

ELIA Asset s.a.

Boulevard de l'Empereur, 20 - 1000 Bruxelles

Liaison souterraine 150kV Woluwe – Charles-Quint (150-70)

Note technique concernant les champs électromagnétiques

Comité Pelletier

(version 2)

Champs produits par la liaison souterraine à 150 kV entre Woluwe et Charles-Quint

Table des matières

	Page
1. Objet	4
2. Champs électriques et magnétiques - Généralités	4
2.1. Principes physiques.....	4
2.2. Les phénomènes de couplage électrique et magnétique.....	5
2.2.1. Couplage magnétique (ou inductif)	5
2.2.2. Couplage électrique (ou capacitif)	5
2.3. Influence des champs sur les installations électroniques et informatiques.....	6
2.4. Influence des champs sur l'être humain	6
2.4.1. Effets avérés.....	6
2.4.2. Recommandations et réglementations	7
2.4.3. Effets controversés.....	8
3. Le réseau électrique à haute tension.....	10
4. Champs générés par une liaison souterraine.....	10
5. Champs générés par la liaison à 150 kV.....	11
5.1. Configuration.....	11
5.2. Courants	11
5.3. Profils de champs	12
5.3.1. Profils des champs au voisinage des câbles	12
5.3.2. Profils des champs au voisinage des jonctions	15
5.3.3. Seuils épidémiologiques.....	16
6. Synthèse et conclusions.....	17
7. Références	17
8. Annexe 1: Champ moyen calculé à différentes distances de l'axe de la liaison posée en trèfle jointif (tranchées type A) pour une charge de 30% de la capacité nominale du câble	19
9. Annexe 2: Champ maximum calculé à différentes distances de l'axe de la liaison posée en trèfle jointif (tranchées type A) pour une charge de 50% de la capacité nominale du câble (100% werkingscapaciteit selon [4]).....	21

10. Annexe 3 : coupes de tranchées 23

1. Objet

La présente note fournit les informations générales permettant d'estimer l'importance des champs magnétiques produits par la liaison souterraine à 150 kV entre les postes de Woluwe Saint Lambert et de Charles-Quint à Bruxelles.

Ces informations sont basées sur des calculs standard et sur l'estimation des courants amenés à circuler dans la liaison.

Une introduction générale sur la problématique des champs, permettant de situer facilement ces niveaux de champs par rapport aux données de la littérature, est également fournie.

2. Champs électriques et magnétiques - Généralités

2.1. Principes physiques

Tous les éléments de transport d'énergie électrique ainsi que la plupart des équipements qu'ils alimentent produisent des champs électriques et des champs magnétiques de même fréquence que celle du réseau électrique. En Europe et dans la plupart des pays, cette fréquence, dite industrielle, est à 50 Hz.

En électricité, le champ électrique traduit l'effet d'attraction ou de répulsion exercé par une charge donnée sur une autre charge électrique¹. De même, le champ magnétique caractérise la force exercée par une charge électrique en mouvement (courant) ou par un aimant permanent sur une autre charge électrique en mouvement. L'unité pratique de champ électrique est le kilovolt par mètre kV/m (1000 V/m) ; celle du champ magnétique est l'ampère par mètre (A/m). On lui préfère cependant souvent celle du champ d'induction magnétique qui traduit l'effet du champ magnétique dans un milieu donné. Cette unité pratique d'induction magnétique est le microtesla (μT) ($1 \mu\text{T} = 0,000001 \text{ T}$).

Dans la suite, cependant, on parlera simplement de champ magnétique plutôt que de champ d'induction magnétique même si l'usage veut qu'on utilise généralement l'unité d'induction magnétique pour le caractériser. Ceci ne pose pas de problème pour la plupart des milieux non magnétiques, comme l'air, pour lesquels il y a équivalence entre $1 \mu\text{T}$ et $0,8 \text{ A/m}$.

D'un point de vue pratique, on peut dire que le champ électrique est lié à la tension tandis que le champ d'induction magnétique résulte du passage du courant. Un objet sous tension génère toujours un champ électrique, même s'il n'est parcouru par aucun courant. Le champ d'induction magnétique, par contre, n'apparaîtra que s'il y a circulation de courant.

Certains champs sont constants ou lentement variables², tel le champ magnétique terrestre³ ou le champ électrique naturel à la surface de la terre⁴.

¹ C'est, par exemple, ce qui provoque la sensation de picotement due aux mouvements des poils de la main approchée d'un écran de télévision

² On parle aussi de champs « statiques »

³ Il est dû à la circulation de matière à l'intérieur du noyau terrestre et est de l'ordre de $40 \mu\text{T}$ dans nos régions

⁴ Il est de l'ordre de 100 à 200 V/m mais peut dépasser 10 kV/m par temps d'orage

Les champs produits par les réseaux de transport et de distribution électrique et les appareils alimentés par ces réseaux sont des champs alternatifs. Ils sont caractérisés par leur fréquence (égale à 50 Hz) et par leur intensité.

Une ligne aérienne génère à la fois un champ électrique et un champ magnétique. Un câble souterrain, par contre, ne génère pas de champ électrique à l'extérieur de l'écran métallique qui le recouvre.

Le câble de puissance est en effet constitué d'une âme métallique de forte section (le conducteur de puissance) entourée d'un isolant. Cet isolant est, à son tour, recouvert d'une enveloppe métallique constituée anciennement de plomb et actuellement de feuilles d'aluminium avec parfois adjonction de fils de cuivre. Cette enveloppe métallique, qui assure principalement l'étanchéité et la sécurité en cas de défaut, est au potentiel de la terre et s'oppose à toute diffusion du champ électrique à l'extérieur du câble.

Dans certains cas le câble comporte trois conducteurs de puissance au lieu d'un seul. On parle alors d'un câble tripolaire au lieu d'un câble unipolaire. L'enveloppe métallique d'un câble tripolaire entoure l'ensemble des trois conducteurs.

Le champ magnétique d'une liaison souterraine est proportionnel à l'intensité du courant qui la parcourt; il dépend de la disposition géométrique des conducteurs, augmente avec la distance entre ceux-ci et diminue avec l'éloignement. Comme le champ magnétique est fonction du courant, et non de la tension, un câble à haute tension ne produira pas nécessairement un champ magnétique plus important qu'un câble à plus basse tension. Cependant, en règle générale la section des conducteurs augmentent avec la tension de telle sorte que, la plupart du temps, les champs croissent avec la tension nominale.

2.2. Les phénomènes de couplage électrique et magnétique

L'induction de tensions ou de courants dans des objets métalliques proches des liaisons constitue un des principaux effets des champs alternatifs.

2.2.1. Couplage magnétique (ou inductif)

Le champ magnétique généré par les câbles souterrains induit des tensions sur des éléments métalliques proches. Celles-ci sont tout à fait négligeables sur des éléments qui ne dépassent pas quelques dizaines de mètres de long. Elles deviennent importantes, cependant, lorsqu'il y a parallélisme et proximité sur plusieurs centaines de mètres. C'est le cas, par exemple, pour les canalisations métalliques (par exemple eau, gaz ...) ou les circuits de télécommunication sur support métallique. Cette problématique est bien connue et les sollicitations peuvent être calculées avec une bonne précision. Par ailleurs, le secteur électrique s'efforce de détecter de telles situations et prend les dispositions nécessaires pour résoudre les problèmes dont il a connaissance.

2.2.2. Couplage électrique (ou capacitif)

Seules les liaisons aériennes peuvent être à l'origine de couplages électriques. Ce point n'est donc pas abordé ici.

