# Apprentissage par problème en Physique (APP)

# **Enoncé SéQUENCE 1 :**

# Les champs électriques dans les lignes Haute Tension

Comme décoration de leur nouvelle attraction, Walibi utilise des sphères de plastique, creuses et pas très lourdes, de couleurs différentes, suspendues à des cordes les unes à côté des autres. En temps normal, les sphères se touchent et peuvent s’entrechoquer au gré du vent, les sons qui en sont issus donnant une ambiance particulière à l’attraction.

## Introduction

Les centrales électriques fournissent l’énergie nécessaire à un grand nombre d’éléments de l’activité humaine. Le transport de l’énergie électrique a un impact évident sur le paysage et notre environnement. Nous vous proposons dans cet APP, d’analyser plusieurs aspects des installations électriques mises en place dans le cadre d’une ligne reliant un parc d’éoliennes au poste de transformation haute tension le plus proche, situé à une vingtaine de kilomètres. Cette analyse se fera pour une structure de base et dans un cadre simplifié pour approfondir les aspects de **l'électrostatique** et de la **conduction électrique** traités précédemment.



## Questions initiales

En regardant autour de soi, certaines questions viennent naturellement à l'esprit, par exemple:

* Les lignes haute-tension sont-elles toutes aériennes ?
* Quelles sont les valeurs et les types de tension et de courant rencontrés dans une ligne haute-tension ?
* Le courant et la tension sont-ils les mêmes aux deux extrémités de la ligne ?
* Y a-t-il une perte d'énergie électrique le long de la ligne lors de son transport ?
* Les phénomènes qui se déroulent dans la ligne peuvent-ils la mettre en danger ?
* Quels sont les critères qui influenceront le choix des matériaux la constituant, ainsi que le choix des dimensions géométriques ?

Dans une première étape, identifiez les éléments importants dont vous pensez avoir besoin pour répondre aux questions précédentes. Cherchez ensuite les concepts physiques nécessaires, définissez et résumez-les en une page maximum *correctement formalisée*.

## Structure simplifiée

Dans une deuxième étape, on s'intéressera à une ligne souterraine. Nous considérerons une structure simplifiée limitée à un seul câble cylindrique (voir figure). Le conducteur principal est le conducteur interne, qui est formé d'un métal bon conducteur. Nous supposerons que ce conducteur a la forme d'un cylindre creux. Ce conducteur est entouré d'une gaine isolante, puis d'un second conducteur, de section plus faible. L'ensemble est entouré d'une gaine de protection non représentée. Le courant qui traverse le conducteur central est censé retourner à son point de départ via un conducteur parfait qui n'est pas représenté. Pour faciliter le travail, on vous propose d’utiliser les notations de la figure 1.

Les grandeurs r1 , r2 , r3 et r4 caractérisent la ligne. r1 et r2 sont les rayons intérieurs et extérieurs du conducteur principal (en pratique, r1 est souvent nul). (r2-r1) représente donc la partie effectivement conductrice du câble, p. ex. du cuivre ou de l’aluminium. (r3-r2) représente l'épaisseur de la partie isolante séparant le conducteur principal du conducteur externe.



Fig.1 Description de la structure simplifiée

A titre d'approximation, on supposera ici :

* H1. que les champs peuvent être calculés à chaque instant en fonction des valeurs *instantanées* de la tension et du courant (hypothèse « **statique** ») ;
* H2. que le courant du conducteur principal revient à son point de départ par un conducteur auxiliaire (non représenté) appelé "neutre" et non par le conducteur externe du câble ;
* H3 que tous les points du conducteur *neutre* sont au même potentiel (pas de chute de tension dans ce conducteur) ;
* H4. que le potentiel du conducteur *neutre* est zéro (c'est-à-dire le même potentiel que le sol), ainsi que le potentiel du conducteur externe du câble.

**Questions relatives à la situation simplifiée**

Dimensionner le câble signifie établir ses caractéristiques pour un usage dans des conditions « normales » tout en se prémunissant des dégâts occasionnés par les surtensions et les court-circuits qui peuvent en résulter.

