



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie

Aspect thermique

Novembre , 2019

Jacques Antille

Chemin des Pruniers 9 /1967 Bramois

E-mail:jacques.antille@bluewin.ch

Mobile: 079 205 27 51

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Contenu

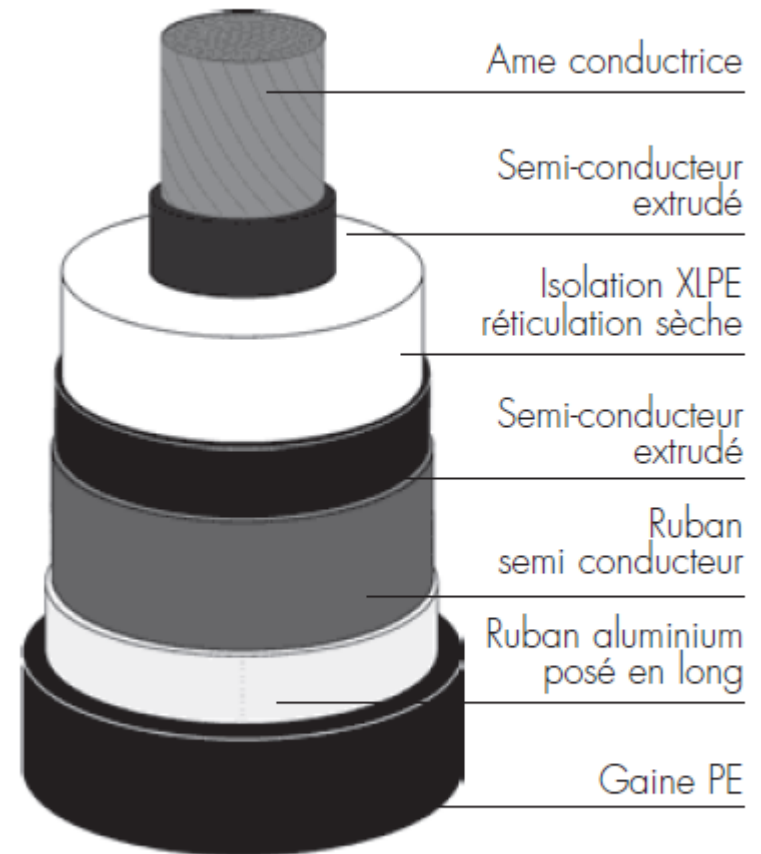
1. **Constitution d'un câble**
2. Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)
 - 2.1 Câble XLPE HV de section 1400 mm^2 , $I = 1000 \text{ A}$, géométrie simplifiée
 - impact des propriétés du sol
 - impact de l'enrobage (backfill)
 - impact de la température de l'air
 - impact du vent
 - 2.2 Câbles 380KV, géométrie réelle, courant = 1350 A
 - pose en nappe horizontale
 - pose en trèfle
3. Câbles en galerie (micro tunnel)
 - 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géométrie réelle, courant nominal
 - pose en trèfle: température distribution, optimisation des phases et B
 - pose en nappe: température distribution, B au niveau du sol
4. Comparaison de B entre une ligne aérienne et un micro tunnel blindé
5. Conclusions

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

1. Constitution d'un câble



Typical sample of a 2500mm² 500 kV XLPE cable



↔
Diamètre du câble 14.4 cm

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

1. Constitution d'un câble : propriétés

CABLE PARAMETERS			
Parameter	Value		Units
	380 kV	-----	
Number of conductor in the cable	1	-	-
Diameter of conductor	61.5		mm
Thermal resistivity of copper	0.002584	-----	K.m/W
Diameter over semi-conductive tape	N/A		mm
Thermal resistivity of semi-conductive tape	N/A		K.m/W
Diameter over conductor screen	65.4		mm
Thermal resistivity of conductor screen	2.5		K.m/W
Diameter over insulation	121.4		mm
Thermal resistivity of insulation (XLPE)	3.5		K.m/W
Diameter over insulation screen	125.4		mm
Thermal resistivity of insulation screen	2.5		K.m/W
Diameter over water swelling tape 1	126.9		mm
Thermal resistivity of water swelling tape 1	3.5		K.m/W
Diameter of copper wires	2.56		mm
Number of copper wires	96		-
Thickness of copper tape (Open Helix)	0.13		mm
Diameter over copper tape	132		mm
Diameter over water swelling tape 2	134.7		mm
Thermal resistivity of water swelling tape 2	3.5		K.m/W
Diameter over laminated aluminum tape	135.4		mm
Thermal resistivity of laminated aluminum tape	0.00422		K.m/W
Diameter over jacket	144		mm
Thermal resistivity of jacket	3.5		K.m/W

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

1. Constitution d'un câble

Deux phénomènes électriques sont importants dans le comportement de l'âme :

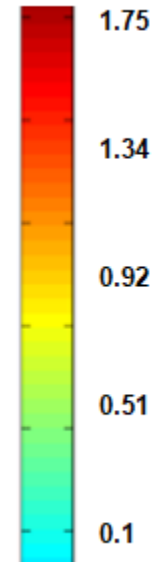
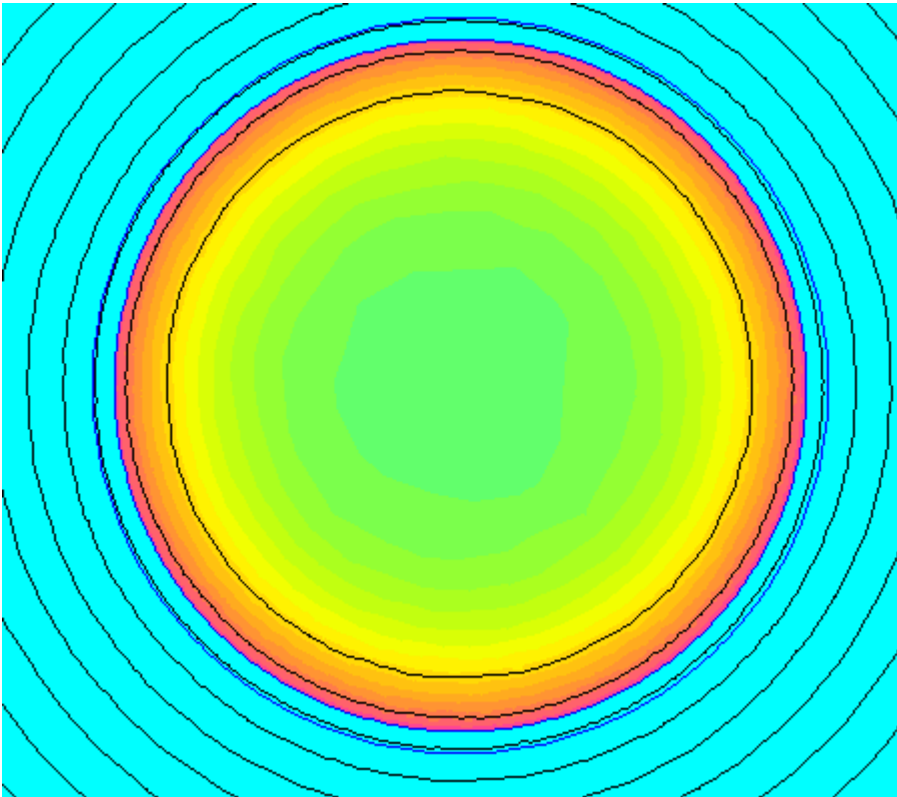
- l'effet de peau (tend à concentrer le passage du courant électrique à la périphérie des conducteurs)
- l'effet de proximité (lorsque le diamètre des conducteurs est relativement important par rapport à la distance séparant les trois phases, le courant électrique tend à se concentrer sur les faces en regard des conducteurs)

La température ne doit pas excéder **90°C** (XPLE câble), sinon les propriétés de l'isolant sont affectées et la durée de vie du câble est réduite.

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

1. Constitution d'un câble

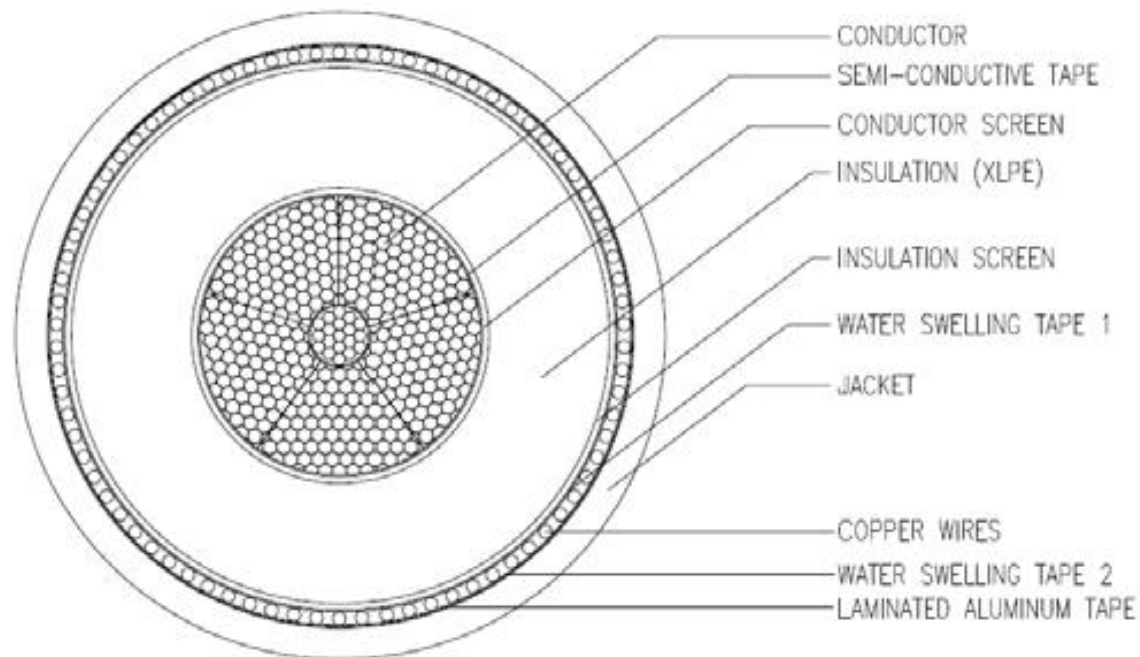
Exemple, câble 380KV avec âme uniforme en cuivre : densité de courant $\times 10^6$ A/m²



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

1. Constitution d'un câble

Exemple: câble 380KV avec âme segmentée constituée par l'assemblage de plusieurs conducteurs de section sectorielle



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Contenu

1. Constitution d'un câble
2. **Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)**
 - 2.1 Câble XLPE HV de section 1400 mm^2 , $I = 1000 \text{ A}$, géométrie simplifiée
 - impact des propriétés du sol
 - impact de l'enrobage (backfill)
 - impact de la température de l'air
 - impact du vent
 - 2.2 Câble 380KV, géométrie réelle, courant = 1350 A
 - pose en nappe horizontale
 - pose en trèfle

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

Pertes thermiques dans les câbles :

- effet Joule: $W_J = R_{AC} \cdot I^2$

- courants induit: $W_s = \lambda_s \cdot R_{AC} \cdot I^2$

- dans l'isolant: $W_d = \omega \cdot C_d \cdot U^2 \cdot \tan \delta$

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

Pertes thermiques dans les câbles, deux approches :

Par des normes (IEC 60287- 60853 ...)