2.3. Influence des champs sur les installations électroniques et informatiques

La plupart des équipements électroniques et informatiques sont insensibles aux champs d'induction magnétiques 50 Hz générés par les liaisons à haute tension. Cependant, les anciens moniteurs d'ordinateurs, les téléviseurs à écran cathodique (CRT) ainsi que certains systèmes spéciaux utilisant des capteurs basés sur la mesure de champs peuvent parfois être perturbés.

2.4. Influence des champs sur l'être humain

A des niveaux élevés de champ, des effets biologiques (pas forcément nuisibles à la santé) sont établis. A des niveaux plus faibles, tels que rencontrés au voisinage des lignes à haute tension, les résultats d'étude sont controversés, surtout en ce qui concerne les champs magnétiques.

En l'absence de conclusions scientifiques unanimes et définitives, l'opinion publique reste particulièrement sensible à la question d'éventuels effets des champs magnétiques sur la santé.

2.4.1. Effets avérés

La plupart des tissus constituant le corps humain sont bons conducteurs de courant électrique.

Par ailleurs, tout élément conducteur placé dans un champ magnétique variable est le siège de tensions induites. Le corps humain n'échappe pas à cette règle. Selon la résistivité de chaque tissu soumis à ces tensions il en résulte également des courants électriques induits. De tels courants induits peuvent aussi être provoqués par un champ électrique (mais contrairement au champ magnétique celui-ci ne doit pas nécessairement être variable dans le temps).

Sachant que les tissus les plus sensibles sont les tissus nerveux qui peuvent être microscopiques (terminaisons nerveuses...), on s'intéresse plus particulièrement à la densité de tension induite qui s'exprime en V/m, c-à-d en fait, au **champ électrique interne** (par opposition au champ électrique ou magnétique externe).

La question à poser est donc : "Quelle est la valeur du champ électrique interne maximal et, partant, le niveau maximum de champ magnétique (ou électrique externe) correspondant qui n'occasionnera aucun effet biologique néfaste pour la santé ?"

Les recherches⁶ ont montré que les premiers effets biologiques se manifestaient sur la rétine à partir de champ électrique interne de l'ordre de 100 mV/m. Ces effets réversibles - et donc non dangereux pour la santé - se traduisent par la perception de légers scintillements lumineux appelés magnétophosphènes. Il y correspond une valeur de champ magnétique de quelque 3000 μ T et près de 50 kV/m pour un champ électrique externe.

Bien que les premiers effets réellement nocifs n'apparaissent que pour des niveaux de champ encore nettement plus élevés, ce sont ces valeurs qui ont servi de base - après y avoir introduit d'importants facteurs de sécurité - à l'élaboration de l'ensemble des normes ou recommandations existantes en la matière.

2.4.2. Recommandations et réglementations

2.4.2.1. Niveau international

En coopération avec le département de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) consacré à l'environnement, la Commission Internationale pour la Protection contre les Radiations Non Ionisantes (ICNIRP) a établi en 1998⁵ et confirmé en 2010⁶ [1] des recommandations relatives aux champs d'induction magnétiques. Ces recommandations s'inscrivent dans le cadre du programme sanitaire de l'OMS pour l'environnement, financé par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE).

Pour l'exposition aux champs magnétiques, le niveau de référence⁷ à ne pas dépasser pour la population est de 200 µT (exposition permanente).

Pour l'exposition aux champs électriques, le niveau de référence à ne pas dépasser pour la population est de 5 kV/m (exposition permanente).

De son côté, et en considérant l'ensemble de la documentation scientifique publiée et plus particulièrement la première publication de l'ICNIRP de 1998, le Conseil de l'Union Européenne a émis, en date du 12 juillet 1999, des recommandations⁸ relatives à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques 0 Hz - 300 GHz (Journal officiel des Communautés Européennes du 30 juillet 1999)[2]. Ce document recommande aux Etats membres, afin de fournir un niveau élevé de protection sanitaire contre l'exposition aux champs électromagnétiques, de respecter une valeur maximale de 100 µT pour le champ magnétique à 50 Hz.

Cette valeur est donc inférieure d'un facteur 2 au niveau de référence recommandé actuellement par l'ICNIRP car celui-ci, ultérieur à la recommandation européenne, se base sur une modélisation plus précise du corps humain permettant de prendre en compte des facteurs de sécurité (incertitudes) moindres.

5 ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics, 74 (4) - 1998, page 5

6 ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (1 Hz to 100 kHz), Health Physics 99(6) - 2010, pp 818-836⁷ Actuellement, le seul mécanisme connu d'interaction des champs magnétiques à très basse fréquence avec les tissus biologiques est la densité du courant électrique induit dans ces tissus ou, de façon quasi équivalente, le champ électrique induit localement. C'est donc en référence à ces grandeurs que des limites sont proposées par les organisations internationales. On les appelle souvent « Restrictions de base ». Cependant, ces grandeurs n'étant pas mesurables physiquement, on détermine par des calculs basés sur des modèles simplifiés les niveaux de champ correspondants, souvent appelés « Niveaux de référence ». Le respect des niveaux de référence garantit toujours celui des restrictions de base. Par contre, l'inverse n'est pas vrai : il n'est pas forcément nécessaire de devoir toujours respecter les niveaux de référence pour satisfaire aux restrictions de base.

7 Actuellement, le seul mécanisme connu d'interaction des champs magnétiques à très basse fréquence avec les tissus biologiques est la densité du courant électrique induit dans ces tissus ou, de façon quasi équivalente, le champ électrique induit localement. C'est donc en référence à ces grandeurs que des limites sont proposées par les organisations internationales. On les appelle souvent « Restrictions de base ». Cependant, ces grandeurs n'étant pas mesurables physiquement, on détermine par des calculs basés sur des modèles simplifiés les niveaux de champ correspondants, souvent appelés « Niveaux de référence ». Le respect des niveaux de référence garantit toujours celui des restrictions de base. Par contre, l'inverse n'est pas vrai : il n'est pas forcément nécessaire de devoir toujours respecter les niveaux de référence pour satisfaire aux restrictions de base.

8 Recommandation CEE 1999/519 du 12/07/99 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques de 0 à 300 GHz (JO L 1999 du 30/07/99)

A titre d'information, une valeur typique de champ de l'ordre de 20 μT est mesurable à une dizaine de cm d'appareils électriques usuels tels que four à micro-ondes, sèche-cheveux ou aspirateur.

2.4.2.2. Niveau national

A l'heure actuelle, il n'y a pas, au niveau fédéral belge, de législation particulière limitant les champs magnétiques à très basse fréquence produits par les liaisons de transport et de distribution d'énergie électrique. Seule existe une limitation concernant les champs électriques produits par les lignes aériennes (RGIE art 139).

2.4.3. Effets controversés

De nombreuses études scientifiques ont été réalisées de par le monde afin de déterminer si les champs de niveaux inférieurs à ceux responsables des effets avérés avaient un effet sur les tissus vivants et, le cas échéant, sur la santé :

- Etudes in vitro (sur des cellules ou des tissus);
- Etudes in vivo sur des animaux de laboratoire;
- Etudes spécifiques sur des volontaires humains;
- Etudes épidémiologiques (statistiques) menées auprès de la population ou auprès de travailleurs.

Ces différentes approches présentent entre elles une certaine complémentarité; elles ont chacune leurs caractéristiques, leurs avantages mais aussi leurs limites.

A l'heure actuelle, la plupart des études in vitro, in vivo ou sur des volontaires humains ont donné des résultats négatifs ou inconsistants et ne permettent pas d'établir un quelconque effet sur la santé.

