



**Calcul ligne HVDC 525KV enfouie**  
**Comparaison avec une liaison aérienne AC**  
**Décembre , 2021**

**Jacques Antille**  
**Chemin des Pruniers 9 /1967 Bramois**  
**E-mail:jacques.antille@bluewin.ch**  
**Mobile: 079 205 27 51**



# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

---

## Contenu

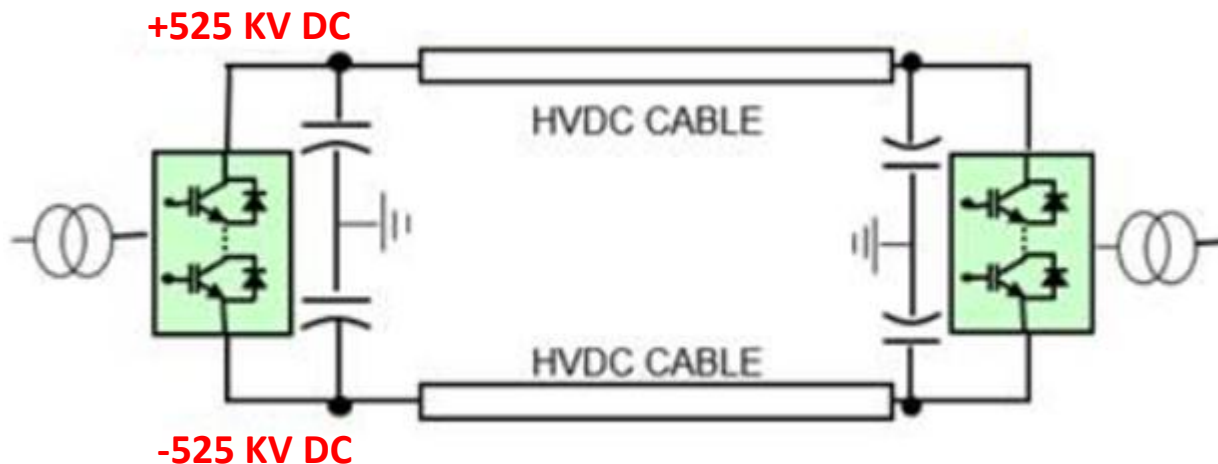
1. Câble HVDC (courant continu haute tension) 525KV
2. Modèle thermique
3. Courant max (Ampacity) et puissance transmise
4. Induction magnétique
5. Estimation des pertes électriques
6. Estimation des coûts et comparaison
7. Avantages solution DC
8. Conclusions

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 1 . Câble HVDC (525KV)

### Configuration

- Symmetrical monopole (2 HVDC câbles, conducteur en cuivre de 3000 mm<sup>2</sup> )
- Tension  $U = \pm 525$  KV
- Puissance transmise :  $P = 2 U I_{\max}$
- $I_{\max}$  = courant maximum



# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 1 . Câble HVDC (525KV)



## Constitution d'un câble HVDC (3000 mm<sup>2</sup>)

- 1 conducteur en cuivre (diamètre 66 mm)
- 2 écran semi-conducteur : 2 mm épaisseur
- 3 isolant en XLPE : 26 mm épaisseur
- 4 écran semi-conducteur : 1.5 mm d'épaisseur
- 5 matelas / rubans : 1mm d'épaisseur
- 6 écran métallique (ruban alu) : 1.2 mm d'épaisseur
- ...
- 10 gaine extérieure : 5 mm d'épaisseur

La température ne doit pas excéder **70°C** dans le conducteur

Diamètre du câble 14.0 cm

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

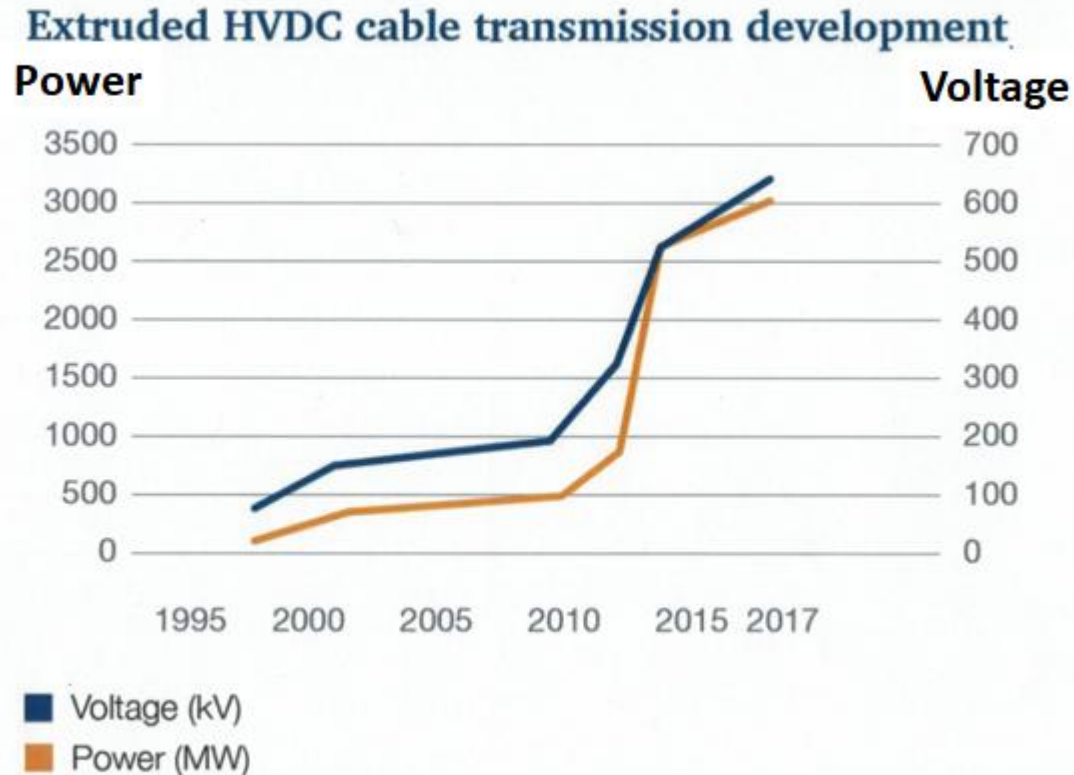
## 1 . Câble HVDC (525KV)

