

GLQ3205

Géophysique appliquée 2

Méthodes EM: Introduction

Ahmed Mhenni
ahmed.mhenni@polymtl.ca

Été 2024

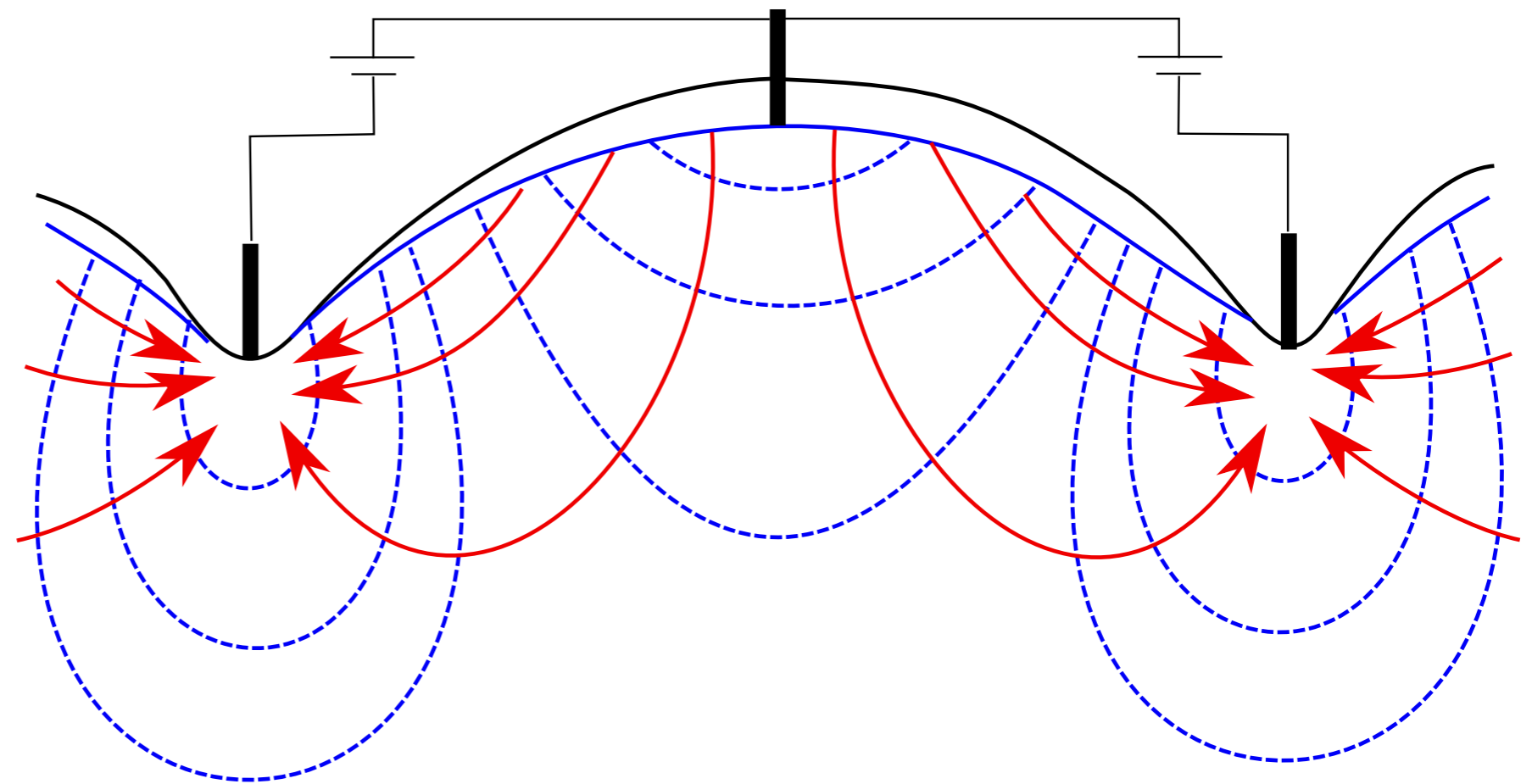
Plan du cours

1. Révision des méthodes électriques
2. Propagation des ondes EM
3. Génération et mesure des champs
4. Circuit équivalent
5. Exemple: conducteur enfoui

La loi d'Ohm

La loi d'Ohm nous dit comment le courant se répartit dans le sol

$$\begin{aligned}
 \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \\
 &= -\sigma \nabla V \\
 \Delta V &= RI
 \end{aligned}$$



- Isopièzes / équipotentiels
- Lignes de courant

Potentiel spontané

Les mécanismes en PP sont analogues aux mécanismes causant des différences de potentiel naturelles. **La polarisation résulte de la séparation de charges.**

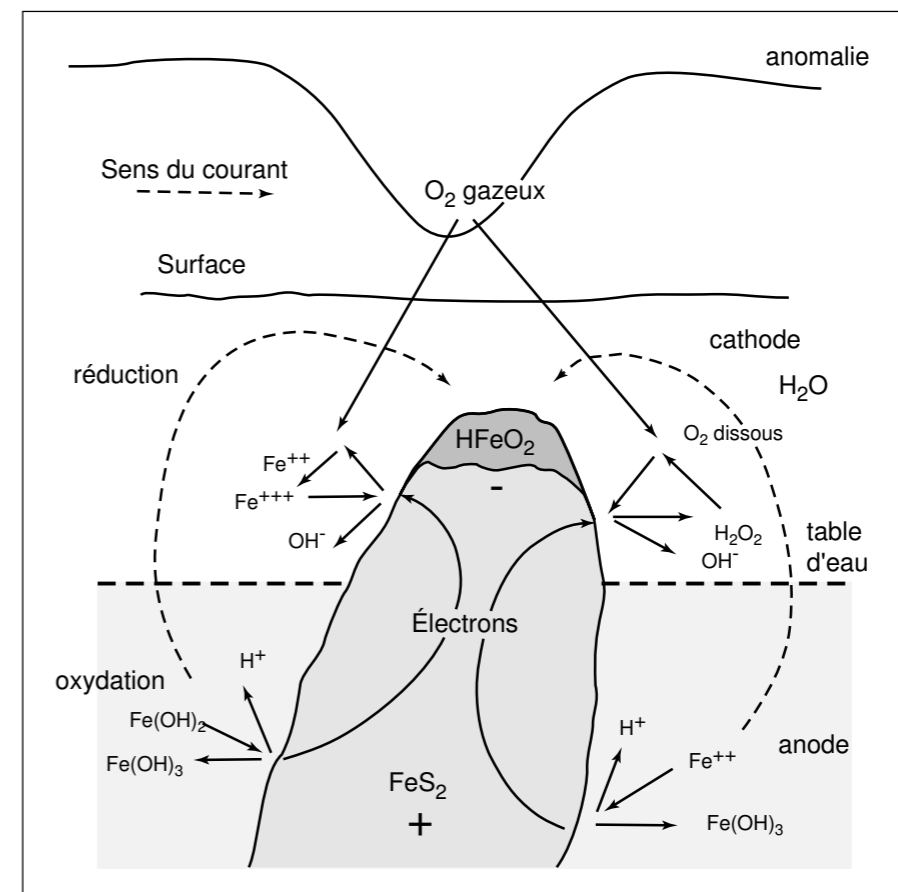
Potentiel électrocinétique

$$E_k = -\phi \frac{\Delta P \epsilon \rho}{4\pi \eta}$$

Potentiel électrochimique:

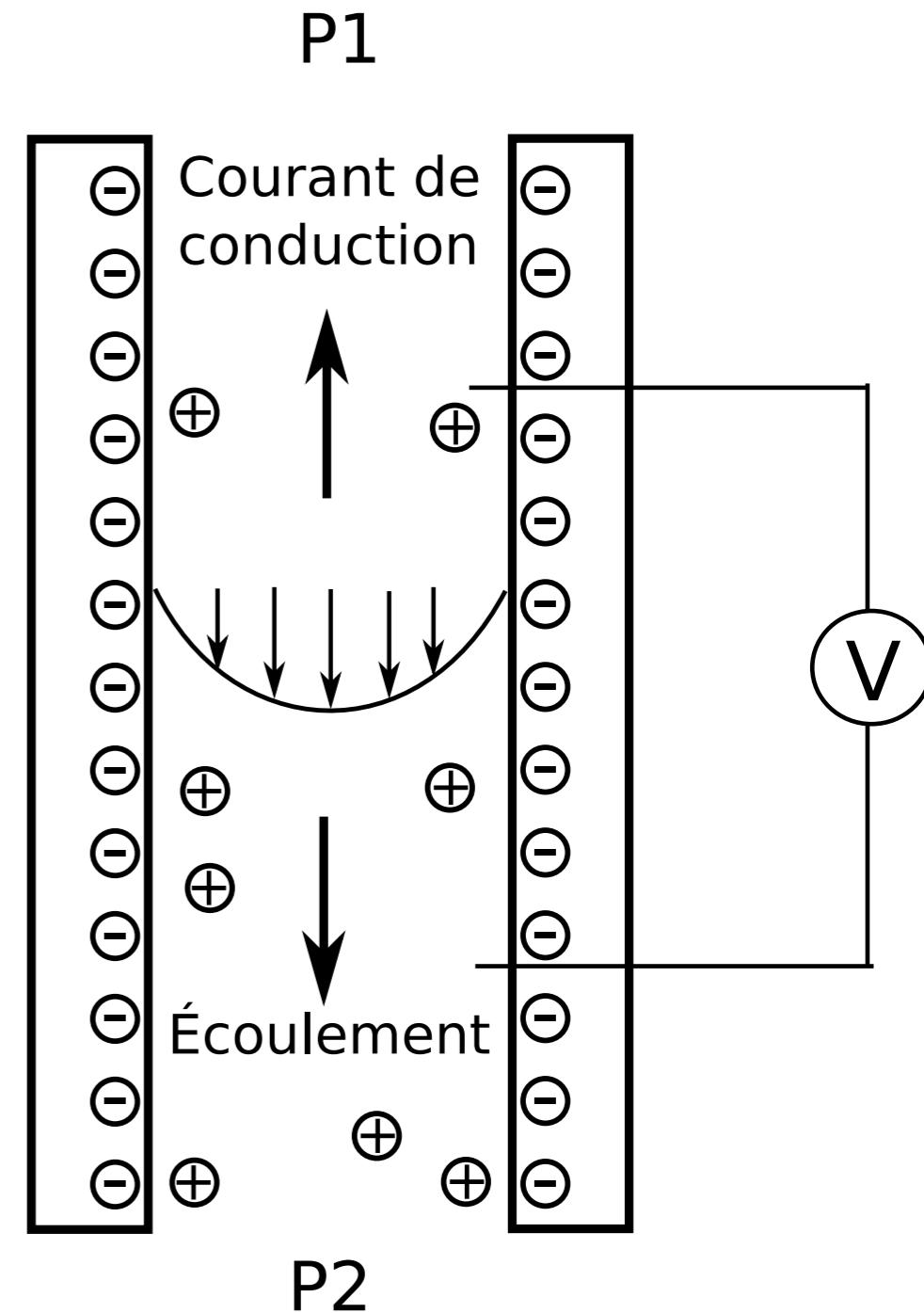
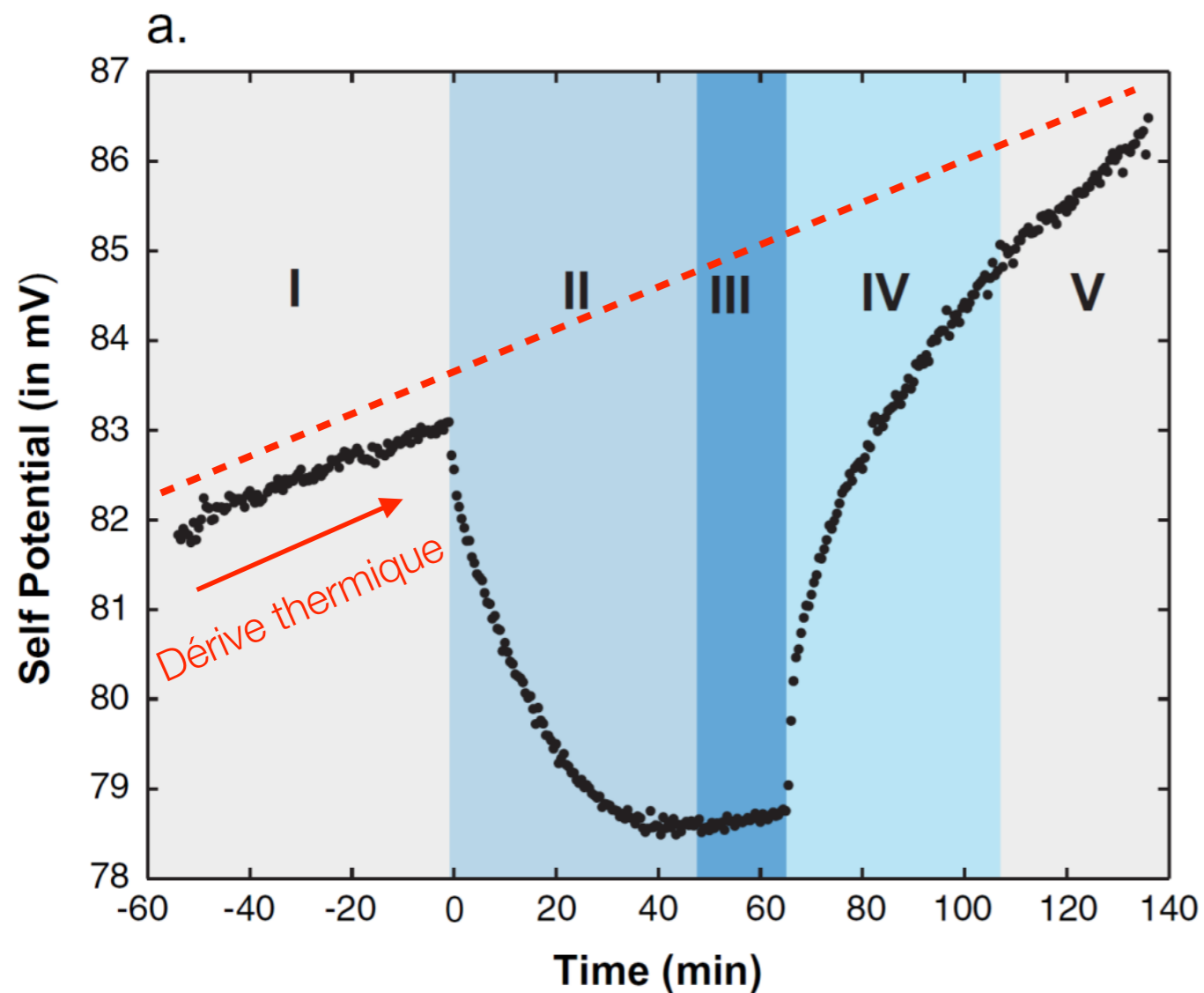
$$E_c = -70.7T \log \frac{C_1}{C_2}$$

Potentiel de minéralisation



Polarisation spontanée

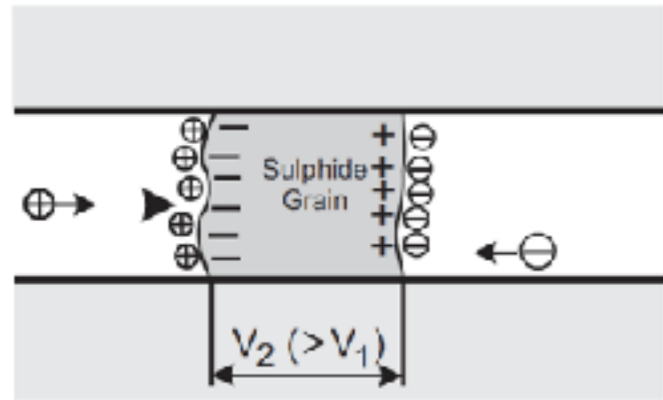
- Le principal attrait de la polarisation spontanée est que c'est la seule méthode permettant de suivre l'écoulement de l'eau



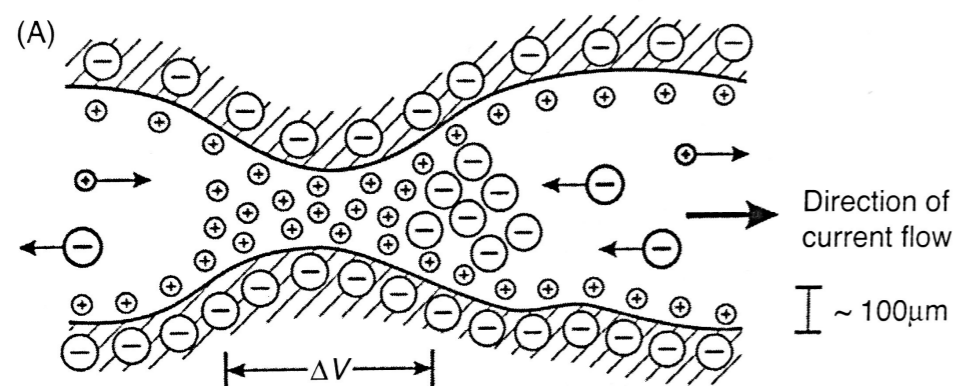
Mécanismes de conduction

Pour comprendre l'effet PP, il faut comprendre les mécanismes de conduction électrique.

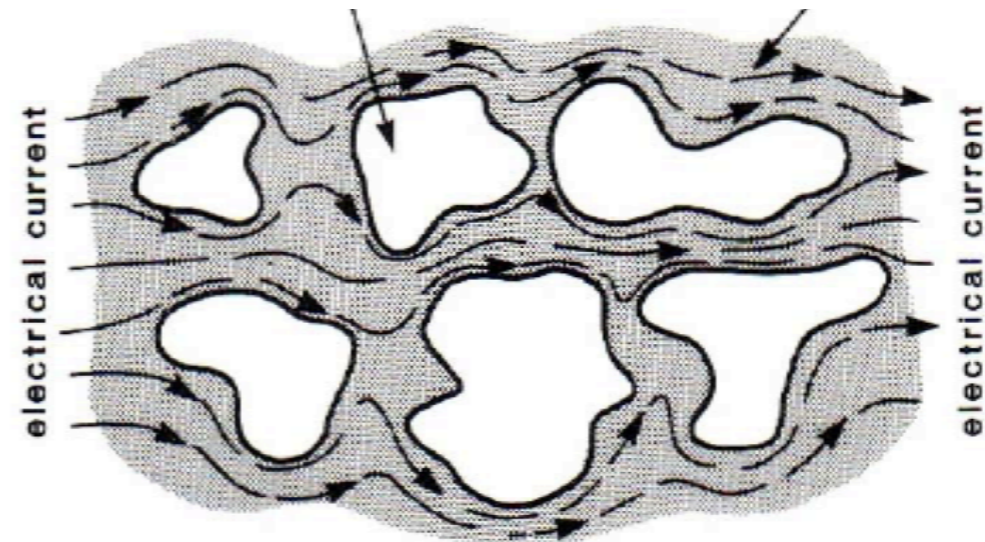
Potentiel d'électrodes



Potentiel de membrane



Conduction ionique

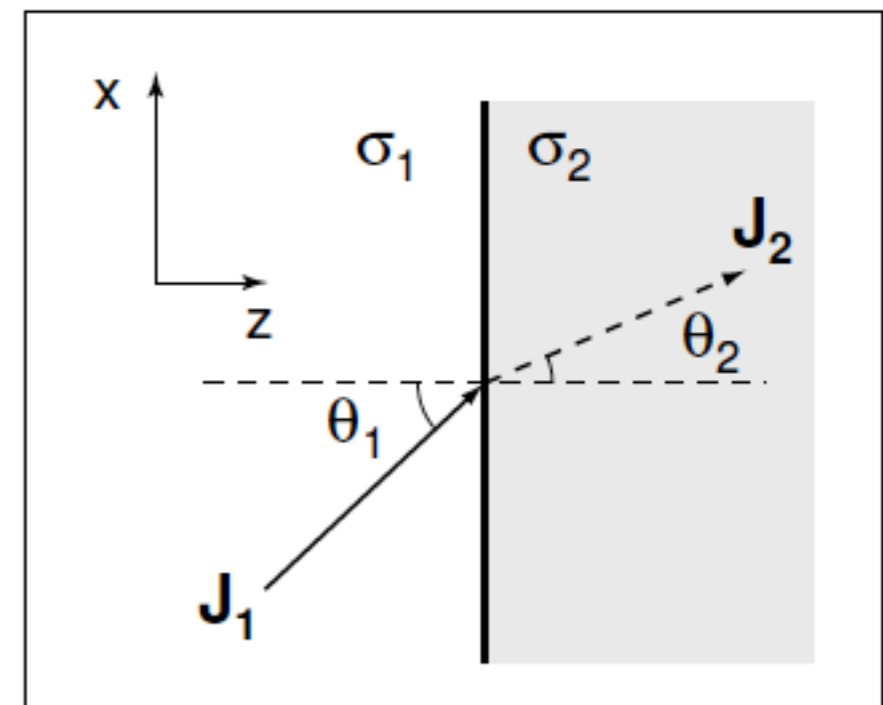
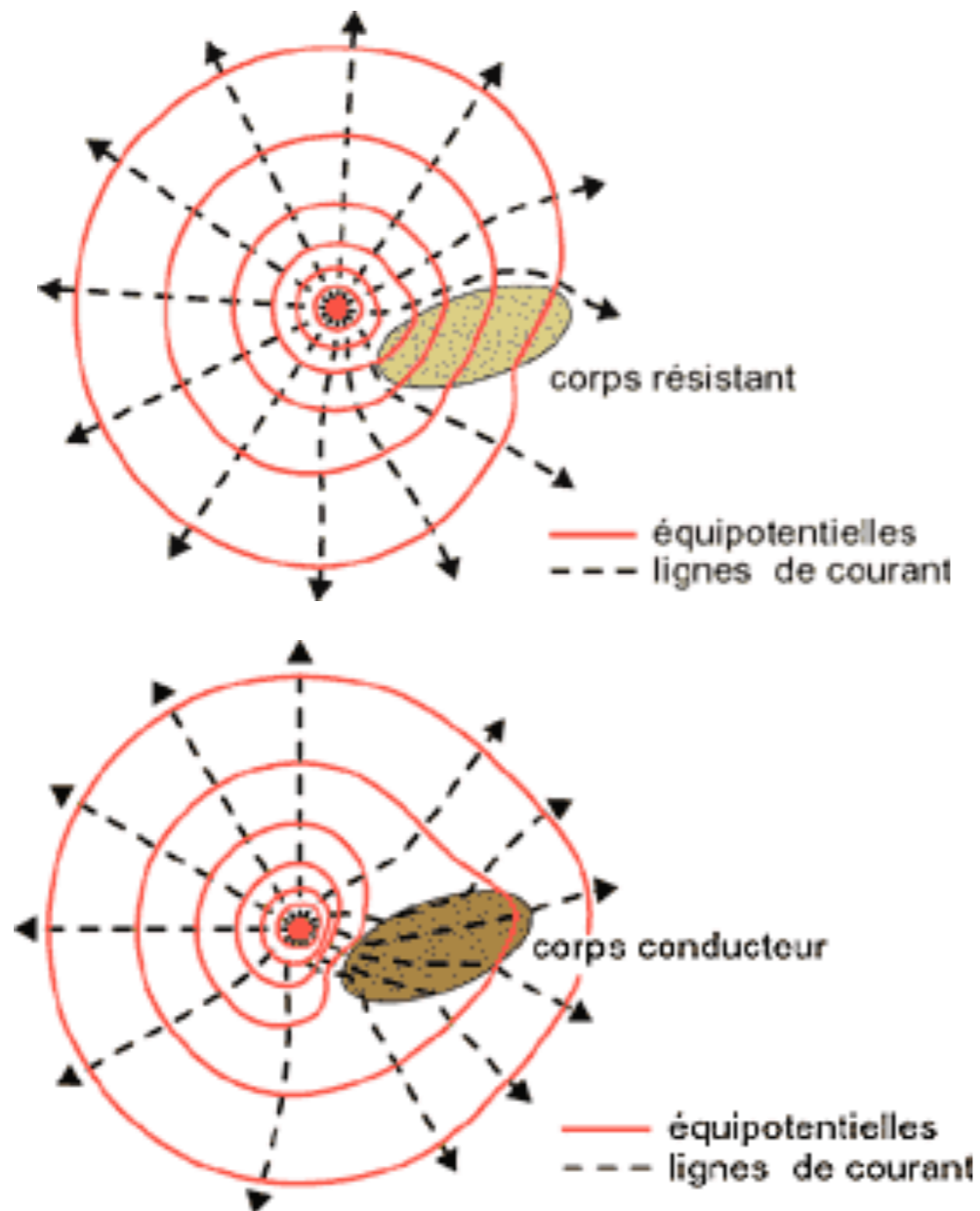


$$\rho_{eff} = a\phi^{-m} S_w^{-n} \rho_w$$

- ϕ : Porosité
- S_w : Saturation en eau

Déviations du potentiel

Les inhomogénéités du sol dévient les lignes de courant et les équipotentielles.



$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Méthodes électriques: injection de courant

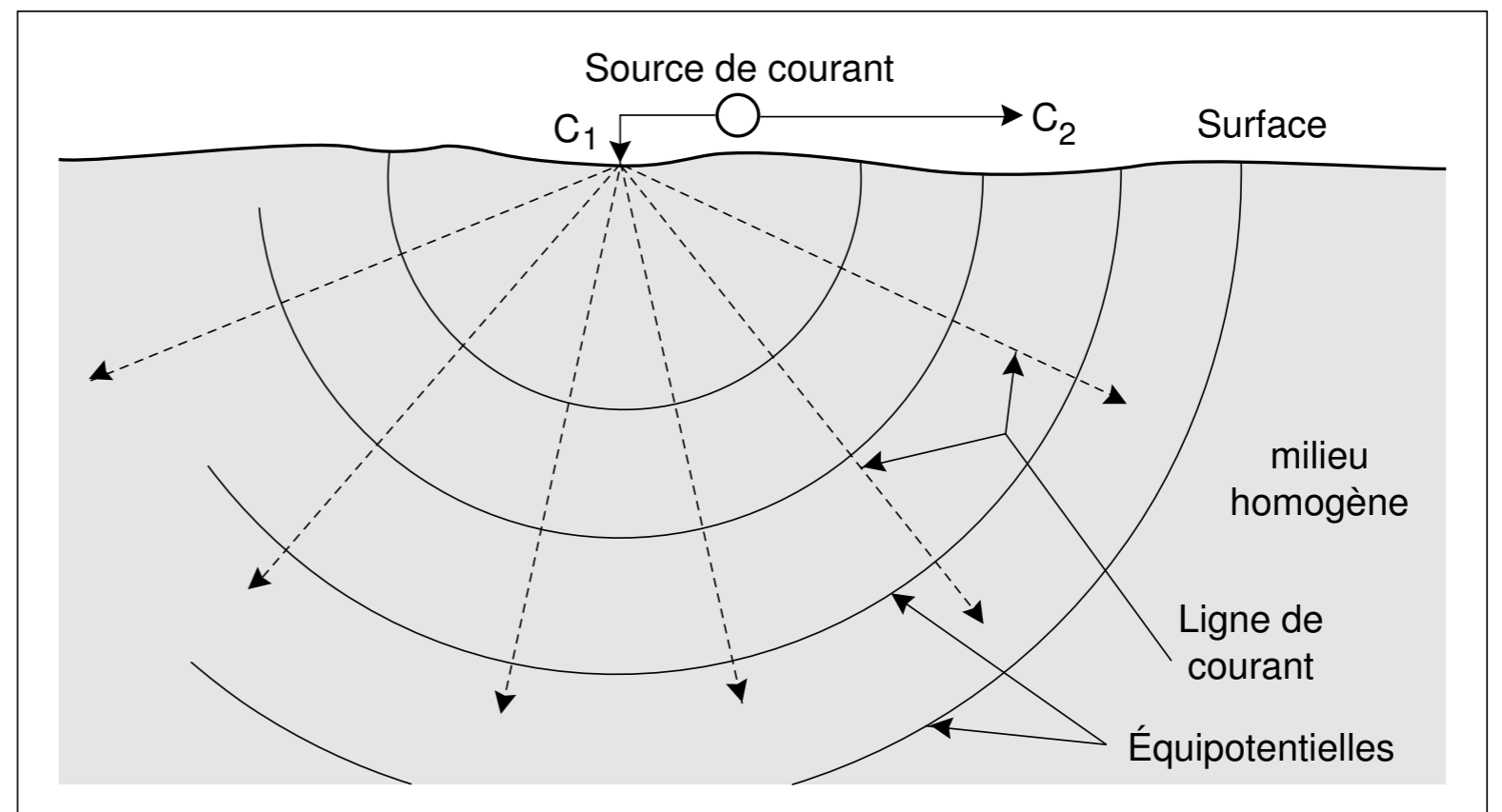
Pour mesurer la résistivité des sols, on injecte du courant à l'aide d'électrodes plantées à la surface.

