



**Calcul ligne THT 380/220KV**

**+**

**Ligne enterrée**

**Mai, 2019**

**Jacques Antille**

**Chemin des Pruniers 9 /1967 Bramois**

**E-mail:[jacques.antille@bluewin.ch](mailto:jacques.antille@bluewin.ch)**

**Mobile: 079 205 27 51**

# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

---

## Contenu

- Introduction - motivation
- Jacques Antille : un « illuminé » ?
- Vérifier les calculs de Swissgrid
  - cas 1 Grône
  - cas 2 Ferme des Crétilons
  - cas 3 Prédiction de l'induction magnétique entre 2 pylônes
- Trouver une solution pour la ligne enterrée
- Conclusions

Remarque: analyse rigoureuse (pas dans l'émotionnel)

# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

---

## Introduction - motivation

- 13 décembre 2018: information publique de la THT à Grône
- 11 janvier 2019 : e-mail à Marie-Claude Debons
- 17 mai 2019 Rencontre avec Swissgrid (Prilly)
- 22 mai rencontre avec le Prof. Nicolas Jordan (HES Valais)
- Mise a jour des données

# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

## Introduction - motivation

De : jacques et josiane antille [jacques.antille@bluewin.ch] Date : ven. 11.01.2019  
À : 'Marie-claude.debons@swissgrid.ch'  
Cc :  
Objet : Ligne THT

Jacques Antille  
Chemin des Pruniers 9  
1967 Bramois  
Natel :079 205 27 51

Madame,

Physicien domicilié à Bramois sur la commune de Sion, je suis votre projet de la ligne THT Chamoson-Chippis via les médias et les comptes rendus de diverses associations. Mon parcours professionnel m'a conduit du CERN à la compagnie Alusuisse puis à partir de 2004 chez KANA-NAK à Sierre. Je connais bien les équations de Maxwell et pendant plus de 25 ans j'ai optimisé les fours pour la production d'aluminium, tant d'un point de vue électromagnétique que thermique. J'ai développé des codes d'éléments finis pour résoudre ces équations. Je suis sidéré de m'apercevoir que beaucoup d'informations techniques ne sont pas connues et que nos autorités cantonales ne sont pas cohérentes dans leurs déclarations. Mon but est le suivant :

- 1) Calculer l'induction magnétique de la ligne THT en fonction de la distance à partir de l'axe du pylône, et l'induction B si on se place entre deux pylônes (flexion maximum).
- 2) Calculer l'induction magnétique d'une ligne 380KV souterraine, avec influence d'un blindage magnétique, en fonction de la distance.
- 3) Comparer ces deux solutions.

Ce que j'ai besoin :

Pour le cas 1) : la position des conducteurs dans l'espace, la valeurs des courants et l'identification des phases.

Pour le cas 2) : j'imagine que vous avez déjà enterré des câbles, donnez-moi un schéma « raisonnable » de la section des câbles, des courants et de leur disposition

Serait-ce possible d'obtenir les coordonnées d'une personne de la technique dans votre organisation ?

Je vous prie de recevoir, Madame, mes respectueuses salutations

Jacques Antille

# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

---


















## Introduction – motivation

- aucune donnée de Swissgrid
- pris contact avec Maître Jacques Philipoz et Marcel Baillard










# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

## Introduction – motivation

### - documents de la commune de Grône

-  2009.10.30\_Demande de défrichement
-  2013.11.29\_Swissgrid\_Ligne 380 kV Chamoson - Chippis, Rapport d'étude des variantes de conducteurs des ternes 380 kV et DAP OFEN 19.01...
-  Annex 1\_Ligne 380 kV Chamoson - Chippis, Genehmigt vom BFE am 19.01.2015(2)
-  Plan Nr. 1
-  Plan Nr. 15
-  Plan Nr. 16
-  Plan Nr. 33
-  Plan Nr. 34
-  Plan Nr. 35
-  Plan Nr. Pièce n° 3.2
-  Plan Nr. Pièce n° 4
-  Plan Nr. Pièce n° 5
-  Plan Nr. Pièce n° 17
-  Plan Nr. Pièce n° 18.1
-  Plan Nr. Pièce n° 18
-  Plan Nr. Pièce n° 19.1
-  Plan Nr. Pièce n° 19

### -documents de Maître Jacques Philippoz

-  DOC001
-  DOC001-ecole grone
-  DOC002
-  DOC003
-  DOC-rapportPrevotec
-  DOC-tout public
-  Présentation Jakob 01.06.2015
-  R3-THT Synergies 08.11.2016
-  Rapport Collège d'Experts

# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

---

Jacques Antille : un « illuminé » ?

- **Mona :”*Modèle Numérique pour l’Aluminium*”**
- **Mona same philosophy as ALUCELL developed by Alusuisse (more than 20 years)**

**to solve :**

**Determination of the stationary electrical potential, velocity, temperature and magnetic induction in an electrolysis cell and determination of the linear stability of a given steady state.**

# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

---

Jacques Antille : un « illuminé » ?

## KAN-NAK PUBLICATIONS & PATENTS

- **KAN-NAK published more than 50 papers in many famous Aluminium Conferences in USA, RUSSIA, INDIA, CHINA, DUBAI, ICELAND**
- **KAN-NAK released many Patents:**
  - **Inert anodes (MOLTECH),**
  - **Cathode design,**
  - **Collector bar design,**
  - **Cooling technology**



# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

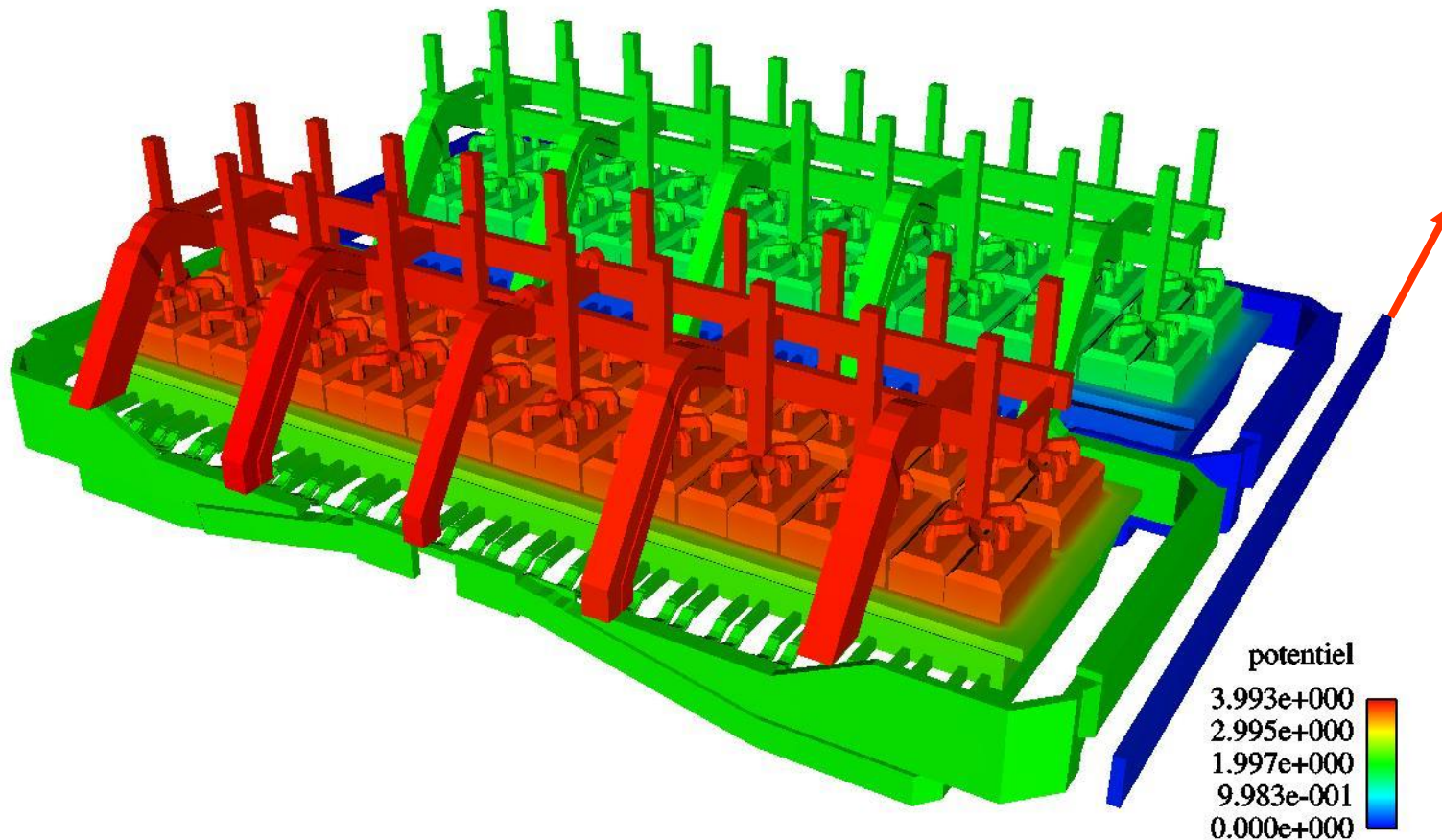
---

Jacques Antille : un « illuminé » ?

- **KAN-NAK ACHIEVEMENTS**
  - **Reduction of specific energy by more than 1 kWh/kg Al**
  - **Increase of current efficiency of more than 1%**
  - **Current increase in the same shell up to 70%**
  
- **BRASIL**
- **CANADA**
- **ENGLAND**
- **FRANCE**
- **GERMANY**
- **ICELAND**
- **INDIA**
- **INDONESIA**
- **NORWAY**
- **ROMANIA**
- **RUSSIA**
- **SCOTLAND**
- **SOUTH AFRIKA**
- **THE NETHERLANDS**
- **USA**

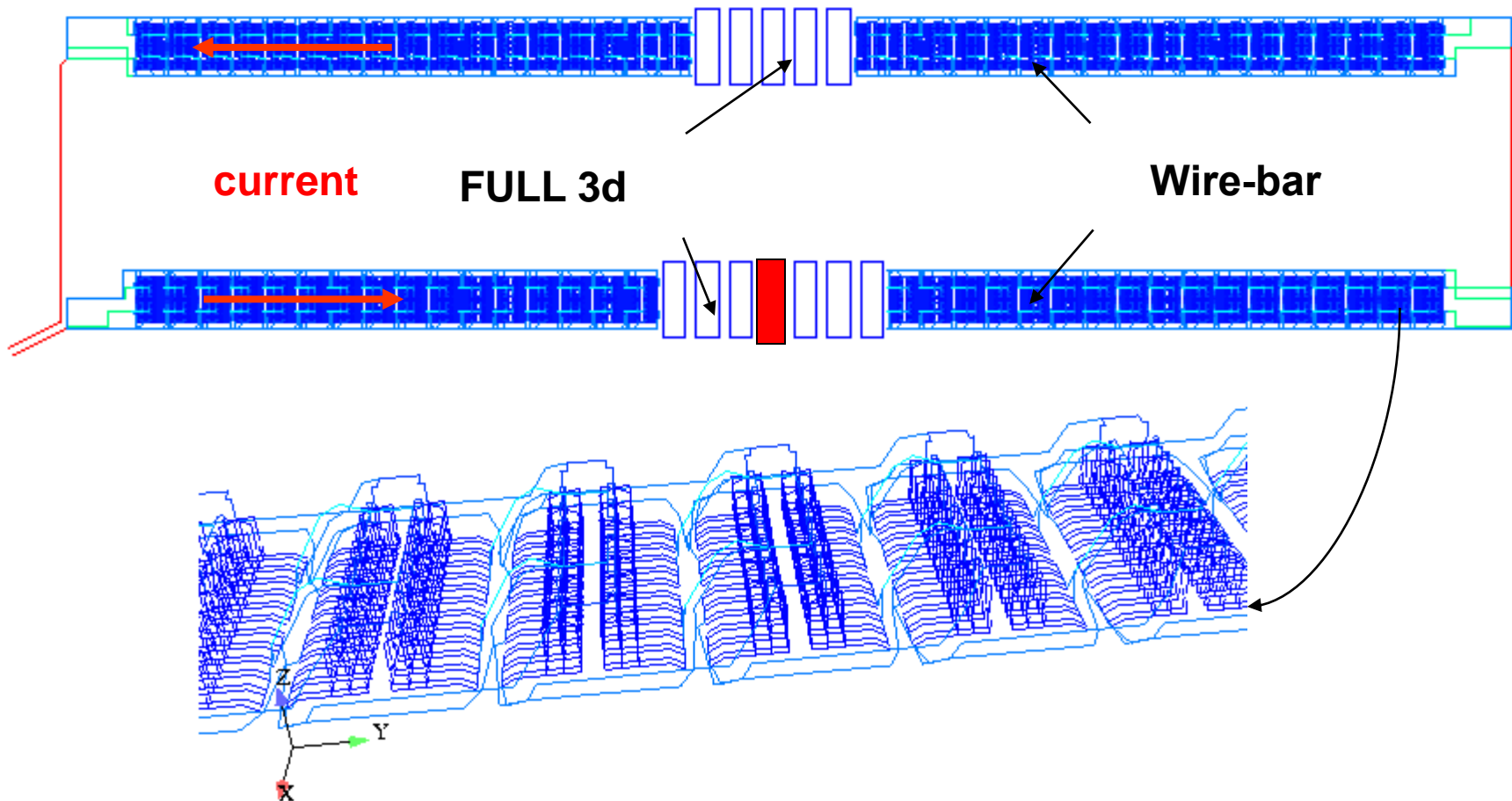
# Calcul ligne THT 380/220KV – ligne enterrée

Jacques Antille : un « illuminé » ?



# Physical models

## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)



# Physical models

---

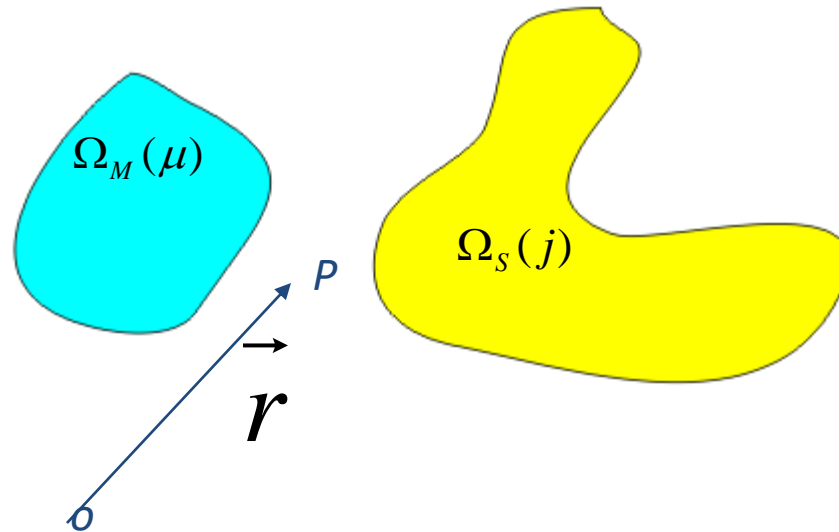
## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)

- the internal magnetic field / ferromagnetism
- a ferromagnetic material, placed in a external magnetic field becomes and remain magnetized when the field is removed
- magnetization is suppressed when the material is hotter than its Curie temperature (770° for steel)
- in reduction cell, only steel is ferromagnetic (shell, cradles, collector bars where the temperature is lower than the Curie temperature
- since the ferro parts are magnetized, they give a contribution to the magnetic field. This contribution is not negligible!

# Physical models

---

## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)



the yellow domain is where the electrical currents are flowing. The cyan domain is the ferromagnetic material with a permeability  $\mu$ . We want to compute  $H(P)$  or  $B(P)$ , taking the presence of  $\Omega_M(\mu)$  into account.

# Physical models

---

## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)

we split the induction field into two components, magnetization induced by currents and magnetization coming from ferro materials:

$$H(P) = H_S(P) + H_M(P)$$

$H_S(P)$  is the source part (magnetic field generated by currents), and we have

$$H_S(r) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Lambda_S} \frac{j_S(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3} d\tau$$

because of this and Ampere's law :  $\nabla \times H_M = 0$  ,and thus

$$H_M = -\nabla \varphi_M$$

$\varphi_M$  Is the magnetic potential

# Physical models

---

## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)

constitutive relation:  $B = \mu \cdot H$

we define  $\chi = \mu_r - 1$ , thus  $\mu = (\chi + 1)\mu_0$  and

$$B = \mu_0 \cdot H + \chi \cdot \mu_0 \cdot H$$

This allows to define the magnetization  $M = \chi \cdot H$  and thus

$$B = \mu_0 \cdot (H + M)$$

$$B = \mu_0 \cdot (H_S + H_M + M)$$

# Physical models

---

## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)

after some treatment, we obtain an expression for  $H_M$

$$H_M(r) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Lambda_M} \nabla \left( M(r') \frac{(r' - r)}{|r' - r|^3} \right) \cdot d\tau$$

By assuming that  $M$  is uniform on each element of the discretisation, one can show that:

- one part of the integrand depends only of the geometry of the steel parts, which led to define a « geometrical factors »
- the integral equation is solved repeatedly, changing  $\chi$  at each step according to  $H$



# Physical models

---

## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)

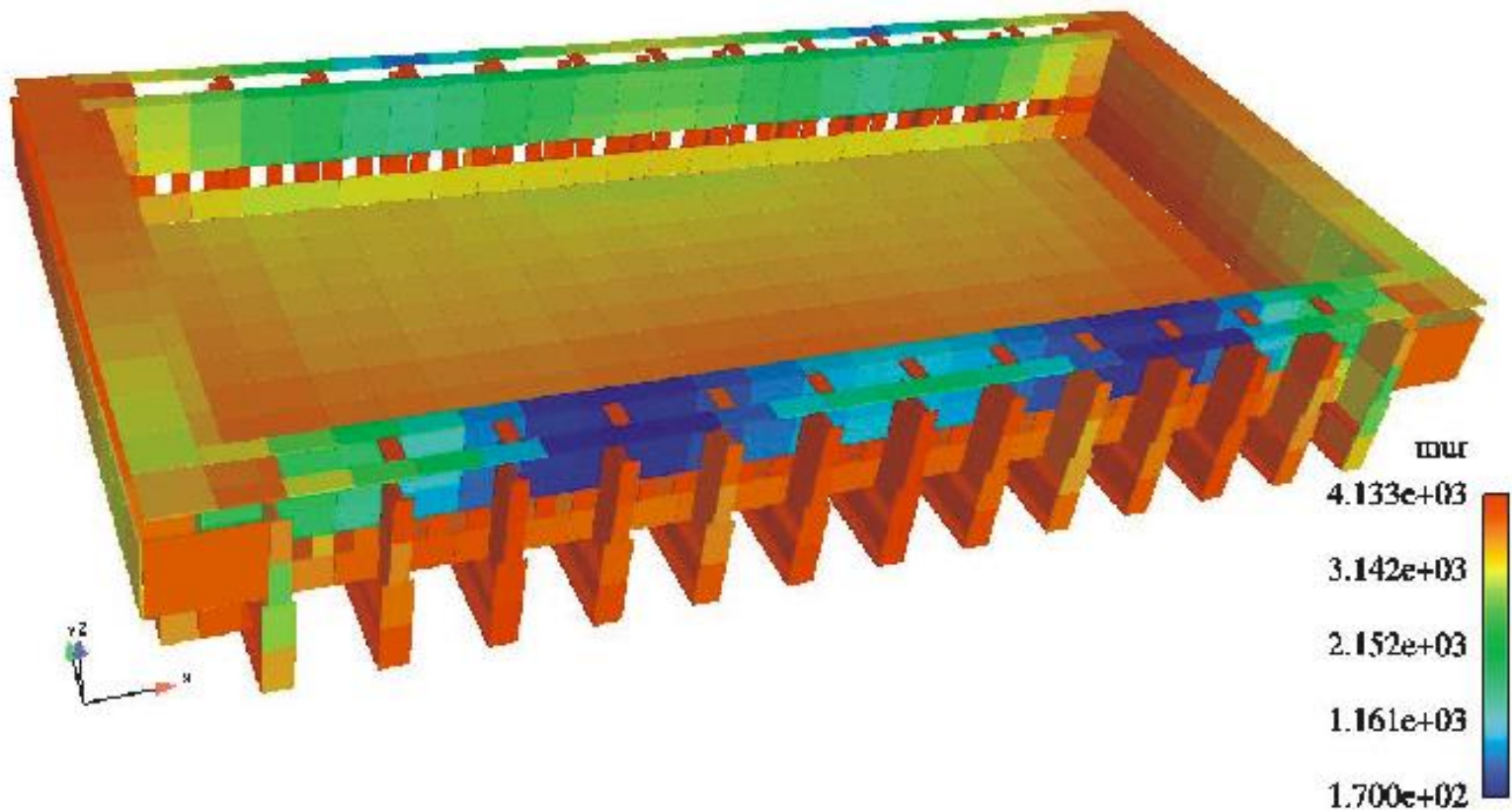
at the end, the ferro computations depends on:

- the  $B - H$  curve (link between B and H)
- the geometry of the ferro parts (geometrical factors)
- the induction field caused by the currents

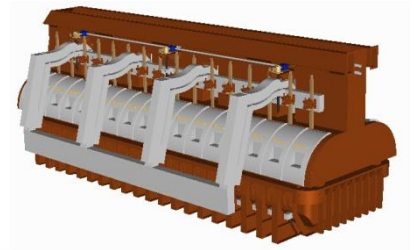
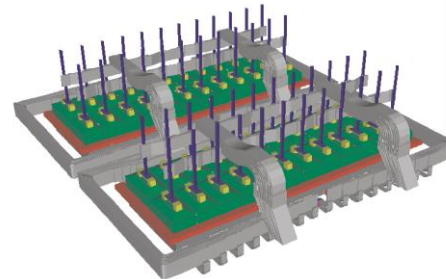
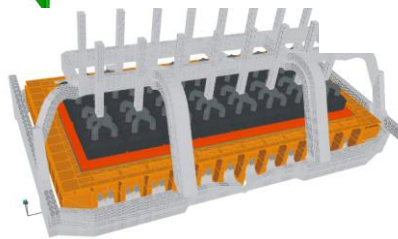
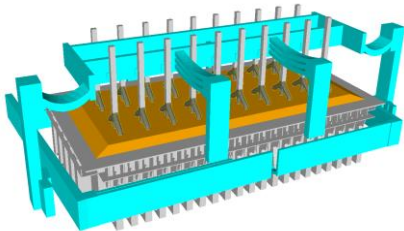
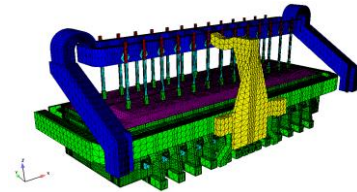
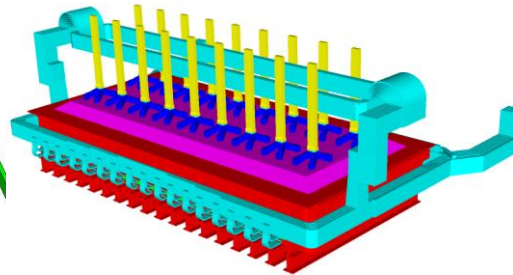
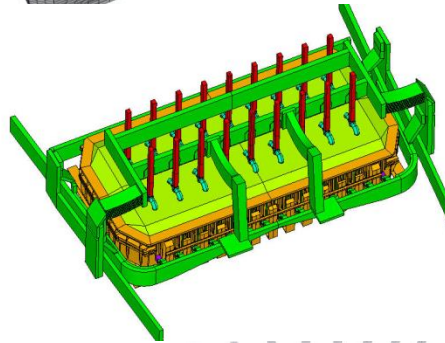
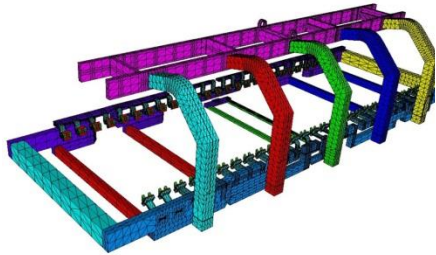
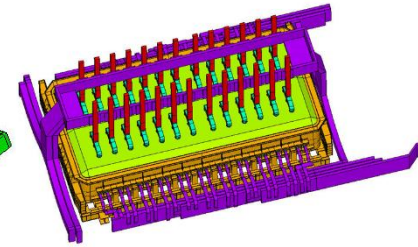
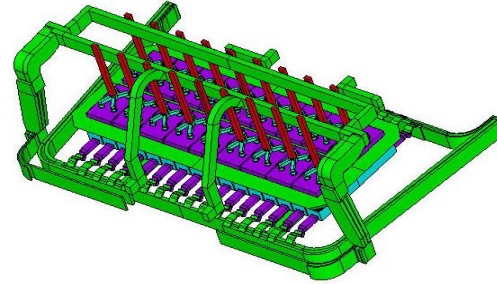
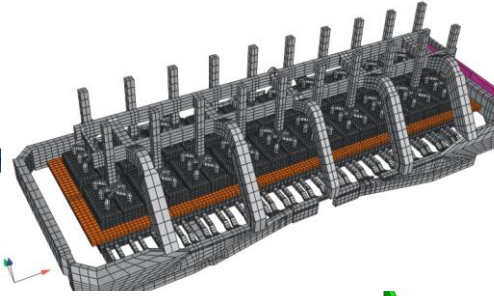
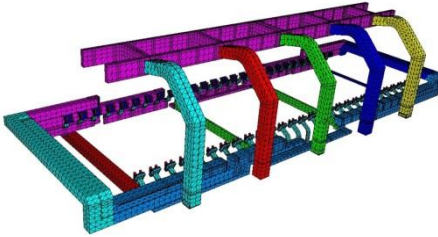
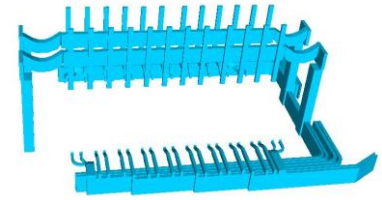
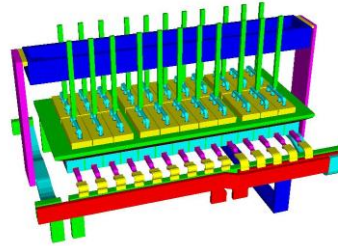
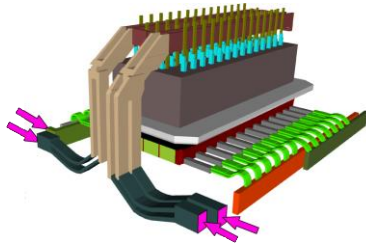
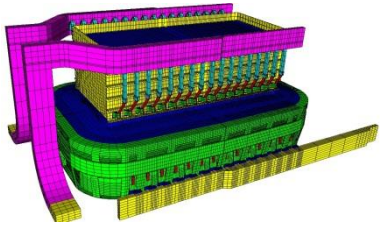
# Physical models

## ELECTROMAGNETIC MODULE (EM)

$\mu_r$  relative permeability



KAN-NAK studied many smelter technologies, among them:





# KAN-NAK is specialized in Hall-Héroult cells measurements



KAN-NAK  
Measurements container

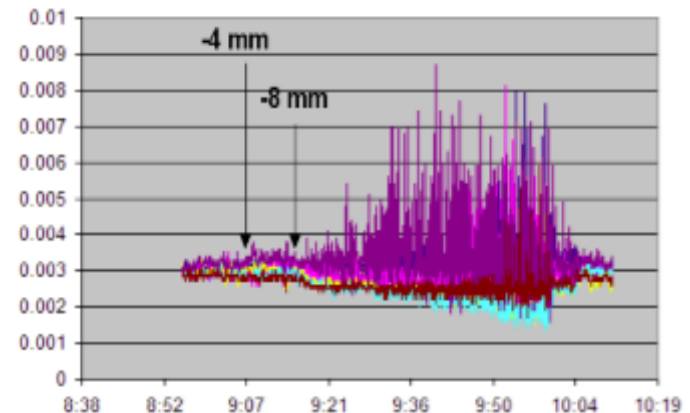


When modeling meets reality!



# Measurements

- Anode and collector bar current distribution
- Voltage drop (anodes, CVD and external)
- Surface temperature distribution
- In situ temperature and voltage measurements
- Heat flux
- Bath temperature ( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Bath liquidus temperature ( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- Ledge profile
- Magnetic field in liquid metal
- Metal upheaval
- Cell stability
- Cell starving



# RECENT PROJECT

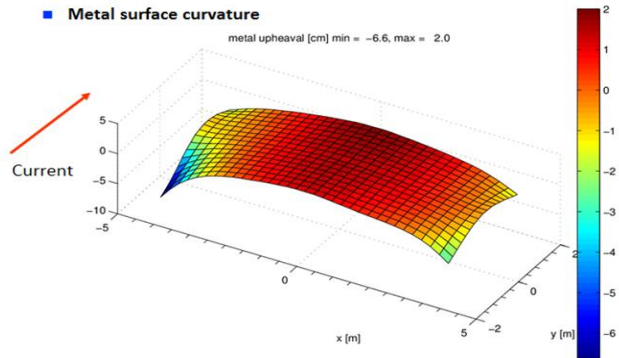




# Impact of copper inserts

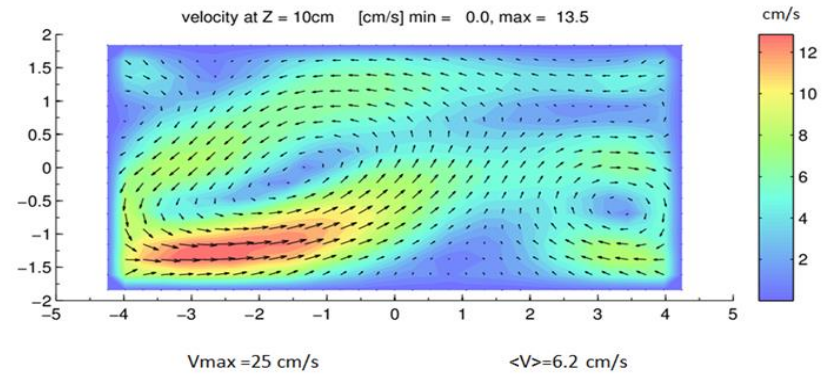
## Metal upheaval

Max. 8.6 cm



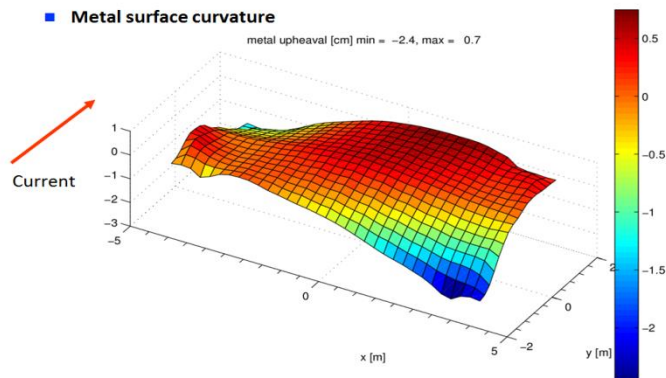
## Metal velocity

Max. 13.5 cm/s

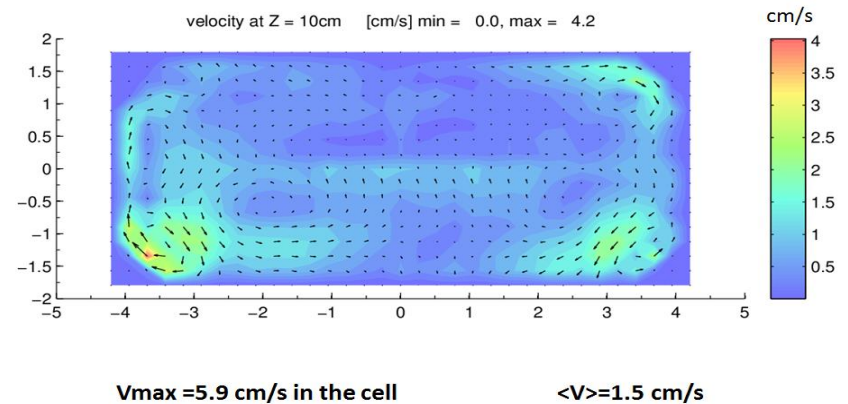


Reference cell

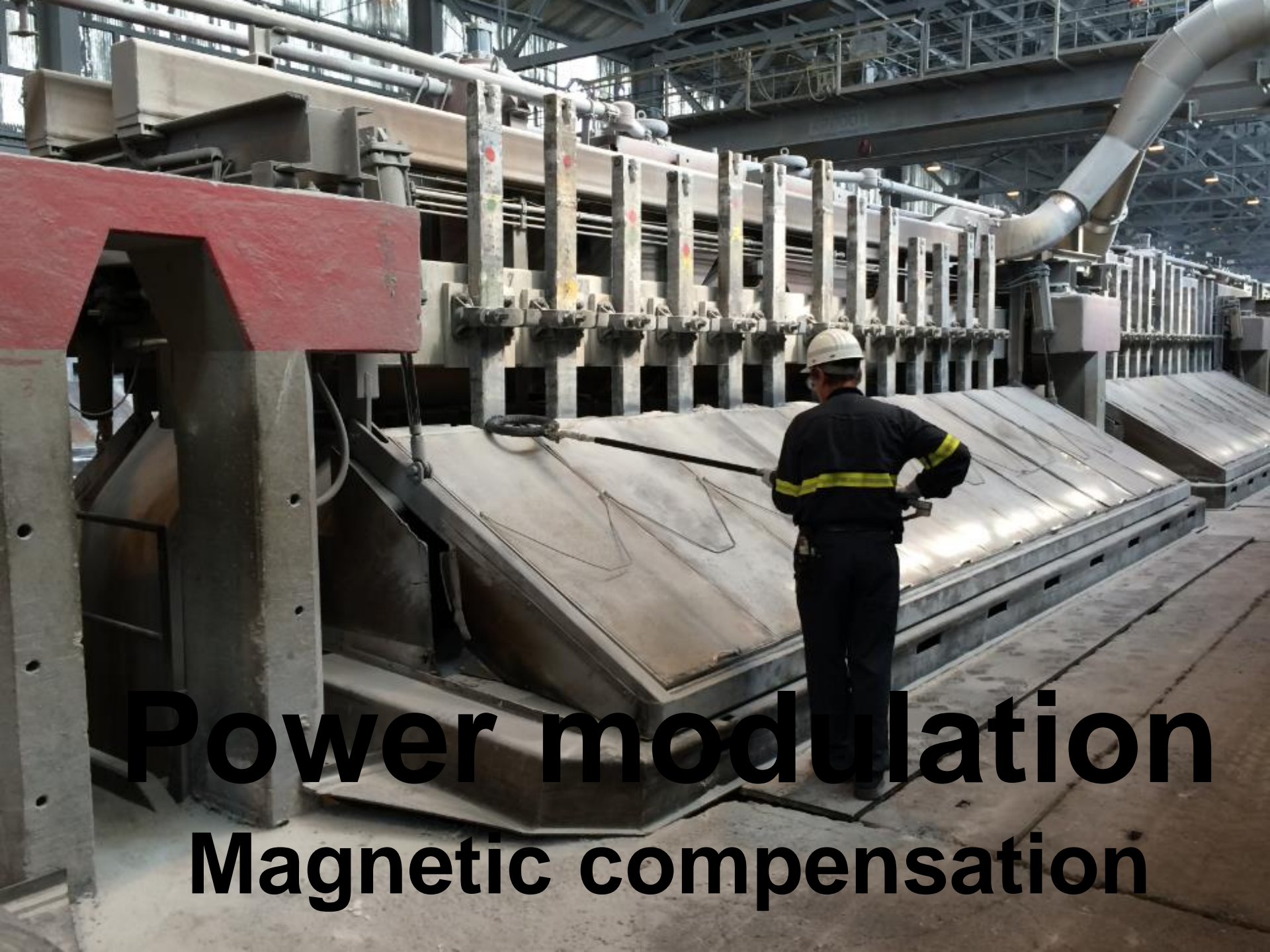
Max. 3.1 cm



Max. 4.2 cm/s



Optimized cell



**Power modulation**  
**Magnetic compensation**

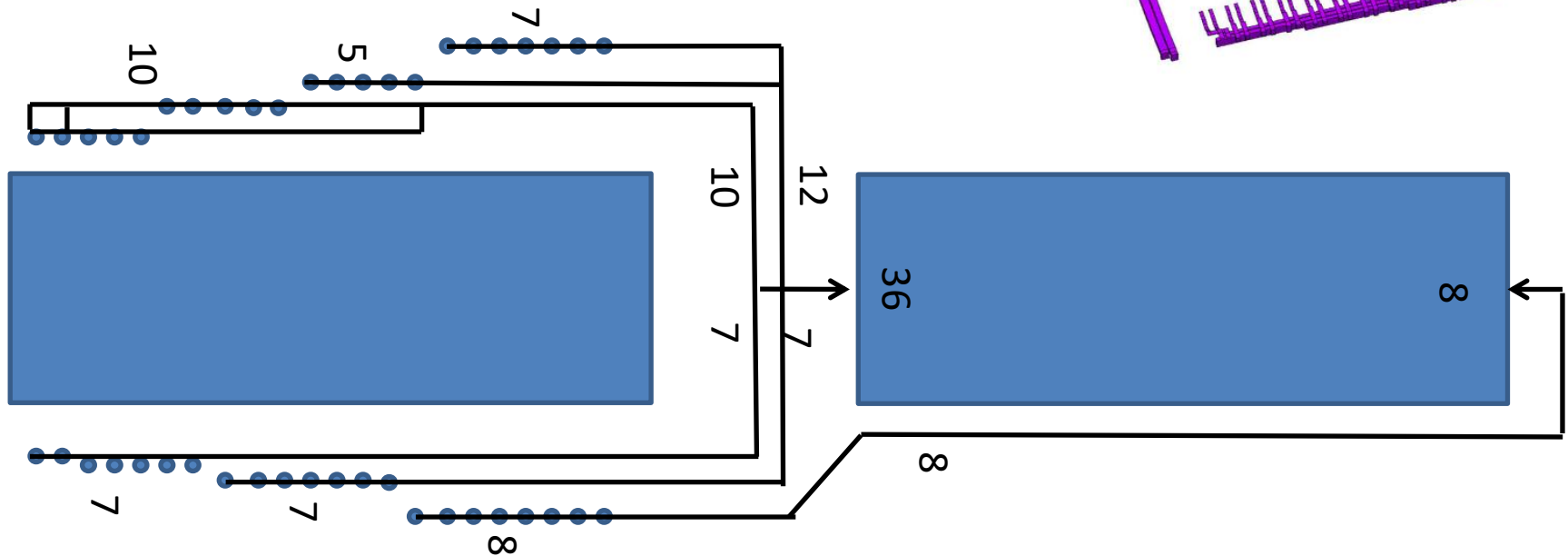


# Existing cell topology

Each number represents the number of collector bars.

