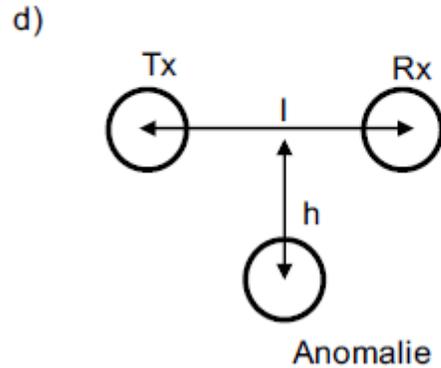
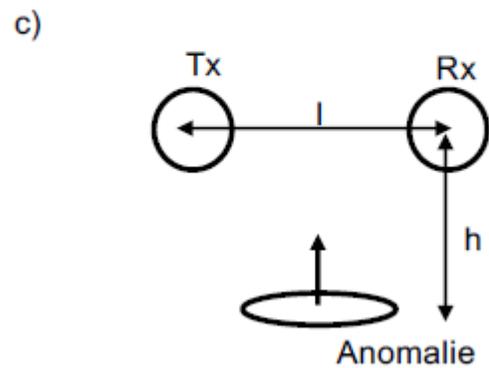
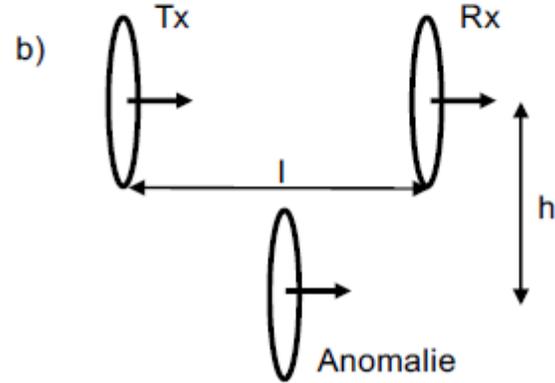
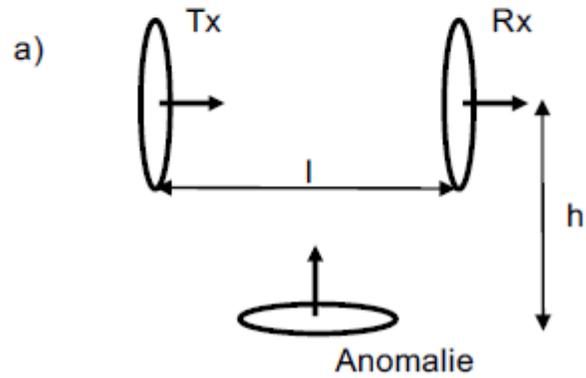
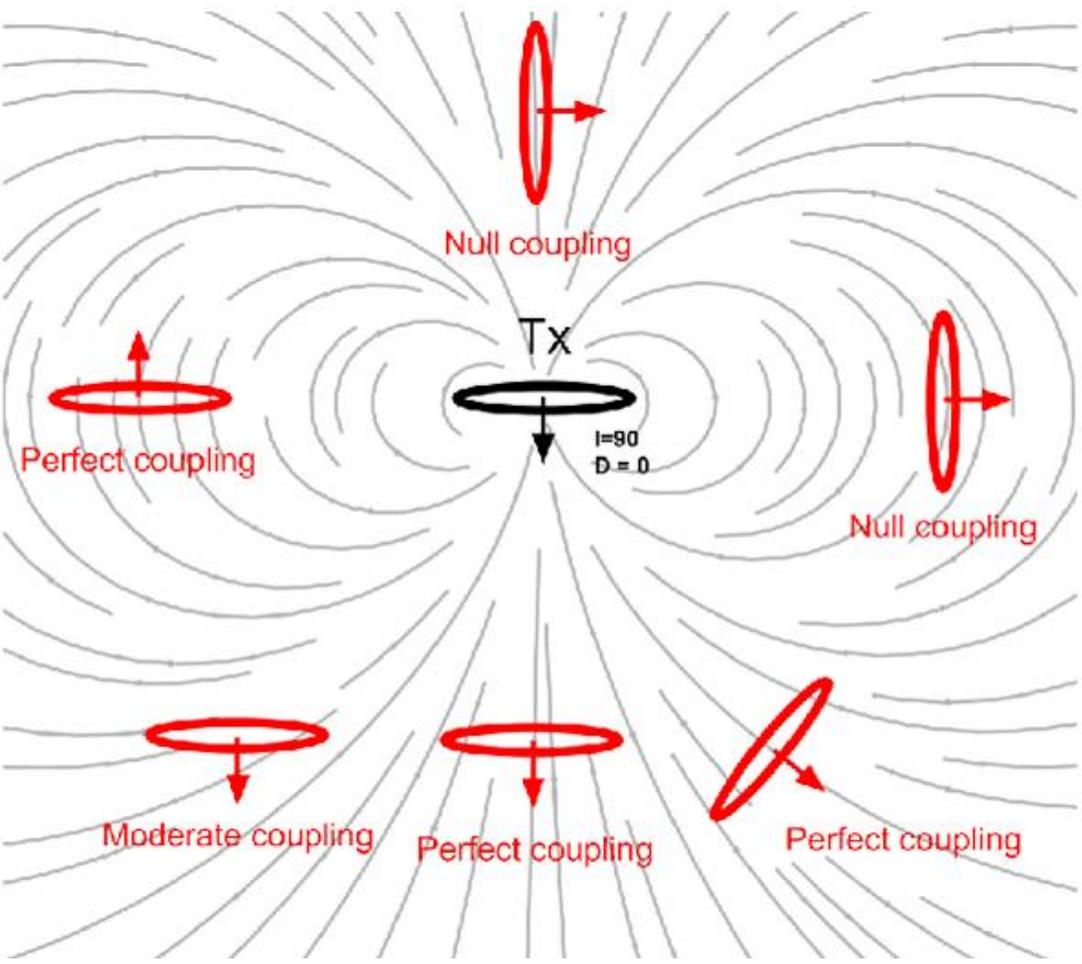


Question 1

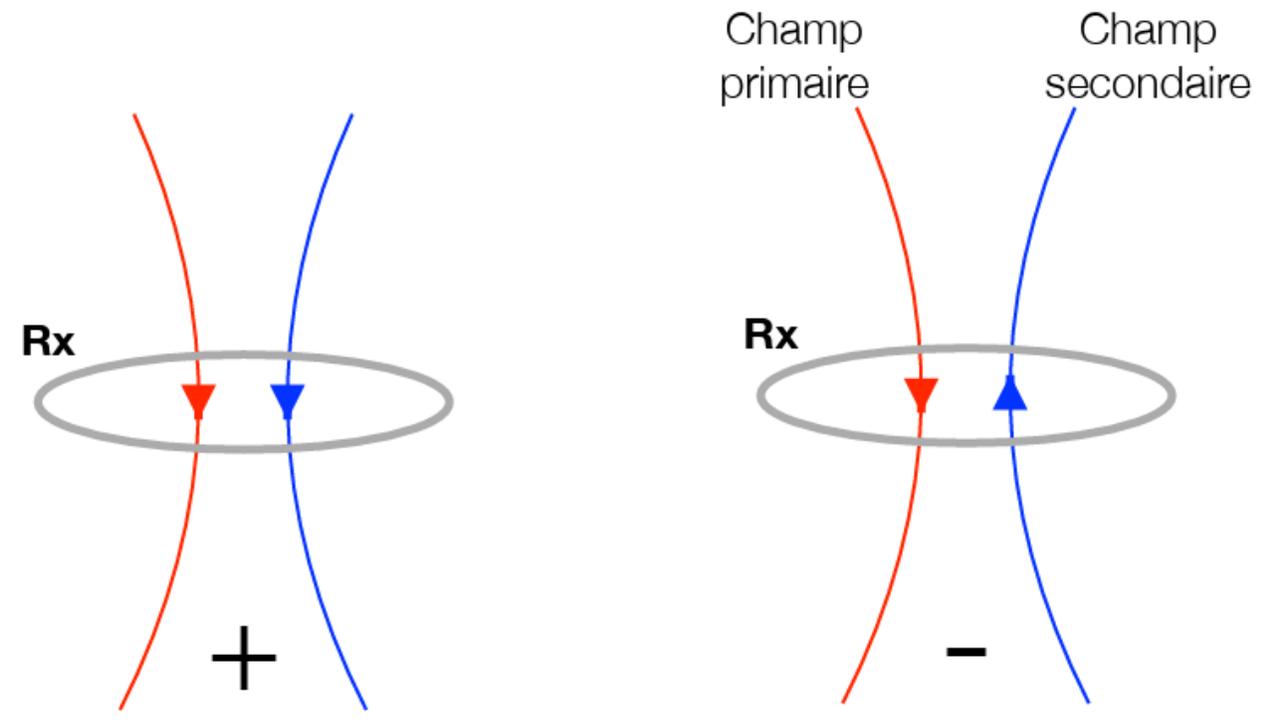
Pour chacune des configurations suivantes, tracez la forme de l'anomalie de façon qualitative en justifiant votre réponse graphiquement grâce au flux magnétique, tel que vu en classe.

