

KAN-NAK

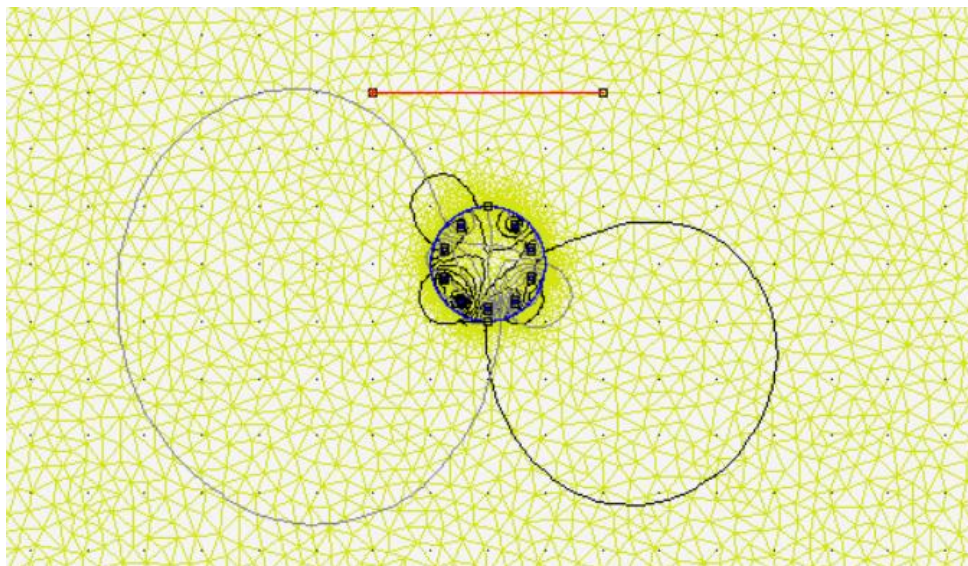
Induction magnétique

Ligne THT 380/220 kV

Ligne enterrée

Étude réalisée par: **KAN-NAK S.A.**
Route de Sion 35
CH-3960 Sierre
Suisse
(Nommé : KAN-NAK)

pour: Monsieur Jean-Bernard Rouvinez



Report : 20200301-01-IndMagLTHT
Auteurs : René von Kaenel, Dr. Louis Bugnion
Date : Mars 2020

CONTENU

1. INTRODUCTION	3
1.1 Logiciel FEMM ou “Finite Element Method Magnetics” Version 4.2	3
1.2 Description du problème.....	4
2. RESULTATS	5
3. CONCLUSIONS	7
A1. ANNEXE 1 RÉSULTATS DR. JACQUES ANTILLE.....	8
A2. PROPRIÉTÉS FERROMAGNÉTIQUES DU TUBE D’ACIER.....	9
A3. PARTIES RÉELLES ET IMAGINAIRES DU POTENTIEL VECTEUR DANS ET VERS LE TUNNEL	10

1. INTRODUCTION

KAN-NAK a été contacté en février 2020 et mandaté pour le calcul du champ magnétique au niveau du sol d'un micro-tunnel composé de 3 groupes de courants triphasés placés dans un tube d'acier enterré. La position, la valeur du courant et la phase de chacun des 9 conducteurs ont été spécifiés. Afin d'atténuer la valeur du champ d'induction en surface un tube d'acier ferromagnétique est utilisé. La géométrie exacte est spécifiée dans le chapitre Introduction. Bien que de multiples autres solutions soient possibles, KAN-NAK ne considère que la solution proposée. L'objectif est de vérifier les calculs effectués par le Dr. Jacques Antille à l'aide d'un modèle MATLAB et présentés dans l'Annexe 1. Nous appellerons cette solution la « Référence ». Afin de garantir une objectivité scientifique par rapport aux résultats reçus, KAN-NAK a utilisé un logiciel connu sur le marché, nommé FEMM, pour les calculs du champ d'induction magnétique totalement indépendant du modèle MATLAB. Le problème ne peut être résolu que par une approche numérique car la présence de l'acier ferromagnétique conduit à un problème non linéaire. Avant d'étudier le problème posé, KAN-NAK a calculé un cas soluble analytiquement afin de s'assurer du bon fonctionnement du programme. Le logiciel FEMM est présenté brièvement ci-dessous. Une description détaillée est disponible sur internet.