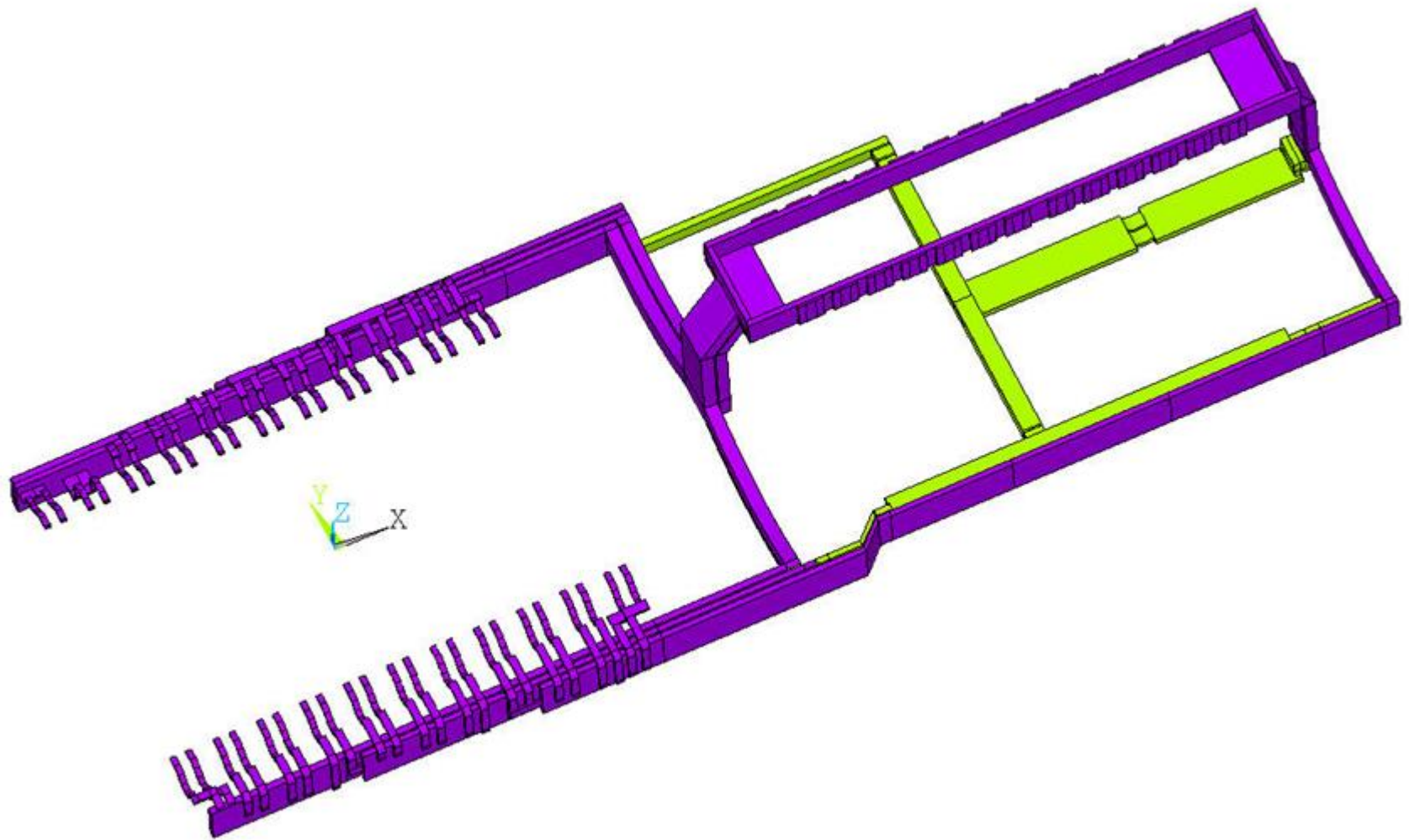
The current is proportional to this number.

One unit =  $162'000/44 = 3682$  A





# New 3D busbars

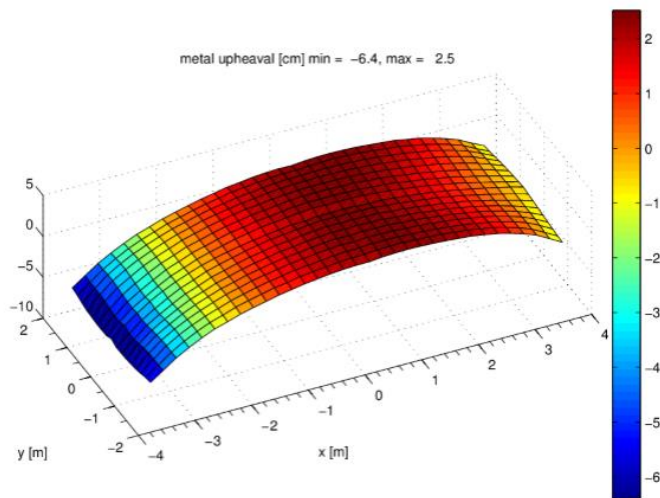


# TRIMET New busbars

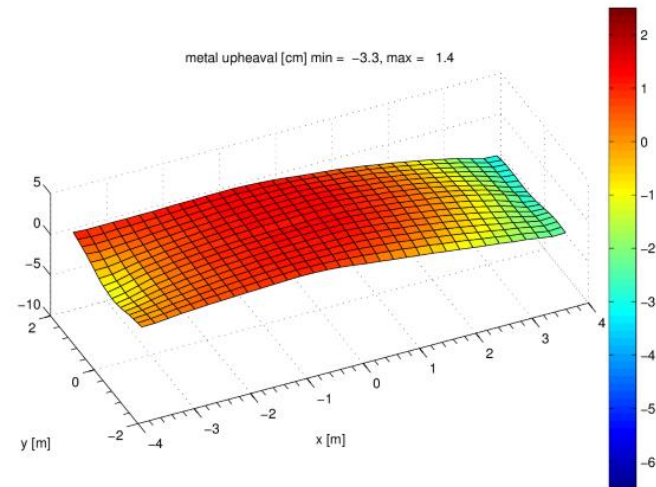


# TRIMET New busbars

- **Decrease of the external resistance from  $2.22 \mu\Omega$  to  $1.95 \mu\Omega$  (-12% or -0.15 kWh/kg)**
- **Decrease of the metal deformation:**
  - **The maximum deformation decreases:**
    - **from 8.9 to 4.7 cm at 162 kA (-47%)**
    - **from 8.9 to 6.3 cm at 185 kA (-29%)**



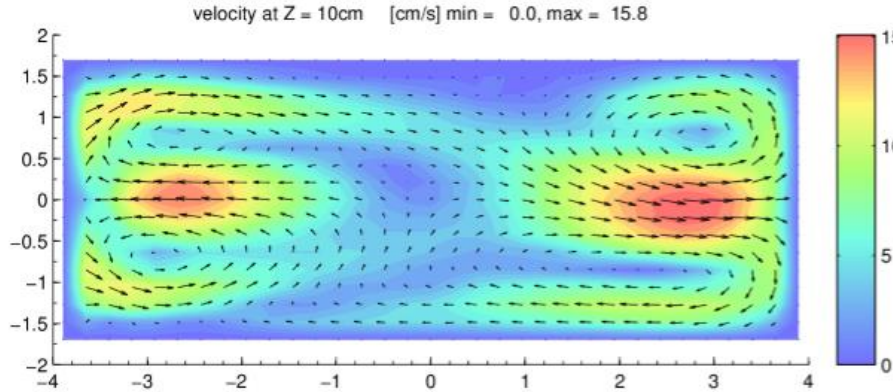
Existing busbars 162 kA, 8.9 cm



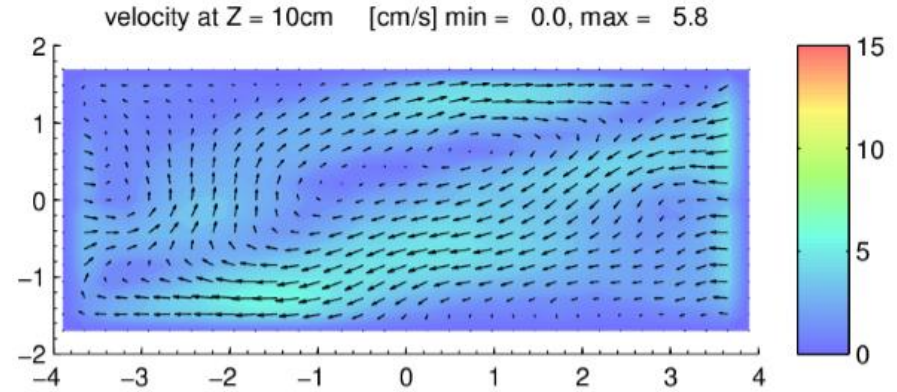
New busbars 162 kA, 4.7 cm

# Magnetic compensation

- **Decrease of the metal velocity field:**  
**The maximum metal velocity decreases:**
  - **from 16 to 6 cm/s at 162 kA (-62%)**
  - **from 16 to 7 cm/s at 185 kA (-56%)**



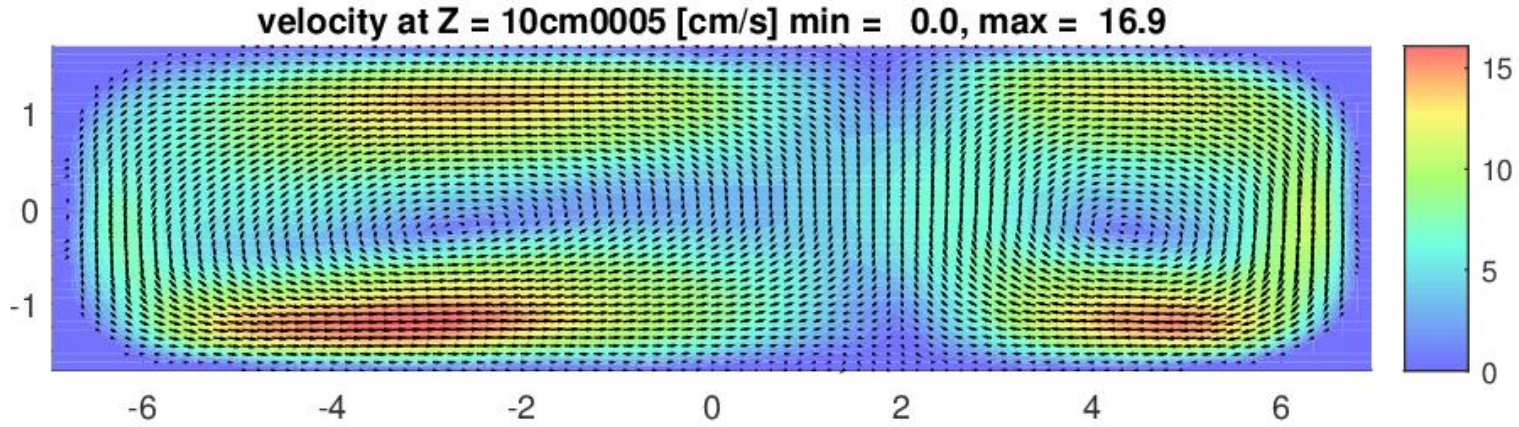
Existing busbars 162 kA, 16 cm/s



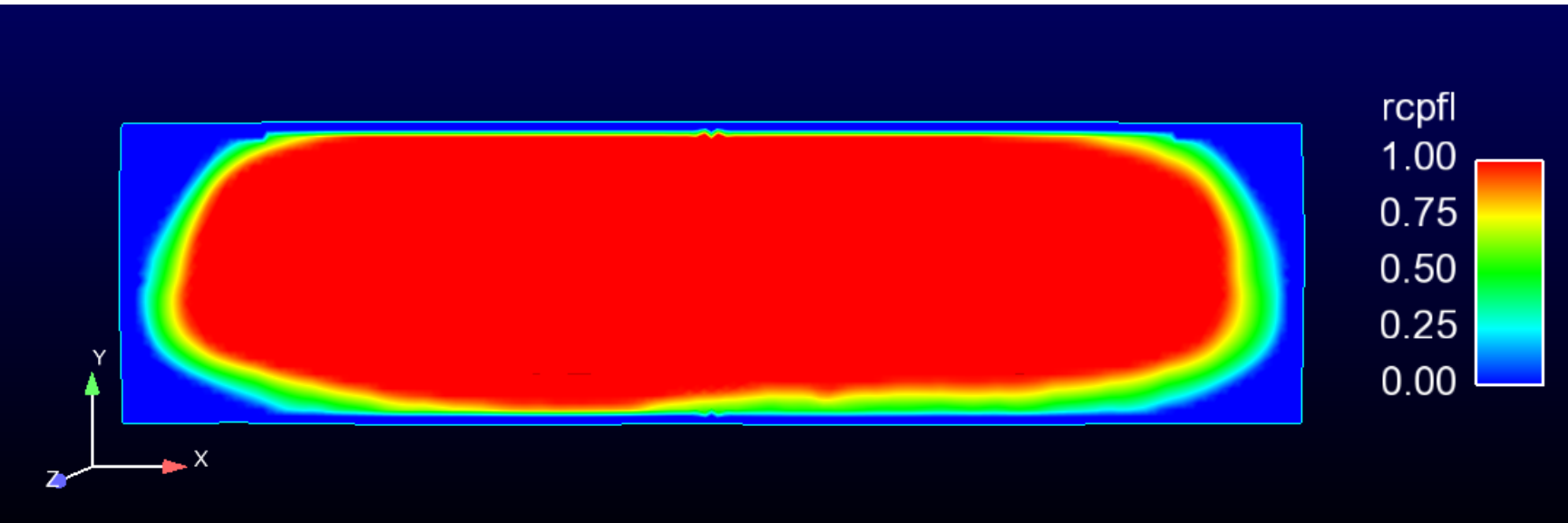
New busbars 162 kA, 6 cm/s



# Récent développement (couplage thermique-vitesse)



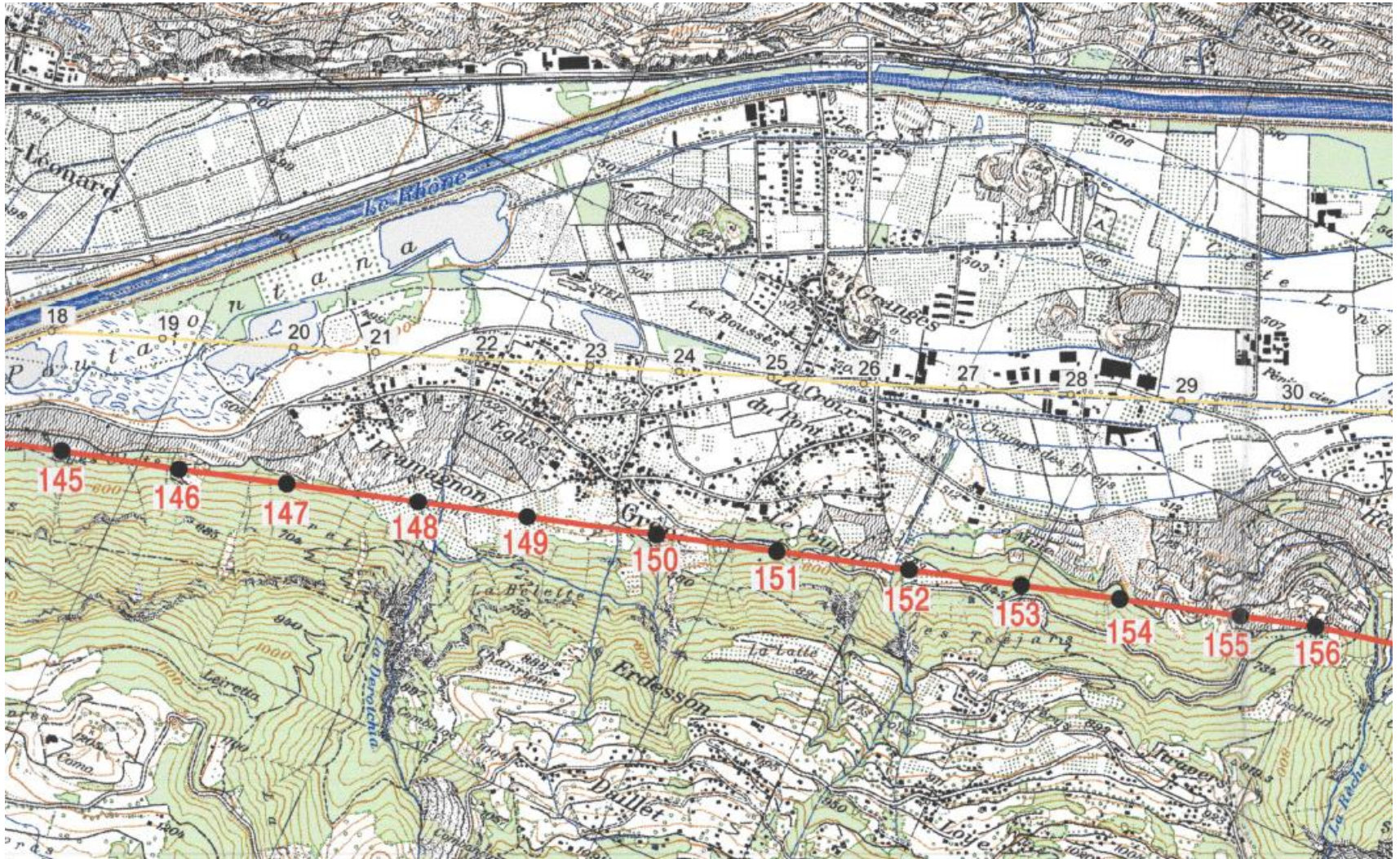
AP32 : Forme du bord





# Cas 1 : Grône

## Numérotation des pylônes

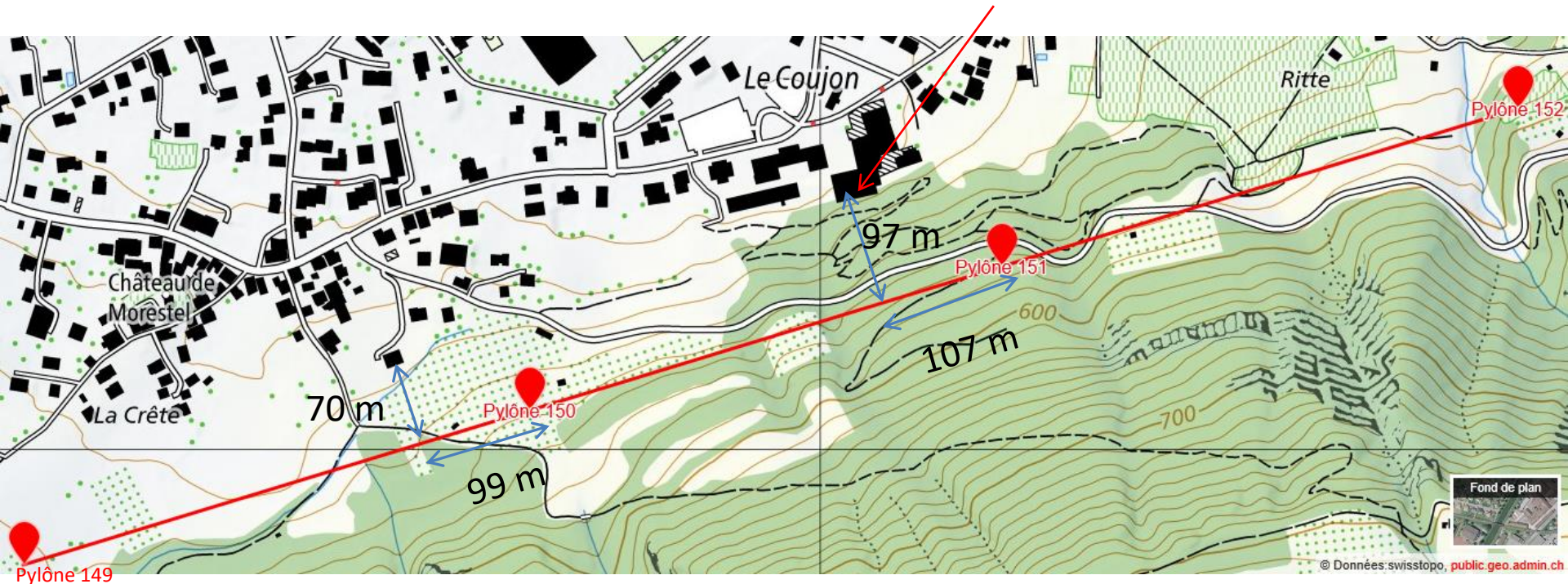




# Cas 1 : Grône

## Position de la salle de gymnastique

Salle de gymnastique (Alt.515 m )



N° Pylône	149	150	151	152
Alt. Terrain (m)	542.65	548.49	575.54	591.64
Dist. Entre pylône (m)	456.52	426.08	467.02	

Différence hauteur bas du pylône 151 et la salle de gymnastique:  $\approx 60$  m

# Cas 1 : Grône

## Type de pylône- position des phases

Chaque pylône a une hauteur différente

Pylône type CPC-2g

Hauteur du pylône : 58 m

La partie sommitale des pylônes est semblable

Position des phases /bas du pylône

Terne 380KV direction Grône

$H_R$  : 25 m

$H_S$  : 34 m

$H_T$  : 43 m

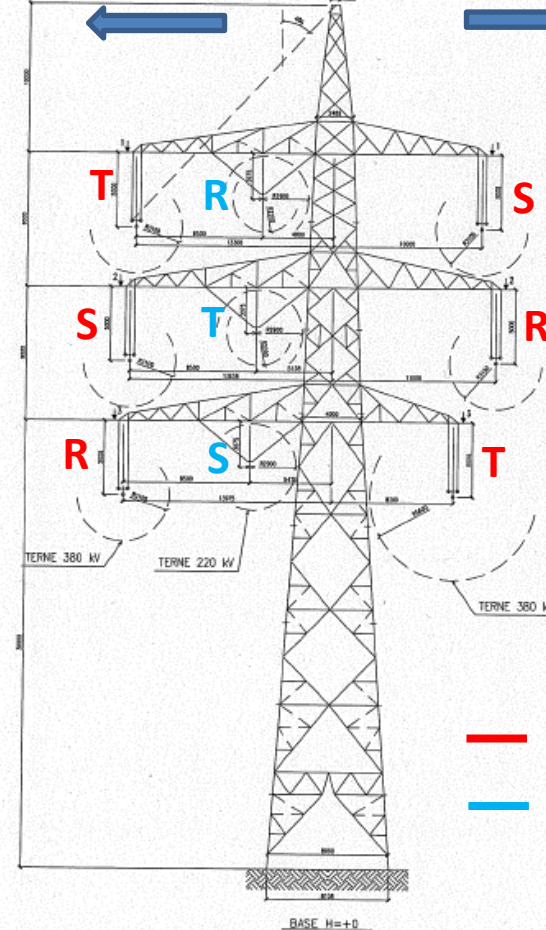
Ligne 220KV (2 câbles)

$H_S$  : 26.92 m

$H_T$  : 35.925 m

$H_R$  : 44.92 m

Direction Grône ←      → Direction Loye



— 380KV  
— 220KV

D P.A. 13.04.2007 MISE A JOUR SELON LETTRE ECR DU 10 AVRIL 2007.

