIGNES AÉRIENNES**

**a) En courant alternatif[4]**

Considérons le cas d'une ligne électrique aérienne en cuivre de longueur L km devant transporter une puissance P MW sous une tension  $U_s=U_n$ .

Cette ligne présente les caractéristiques linéiques suivantes:



*Fig. 10. Ligne HVAC unifilaire*

- Résistance linéique:  $r_0$  ( $\Omega$ /km)
- Réactance linéique:  $x_0$  ( $\Omega$ /km)
- Susceptance linéique:  $b_0$  ( $\Omega^{-1}$ /km)
- Conductance linéique:  $g_0$  ( $\Omega^{-1}$ /km)
- Longueur de la ligne: L en km

**VARIATION DE LA PUISSANCE MAXIMALE TRANSMISSIBLE**

Toute association générateurs/récepteur présente une limite de puissance transmissible de l'un vers l'autre. Tout réseau électrique, dès lors qu'il est globalement équilibré, peut être ramenée à une telle association et est tributaire d'une grandeur importante appelée puissance maximale transmissible donnée par la relation suivante:

$$P_{max} = \frac{U_s^2}{X} \text{ (MW) avec } X = x_0 \cdot L \text{ (}\Omega\text{)} \tag{7}$$

$x_0$  est la réactance linéique de la ligne en  $\Omega/\text{km}$ .

L: la distance de transport en km.

Elle est directement proportionnelle au carré de la tension en ligne et inversement proportionnelle à la réactance de la ligne (la résistance R étant négligeable devant la réactance X) [1].

Pour une ligne travaillant sur une tension  $U_n$ , lorsqu'on augmente la distance de transport, on constate que la capacité maximale de transit de la ligne diminue.

La puissance transmise par la ligne peut aussi s'exprimer par la relation suivante:

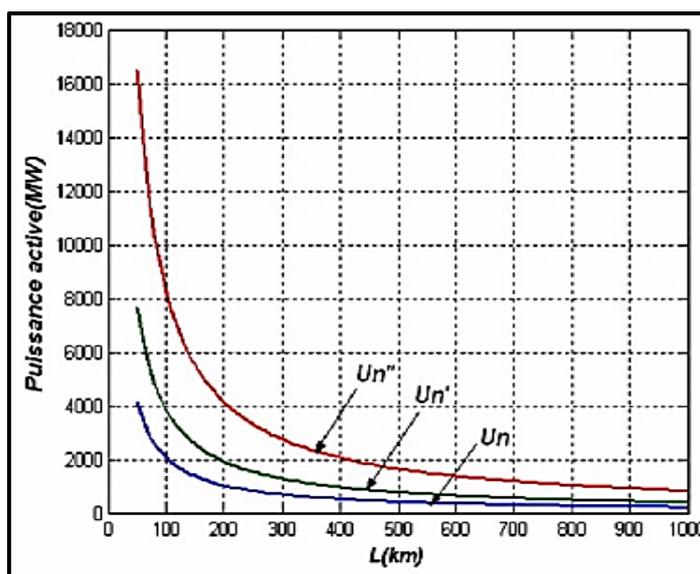
$$P = K \frac{U_s^2}{L} \tag{8}$$

C'est une fonction hyperbolique pour une tension constante.

Dans cette relation,  $U_s$  est la tension au départ de la ligne égale à la tension nominale  $U_n$  et L, est la longueur de la ligne. K est un facteur déterminé par la qualité de l'énergie électrique, par la nature du conducteur utilisé et par ses dimensions.

Pour une puissance donnée et un niveau de tension bien défini, la puissance transmise par la ligne diminue lorsque la longueur de la ligne augmente. Pour une puissance et une distance données, lorsqu'il y a croissance de la tension, la puissance transmissible augmente, mais on est limité dans cette voie par des problèmes d'isolement des matériels et des équipements du réseau électrique.