### Propriété du câble HVDC (525KV)

Matériau	Conductivité thermique W/(m°K)	Commentaire
Copper, pure	401 (273°K)	$\lambda_{\text{anda}} = \lambda_{\text{anda}} (T)$
écran XLPE semi-conducteur	0.4	constant
isolant en XLPE	0.28571	constant
écran XLPE semi-conducteur	0.4	constant
Matelas/rubans	0.167	constant
écran métallique ruban aluminium	236 (273°K)	$\lambda_{\text{anda}} = \lambda_{\text{anda}} (T)$
gaine extérieure	0.28571	constant
air	2	constant
pipe en PEHD	entre .35 et .25	$\lambda_{\text{anda}} = -0.0013 * T + 0.4026$

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 1 . Câble HVDC (525KV)

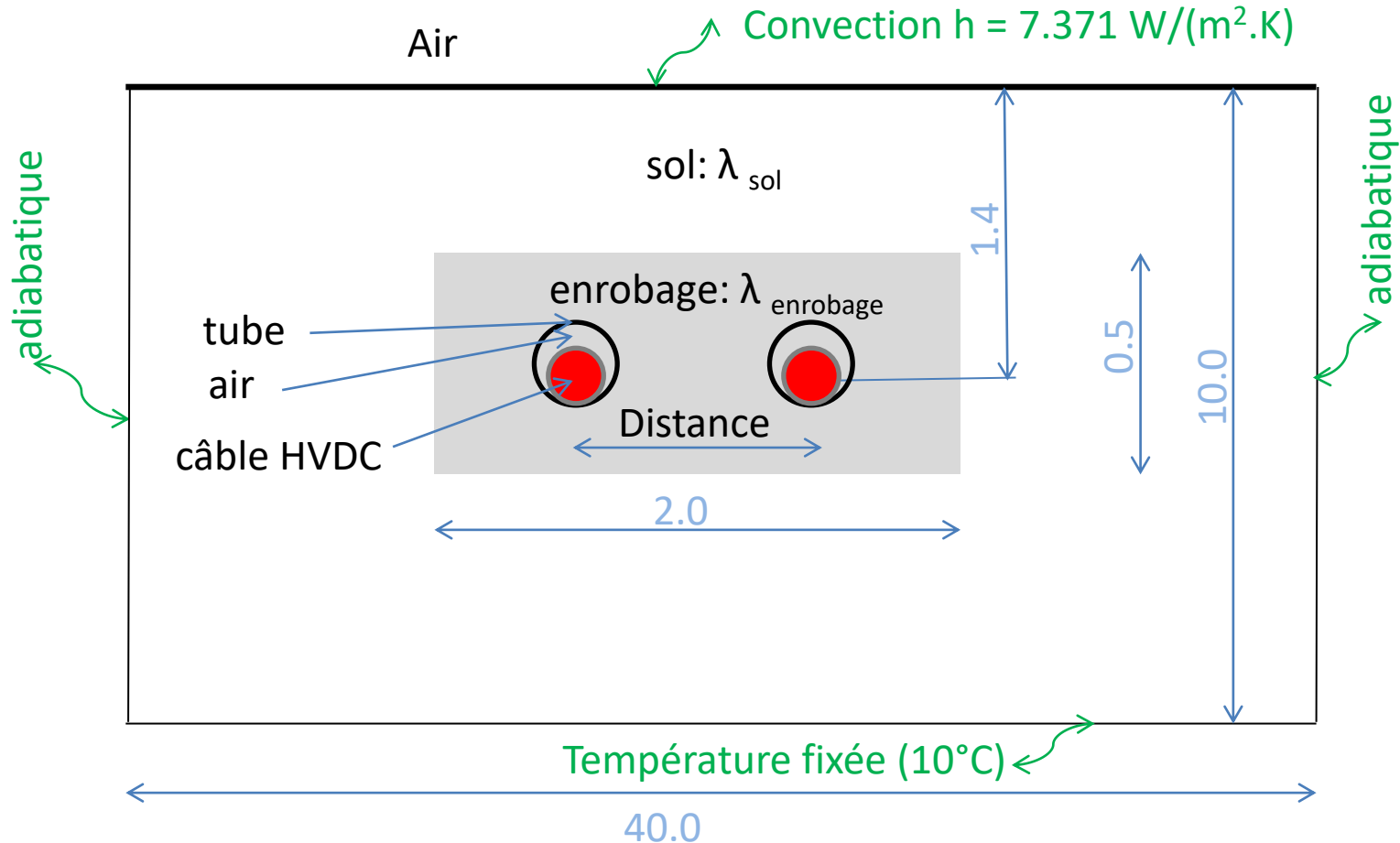


Source NKT

**Des câbles HVDC de 640KV existent sur le marché !  
La section peut être supérieure à 3000 mm<sup>2</sup>**

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 2 . Modèle thermique



Unité : mètre

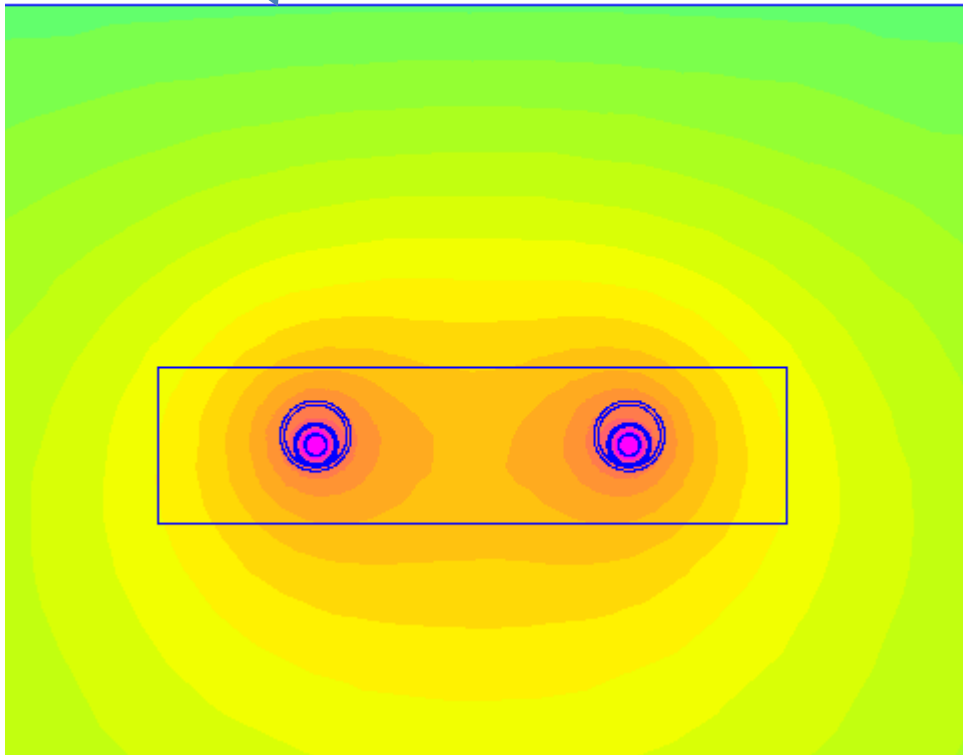
# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 2 . Modèle thermique

**Exemple de distribution de la température, courant = 2040 A /câble**

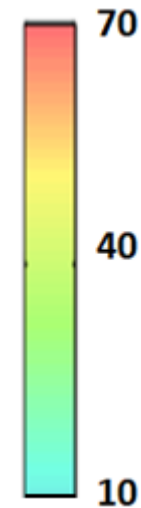
**Distance entre conducteur 1000 mm ,  $\lambda_{\text{enrobage}} = \lambda_{\text{sol}}$**