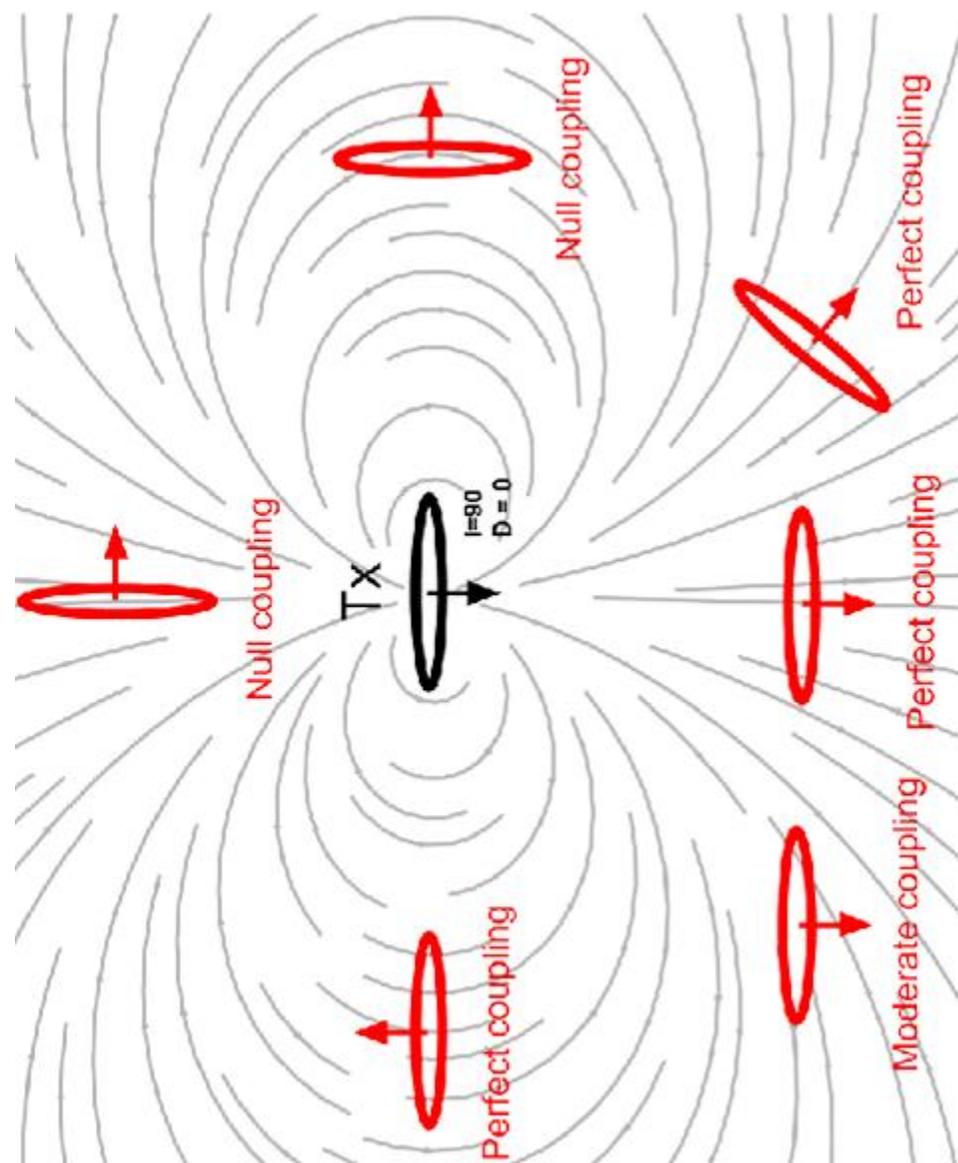
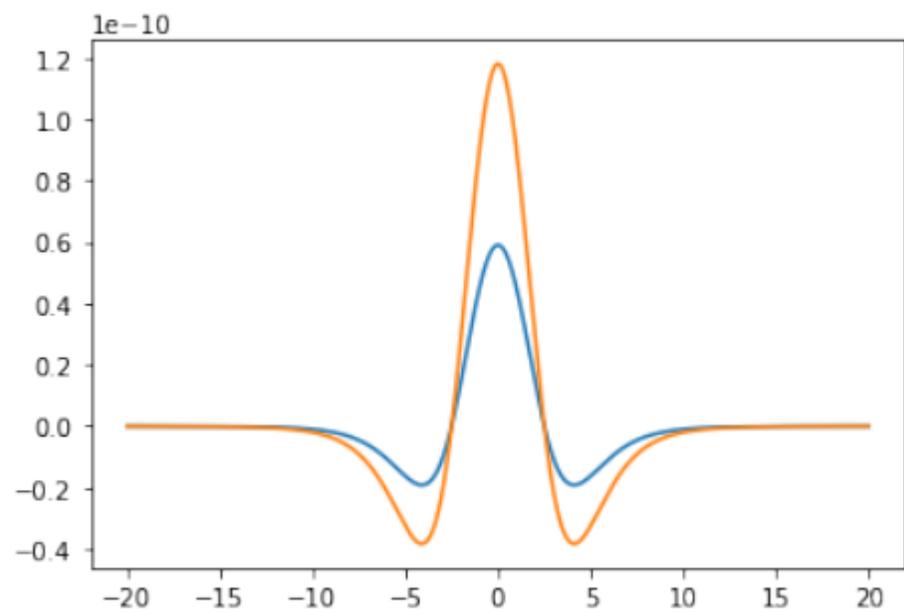
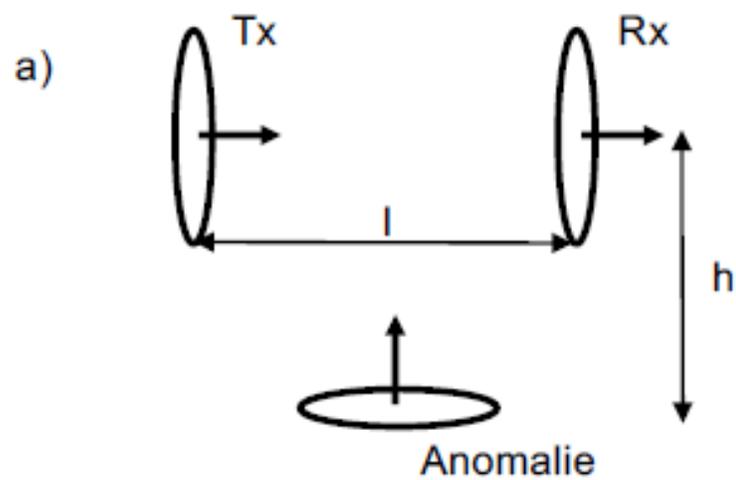


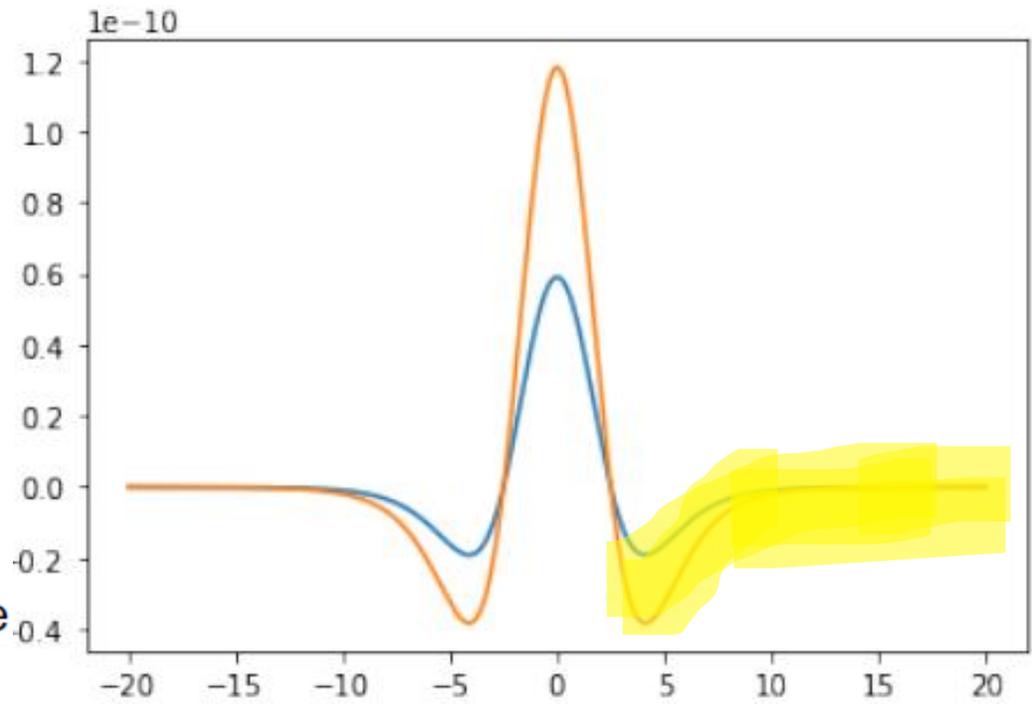
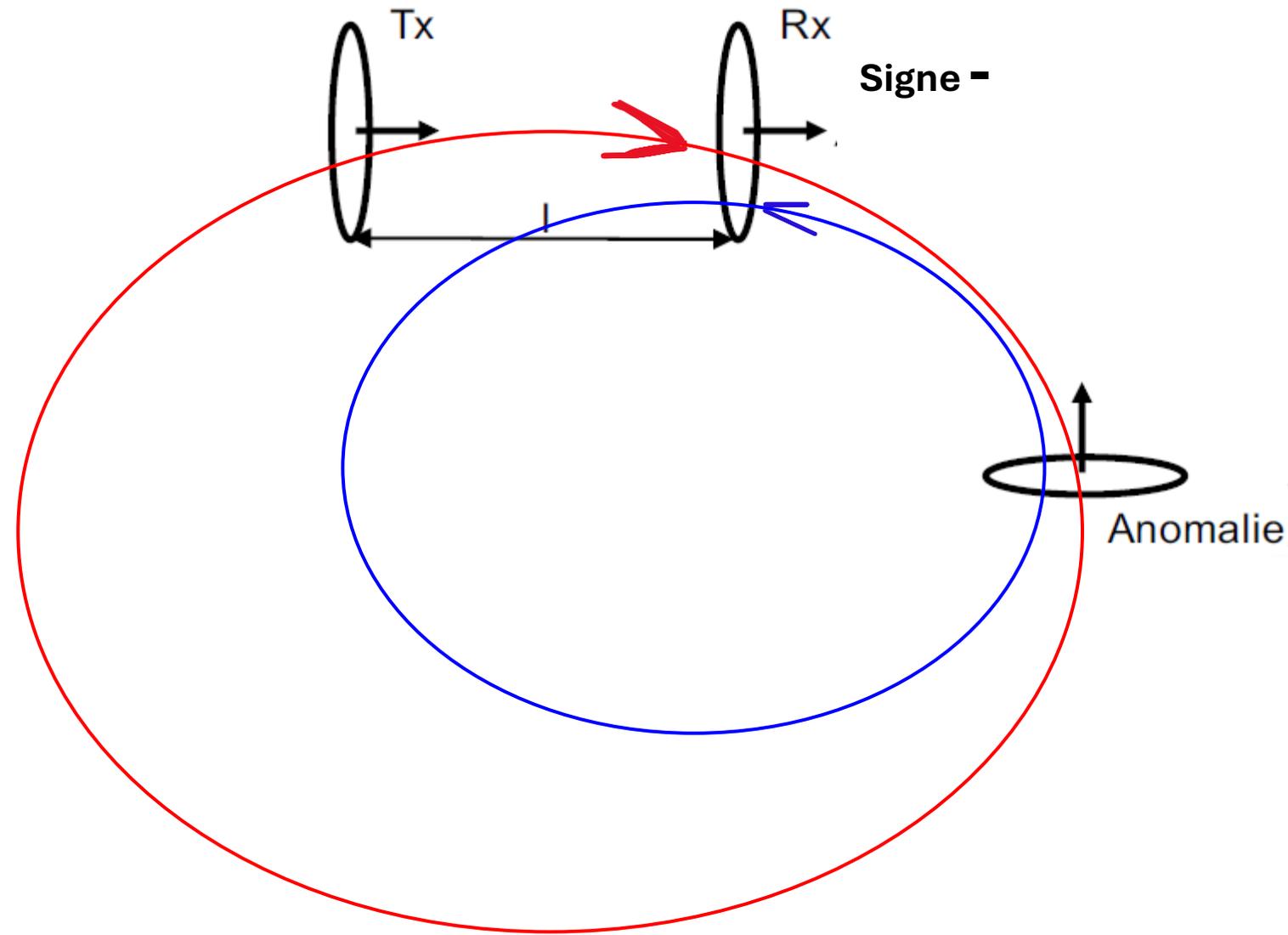
- Rappel :**
- Se reporter à l'illustration des lignes de champ magnétique émises par une boucle pour comprendre comment ces lignes de champ magnétique interagissent avec les deux autres boucles et ainsi estimer le flux magnétique qu'elles capturent.