Cette situation se traduit par les courbes données ci-dessous pour différents niveaux de la tension



**Fig. 11. Allures de la puissance en ligne en fonction de la distance de transit et du niveau de la tension de ligne.**

**VARIATION DE LA PUISSANCE RÉACTIVE EN FONCTION DE LA LONGUEUR**

La puissance réactive le long de la ligne pour une tension de  $0,9U_n$  diminue beaucoup que pour la tension  $U_n$  tandis que pour une tension de  $1,1U_n$ , elle s'accroît au fur et à mesure que la longueur de la ligne augmente. L'exploitation peut être augmentée en longueur jusqu'à 450 km pour une tension de  $1,1U_n$ .

L'écart de tension entre l'origine et l'extrémité diminue considérablement avec l'augmentation de la tension. Cette observation s'inverse pour la puissance active. Mais on a une capacité de transport plus importante.

En ce qui concerne la distribution de la puissance réactive le long de la ligne, elle dépend essentiellement de la capacitance et du niveau de tension dont elle est soumise.

On peut observer aussi que le sens d'éroulement de la puissance réactive le long de la ligne

Les courbes de la figure 14 montrent les variations de la puissance réactive le long d'une ligne à haute tension pour différents niveaux de la tension de transport.

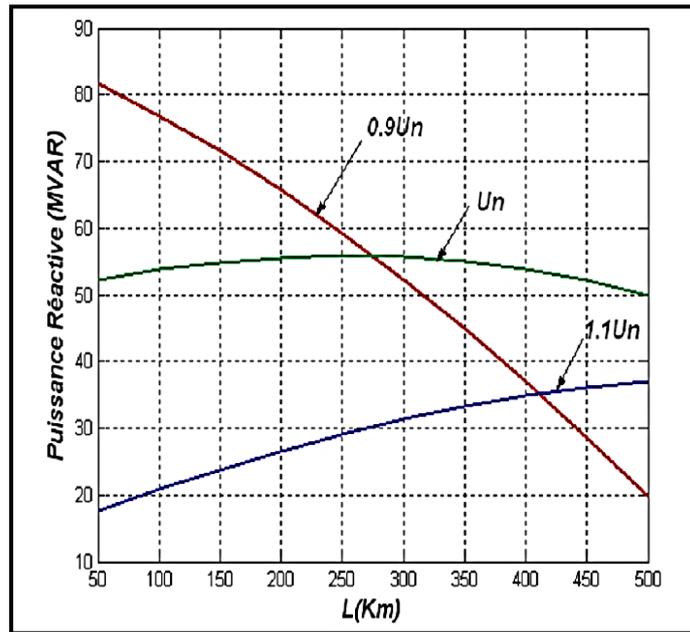


Fig. 12. Variations de la puissance réactive le long de la ligne pour différentes tensions.

L'usage du courant alternatif en transport se limite à des distances inférieures ou égales à 250km pour une ligne établie pour une tension  $U_n=220kV$ . Au-delà de cette distance, on enregistre de fortes chutes de tension provoquées par le transit de la puissance réactive et aussi à un effondrement de la puissance transmise par la ligne. Pour augmenter la distance de transport pour une tension donnée, il faudra compenser l'énergie réactive dans la ligne. C'est un moyen très coûteux.

**b) En courant continu**

En courant continu la capacité de transmission n'est limitée que par l'échauffement des fils de la ligne électrique. La puissance dissipée en chaleur dans la ligne est exprimée par la relation ci-dessous.

$$p = \frac{(V_s - V_R)^2}{R} \tag{9}$$

Avec  $V_s$  et  $V_R$  respectivement tension au départ et en bout de ligne,  $R$  résistance équivalente de la ligne.

La figure ci-dessous donne les variations de la capacité de transmission en fonction de la distance de transport en alternatif et en continu.