Électrodes loin de la surface

$$V = I\rho \frac{1}{4\pi r}$$

Électrodes à la surface

$$V = I\rho \frac{1}{2\pi r}$$



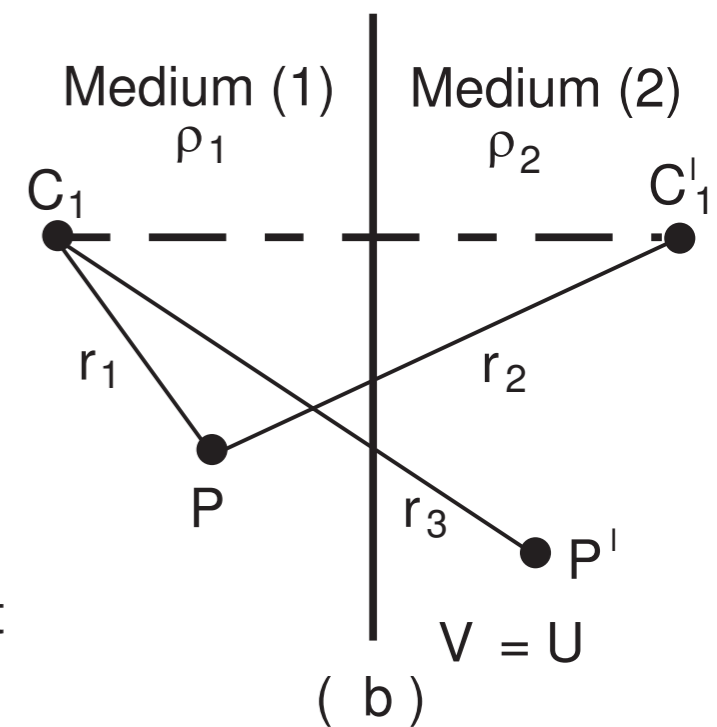
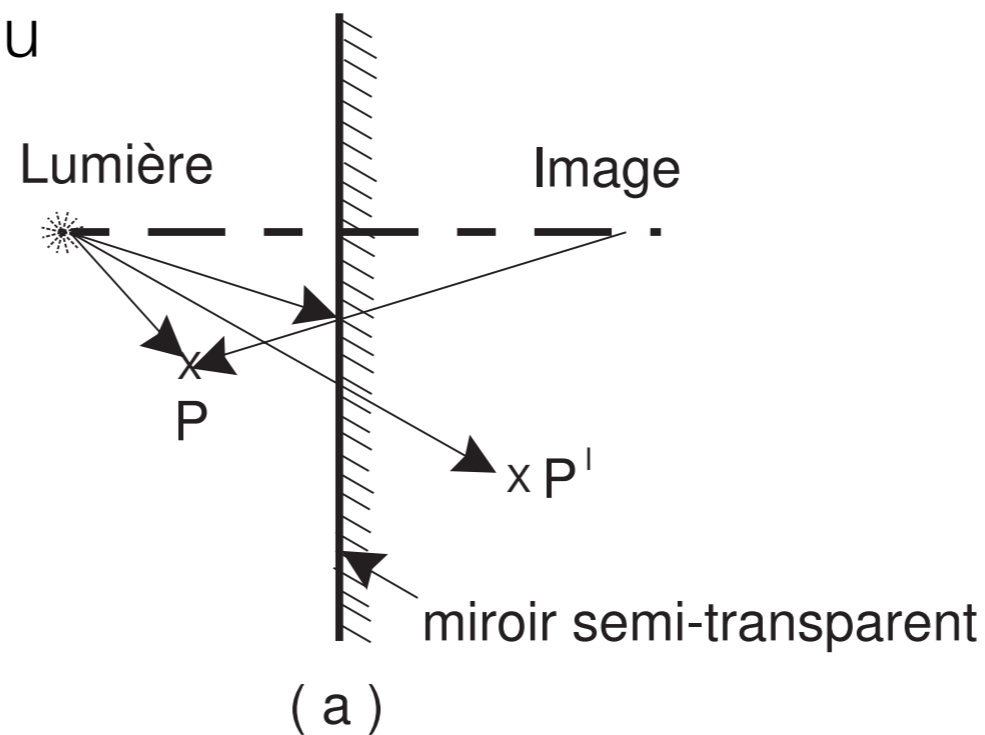
Modification du potentiel: méthode des images

Comment le potentiel est-il affecté par les hétérogénéités ?

À l'interface, une portion k du courant sera réfléchi.

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

Le coefficient de réflexion est entre -1 et 1.



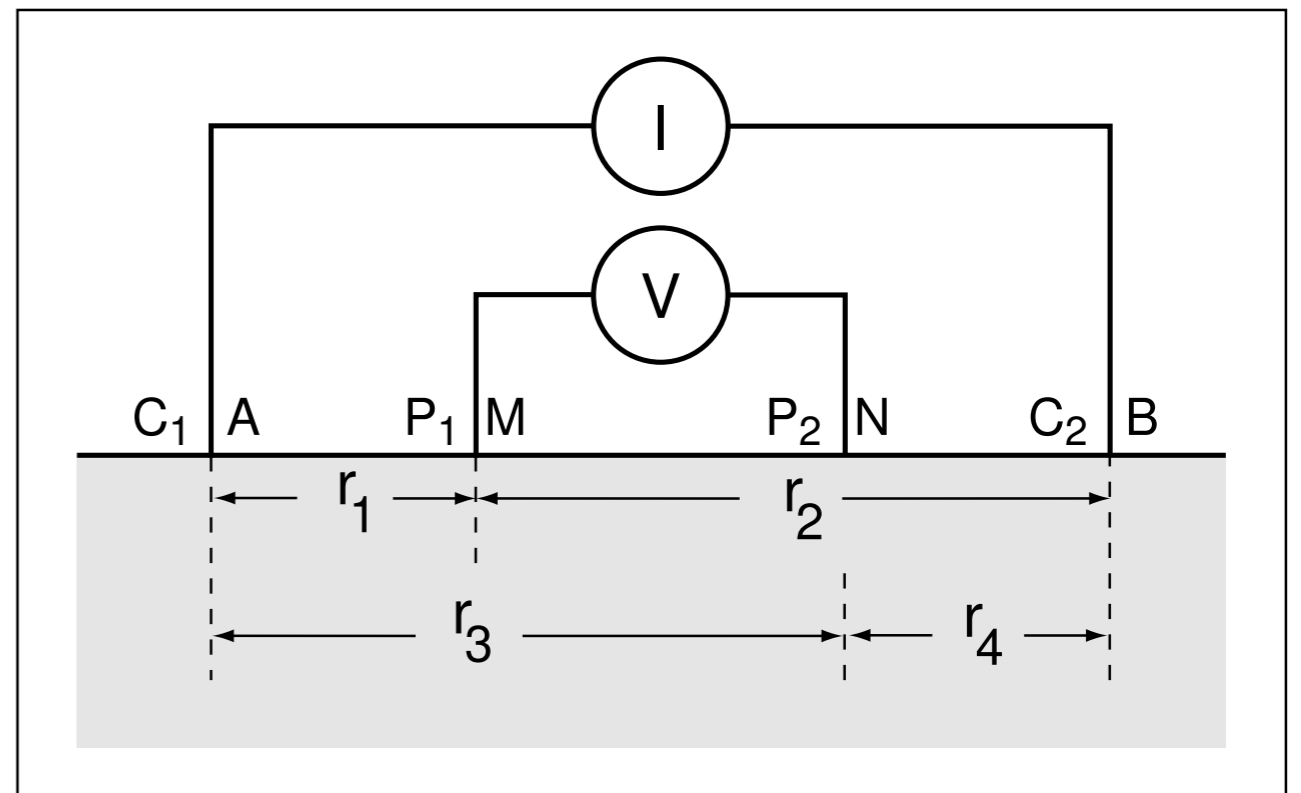
Résistivité apparente

La mesure du potentiel permet d'obtenir un estimé de la résistivité du sol, la résistivité apparente.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$$

où K est le facteur géométrique, propre à chaque configuration d'électrode

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$

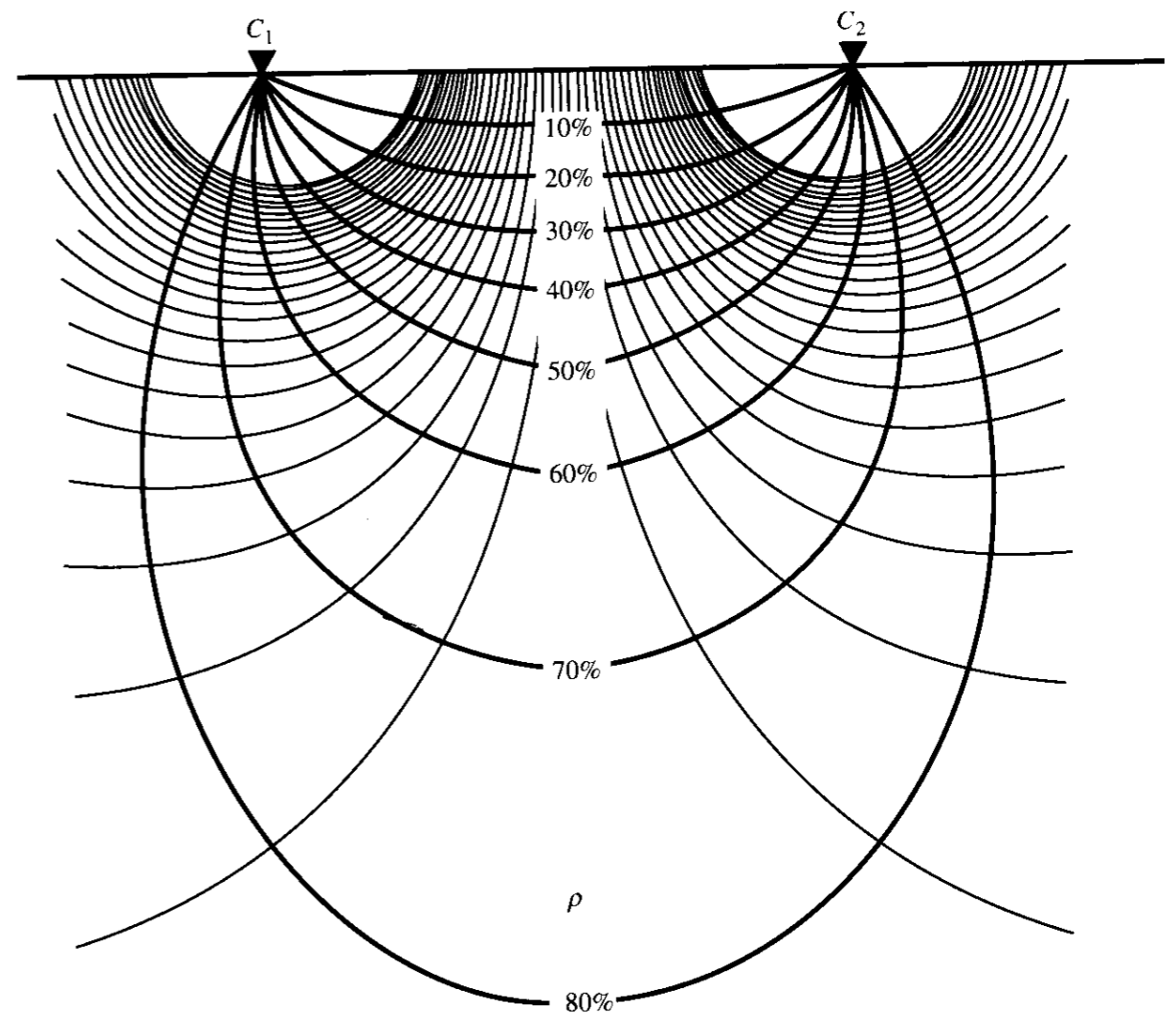


Profondeur d'investigation

La résistivité apparente est une mesure moyennée sur la profondeur. La profondeur des lignes de courant dépend de l'écartement des électrodes.

$$\frac{I_x}{I} = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{2z}{L}$$

où L est l'écartement entre les électrodes

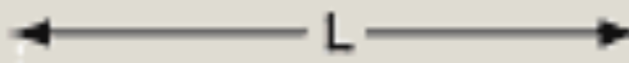
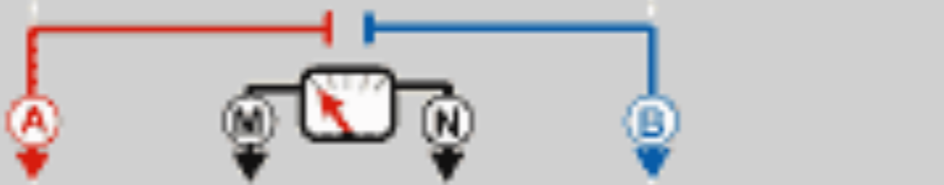
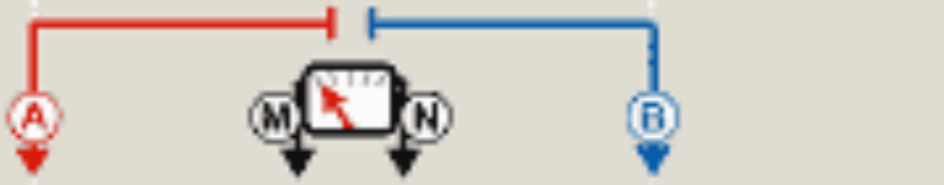

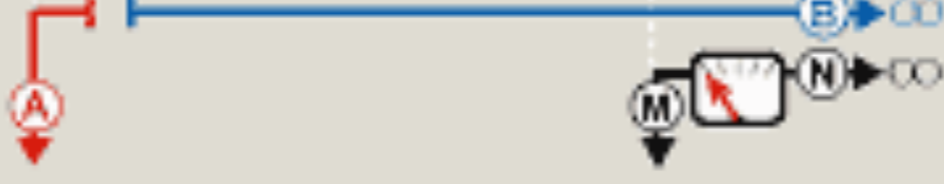


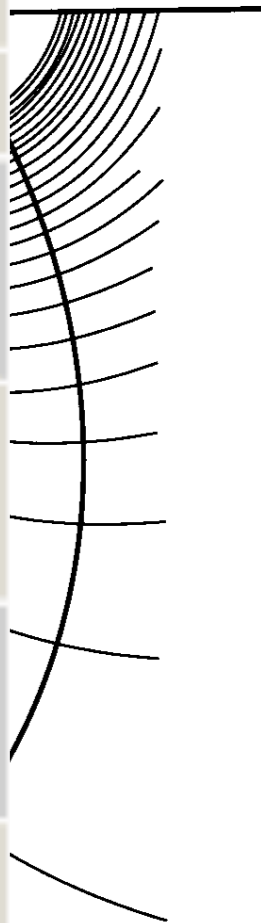
Profondeur d'investigation

La résistivité apparente est une mesure moyennée sur la profondeur. La profondeur des lignes de courant dépend de l'écartement des électrodes.

$\frac{I_x}{I}$

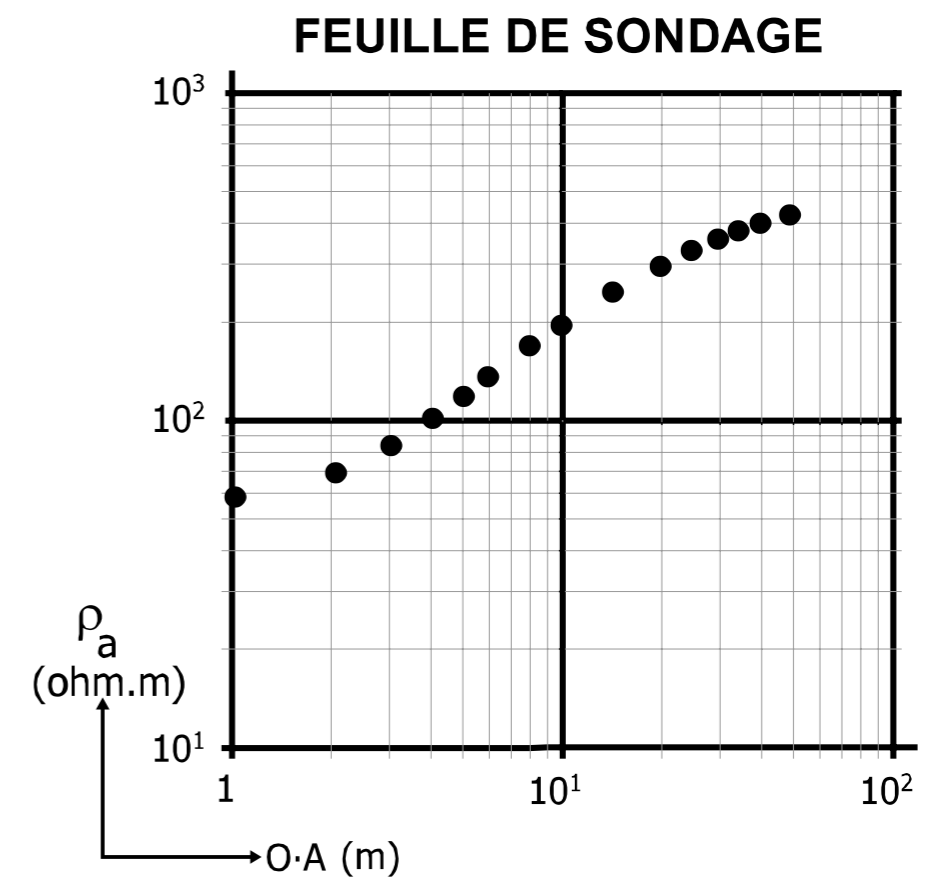
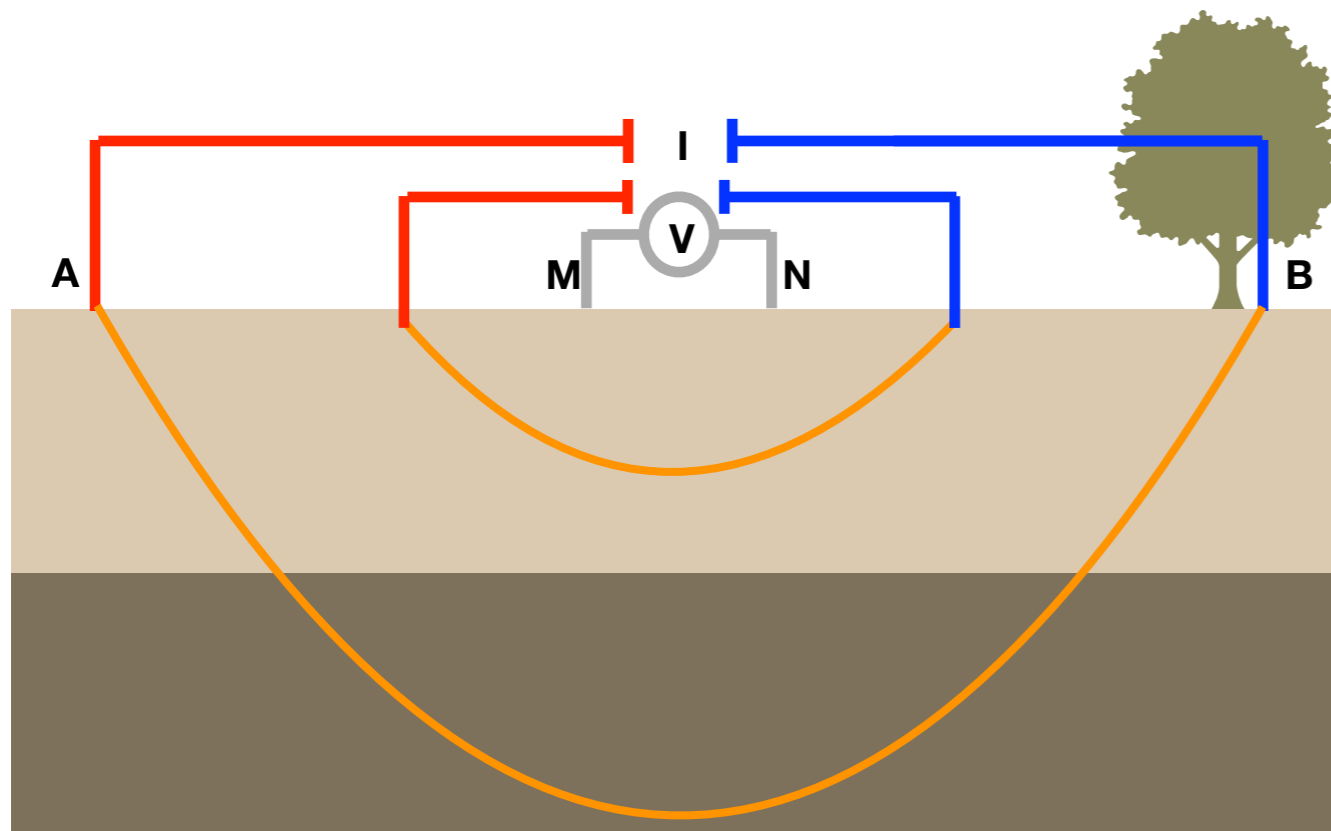
où L est l'écartement des électrodes

Dispositifs		Prof. d'investigation	
		Roy (1971)	Barker (1989)
Wenner		0.11L	0.17L
Schlumberger		0.125L	0.19L
Dipôle-Dipôle		0.195L	0.25L
Pôle-Pôle		0.35L	



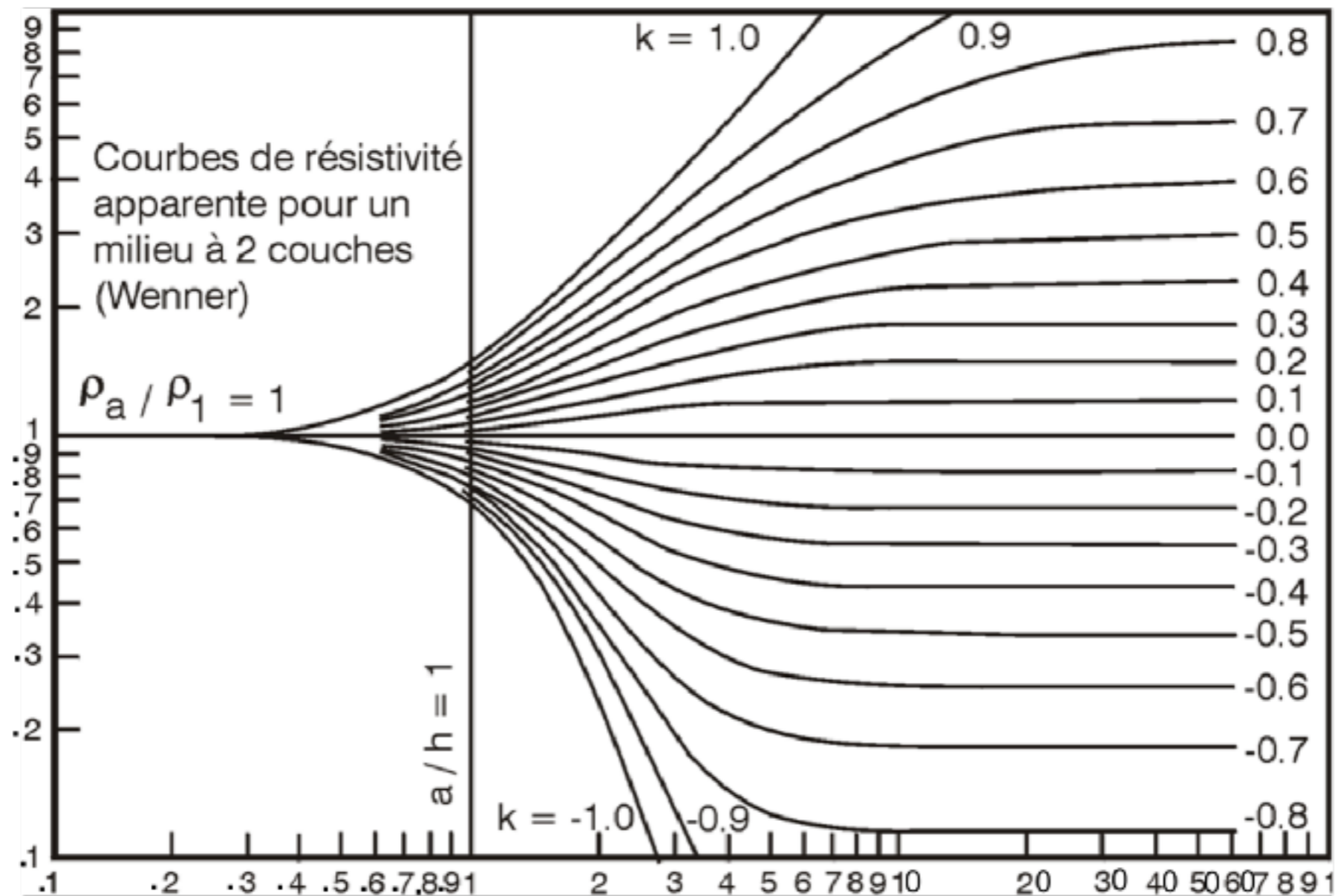
Sondages électriques

Pour retrouver la résistivité vraie des couches, il faut faire plusieurs mesures qui sont sensibles à différentes profondeurs du sol.



Abaque: 2 couches, dispositif de Wenner

Les abaques sont une série de courbes normalisées!



Interprétation: Principe de similitude

Les méthodes d'interprétation se basent sur le principe de similitude.