1.1 Logiciel FEMM ou "Finite Element Method Magnetics" Version 4.2

Le logiciel a été développé par un Dr. en science, actuellement employé en tant que « Principal Scientist » chez QinetiQ aux Etats-Unis d'Amérique. QinetiQ est une entreprise spécialisée au service de l'armée américaine (www.qinetiq-na.com). Le logiciel est disponible sur internet.

KAN-NAK a testé le logiciel en effectuant un calcul simple pour lequel une solution analytique existe. Pour résoudre notre problème les équations nécessaires sont les équations de Maxwell pour les "basses fréquences". Dans cette approche, les courants de déplacements peuvent être négligés. Les courants de déplacements sont typiquement nécessaires pour les problèmes de radio fréquences mais totalement négligeables dans un réseau à 50 Hz. On recherche une solution pour un problème harmonique à une fréquence de 50 Hz. Quand le champ magnétique varie au court du temps, des courants de Foucault sont induits dans les matériaux électriquement conducteurs. Dans ce cas, le champ électrique E est donné par :

$$\nabla \times E = - \partial B / \partial t \quad (1)$$

avec B pour champ d'induction magnétique.

La densité de courant J est déterminée par la loi d'Ohm :

$$J = \sigma E \quad (2)$$

avec σ pour la conductivité électrique des matériaux impliqués. Comme nous considérons une solution harmonique en deux dimensions, nous introduisons le potentiel vecteur A comme partie réelle du potentiel vecteur complexe a :

$$A = \text{Re} [a (\cos \omega t + j \sin \omega t)] = \text{Re} [a e^{j\omega t}] \quad (3)$$

$$\text{avec} \quad B = \nabla \times A \quad (4)$$

En substituant dans les équations de Maxwell on trouve l'équation à résoudre pour notre problème :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_{eff}(B)} \nabla \times a \right) = -j\omega \sigma a + \hat{J}_{src} - \sigma \nabla V \quad (5)$$

avec J_{src} le courant source imposé dans les conducteurs, V le potentiel électrique et μ_{eff} la perméabilité magnétique effective sous une charge harmonique qui dépend de l'amplitude du champ d'induction magnétique ce qui rend le problème non linéaire. Ce terme nécessite également quelques subtilités numériques qui peuvent être lues dans la documentation du logiciel FEMM. La formulation en nombre complexe de l'équation (3) permet de s'affranchir du temps. Comme déjà mentionné, l'équation (5) aux dérivées partielles est non linéaire et ne peut être résolue que par une méthode numérique, en l'occurrence la méthode des éléments finis.

1.2 Description du problème

Le schéma du micro-tunnel est présenté dans la figure 1. Le tube en acier a une épaisseur de 3.4 mm avec des propriétés ferromagnétiques $\mu_{eff}(B)$ spécifiées dans l'Annexe 2. Chaque câble a une section de 2500 mm². Les positions des conducteurs sont les suivantes :

Système de coordonnées : origine au centre du micro-tunnel $x=y=0$

Position des phases ligne 1 : 380 kV
 T $x = -0.473$ $y = 0.647$
 S $x = -0.7620$ $y = 0.248$
 R $x = -0.7620$ $y = -0.248$

Position des phases ligne 2 : 380 kV
 T $x = 0.7620$ $y = -0.248$
 S $x = 0.7620$ $y = 0.248$
 R $x = 0.473$ $y = 0.647$

Position des phases ligne 3: 220 kV
 R $x = -0.471$ $y = -0.647$
 S $x = 0.0$ $y = -0.8$
 T $x = 0.471$ $y = -0.647$