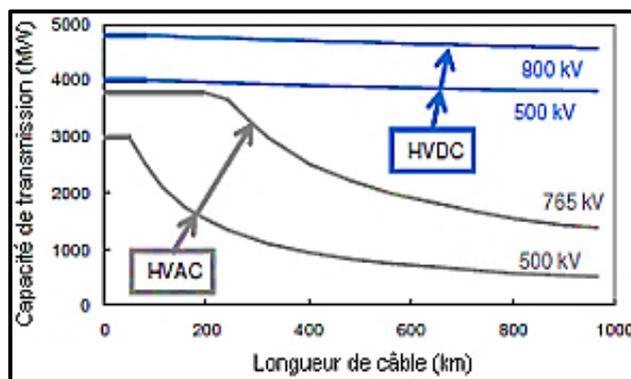


Fig. 13. Capacité de transmission des lignes aériennes AC et DC en fonction de la distance

En courant alternatif, sur des grandes distances de transport, on assiste à un effondrement de la puissance transmise et une limite de distance de transmission située aux alentours de 250km.

Pour augmenter cette distance on est obligé de monter en tension.

### 2.6.2 LIAISON HVAC PAR CÂBLE

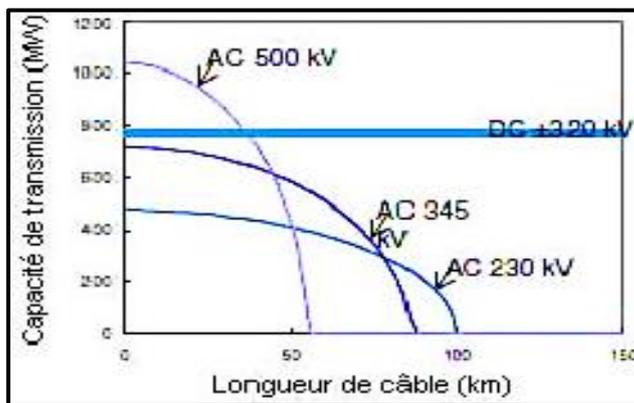
#### a) En courant alternatif

Le transport du courant alternatif par câble présente des limites en termes de montées de tension et de capacité de transmission de courant. Lors de transmissions souterraines (généralement limité en haute tension, pour des raisons de coût et de temps de réparation) le transit de réactif est encore plus important pour le dimensionnement suite à la valeur bien plus élevée de la capacité et une valeur plus faible de l'inductance longitudinale, ce qui abaisse sensiblement l'impédance caractéristique (à environ 50 à 100Ω au lieu d'environ 300Ω pour une ligne aérienne), Pour des raisons thermiques, le transit est d'habitude limité à 30% de la puissance naturelle, ce qui nécessite une forte compensation inductive et limite donc rapidement le longueur de la transmission.

Pour exemple, un câble 3×450 mm<sup>2</sup>, utilisé à 380 kV et ayant une capacité thermique de 600 A (capacité linéique environ 0,2 mF/km, inductance linéique environ 0,5 mH/km) dépasse sa limite thermique au-delà de 40 km ( $I_{th} = \omega \cdot C \cdot V \cdot L = 600A$ ) et ne peut donc transiter aucune puissance utile. A cette distance le câble se comporte comme un circuit bouchon empêchant le courant de passer.

L'observation de la figure 16 montre que le transport de l'énergie électrique par câble souterrain ou sous-marin, pour une ligne à 500kV ayant une capacité de transit de 1000MW, la distance limite de transit se situe aux environs de 50km, tandis que pour une ligne de 400MW fonctionnant sous une tension de 230kV, la distance limite est d'environ 100km.

A 345kV et avec une capacité de transit de 700MW environ, la distance limite est d'à peu près 80km. En courant alternatif, l'accroissement de la distance de transport rend l'exploitation de la ligne pratiquement impossible au-delà de 100km à cause de la diminution de la puissance active et de l'accroissement du transit de puissance réactive dans la ligne occasionnant une forte chute de la tension. C'est pourquoi, l'augmentation de la distance de transit ne peut se concevoir que par l'utilisation des installations de compensation de l'énergie réactive constituées par des inductances suffisamment calibrées.