 - La loi de Lenz stipule que la f.e.m induite par un champ magnétique dans une boucle produira un courant dont le champ créé s'opposera au champ primaire.

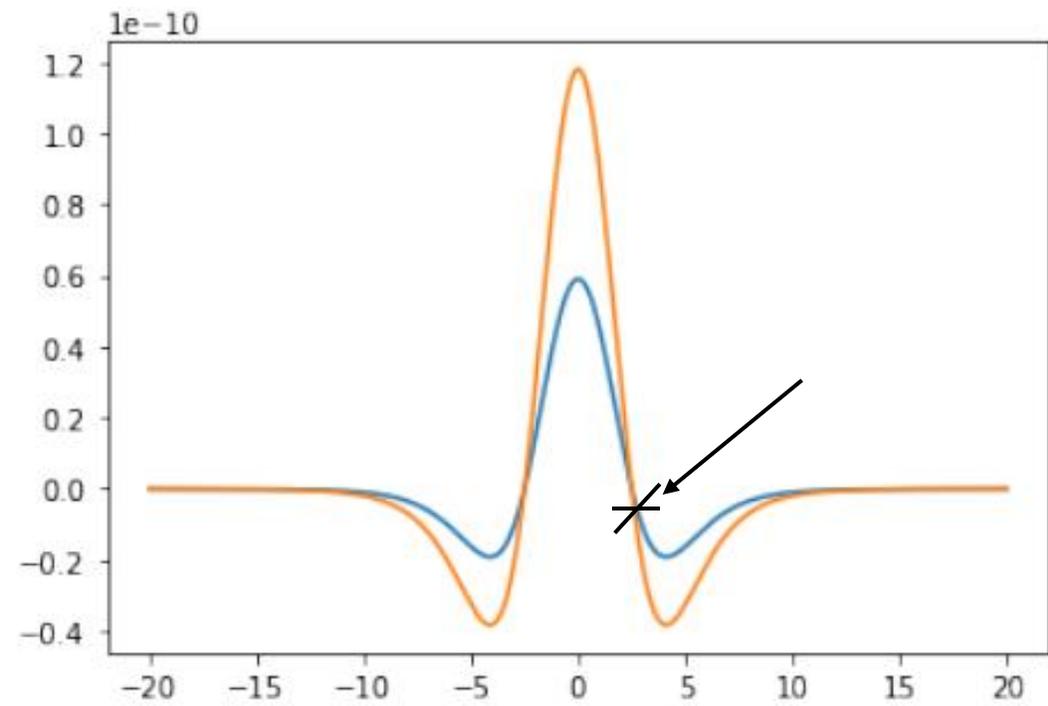
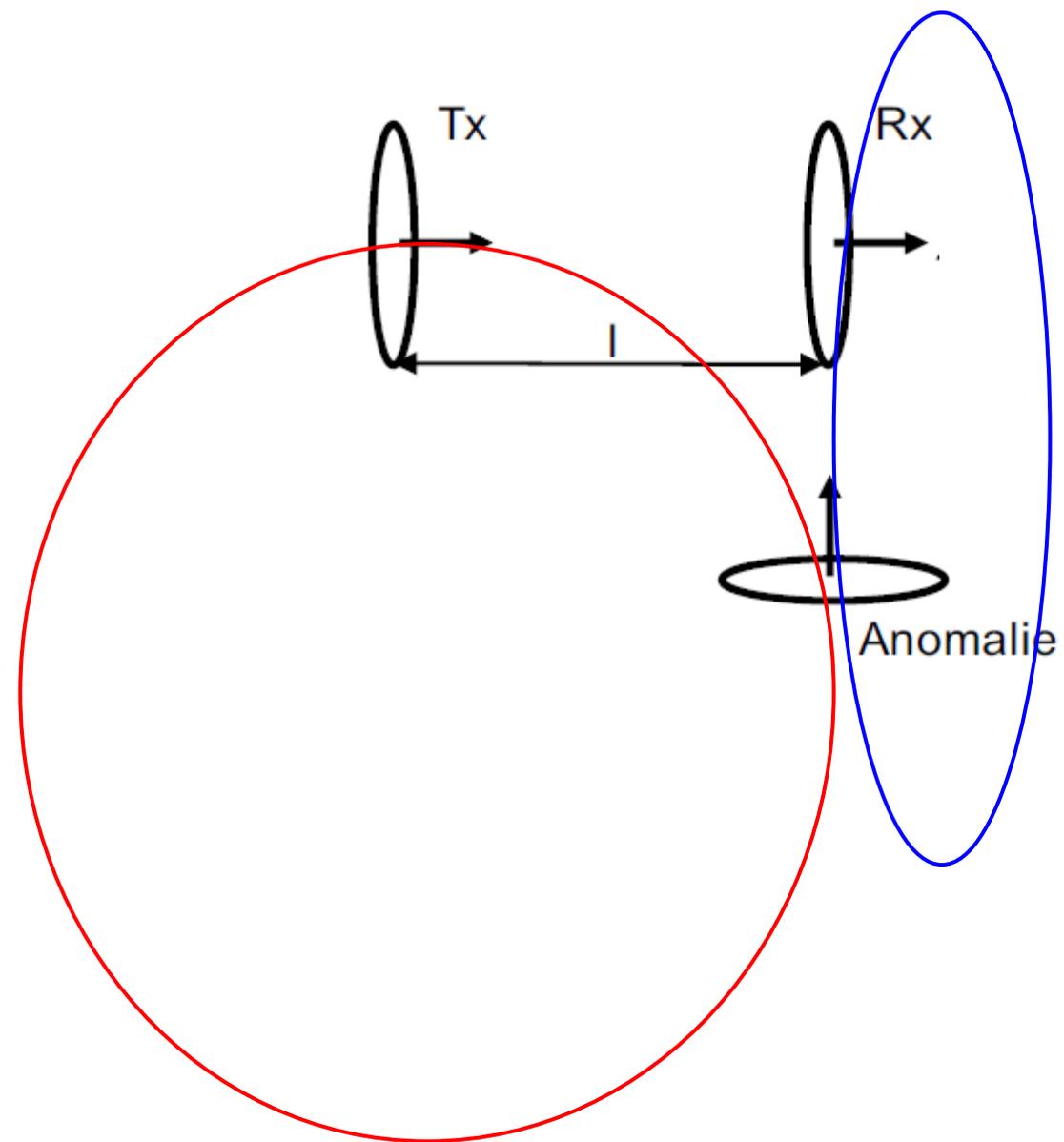


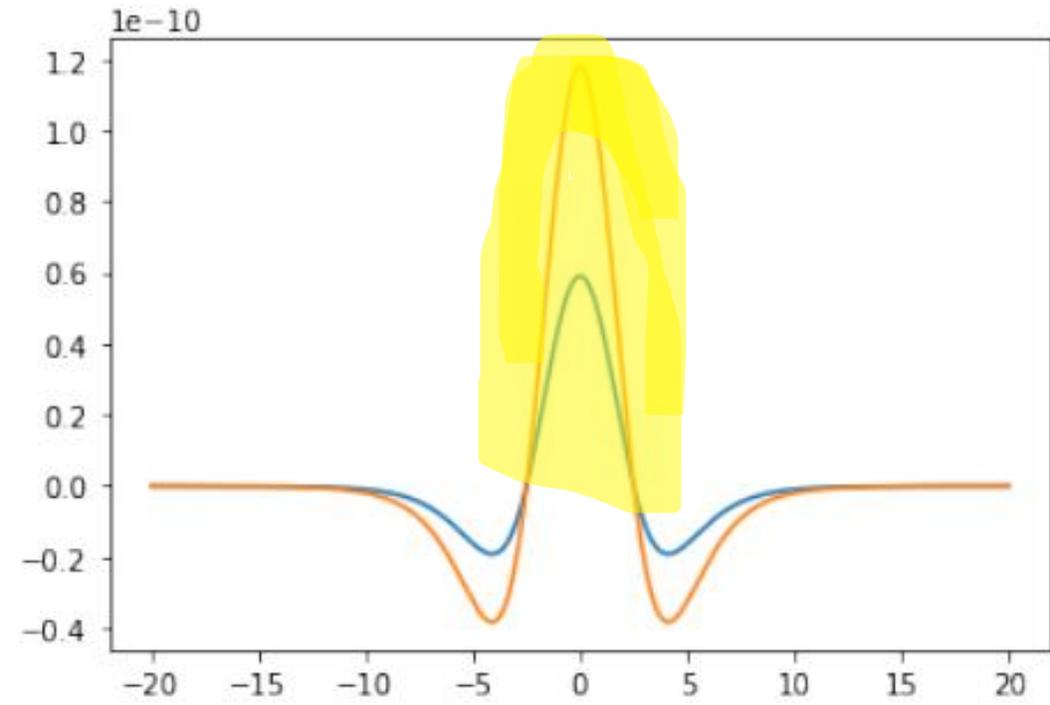