Principe de similitude: Les résistivités apparentes mesurées par deux dispositifs peuvent être les mêmes si certaines proportions sont respectées:

Soient 3 facteurs de similitudes:

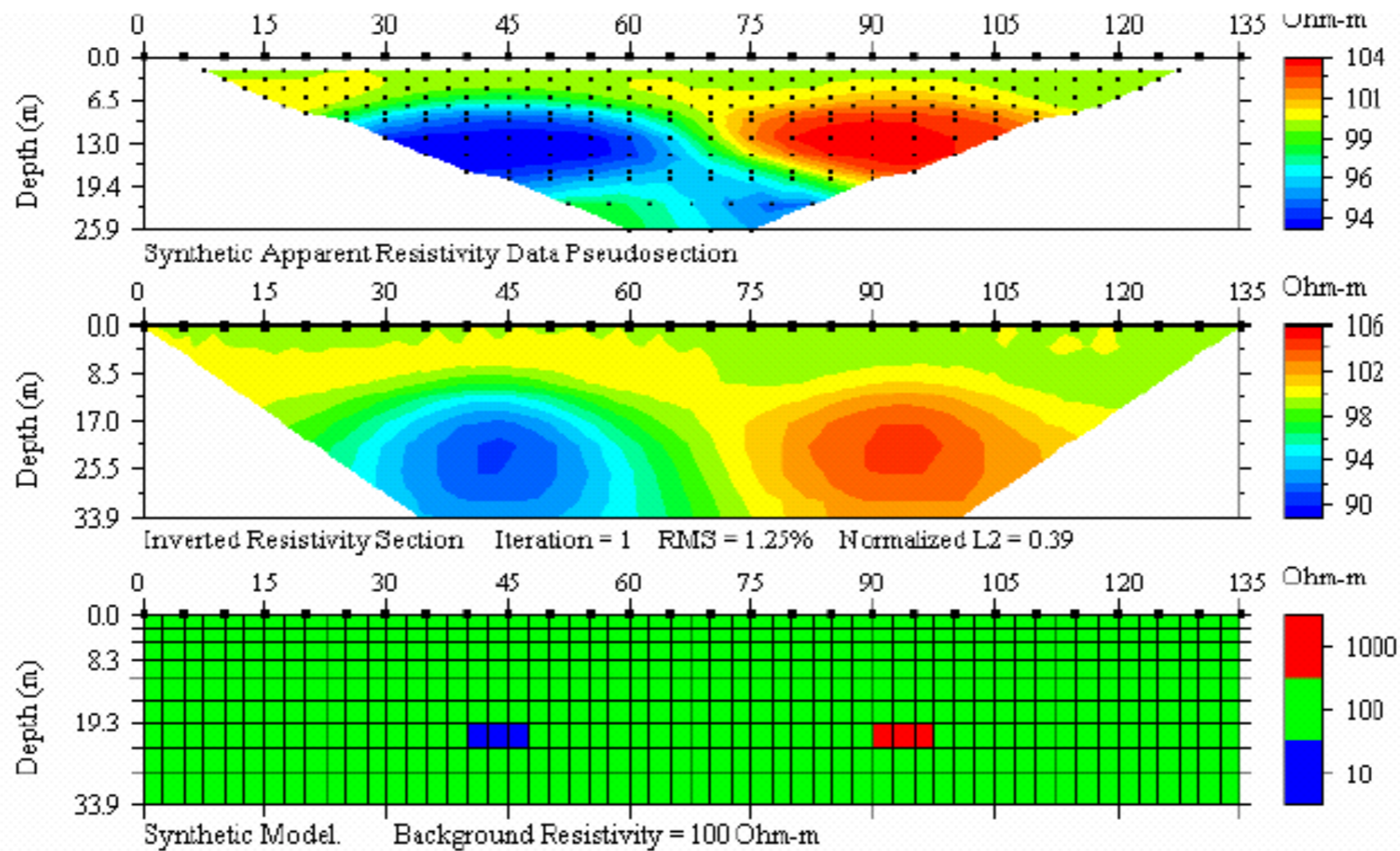
- $k_\rho \longrightarrow \rho'_2 = k_\rho \rho_2 \quad \rho'_1 = k_\rho \rho_1$
- $k_h \longrightarrow h' = k_h h$
- $k_K \longrightarrow K' = k_K K$

Alors:

$$\rho'_a = \rho_a \frac{k_\rho k_K}{k_h}$$

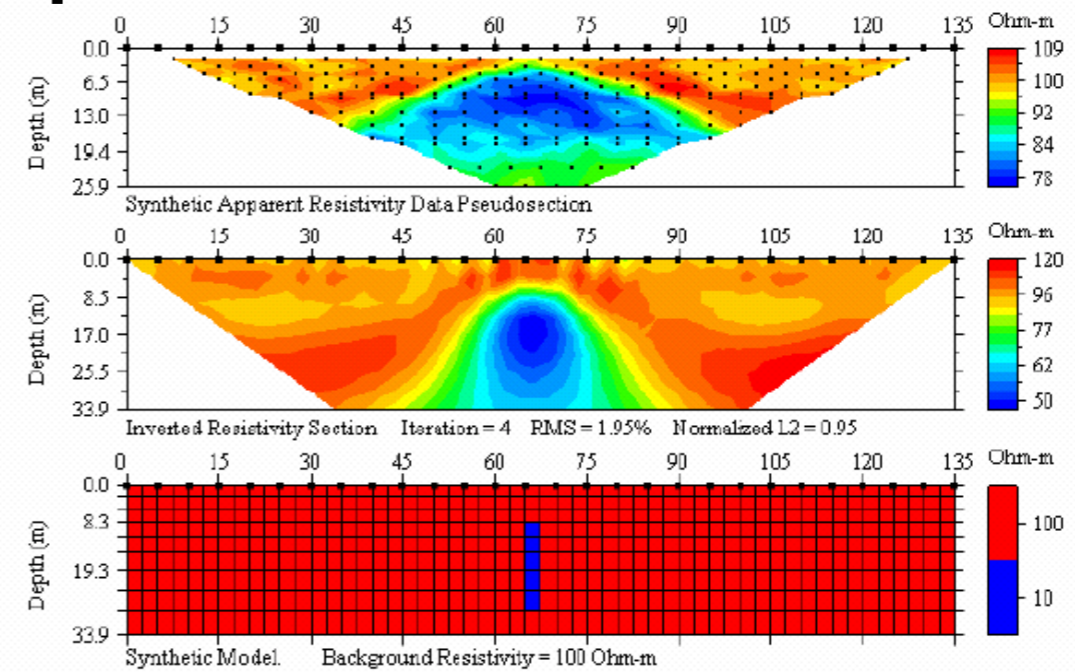
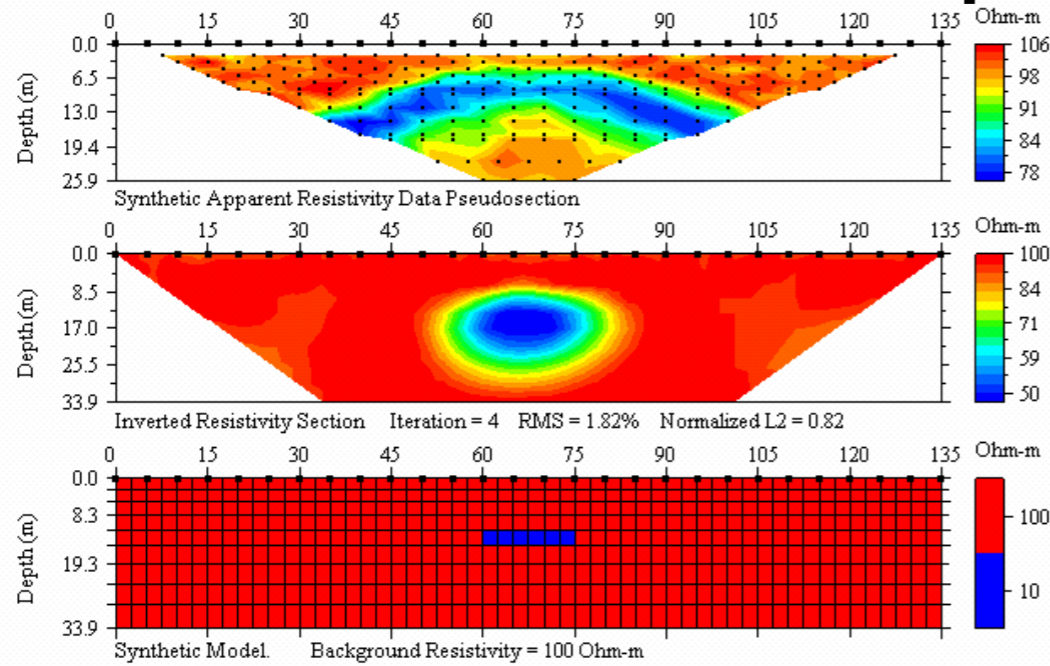
Tomographie

En général, on utilise la tomographie pour retrouver la distribution de résistivité dans le sol.

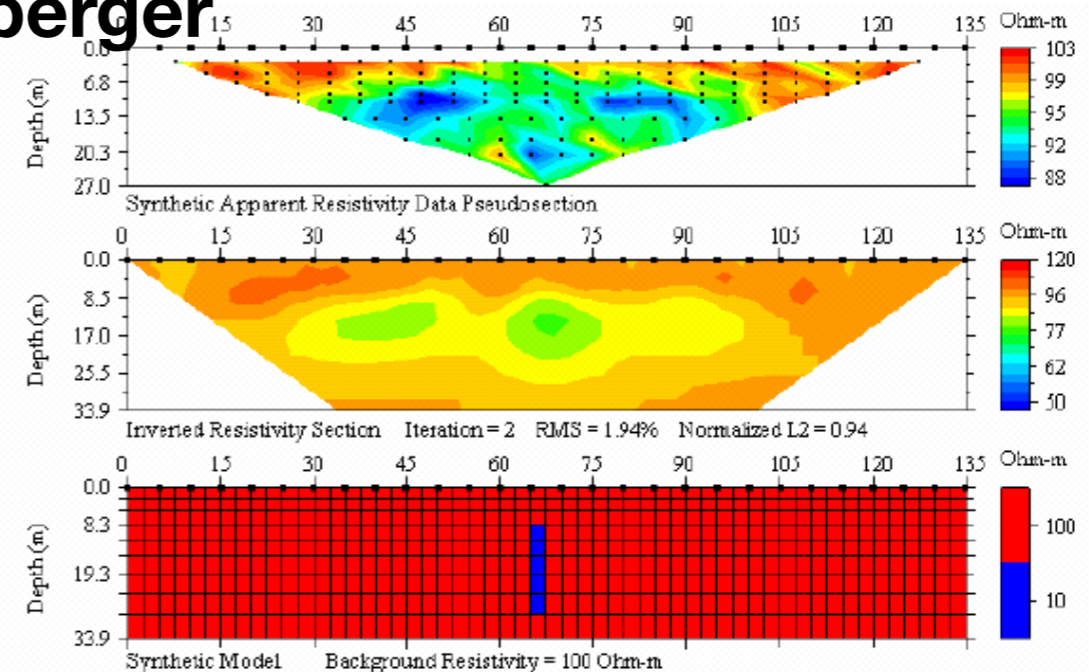
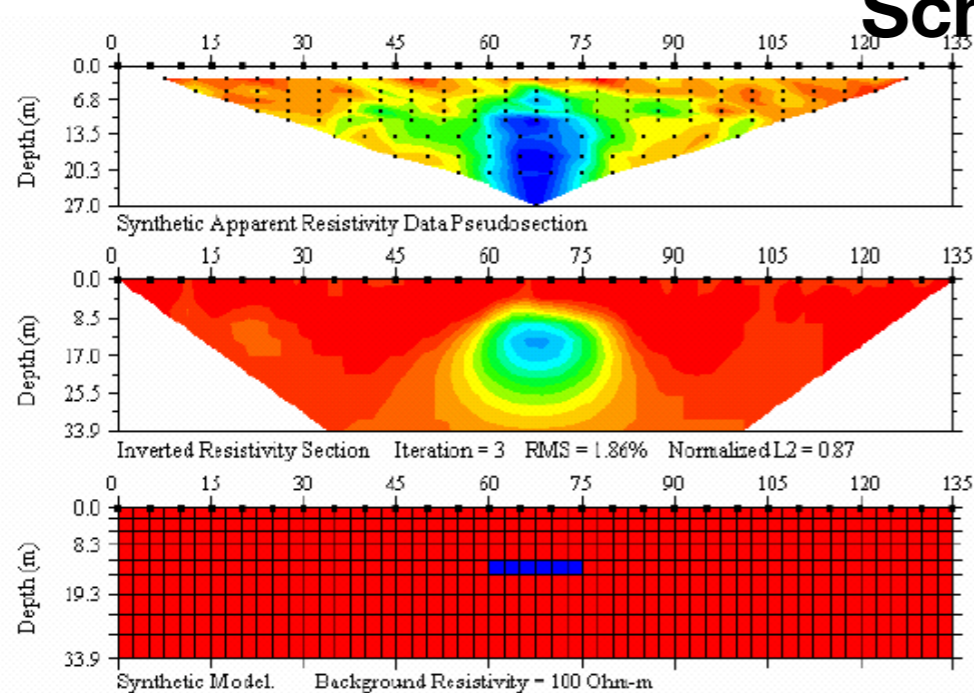


Choix du dispositif et sensibilité

Dipôle-dipôle



Schlumberger



La PP dans le domaine du temps

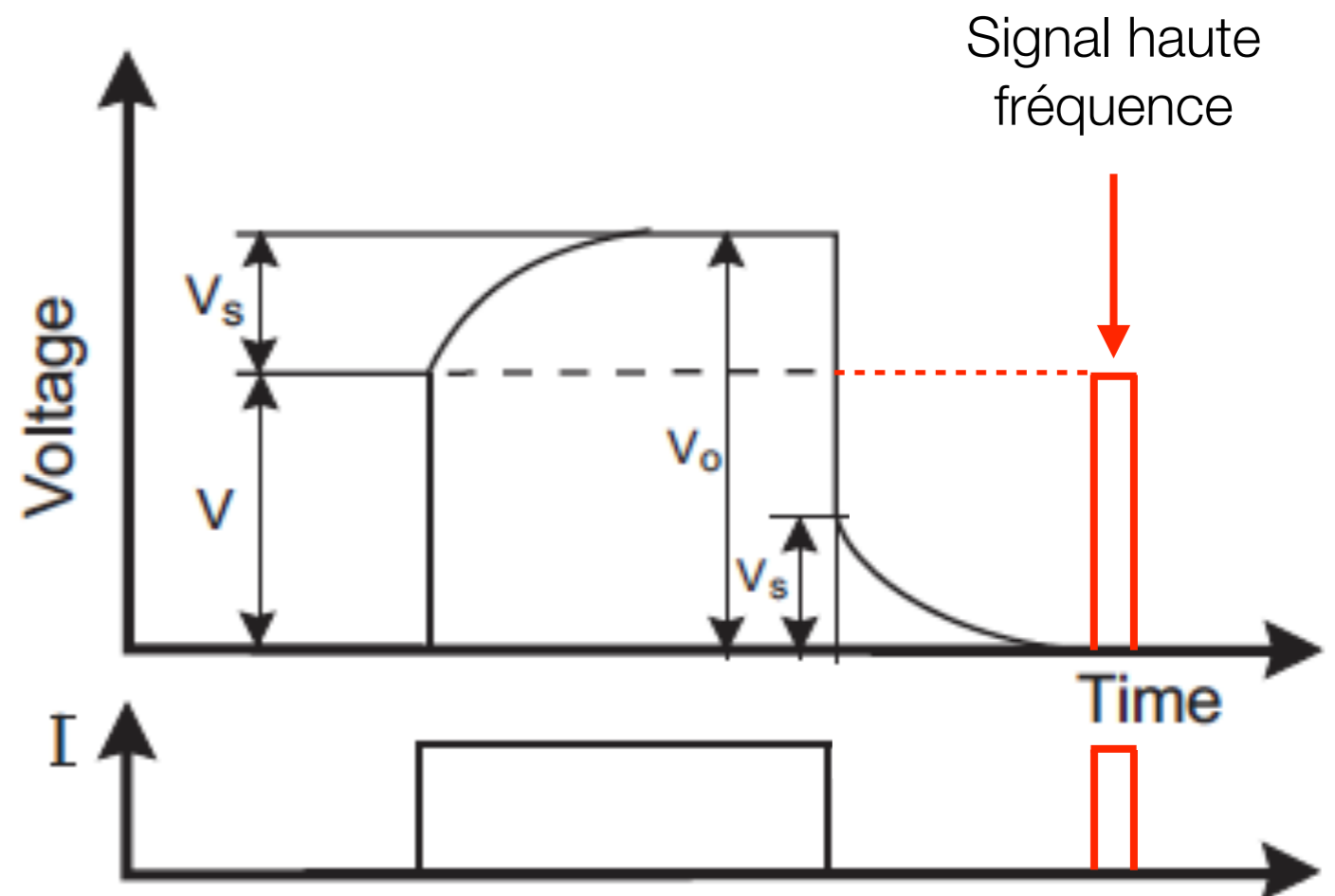
Différentes définitions équivalentes de la chargeabilité existent.

Selon les potentiels:

$$m = \frac{V_s}{V_0} = \frac{V_0 - V}{V_0}$$

Selon les résistivité:

$$m = \frac{\rho_{DC} - \rho_{AC}}{\rho_{DC}}$$



Résistivité moyenne

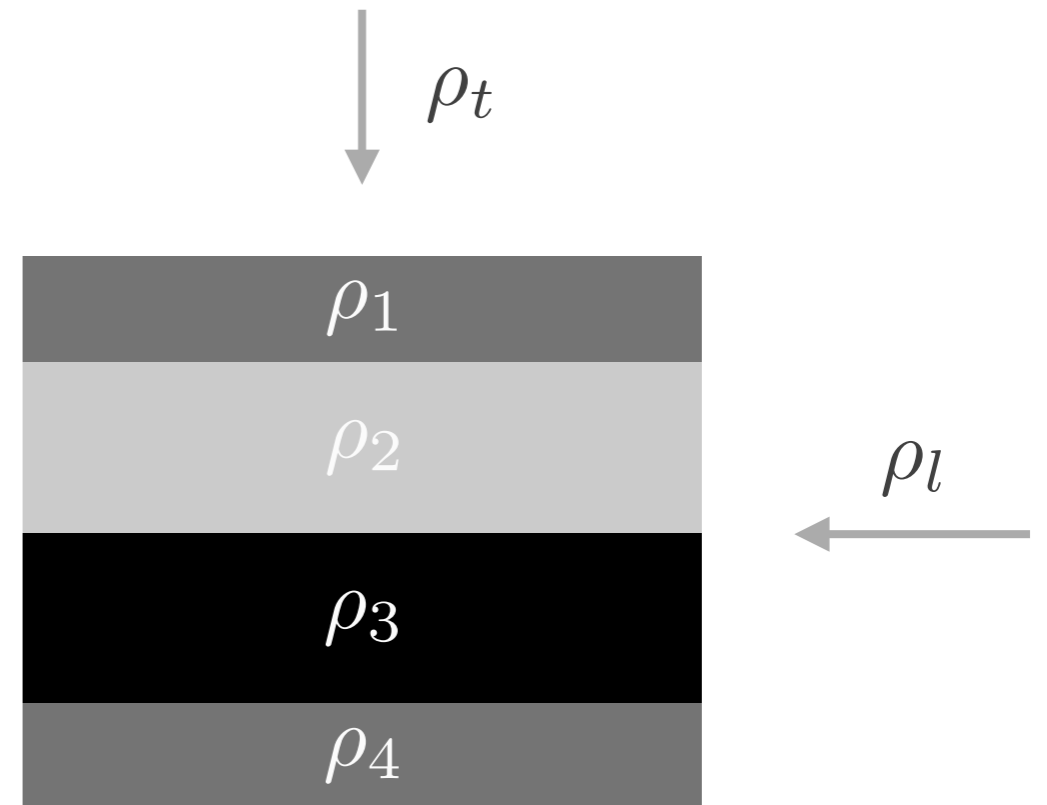
Attention: La direction de mesure peut grandement affecter les valeurs obtenues de résistivité apparente.

Résistivité transversale
(résistances en série)

$$\rho_t = \frac{\sum_i^n h_i \rho_i}{\sum_i^n h_i}$$

Résistivité longitudinale
(résistances en parallèle)

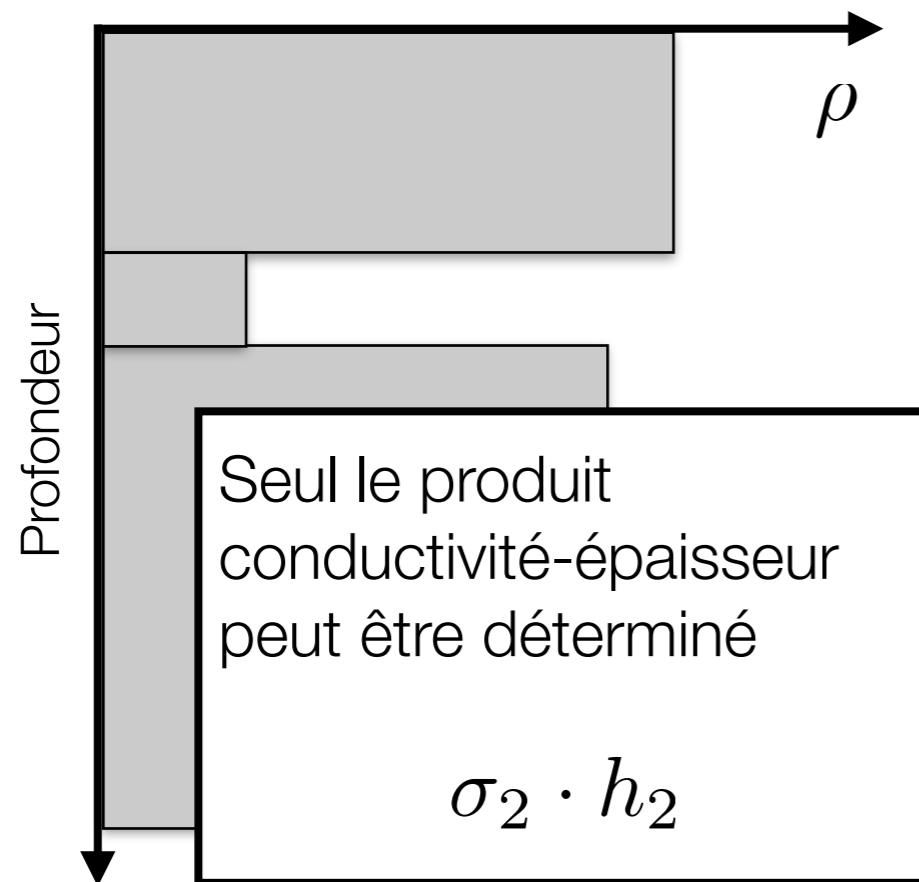
$$\rho_l = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^n h_i / \rho_i}$$



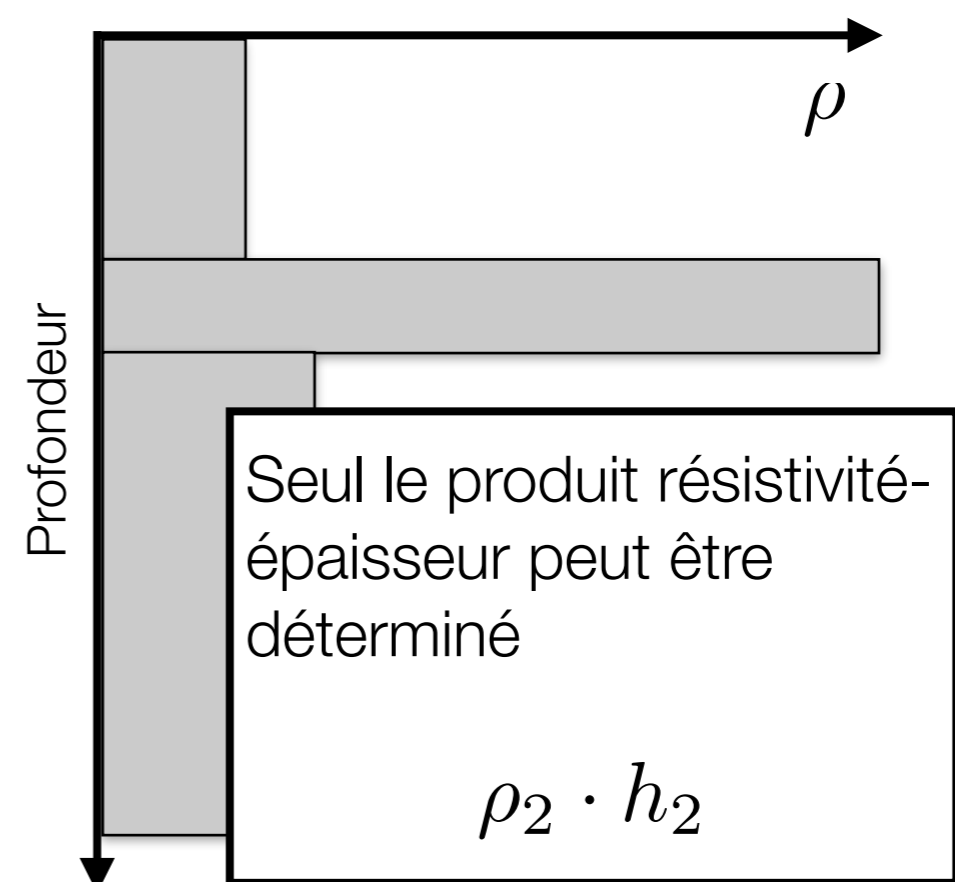
Sondage: Principe d'équivalence

Attention! Deux modèles tabulaires différents peuvent donner des courbes de sondage très similaires l'une à l'autre.

Couche mince conductrice entre deux couches résistives

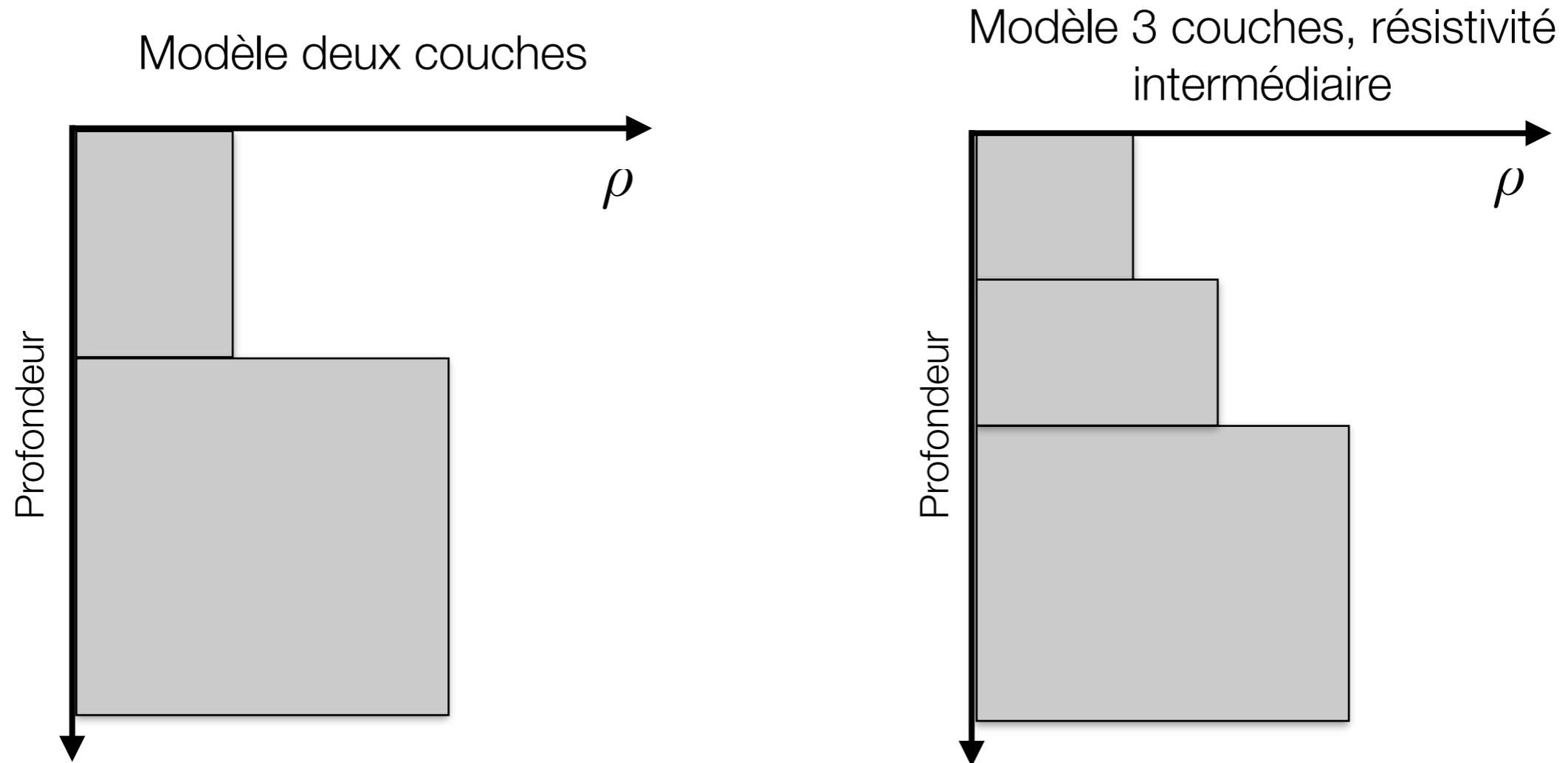


Couche mince résistive entre deux couches conductrices



Sondage: Principe de suppression

Attention! Deux modèles tabulaires différents peuvent donner des courbes de sondage très similaires l'une à l'autre.



Conception de levés électriques

Lors de la conception d'un levé électrique, il faut aborder les questions suivantes:

1. **Problématique:** Que veut-on mesurer ?
 2. **Propriétés géophysiques:** Est-ce que les propriétés électriques sont sensibles au phénomène étudié ?
 3. **Méthode de mesure:** Est-ce que la méthode peut mesurer efficacement et assez précisément les propriétés désirées ?
 4. **Mesures sur le terrain:** Quelles sont les précautions à prendre pour obtenir des mesures de qualité ?
 5. **Traitement des données:** Veut-on des mesures quantitatives ou une simple détection est suffisante ?
 6. **Interprétation:** Peut-on obtenir une information géologique des mesures géophysiques ?
 7. **Synthèse:** Intégrer les informations géophysiques pour répondre à la problématique formulée au départ.
-

Méthodes électromagnétiques

Mesures électriques vs EM

Tomographie Électrique



Méthodes EM



Mesures électriques vs EM

Tomographie Électrique

Avantages

- Haute résolution
- Inversion assez bien contrainte
- Bon pour les anomalies résistives
- Assez robuste aux bruits culturels

Inconvénients

- Mise en oeuvre ardue
- Échelle régionale impossible
- Nécessite l'accès au site
- Profondeur dépend de la longueur du dispositif

Méthodes EM

Avantages

- Rapide et simple de mise en oeuvre
- Échelle régionale possible
- Accès au sites n'est pas nécessaire
- Une bonne profondeur par rapport à la grandeur des dispositifs

Inconvénients

- Interprétation souvent qualitative
- Inversion doit absolument être contrainte
- Très sensible au bruit culturel

Applications courantes de l'EM

Les méthodes EM sont utilisées dans presque tous les champs d'application de la géophysique!

Ces différentes applications utilisent différentes méthodes EM évidemment!

- Exploration minérale
- Estimation de ressources minières
- Exploration pétrolière
- Suivi de réservoir pétrolier
- Études hydrogéologiques
- Contamination des sols
- Caractérisation de sites d'enfouissement
- Détection de dolines
- Détection du pergélisol
- Détection d'infrastructures souterraines
- Archéologie

Types de méthodes

Méthodes à champ uniforme (non vues dans ce cours)

- VLF (very low frequency): Utilise le champ magnétique créé par des antennes radios lointaines de très basses fréquences.
 - TURAM: Utilise un long câble (centaines à plusieurs kilomètres). Mesure du champ magnétique à l'aide de deux boucles séparées d'une dizaine de mètres.
 - MT (magnetotelluric): Utilise les champs électromagnétiques terrestres pour aller chercher la résistivité en profondeur de la Terre (300 m à plusieurs km).
 - AMT (Audio magnetotelluric): Même principe que la MT, utilise les sphériques produits par les éclairs.
 - CSEM (controlled source electromagnetic) ou CSAMT (controlled source AMT): On utilise un très long dipôle (~2km) pour produire un champ électrique entre 0.1 Hz et 100 kHz.
-

Types de méthodes

Méthodes à champs dipolaire (vues dans ce cours)

- FEM (Frequency EM): Regroupe les méthodes utilisant un boucle émettrice et une boucle réceptrice qui utilise une ou plusieurs fréquences à la fois.
- Conductivitémètre ou LIN (Low Induction EM): Méthode en fréquence FEM qui est conçue pour fonctionner dans le régime à faible nombre d'induction.
- TEM ou TDEM (Time Domain EM): Regroupe les méthodes utilisant une boucle émettrice et une boucle réceptrice dont le courant est une impulsion dans le temps.
- Méthodes aéroportées: Les méthodes FEM et TDEM peuvent être déployées sur des avions ou des hélicoptères.