Pouvez-vous dès lors :

* calculer la valeur de la tension *de crête* du câble (entre les conducteurs interne et externe) dans des conditions normales de fonctionnement (tension égale à la tension "spécifiée" par le fabricant) ;
* calculer le champ électrique *de crête* en tout point (intérieur et extérieur du câble) et faire un graphe de l'intensité de ce champ en fonction de la position ;
* tracer des équipotentielles associées à ce champ ;
* calculer le champ électrique *de crête* maximum ;
* examiner de façon critique les valeurs maximum citées en tenant compte des propriétés des matériaux ;
* calculer la charge électrique de chaque conducteur et l'énergie accumulée dans la ligne sous forme capacitive. Ce calcul sera effectué pour l'instant où la tension passe par sa valeur *de crête* ;
* calculer la résistance du conducteur principal au courant circulant sur toute la longueur de ce conducteur ;
* calculer la puissance moyenne perdue par effet Joule lorsque le câble est utilisé à son régime nominal, comparer cette puissance à la puissance moyenne transmissible dans les mêmes conditions et indiquez l'influence du choix du métal conducteur ;
* qu’en est-il, lorsque cette ligne est utilisée pour transporter une puissance réduite, ce qui se produit régulièrement lorsque le vent actionnant les éoliennes de la centrale faiblit ;
* calculer la densité de puissance calorifique produite à l'intérieur du câble (en chaque point).
* compte tenu de ces résultats, pouvez-vous expliquer pourquoi le transport d'énergie électrique s'effectue à des tensions de plusieurs dizaines ou centaines de milliers de volts? Est-il intéressant d'utiliser un câble à une tension inférieure à sa tension spécifiée ?

**Données techniques**

Les données techniques ci-dessous correspondent à un câble réel disponible auprès de fabricants. La tension et le courant sont alternatifs (sinusoïdale 50 Hz) et les valeurs données sont des valeurs efficaces.

|  |
| --- |
| Isolant : polyéthylène réticulé |
| Tension spécifiée (kV) |  |
| Courant nominal (kA) | 686 |
| Matériau du conducteur principal | Aluminium |
| Section du conducteur principal (mm2) | 630 |
| Épaisseur nominale de l'isolant r3 - r2 (mm) | 8.8 |
| Diamètre extérieur de l'isolant 2 x r3 (mm) | 50.25 |

Le champ disruptif (aussi appelé "*rigidité diélectrique*" en français et "*dielectric strength*" en anglais) est pour le polyéthylène réticulé d'environ 35 kV / mm (selon un catalogue CDC-Câbleries de Charleroi et différents sites Internet). Elle dépend de la qualité du matériau et des conditions d'essai.

# **Enoncé SéQUENCE 2 :**

# Champs et énergie magnétiques des lignes électriques

## Introduction

Nous vous proposons, dans ce deuxième APP, d’entreprendre l'analyse du champ magnétique associé à la ligne électrique mise en situation dans l’APP précédent. Cette première analyse se fera pour une structure de base et dans un cadre très simplifié. Une étude plus approfondie sera faite lors de l’APP suivant.



## Questions initiales

En regardant autour de soi, certaines questions viennent naturellement à l'esprit, par exemple : existe-t-il des champs magnétiques associés aux lignes de transport d'énergie électrique. Si oui, ces champs ont-ils une influence sur la ligne elle-même, quelle est leur valeur et leur direction au niveau du sol.

Dans une première étape, identifiez les éléments importants dont vous pensez avoir besoin, cherchez ensuite les concepts physiques nécessaires, définissez et résumez les en une page maximum correctement formalisée.

## Structure simplifiée

Pour l'instant, on limitera l'étude au champ associé à un seul câble d'une ligne souterraine, les autres câbles étant supposés suffisamment éloignés pour ne pas avoir d'influence sur les résultats.

Cela nous conduit à considérer la structure simplifiée suivante.

Nous supposerons que l'axe du câble se trouve à une profondeur de 80 cm à l'intérieur du sol.

Le courant à considérer pour les calculs sera le même que celui qui a été considéré dans votre solution à l'APP précédent.



Fig.1 Description de la structure simplifiée.

**Cas d'un courant circulant uniquement dans le conducteur central**

Si seul le conducteur central est parcouru par un courant, pouvez-vous :

**-** faire un graphe des lignes de champ magnétique (pour sa valeur *de crête*) dans et autour du câble ;

- calculer le champ magnétique au niveau du sol ;

* calculer la force exercée par le champ magnétique terrestre sur le câble. Pour quelle orientation du câble cette force est-elle maximum. Comparez cette force au poids du câble.

**Cas où le retour du courant s'effectue par le conducteur externe**

Si le courant transporté par le conducteur interne revient à son point de départ par le conducteur externe, pouvez-vous :

* répondre aux mêmes questions que dans le premier cas ;
* dire (en le justifiant) s'il y a un intérêt à faire revenir le courant par le conducteur externe ;
* calculer en tout point l'expression du vecteur **S** défini par **S** = **E** x **H** , en supposant que le courant et la tension passent simultanément par leur valeur de crête ;
* calculer le flux de ce vecteur à travers un plan perpendiculaire au câble. Quelle est la dimension physique du résultat ? Comparez le résultat à une grandeur déjà calculée lors de l'APP précédent et ayant la même dimension physique.