Interface sol - air



**Distribution température :**

**$T_{\text{max}} = 70^\circ$**



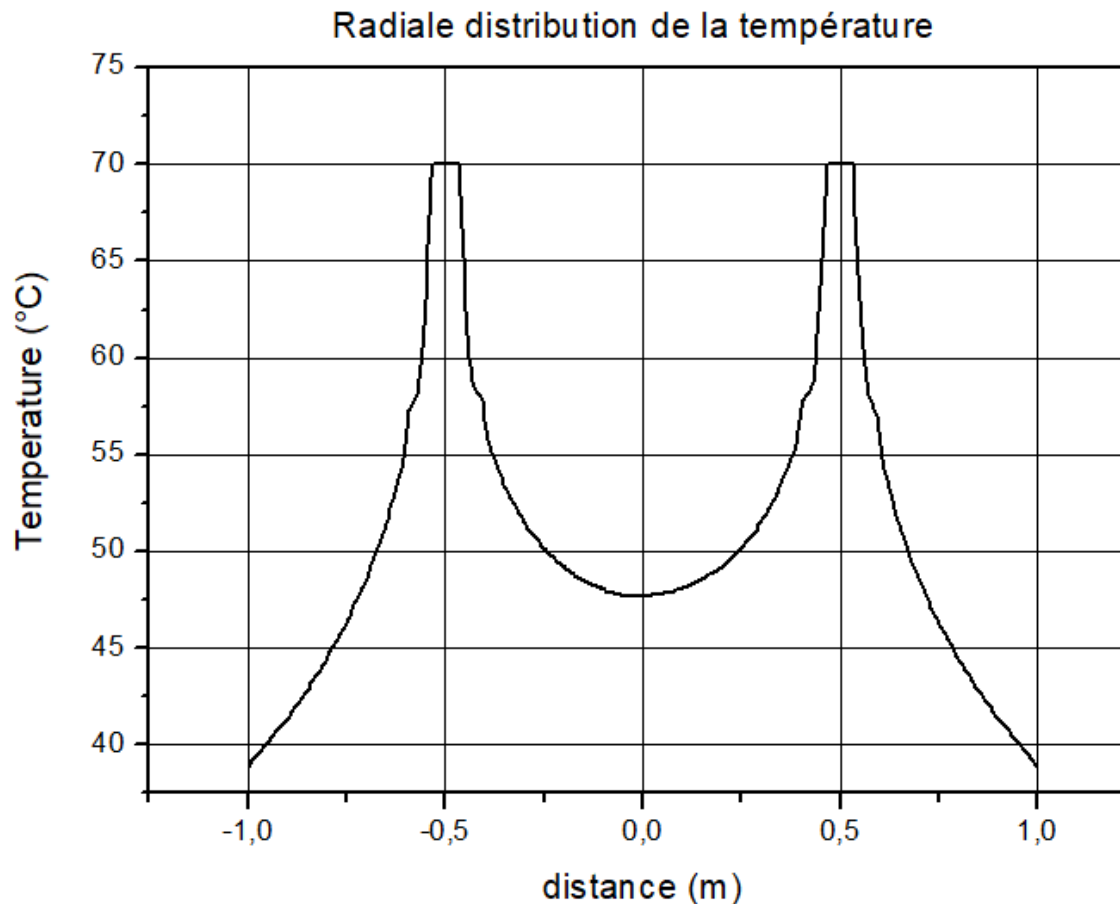


# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 2 . Modèle thermique

**Distribution radiale de la température, courant = 2040 A /câble**

**Distance entre conducteur 1000 mm ,  $\lambda_{\text{enrobage}} = \lambda_{\text{sol}}$**

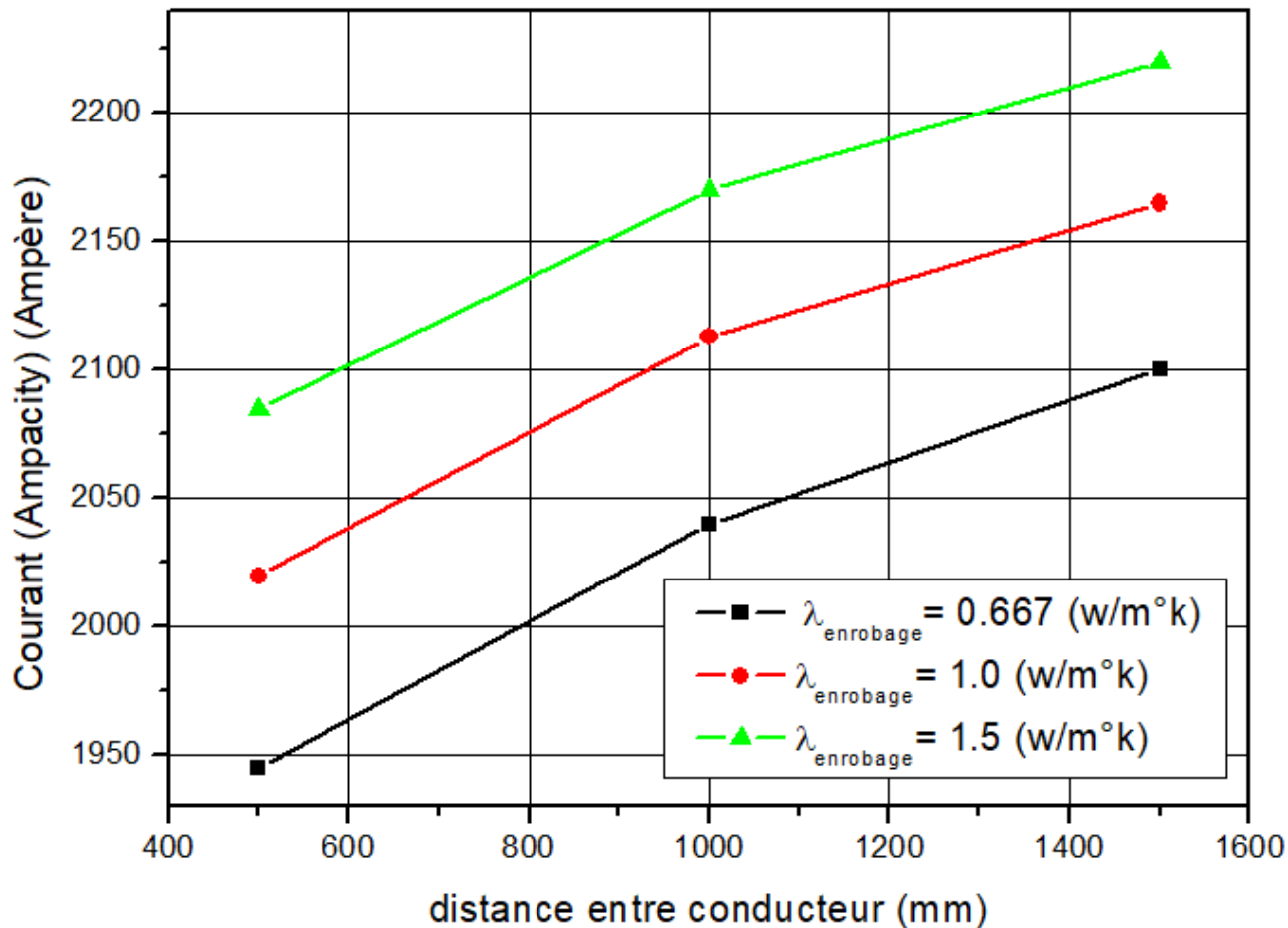


# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 3 . Courant max (Ampacity) et puissance transmise

### Calcul du courant maximum (Ampacity )

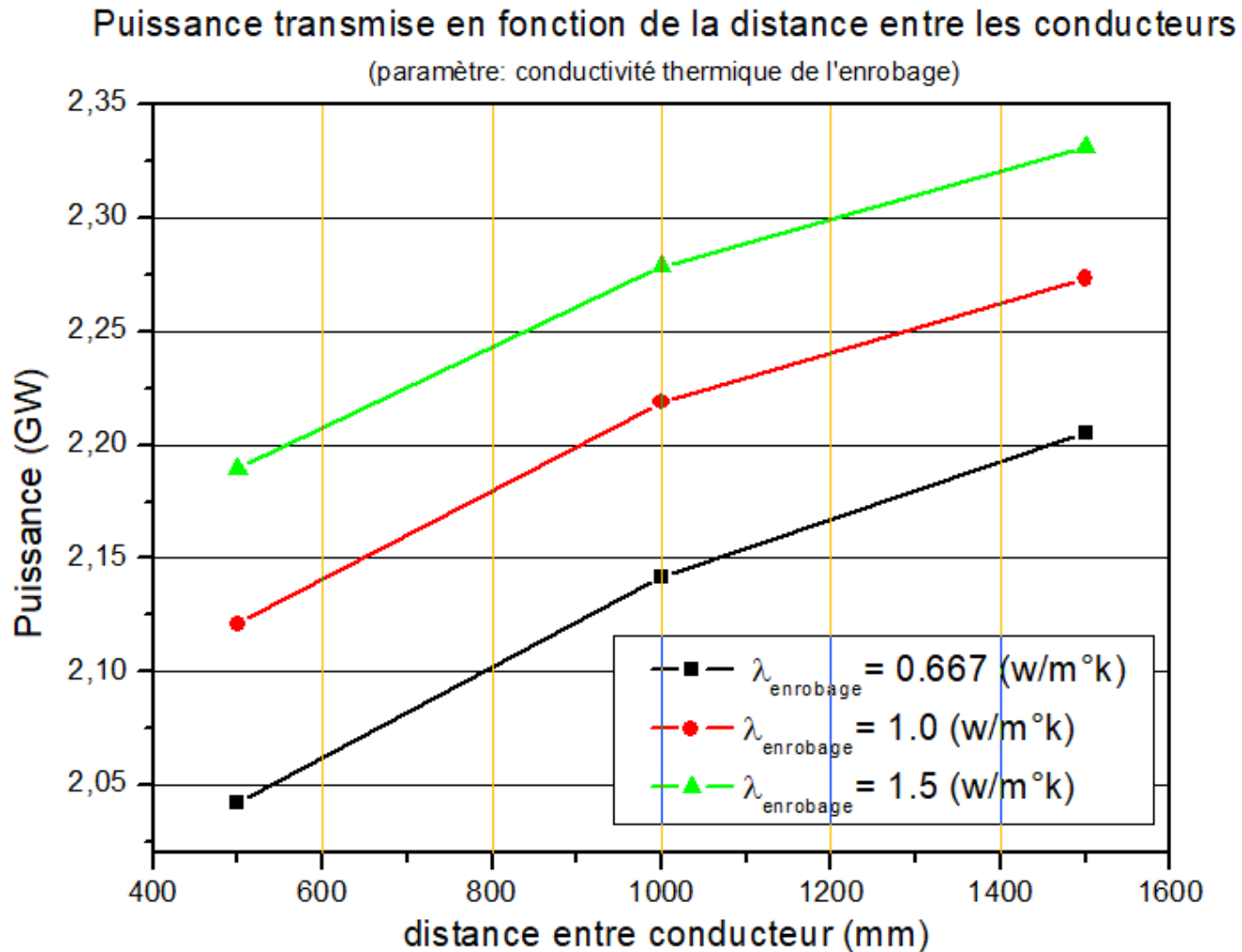
Câble ampacité en fonction de la distance entre les conducteurs  
(paramètre: conductivité thermique de l'enrobage)



# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 3 . Courant max (Ampacity) et puissance transmise

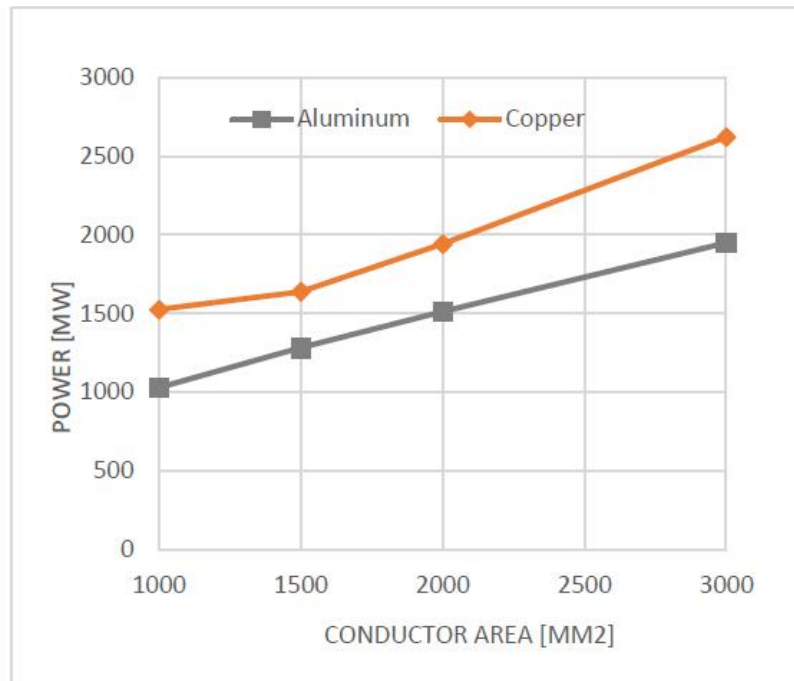
### Puissance transmise en GW



# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 3 . Courant max (Ampacity) et puissance transmise

Figure 7 shows the transmitted power as a function of conductor area for both copper and aluminium as the conductor material. It is possible to transmit up to 2.6 GW through one pair of cables with the 3000 mm<sup>2</sup> copper conductor. Compared with the 320 kV level the transferred power given as MW/kgm (power per kilogram of one meter cable) is about doubled for a land cable circuit and 1.5x for a submarine circuit for a transmitted power of 1.5 GW (Figure 8).



Source ABB

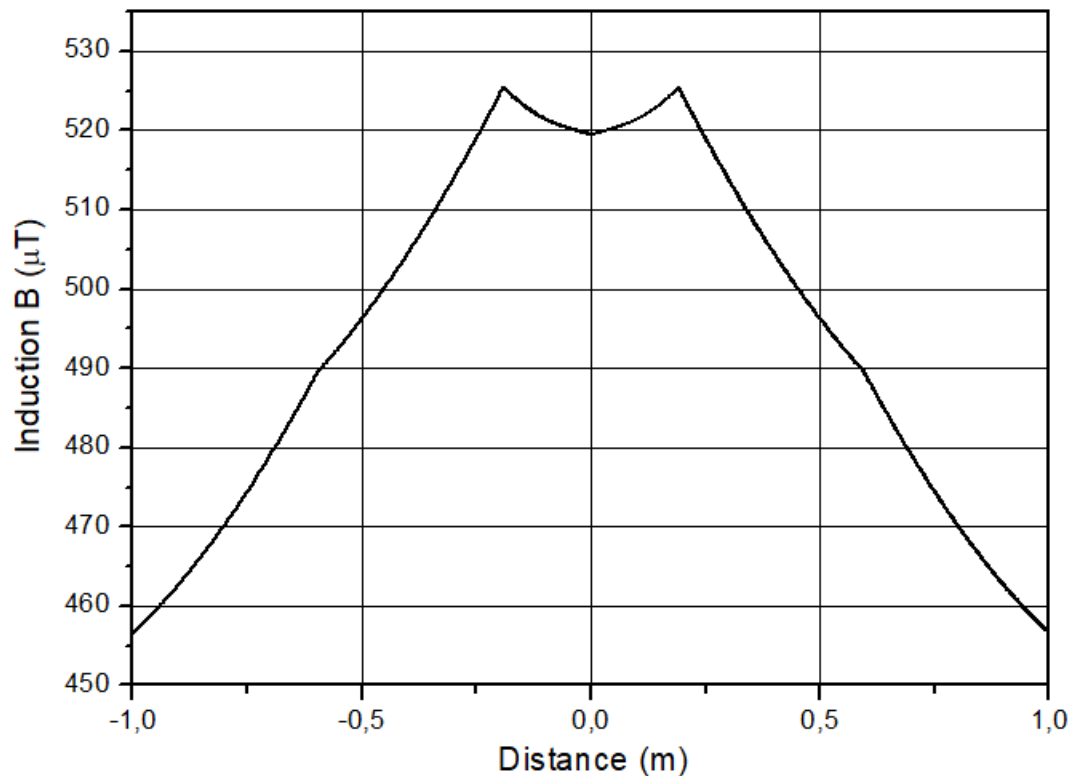
Figure 7. Transmitted power as a function of conductor area and metal for a cable pair. The Copper (3000 mm<sup>2</sup>) and Aluminium (2000 mm<sup>2</sup>) 525 kV cables are shown to the right.