Néanmoins, en juin 2001, un groupe d'experts internationaux constitué par le CIRC⁹ a classé les champs magnétiques dans la catégorie 2b, « peut-être cancérigène pour l'homme ».

Cette catégorie a été attribuée sur base des méta-analyses épidémiologiques réalisées en 2000 qui faisaient apparaître un lien statistique entre la leucémie chez l'enfant et l'exposition à des valeurs moyennes (à long terme) de champs magnétiques supérieures à 0,4 μT .

Le CIRC a estimé que, sur base des indications limitées de l'épidémiologie et en présence d'indications insuffisantes et non concordantes de la recherche expérimentale, les champs magnétiques devaient être classés dans la catégorie 2b.

C'est la plus basse des trois catégories utilisées par le CIRC pour classer les agents cancérigènes potentiels en fonction des preuves scientifiques publiées¹⁰.

⁹ Centre Internationale de Recherche sur le Cancer (CIRC ou IARC en anglais).
Le CIRC relève de l'Organisation Mondiale de la Santé et a pour mission de coordonner et de conduire la recherche relative aux causes du cancer chez l'homme.
Il a publié en 2002 une monographie (Vol 80) traitant des champs électriques et magnétiques à très basse fréquence.

Voir aussi l'aide-mémoire 322 de l'OMS :
(www.who.int/mediacentre/factsheets/fs322/fr/index.html)

¹⁰ Le CIRC a, en effet, évalué une large gamme de substances quant à leur impact éventuel sur le cancer selon un système de classification comportant les catégories suivantes :

Pour tous les autres types de cancer, le CIRC a estimé que les indications étaient insuffisantes ou non concordantes. Le CIRC note également que les scientifiques n'ont pas réussi à trouver un mécanisme scientifique qui expliquerait un développement du cancer sous l'effet des champs magnétiques de fréquence extrêmement basse produits par les installations de fourniture et transport d'énergie.

Compte tenu de la classification du CIRC, l'OMS¹¹ considère que des limites doivent être basées sur des effets considérés comme établis. Elle ne recommande donc pas l'établissement de limites d'expositions basées sur les données relatives à la leucémie infantile¹². L'OMS recommande la poursuite des recherches et l'information du public.

Par ailleurs, le Conseil de l'Union Européenne ayant retenu un "niveau de référence" de 100 µT, définit sa position quant aux effets non avérés comme suit:

"Ces restrictions de base et niveaux de référence en vue de limiter l'exposition ont été mis au point après avoir passé soigneusement en revue toute la documentation scientifique publiée. Les critères appliqués lors de cet examen ont été conçus pour évaluer la crédibilité des différents résultats annoncés : seuls les effets avérés ont été retenus pour fonder les propositions de restrictions en matière d'exposition. L'induction du cancer en tant que risque d'une exposition à long terme n'a pas été considérée comme établie. Toutefois, étant donné qu'il y a un coefficient de sécurité d'environ 50 entre les valeurs seuils pour l'apparition d'effets aigus et les valeurs des restrictions de base, la présente recommandation couvre implicitement les effets éventuels à long terme dans la totalité de la gamme de fréquences".

Enfin, la Commission Européenne a estimé en 2009¹³, sur base des évaluations régulières effectuées par le comité SCENHIR¹⁴ qu'il n'y avait pas lieu de revoir les limites proposées dans la Recommandation Européenne.

Ce point de vue est également partagé par l'Organisation Mondiale de la Santé¹⁵ [3].

-
- 1 cancérogène (une centaine de substances comme l'amiante, le tabac - actif et passif, etc.)
 - 2a probablement cancérogène (quelque 70 substances comme les gaz d'échappement de moteur diesel, les lampes solaires, etc.)
 - 2b peut-être cancérogène (près de 250 substances comme les champs magnétiques, le café, les gaz d'échappement de moteurs à essence, la laine de verre, les pickles, etc.)
 - 3 inclassable (plus de 500 substances)
 - 4 probablement non cancérogène (une seule substance)

11 cf : WHO – "Framework to Develop Precautionary Measures in Areas of Scientific Uncertainty" (www.who.int/peh-emf/publications/reports/en/precautionary_framework_october2004.pdf)

12 Le texte de l'OMS dit plus précisément: "*given the weakness of the evidence for a link between exposure to ELF magnetic fields and childhood leukemia, the benefits of exposure reduction on health are unclear*" et ajoute: "*When constructing new facilities and designing new equipment, including appliances, low-cost ways of reducing exposures maybe explored. Appropriate exposure reduction measures will vary from one country to another. However, policies based on the adoption of arbitrary low exposure limits are not warranted*".

13 Response by Commission to European Parliament motion: 26/05/2009

14 Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks – dernier rapport 2015: http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenih_r_o_041.pdf

15 World Health Organization: Fact Sheet Nr 322 – June 2007

Nonobstant ces considérations, certaines autorités en Belgique, invoquant le principe de précaution, ont pris des mesures ou émis des recommandations pour limiter l'exposition ; c'est le cas du Conseil Supérieur de la Santé qui, dans sa recommandation concernant l'exposition de la population aux champs magnétiques générés par des installations électriques (2008), conseille de ne pas exposer pendant de longues périodes les enfants de moins de 15 ans à une intensité de champ moyenne supérieure à 0,4 μT . C'est le cas aussi le cas du gouvernement flamand qui dans son arrêté du 11 juin 2004 sur la pollution intérieure définit une valeur guide de 0,2 μT et une valeur d'intervention de 10 μT .

3. Le réseau électrique à haute tension

Le réseau électrique à haute tension d'Elia est constitué de liaisons aériennes ou souterraines dont la tension s'élève à 380kV (380.000 volts)¹⁶, 220kV, 150kV, 110kV, 70kV, 36kV et 30kV.

L'électricité fournie aux sociétés de distribution est ramenée à des tensions généralement comprises entre 5 et 15kV.

Les foyers domestiques sont alimentés en 230 ou 380V.

4. Champs générés par une liaison souterraine

Comme indiqué en 2.1, le champ magnétique produit par une liaison souterraine dépend essentiellement du courant qui la parcourt et de la configuration des conducteurs. Celle-ci dépend à son tour du type de câble (uni- ou tripolaire) et, pour les câbles unipolaires, de leur position relative. Plus petite est la distance entre les axes des conducteurs de puissance, plus faible sera le champ magnétique généré.

Dans les câbles tripolaires, utilisés uniquement aux tensions inférieures à 70 kV, les trois conducteurs sont toujours disposés en triangle.

C'est en général aussi le cas des liaisons à plus de 70 (110, 150, 220, 380 kV) dans lesquelles la configuration des trois câbles unipolaires est celle d'un trèfle.

Il peut arriver cependant, essentiellement pour des raisons de capacité de transport, qu'on doive poser les câbles côte à côte en maintenant une certaine distance entre eux. On parle alors de pose en nappe.

Cette dernière configuration est moins favorable que la configuration en trèfle en termes de champ magnétique produit car celui-ci est directement proportionnel à la distance qui sépare les conducteurs.

A l'endroit où sont faites les jonctions¹⁷ entre deux longueurs de câble successives, la configuration est toujours en nappe pour des raisons pratiques liées à la confection des jonctions et à la sécurité d'exploitation.

Dans tous les cas, le champ magnétique décroît rapidement avec la distance à l'axe de la liaison et, plus généralement, même avec le carré de cette distance. Les valeurs de champ les plus élevées se rencontreront donc au niveau du sol à la verticale de la liaison.