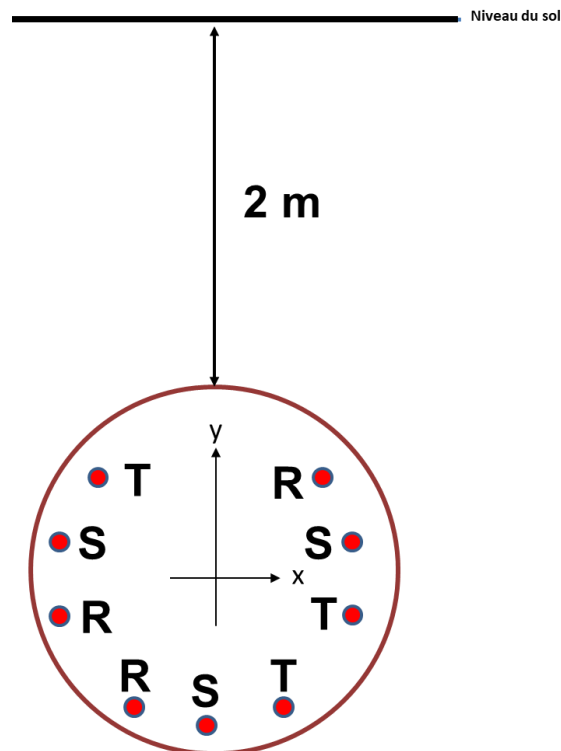


Figure 1 : Schéma du micro-tunnel

2. RESULTATS

La figure 2 montre les conducteurs à l'intérieur du tube d'acier dans le modèle FEMM.

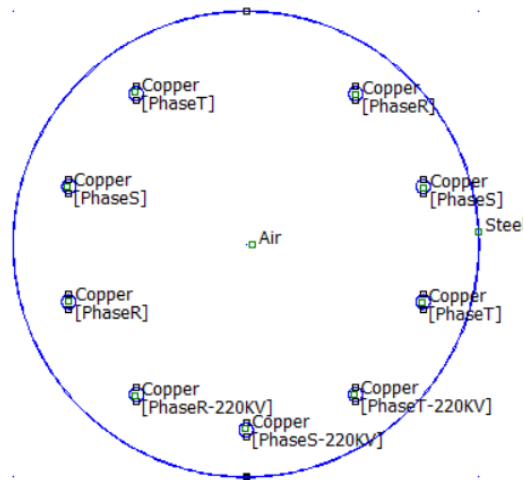


Figure 2 : Conducteurs à l'intérieur du tube d'acier

La figure 3 montre le domaine de calculs dans l'espace autour du tube d'acier. Le champ magnétique est calculé en chaque nœud (43'281) dans la circonférence de 1000 mètres de diamètre. La solution nous intéresse à la surface 2 mètres au-dessus du tube d'acier. Nous allons analyser la valeur du champ magnétique sur le segment A-B. Nous supposons le potentiel vecteur nul à 500 m du centre du tube d'acier.