Types de méthodes

Méthodes à champs dipolaire (vues dans ce cours)

- FEM (Frequency EM): Regroupe les méthodes utilisant un boucle émettrice et une boucle réceptrice.
- Conductivité est conçue
- TEM ou Témétrice temps
- Méthodes sur des a

Nous verrons séparément les deux grandes familles de méthodes la semaine prochaine:



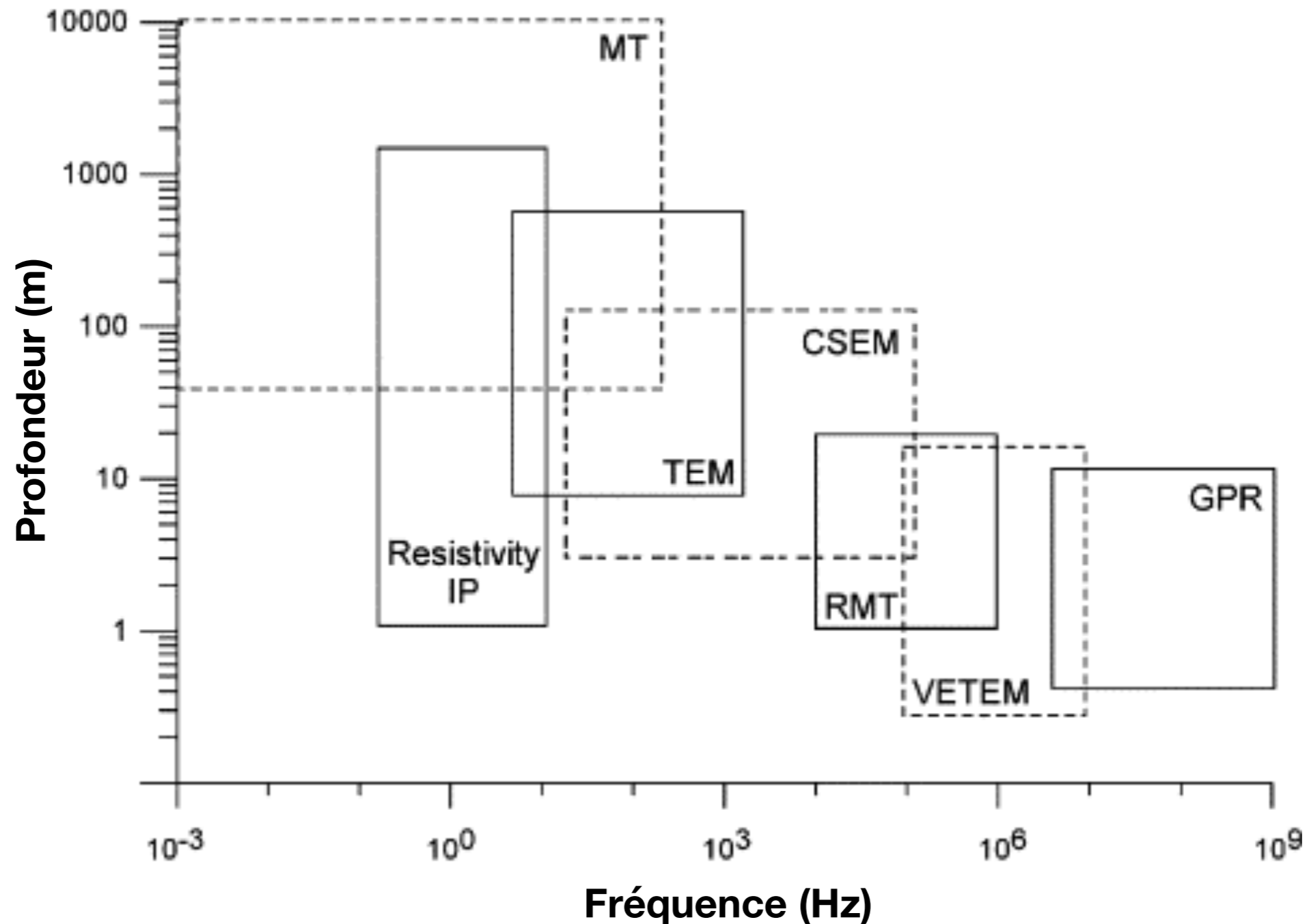
**Cours 1:
FEM**



**Cours 2:
TDEM**

e FEM qui
ction
s un boucle
n dans le
déployées

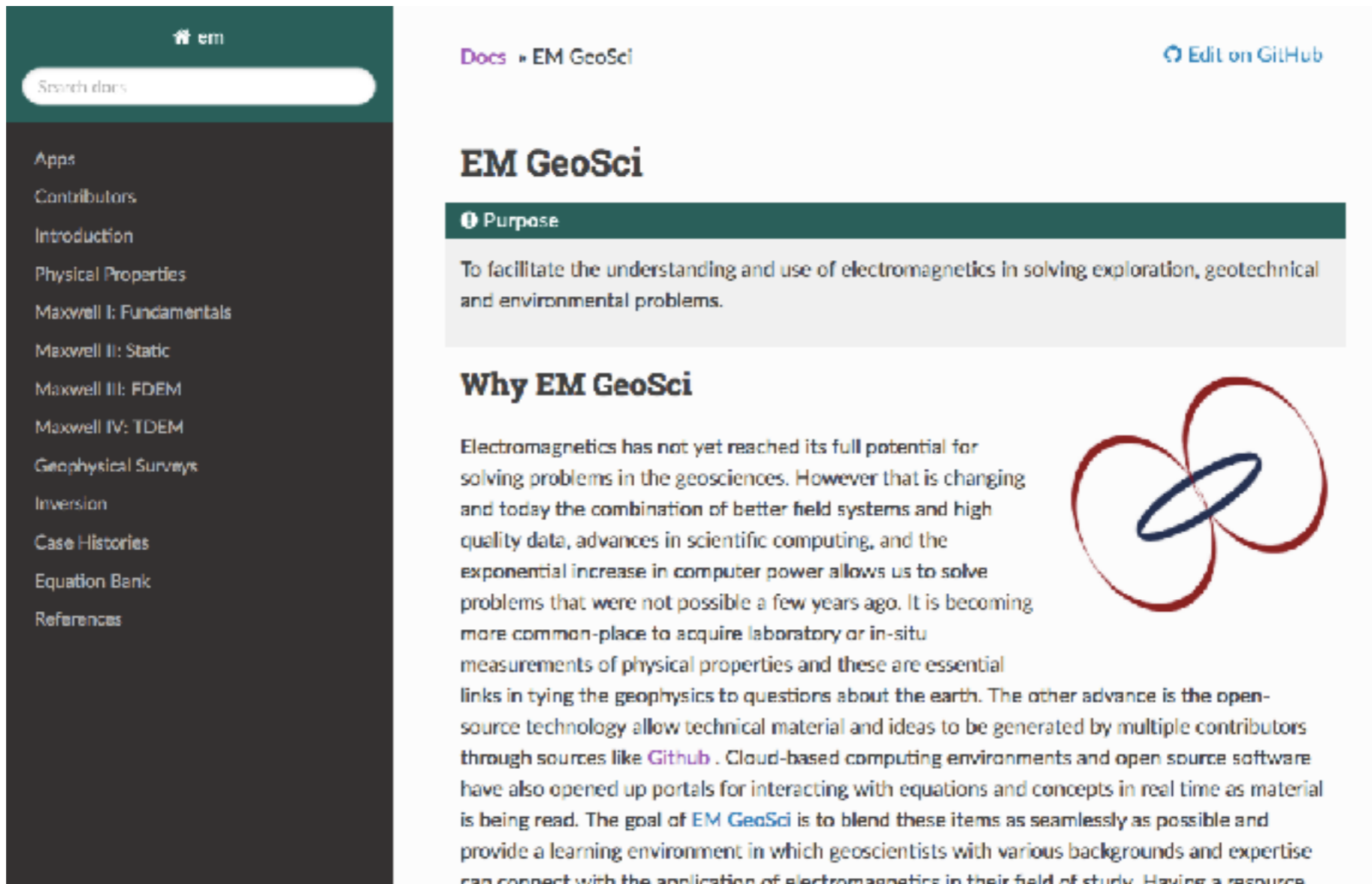
Différentes méthodes selon la fréquence



(Pellerin et Wannamaker, 2005)

Bonne références

Voir le site de UBC sur le EM: <https://em.geosci.xyz/index.html>



em

Search docs

Apps

Contributors

Introduction

Physical Properties

Maxwell I: Fundamentals

Maxwell II: Static

Maxwell III: FDEM

Maxwell IV: TDEM

Geophysical Surveys

Inversion

Case Histories

Equation Bank

References

Docs » EM GeoSci [Edit on GitHub](#)


EM GeoSci

Purpose

To facilitate the understanding and use of **electromagnetics** in solving exploration, geotechnical and environmental problems.

Why EM GeoSci

Electromagnetics has not yet reached its full potential for solving problems in the geosciences. However that is changing and today the combination of better field systems and high quality data, advances in scientific computing, and the exponential increase in computer power allows us to solve problems that were not possible a few years ago. It is becoming more common-place to acquire laboratory or in-situ measurements of physical properties and these are essential links in tying the geophysics to questions about the earth. The other advance is the open-source technology allow technical material and ideas to be generated by multiple contributors through sources like [Github](#) . Cloud-based computing environments and open source software have also opened up portals for interacting with equations and concepts in real time as material is being read. The goal of **EM GeoSci** is to blend these items as seamlessly as possible and provide a learning environment in which geoscientists with various backgrounds and expertise can connect with the application of electromagnetics in their field of study. Having a resource



Comprendre les bases de l'EM

1. **Comment se propagent les ondes électromagnétiques ?**
2. Qu'est-ce qu'on mesure et comment le mesure-t-on ?
3. Comment peut-on détecter une anomalie dans la sous surface ?



Propagation des ondes électromagnétiques

Équations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont à la base des méthodes EM!

Équations de Maxwell

- Loi d'Ampère: $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
- Loi de Faraday: $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
- Loi de Gauss: $\nabla \cdot \mathbf{D} = q$
- Loi de Gauss: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
(magnétique)

Équations constitutives

- $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$
- $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$
- $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$

Propagation des ondes EM

Les méthodes EM se basent sur la propagation d'une onde électromagnétique. On peut en effet trouver une équation d'onde à partir des équations de Maxwell:

À partir des lois d'Ampère et de Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

On prend le rotationnel de chaque équation:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{J} + \frac{\partial \nabla \times \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \nabla \times \mathbf{B}}{\partial t}$$

Propagation des ondes EM

Les méthodes EM se basent sur la propagation d'une onde électromagnétique. On peut en effet trouver une équation d'onde à partir des équations de Maxwell:

Sachant que $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{V}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{V}) - \nabla^2 \mathbf{V}$ on obtient:

$$\left(\nabla^2 - \sigma\mu\frac{\partial}{\partial t} - \epsilon\mu\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\mathbf{E} = 0$$

$$\left(\nabla^2 - \sigma\mu\frac{\partial}{\partial t} - \epsilon\mu\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\mathbf{B} = 0$$

Ceci a la forme d'une équation d'onde:

$$\frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \nabla^2 \phi$$

Propagation des ondes EM

Les méthodes EM se basent sur la propagation d'une onde électromagnétique. On peut en effet trouver une équation d'onde à partir des équations de Maxwell:

Posons une solution de la forme $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{x})e^{i\omega t}$:

$$(\nabla^2 - i\sigma\mu\omega + \epsilon\mu\omega^2)\mathbf{E} = 0$$

$$(\nabla^2 - i\sigma\mu\omega + \epsilon\mu\omega^2)\mathbf{B} = 0$$

où ω est la fréquence angulaire $\omega = 2\pi f$.

Approximations possibles

Différentes figures de cas sont possibles selon les fréquences utilisées

$$(\nabla^2 - i\sigma\mu\omega + \epsilon\mu\omega^2)\mathbf{E} = 0$$

Méthodes DC

$$\omega \rightarrow 0$$

$$\nabla^2 V = 0$$



Régime permanent

Méthodes EM

$$\sigma \gg \omega\epsilon$$

$$(\nabla^2 - i\sigma\mu\omega)\mathbf{E} = 0$$



Régime diffusif

Méthodes Radar

$$\sigma \ll \omega\epsilon$$

$$(\nabla^2 + \epsilon\mu\omega^2)\mathbf{E} = 0$$



Régime propagation

Approximation quasi-statique

Différentes figures de cas sont possibles selon les fréquences utilisées

$$(\nabla^2 - i\sigma\mu\omega + \epsilon\mu\omega^2)\mathbf{E} = 0$$

Méthodes D
 $\omega \rightarrow 0$

$$\nabla^2 V = 0$$



Régime permanent

Les méthodes électromagnétiques ne sont applicables que dans l'**approximation quasi-statique**:

$$\sigma \gg \omega\epsilon$$



Régime diffusif

Méthodes Radar
 $\omega \ll \omega\epsilon$

$$(\nabla^2 - \epsilon\mu\omega^2)\mathbf{E} = 0$$



Régime propagation

Régime diffusif: FEM

La solution de l'équation de diffusion:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0$$

On pose la solution: $H_x = H_0 e^{i\omega t + mz}$

Ce qui nous permet de trouver: $m = \pm(1 + i) \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}$

La solution est alors:

$$H_x = H_0 e^{-z/\delta} e^{i(\omega t - z/\delta)}$$

FEM: Atténuation et profondeur de peau

L'onde EM est atténuée:

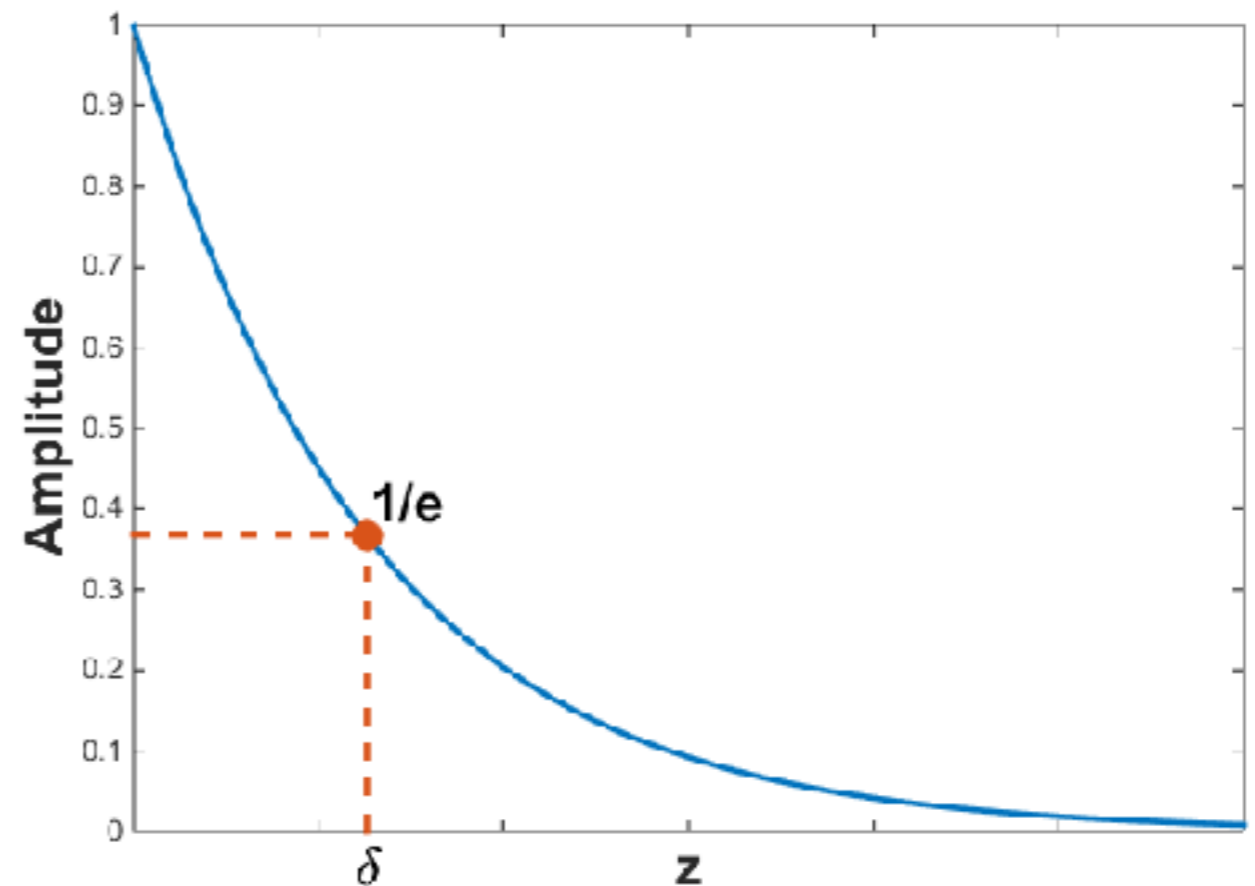
$$H_x = H_0 e^{-z/\delta} e^{i(\omega t - z/\delta)}$$

La profondeur de peau, est donnée par:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$$

L'amplitude du champ magnétique décroît de façon exponentielle dans le sol.

La profondeur de peau est souvent utilisée pour décrire **la profondeur d'investigation** des méthodes EM.



FEM: Atténuation et profondeur de peau

Quelques profondeurs de peau typiques

Type	σ	μ_r	ϵ_r	δ (1Hz)	δ (1kHz)	δ (1MHz)
Air	0 S/m	1	1	∞	∞	∞
Sea Water	3.3 S/m	1	80	277 m	8.76 m	0.277 m
Igneous	10^{-4} S/m	1	5	50,300 m	1,590 m	121 m
Sedimentary (dry)	10^{-3} S/m	1	4	15,900 m	500 m	18 m
Sedimentary (wet)	10^{-2} S/m	1	25	5,000 m	160 m	5.4 m
Sulphide Skarn	10^2 S/m	1	5	50 m	1.6 m	0.05 m
Magnetite Skarn	10^2 S/m	2	5	36 m	1.1 m	0.04 m

FEM: Longueur d'onde

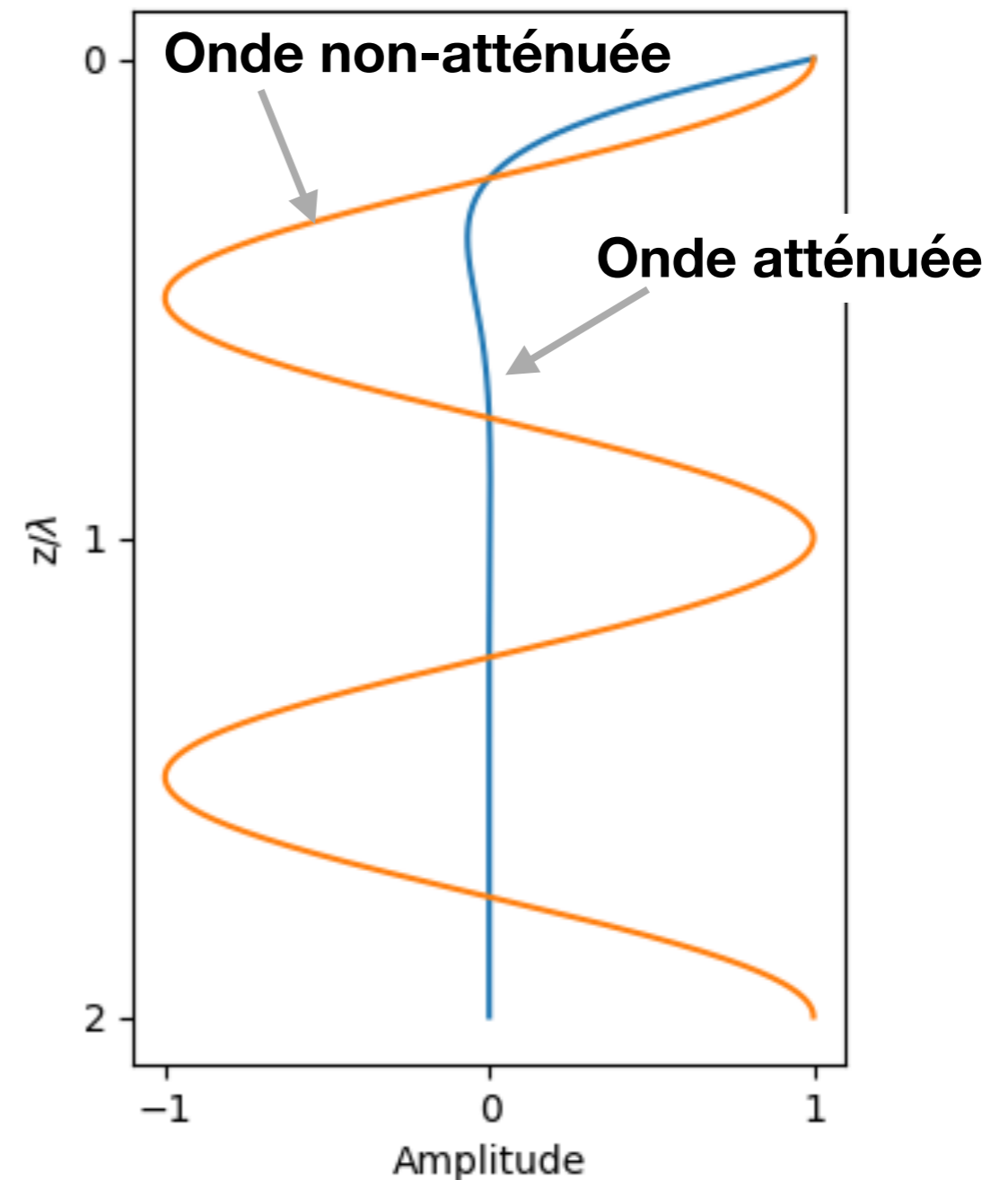
L'onde se propage selon:

$$H_x = H_0 e^{-z/\delta} e^{i(\omega t - z/\delta)}$$

La longueur d'onde est égale à la profondeur de peau:

$$\lambda = \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

L'onde diffusive est atténuée rapidement et guère plus d'une longueur d'onde ne contient d'énergie.



FEM: Vitesse de phase

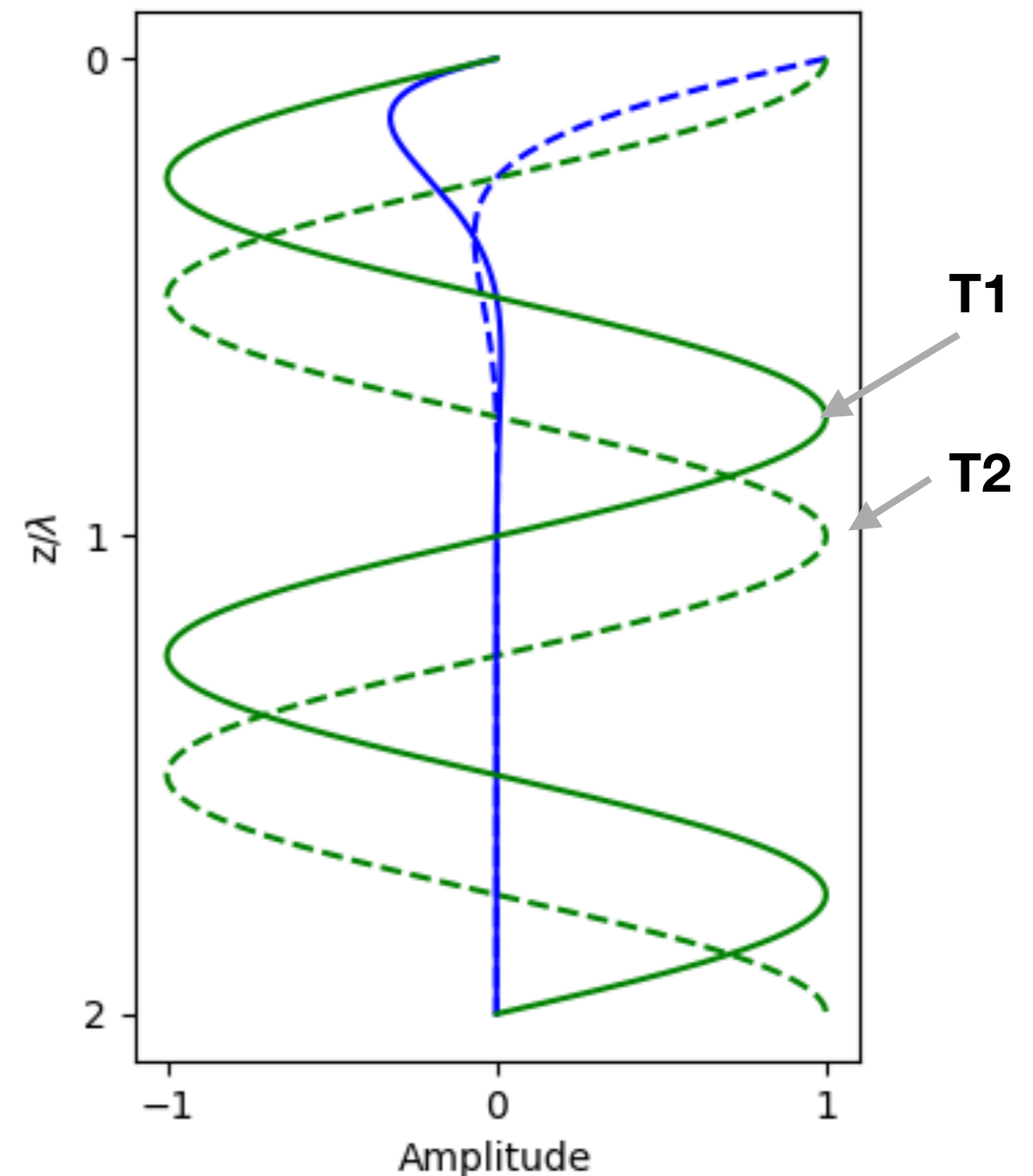
L'onde se propage selon:

$$H_x = H_0 e^{-z/\delta} e^{i(\omega t - z/\delta)}$$

La vitesse de propagation est:

$$v = \lambda/f = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}$$

La vitesse de l'onde dépend de la fréquence et de la conductivité du sol.