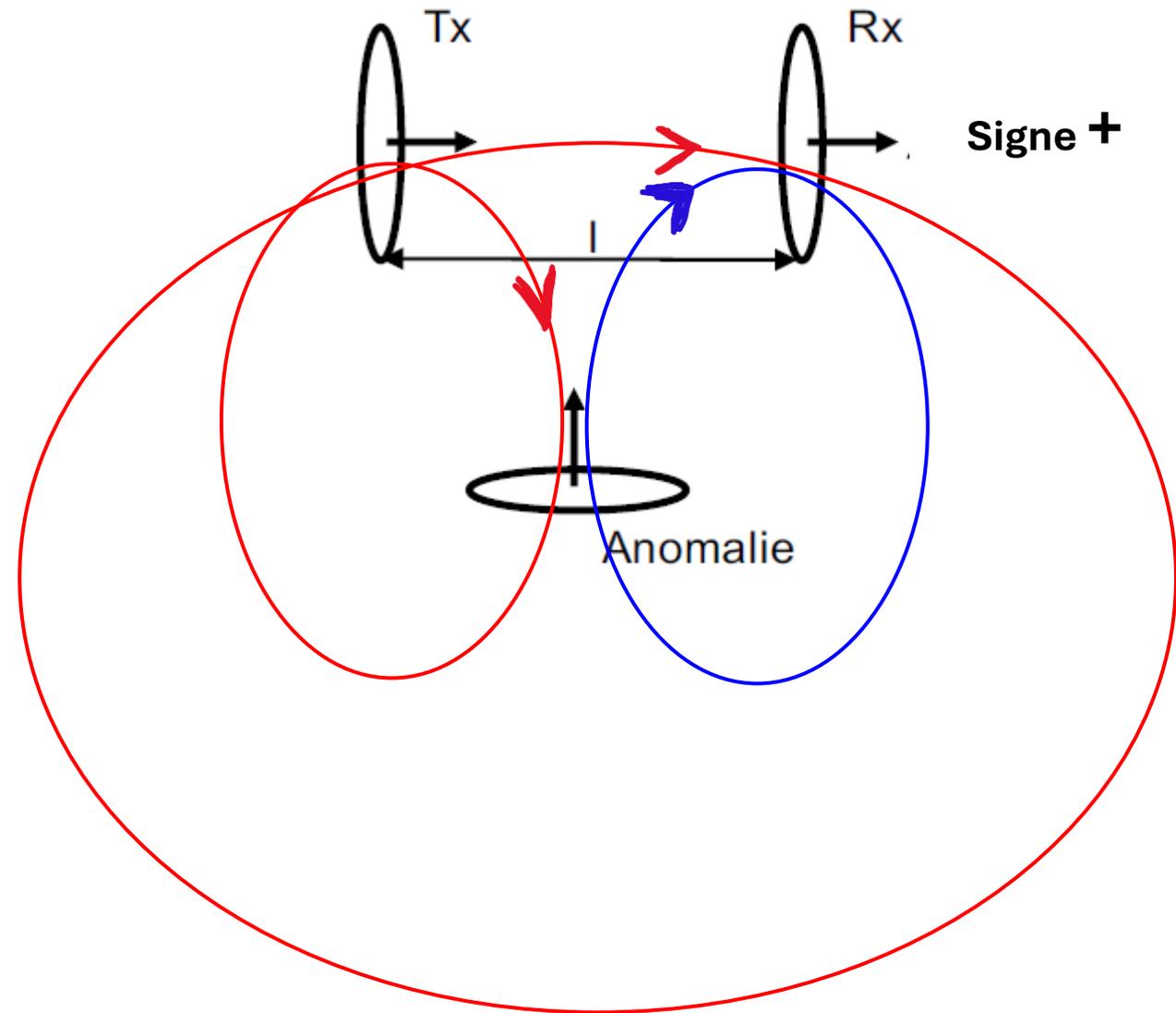
Convention des signes:

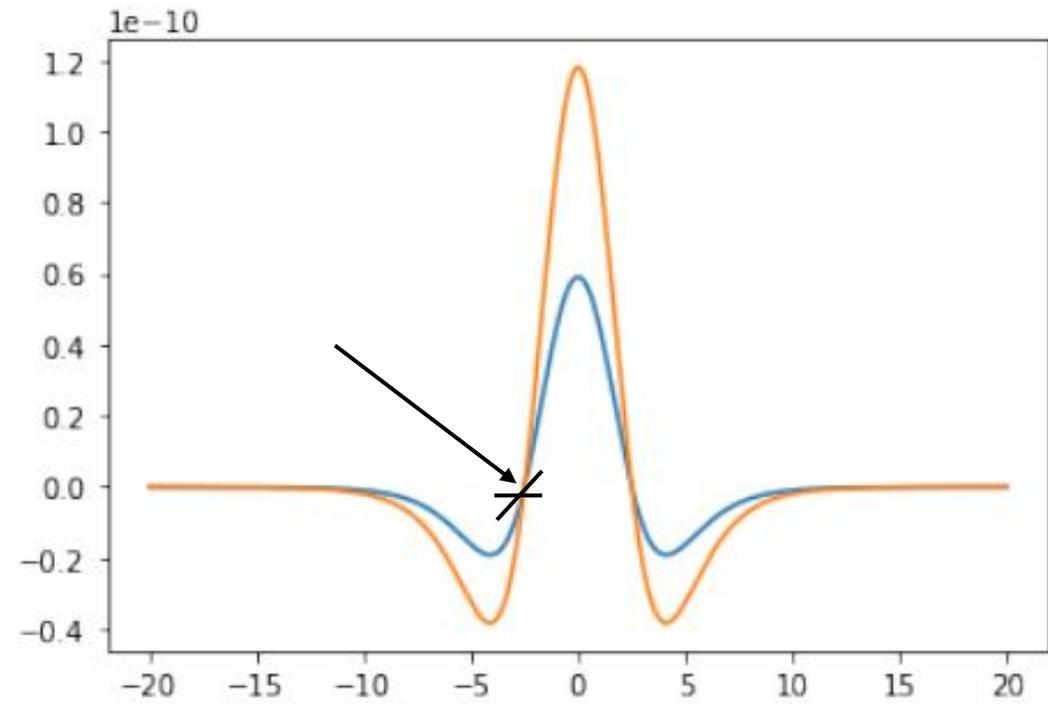
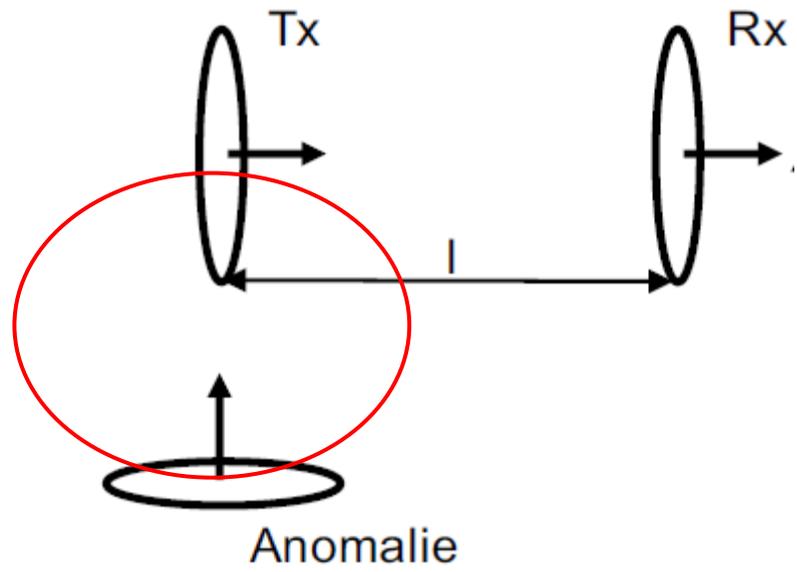