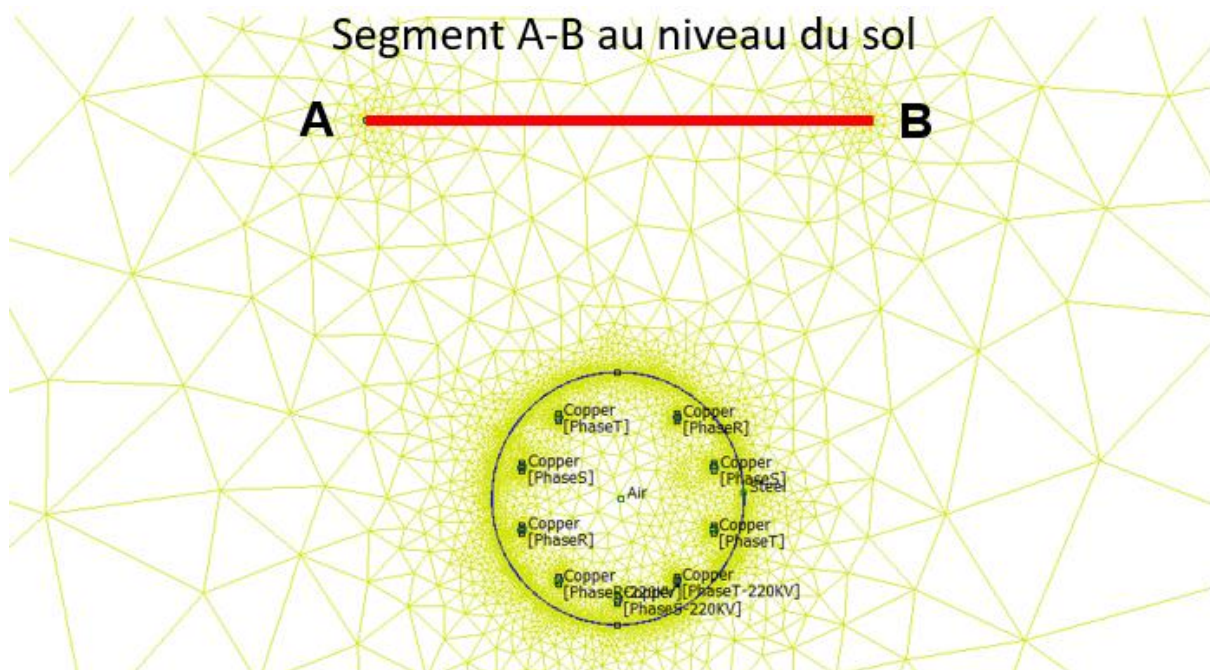


Figure 3 : Domaine de calcul dans l'espace autour du tube d'acier
Segment A-B pour la détermination du champ critique

L'annexe A3 montre la forme du potentiel vecteur A dans le tunnel et à son voisinage. Grâce au potentiel vecteur en tout point jusqu'à 500 mètres du tube d'acier, le champ d'induction magnétique est facilement déterminé à l'aide de l'équation 4. La figure 4 montre la solution deux mètres au-dessus du tube en acier sur le segment A-B de 4 mètres de long au niveau du sol. Le centre du segment se trouve dans l'axe du tube d'acier. La valeur maximale de 11.3 μT du champ d'induction magnétique se trouve 1 m à gauche de l'axe. La valeur minimale sur le segment de 4 mètres est de 9.2 μT à 2 mètres de l'axe du tube d'acier comme pour la solution de Référence.