HEBEL L.  
- 10/10 LES ÉDITIONS S.A.T. 91 000

Ligne 380/220/132/65 kV Chamoson - Chippis  
Pylône porteur sapin type "CPC-2g" (secteur 3)

DESSIN N° EGS : 84655

SILHOUETTE "GENERALE"

WT50378531

# Cas 1 : Grône

Courant par phase

$$I_{380KV} = 2230 \frac{A}{\text{phase}}$$

$$I_{220KV} = 2240 \frac{A}{\text{phase}}$$

$$I_R = I_{380-220KV} \cdot \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$I_S = I_{380-220KV} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

Avec  $\nu = 50 \text{ Hz}$

$$I_T = I_{380-220KV} \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

$$I_{Terne} = \frac{I_{380KV}}{3} \quad \text{Ligne 220KV, 2 câbles} \rightarrow I_{\text{câble}} = \frac{I_{220KV}}{2}$$

# Cas 1 : Grône

## Vérification ligne infinie

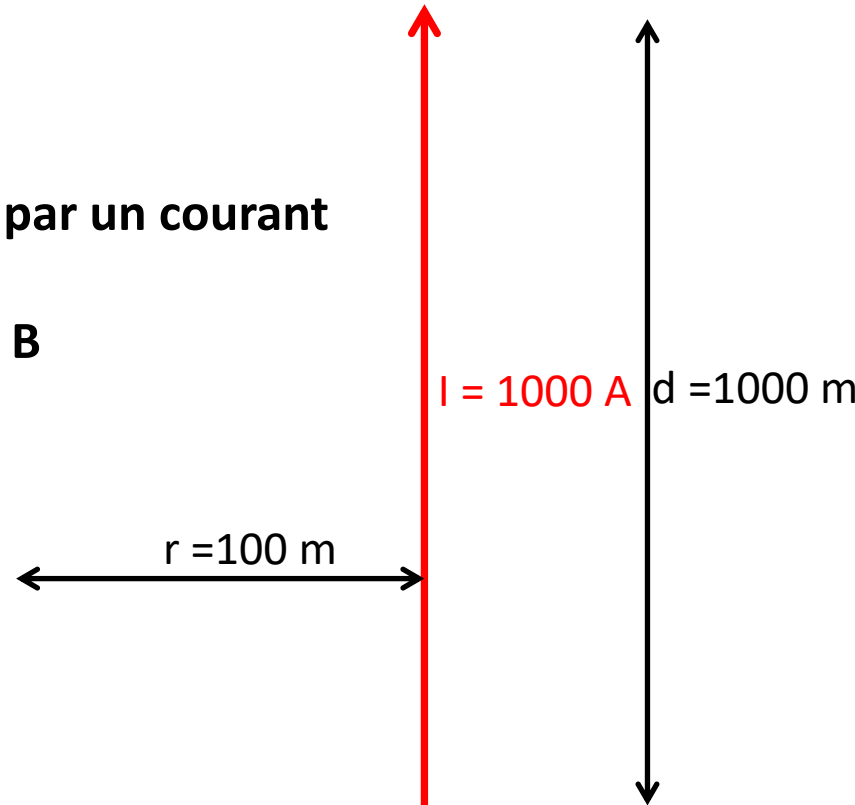
Soit une ligne infinie rectiligne parcourue par un courant

Le théorème d'Ampère permet de calculer B

$$B = 0.2 \frac{I(A)}{r(m)} \quad (\mu T)$$

Soit :

$$B = 0.2 \frac{1000}{100} = 2 \mu T$$



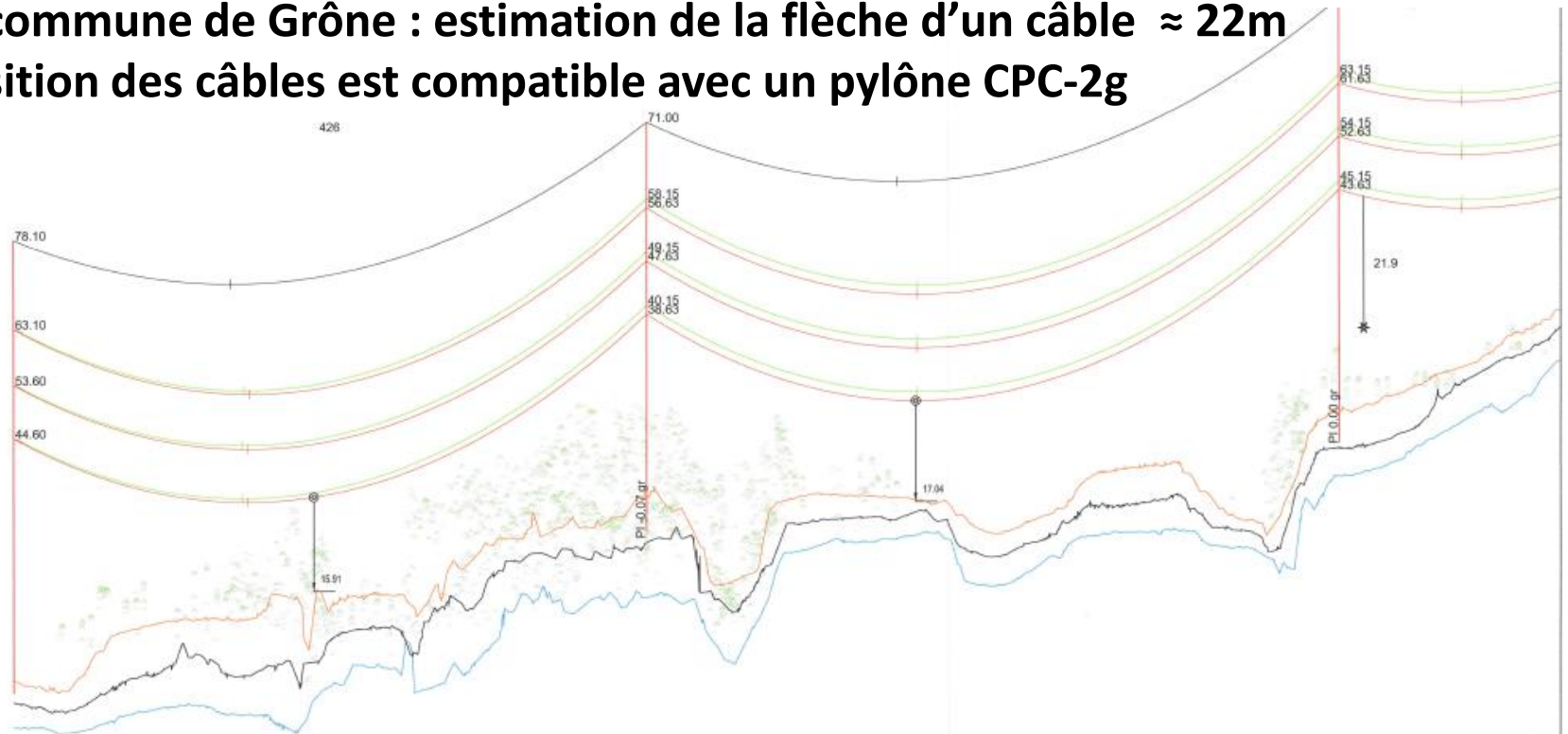
Les calculs sont réalisés par MONA (logiciel E.F.)  $\rightarrow B = 1.99 \mu T$



# Cas 1 : Grône

## Modélisation de la ligne

Plan commune de Grône : estimation de la flèche d'un câble  $\approx 22\text{m}$   
la position des câbles est compatible avec un pylône CPC-2g

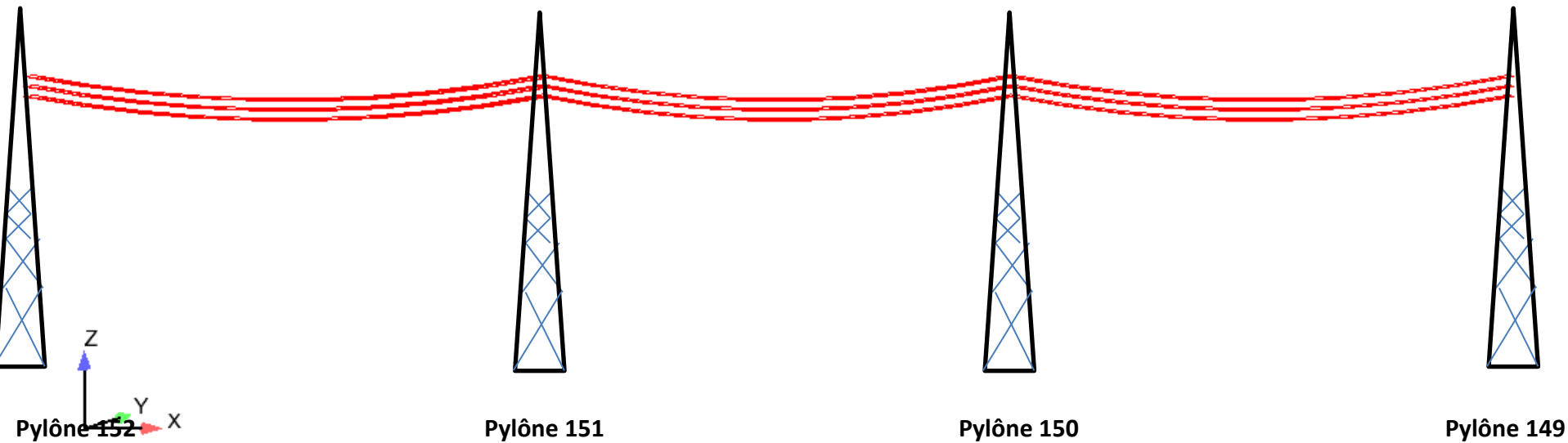


601748.02/ 122033.02	602155.74/ 122156.74	602802.49/ 122282.81
548.49	575.54	581.64
426.08	467.02	
150 CTC44	151 CPC42	152 CPC48

# Cas 1 : Grône

## Modélisation de la ligne

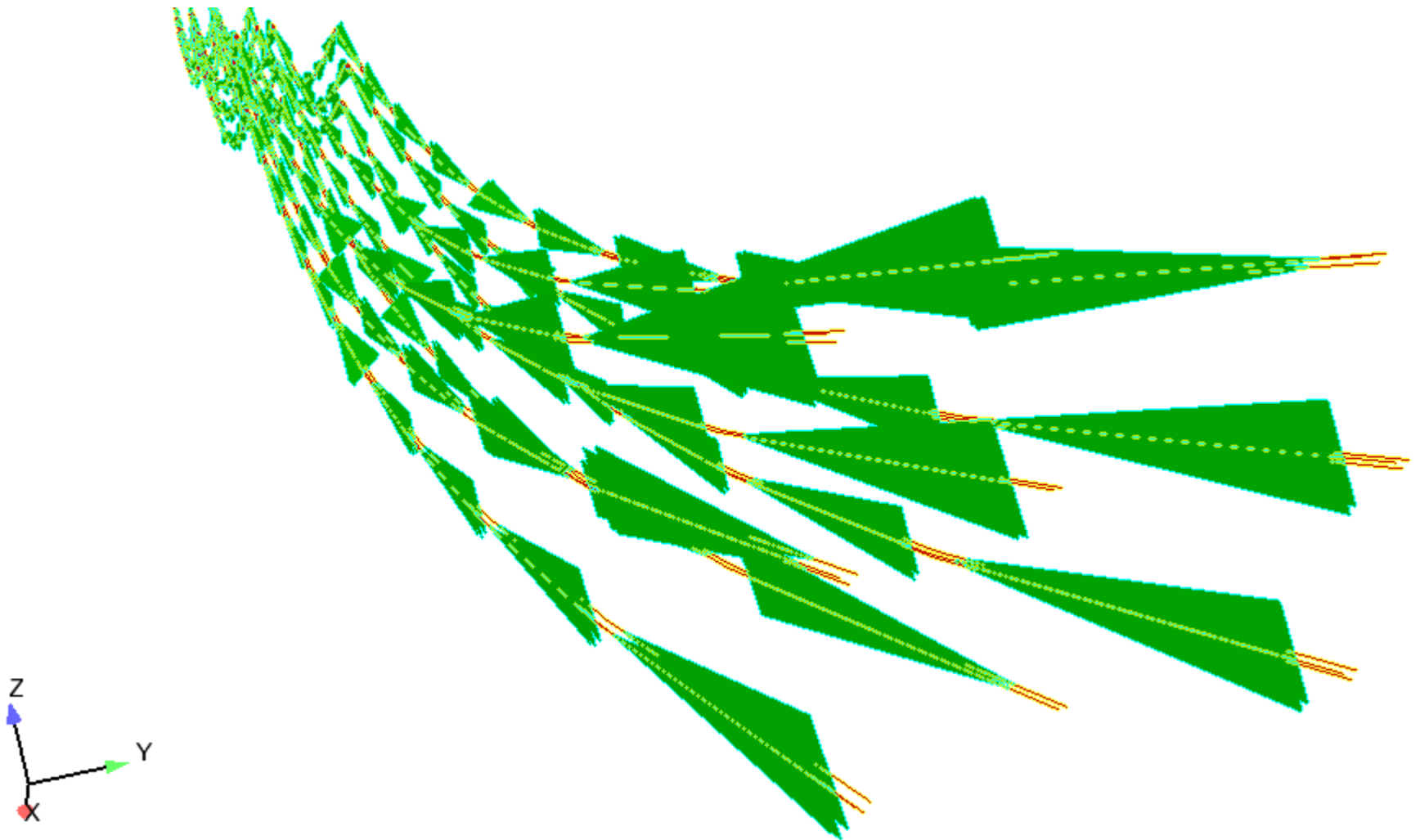
Hypothèses: - on tient compte de la hauteur des pylônes et de l'altitude  
- la flèche d'un câble est de 22 m (identique pour tous)



Salle de  
gymnastique

# Cas 1 : Grône

## Modélisation de la ligne



# Cas 1 : Grône

## Ordonnance

Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI)

- La valeur limite de l'installation est de 1  $\mu\text{T}$  pour la valeur efficace de la densité de flux magnétique

### Immissions:

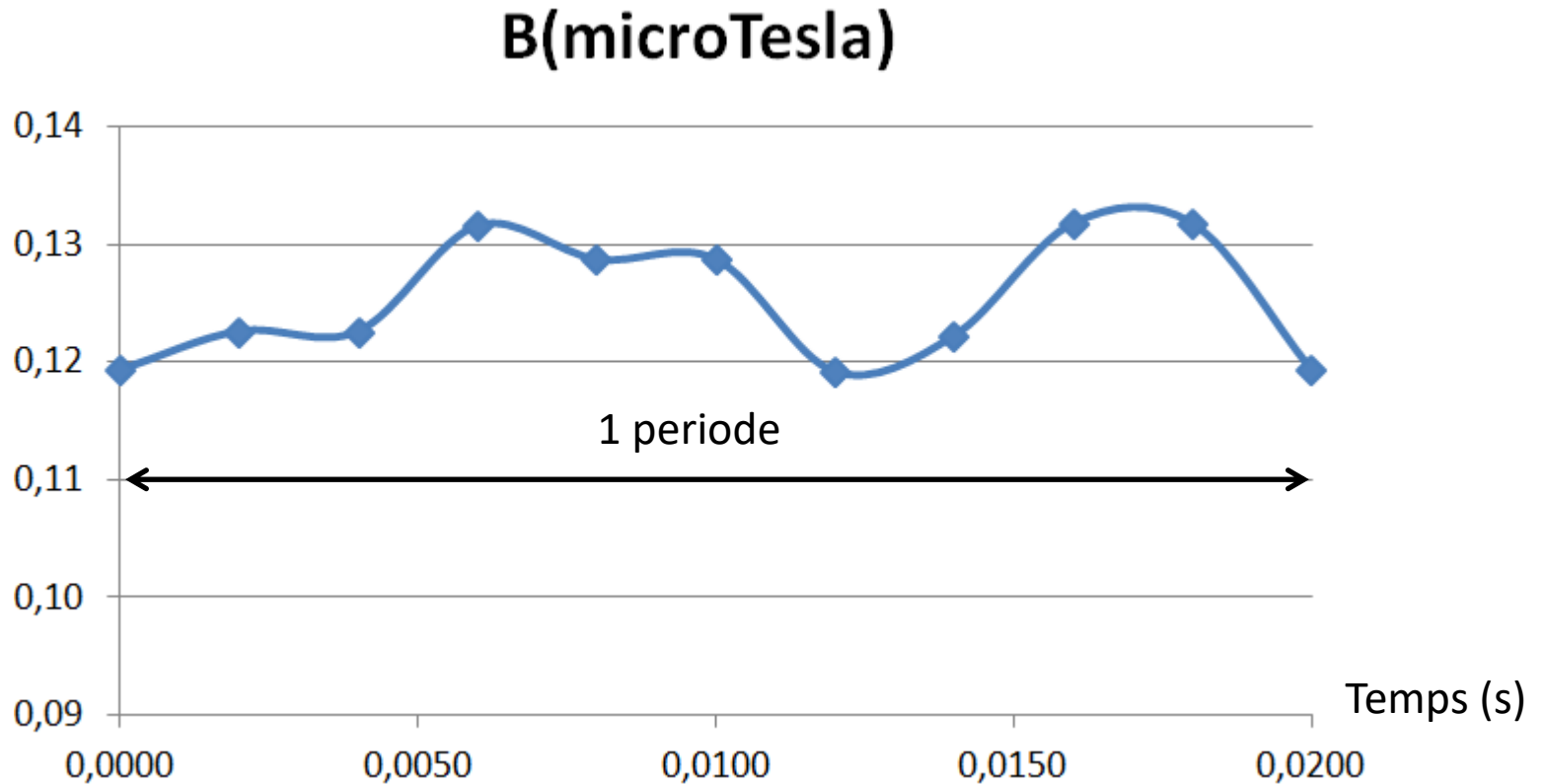
- Les valeurs limites d'immissions au sens de l'annexe 2 doivent être respectées partout où des personnes peuvent séjourner