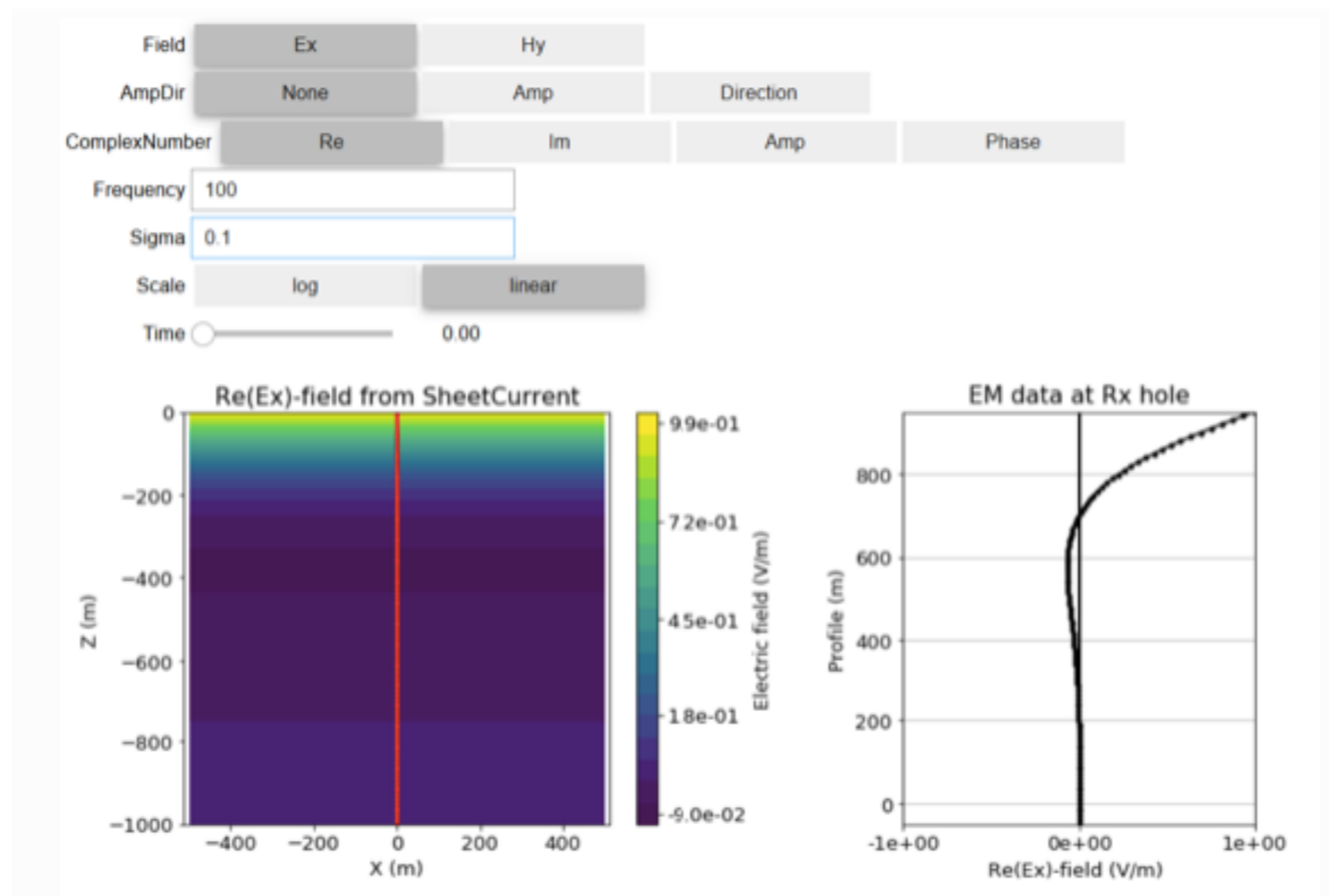
FEM: Vitesse de phase

Quelques vitesses typiques

Type	σ	μ_r	ϵ_r	v_{ph} (1Hz)	v_{ph} (1kHz)	v_{ph} (1MHz)
Air	0 S/m	1	1	299.8 m/us	299.8 m/us	299.8 m/us
Sea Water	3.3 S/m	1	80	0.0017 m/us	0.055 m/us	1.7 m/us
Igneous	10^{-4} S/m	1	5	0.32 m/us	10 m/us	132 m/us
Sedimentary (dry)	10^{-3} S/m	1	4	0.1 m/us	3.2 m/us	90 m/us
Sedimentary (wet)	10^{-2} S/m	1	25	0.032 m/us	1 m/us	30 m/us
Sulphide Skarn	10^2 S/m	1	5	0.00032 m/us	0.01 m/us	0.32 m/us
Magnetite Skarn	10^2 S/m	2	5	0.00022 m/us	0.007 m/us	0.22 m/us

Propagation en fréquence

Les applications de UBC sont une belle façon de comprendre la physique de la propagation en fréquence ! Voir le notebook `FDEM_Planewave_Wholespace`.



https://mybinder.org/v2/gh/geoscixyz/em-apps/main?labpath=notebooks%2Fem%2FFDEM_Planewave_Wholespace.ipynb

TEM: Propagation d'une impulsion

La solution de l'équation de diffusion:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0$$

La solution pour une fréquence:

$$H_x = H_0 e^{-z/\delta} e^{i(\omega t - z/\delta)}$$

La solution pour une impulsion:

$$E_x = E_0 \frac{\sqrt{\mu\sigma} z}{2\pi^{1/2} t^{3/2}} e^{-\mu\sigma z^2/4t} \quad H_y = -E_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\pi\mu t}} e^{-\mu\sigma z^2/4t}$$

TEM: Distance de diffusion

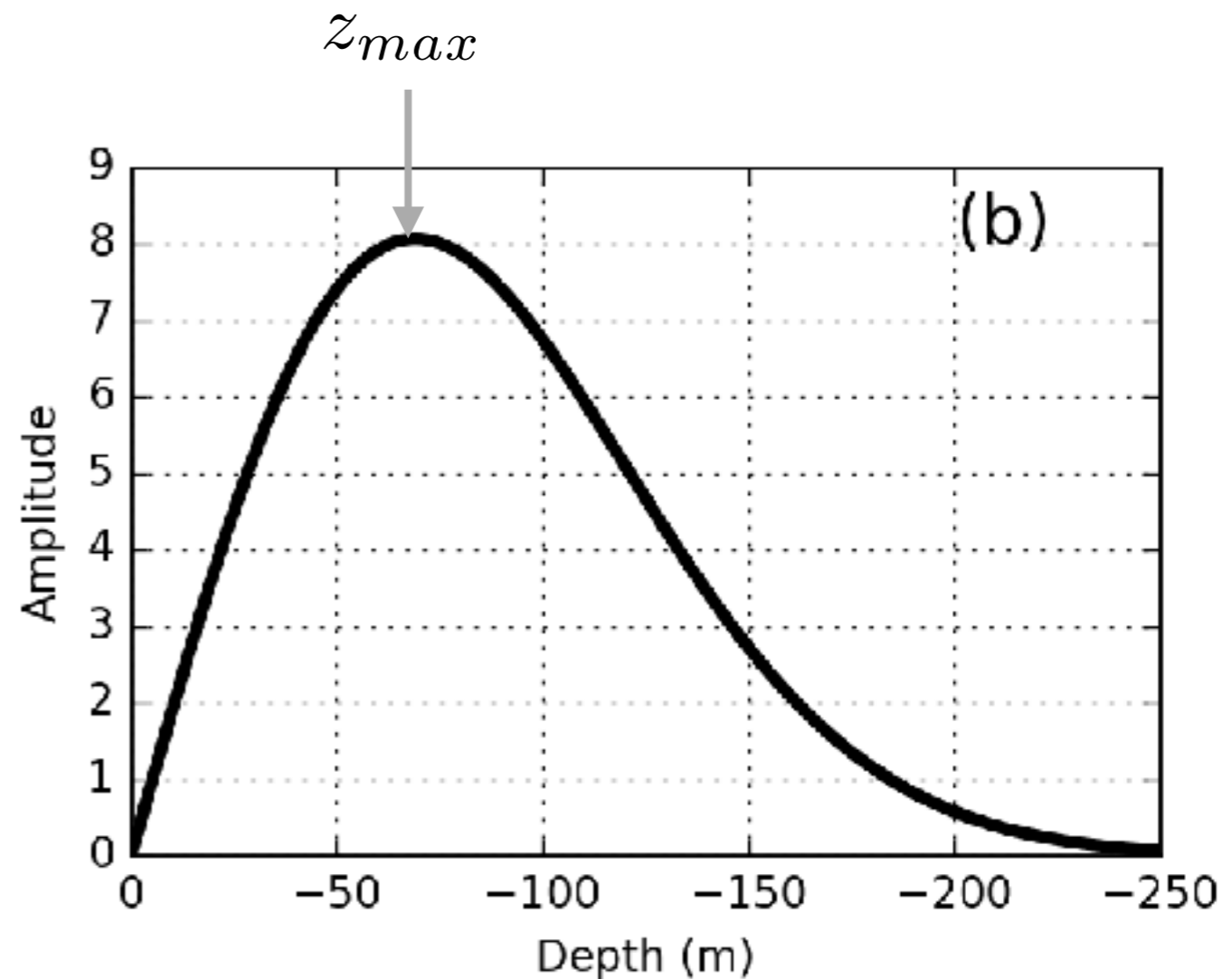
Pour un temps donné, l'onde EM a un maximum en z :

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 0$$

La distance de diffusion est donnée par:

$$z_{max} = \sqrt{\frac{2t}{\sigma\mu}}$$

La distance de diffusion agit comme la profondeur de peau dans le temps.



TEM: Le temps du maximum

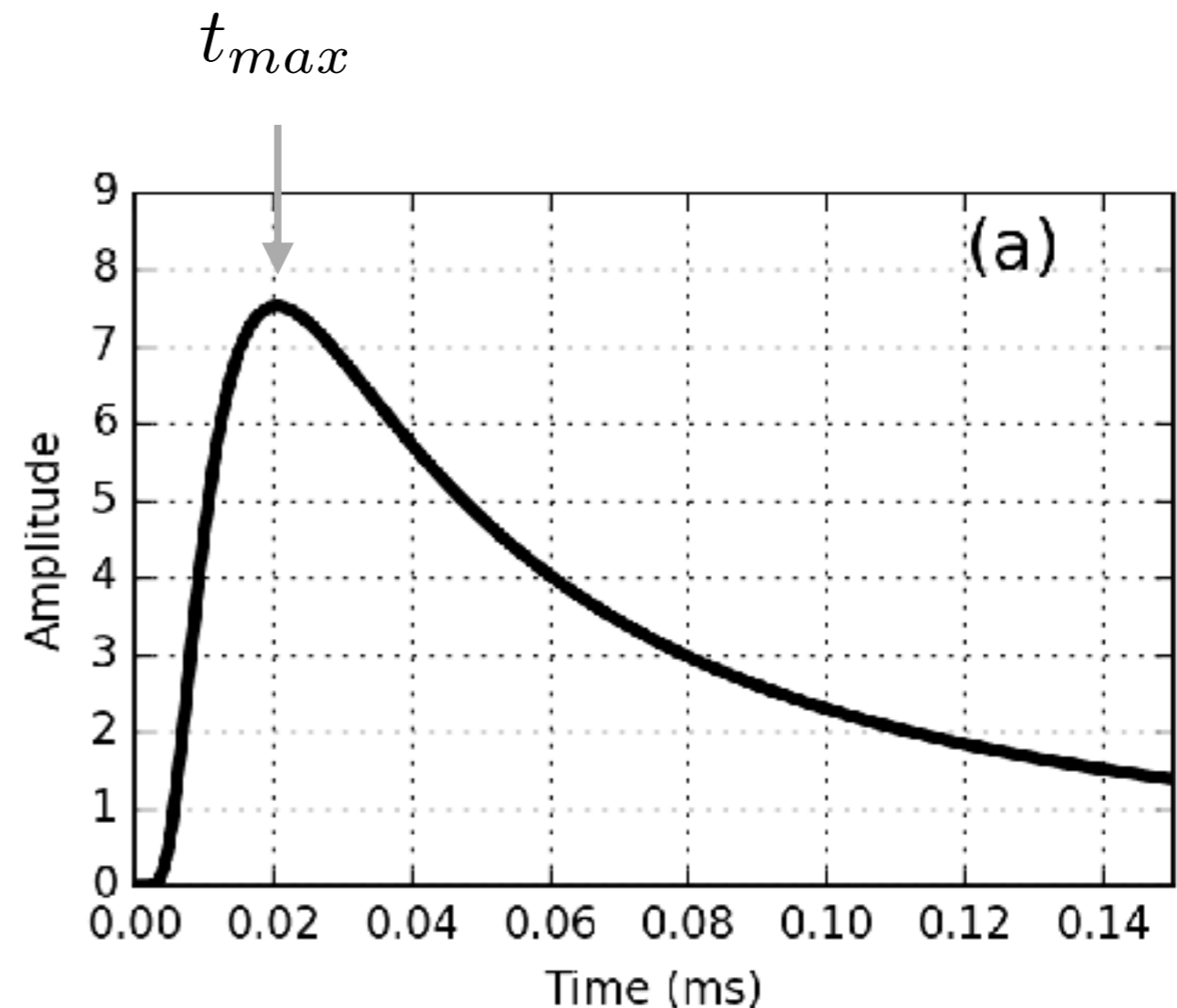
Pour une profondeur donnée, l'onde EM a un maximum à un temps t :

$$\frac{\partial E}{\partial t} = 0$$

Le temps du maximum est donné par:

$$t_{max} = \frac{\mu\sigma z^2}{6}$$

Le temps du maximum croît avec la profondeur.



TEM: Vitesse de diffusion

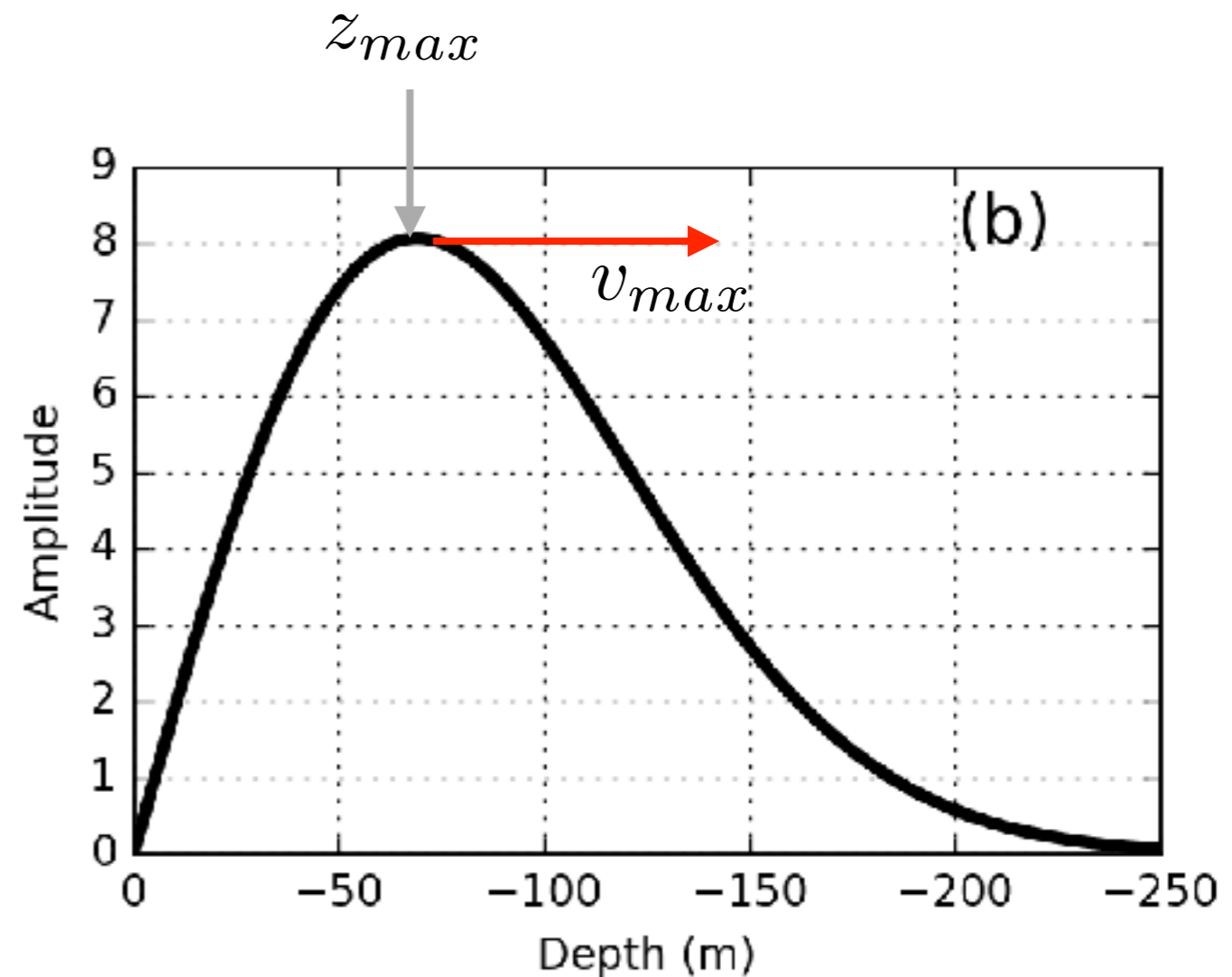
Le maximum de l'impulsion se déplace ainsi à une vitesse donnée par:

$$v_{max} = \frac{\partial z_{max}}{\partial t}$$

Le temps maximal est donné par:

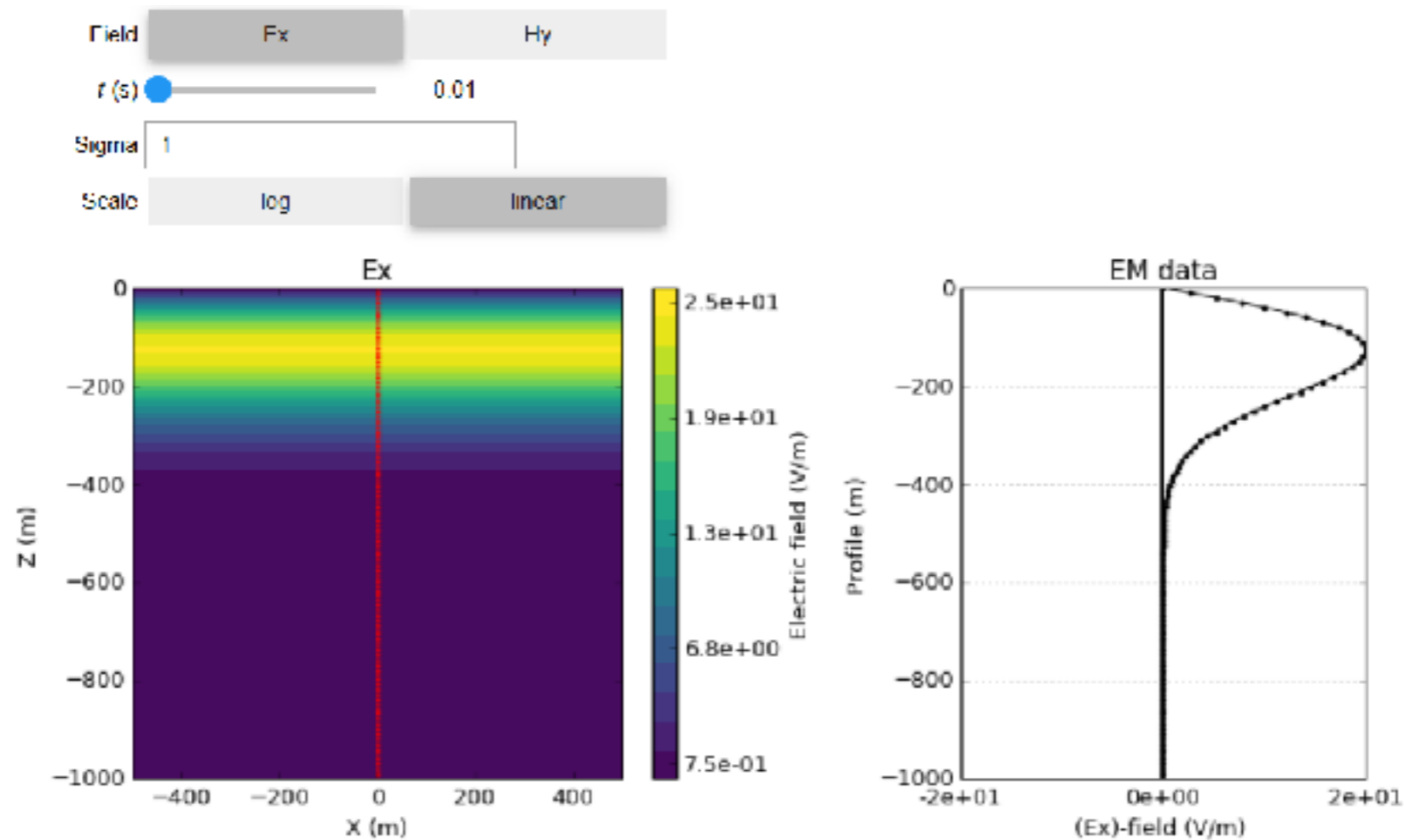
$$v_{max} = \frac{1}{\sqrt{2\mu\sigma t}}$$

L'impulsion se propage donc de plus en plus lentement au cours du temps.



Propagation d'une impulsion

Les applications de UBC sont une belle façon de comprendre la physique de la propagation en fréquence ! Voir le notebook TDEM_Planewave_Wholespace.



Principes des mesures EM

Comprendre les bases de l'EM

1. Comment se propagent les ondes électromagnétiques ?
- 2. Qu'est-ce qu'on mesure et comment le mesure-t-on ?**
3. Comment peut-on détecter une anomalie dans la sous surface ?



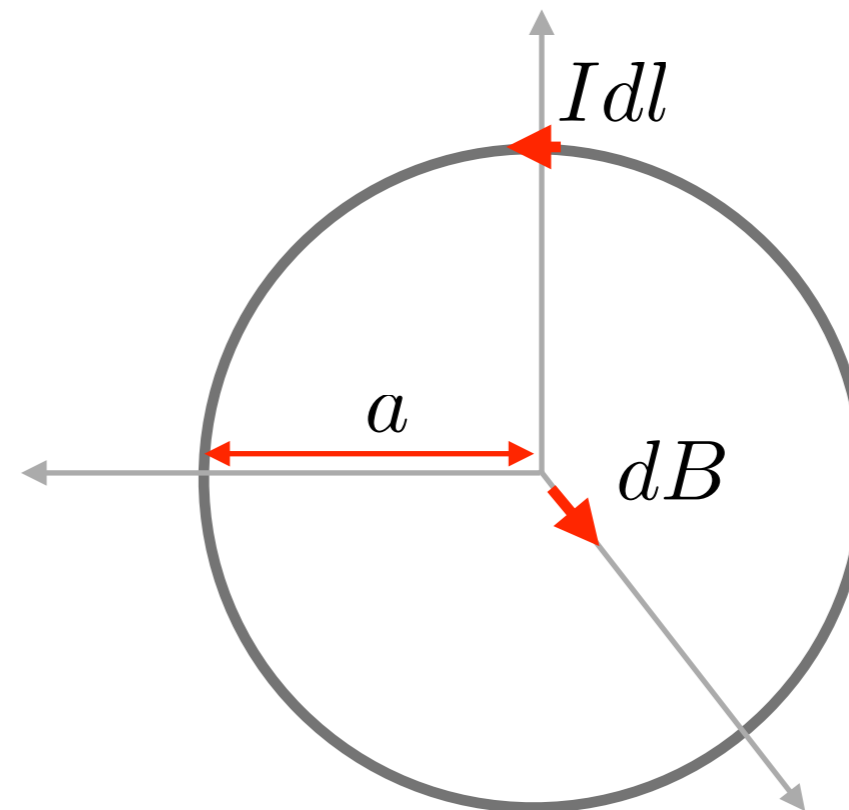
Boucle émettrice

La loi de Biot-Savart: **Production d'un champ magnétique** par une boucle de courant

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu I}{4\pi} \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

Pour une boucle, en son centre:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu I}{4\pi a^2} \oint dl \\ &= \frac{\mu I}{4\pi a^2} 2\pi a \\ &= \frac{\mu I}{2a} \end{aligned}$$



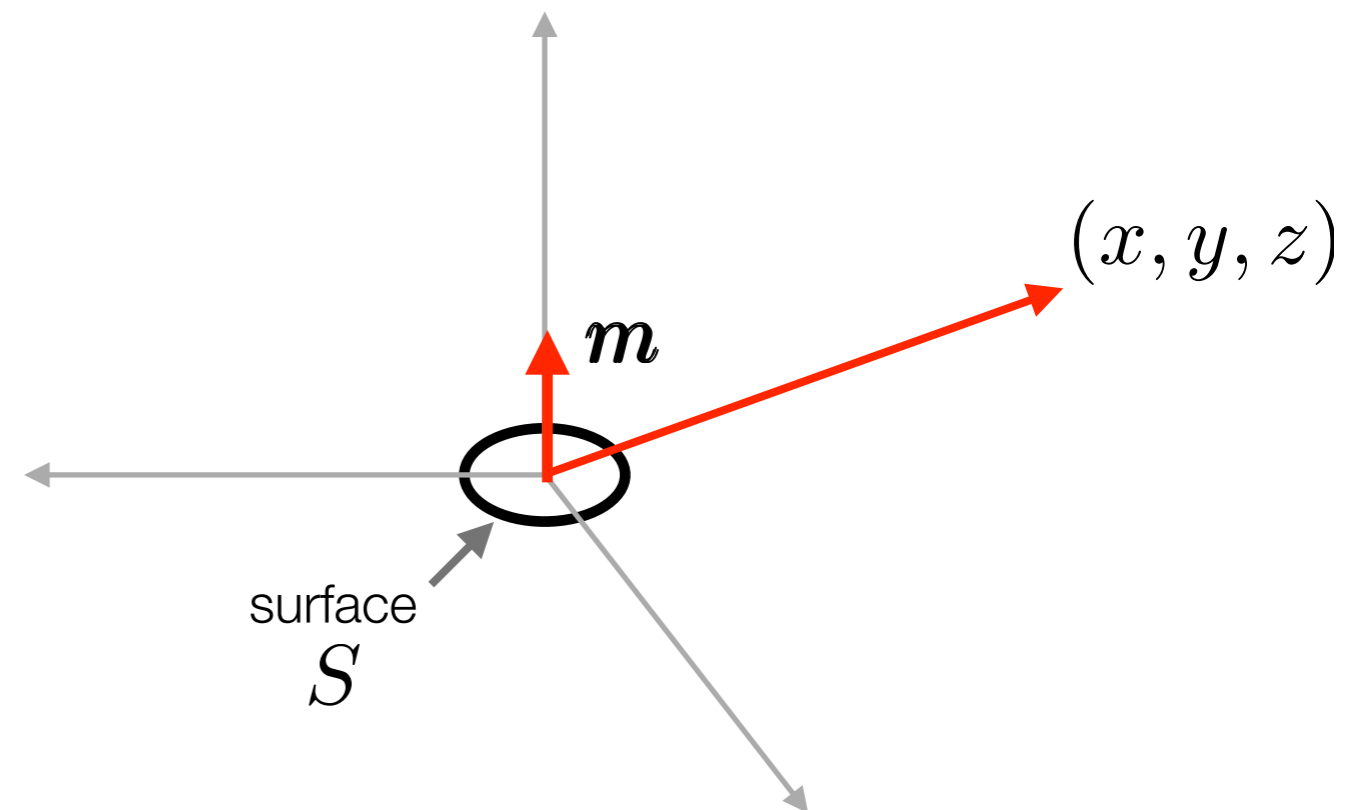
Boucle émettrice

La champ produit par une boucle à un point quelconque de l'espace est plus complexe à dériver, et est donné par:

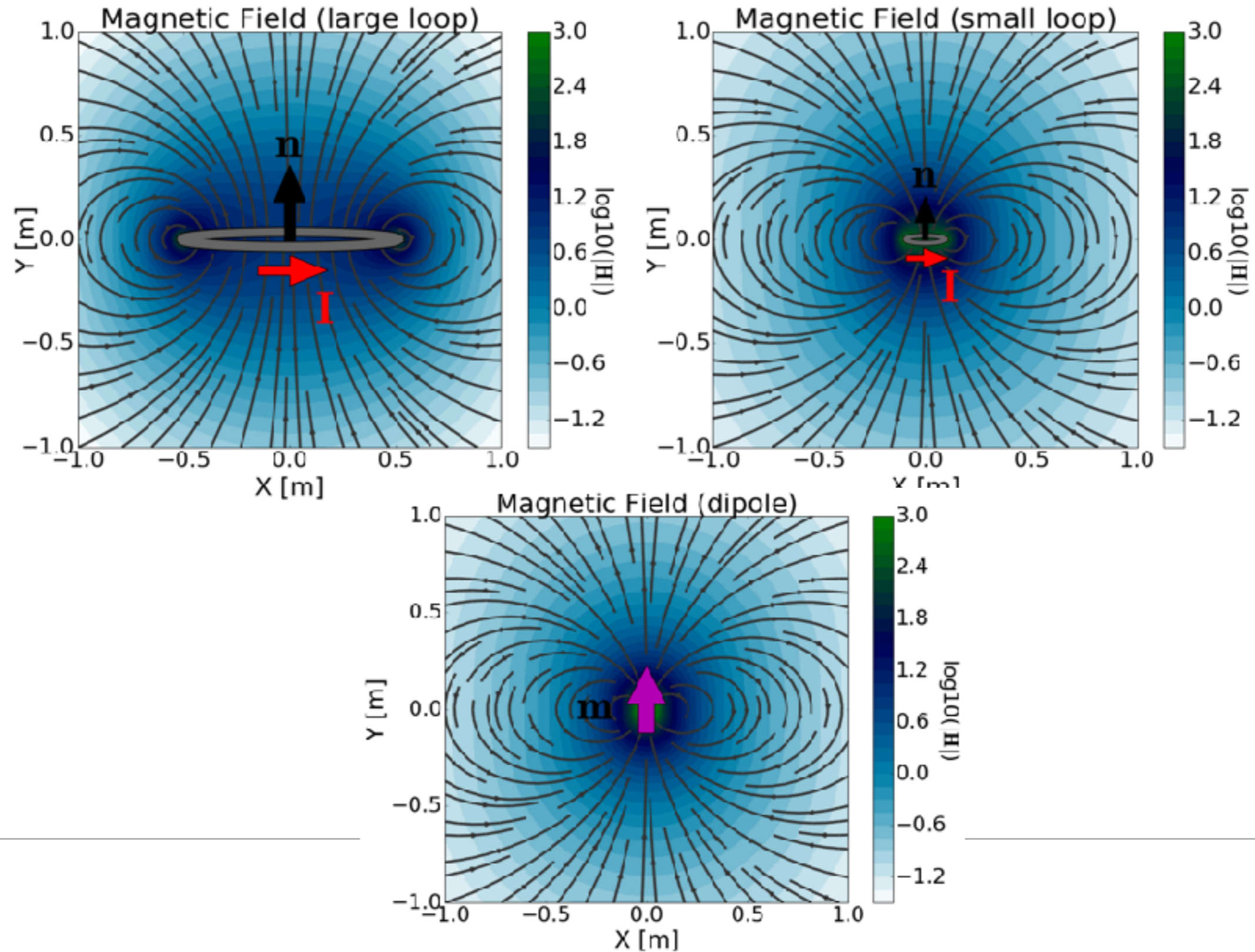
$$H_z = \frac{IS}{4\pi r^3} \left[\frac{3(x^2 + y^2)}{r^2} - 2 \right] \quad H_x = \frac{IS}{4\pi r^3} \frac{3zx}{r^2} \quad H_y = \frac{IS}{4\pi r^3} \frac{3zy}{r^2}$$