**Fig. 14. Capacité de transmission des câbles souterrains ou Sous-marins AC et DC en fonction de la distance**

Une liaison HVAC par câbles fournit de la puissance réactive quel que soit la puissance apparente de la charge tandis qu'une liaison HVAC par lignes aériennes fournit à vide de la puissance réactive et consomme en pleine charge de la puissance réactive. La puissance réactive consommée par les lignes aériennes ou les câbles en fonction de la puissance apparente consommée par la charge (Sch) est donnée par la figure suivante pour une ligne de 225kV pour une ligne de 10km.

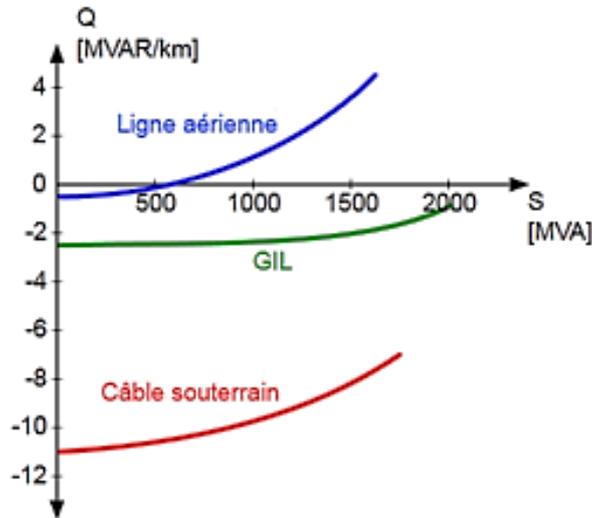


Fig. 15. Sens et variations de la puissance réactive en fonction de la puissance apparente transitant dans les lignes ou les câbles souterrains ou sous-marins.

## b) En courant continu

Lorsqu'il s'agit de transporter l'énergie électrique sur des très grandes distances, on a recouru au courant continu car l'usage du continu permet de s'affranchir du transit de l'énergie réactive et s'avère être plus économique car le gain réalisé sur le coût désignés et des installations de compensation de puissance réactive dépasse le coût des stations de conversions placées aux extrémités des lignes.

Le transport de l'énergie électrique par câble souterrain ou sous-marin ne présente pas une limite de transmission mais on est limité en puissance que par l'échauffement de la ligne.

## 2.7 LA PROBLÉMATIQUE DE LA COUPURE DU COURANT ÉLECTRIQUE

L'interruption du courant électrique en moyenne ou en haute tension s'accompagne généralement de la création d'un arc électrique qu'il faudra éteindre le plus rapidement possible pour éviter la détérioration de l'équipement par la chaleur dégagée (plusieurs milliers de degrés Celsius).

### EN COURANT ALTERNATIF

Le cas le plus facile d'interruption du courant électrique est celui du courant alternatif dans un circuit ohmique. Le courant alternatif s'interrompt plus difficilement dans un circuit inductif ou capacitif que dans un circuit résistif puisque le courant et la tension sont déphasés. En outre, ces difficultés sont accrues lorsqu'il s'agit d'interrompre un court-circuit: l'intensité du courant à couper est alors très élevée et de plus, en alternatif, un courant de court-circuit est toujours fortement déphasé en arrière en raison de la réactance des machines et des lignes.

### EN COURANT CONTINU

L'interruption d'un courant continu est plus difficile à réaliser parce qu'il faudra couper un grand courant sous une tension constante  $U$  de grande valeur.

### CONCLUSIONS

Dans le domaine de la haute tension et au stade actuel de l'évolution technologique, un courant électrique est beaucoup plus difficile à couper lorsqu'il s'agit d'un courant continu que d'un courant alternatif. C'est pourquoi les appareillages de coupure à courant continu sont très complexes et coûtent plus chers que ceux utilisés en courant alternatif.

### **3 CONSIDERATIONS ECONOMIQUES**

#### **3.1 PERTES EN LIGNE**

L'électricité transportée sur le réseau implique des pertes dont l'origine est de plusieurs natures.