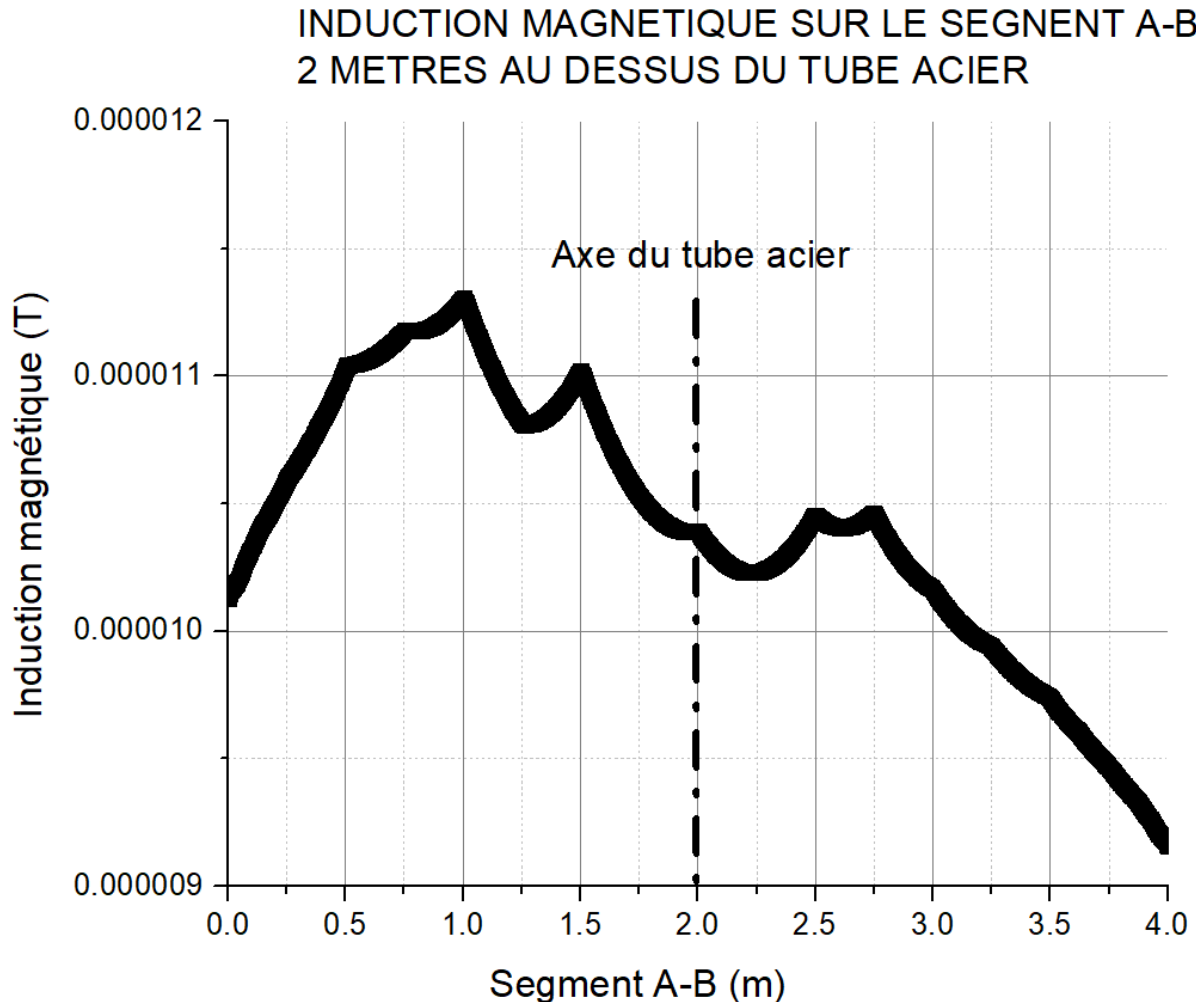


Figure 4 : Champ d'induction magnétique 2 mètres au-dessus du tube d'acier (FEMM)

La figure 5 montre la superposition de la solution FEMM en gras et de la Référence. La forme des deux signaux est équivalente. Le maximum et minimum sont quasi identiques. Le maximum se trouve à gauche de l'axe du tube en acier. Le minimum complètement à droite. La différence maximale entre les deux solutions est plus faible que 0.2 μT . Le coefficient d'amortissement est montré en bleu pour la Référence.