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 4 . Induction magnétique

### Induction magnétique au niveau du sol

Distance entre conducteur 1000 mm,  $I=2040$  A



**Ce champ magnétique continu est inoffensif pour l'homme**

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 5 . Estimation des pertes électriques

### Hypothèses

**A. Ligne aérienne, 2 x 380 KV , I<sub>max</sub>= 2230 A / phase**

**B. Ligne souterraine, câble HVDC 525 KV**

- **Puissance transmise identique**
- **distance 27 km (Chamoson-Chippis)**
- **prix de l'énergie électrique 10 ct/Kwh**
- **période 40 ans**

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 5 . Estimation des pertes électriques

### Comparaison des résistances

Aérien		1 phase 380KV comprend 3 câbles de section 1000 mm <sup>2</sup> chacune, fournisseur De Angeli Prodotti : AAAC039,93mm	
Résistance *	Unité	1 câble	3 câbles
R <sub>DC</sub> (20°C)	Ω / km	0.0355	
R <sub>DC</sub> (62.3°C)	Ω / km	0.0416	
R <sub>AC</sub> (62.3°C)	Ω / km	0.0430	<b>0.0143</b>
Souterrain		Symmetrical monopole: 525KV HVDC : 2 câbles Nexans, conducteur en cuivre de 3000 mm <sup>2</sup>	
Résistance	Unité	1 câble	
R <sub>DC</sub> (20°C)	Ω / km	0.0060	
R <sub>DC</sub> (70°C)	Ω / km	<b>0.007179</b>	

**La résistance du câble 525KV HVDC est deux fois plus faible qu'une phase 380KV AC**

\* Cf étude thermique 20200418-estimation-pertes.pdf

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 5 . Estimation des pertes électriques

### Hypothèses

- distance 27 km (Chamoson-Chippis)
- prix de l'énergie électrique 10 ct/Kwh
- période 40 ans

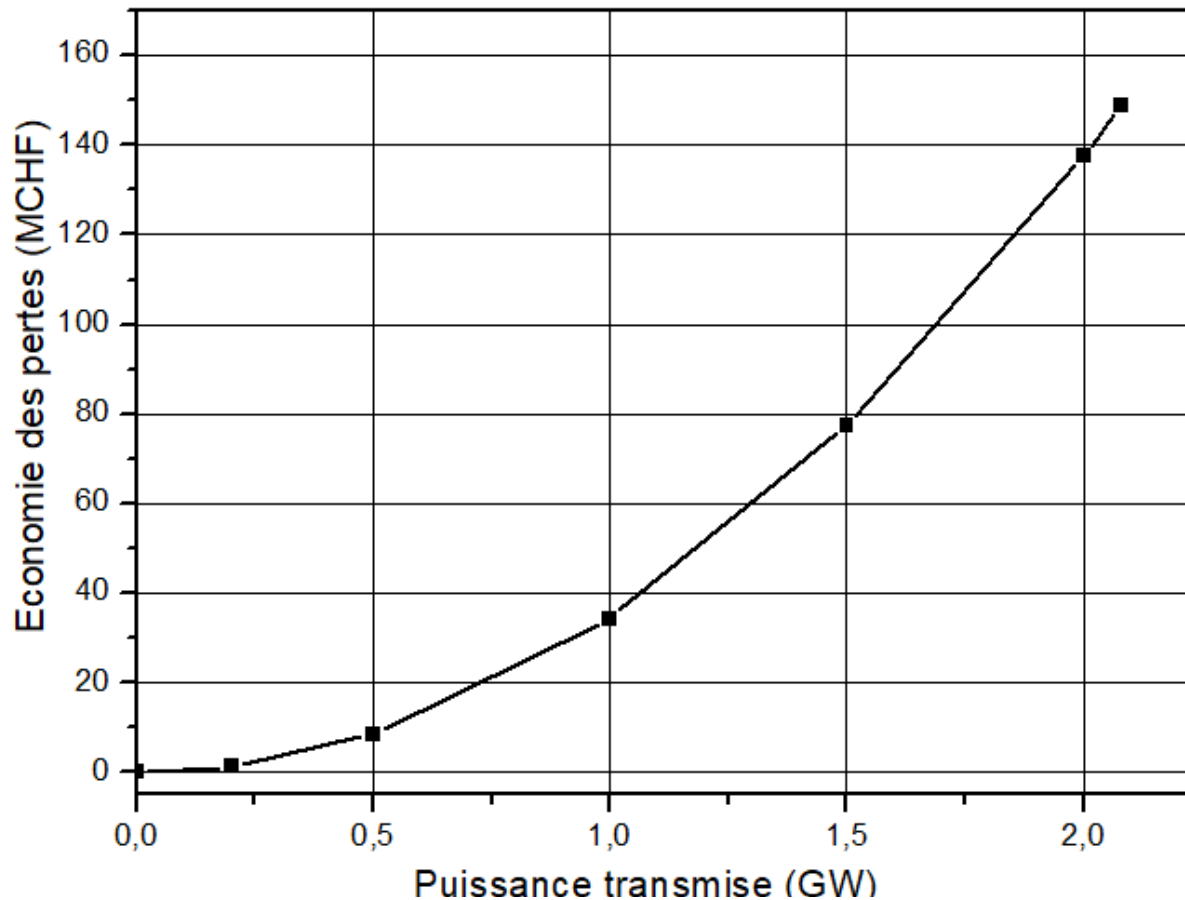
Puissance transmise (GW)	Courant	Perte au km	Perte pour 27 km	Perte annuelle pour 27 km	Perte pdt 40 ans pour 27 km	Coût des pertes pdt 40 ans pour 27 km
2,0	A	P kw/km	P' kw/27km	Q Mwh/27km.année	Q' Mwh/27km.40 ans	K Mio. CHF
<b>Enfouie</b>						
2 câbles HVDC 525KV de section 3000 mm2						
courant DC	1905					
perte ohmique		52,1	1 406,5	12 320,9	492 836,9	<b>49,3</b>
<b>Ligne aérienne</b>						
3 câbles par phase de section 1000 mm2						
courant eff.	1515					
perte pour 1 Ligne 380KV		98,7	2 665,8	23 352,8	934 110,7	<b>93,4</b>
<b>Total des pertes ohmique (2 lignes 380KV)</b>		<b>197,5</b>	<b>5 331,7</b>	<b>46 705,5</b>	<b>1 868 221,3</b>	<b>186,8</b>
<b>Différence des Pertes</b>						
aérien - enfouie		145,4	3 925,2	34 384,6	1 375 384,4	<b>137,5</b>



# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 5 . Estimation des pertes électriques

Economie des pertes pour la solution HVDC sur une période de 40 ans  
Prix de l'énergie électrique 10 ct/Kwh



A pleine charge , l'économie représente 140 Mio. CHF pour un tronçon de 27km

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

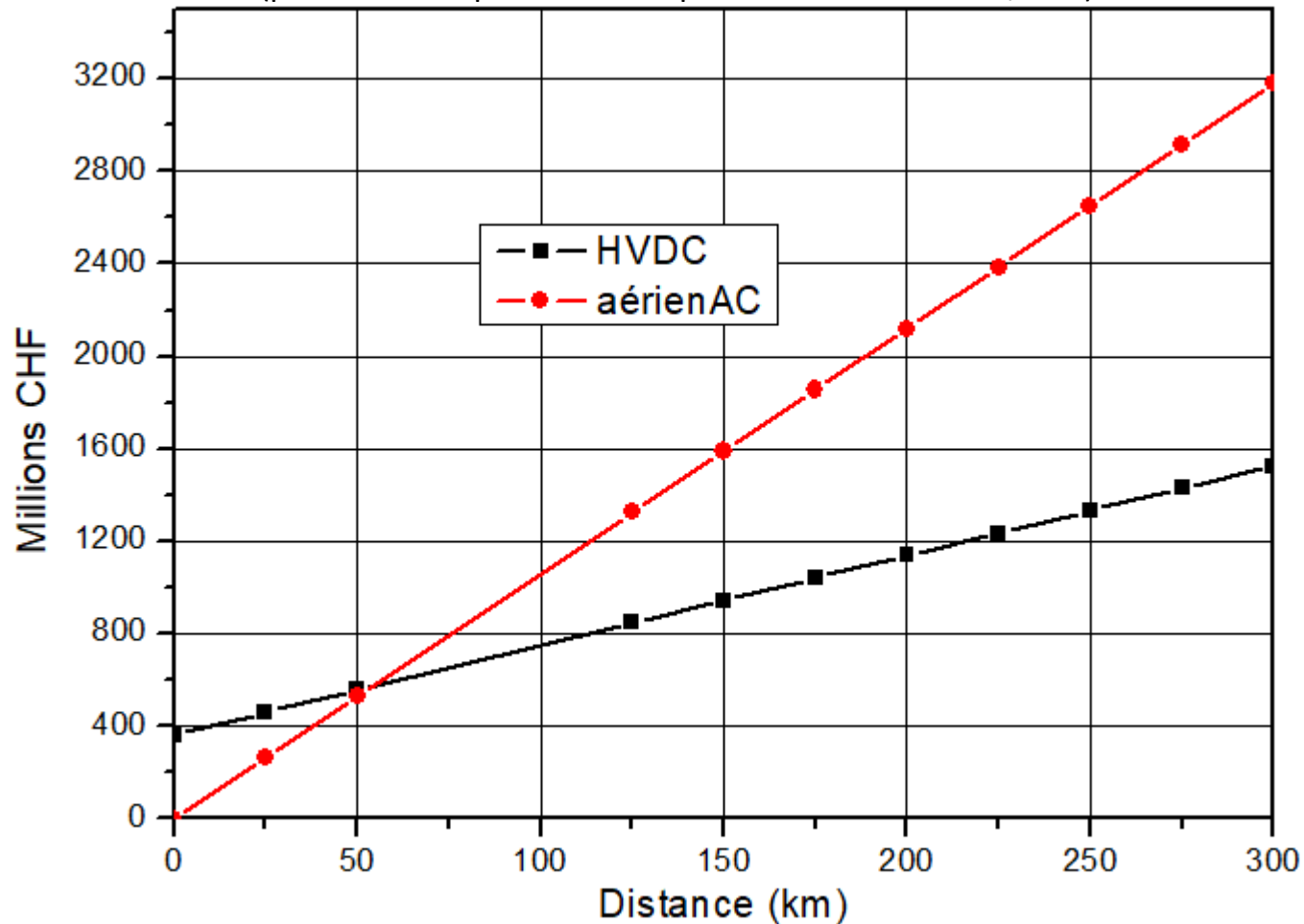
## 6 . Estimation des coûts et comparaison

<b>Liaison souterraine HVDC-525KV</b>	<b>Prix</b>
Fourniture, installation et essais d'un km de bipôle 3000 mm <sup>2</sup> Cu 525KV(2 km de câble), génie civile inclus	1.8 à 2.2 Millions Euros par km
Stations de conversion	350 Millions Euros
<b>Liaison aérienne</b>	<b>Prix</b>
	<b>100 Millions SFR pour 27km</b>

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 6 . Estimation des coûts et comparaison

Coûts d'investissement plus pertes électriques en fonction de la distance  
pour une puissance de 2GW  
(pertes électriques estimées pendant 40 ans à 10 ct/kwh).