Nous avons: les pertes par effet joule; par effet couronne ainsi que les pertes shunt, de fuite et par induction (hystérésis magnétique et diélectrique, courants de Foucault) et par effet Kelvin).

##### **a) Pertes par effet joule**

Elles constituent la composante principale des pertes de transport (environ 80 % des pertes globales).ces pertes sont causées par le courant qui circule dans les transformateurs et lignes et la résistance des éléments.Tous les éléments du réseau opposent une résistance au transport de la charge.

##### **b) Pertes par effet couronne**

La deuxième source en importance (à peu près 8% des pertes globales) est constituée des pertes par effet couronne. Les pertes par effet couronne sont plus importantes en alternatif qu'en continu.

##### **c) Pertes par défaut d'isolement**

Les pertes de fuite sont le résultat de courants à la surface des isolateurs et dans les gaines isolantes des lignes souterraines. Ces courants sont de faible amplitude, à peu un millième du courant nominale, mais touchent tous les isolateurs présents dans les lignes de transport, ce qui génère une certaine quantité de pertes.

A niveau d'isolement identique une ligne à courant continu présente les mêmes pertes qu'une ligne à courant alternatif.

##### **d) Pertes par induction (hystérésis et courants de Foucault)**

Les pertes par induction électromagnétique résultent de l'induction de courant dans des circuits parallèles fermés comme les fils de garde non isolés à leur point de support. Elles sont donc fonction du courant de charge circulant dans la ligne. Ces pertes sont inexistantes en courant continu.

##### **e) Pertes par effet de peau ou Kelvin.**

Ces pertes se manifestent uniquement en courant alternatif. En effet lorsque la section de la ligne est très grande, il se produit un effet d'auto-induction à l'intérieur du conducteur: les lignes de courant sont rejetées vers la surface externe.La partie centrale ne participant que peu ou pas du tout à la conduction, un conducteur cylindrique massif conduit le courant comme le ferait un tube d'épaisseur  $e$ ; la section utile est plus petite que la section géométrique: la résistance en alternatif est plus grande qu'en continu et par conséquent provoque une perte d'énergie supplémentaire par effet joule.

##### **f) Les pertes shunt**

Les pertes shunt proviennent des appareils branchés à la terre dont les appareils de compensation, de soutien, de mesurage, de protection.

**CONCLUSION:** Les pertes en ligne sont réduites en courant continu. La réduction des pertes est en particulier liée au fait que la résistance en courant continu est plus faible qu'en alternatif (absence de l'effet de peau) mais surtout au fait que seule la puissance active est transportée en courant continu. Les pertes dues au transport de la puissance réactive n'existent pas en courant continu, le courant est donc seulement limité par les capacités thermiques des conducteurs. Avec le courant continu à haute tension, il y a des pertes supplémentaires dans les stations de conversion.

3.2 COÛT DES SYSTÈMES DE TRANSMISSION

Dans le transport de l'énergie électrique sur des grandes distances par des lignes électriques aériennes, on constate dans le cas général, que le coût des constructions des lignes aériennes en courant alternatif, pour une même puissance transportée et une même isolation, est plus élevé que dans le cas du courant continu. Cette situation est due d'une part au fait que pour la même tension nominale de la ligne  $U_n$ , le niveau d'isolement est plus faible en courant continu qu'en courant alternatif, et d'autre part la puissance transportée, à pertes spécifiques égales, est moitié en courant alternatif de celle transportée en courant continu. En plus les câbles utilisés en alternatif sont plus complexes que ceux utilisés en continu et par conséquent, coûtent plus chers.