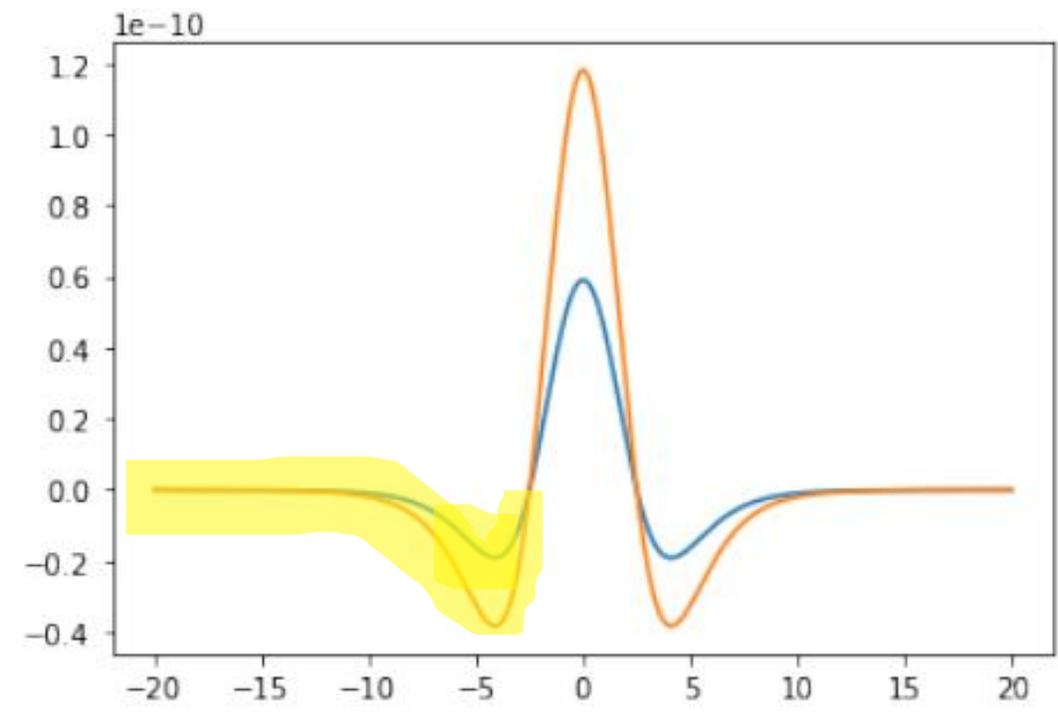
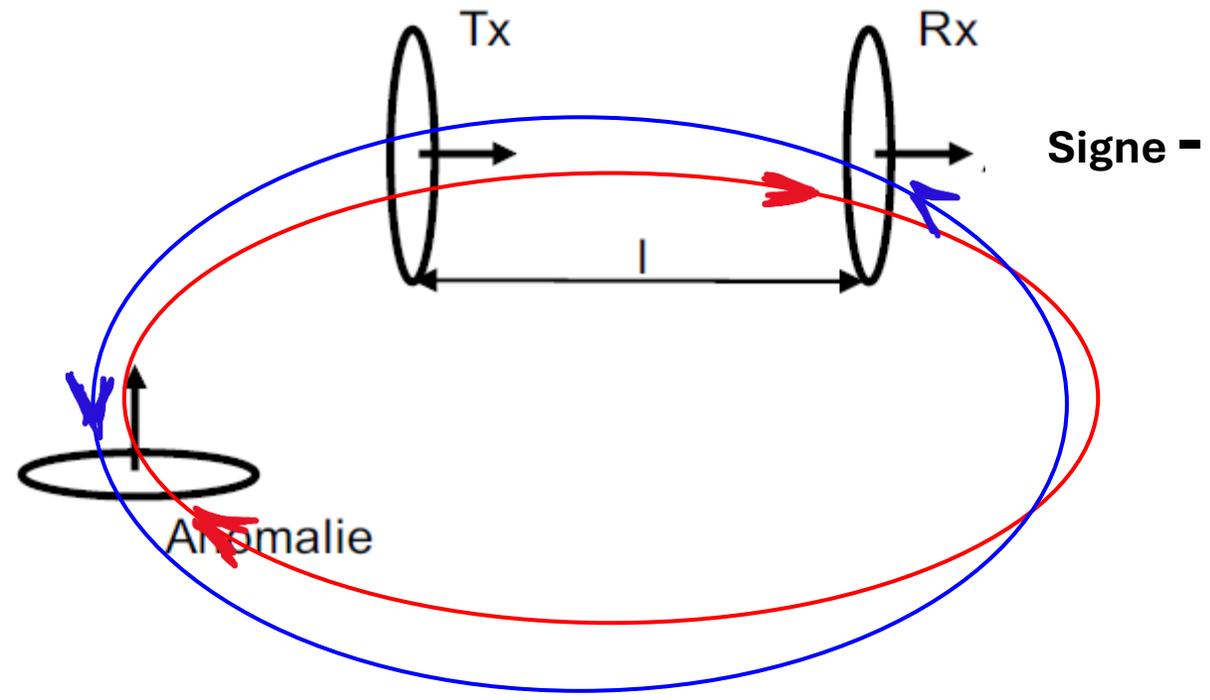


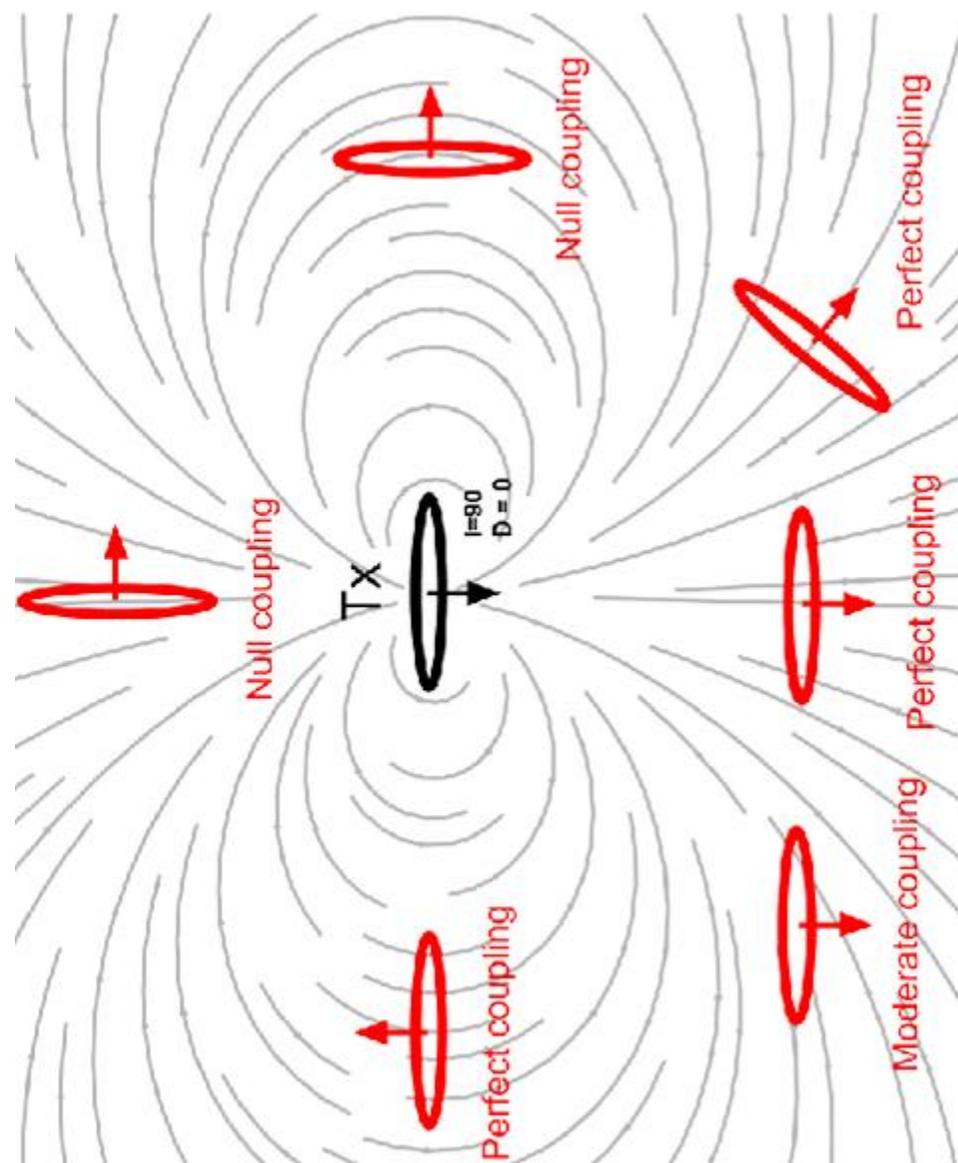
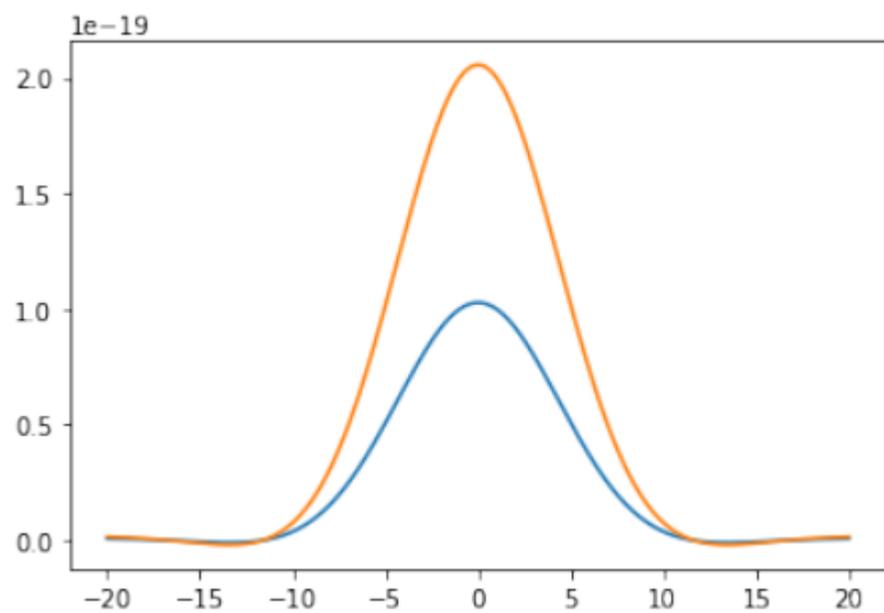