Approche analytique

Résistance de l'âme en courant alternatif:

$$R_{AC}(T) = R_{DC}(T) \cdot (1 + y_s + y_p)$$

y_s facteur effet de peau

y_p facteur effet de proximité

$$y_s + y_p \cong 0.1$$

$$R_{DC}(T) = \rho(T) \cdot \frac{l}{S}$$

$$\rho(T) = \rho(20^\circ) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - 20^\circ))$$

FEM (finite element method)

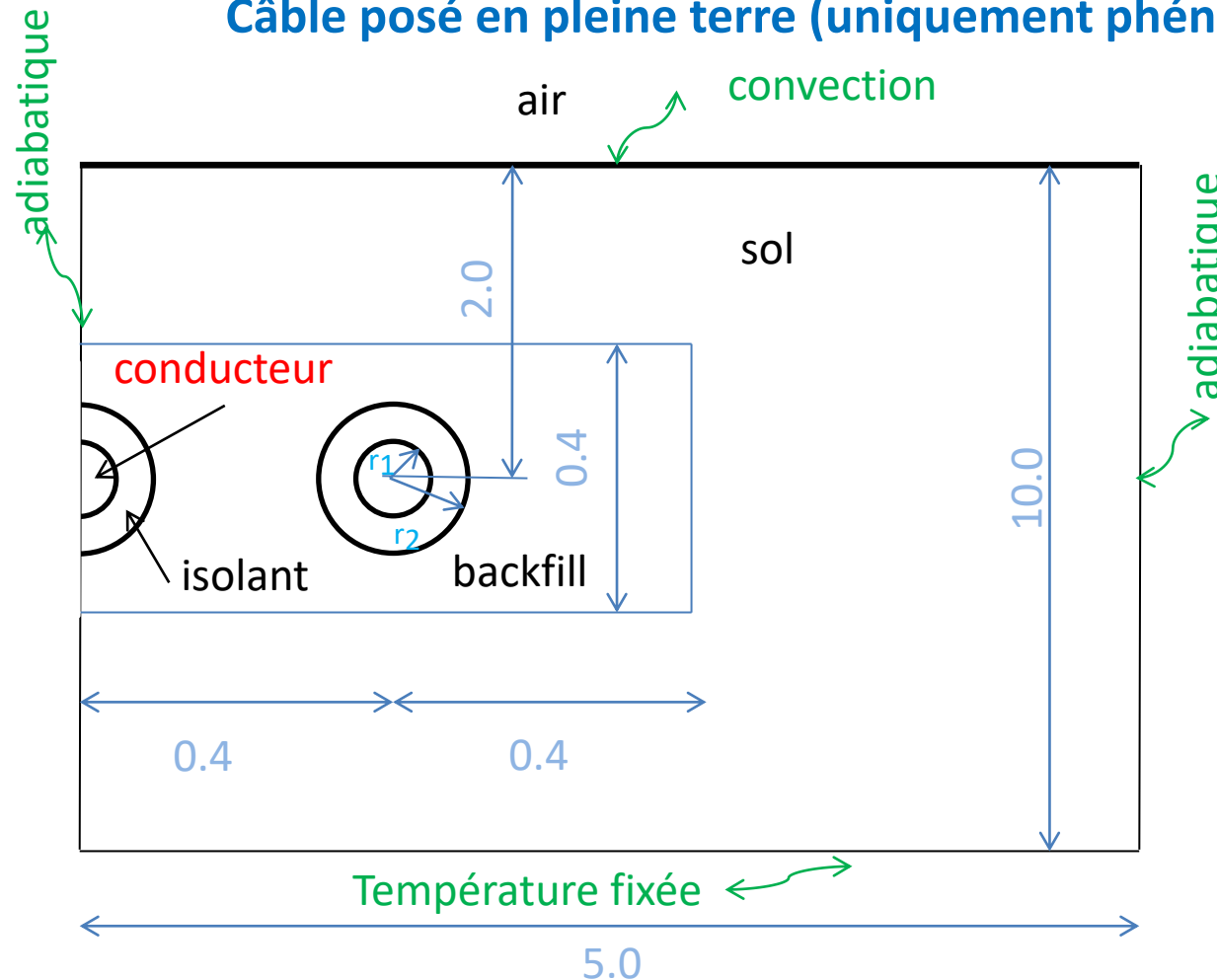
vraie géométrie du câble prise en compte

$$W_J = \iint_c \frac{J_c(x, y)}{\sigma_c} dx \cdot dy$$

$$W_S = \iint_s \frac{J_s(x, y)}{\sigma_s} dx \cdot dy$$

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)



Câble	Matériel	Conductivité thermique W/(m.K)
conducteur	cuivre	400
isolation	XLPE	0.3232

$$r_1 = 21.1 \text{ mm}$$

$$r_2 = 48 \text{ mm}$$

Unité : mètre

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

2.1 Câble XLPE HV de section 1400 mm², I =1000 A, géométrie simplifiée

$$\lambda_{\text{sol}} = \lambda_{\text{backfill}} = 0.5 \text{ W}/(\text{m.K}) \quad h_{\text{convection}} = 7.371 + 6.43 \times V^{0.75} \quad T_{\text{air}} = 20^\circ \quad T_{\text{fixé}} = 10^\circ$$

T °C	R _{DC} (T) ohm/m	R _{AC} (T) ohm/m	P = R _{AC} (T) x I ² W/m	P / Volume KW/m ³
47	1.3622x10-5	1.495x10-5	14.95	10.679
63.8	1.4435x10-5	1.5842x10-5	15.842	11.316
72.5	1.4856x10-5	1.63304x10-5	16.304	11.646

impact des propriétés du sol

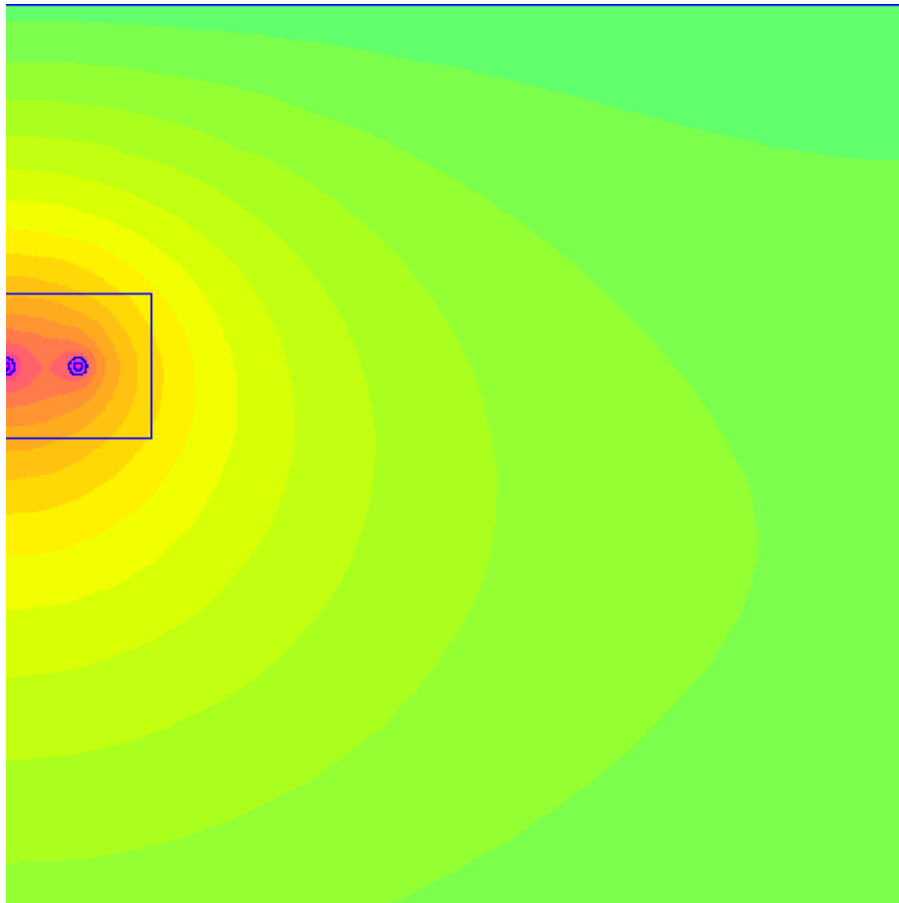
conductivité thermique sol W/(m.K)	conductivité thermique backfill W/(m.K)	Temperature max °C
0.5	0.5	72
1	1	48

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

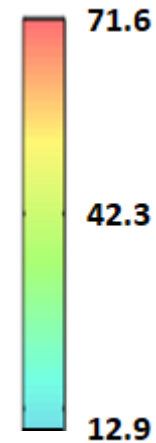
2.1 Câble XLPE HV de section 1400 mm², I =1000 A, géométrie simplifiée

- impact des propriétés du sol



Distribution de température

$T_{\max} = 71.6$



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

2.1 Câble XLPE HV de section 1400 mm², I =1000 A, géométrie simplifiée

-impact de l'enrobage (backfill)

conductivite thermique sol W/(m.K)	conductivite thermique backfill W/(m.K)	Temperature max °C
0.5	0.5	72
0.5	1	62.7

effet important : T_{max}
diminue de 10°

- impact de la température de l'air

conductivite thermique sol W/(m.K)	conductivite thermique backfill W/(m.K)	Temperature air °C	Temperature max °C
0.5	0.5	20	72
0.5	0.5	40	88

effet important : T_{max}
augmente de 4°

- impact du vent

conductivite thermique sol W/(m.K)	conductivite thermique backfill W/(m.K)	Temperature air °C	Vitesse vent m/s	Temperature max °C
0.5	0.5	20	0	72
0.5	0.5	20	5	71.5