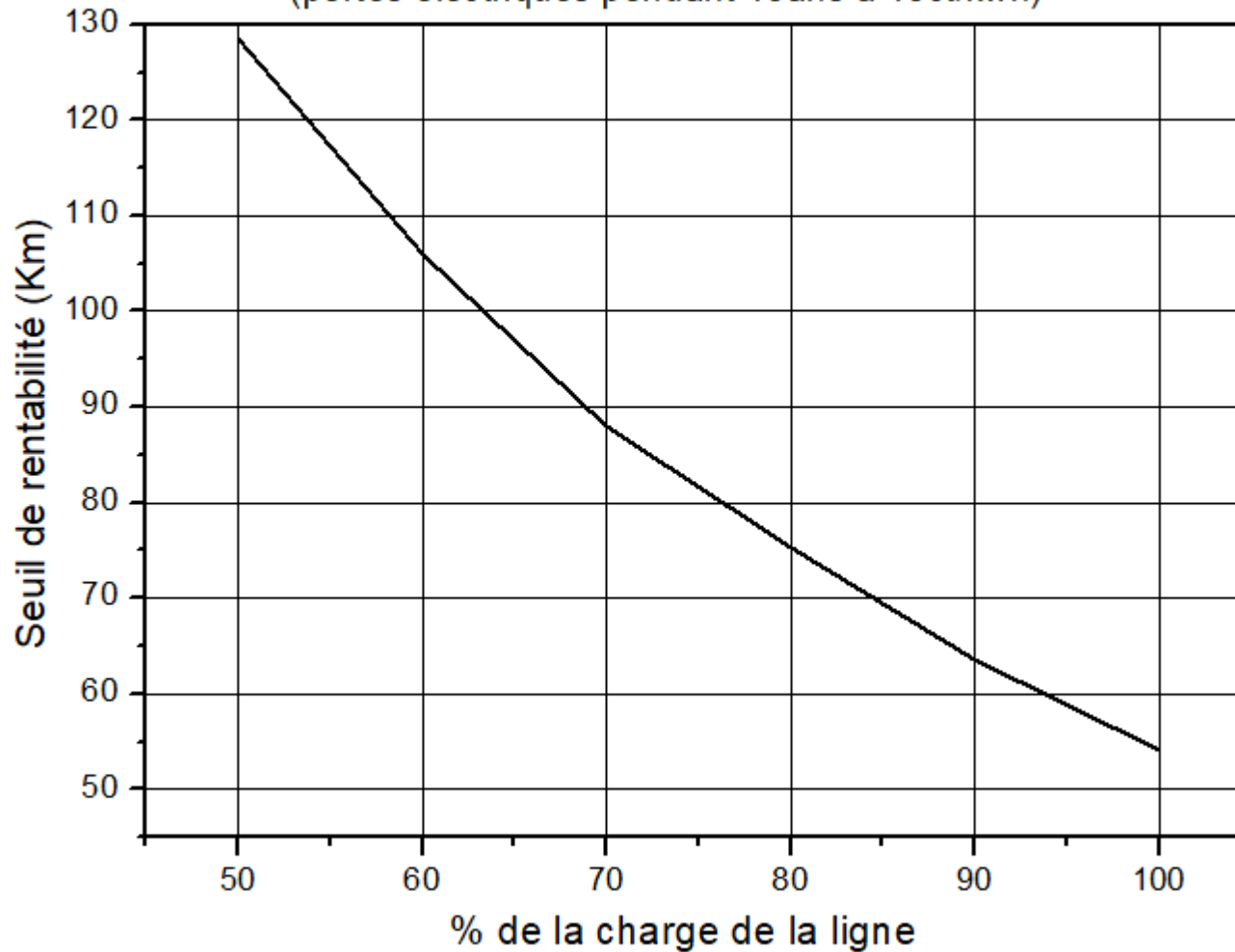


# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 6 . Estimation des coûts et comparaison

Rentabilité d'une liaison HVDC (+-525KV) en fonction  
de la charge de la ligne de 2GW

(pertes électriques pendant 40ans à 10ct/kwh)



# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 6 . Avantages solution DC

- Une liaison HVDC est environ 40 fois moins encombrant qu'une liaison aérienne
- Un système de transport AC nécessite trois conducteurs alors que le HVDC deux suffisent
- La solution HVDC est beaucoup plus respectueuse en matière d'insertion paysagère, écologique ou sanitaire.
- Un câble HVDC ne tient compte que des pertes ohmiques des conducteurs.
- Les câbles AC se heurtent à plusieurs contraintes de dimensionnement: pertes par effet de peau, pertes par effet de proximité, pertes induites dans les écrans.
- Un câble HVDC ne génère ni n'absorbe aucune puissance réactive.
- ...

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 6 . Conclusions

- Cette analyse est le résultat d'une collaboration avec **Nexans**.
- L'analyse des câbles HVDC Symmetrical monopole posés en pleine terre a permis de déterminer la distribution de température dans les câbles et d'estimer l'ampacité en fonction de la distance entre les conducteurs.
- Pour des câbles HVDC (3000 mm<sup>2</sup>), distants de 1 m la puissance transmise est supérieure à 2GW, tout en respectant la température maximum de l'âme (70°C)
- La résistance électrique d'un câble HVDC de même section qu'une phase AC est deux fois plus petite. Cela se traduit qu'à pleine charge , l'économie représente 140 Mio. CHF pour un tronçon de 27km sur une période de 40 ans en supposant 10 ct/Kwh.
- Autrement dit, cette économie représente l'équivalent de la consommation électrique annuelle de 300'000 foyers !

# Calcul ligne HVDC 525KV enfouie

## 6 . Conclusions

- Pour les connections souterraines, le seuil de rentabilité du HVDC serait de 54 km.
- Les calculs réalisés par une méthode FEM dans les conditions ci-dessus montrent la faisabilité d'une liaison HVDC.
- Ce type de liaison HVDC permettrait de définir un couloir d'énergie à proximité de l'autoroute pour contribuer à la transition énergétique optimale.
- Le paysage de la production d'énergie a changé:
  - les cellules photovoltaïques produisent directement du courant continu (DC)
  - les éoliennes passent par une étape en DC
  - ...
- Les technologies d'électronique de puissance rendent aujourd'hui possible le transport efficace de l'électricité sous forme de courant continu à haute tension (HVDC).