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B(t)^2 \cdot dt}$$



# Cas 1 : Grône

Prédiction de B : salle de gymnastique



$$B_{\text{eff}} = 0.126 \mu\text{T}$$

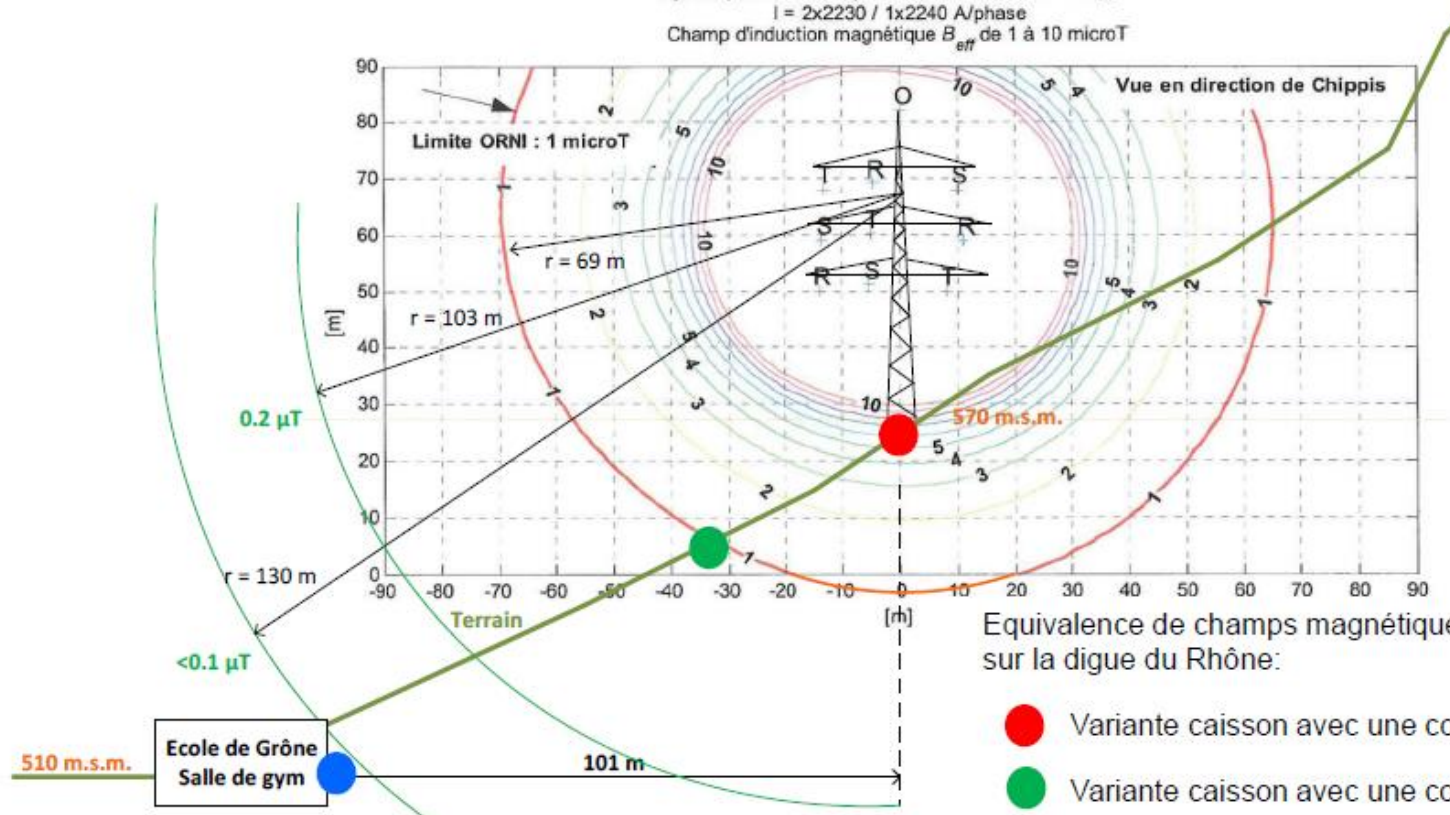
# Cas 1 : Grône

## 8. Comparaison avec le cas de Grône

## Prédiction de Swissgrid

Source: R3-THT Synergies 08.11.2016

Ligne Chamoson-Chippis - 2x380 kV (EOS) / 1x220 kV (EOS)  
 Pylone porteur CPC-2g - Tronçon St-Leonard - Chippis  
 $I = 2 \times 2230 / 1 \times 2240$  A/phase  
 Champ d'induction magnétique  $B_{eff}$  de 1 à 10 microT



Equivalence de champs magnétique pour une personne se promenant sur la digue du Rhône:

- Variante caisson avec une couverture de 2 m
- Variante caisson avec une couverture de 10.1 m
- Variante caisson avec une couverture de 28 m

La représentation du pylône sur la coupe ci-dessus permet une meilleure compréhension, mais il n'est pas à l'échelle juste. En effet, la coupe schématique présentée ci-dessus se situe quasiment à mi-distance entre deux pylônes. La flèche des câbles a comme conséquence que ceux-ci ne sont situés qu'à 30 m au-dessus du sol, alors qu'ils sont à 60 m au droit d'un pylône de 90m de haut.

# Cas 1 : Grône

**Prédiction de Swissgrid**  
Source: Rapport Collège d'Experts 2011

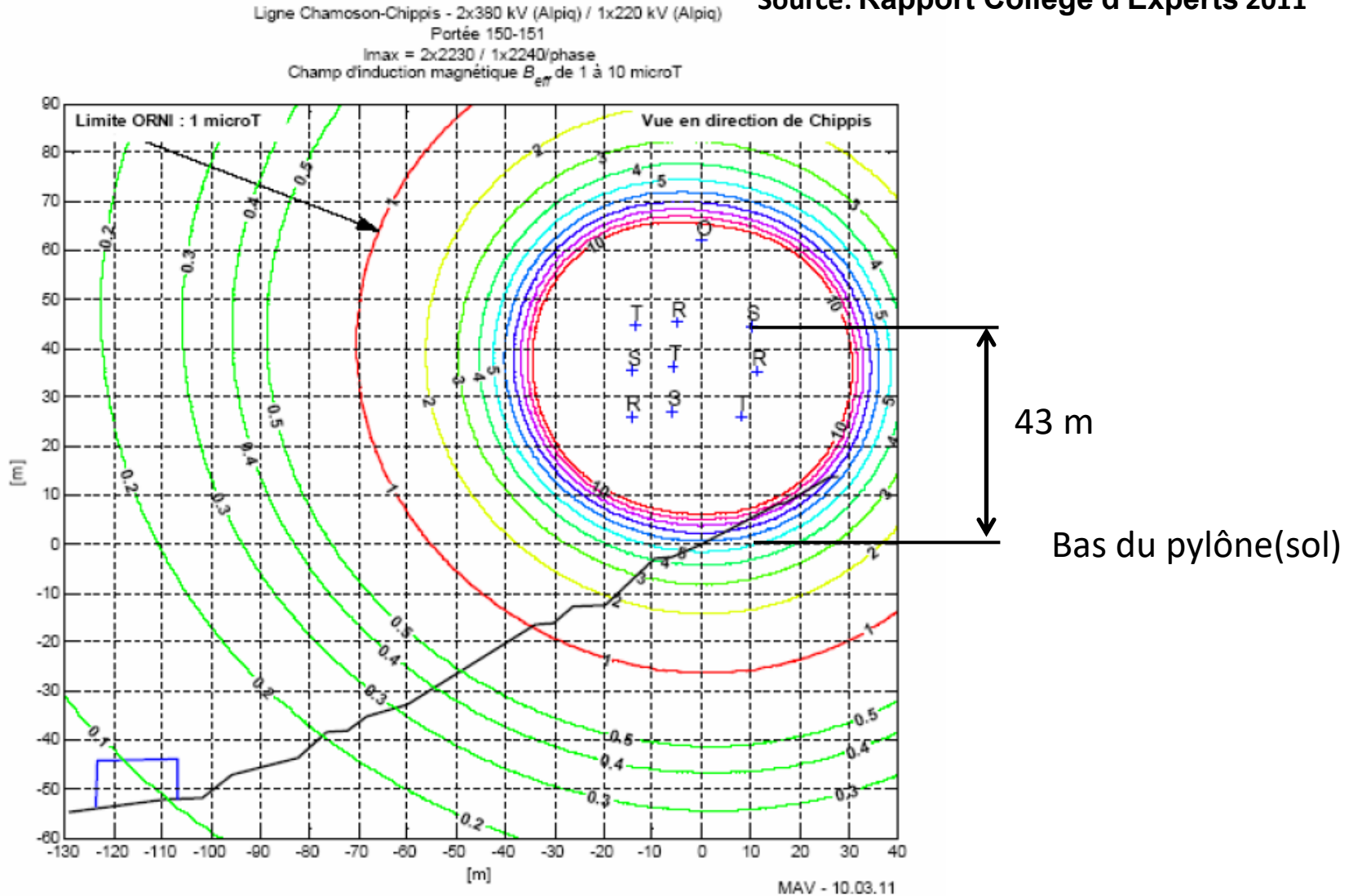


Abb. 4: Verteilung der magnetischen Flußdichte (in  $\mu\text{T}$ ) im Bereich der Schule (Grône)

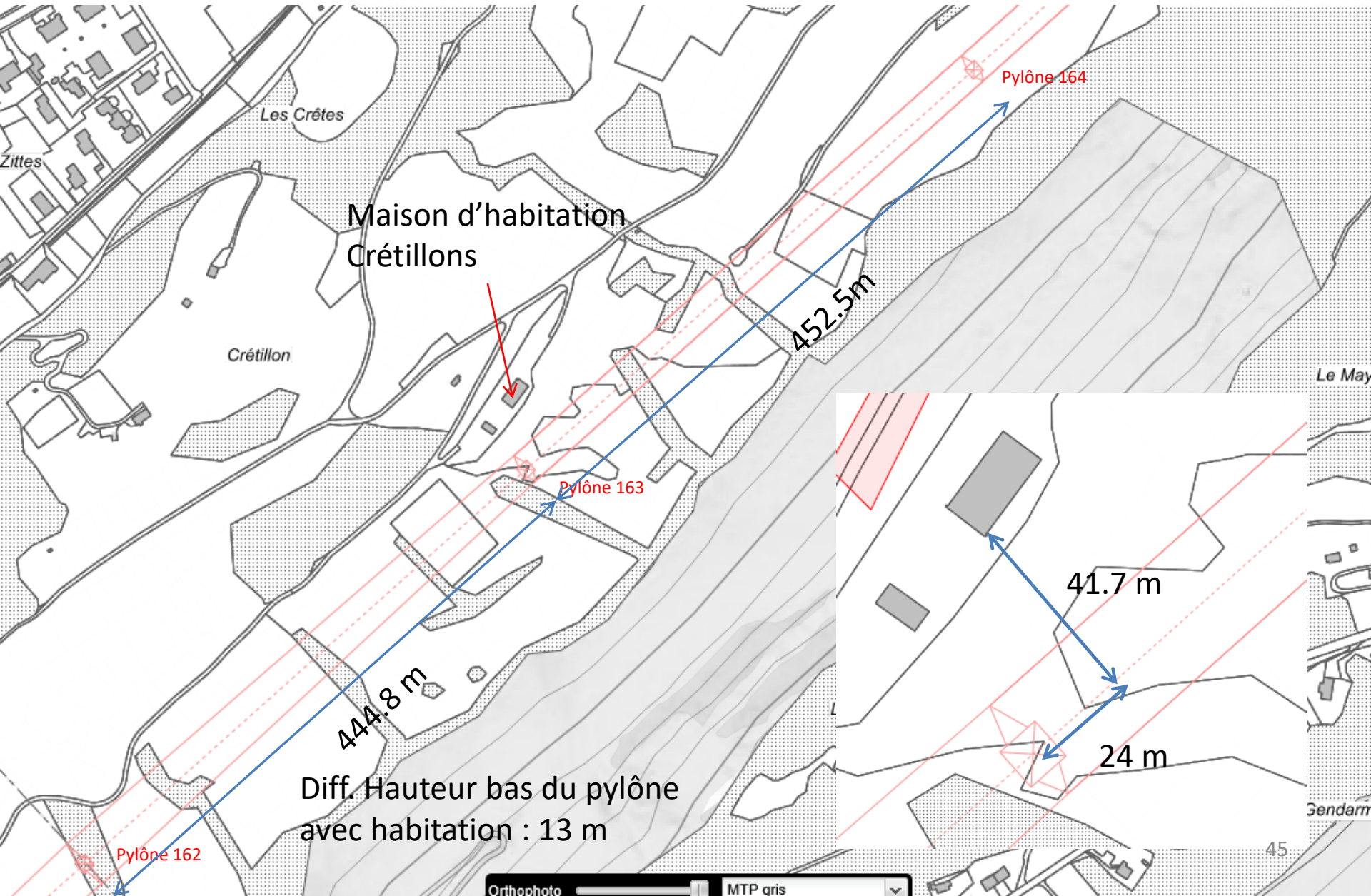
# Cas 1 : Grône

---

## Conclusions

- Predictions de Swissgrid :  $< 0.1 \mu\text{T}$  et  $0.12 \mu\text{T}$
- Prediction par MONA :  $B_{\text{eff}} = 0.126 \mu\text{T}$  en accord avec Swissgrid
  - la taille des pylônes, position des phases et les courants sont réalistes

# Cas 2 : Ferme des Crétilons

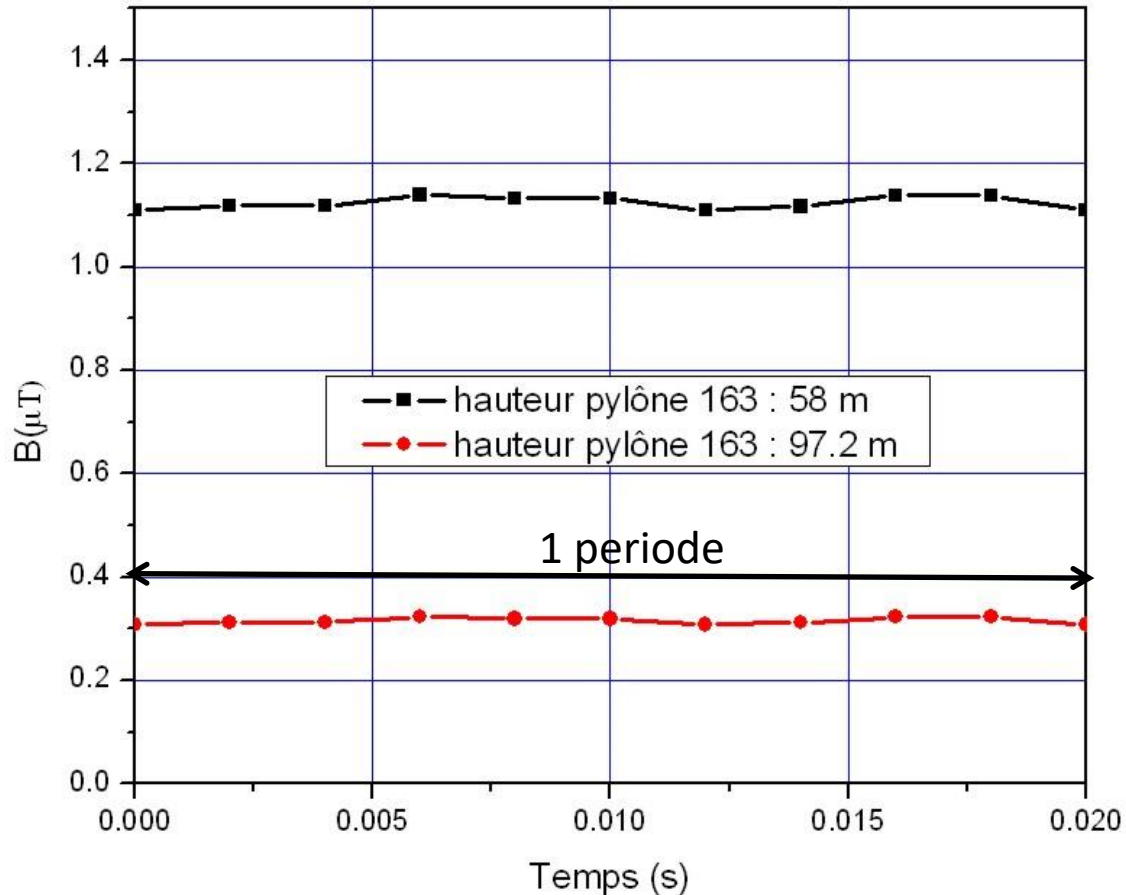




# Cas 2 : Ferme des Créteilons

## Prédiction de B : ferme des Créteilons

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



Hauteur du pylône 163

$B_{\text{eff}}$

58 m

1.12

97.2 m (actuel)