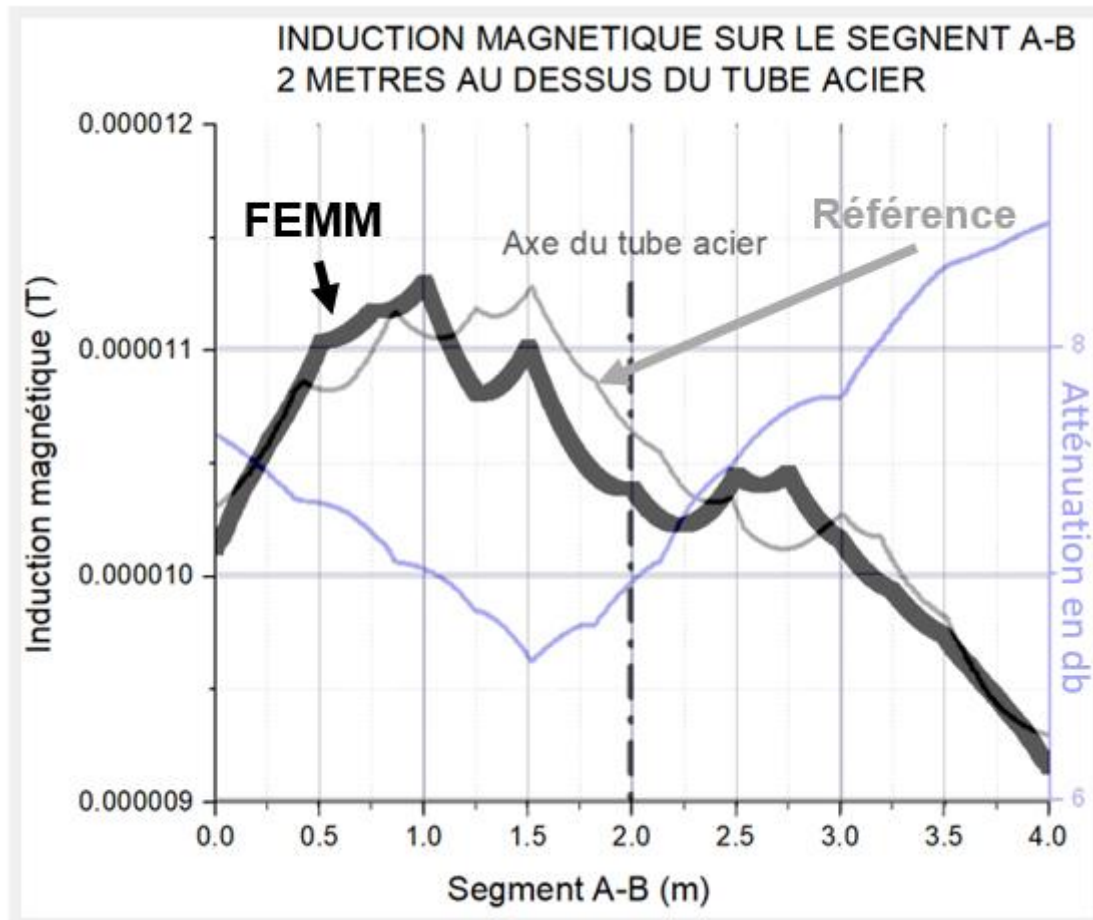


Figure 5 : Champ d'induction magnétique 2 mètres au-dessus du tube d'acier (FEMM) et champ d'induction de la Référence avec son coefficient d'amortissement

3. CONCLUSIONS

L'étude réalisée par KAN-NAK donne des résultats quasi identiques à la Référence. Le maximum de l'induction magnétique est de $11.3 \mu\text{T}$, c'est-à-dire identique à la Référence. Le minimum est de $9.2 \mu\text{T}$ alors que celui de la Référence indique $9.3 \mu\text{T}$. La position des extrema et la forme du signal sont quasi identiques. La différence maximale de $0.2 \mu\text{T}$ est attribuée à la relation $B(H)$ décrivant les propriétés ferromagnétiques de l'acier et/ou au domaine de calcul (diamètre 1000 mètres pour FEMM) qui sont probablement légèrement différents pour la Référence.

KAN-NAK confirme les résultats du Dr. Jacques Antille effectués avec le logiciel MATLAB à l'aide du logiciel FEMM, à savoir que le champ d'induction varie entre $9 \mu\text{T}$ et $11 \mu\text{T}$ sur le segment A-B.

Sierre, le 1^{er} mars 2020

Dr. Louis Bugnion

René von Kaenel

A1. Annexe 1 Résultats Dr. Jacques Antille

La solution du Dr. Jacques Antille (figure A1) montre que l'induction magnétique a un maximum de $11.3 \mu\text{T}$ au niveau du sol 50 cm à gauche de l'axe du tube d'acier. Le minimum est de $9.5 \mu\text{T}$ et se trouve 2 m à droite de l'axe du tube d'acier.

Cas 2: Microtunnel avec blindage/ calculs FEM induction magnétique B_{max} et atténuation 2 m au dessus du microtunnel