Lorsque $r > 5a$, la boucle agit comme un dipôle avec un **moment dipolaire** donné par:

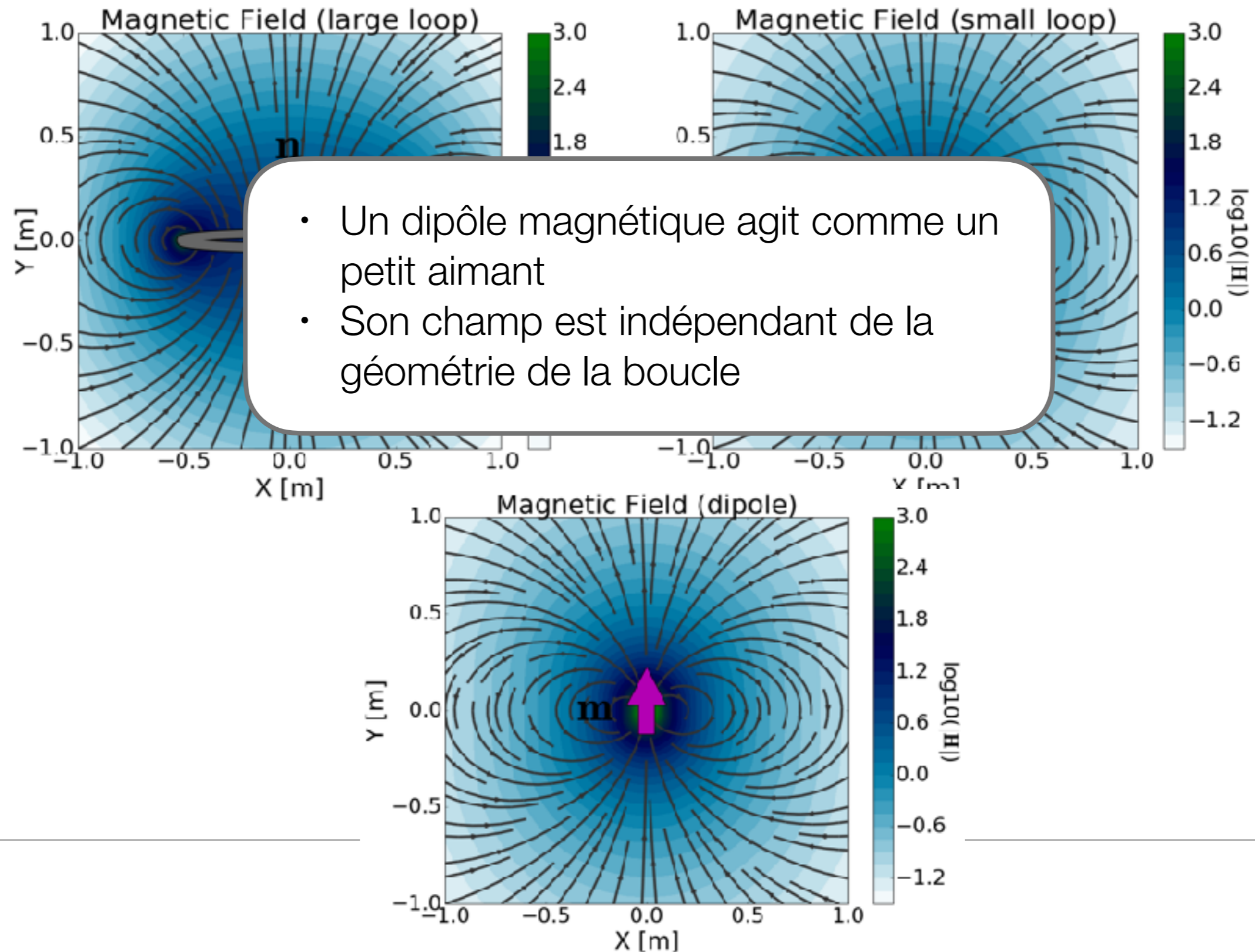
$$\mathbf{m} = IS\mathbf{n}$$



Boucle émettrice



Boucle émettrice

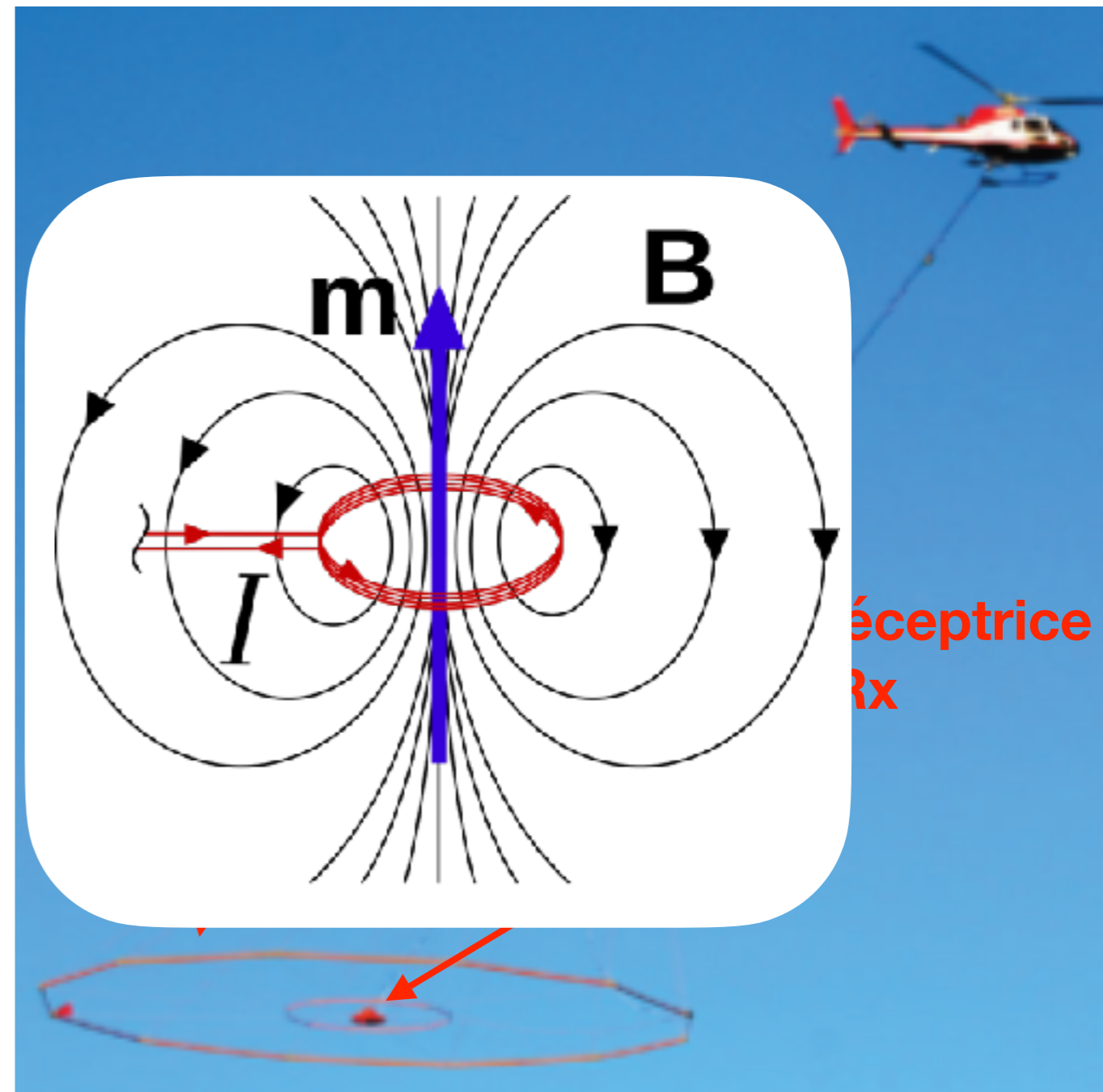


- Un dipôle magnétique agit comme un petit aimant
- Son champ est indépendant de la géométrie de la boucle

Boucle émettrice

Les émetteurs en EM:

- Boucles dans lesquels on fait passer un courant
- Produit un champ magnétique qui peut être assimilé à un dipôle magnétique
- Le champ magnétique se propage dans l'espace selon les lois vues précédemment de propagation des champs électromagnétiques



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_field_due_to_current.svg

Boucle réceptrice: Loi de Faraday

Les équations de Maxwell sont à la base des méthodes EM!

Équations de Maxwell

- Loi d'Ampère: $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$

- Loi de Faraday: $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

- Loi de Gauss: $\nabla \cdot \mathbf{D} = q$

- Loi de Gauss: $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
(magnétique)

Équations constitutives

- $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

- $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$

- $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$

Boucle réceptrice: Loi de Faraday

Nous partons plutôt de la forme intégrale de la loi de Faraday:

Forme différentielle

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Forme intégrale

$$\oint_{dS} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}$$

Les deux formulations sont reliées par le théorème de Stokes:

$$\oint_{dS} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S}$$

Boucle réceptrice: Loi de Faraday

Loi de Faraday: **Une force électromotrice** causée par la **variation d'un champs magnétique** dans une boucle. **C'est le principe d'induction.**

$$\oint_{dS} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}$$

Force électromotrice (volt)

Flux magnétique

$$\mathcal{E} = \oint_{dS} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

$$\phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

$$\mathcal{E} = - \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

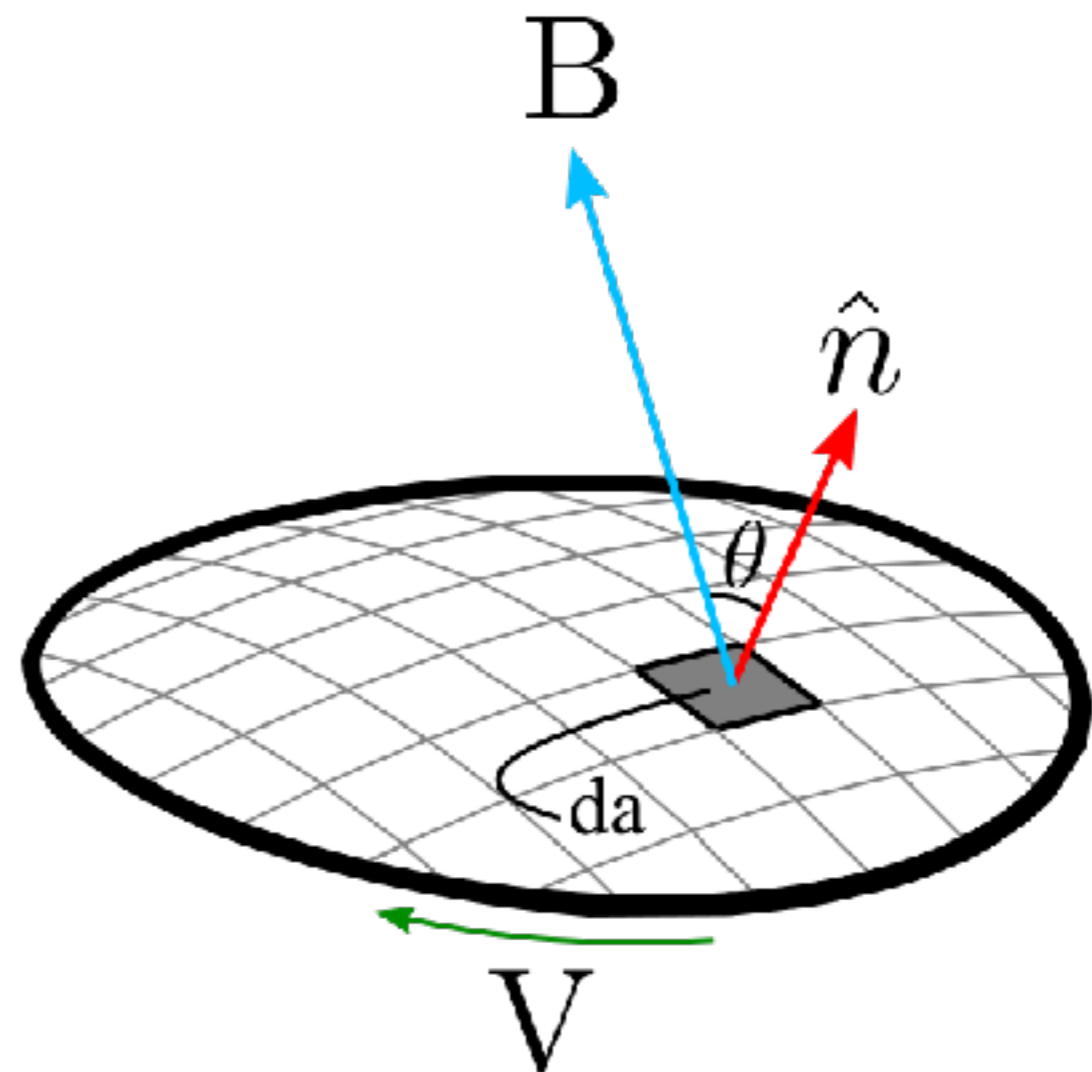
Boucle réceptrice: Flux magnétique

Le flux magnétique correspond à la composante champ magnétiques qui est normale à la surface recoupé par le champ.

$$\phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Le flux dépend:

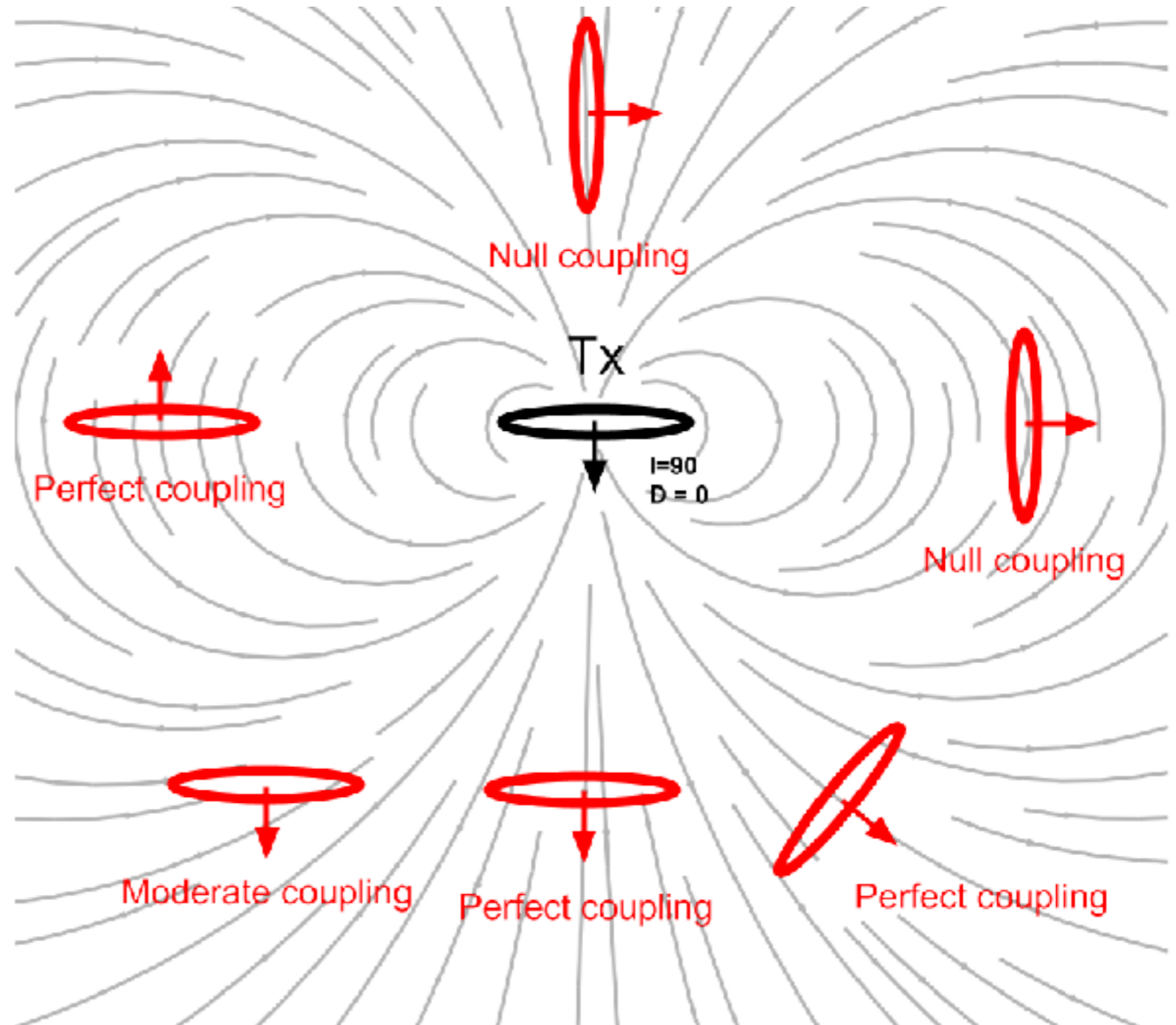
- De la grandeur de la surface
- De l'orientation de la surface par rapport au champ magnétique
- De la force du champ



Boucle réceptrice: Flux magnétique

Le flux dépend fortement de l'orientation de la boucle réceptrice par rapport au champ magnétique

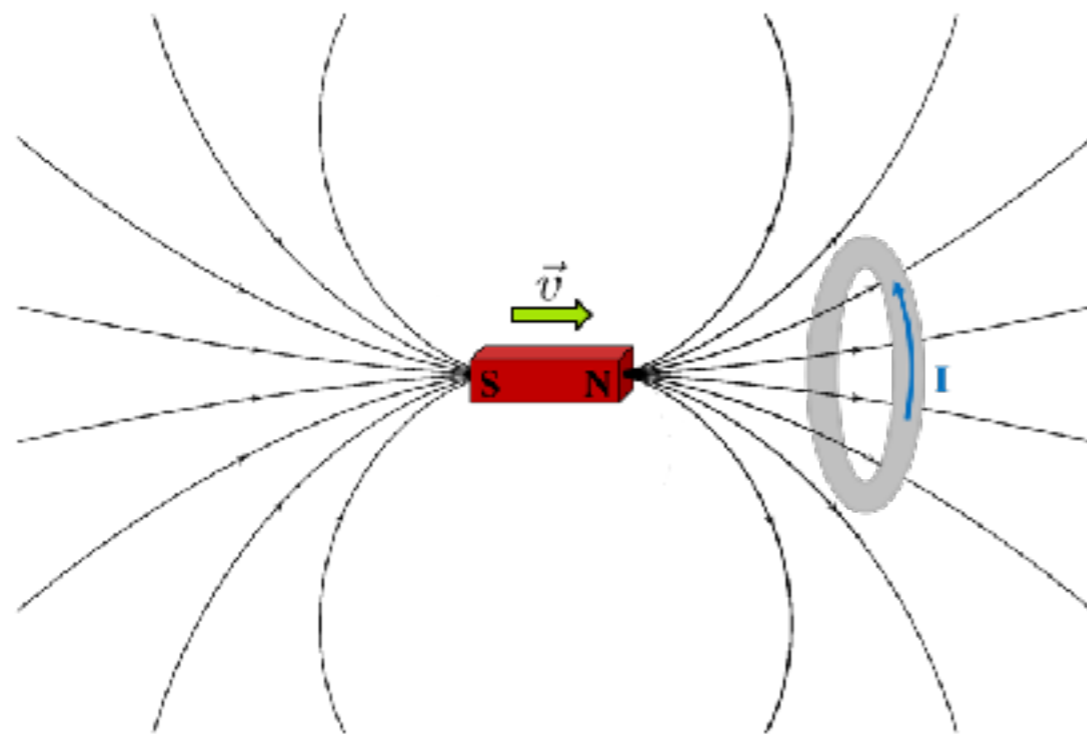
$$\phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$



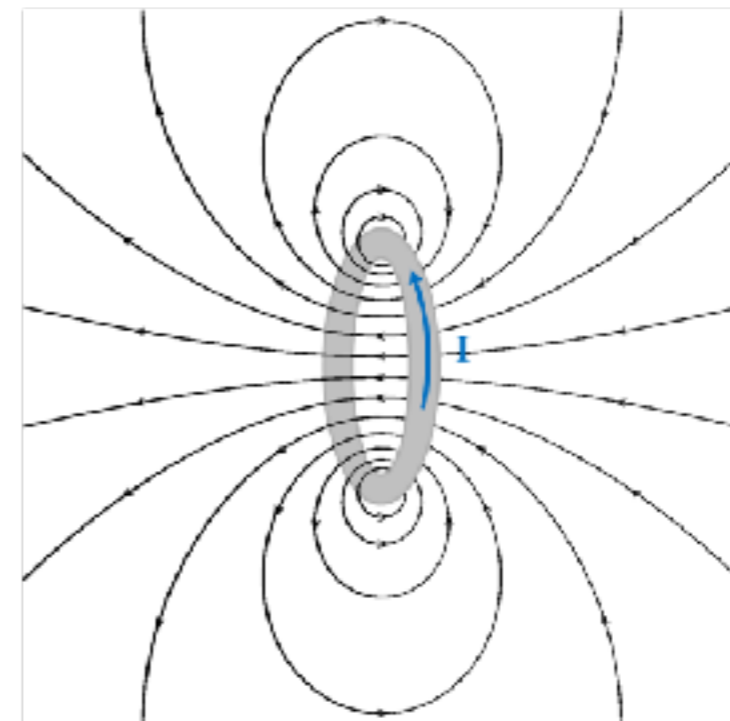
Boucle réceptrice: Loi de Lenz

La loi de Lenz stipule que la f.e.m induite par un champ magnétique dans un boucle produira un courant dont le champ créé **s'opposera** au champ primaire.

$$\mathcal{E} = - \frac{\partial \phi}{\partial t}$$



Champ primaire



Champ secondaire

Boucle réceptrice

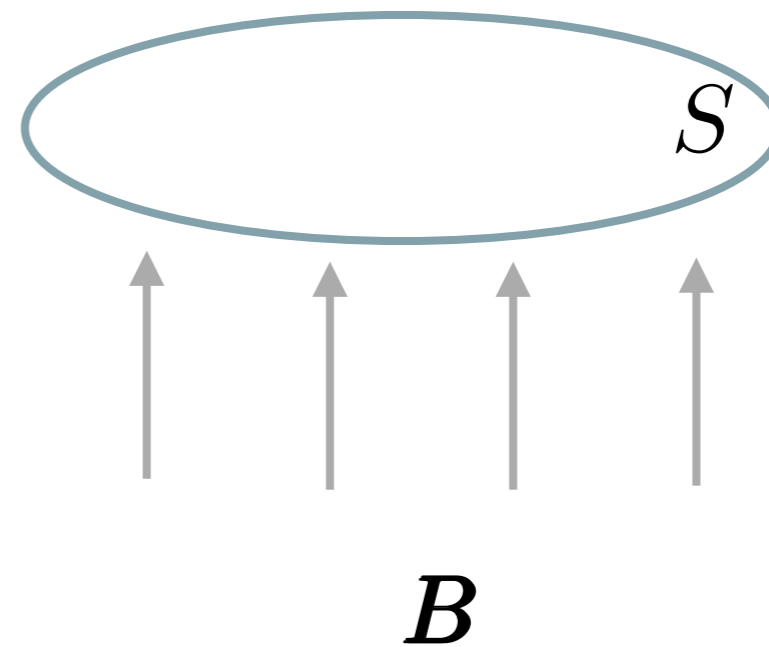
La boucle réceptrice mesure un voltage proportionnel à la variation du champ magnétique total.

Pour un champ plan

$$\mathbf{B} = B_0 e^{i\omega t} \mathbf{e}_z$$

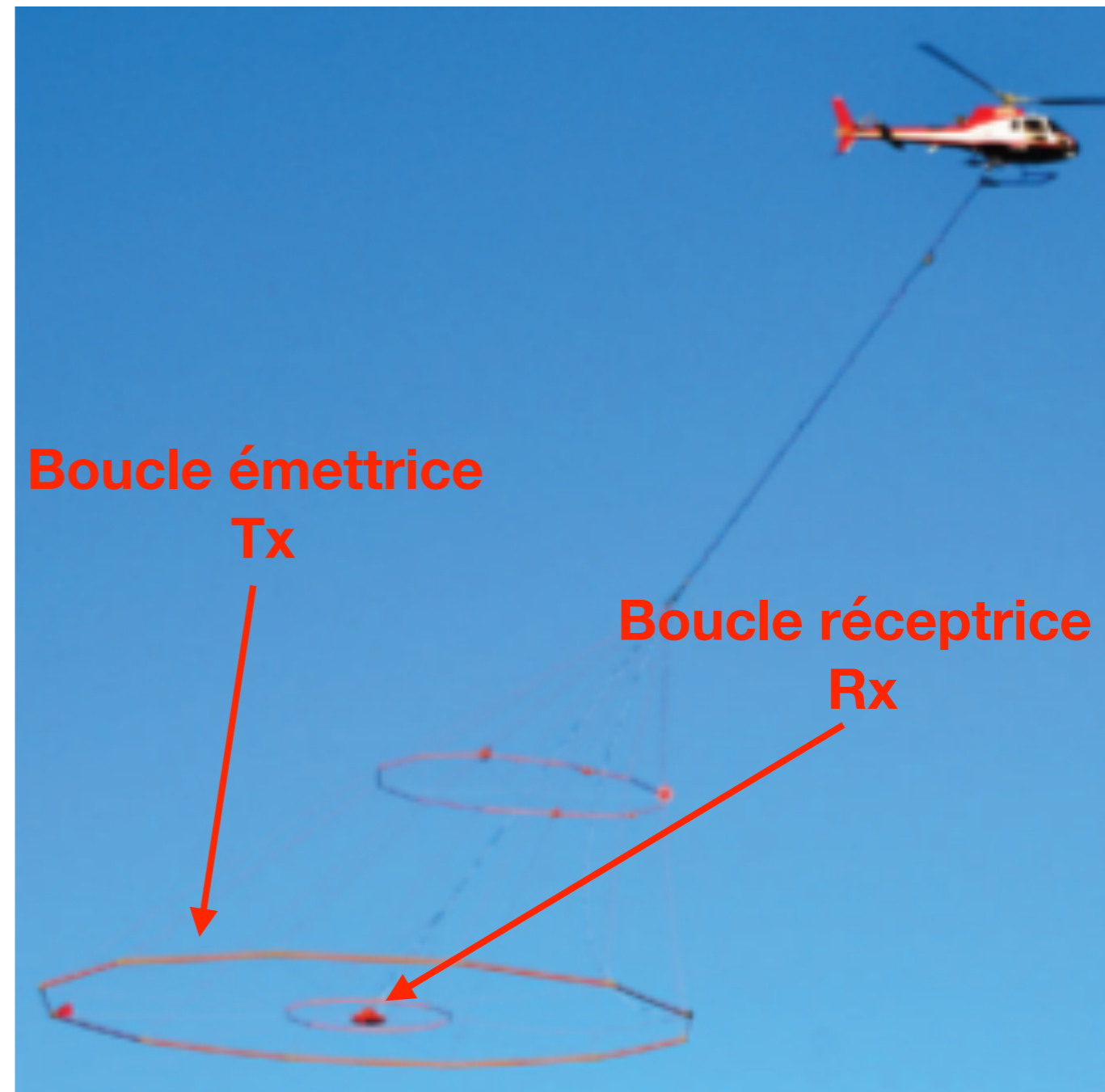
La f.e.m. mesurée sera:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -\frac{\partial \phi}{\partial t} \\ &= -\frac{\partial (SB_0 e^{i\omega t})}{\partial t} \\ &= -i\omega SB_0 e^{i\omega t} \end{aligned}$$



Boucles réceptrices

- La **loi de Faraday** décrit comment la variation temporel d'un champ magnétique peut être mesurée par le courant induit dans une boucle
- La **loi de Lenz** indique le sens du courant induit dans le récepteur
- Le **flux magnétique** est la composante du champ magnétique normal à la surface de la boucle
- Pour mesurer le champ, le **couplage du récepteur** avec le champ mesuré est important