0.32

# Cas 2 : Ferme des Créteilons

Prédiction de Swissgrid  
Source: Rapport Collège d'Experts 2011

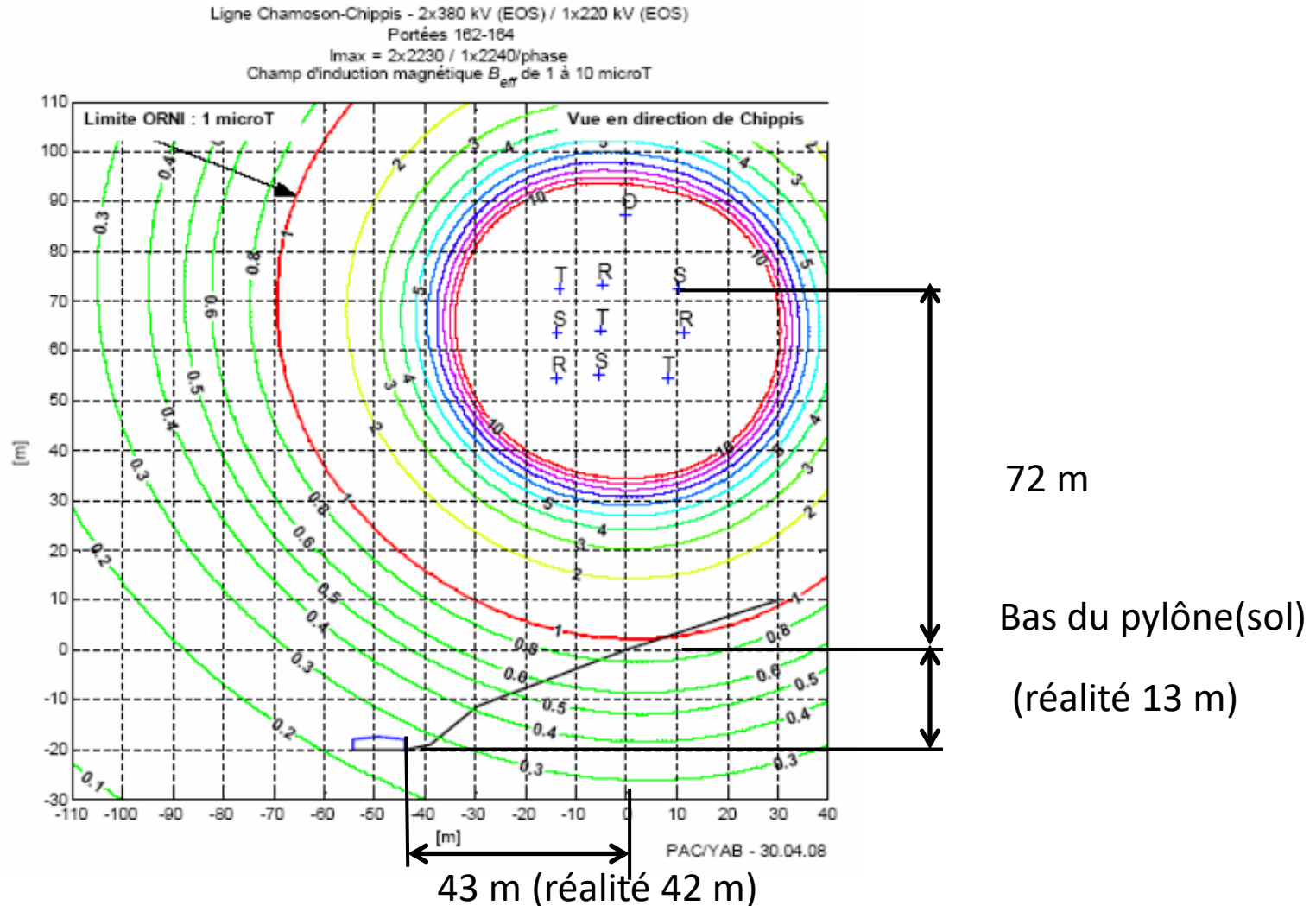
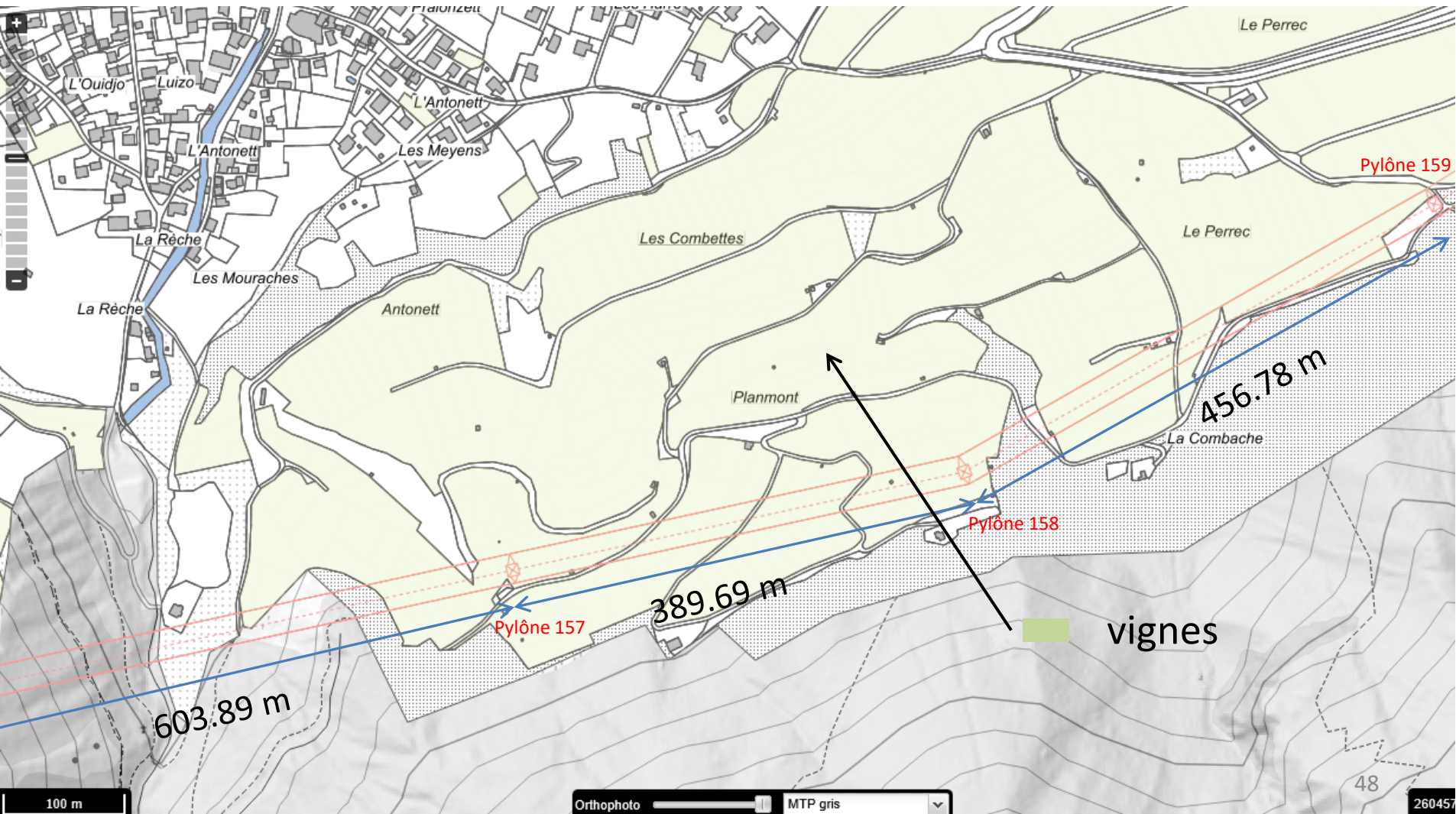


Abb. 5: Verteilung der magnetischen Flußdichte (in  $\mu T$ ) im Bereich Zeppellaz-Portees

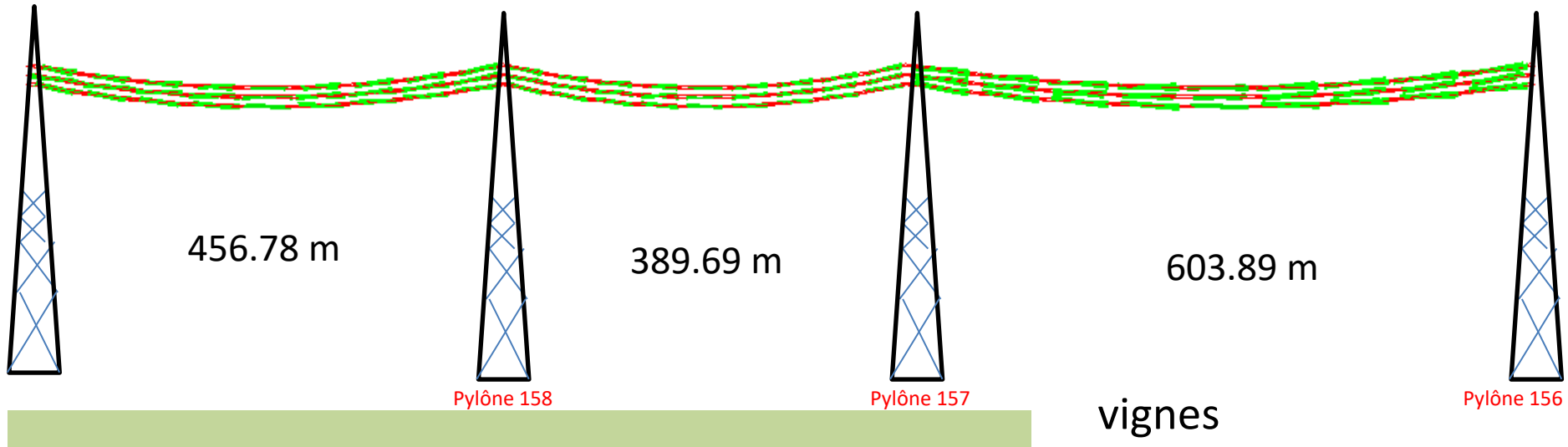
# Cas 3 : Prédiction de B entre 2 pylônes

## Vignes sous les pylônes (Planmont au-dessus de Réchy)



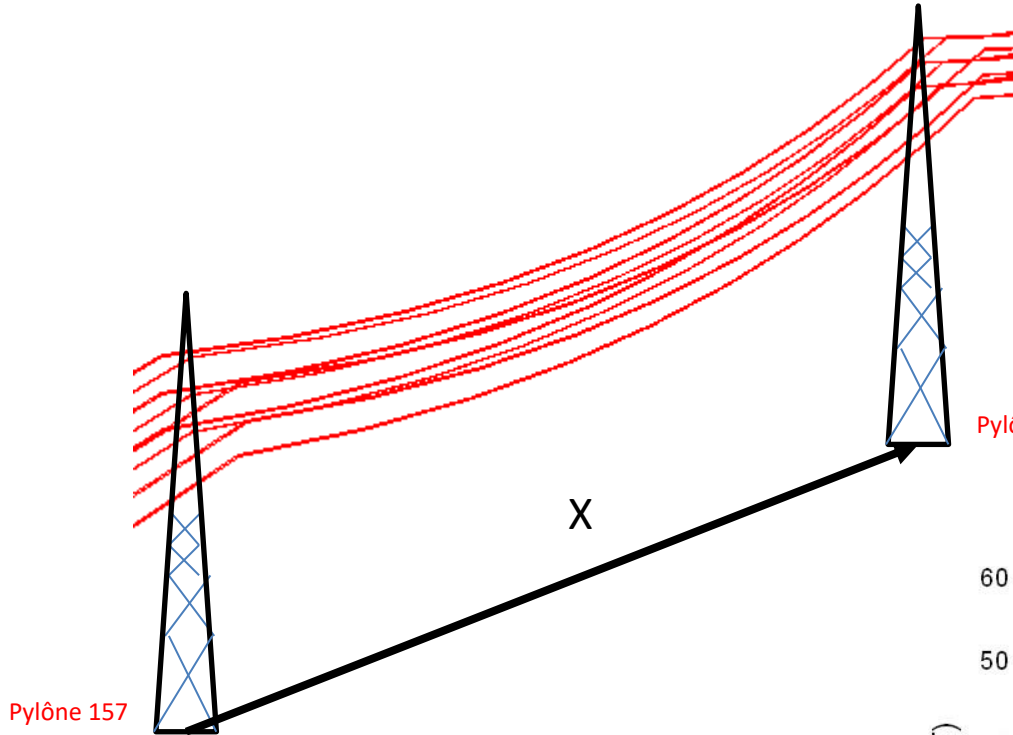
# Cas 3 : Prédiction de B entre 2 pylônes

Vignes sous les pylônes (Planmont au-dessus de Réchy)



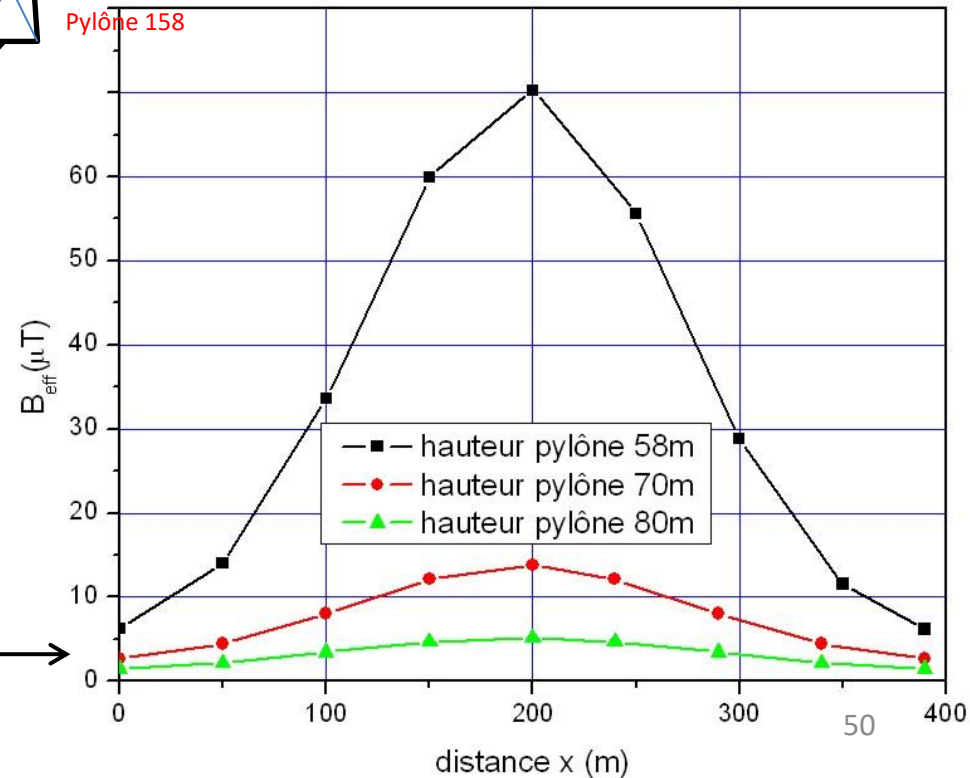
# Cas 3 : Prédiction de B entre 2 pylônes

Vignes sous les pylônes (Planmont au-dessus de Réchy)



Prédiction de B entre les pylônes

2x380KV / 1x220KV I<sub>max</sub> = 2x2230 A / 1x2240 A /phase



Entre 1.5 et 6.3  $\mu\text{T}$  sous l'axe du pylône

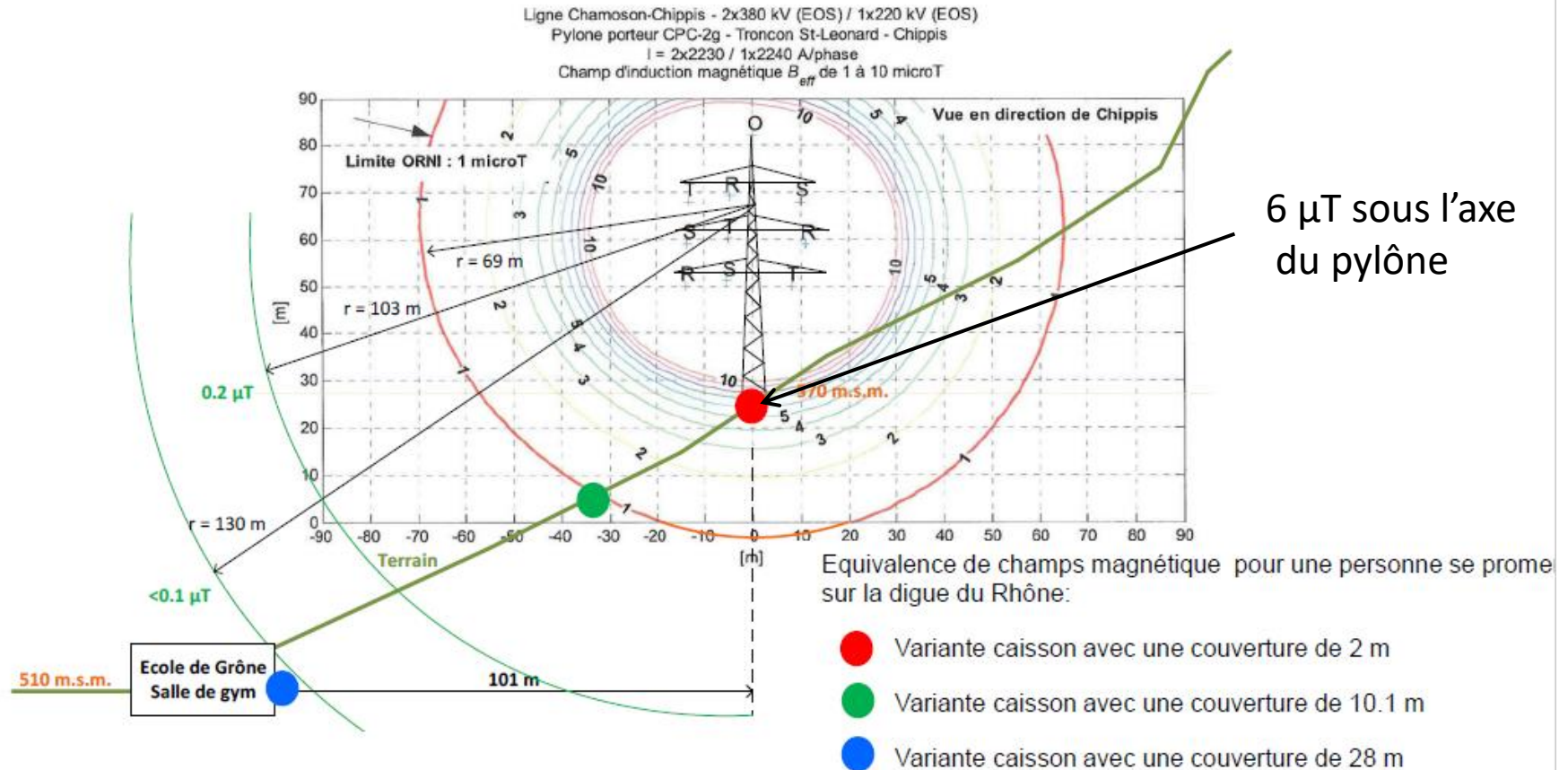




# Cas 3 : Prédiction de B entre 2 pylônes

## Comparison avec la valeur de Swissgrid sous le pylône

### 8. Comparaison avec le cas de Grône



La représentation du pylône sur la coupe ci-dessus permet une meilleure compréhension, mais il n'est pas à l'échelle juste. En effet, la coupe schématique présentée ci-dessus se situe quasiment à mi-distance entre deux pylônes. La flèche des câbles a comme conséquence que ceux-ci ne sont situés qu'à 30 m au-dessus du sol, alors qu'ils sont à 60 m au droit d'un pylône de 90m de haut.