¹⁶ Uniquement aérien en 380kV

¹⁷ Tous les 700 à 900 m environ

Les champs sont, par ailleurs, directement proportionnels au courant qui s'écoule dans la liaison, ce qui permet de les extrapoler pour n'importe quelle valeur de courant.

5. Champs générés par la liaison à 150 kV

5.1. Configuration

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques techniques de la liaison qui interviennent dans la détermination des champs.

Longueur de la liaison	7 km
Type de câble	XLPE 150 kV
Section des conducteurs	2000 mm ² alu
Courant nominal	1135 A
Diamètre extérieur des câbles	10,8 cm
Mode de pose : Tranchée type A (voir Annexe 3) Tranchée type B (voir Annexe 3) Jonction (voir Annexe 3)	trèfle jointif trèfle ouvert nappe
Profondeur de pose ¹⁸ Tranchée type A Tranchée type B Jonctions	125 cm 135 cm 200 cm

Tableau 1: Principales caractéristiques de la liaison

Le mode de pose prévu recourt majoritairement au placement des câbles en tranchée type A ; cependant, pour le croisement des routes ou à la demande des autorités, le placement sous tube (tranchée type B) peut aussi être réalisé car il permet des forages dirigés (passage de voirie ou d'impétrants) ainsi qu'une réduction de la durée du chantier (blocage des places de parking...).

5.2. Courants

Trois amplitudes de courant sont considérées :

- 1) Le courant nominal du câble. C'est le courant maximum pour lequel les câbles ont été dimensionnés et donc susceptible d'y circuler en permanence indépendamment de la structure réelle du réseau. Il est ici de 1135 A (correspondant à 295 MVA). Dans la réalité, il ne sera atteint qu'en situation exceptionnelle et temporaire (e.g. défaut sur une autre liaison) et pour autant que la structure du réseau le permette.

¹⁸ Base des câbles inférieurs de la liaison ; dans la réalité, les câbles seront placés environ 30 cm plus bas

- 2) Le courant maximum annuel en situation d'exploitation normale¹⁹ (pointe hivernale), compte tenu des charges réelles du réseau. Il ne s'agit pas d'une pointe instantanée mais du percentile 95 de la distribution annuelle de courant, c.-à-d. la valeur du courant annuel qui n'est dépassée que durant 5 % du temps. Ce courant maximum est en général proche de 50 % du courant nominal afin de pouvoir faire face à une situation de défaut sur un autre feeder (règle du N-1), c.-à-d. ici, environ 570 A. C'est également cette valeur de courant qui est appelé « 100 % werkingscapaciteit » dans le rapport MIRA [4]
- 3) Le courant annuel moyen. Il est voisin du courant annuel non dépassé pendant 50 % du temps (encore appelé médiane ou percentile 50), compte tenu des charges du réseau qui varient d'heure en heure et suivant les saisons. Ce courant est en général pour une liaison par câble inférieur à 50 % du courant maximum annuel soit donc inférieur à 25 % du courant nominal. Par mesure de sécurité, on retiendra une valeur de 30% du courant nominal, soit 340 A (ou 60 % werkingscapaciteit selon [4]).

C'est cette valeur qui doit être prise en compte pour la détermination des champs relatifs à une exposition de longue durée.

Dans le cas particulier de la présente liaison on s'attend cependant à ce que le courant moyen soit, pour le long terme, de l'ordre de seulement 10 % du courant nominal en raison du fait que la liaison sert essentiellement à refermer la boucle entre les postes de Charles-Quint et de Woluwe qui, eux, sont alimentés directement à partir des postes sources de Machelen et de Schaerbeek. En d'autres termes cette liaison sert seulement à réaliser l'équilibre de l'approvisionnement des deux postes et ne se retrouve chargée (typiquement à 40 % de la puissance nominale) qu'en cas de défaillance dans le réseau (moins de 1% du temps).

5.3. Profils de champs

5.3.1. Profils des champs au voisinage des câbles

Les profils de champ sont calculés pour la charge moyenne, à savoir 340 A et ce pour trois hauteurs au-dessus du sol²⁰ (0 m, 1,5 m et 3 m) et les deux types de configurations : trèfle jointif (tranchées type A) et pose sous tube en trèfle ouvert (tranchée type B). Les profils sont aussi calculés au droit des jonctions.

Tous ces niveaux étant proportionnels au courant qui circule dans les câbles, il est facile de les extrapoler pour d'autres valeurs de courant (e.g. courant maximum annuels, courant nominal)

La Figure 1 donne, pour la pose en trèfle jointif, les profils de champs moyens dans un plan perpendiculaire à la liaison, en fonction de l'éloignement par rapport à l'axe de la liaison.

La Figure 2 reprend les mêmes profils de champ mais avec une échelle verticale logarithmique qui a pour effet d'amplifier visuellement les valeurs de champ les plus faibles et permet ainsi une meilleure estimation à distance. Les valeurs numériques correspondantes sont également reprises en annexe 1 au chapitre 8.

¹⁹ Donc sans tenir compte des charges exceptionnelles résultant d'un défaut

²⁰ Par « sol » on entend la voirie

A titre d'exemple on a reporté sur cette figure la position typique des façades (trait vertical en pointillé) qui se trouvent souvent à environ 4,5 m de l'axe de la liaison. On peut voir ainsi qu'au niveau du sol (0 m), le champ moyen le long des façades sera de l'ordre de $0,45 \mu\text{T}$; il sera inférieur à $0,4 \mu\text{T}$ à 1,5 m et à 3 m au-dessus du sol (courbe rouge et verte) et très légèrement supérieur à 1,5 m sous le niveau du sol (courbe non représentée sur la figure car sortant largement du graphique au droit des câbles mais valeurs reprises au Tableau 2 et en annexe 1)

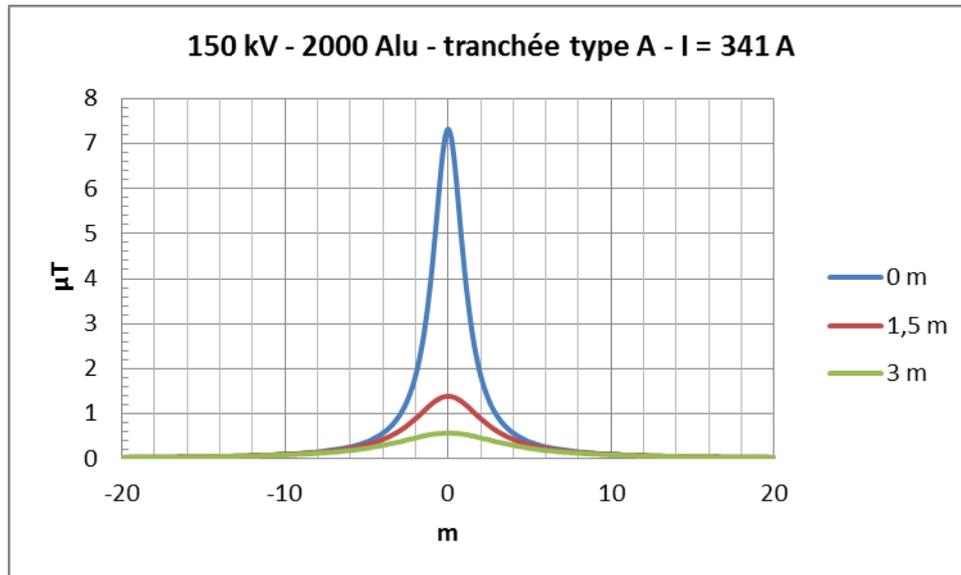


Figure 1: Champs moyens calculés à 0, 1,5 m et 3 m du sol pour une pose en trèfle jointif