effet
négligeable

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Contenu

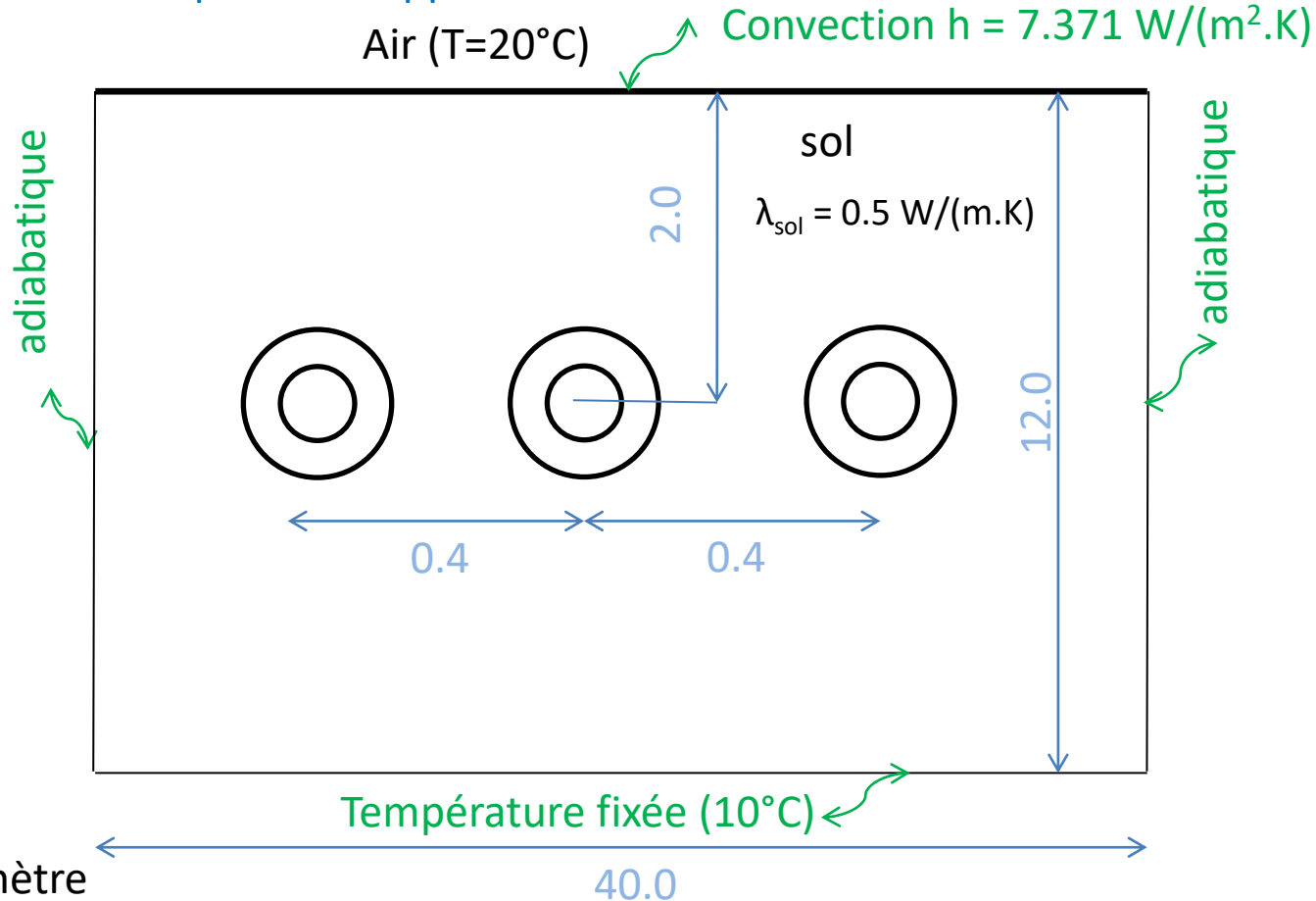
1. Constitution d'un câble
2. **Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)**
 - 2.1 Câble XLPE HV de section 1400 mm^2 , $I = 1000 \text{ A}$, géométrie simplifiée
 - impact des propriétés du sol
 - impact de l'enrobage (backfill)
 - impact de la température de l'air
 - impact du vent
 - 2.2 Câbles 380KV, géomètre réelle, courant = 1350 A
 - pose en nappe horizontale
 - pose en trèfle

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

2.2 Câble 380KV, géométrie réelle, courant = 1350 A

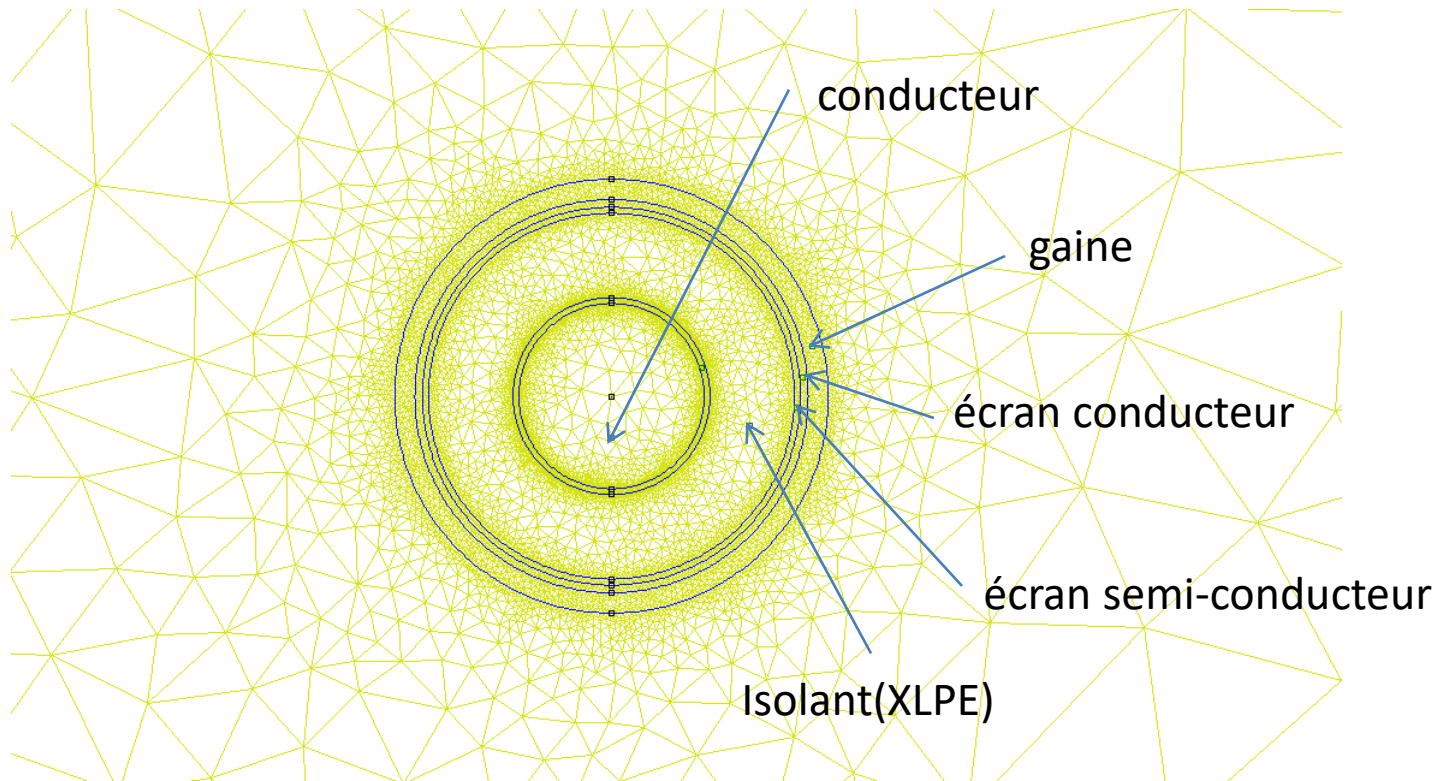
- pose en nappe horizontale



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

2.2 Câble 380KV, géométrie réelle, courant = 1350 A
- pose en nappe horizontale

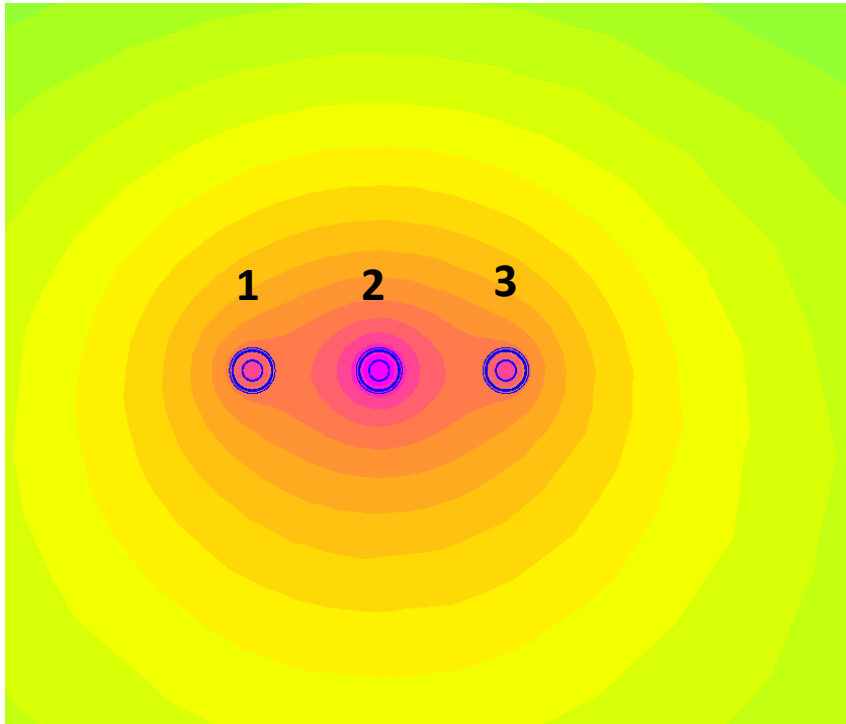


Maillage utilisé

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

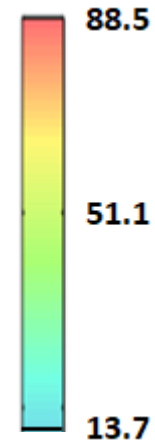
2.2 Câble 380KV, géomètre réelle, courant = 1350 A
- pose en nappe horizontale