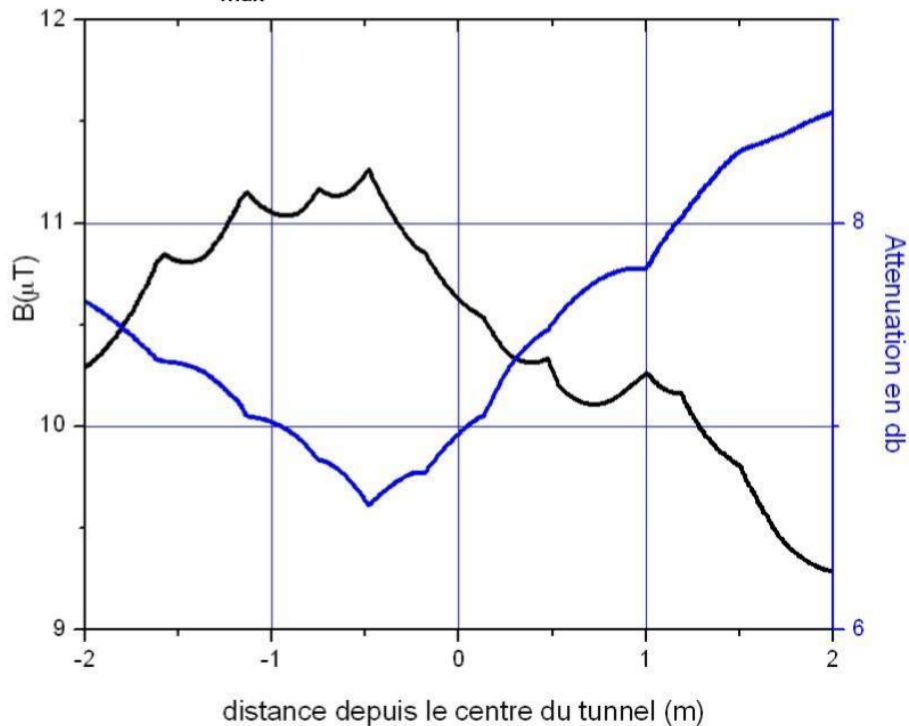
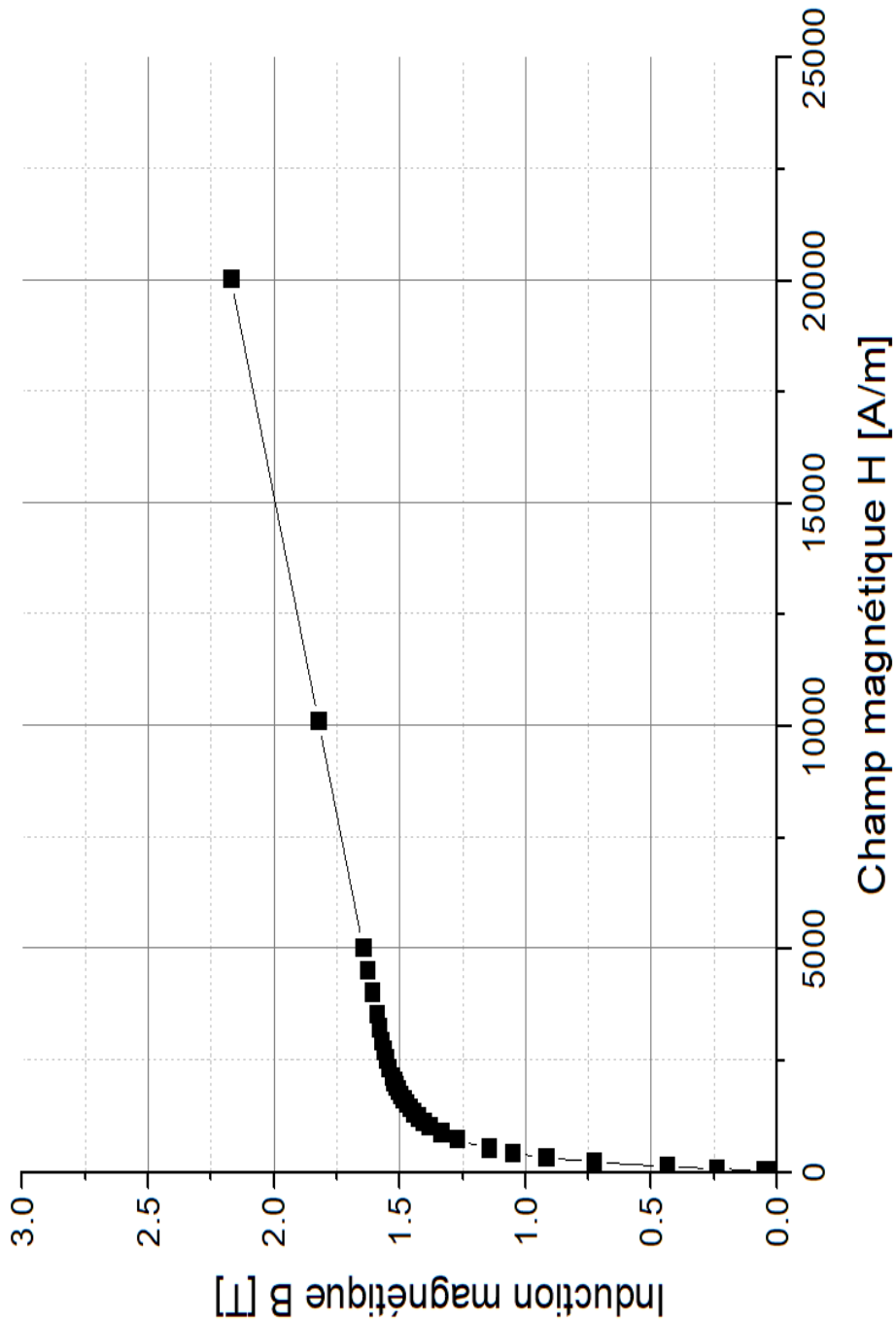