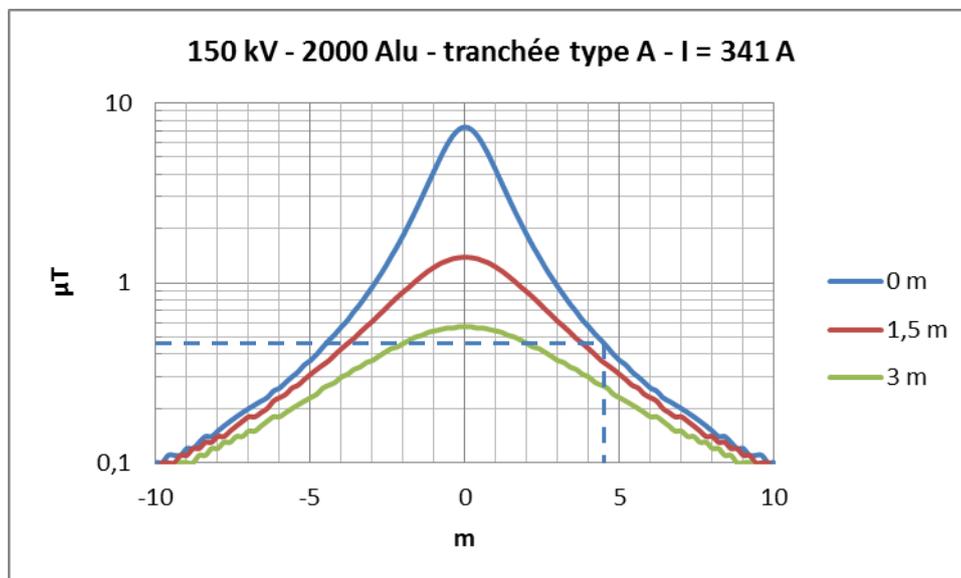


Figure 2: Champs moyens calculés à 0, 1,5 m et 3 m du sol pour une pose en trèfle jointif (échelle verticale logarithmique)

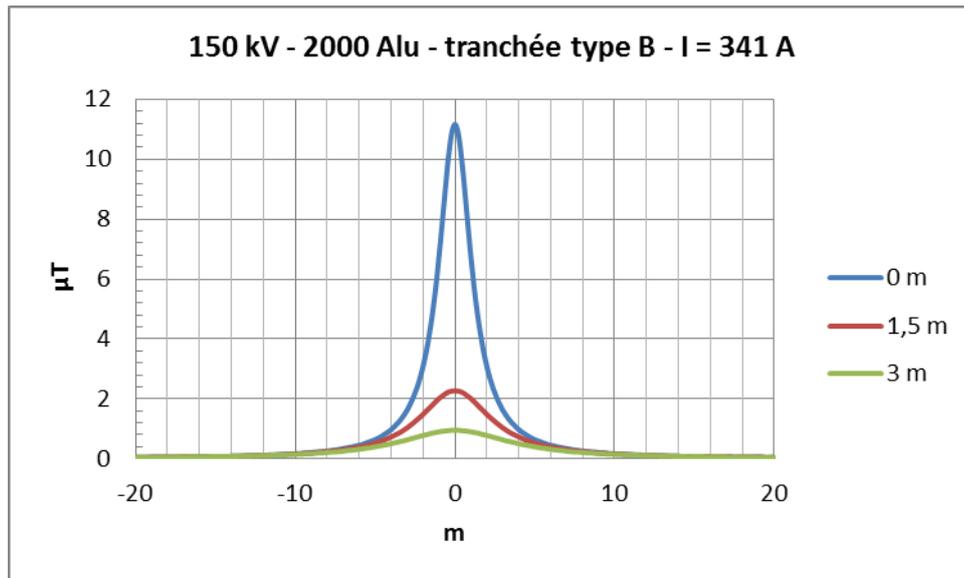
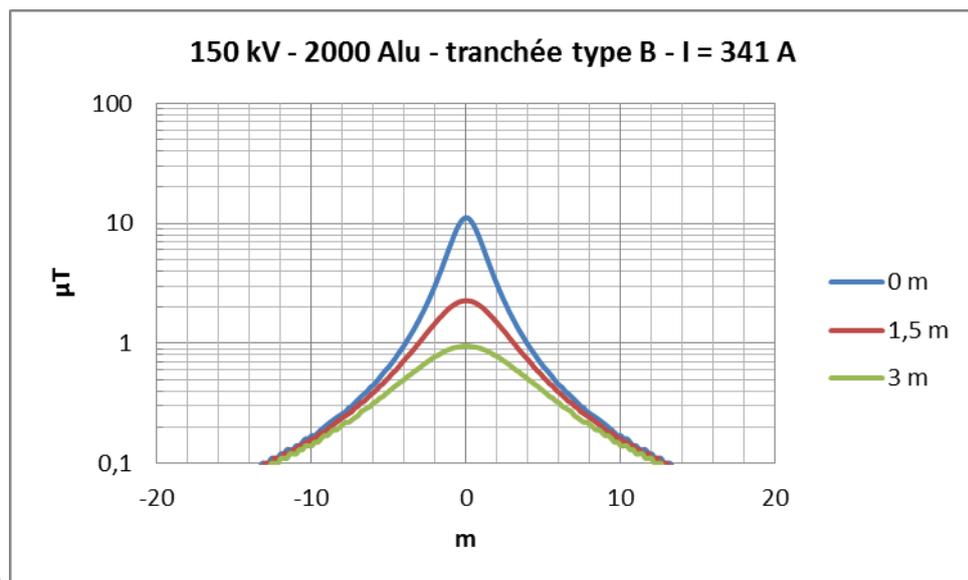


Figure 3: Champs moyens calculés à 0, 1,5 m et 3 m du sol pour une pose sous tube

La Figure 3 donne, pour la pose sous tube, les profils de champs moyens évalués également à 0, 1,5 m et 3 m au-dessus du sol.



La

Figure 4 reprend les mêmes profils de champ Figure 1 mais avec l'échelle verticale logarithmique.

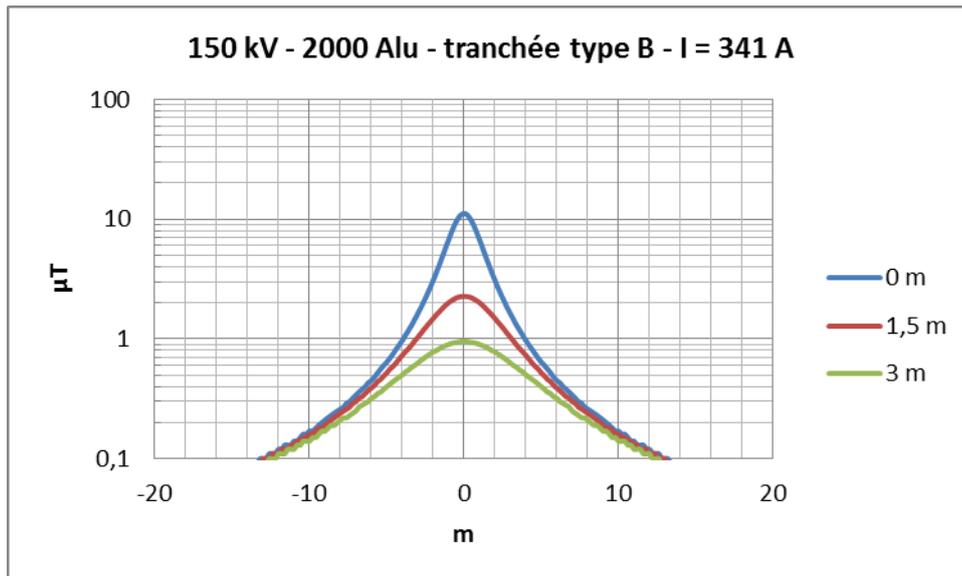


Figure 4: idem Figure 3 mais avec échelle verticale logarithmique

5.3.2. Profils des champs au voisinage des jonctions

Comme précisé en 4, aux endroits où les différents tronçons de câbles sont raccordés entre eux, le mode de pose est modifié (pose en nappe) pour faciliter la réalisation des jonctions. En ces endroits, le champ est donc plus élevé comme le montre les profils des Figure 5 et Figure 6.