Température distribution

Distribution de température

$$T_{\max} = 88.5$$

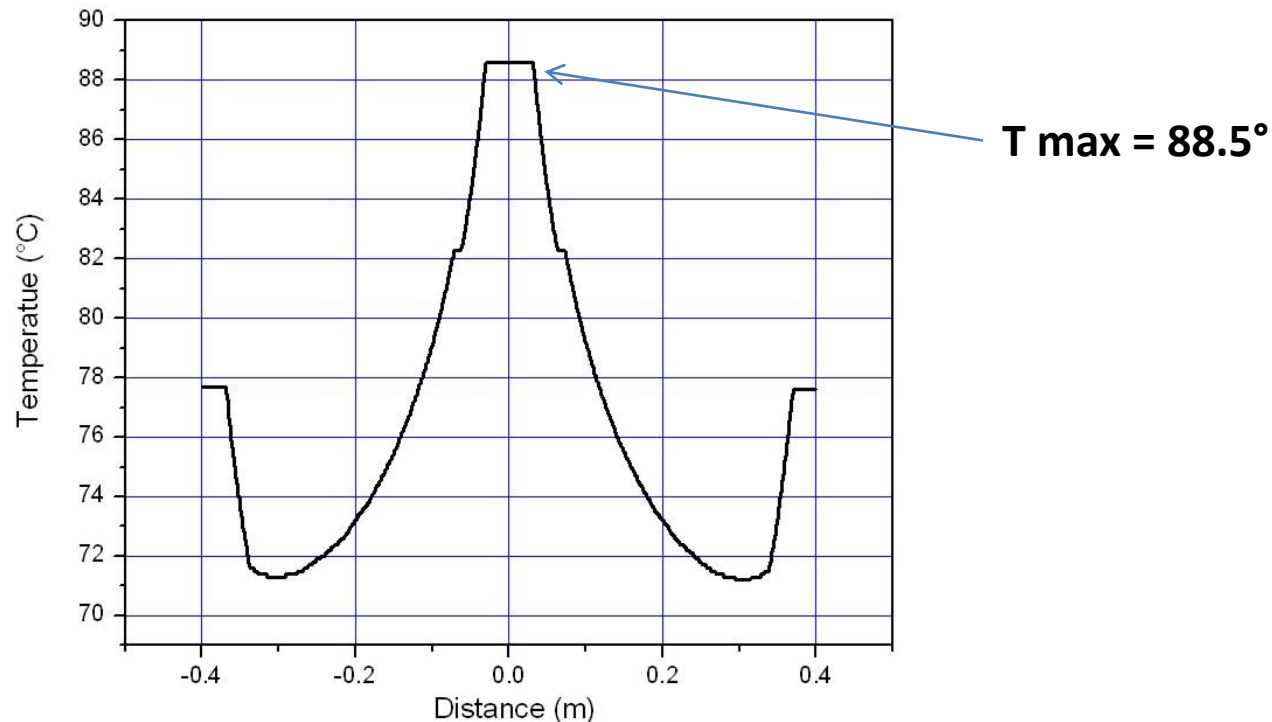


Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

2.2 Câble 380KV, géomètre réelle, courant = 1350 A
- pose en nappe horizontale

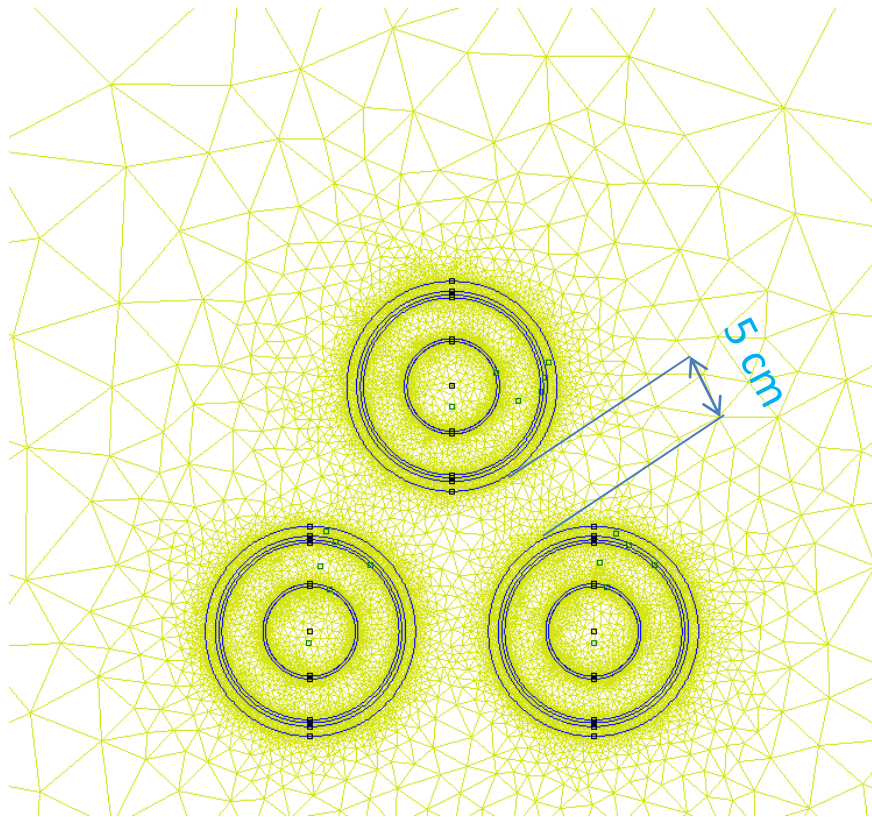
Température distribution du centre de l'âme 1 au 3



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

2.2 Câble 380KV, géométrie réelle, courant = 1350 A
- pose en trèfle

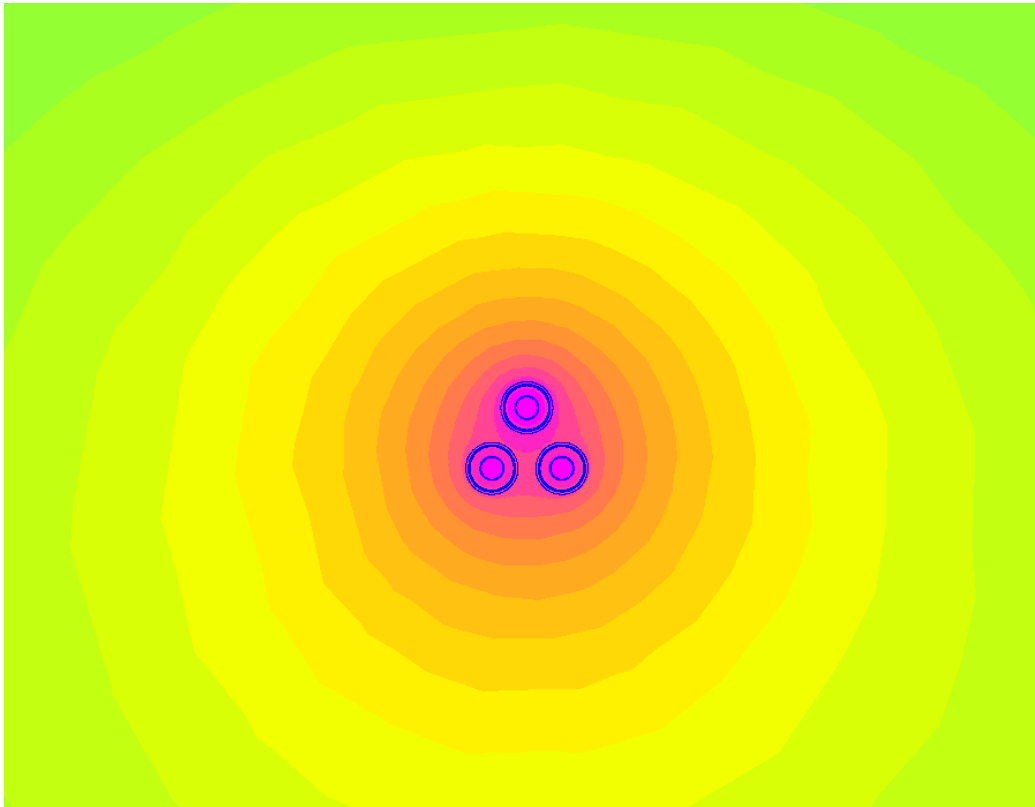


Maillage utilisé

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

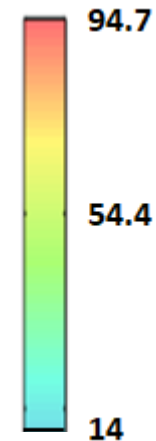
Câble posé en pleine terre (uniquement phénomène de conduction)

2.2 Câble 380KV, géométrie réelle, courant = 1350 A
- pose en trèfle



Distribution température :

$$T_{\max} = 94.7$$



$T_{\max} > 90^\circ$!!

La pose en nappe est plus favorable
d'un point de vue thermique

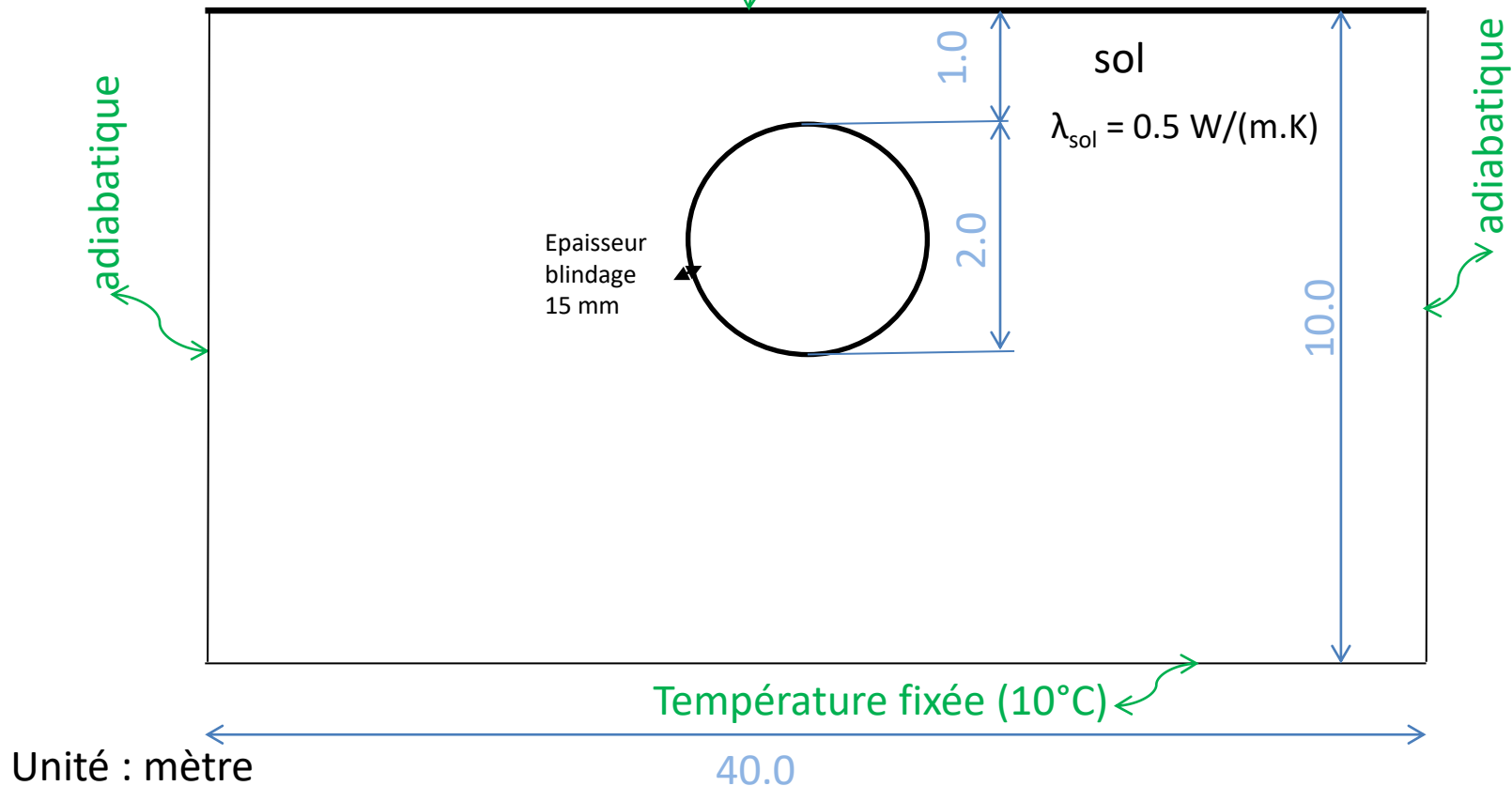
$$T_{\max} (\text{trèfle}) - T_{\max} (\text{nappe}) = 6.2^\circ$$

Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

3. Câbles en galerie (micro tunnel)

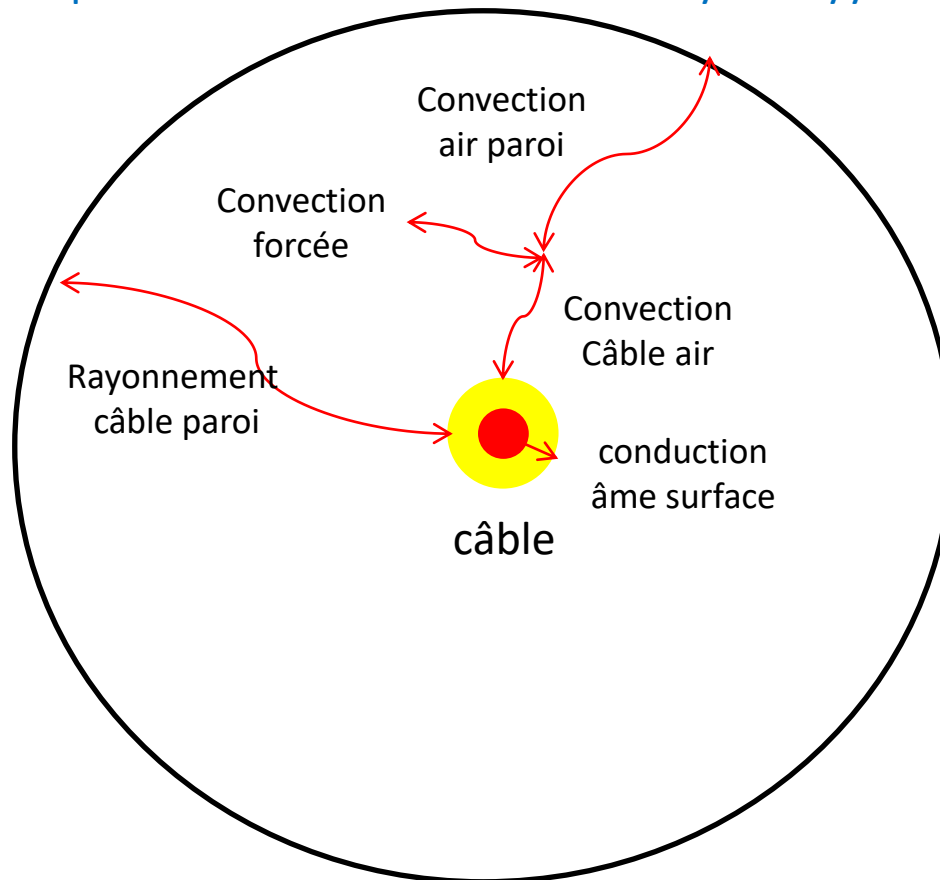
- 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en trèfle, condition été, convection forcée 1m/s

Air ($T=40^{\circ}\text{C}$) Convection $h = 7.371 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



3. Câbles en galerie (micro tunnel)

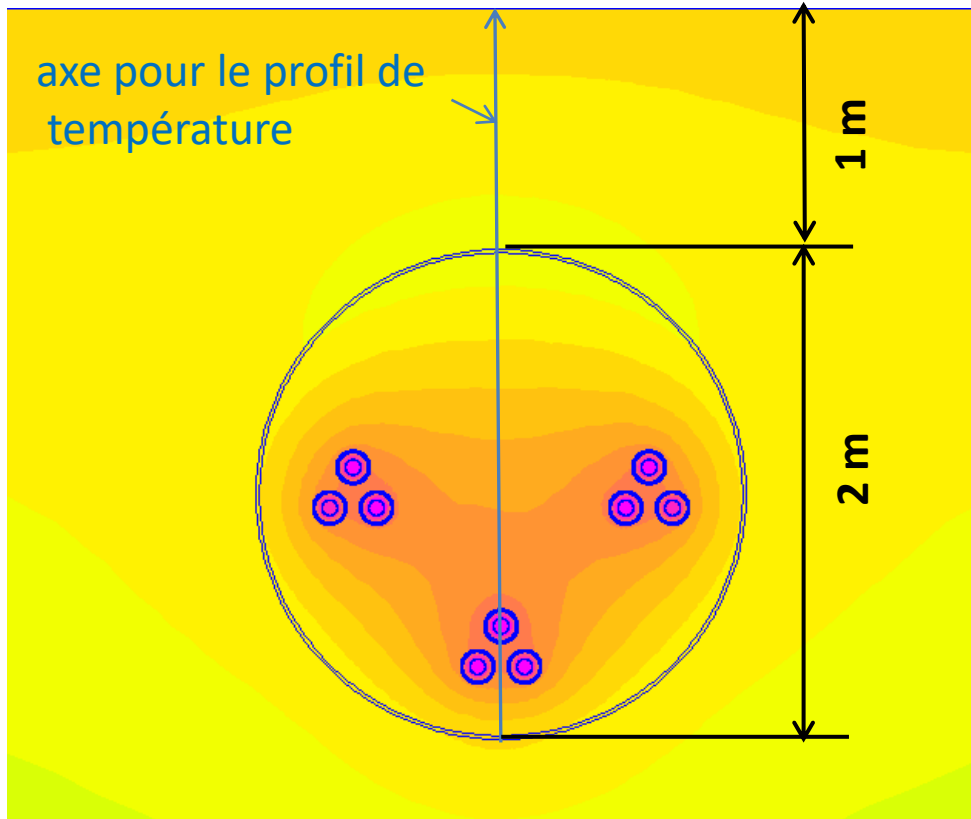
Echanges thermiques : basé sur les lois de Weedy et Zayyat modifiées *



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

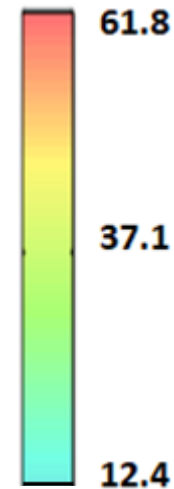
3. Câbles en galerie (micro tunnel)

- 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en trèfle, condition été, convection forcée 1m/s



Distribution température :

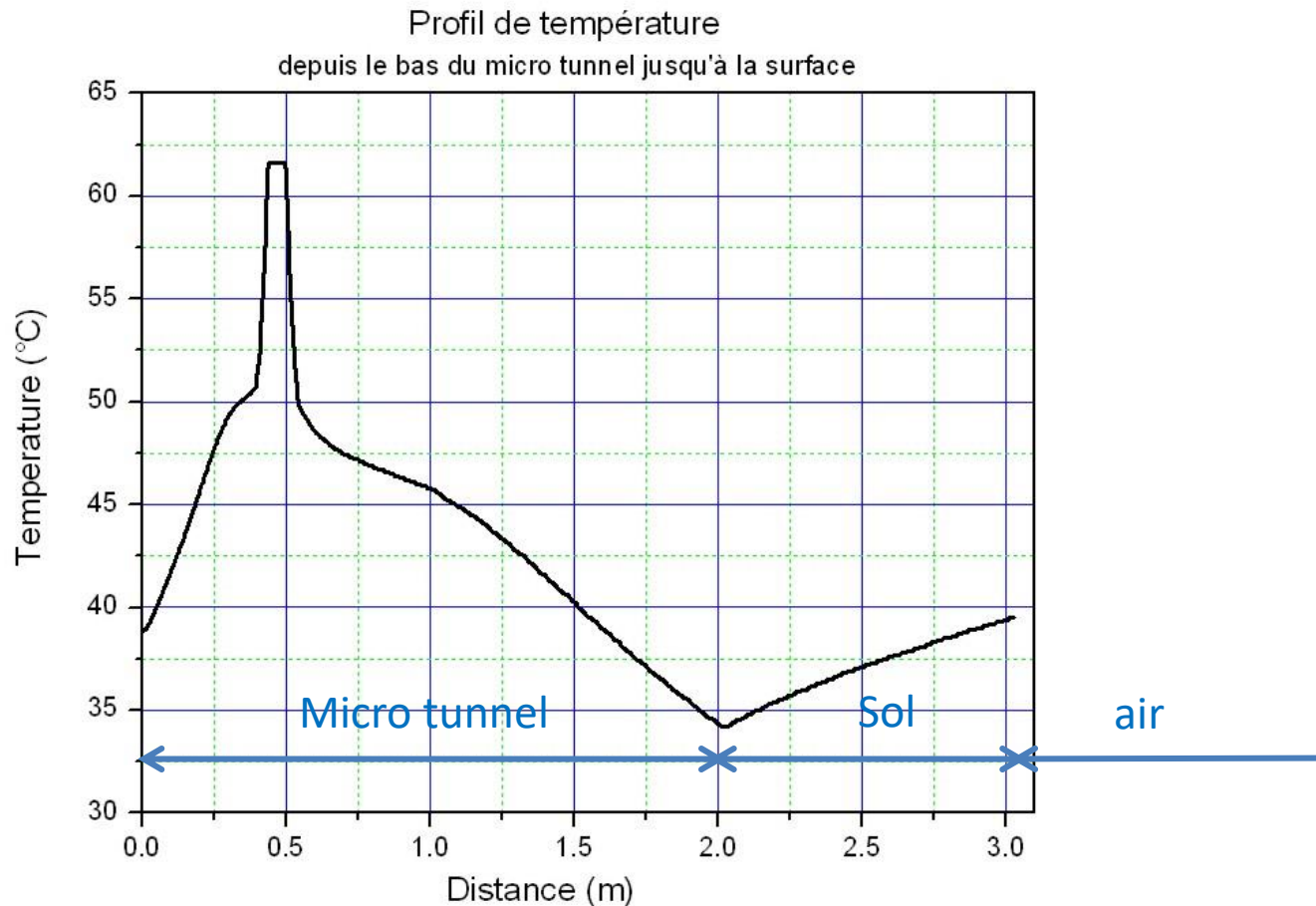
$$T_{\max} = 61.8^{\circ}$$



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

3. Câbles en galerie (micro tunnel)

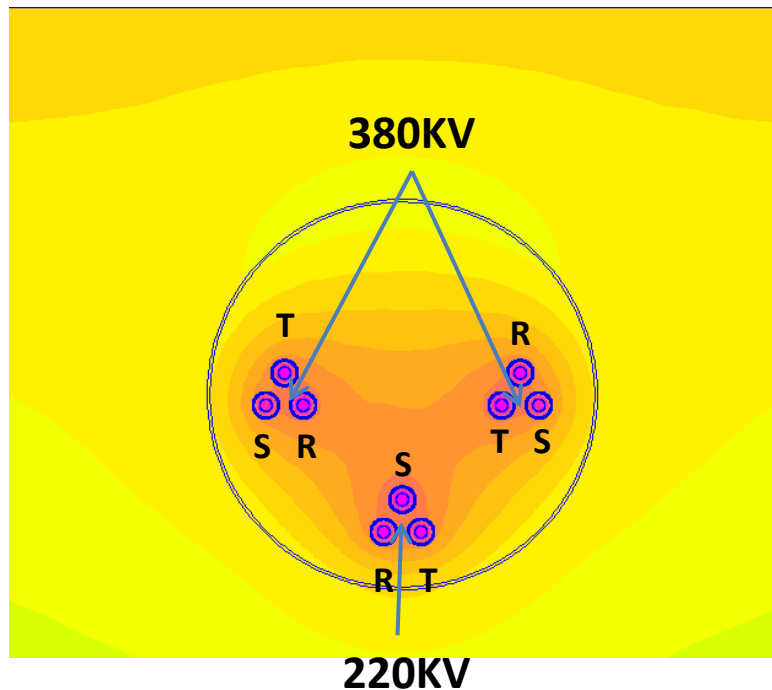
- 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en trèfle, condition été, convection forcée 1m/s