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_field_due_to_current.svg

Détection d'une anomalie

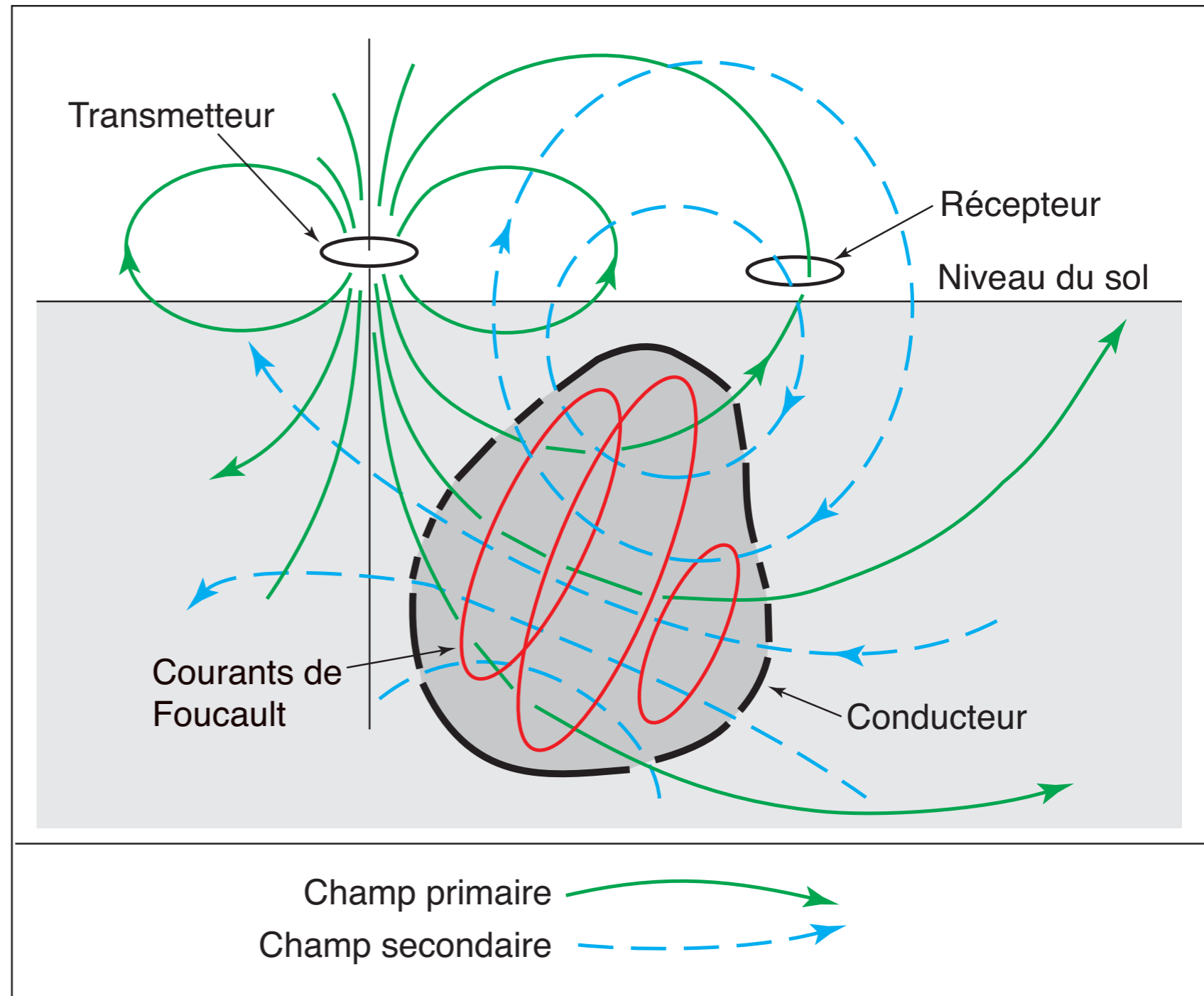
Comprendre les bases de l'EM

1. Comment se propagent les ondes électromagnétiques ?
2. Qu'est-ce qu'on mesure et comment le mesure-t-on ?
3. **Comment peut-on détecter une anomalie dans la sous surface ?**



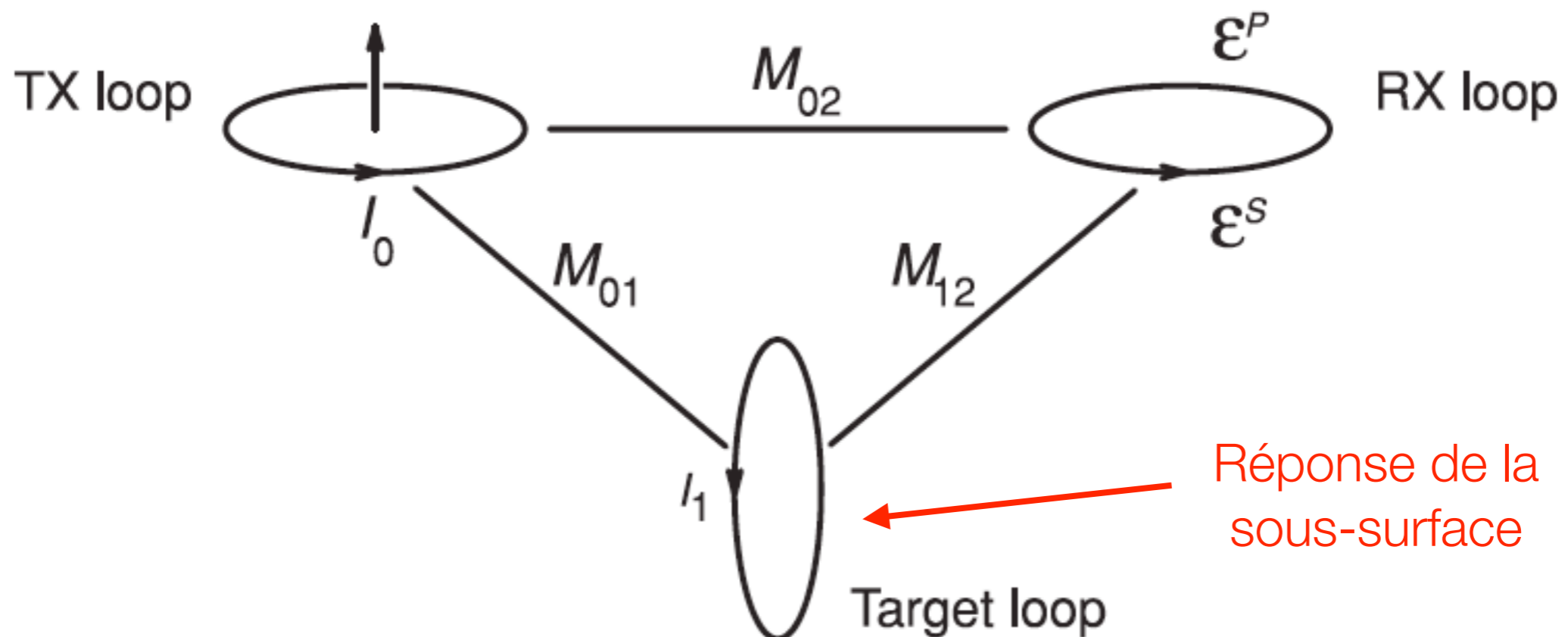
Modèle du conducteur enfoui

- L'émetteur émet un champ magnétique, que l'on nomme **champ primaire**.
- Le champ primaire induit un courant dans le conducteur enfoui, selon la loi de Faraday.
- Le courant induit crée à son tour un champ magnétique que l'on nomme **champ secondaire**.
- Le récepteur mesure la somme du champ primaire et du champ secondaire.



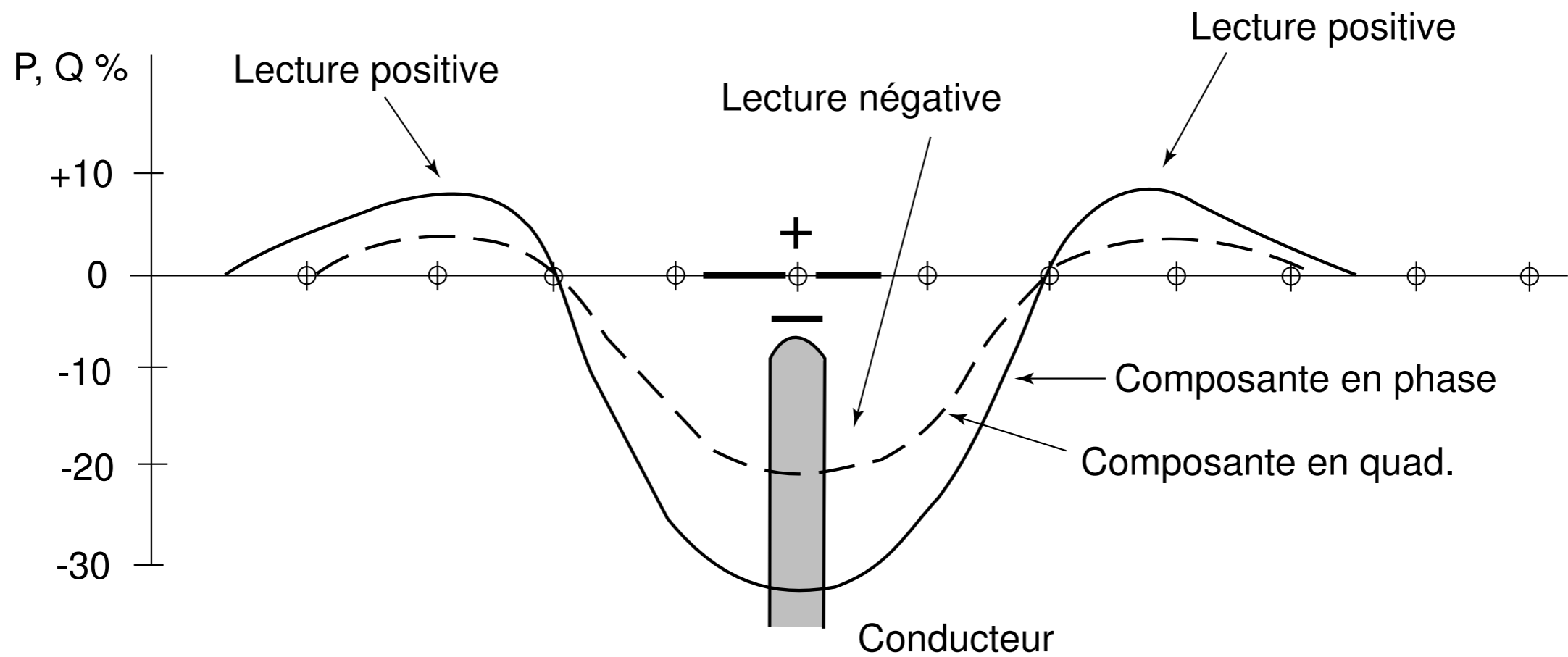
Le circuit équivalent

On utilise un système simplifié afin de comprendre la dynamique du système. Le sol est assimilé à une troisième boucle de courant.



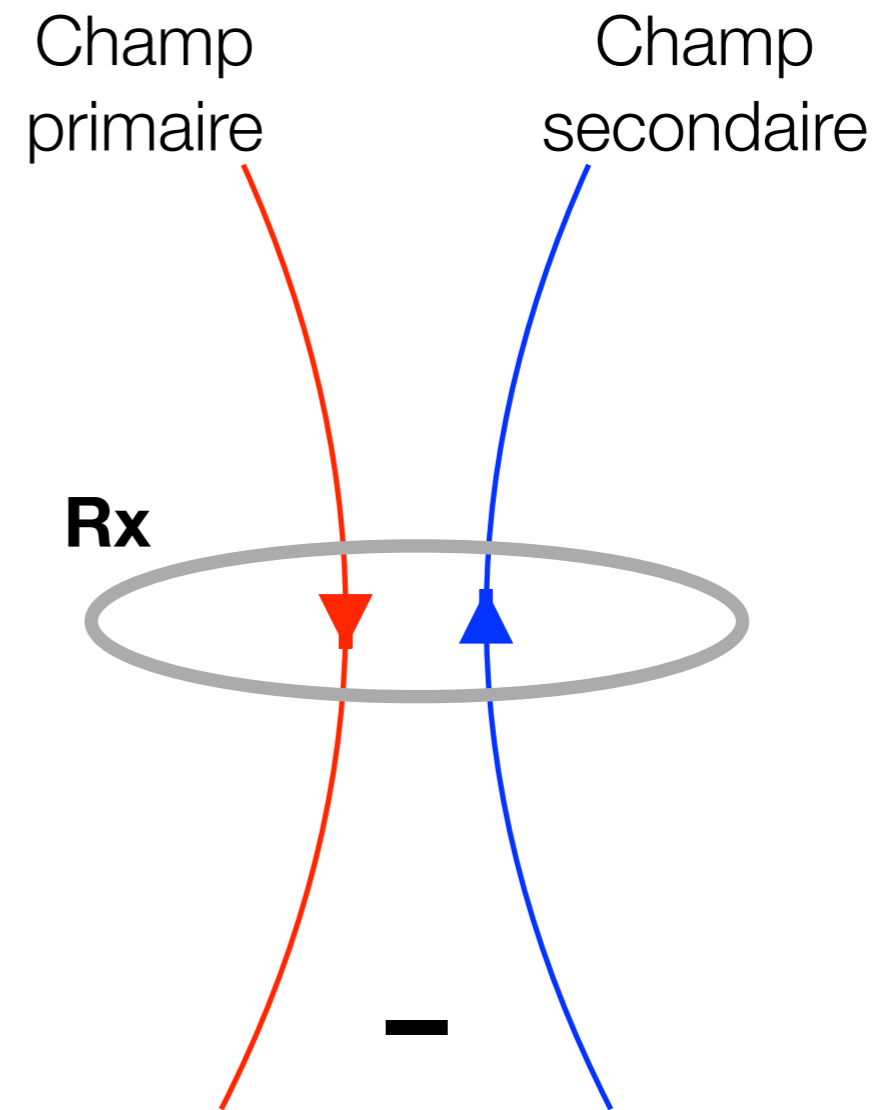
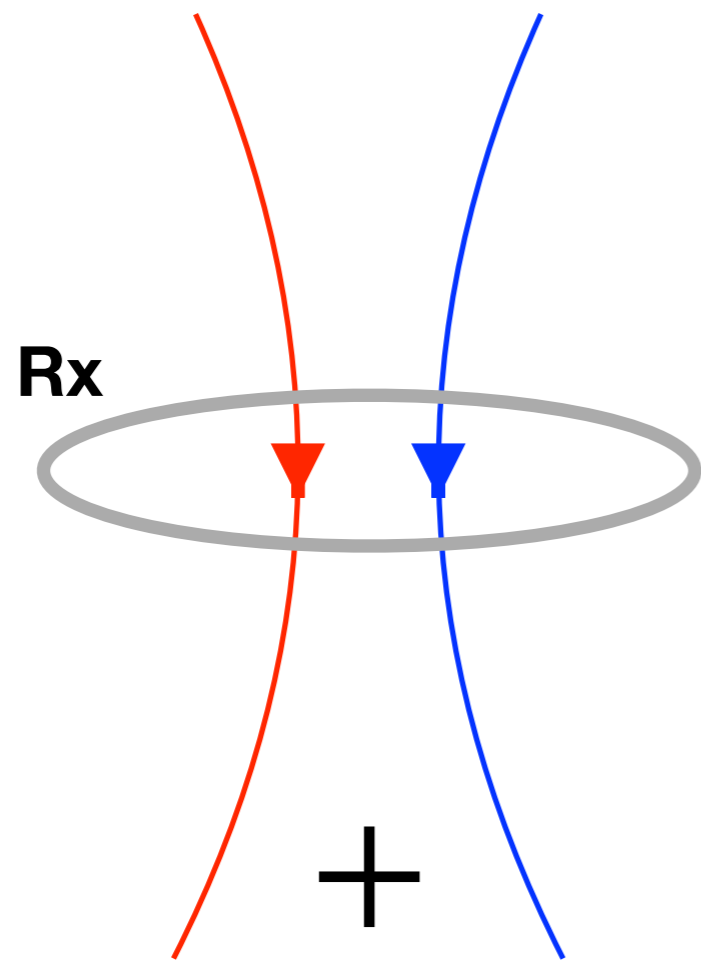
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique.



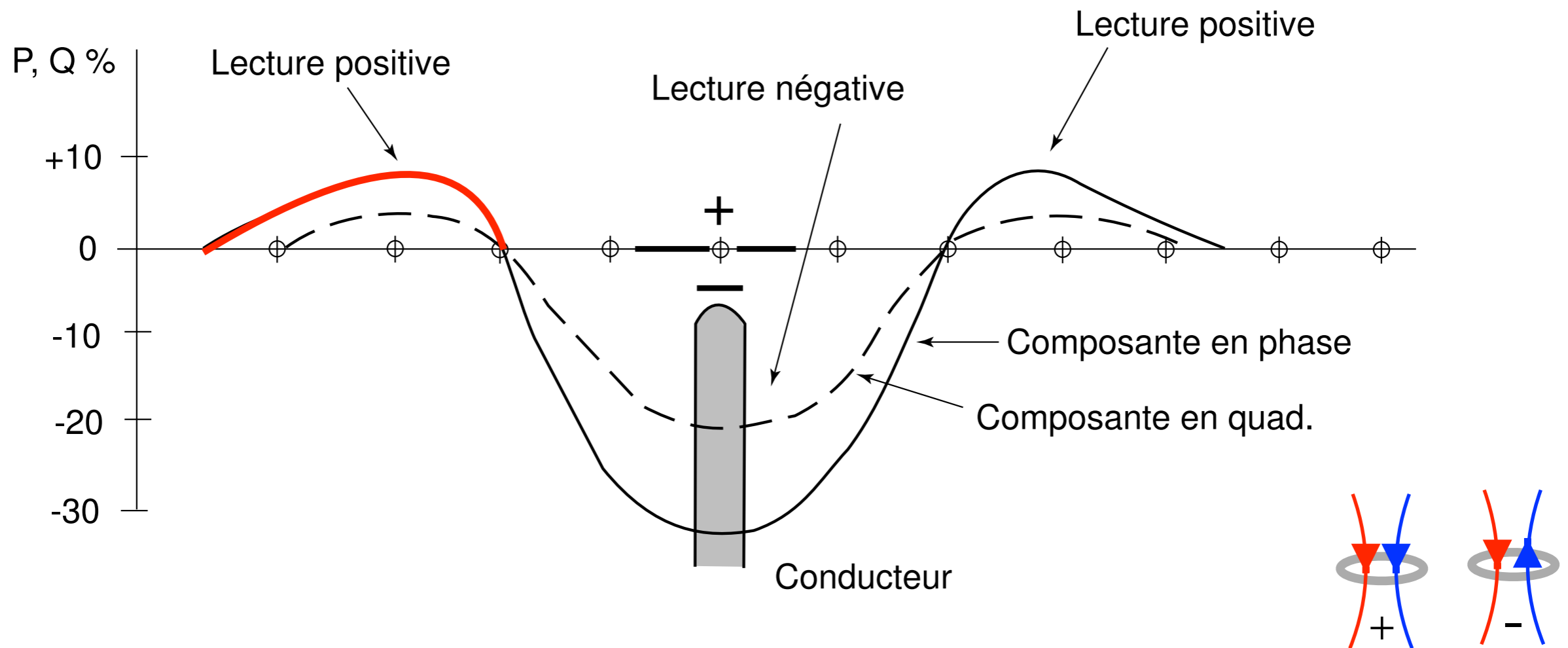
Forme de l'anomalie

Convention des signes:



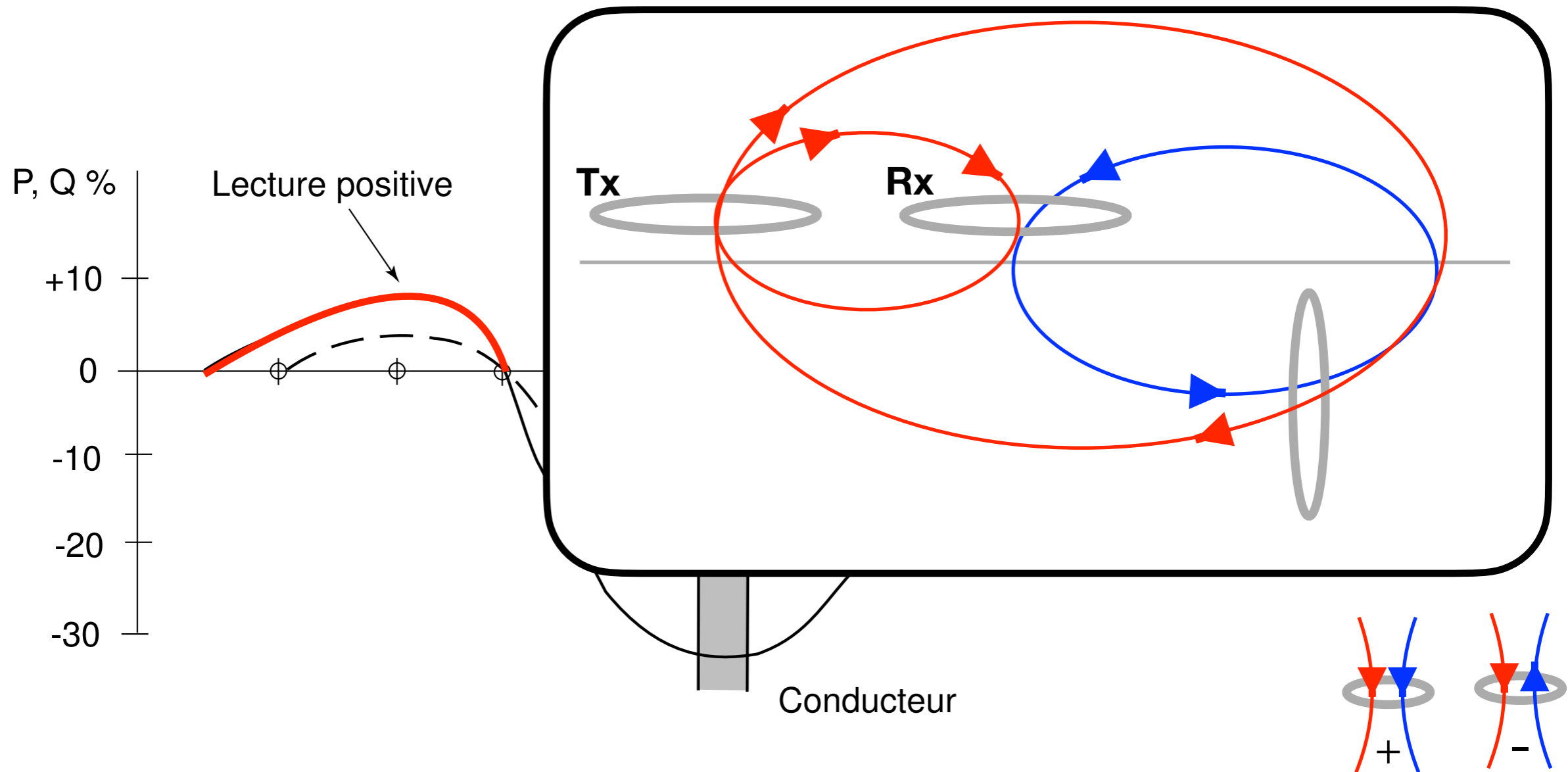
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



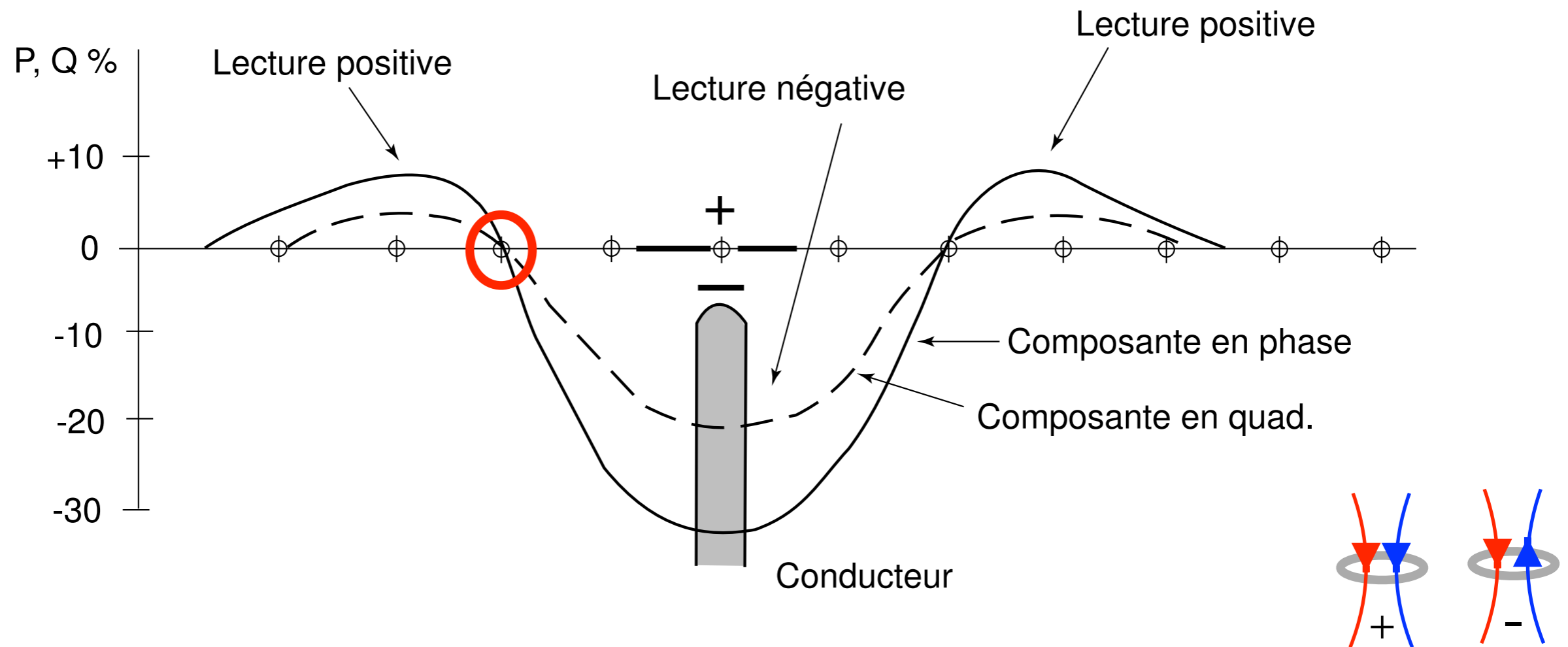
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



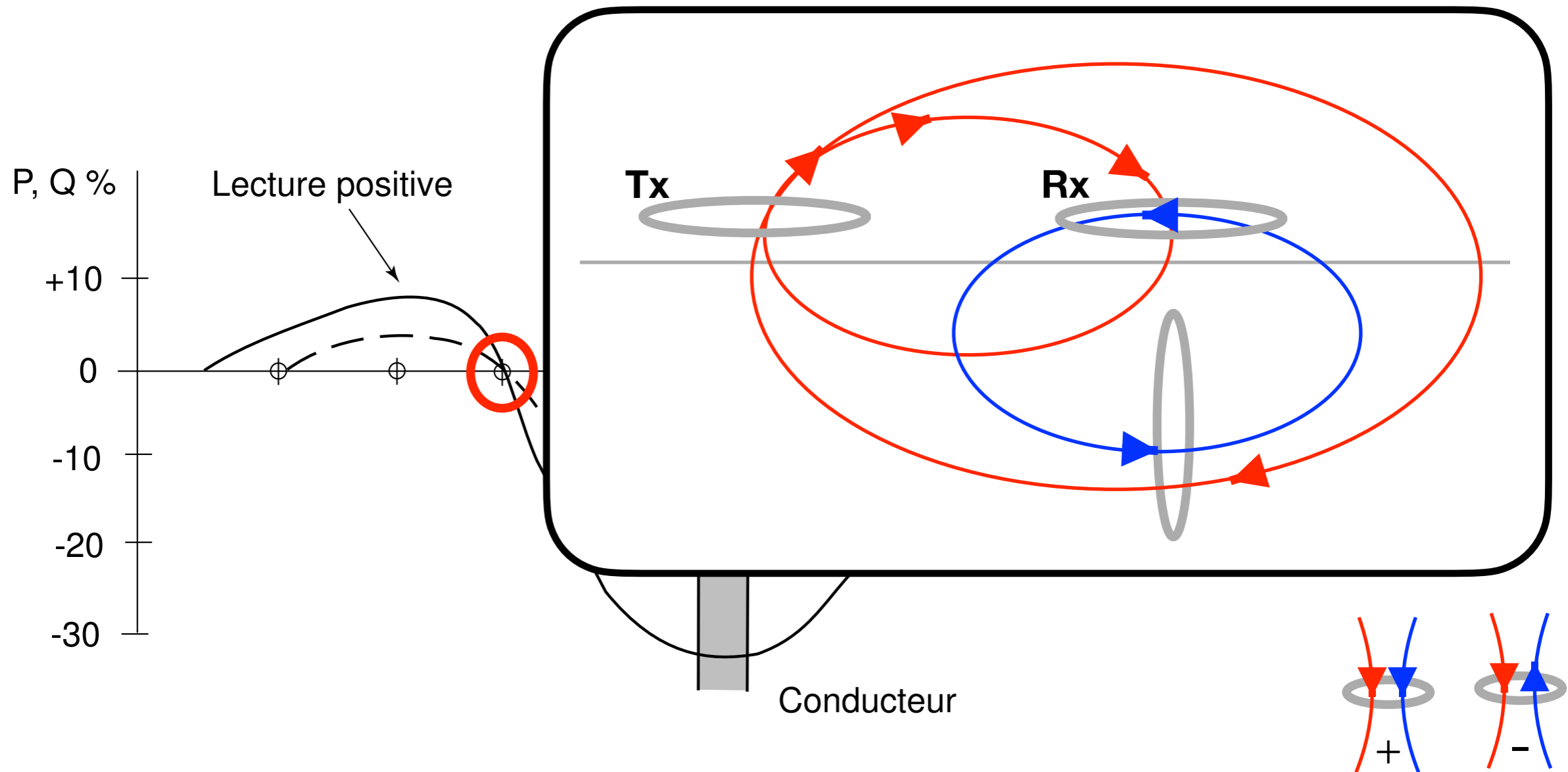
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