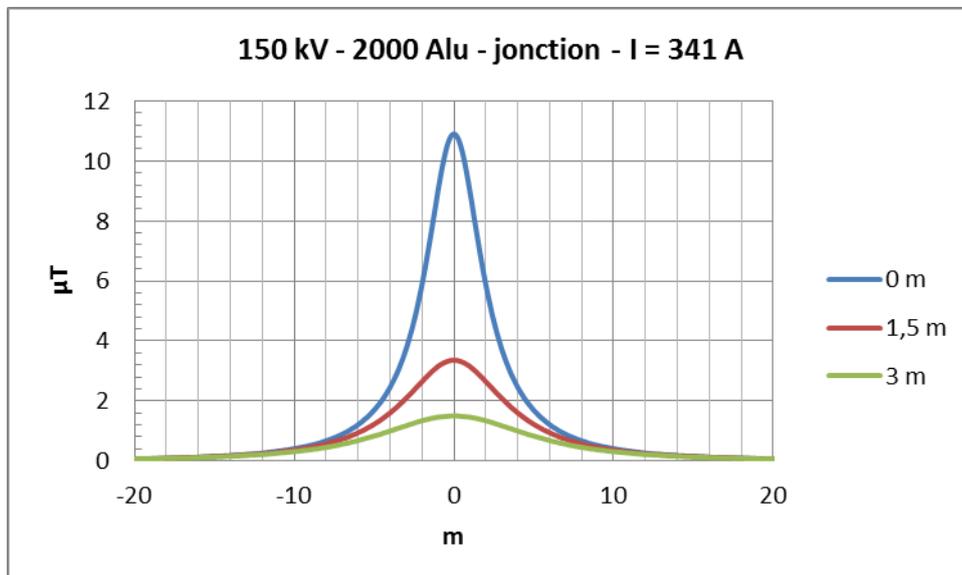


Figure 5: Champs moyens calculés à 0, 1,5 m et 3 m du sol au droit des jonctions

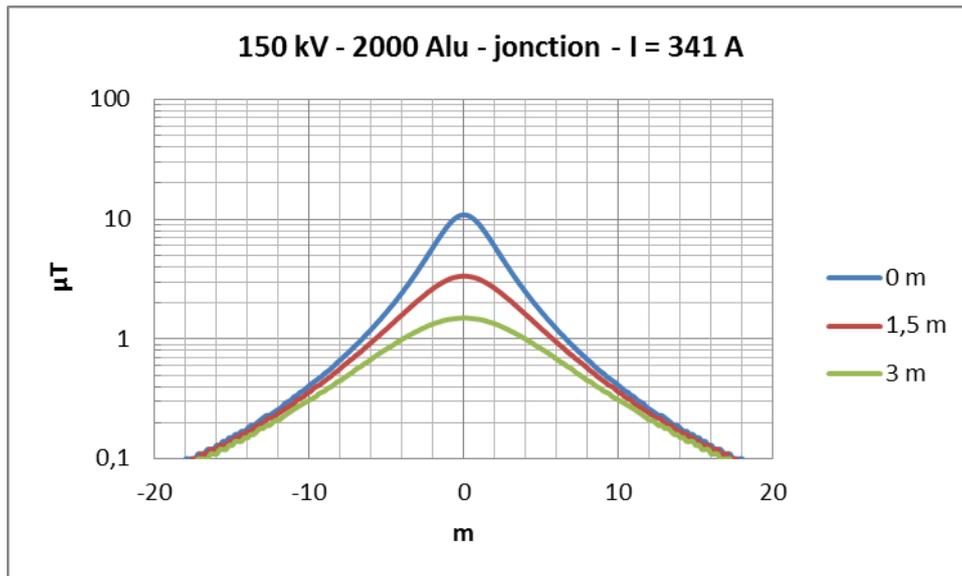


Figure 6: idem Figure 5 mais avec échelle verticale logarithmique

Les courbes d'iso-valeur du champ calculées à 1,5 m du sol au voisinage d'une jonction sont en outre illustrées à la Figure 7 (quadrillage : 12,5 m x 5 m).

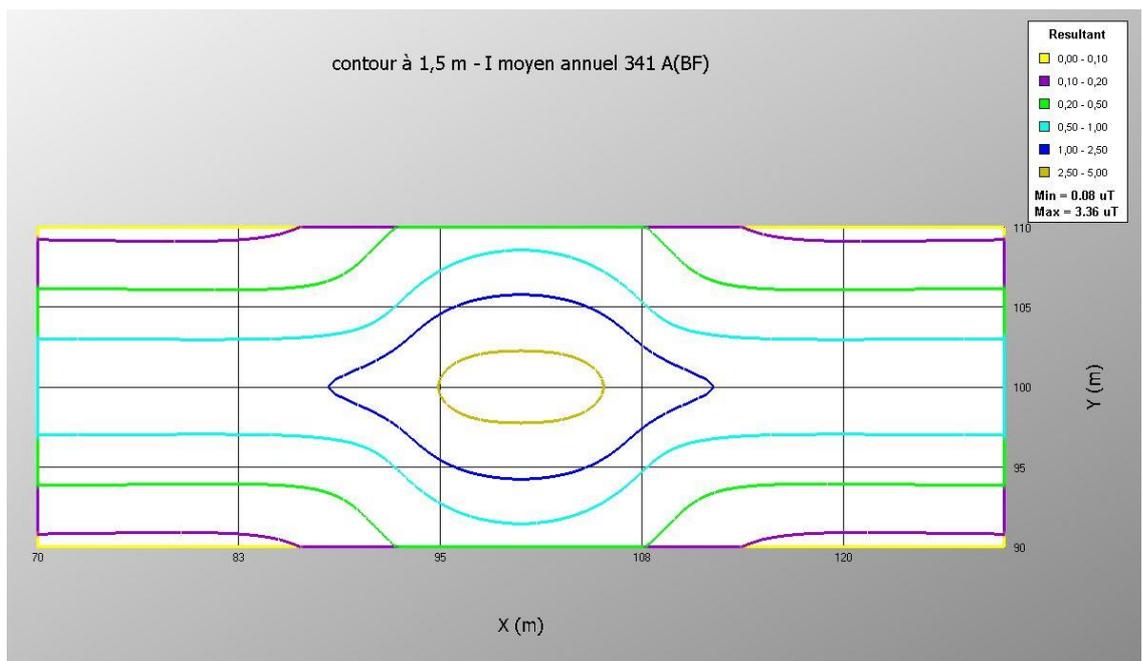


Figure 7: Courbes iso-champ au voisinage d'une jonction

5.3.3. Seuils épidémiologiques

A l'aide des profils de champs moyens établis ci-dessus, il est possible d'estimer la distance à l'axe de la liaison au-delà de laquelle les niveaux restent en dessous du seuil d'exposition de 0,4 μT mentionné dans certaines études épidémiologiques.