3. Câbles en galerie (micro tunnel)

- 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en trèfle, condition été, convection forcée 1m/s

Optimisation des phases

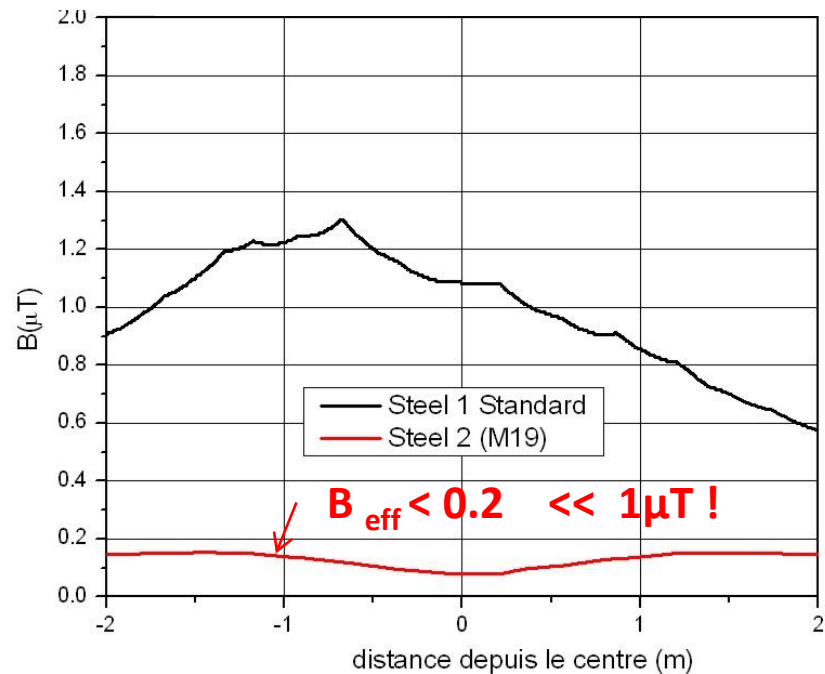
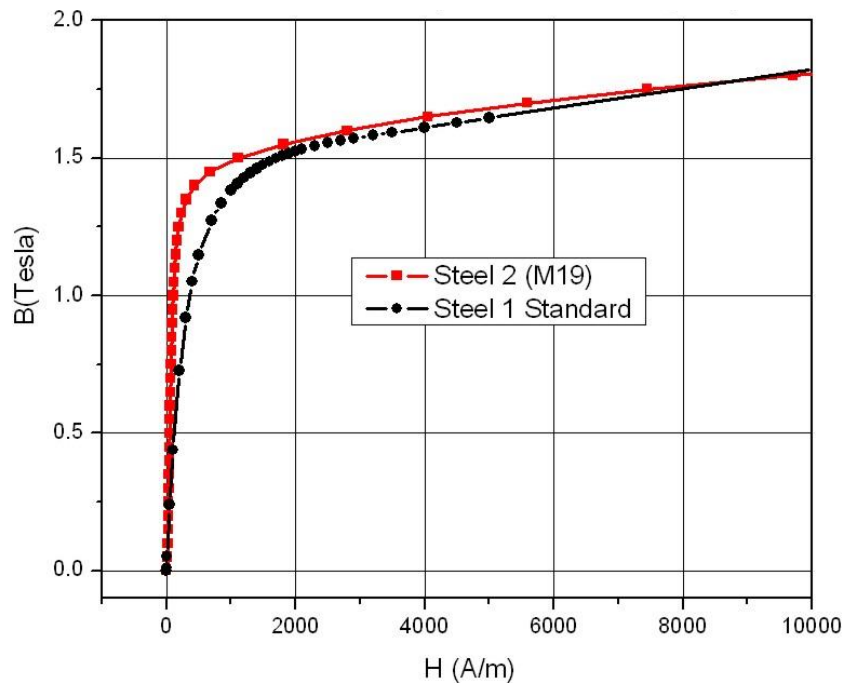


Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

3. Câbles en galerie (micro tunnel)

3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géométrie réelle, courant nominal
- pose en trèfle, condition été

Courbe B de H utilisée pour les calculs $B_{\text{efficace}} (\mu\text{T})$ en fonction de la distance au niveau du sol

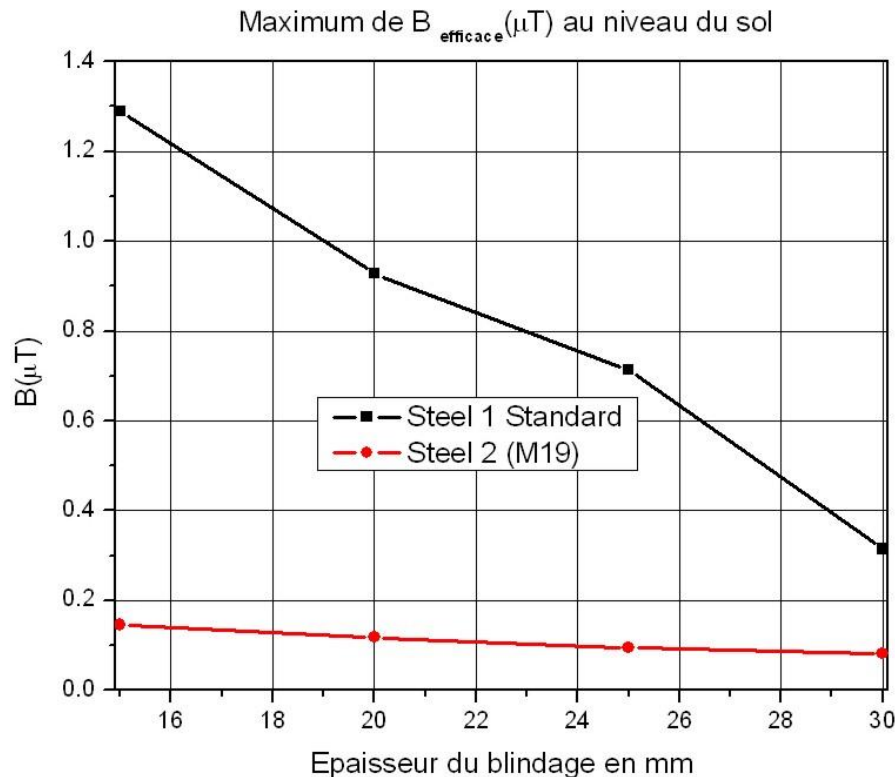


Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

3. Câbles en galerie (micro tunnel)

3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en trèfle, condition été

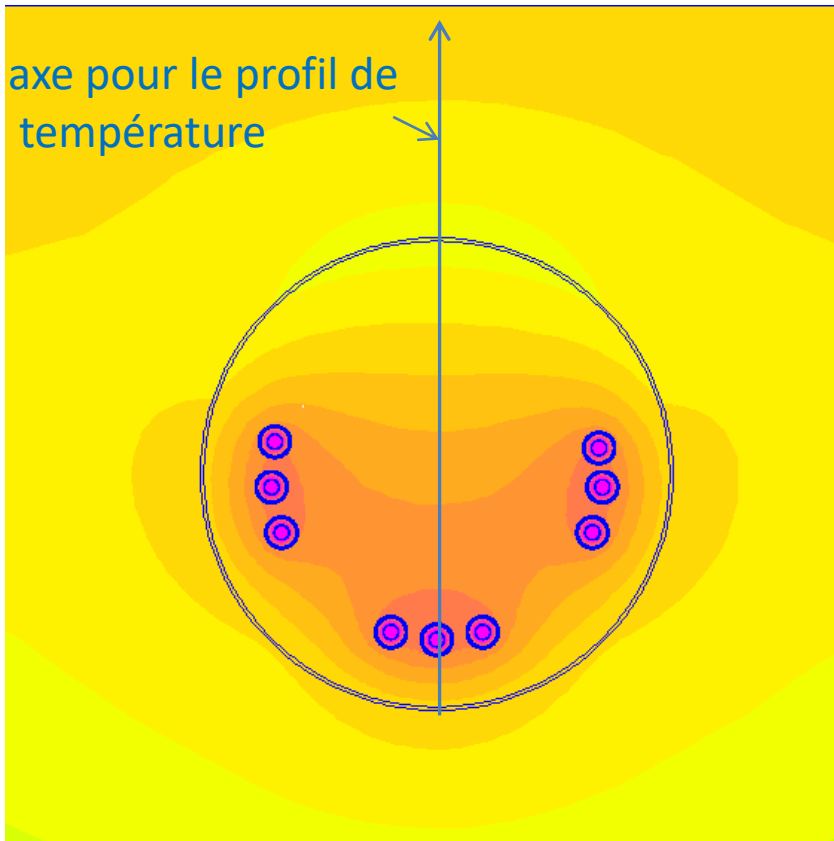
Maximum de B_{efficace} (μT) au niveau du sol en fonction de l'épaisseur du blindage



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

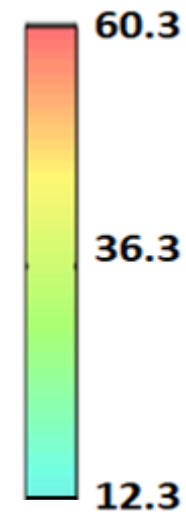
3. Câbles en galerie (micro tunnel)

- 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en nappe, condition été, convection forcée 1m/s



Distribution température :