Compte tenu de la section des conducteurs du câble considéré, faire revenir le courant par le conducteur externe vous semble-t-il possible en pratique ? Si non, pourquoi le câble n'a-t-il pas été conçu pour être utilisé de cette façon ?

**Données techniques**

Utilisez les mêmes données que lors de l'APP précédent et reprises ci-dessous. Vous pouvez les compléter par le fait que le conducteur externe est en cuivre et que sa section est de 24 mm2.

**Données techniques**

Les données techniques ci-dessous correspondent à un câble réel disponible auprès de fabricants. La tension et le courant sont alternatifs (sinusoïdale 50 Hz) et les valeurs données sont des valeurs efficaces.

|  |
| --- |
| Isolant : polyéthylène réticulé |
| Tension spécifiée (kV) |  |
| Courant nominal (kA) | 686 |
| Matériau du conducteur principal | Aluminium |
| Section du conducteur principal (mm2) | 630 |
| Épaisseur nominale de l'isolant r3 - r2 (mm) | 8.8 |
| Diamètre extérieur de l'isolant 2 x r3 (mm) | 50.25 |

# **Enoncé SéQUENCE 3 :**

#  Lignes et champs magnétiques

## Introduction générale

Le problème qui vous est soumis a pour objectif l'apprentissage des **phénomènes d'induction**. Il se situe dans la suite des deux APP précédents, à savoir l'étude d'une ligne de transport d'énergie électrique, mais on ne se limitera plus maintenant aux phénomènes stationnaires. On sait en effet que le courant qui parcourt les câbles est alternatif. Le champ magnétique associé à ce courant évolue donc à la même fréquence que le courant (à savoir 50 Hz en Europe).



On considèrera une structure simplifiée (la même que précédemment). Il s'agira de déterminer les effets des variations incessantes du champ associé aux courants alternatifs. Certaines questions viennent naturellement à l'esprit dans ce contexte, par ex. :

- Quels sont les effets de ces variations sur le comportement de la ligne ?

- Y a-t-il de l'énergie accumulée sous forme magnétique quelque part dans la ligne, et si oui, comment varie-t-elle dans le temps ? Si l’énergie varie dans le temps, comment cela peut-il être concilié avec le principe de la conservation de l’énergie ?

**Données techniques**

Utilisez les mêmes données techniques que précédemment. Estimez l’épaisseur du conducteur externe sur base de ces données.

Pour rappel, la tension et le courant sont alternatifs sinusoïdaux (50 Hz).

**Cas d’un courant circulant uniquement dans le conducteur central**

Si seul le conducteur central est parcouru par un courant, pouvez-vous

* faire un graphe de la densité d’énergie magnétique (pour la valeur de crête du courant) dans et autour du câble ;
* calculer l’énergie magnétique accumulée en intégrant cette densité ;
* comparer cette énergie à l’énergie stockée dans le câble sous forme «électrostatique » ;
* examiner la possibilité de réduire le champ magnétique extérieur au câble en entourant celui-ci d’un blindage magnétique.

**Cas où le retour du courant s’effectue par le conducteur externe**

Si le courant transporté par le conducteur interne revient à son point de départ par le conducteur externe, pouvez-vous :

* répondre aux mêmes questions que dans le premier cas,
* calculer l’évolution dans le temps du flux magnétique encerclé par le circuit,
* calculer l’inductance du câble. L’énergie magnétique calculée précédemment peut-elle s’exprimer en utilisant cette inductance ?

En supposant que, à l’extrémité du câble qui est connectée aux générateurs éoliens, le courant est en phase avec la tension et que tous deux correspondent aux valeurs nominales du câble, calculez l’évolution de l’énergie stockée dans le câble en fonction du temps. Quelles sont ses valeurs minimum et maximum atteintes ? Calculez aussi l’évolution des tensions, courants et puissances instantanées aux deux extrémités du câble. L’écart entre ces deux puissances correspond-t-il aux variations de l’énergie stockée ?

***Indications :*** pour calculer le flux magnétique, il faut en principe intégrer le champ magnétique B sur une surface encerclée par le circuit électrique dont les deux conducteurs du câble font partie. Cette surface pourrait être un rectangle dont la longueur est celle du câble, l'un des grands côtés de ce rectangle se trouvant dans le conducteur interne et l'autre dans le conducteur externe. On remarquera que, comme les conducteurs ont une épaisseur non négligeable, le résultat du calcul dépend de la position de ces côtés à l'intérieur des conducteurs. Le flux dont la dérivée temporelle est la tension induite (par la loi de Faraday) est un flux moyen.