Figure A1 : Champ d'induction magnétique 2 mètres au-dessus du tube d'acier
Solution Dr. Jacques Antille, MATLAB

A2. Propriétés ferromagnétiques du tube d'acier



A3. Parties réelles et imaginaires du potentiel vecteur dans et vers le tunnel

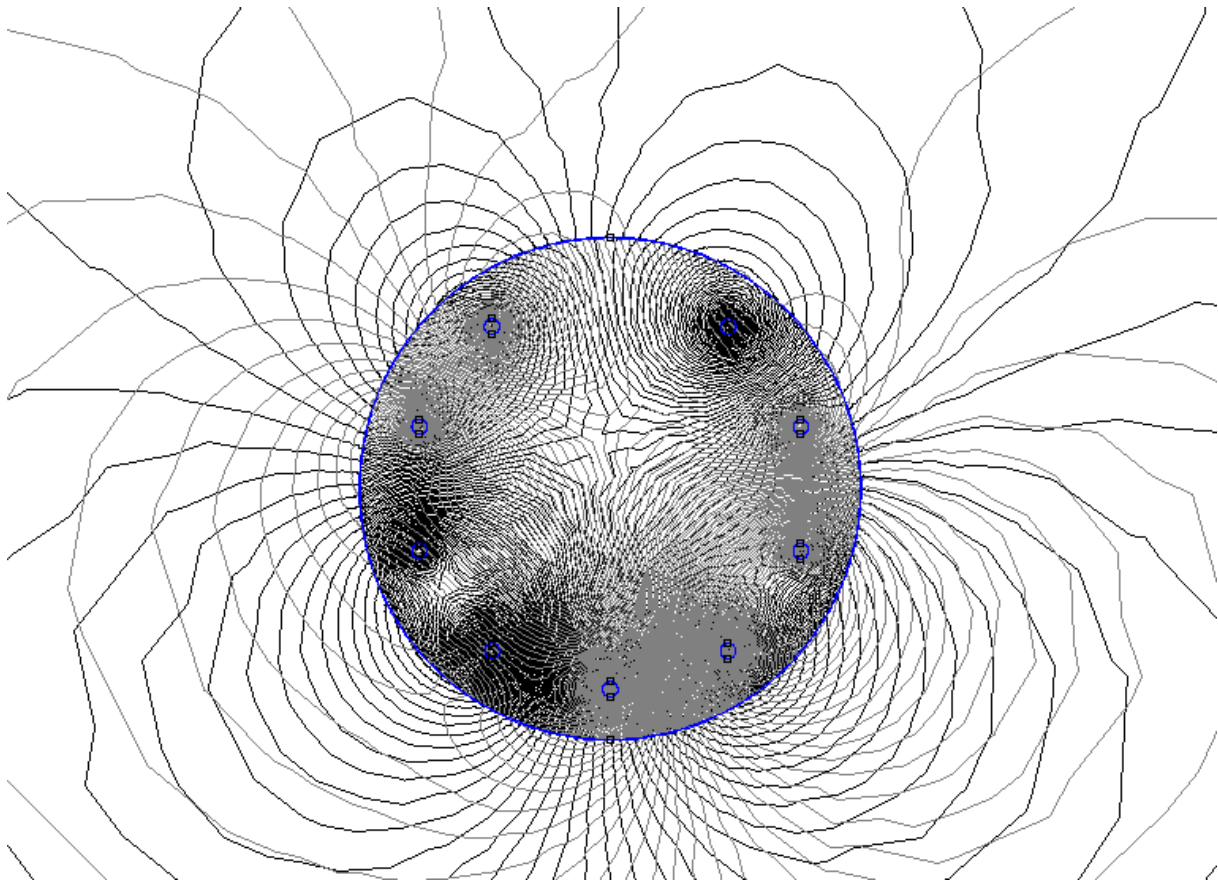


Figure A3.1 : Parties réelles et imaginaires du potentiel vecteur dans le tube d'acier et à son voisinage