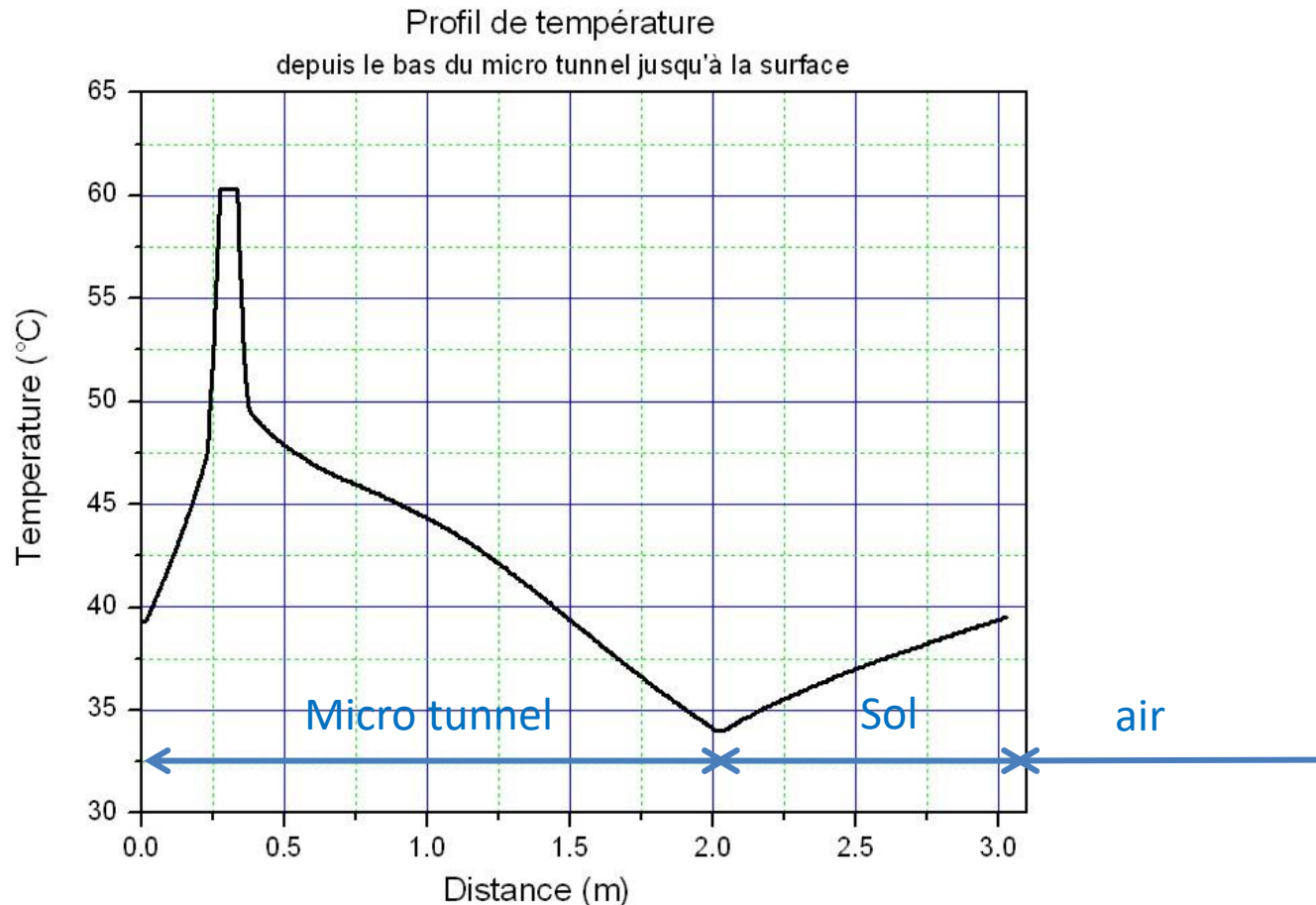
$$T_{\max} = 60.3^{\circ}$$



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

3. Câbles en galerie (micro tunnel)

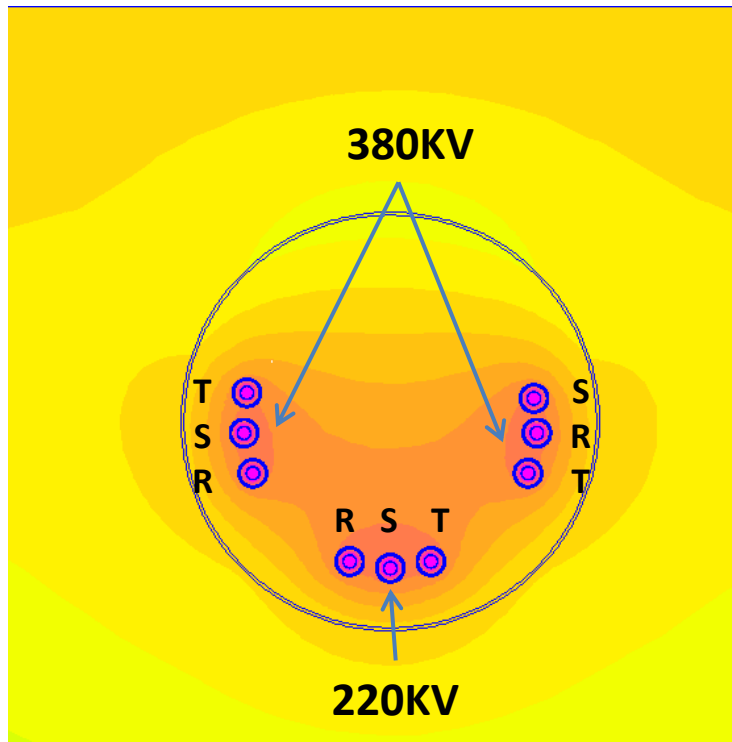
- 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en nappe, condition été, convection forcée 1m/s



3. Câbles en galerie (micro tunnel)

- 3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal
- pose en nappe, condition été, convection forcée 1m/s

Optimisation des phases



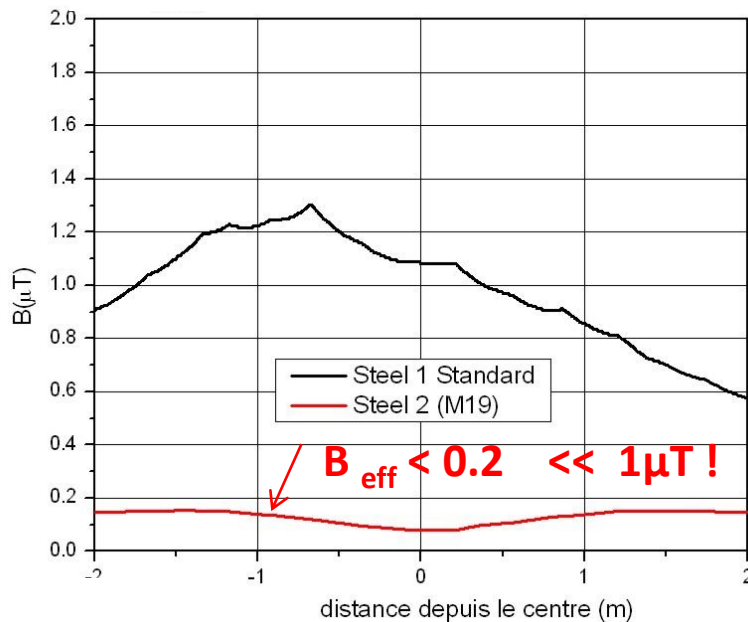
Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

3. Câbles en galerie (micro tunnel)

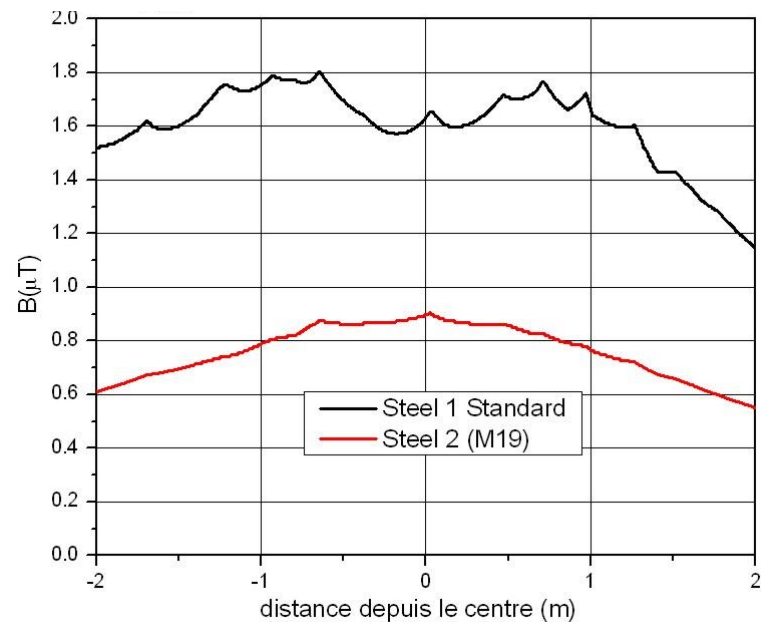
3.1 2 lignes 380KV, 1 ligne 220KV géomètre réelle, courant nominal - pose en nappe, condition été