En comparant une ligne triphasée simple avec une ligne bipolaire présentant la même résistance ohmique par phase, on constate que, pour une même puissance transitée et une même valeur crête de la tension de phase, les pertes de puissance sur la ligne à courant alternatif sont de 33% plus grande que celles en courant continu.

$$\Delta P_{CA} = 1,33 \cdot \Delta P_{CC} \tag{10}$$

Et dans l'hypothèse où les sections des conducteurs, les puissances transportées, les pertes joules dans les deux systèmes sont égales, il en résulte que la ligne à courant continu est plus économique que celle à courant alternatif car elle présente deux fils conducteurs au lieu de trois; En outre son niveau d'isolement est de 87% de celui de la ligne à courant alternatif.

En dehors de toute considération technique, le choix économique d'utiliser ou pas du courant continu pour une liaison de grande longueur est lié en particulier à l'équilibre entre trois paramètres:

- Le coût supplémentaire des stations de conversion;
- Les pertes de ces stations de conversion;
- Les pertes en ligne

Il en résulte donc une longueur de la ligne au-delà de laquelle un projet à courant continu est rentable. On estime en général cette longueur à 500 ou 600km environ.

La figure ci-dessous donne les coûts de réalisation des systèmes continu et alternatif en fonction de la distance.

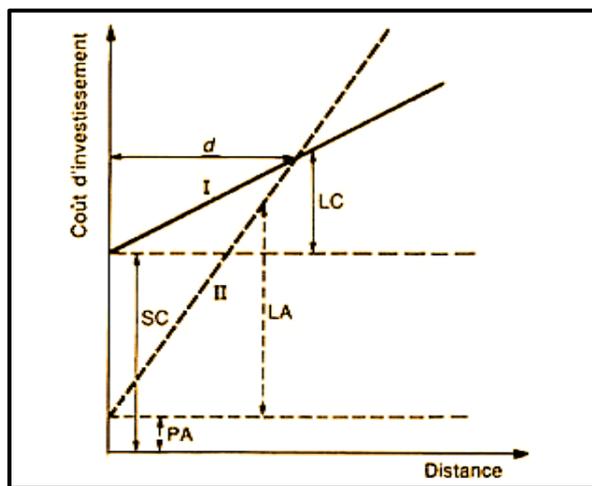


Fig. 16. Coût d'investissement des systèmes HVAC et HVDC en fonction de la distance

--- Ligne à courant alternatif

— Ligne à courant continu

d: distance critique à partir de laquelle le choix entre le système HVAC et HVDC est indifférent, elle va de 500 à 600km environ.

SC: coût des stations de conversion,

PA: coût des stations terminales AC,

LA: coût des lignes AC,

LC: coût des lignes DC

#### **4 CONSIDERATIONS ENVIRONNEMENTALES**

Les lignes à haute tension parcourues par des courants alternatifs émettent dans l'espace des ondes électromagnétiques à basse fréquence (ondes non ionisantes) qui peuvent avoir des effets néfastes sur l'organisme humain ou animal (cancer, leucémie, troubles neurologiques, etc.) en fonction de leurs intensités.

Les CEM ont une influence sur le vivant, car l'être vivant (bio électromagnétique) peut être considéré globalement comme un ensemble de processus électriques qui entrent en interaction avec ses mécanismes biochimiques.

Depuis plusieurs années face à l'évidence des conclusions des études il n'y a plus aucun doute que les champs électromagnétiques proches des THT sont nocifs pour la santé humaine.

Le tableau ci-dessous donne pour quelques lignes à haute tension, les valeurs des champs électriques et magnétiques émis en fonction de la distance et de la position par rapport à la ligne électrique.

L'effet couronne dans ces manifestations, présente des effets chimiques et contribue à la naissance de certains espèces chimiques, dérivés de l'air ambiant, tels que les oxydes d'azote (NO, NO<sub>2</sub>), des radicaux (HO et HO<sub>2</sub>) ainsi que de l'ozone O<sub>3</sub> qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières.

L'effet couronne produit des effets électromagnétiques qui se traduisent par des perturbations radiophoniques et émettent dans l'espace environnant les lignes électriques un bruissement caractéristique très gênant en cas de mauvais temps (pluies, brouillards, neiges...).