# Cas 3 : Prédiction de B entre 2 pylônes

## Conclusions

- Au niveau du sol et dans l'axe des pylônes  $B_{\text{eff}}$  est toujours  $> 1 \mu\text{T}$
- $B_{\text{eff}}$  est compris entre 1.5 et 6.3  $\mu\text{T}$  au droit d'un pylône
- $B_{\text{eff}}$  atteint 70  $\mu\text{T}$  entre les pylônes pour une hauteur de 58 m
- $B_{\text{eff}}$  décroît très rapidement avec la hauteur du pylône
- Un corridor de  $\pm 60$  m sous l'axe de la ligne avec  $B_{\text{eff}} > 1 \mu\text{T}$ 
  - ce corridor peut s'élargir ou se rétrécir selon la position sur l'axe
  - dépend de la flèche des câbles
- Les vignes sous les pylônes sont-elles classées en LUS ?  
(lieux à utilisation sensible)

# Ligne enterrée

---

**Selon rapport : R3-THT Synergies 08.11.2016  
2 cas avec blindage ont été analysés**

Cas 1: Canal béton avec blindage

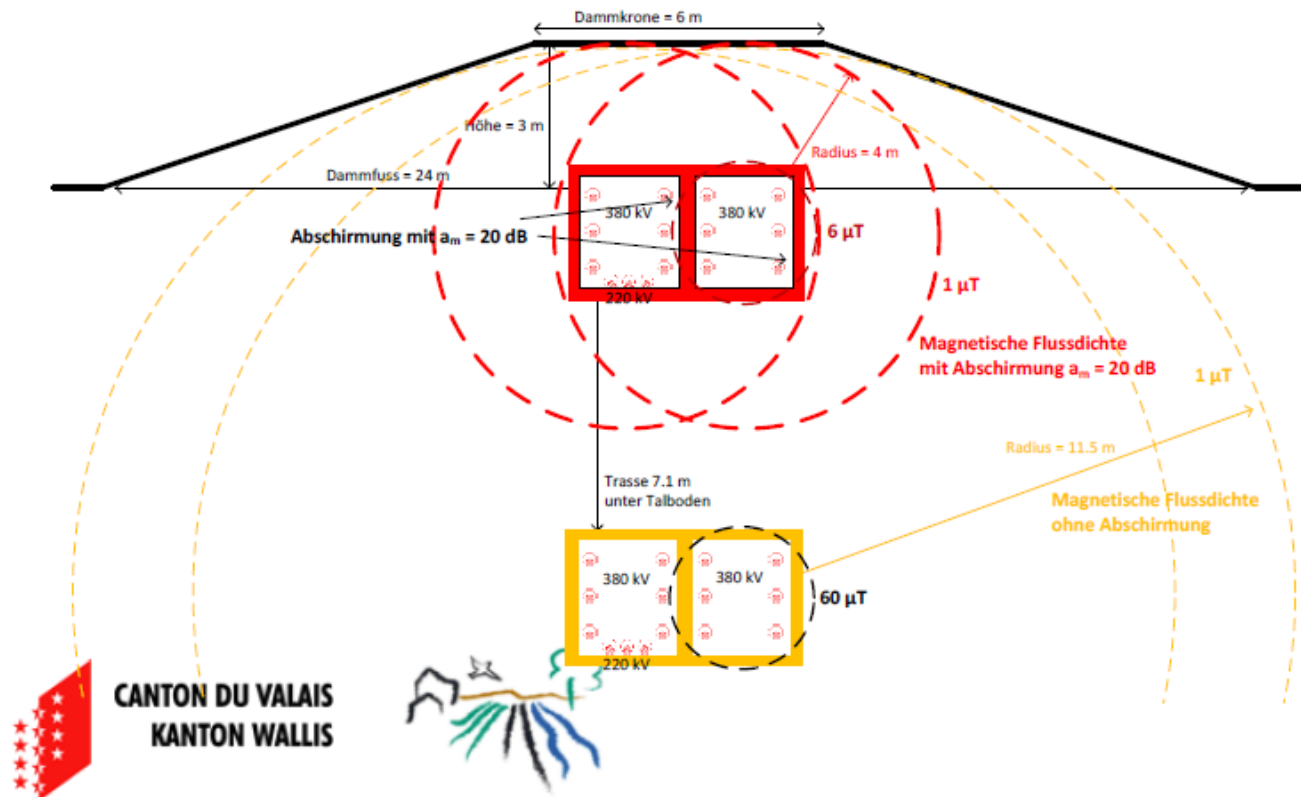
Cas 2 : Microtunnel avec blindage

# Ligne enterrée

## Canal béton avec blindage

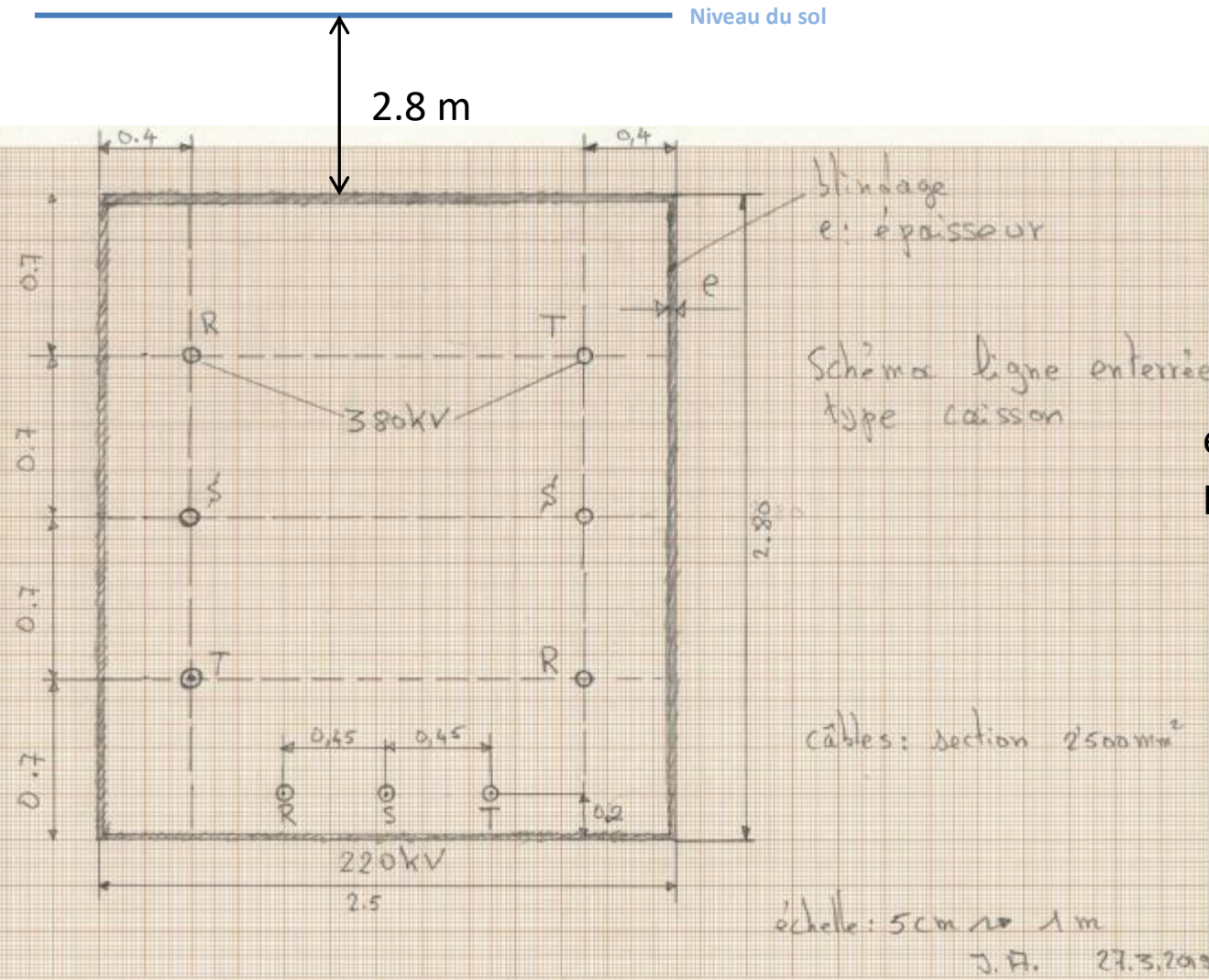
$a_m = 20$  dB avec le matériel et l'épaisseur suivant

- Fer,  $\mu_r = 2000$ ;  $d = 5.0$  mm



# Ligne enterrée

## Cas 1: Canal béton avec blindage pour la simulation

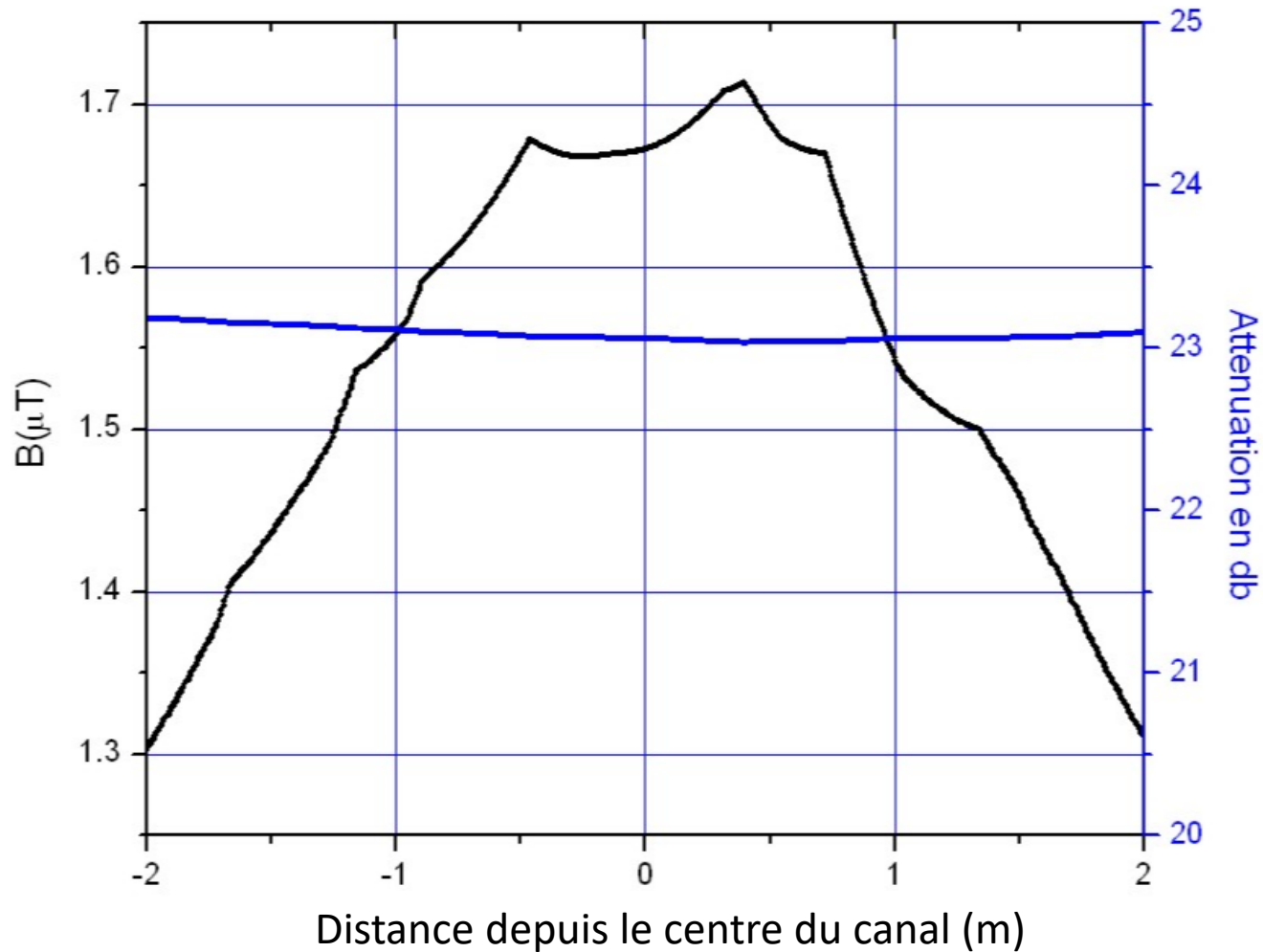


e: épaisseur du blindage 5 mm  
 $\mu_r$  matériel ferro : 2206



# Ligne enterrée

## Cas 1: Canal béton avec blindage / calculs FEM induction magnétique B et atténuation 2.8 m au dessus du canal



# Ligne enterrée

---

## Conclusions : cas 1

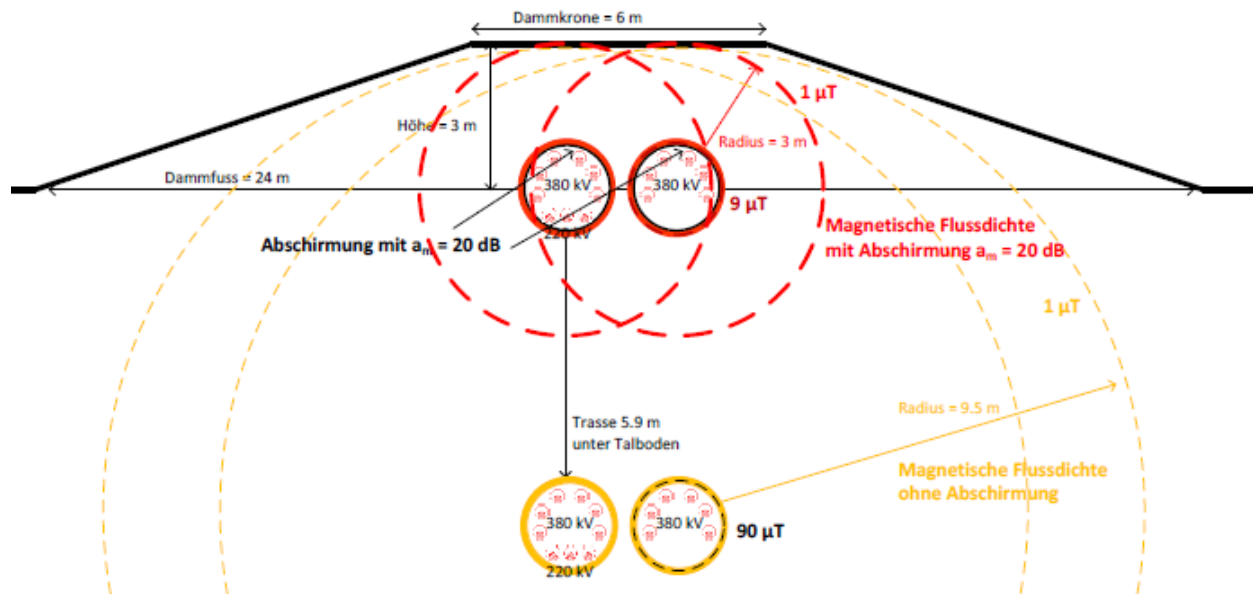
- Les calculs réalisés par FEM prédisent une valeur de B de  $1.7\mu\text{T}$  au centre du canal ( $1.0\mu\text{T}$  par l'entreprise Schnyder Ingenieure)
- Le facteur d'atténuation déterminé par FEM est sensiblement constant de l'ordre de 23 db ( 20db par l'entreprise Schnyder Ingenieure)
- Malgré une approche « simpliste » les valeurs prédites par Schnyder Ingenieure sont à peu près réalistes, à un facteur  $\approx 2$  près!

# Ligne enterrée

## Microtunnel avec blindage

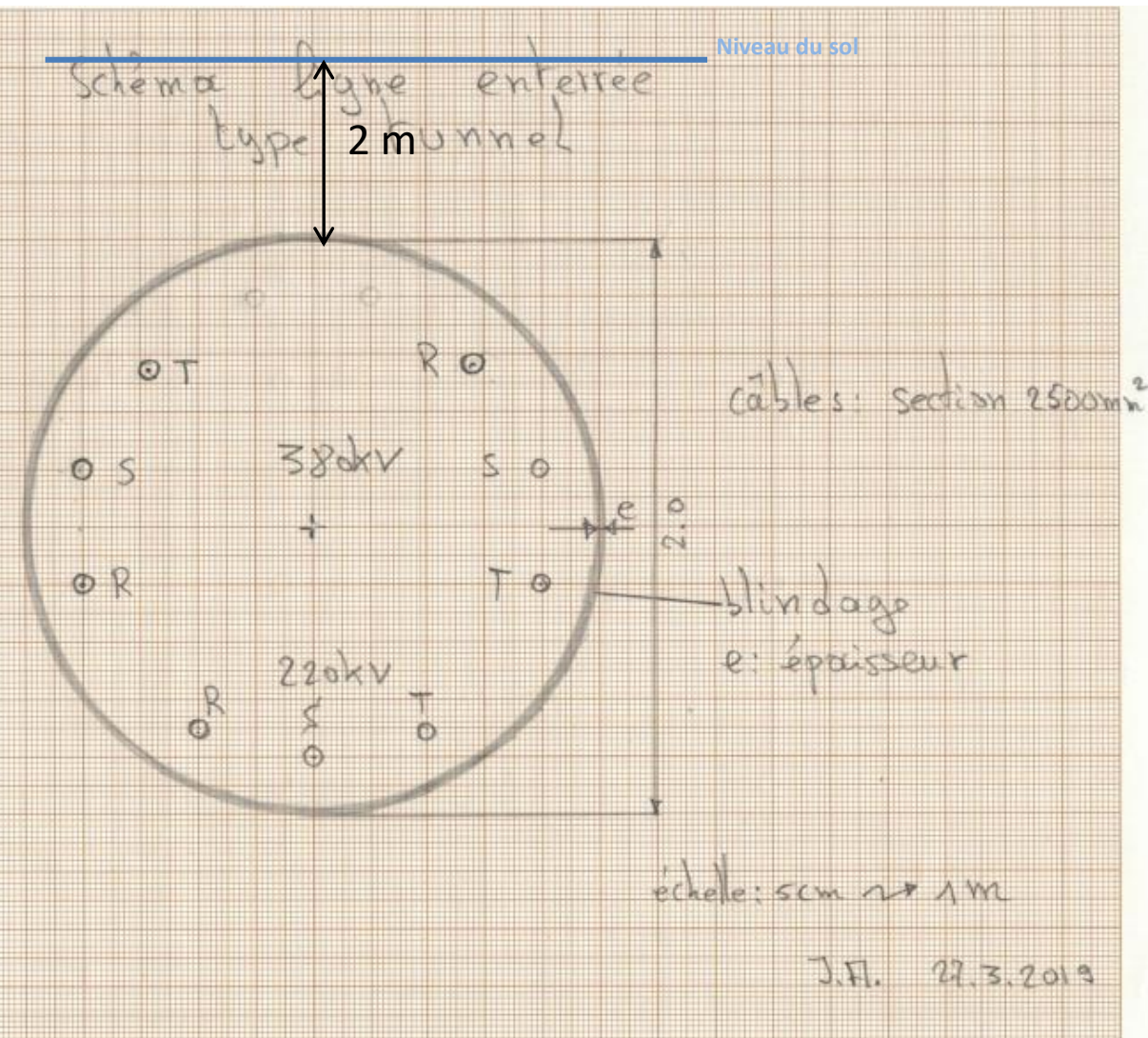
$a_m = 20$  dB avec le matériel et l'épaisseur suivant

- Fer,  $\mu_r = 2000$ ;  $d = 3.4$  mm



# Ligne enterrée

## Cas 2: Schéma microtunnel avec blindage pour la simulation tube de 2m de diamètre

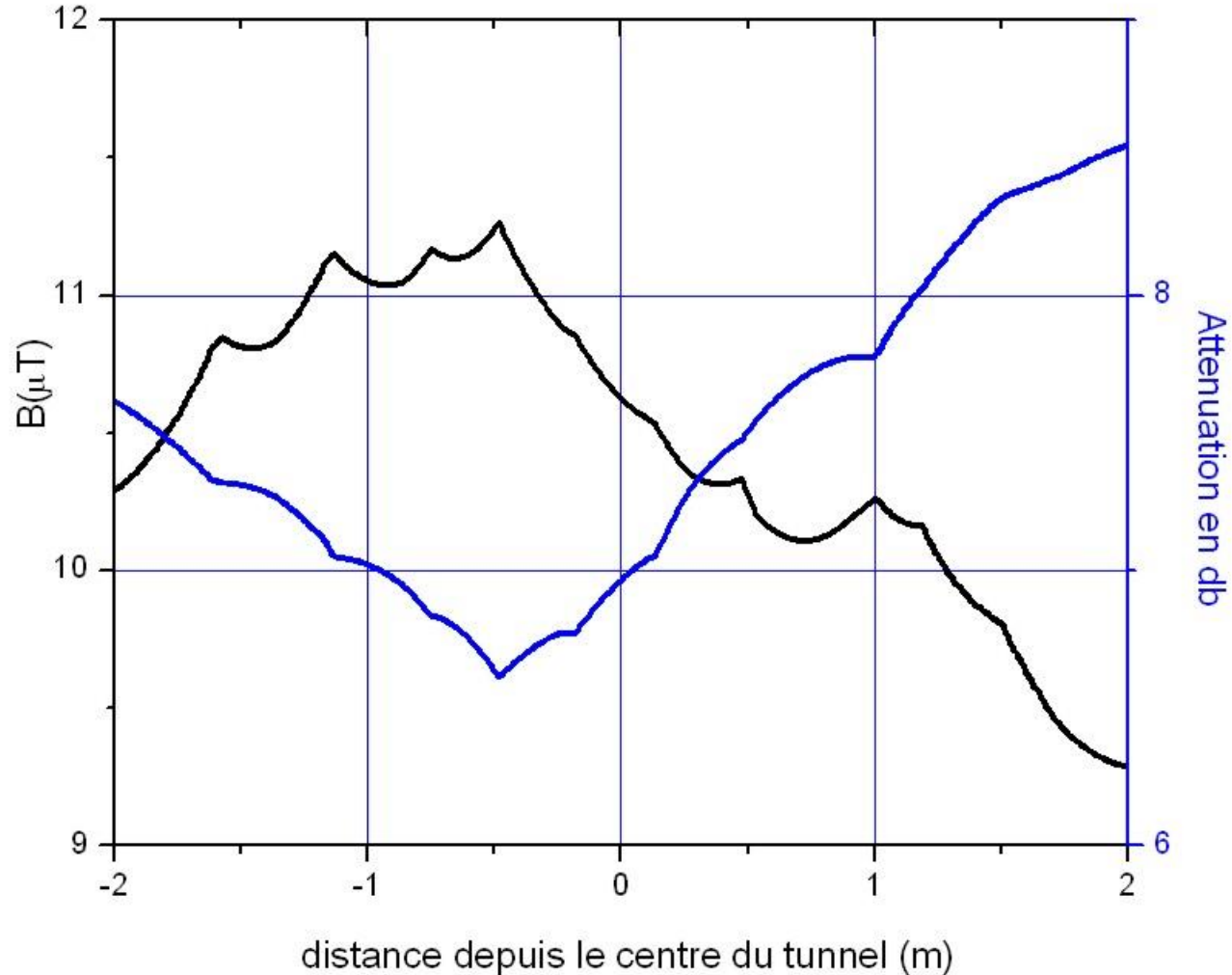


e: épaisseur du blindage 3.4 mm  
 $\mu_r$  matériel ferro : 2206

# Ligne enterrée

## Cas 2: Microtunnel avec blindage/ calculs FEM

induction magnétique  $B_{\max}$  et atténuation 2 m au dessus du microtunnel





# Ligne enterrée

---

## Conclusions


- Les calculs réalisés par une méthode FEM prédisent une valeur de B 10x supérieure à celle de l'entreprise Schnyder Ingenieure
- Le facteur d'atténuation déterminé par FEM n'est pas constant, de l'ordre de 10.5