Comparaison B_{efficace} (μT) en fonction de la distance au niveau du sol

pose en trèfle

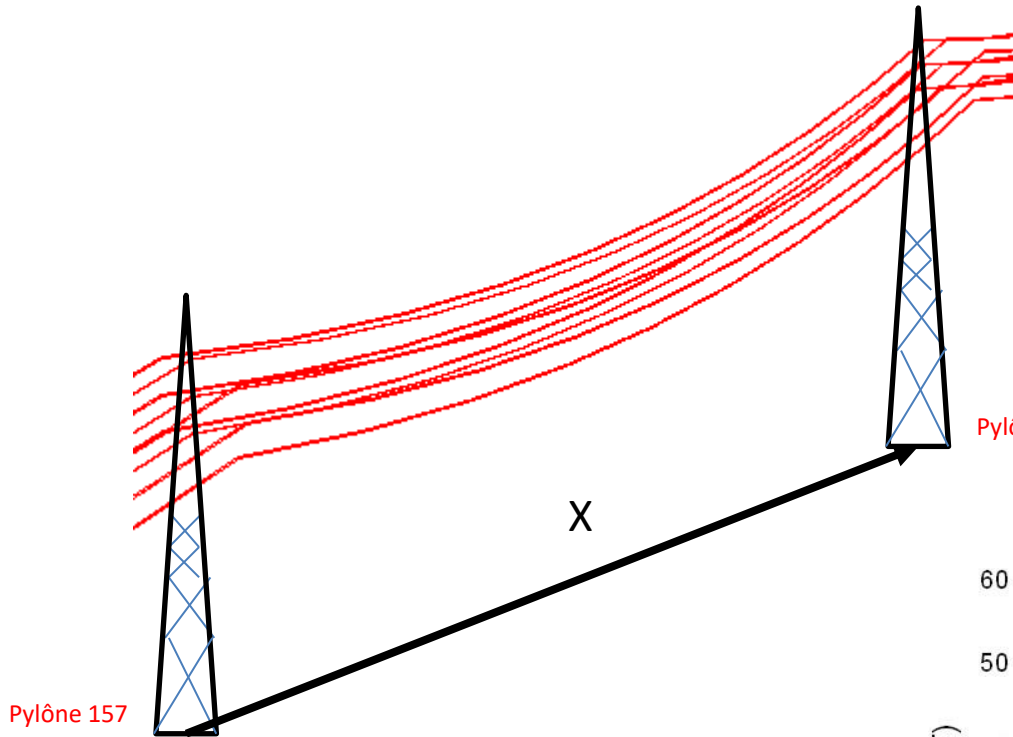


pose en nappe



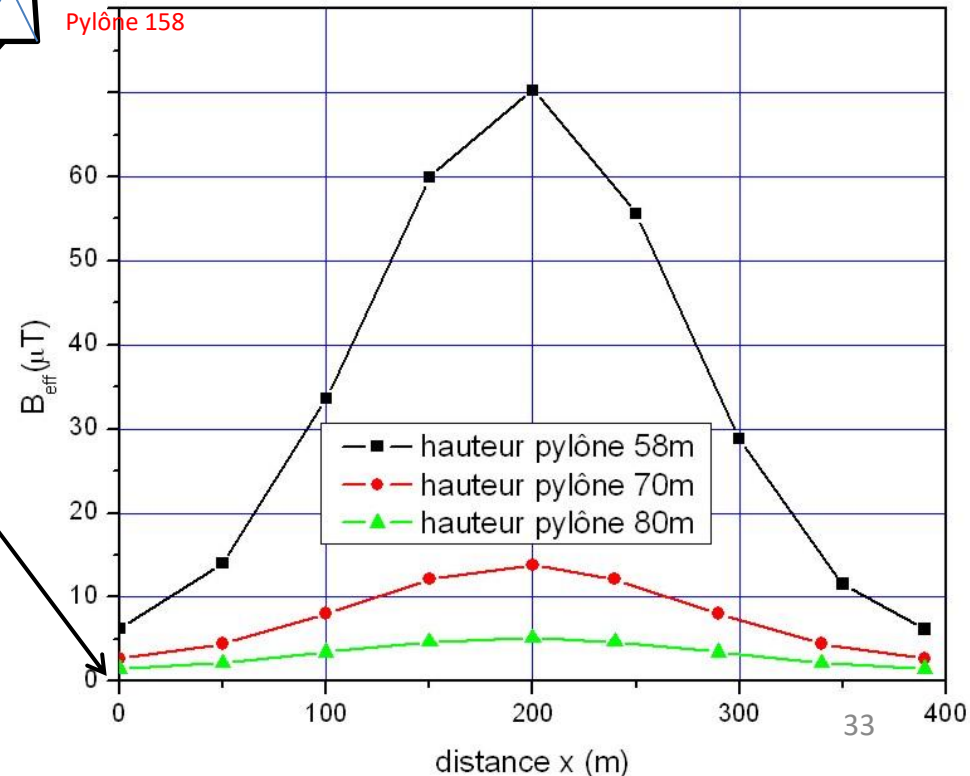
Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

4. Comparaison de B entre une ligne aérienne et un micro tunnel blindé



Prédiction de B entre les pylônes

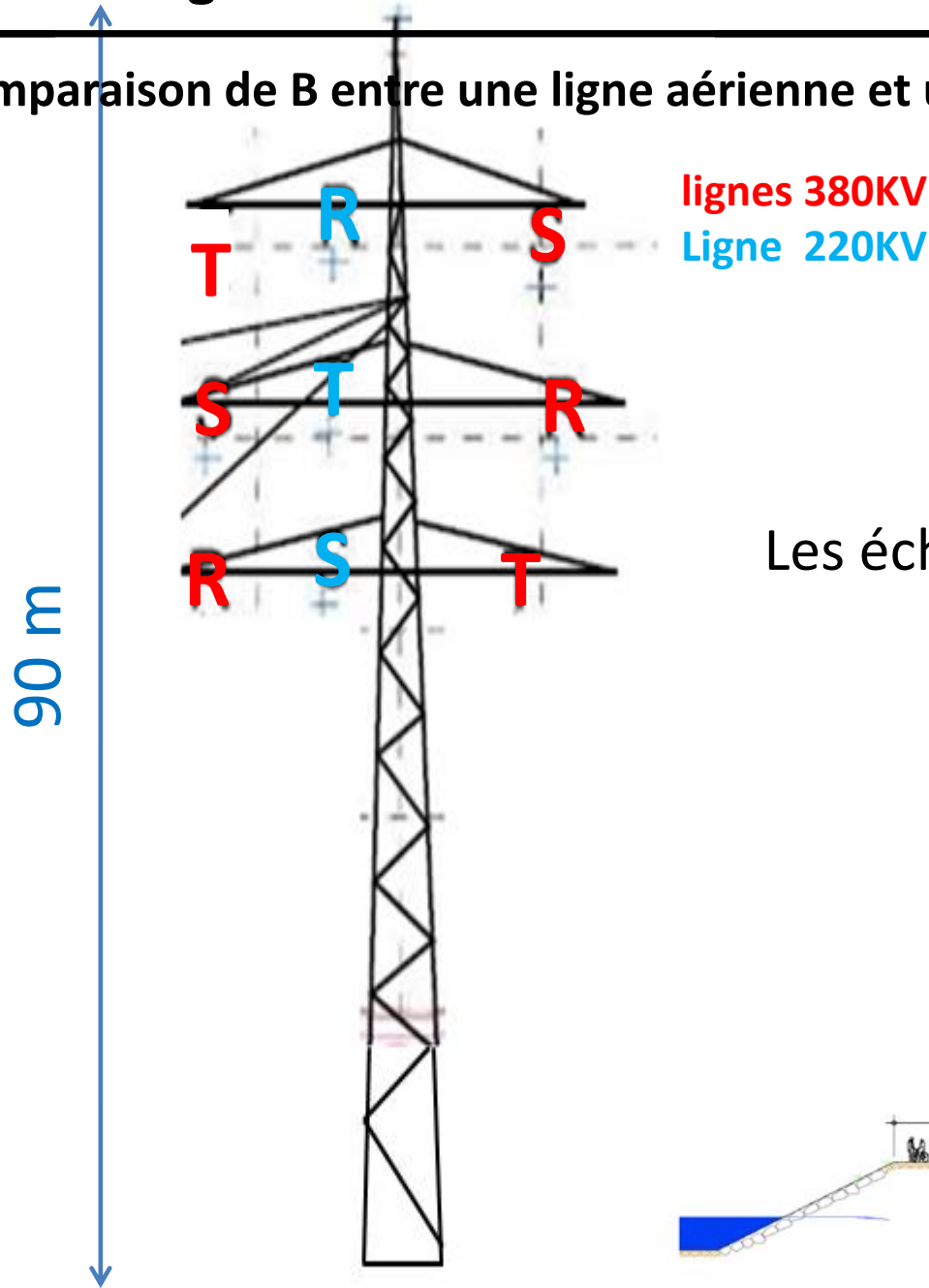
2x380KV / 1x220KV I_{max} = 2x2230 A / 1x2240 A /phase



- Entre 1.5 et 6.3 μT sous l'axe du pylône
- Une ligne aérienne ne respecte jamais une valeur de $B_{\text{eff}} < 1\mu\text{T}$ sous la ligne !

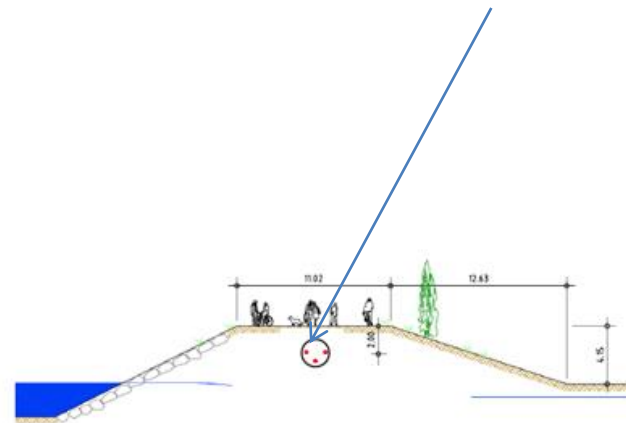
Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

4. Comparaison de B entre une ligne aérienne et un micro tunnel blindé



Les échelles sont respectées

Micro tunnel blindé
Avec 2 lignes 380KV +
1 ligne 220KV



Calcul ligne THT 380/220KV enfouie – aspect thermique

5. Conclusions

- L'analyse des câbles posés en pleine terre (uniquement phénomène de conduction) a permis de se familiariser à cette technologie et de déterminer les conditions aux limites à appliquer pour la résolution des équations .
- Cette étude est basée sur des bancs d'essais expérimentaux et numériques pour estimer les échanges thermiques dans le refroidissement des câbles en galerie.
- Avec ces coefficients d'échange, l'étude s'est portée sur le refroidissement de 2 lignes 380KV et une de 220KV (similaire à la solution aérienne) pour un micro tunnel de 2 mètres de diamètre avec le manteau supérieur enfoui à 1 mètre du sol. Le manteau du micro tunnel est en acier (ferromagnétique) de 15mm d'épaisseur pour atténuer le flux d'induction magnétique (B).
- L'analyse s'est portée sur deux poses différentes des câbles, l'une en nappe et l'autre en trèfle, correspondant à une charge maximum du courant dans les câbles (ampacité) pour des conditions d'été et avec une convection forcée de 1m/s.
- Sur la base des résultats de l'analyse thermique, une optimisation magnétique a été réalisée pour l'identification des phases (R S T) et le calcul de B au niveau du sol .

5. Conclusions (suite 1)

L'analyse thermique a permis de dégager les points suivants :

- La pose en nappe des câbles est plus favorable d'un point de vue thermique que celle en trèfle.
- La pose en trèfle des câbles est beaucoup plus favorable d'un point de vue magnétique que celle en nappe.
- La température maximum de l'âme des câbles n'atteint pas **90°C** (XPLE câble), à pleine charge conformément aux prescriptions du fabricant, ceci pour les deux configurations de pose des câbles, pour la saison critique d'été.
- Les calculs réalisés par une méthode FEM dans les conditions ci-dessus montrent la faisabilité de l'enfouissement de câbles dans un micro tunnel blindé.
- Les solutions proposées respectent la valeur limite de $1 \mu\text{T}$ au niveau du sol.

5. Conclusions (suite 2)

- La solution d'un micro tunnel blindé correspond à une tranchée de 2mètres de large et 3 mètres de profond. Cette solution permettrait d'ajouter facilement des câbles de transmission (fibre optique,...) à une configuration existante.
- Avec ce concept de micro tunnel blindé, on peut facilement rajouter un autre micro tunnel blindé à proximité et ainsi doubler la capacité.
- Une ligne aérienne ne respecte jamais une valeur de $B_{\text{eff}} < 1\mu\text{T}$ sous la ligne !
- Comme B au niveau du sol du à un micro tunnel blindé est inférieur à celui généré par une ligne aérienne, son influence sur la santé est moindre.
(Principe de précaution)