Les lignes à haute tension continue ou alternative transmettent généralement des grandes puissances. Pour une même capacité de transit et un même niveau de tension, on démontre que le couloir de transmission d'une ligne à courant alternatif est plus grand que celui d'une ligne courant continu et présente, en fonction de ses dimensions, un grand impact sur la destruction de l'écosystème forestier (abattage et élagage d'arbres, défrichage, érosion, sécheresse, etc.).

Pour exemple, le transport d'une puissance de 2GW avec des lignes de 400 à 500kV AC ou DC, nécessite un couloir de transmission d'environ 100m en alternatif et de 50 m en courant continu. Si la distance de transport est de 2000km, cela représente à peu près une superficie occupée par la ligne d'environ 200km<sup>2</sup> en AC et de 100km<sup>2</sup> en DC, Sans compter les surfaces occupées par les postes de transformations et les stations de conversion dans le cas du courant continu.

#### **5 AVANTAGES, INCONVENIENTS ET CRITERES DE CHOIX**

L'emploi de la haute tension alternative (HVAC) en transport s'avère plus rentable pour des distances inférieures ou égales à 250km. Au-delà de cette distance, il faudra recourir à la technologie Haute tension courant continu (HVDC) dont l'intérêt réside dans la réduction des pertes d'électricité lors du transport par rapport aux technologies AC conventionnelles. En outre, elle nécessite moins de lignes de transport, ce qui signifie que le terrain occupé est moins important. La conversion du courant alternatif en courant continu ne peut être réalisée qu'à l'aide d'équipements spéciaux. Le HVDC n'est donc rentable que sur de longues distances, généralement supérieures à 600 ou 800 km pour les lignes aériennes et à 50 km pour les câbles souterrains ou sous-marins.

Le HVDC peut également être utilisé pour raccorder différents réseaux en courant alternatif et améliorer leur efficacité individuelle.

En courant continu, il y'a :

- Une meilleure utilisation de la section conductrice des câbles,
- Meilleure utilisation de l'isolant: le gradient de potentiel peut être plus élevé en continu tandis que, d'autre part, la « tension crête », typique du transport en alternatif, laisse place à la « tension nominale » qui autorise une tension plus élevée pour des caractéristiques d'isolement identiques;

Il ressort de ce qui précède que la puissance transportée par un ouvrage HVDC sera plus élevée, à caractéristiques techniques plus ou moins comparables (notamment au niveau de la section conductrice et de l'épaisseur de l'isolant), que pour une liaison à courant alternatif.

Considérons à présent, deux autres avantages mis en évidence par les experts:

- La stabilité de la ligne ne pose pas de problèmes en courant continu. Cette caractéristique est importante pour les grandes lignes où les problèmes de stabilité, en courant alternatif, peuvent conduire à réduire sensiblement la charge des liaisons, ou engendrer des dysfonctionnements;
- Les liaisons HVDC sont « bipolaires » et ne nécessitent donc que deux câbles là où le courant alternatif en impose trois, ce qui aboutit à des économies importantes au niveau du poste « câbles et accessoires ».

Le transport de l'énergie électrique en courant continu présente certains avantages par rapport au transfert à courant alternatif:

- La commande de la puissance peut se faire beaucoup plus rapidement. En moins d'une seconde, on peut inverser le sens d'écoulement des puissances de plusieurs centaines de Mégawatts.

La rapidité des systèmes de commande permet aussi de limiter les courants de court-circuit à des valeurs inférieures à celles rencontrées sur un réseau à courant alternatif. Cette réponse rapide permet d'utiliser une ligne à courant continu pour alimenter et stabiliser un réseau à courant alternatif.

Le réseau à courant continu peut permettre la modulation de la puissance à courant continu pour amortir les oscillations lorsque le réseau à courant alternatif est sur le point de devenir instable.