**Les calculs réalisés par l'entreprise Schnyder Ingenieure sont trop simplistes et ne correspondent pas à la réalité !**

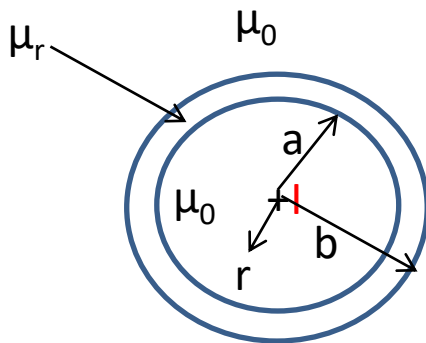
# Ligne enterrée

## Optimisation

Remarques:

-si les 3 phases sont au même endroit, le courant total est nul   $B = 0$   
(on a avantage à mettre les phases proches les unes des autres)

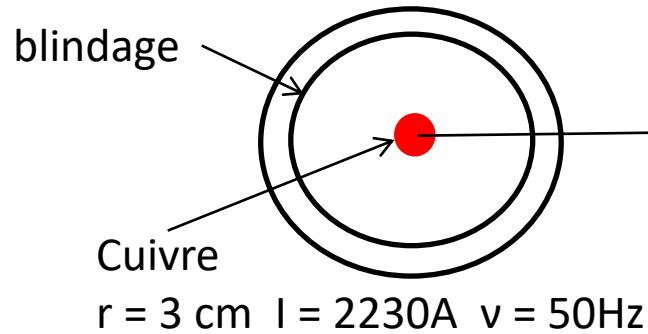
- soit une ligne rectiligne entourée d'un blindage magnétique de perméabilité  $\mu_r$   
on peut résoudre analytiquement ce problème  
(potentiel vecteur)



L'efficacité du blindage dépend:

- de l'endroit où il est placé, a plus petit possible
- de son épaisseur
- des propriétés du matériel  $\mu_r$

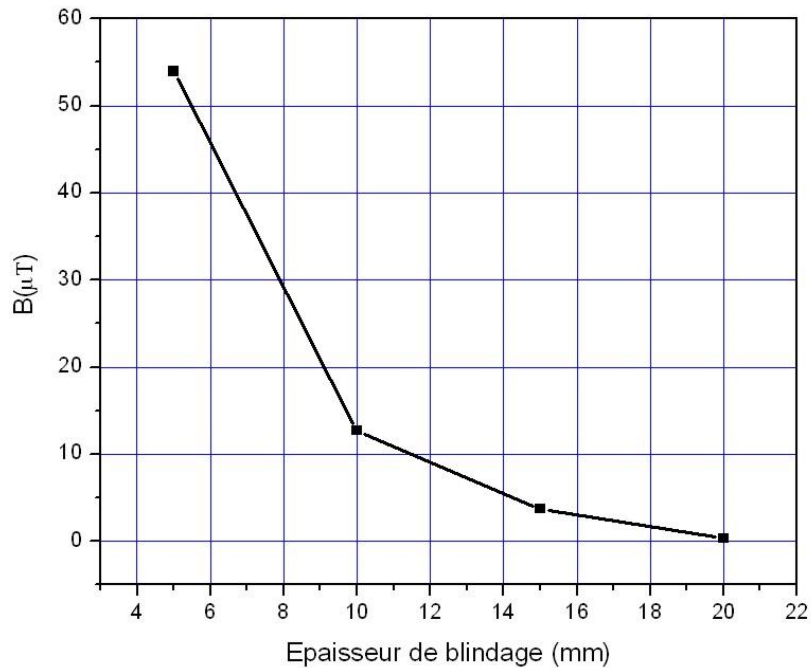
# Ligne enterrée



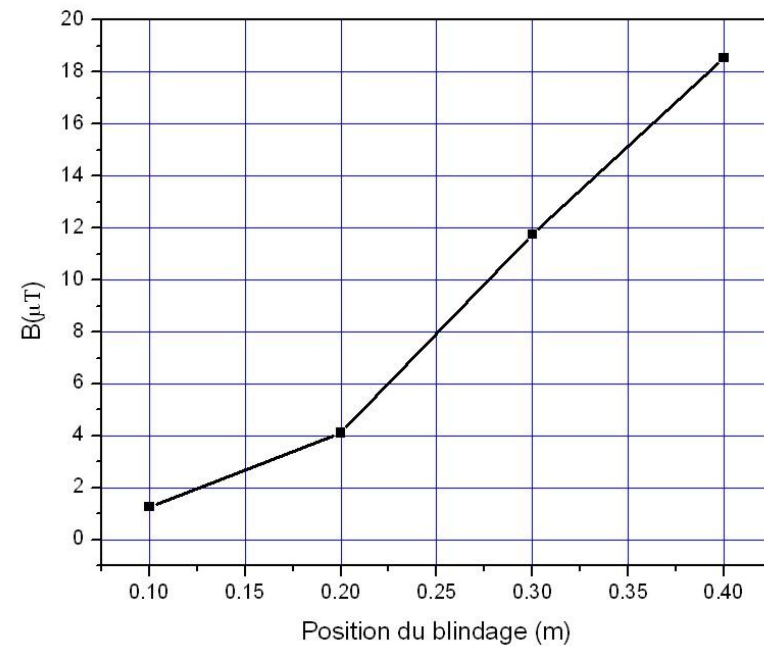
## Optimisation

→ ● Point calculé :  
 $R = 1 \text{ m}$

B en fonction de l'épaisseur du blindage  
position blindage 25 cm



B en fonction de la position du blindage  
épaisseur blindage 10 mm



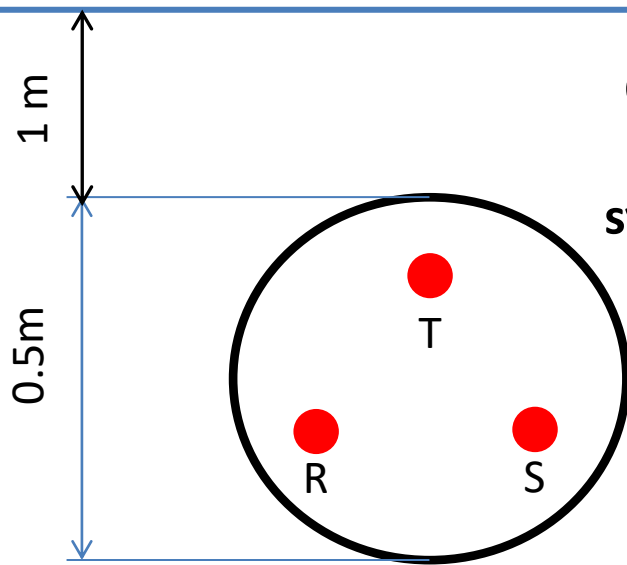
# Ligne enterrée

Niveau du sol

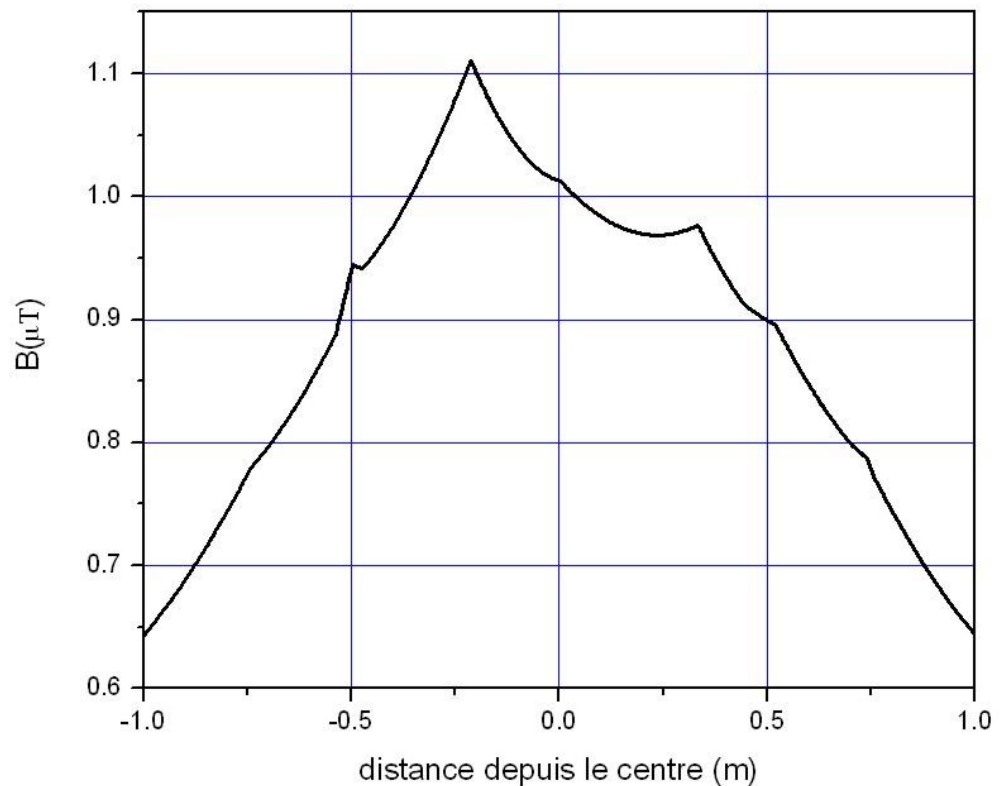
Optimisation : microtube

système de 3 phases 380KV

2cm blindage



B en fonction de la distance au niveau du sol



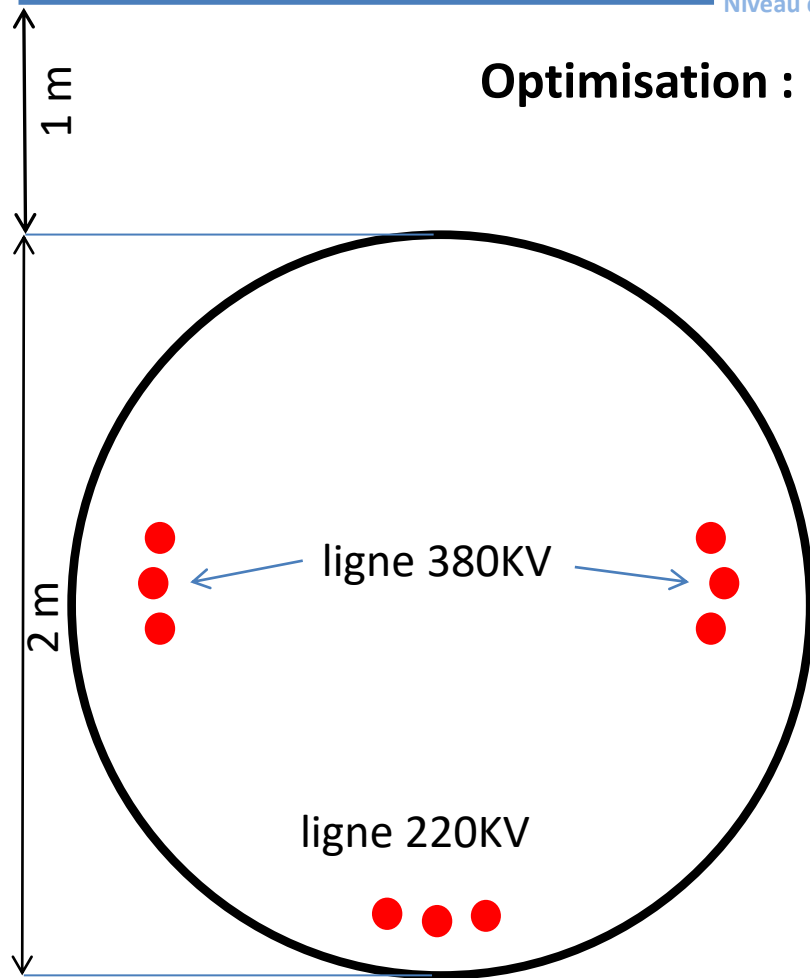
Remarque : Il n'est pas nécessaire d'entourer complètement le câble

# Ligne enterrée

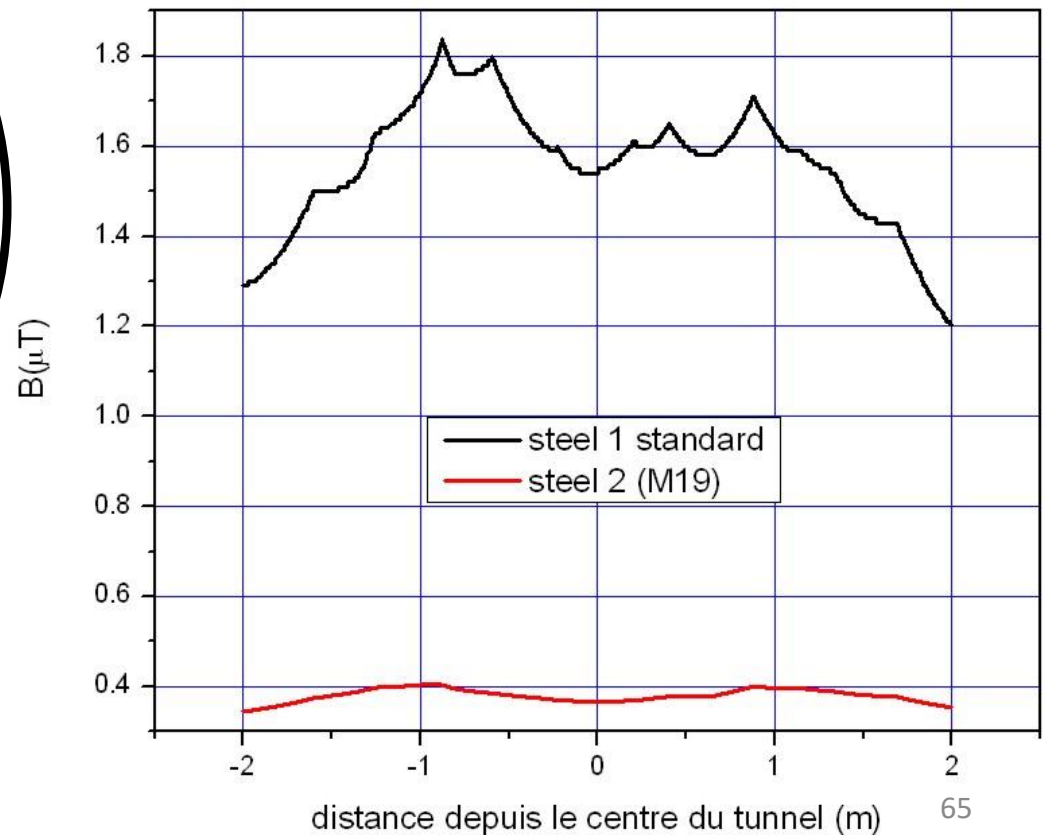
Niveau du sol

## Optimisation : Microtunnel avec blindage

1.5 cm blindage



B en fonction de la distance au niveau du sol





# Ligne enterrée

---

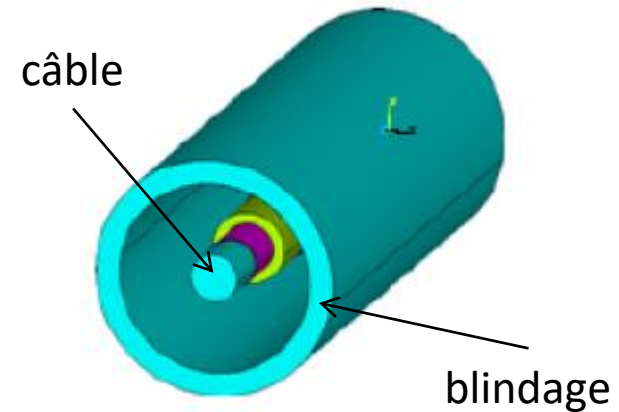
## Remarques (Approche Schnyder Ingenieure)

- les calculs ont été réalisés par l'entreprise Schnyder Ingenieure (Gampel) (en fait aucun calcul, estimation sur la base d'abaque!)
- pour respecter  $B_{\text{eff}} \leq 1\mu\text{T}$  au niveau du sol, la variante :
  - canal béton avec blindage, le manteau supérieur doit être enfoui à une profondeur de 2.8m (calcul FEM: assez juste...)
  - microtunnel avec blindage, le manteau supérieur doit être enfoui à une profondeur de  $\approx 2\text{m}$  (calcul FEM: les prédictions par l'approche Schnyder sont complètement fausses!)
- ces variantes ne sont pas optimisées !
- cette analyse de la ligne enterrée n'est pas une étude sérieuse

# Ligne enterrée

## Remarques sur le blindage

- Pour calculer proprement il faut utiliser un modèle d'élément fini (FEM) associé à la géométrie du câble
- L'efficacité du blindage dépend:
  - des propriétés du matériel
  - de son épaisseur
  - de l'endroit où il est placé
- L'efficacité est d'autant plus grande que le blindage est à proximité du câble
- Il n'est pas nécessaire d'entourer complètement le câble : un chapeau peut suffire avec une ouverture donnée ( peut être important pour la dissipation de chaleur)
- Avec la géométrie ci-dessus, les calculs montrent que l'on peut facilement atteindre un facteur de 40db (réduction par un facteur 100)
- On peut faire encore 50 fois mieux, mais le blindage coûtera 30 fois plus!



# Ligne enterrée

---

## Conclusions

Deux propositions de ligne enterrée ont été faites, respectant  $B_{\text{eff}} \leq 1\mu\text{T}$  au niveau du sol :

### Solution 1:

- microtube : une ligne 380KV complète (3 phases)
- diamètre du tube : 0.5 m
- épaisseur du blindage : 2cm
- couverture de 1 m seulement du manteau supérieur du blindage

### Solution 2:

- Microtunnel optimisé: deux lignes 380KV + une ligne 220KV
- diamètre du microtunnel : 2m
- épaisseur du blindage : 1.5cm
- couverture de 1 m seulement du manteau supérieur du blindage

# Ligne enterrée

---

## Conclusions

- Les calculs réalisés par une méthode FEM montrent la faisabilité de l'enfouissement de câbles blindés
- Il est facile d'ajuster et d'optimiser une "batterie de câbles" pour une profondeur d'enfouissement de l'ordre du mètre
- Cette méthode permet d'ajouter facilement des câbles à une configuration existante
- Les solutions proposées respectent la valeur limite de 1  $\mu\text{T}$  au niveau du sol