Ces distances sont reprises dans le Tableau 2 pour les 3 hauteurs au-dessus du sol.

Pour rappel, les façades sont situées entre 4,5 et 4,7 m de l'axe de la liaison.

Tableau 2: Distances à l'axe de la liaison pour un champ moyen de 0,4 μ T

Hauteur au-dessus du sol ²¹	-1,5 m	0 m	1,5 m	3 m
Trèfle jointif (type A)	5 m	4,8 m	4,2 m	2,7 m
Sous tube (type B)	6,6 m	6,4 m	5,9 m	5 m
Jonction (nappe)	10,3 m	10,1 m	9,6 m	8,6 m

L'annexe 1 reprend plus en détail les valeurs de champ moyen calculées à différentes hauteurs au-dessus du sol et à différentes distances de l'axe de la liaison (courant moyen de 340 A).

L'annexe 2 reprend les mêmes résultats de calculs mais réalisés cette fois pour un courant maximum annuel de 570 A.

Comme on peut le déduire de ces tables, une augmentation de courant de 66% n'accroît la distance correspondant au seuil épidémiologique de 0,4 μ T que de 30% environ.

6. Synthèse et conclusions

Les principes physiques qui sont à l'origine des champs ainsi que les principaux modes d'interaction de ceux-ci avec les équipements et avec les êtres vivants ont été rappelés.

A partir des informations fournies par l'Organisation Mondiale de la Santé, le point a aussi été fait sur l'état des connaissances scientifiques en matière d'incidence sur la santé ainsi que sur les recommandations internationales qui en découlent.

Les principales données physiques relatives à la liaison Woluwe – Charles-Quint ainsi que les hypothèses retenues pour évaluer les niveaux de champ qu'elle génèrera ont été détaillées.

Les calculs effectués montrent que, quelles que soient les hypothèses retenues, les champs magnétiques générés par la liaison seront toujours inférieurs au niveau de référence de 100 μ T recommandé par les instances internationales (ICNIRP, Conseil de l'Europe).

En outre, à quelques mètres de la liaison, les niveaux de champ moyens seront inférieurs aux seuils épidémiologiques cités dans la littérature scientifique.

7. Références

- [1] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) - International Commission for Non Ionizing Radiation Protection - Health Physics Society 2010

²¹ Une valeur négative signifie sous le niveau du sol c-à-d sous le niveau de l'asphaltage de la rue.

- [2] Recommandation CEE 1999/519 du 12/07/99 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques de 0 à 300 GHz (JO L 1999 du 30/07/99)
- [3] World Health Organization: Fact Sheet Nr 322 – June 2007
- [4] Milieurapport Vlaanderen MIRA – Thema Niet-ioniserende straling – Vlaamse Milieumaatschappij 2011

8. Annexe 1: Champ moyen calculé à différentes distances de l'axe de la liaison posée en trèfle jointif (tranchées type A) pour une charge de 30% de la capacité nominale du câble

Distance à l'axe de la liaison (m)	Champ à 1,5 m sous le sol (μT)	Champ au niveau du sol (μT)	Champ à 1,5 m au-dessus du sol (μT)	Champ à 3 m au-dessus du sol (μT)
0	87,26	7,33	1,39	0,57
0,2	64,58	7,12	1,38	0,57
0,4	36,11	6,55	1,36	0,56
0,6	20,81	5,78	1,32	0,56
0,8	13,07	4,96	1,28	0,55
1	8,84	4,2	1,22	0,54
1,2	6,34	3,54	1,16	0,53
1,4	4,75	2,98	1,09	0,51
1,6	3,68	2,52	1,02	0,5
1,8	2,94	2,15	0,95	0,48
2	2,39	1,84	0,89	0,46
2,2	1,99	1,59	0,83	0,44
2,4	1,68	1,39	0,77	0,43
2,6	1,43	1,21	0,71	0,41
2,8	1,24	1,07	0,66	0,39
3	1,08	0,95	0,61	0,37
3,2	0,95	0,85	0,57	0,36
3,4	0,84	0,76	0,53	0,34
3,6	0,75	0,69	0,49	0,33
3,8	0,68	0,62	0,46	0,31
4	0,61	0,57	0,43	0,3
4,2	0,55	0,52	0,4	0,28
4,4	0,51	0,48	0,37	0,27
4,6	0,46	0,44	0,35	0,26
4,8	0,43	0,4	0,33	0,24
5	0,39	0,37	0,31	0,23
5,2	0,36	0,35	0,29	0,22
5,4	0,34	0,32	0,27	0,21
5,6	0,31	0,3	0,26	0,2
5,8	0,29	0,28	0,24	0,19

6	0,27	0,26	0,23	0,18
6,2	0,26	0,25	0,22	0,18
6,4	0,24	0,23	0,2	0,17
6,6	0,23	0,22	0,19	0,16
6,8	0,21	0,21	0,18	0,15
7	0,2	0,2	0,18	0,15
7,2	0,19	0,19	0,17	0,14
7,4	0,18	0,18	0,16	0,14
7,6	0,17	0,17	0,15	0,13
7,8	0,16	0,16	0,14	0,13
8	0,15	0,15	0,14	0,12
8,2	0,15	0,14	0,13	0,12
8,4	0,14	0,14	0,13	0,11
8,6	0,13	0,13	0,12	0,11
8,8	0,13	0,12	0,12	0,1
9	0,12	0,12	0,11	0,1
9,2	0,12	0,11	0,11	0,1
9,4	0,11	0,11	0,1	0,09
9,6	0,11	0,11	0,1	0,09
9,8	0,1	0,1	0,1	0,09
10	0,1	0,1	0,09	0,08

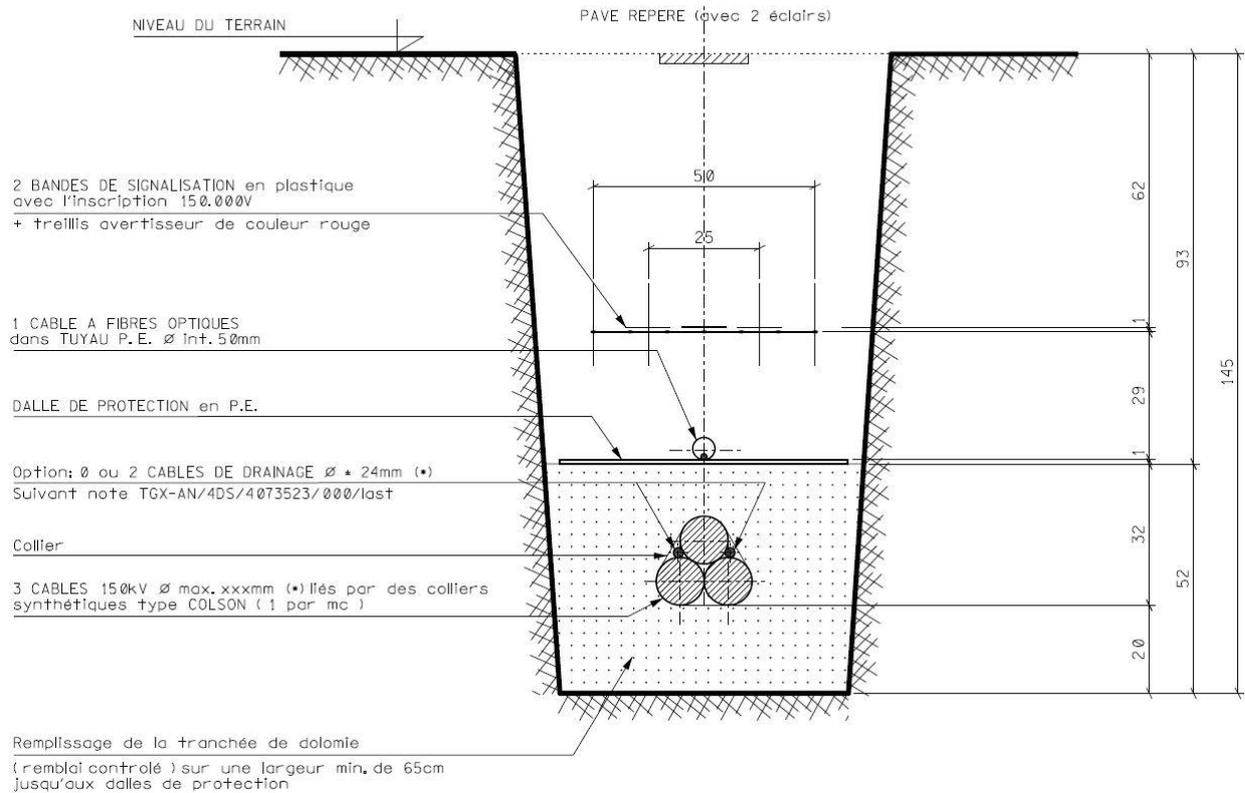
9. Annexe 2: Champ maximum calculé à différentes distances de l'axe de la liaison posée en trèfle jointif (tranchées type A) pour une charge de 50% de la capacité nominale du câble (100% werkingscapaciteit selon [4])