- On peut transporter le courant continu sur de grandes distances en utilisant des câbles souterrains ce qu'on ne peut pas se faire en courant alternatif à cause de la capacité des câbles.
- Un système à courant alternatif ne peut relier deux réseaux que s'ils fonctionnent à la même fréquence. De plus l'échange de puissance est imposé par la réactance de la ligne et le déphasage des tensions entre les deux extrémités.

## 6 CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article les différentes technologies utilisées dans le transport de l'énergie électrique sur des grandes distances, en dégageant pour chaque système ses avantages et ses inconvénients ainsi que les critères sur lesquels on se base pour faire le choix entre le système HVAC ou HVDC.

La transmission de l'énergie électrique peut se faire en courant alternatif ou en courant continu au moyen des lignes électriques aériennes ou souterraines ou sous-marines. Il ressort de cette analyse que pour bien effectuer cette étude, il faut considérer deux systèmes transportant dans les mêmes conditions, la même puissance, sous la même tension et sur une même distance.

Les résultats obtenus au cours de cette étude montrent que le Courant alternatif à haute tension est plus facile à produire que le courant continu, cela nécessite l'utilisation des alternateurs associés à des transformateurs statiques.

La production du courant continu ne peut s'obtenir de manière économique que par transformation des ondes de tensions alternatives. Ce qui montre que les deux systèmes de tensions sont loin de se séparer l'un de l'autre. Leur utilisation systématique dépendra des conditions imposées par les systèmes de transport d'énergie.

L'emploi du courant alternatif en transport se justifie, économiquement et techniquement, pour des courtes distances, environ 250km.

Pour acheminer de l'électricité sur des très grandes distances supérieures à 500km, il est nécessaire d'accroître la tension: 750kV et plus. On est limité dans cette voie par des problèmes d'isolement et de coût des matériels et équipements.

L'usage du courant continu est rentable pour des distances de transit supérieur à 500 ou 600 km.

## REFERENCES

- [1] THEODORE WILDI, Electrotechnique, 2ème édition, presses de l'université de Laval, 1993.
- [2] MICHEL AUGET ET JEAN JACQUES MORF, Energie électrique, Presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1987.
- [3] J.C. MAUCLERC, Y. AUBERT, A. DOMENECH, Guide du technicien en électrotechnique, Hachette technique, 2003.
- [4] BOUMILEK RADIA, Effet du phénomène de bifurcation du transport HVAC-HVDC sur la qualité de l'énergie électrique transmise, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de magistère en réseaux électriques, université Annaba, 2007.
- [5] PASCAL MONJEAN, Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques des centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées des liaisons en continu. Thèse soutenue en vue de l'obtention du grade de docteur en génie électrique délivré par l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, 2012.
- [6] MIDA DRIS, Transport d'énergie en courant continu (HVDC). Cours de 2<sup>e</sup> Master Réseaux électriques, Université d'El Oued, 2007-2008.
- [7] LUC LASNE, Electrotechnique: les réseaux électriques, Dunod, 2008.
- [8] TOMASZ DROBIK, High-voltage direct current transmission lines, IEEE Conference Publishing, ul. Pulaskiego 32/13, 46-100 Namyslow, Poland.
- [9] LEON CHETTY, N. IJUMBA, Rural electrification using overhead HVDC transmission lines, HVDC Centre, University of KwaZulu-Natal, South Africa.
- [10] General Overview of HVDC Transmission System.
- [11] EDGAR GILON, Electrotechnique, Université catholique de Louvain, 1978.
- [12] FABRICE D'EUSTACHIO, « Les enjeux des systèmes HVDC dans les réseaux de transport d'électricité », mémoire, eicnam, 2013-2014.
- [13] G. DE ROSENBAUM, Transport d'énergie électrique à très grande distance et en très grande quantité en utilisant le courant alternatif: Considérations sur l'interconnexion Inga-Shaba, Académie royale des Sciences d'Outre-Mer, Bruxelles, 1973.
- [14] DRAGAN JOVCIC, A comparison of inverter current control and rectifier control for HVDC systems.