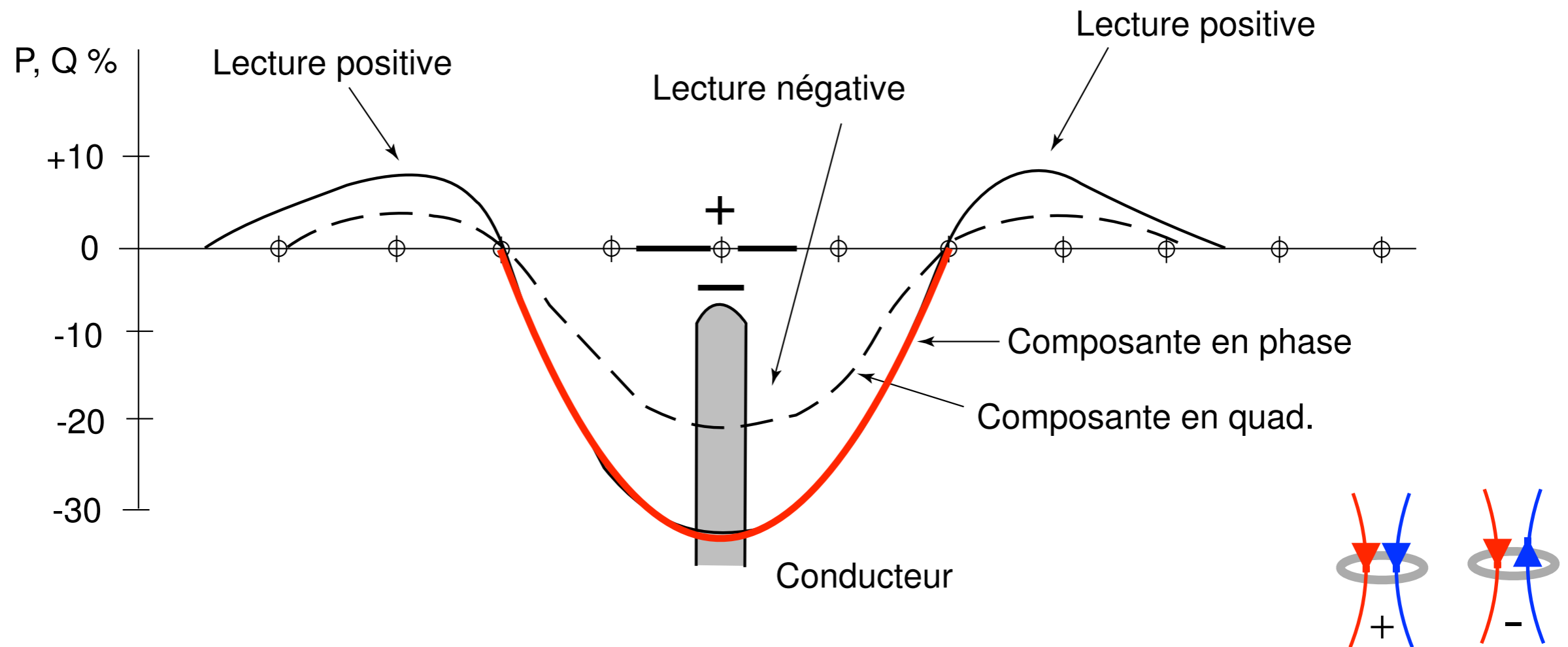
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



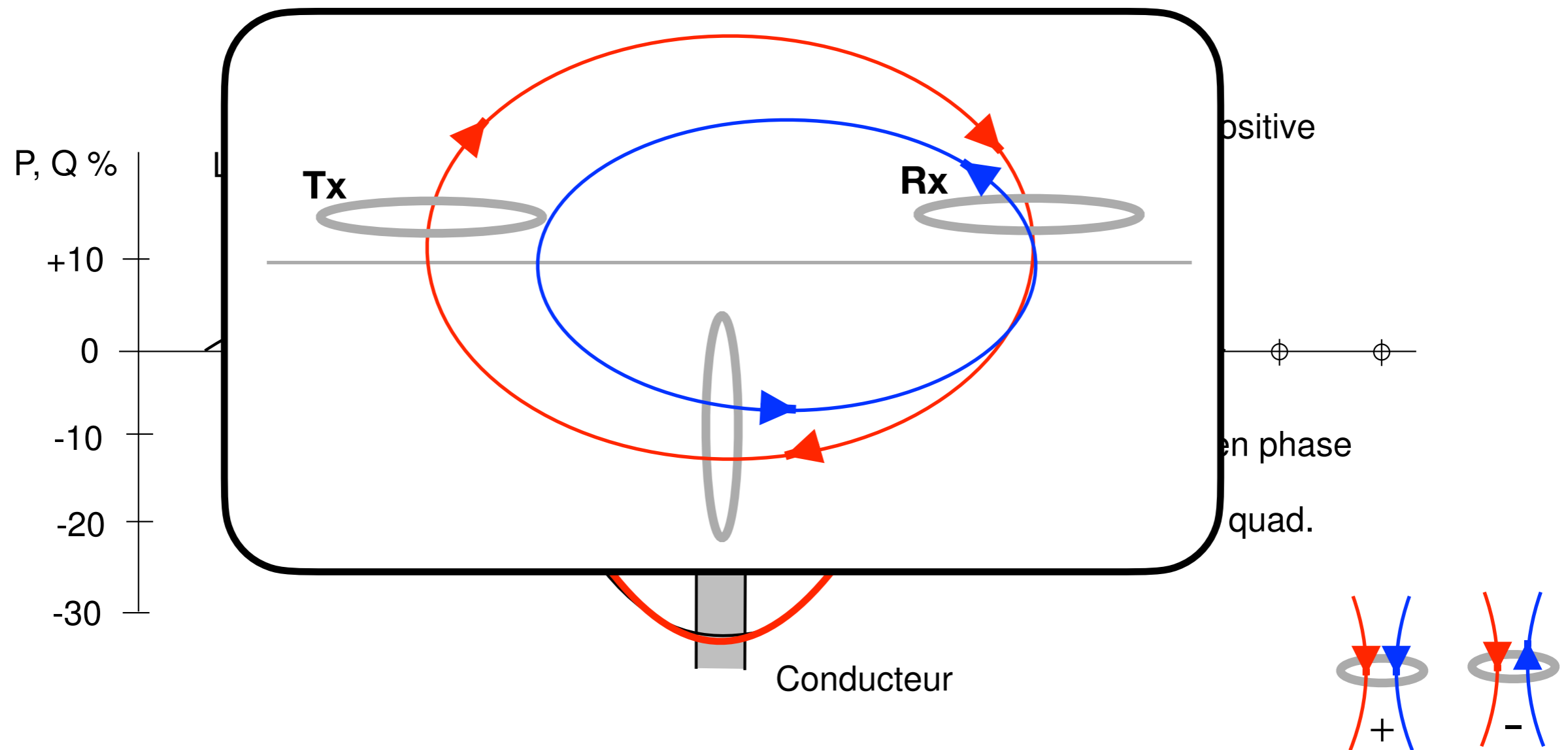
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



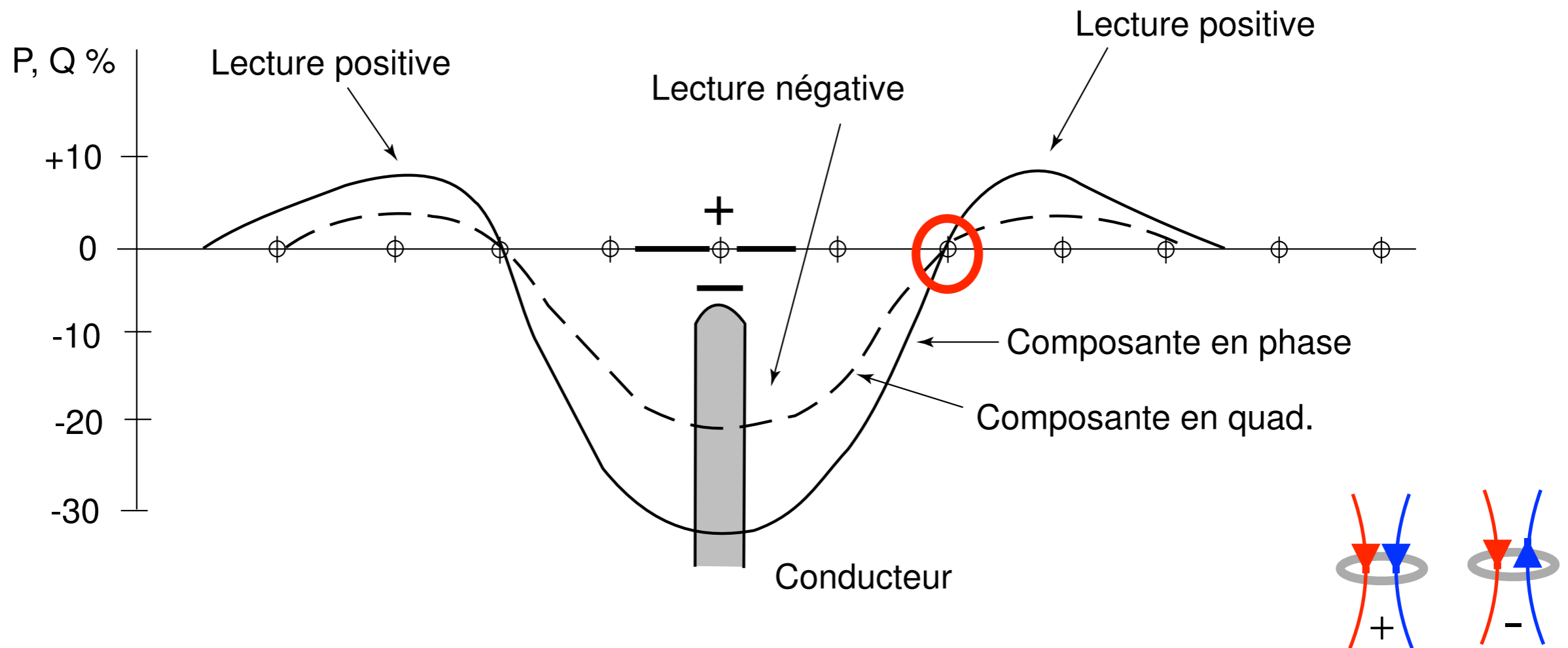
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



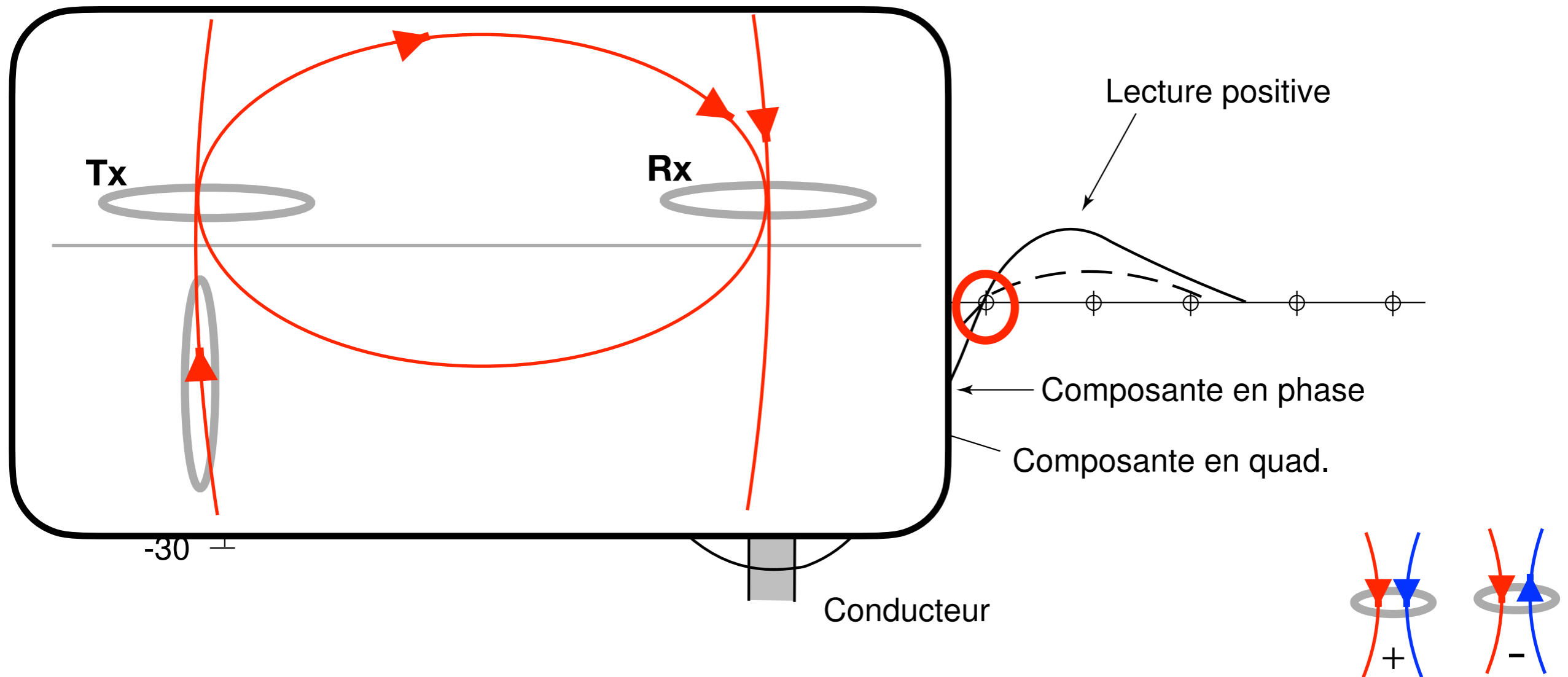
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



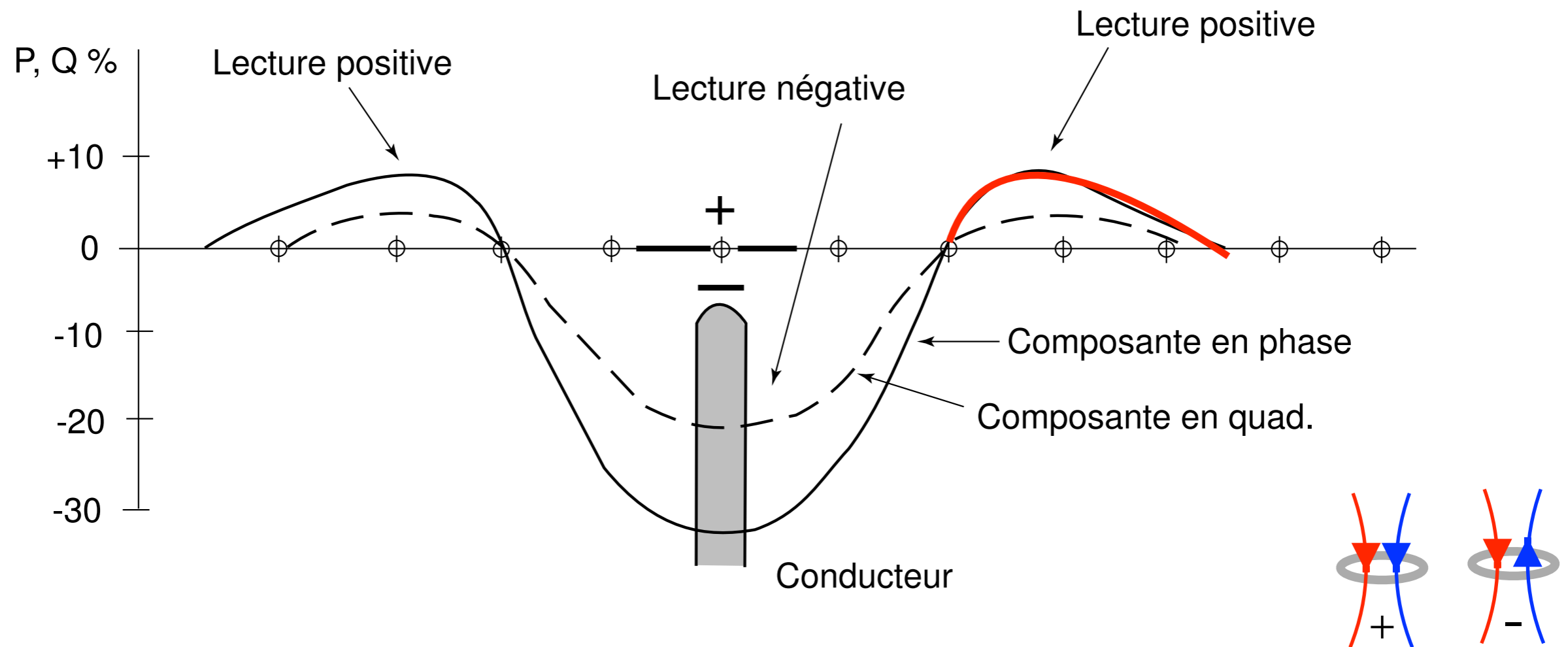
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



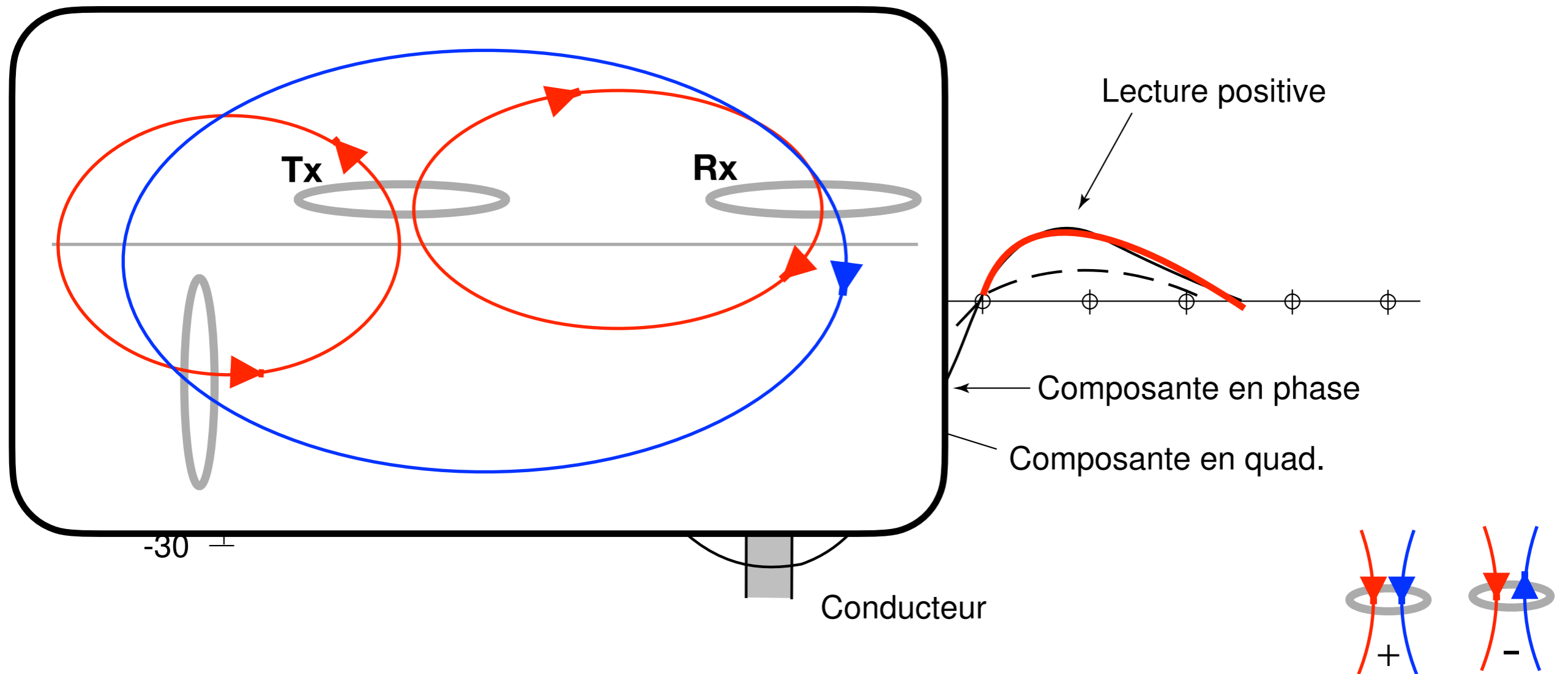
Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique

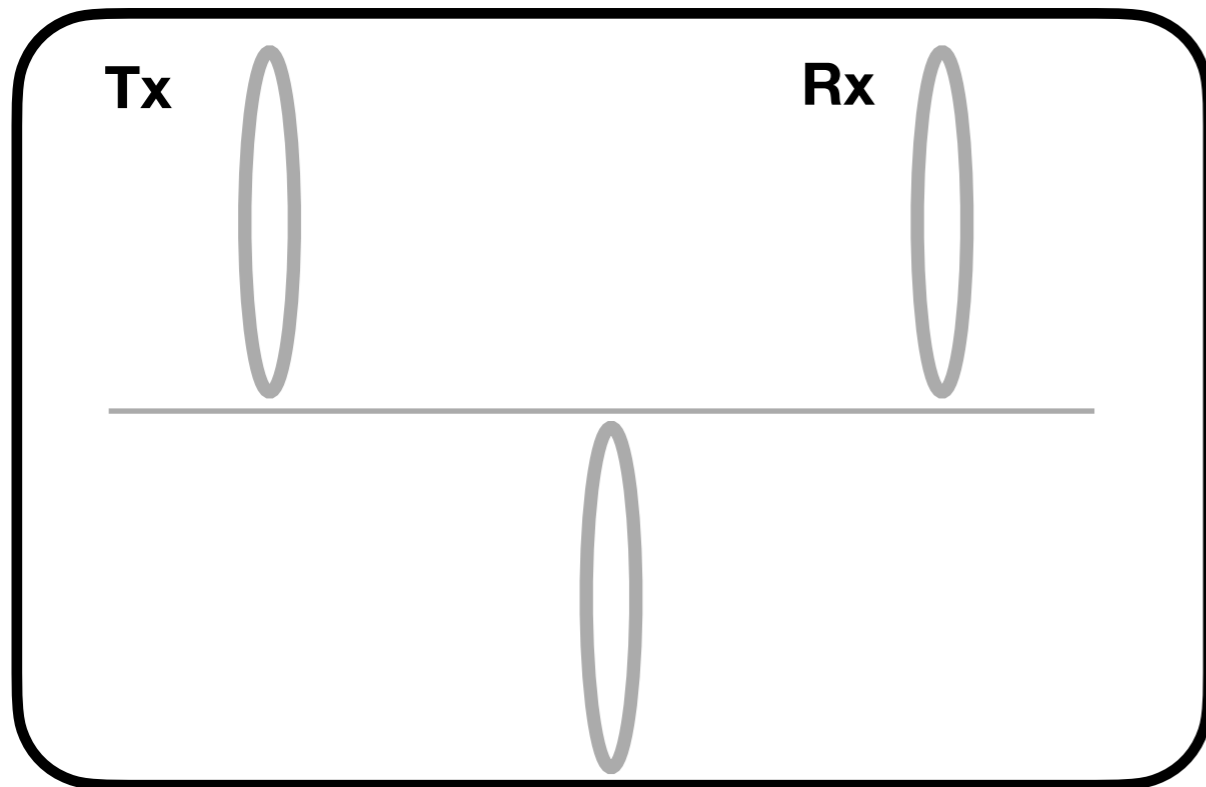
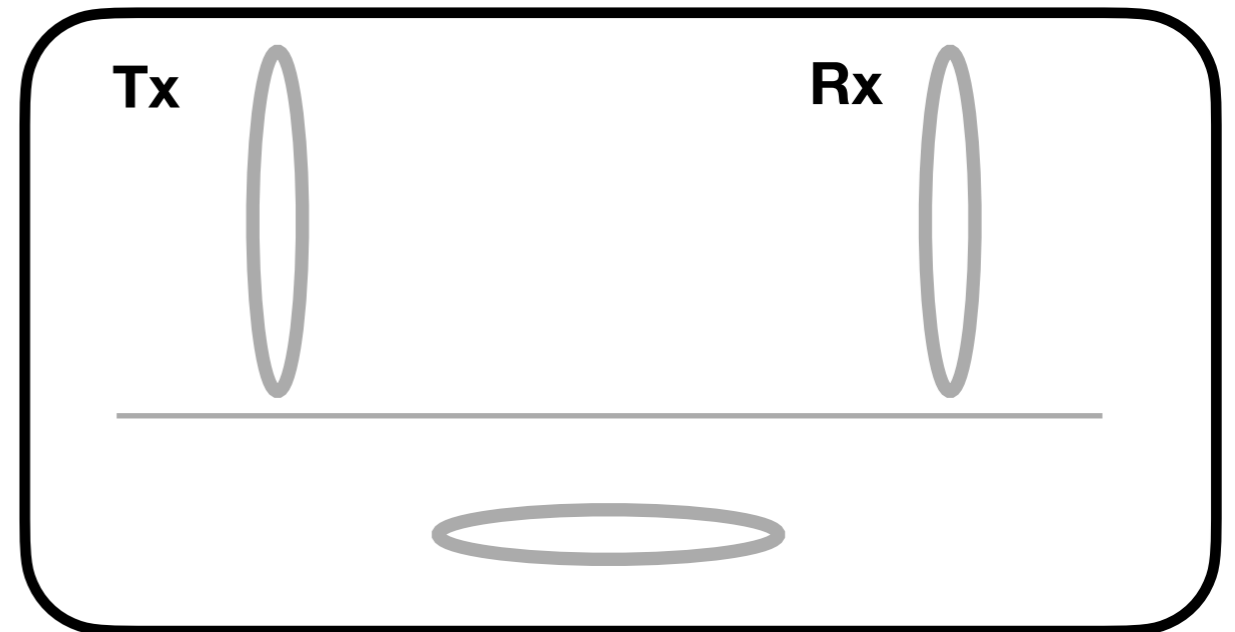
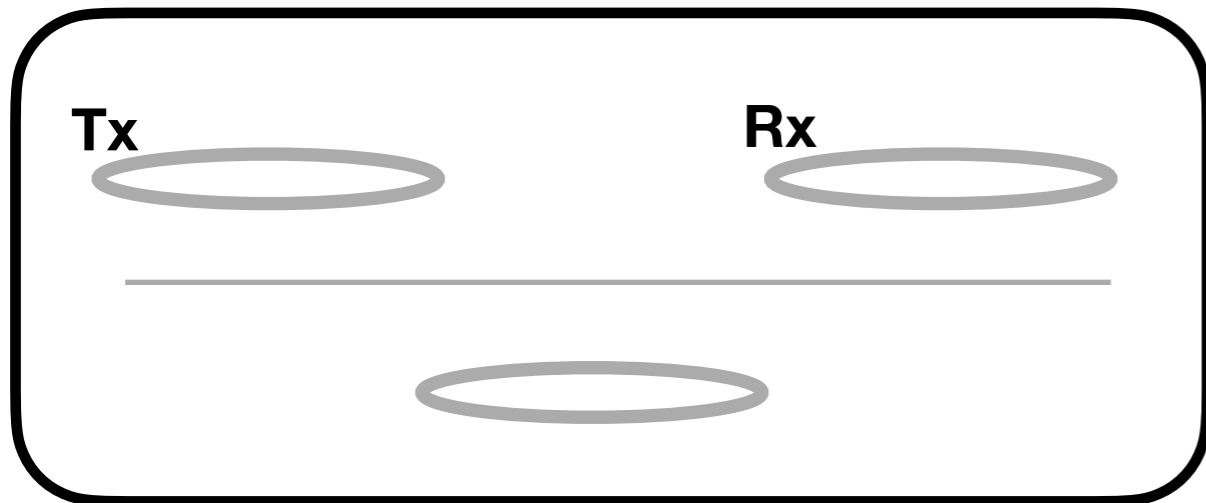


Forme de l'anomalie

Tentons d'expliquer la forme de l'anomalie grâce au flux magnétique



Quels seraient la forme des profils ?



Résumé

- Une boucle émet un champ magnétique (le champ primaire)
- Le champ primaire se propage dans le sol
- Le champ primaire induit un courant dans le sol
- Le courant produit un champ magnétique secondaire
- La boucle émettrice mesure les champs primaires et secondaires
- La mesure dépend du couplage entre les boucles et entre les anomalies présentes dans le sol.