Distance à l'axe de la liaison (m)	Champ à 1,5 m sous le sol (μT)	Champ au niveau du sol (μT)	Champ à 1,5 m au-dessus du sol (μT)	Champ à 3 m au-dessus du sol (μT)
0	145,43	12,22	2,32	0,95
0,2	107,63	11,87	2,30	0,95
0,4	60,18	10,92	2,27	0,93
0,6	34,68	9,63	2,20	0,93
0,8	21,78	8,27	2,13	0,92
1	14,73	7,00	2,03	0,90
1,2	10,57	5,90	1,93	0,88
1,4	7,92	4,97	1,82	0,85
1,6	6,13	4,20	1,70	0,83
1,8	4,90	3,58	1,58	0,80
2	3,98	3,07	1,48	0,77
2,2	3,32	2,65	1,38	0,73
2,4	2,80	2,32	1,28	0,72
2,6	2,38	2,02	1,18	0,68
2,8	2,07	1,78	1,10	0,65
3	1,80	1,58	1,02	0,62
3,2	1,58	1,42	0,95	0,60
3,4	1,40	1,27	0,88	0,57
3,6	1,25	1,15	0,82	0,55
3,8	1,13	1,03	0,77	0,52
4	1,02	0,95	0,72	0,50
4,2	0,92	0,87	0,67	0,47
4,4	0,85	0,80	0,62	0,45
4,6	0,77	0,73	0,58	0,43
4,8	0,72	0,67	0,55	0,40
5	0,65	0,62	0,52	0,38

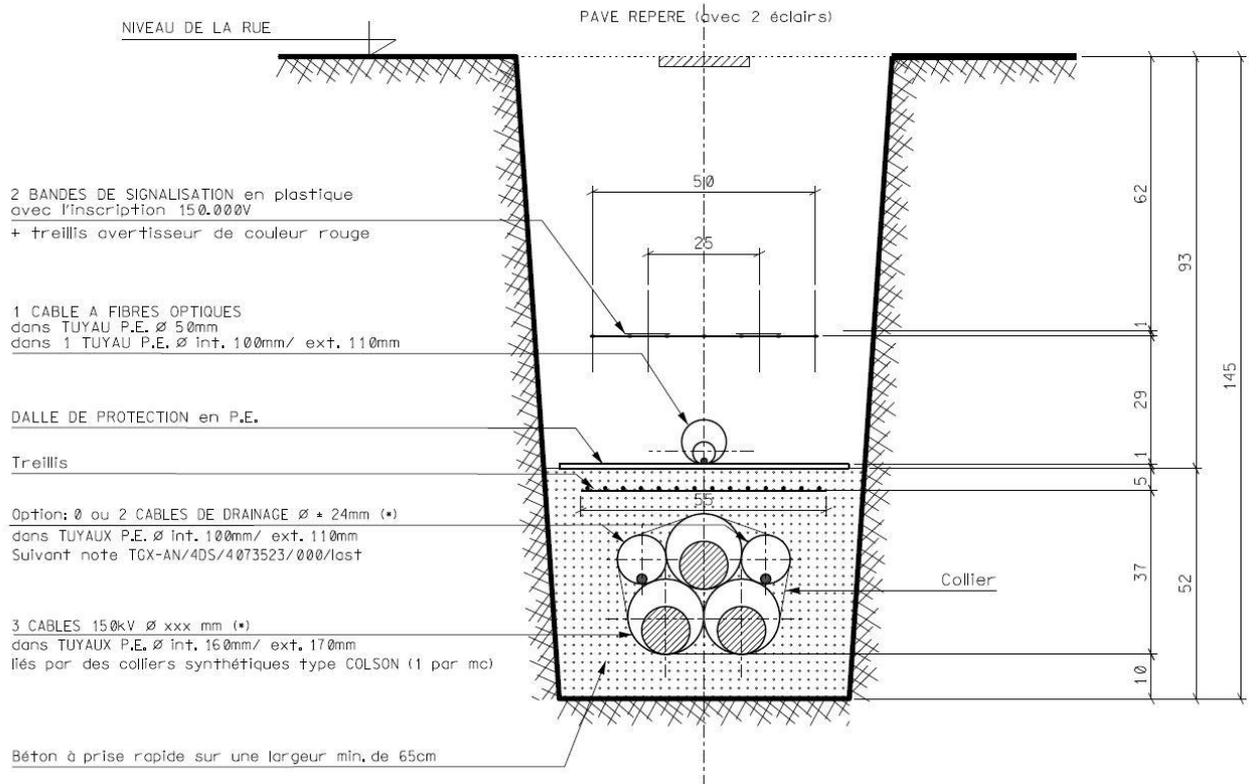
5,2	0,60	0,58	0,48	0,37
5,4	0,57	0,53	0,45	0,35
5,6	0,52	0,50	0,43	0,33
5,8	0,48	0,47	0,40	0,32
6	0,45	0,43	0,38	0,30
6,2	0,43	0,42	0,37	0,30
6,4	0,40	0,38	0,33	0,28
6,6	0,38	0,37	0,32	0,27
6,8	0,35	0,35	0,30	0,25
7	0,33	0,33	0,30	0,25
7,2	0,32	0,32	0,28	0,23
7,4	0,30	0,30	0,27	0,23
7,6	0,28	0,28	0,25	0,22
7,8	0,27	0,27	0,23	0,22
8	0,25	0,25	0,23	0,20
8,2	0,25	0,23	0,22	0,20
8,4	0,23	0,23	0,22	0,18
8,6	0,22	0,22	0,20	0,18
8,8	0,22	0,20	0,20	0,17
9	0,20	0,20	0,18	0,17
9,2	0,20	0,18	0,18	0,17
9,4	0,18	0,18	0,17	0,15
9,6	0,18	0,18	0,17	0,15
9,8	0,17	0,17	0,17	0,15
10	0,17	0,17	0,15	0,13

10. Annexe 3 : coupes de tranchées

TYPE A



TYPE B



Fouille avec jonctions terminées et avant remblayage.
Mofput met afgewerkte moffen vóór aanvulling.