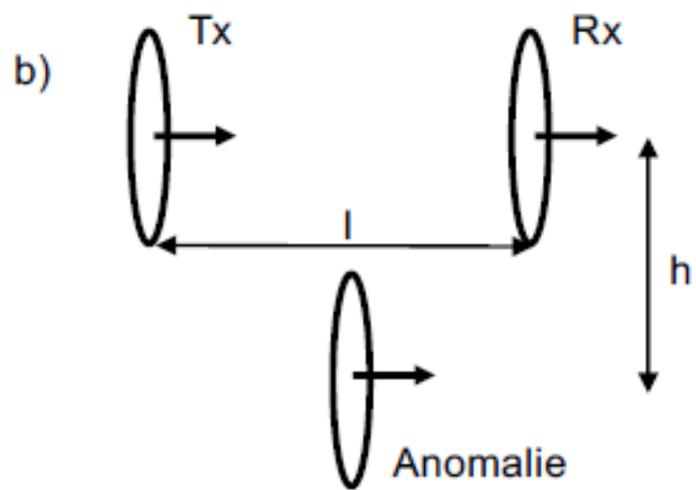


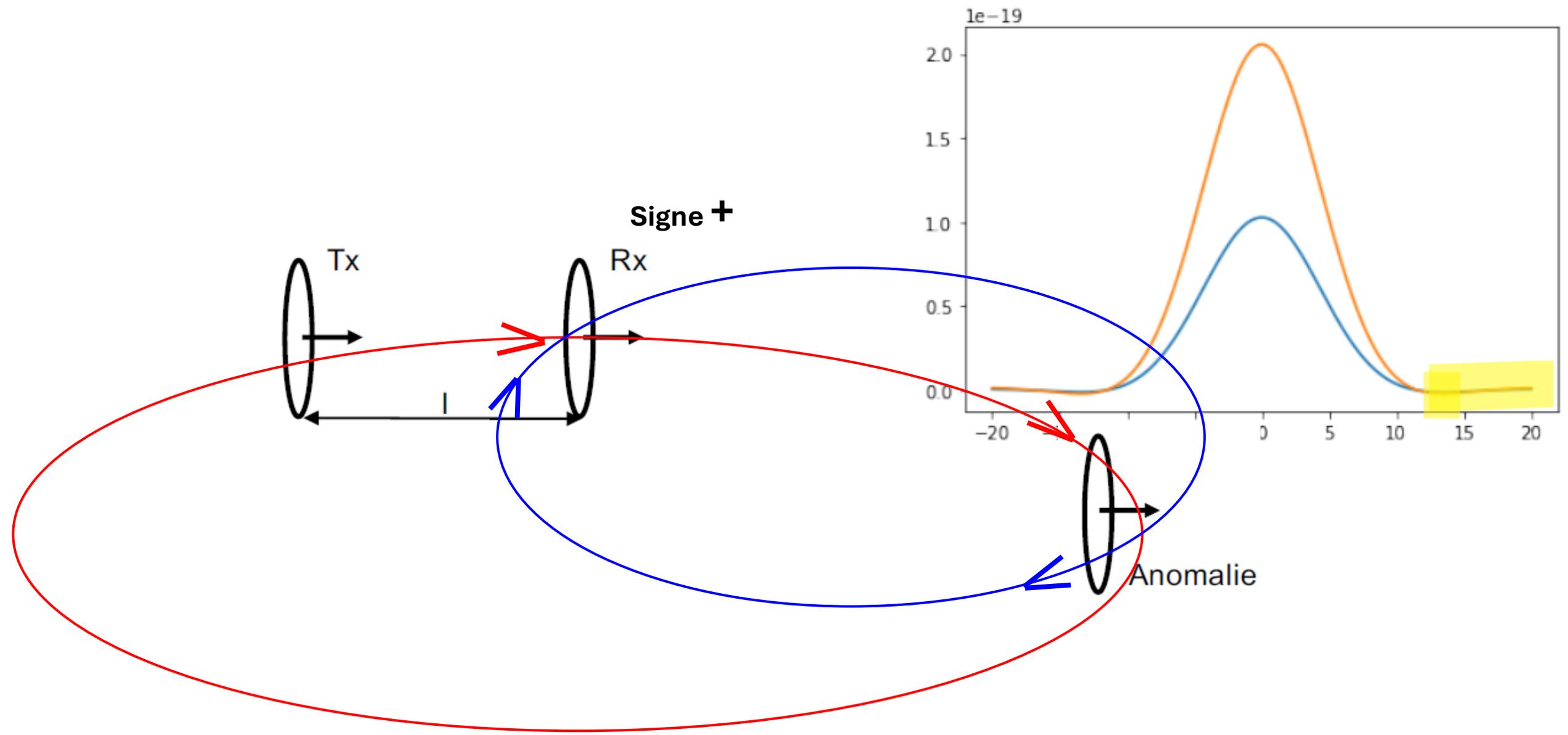


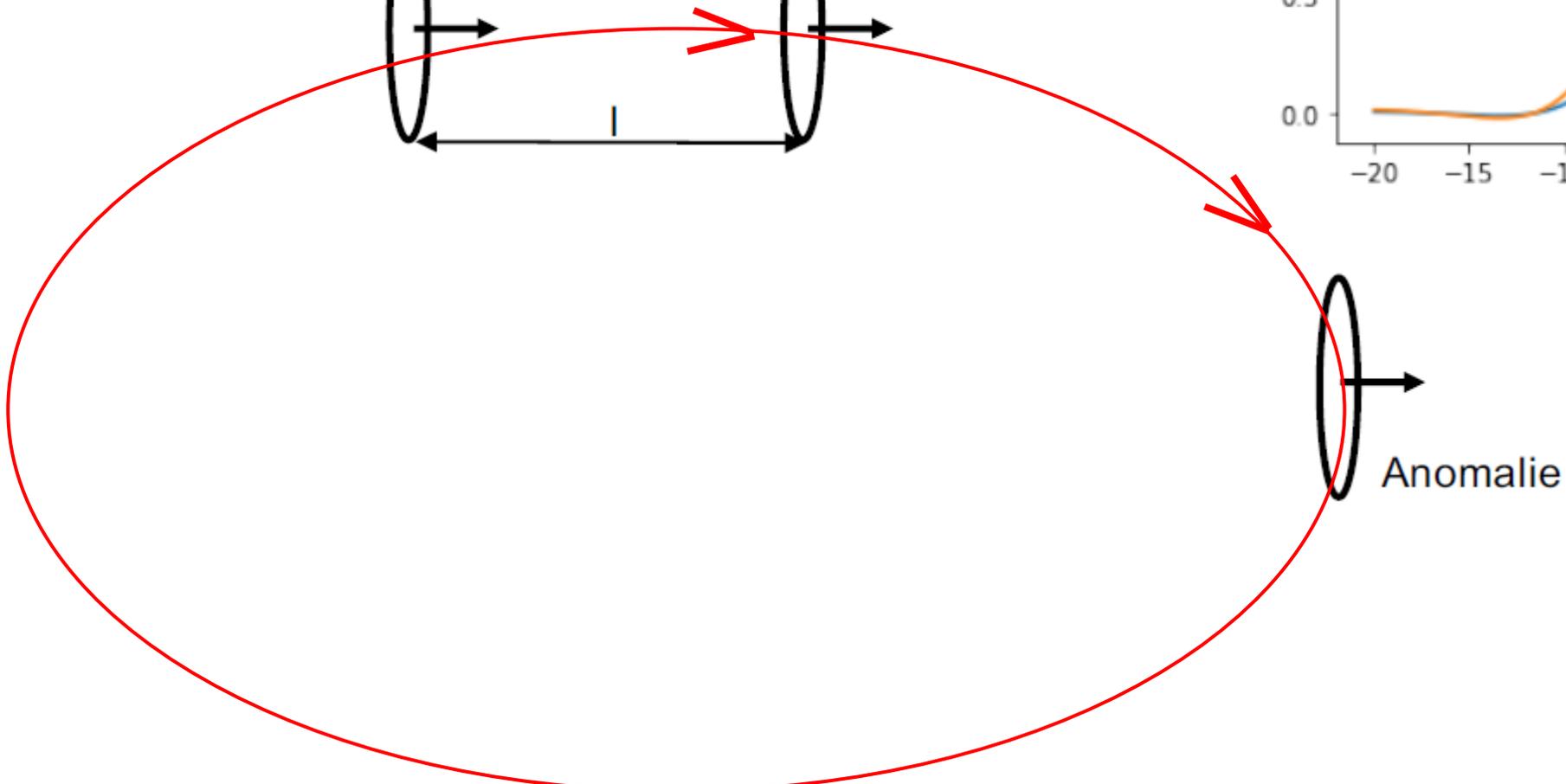
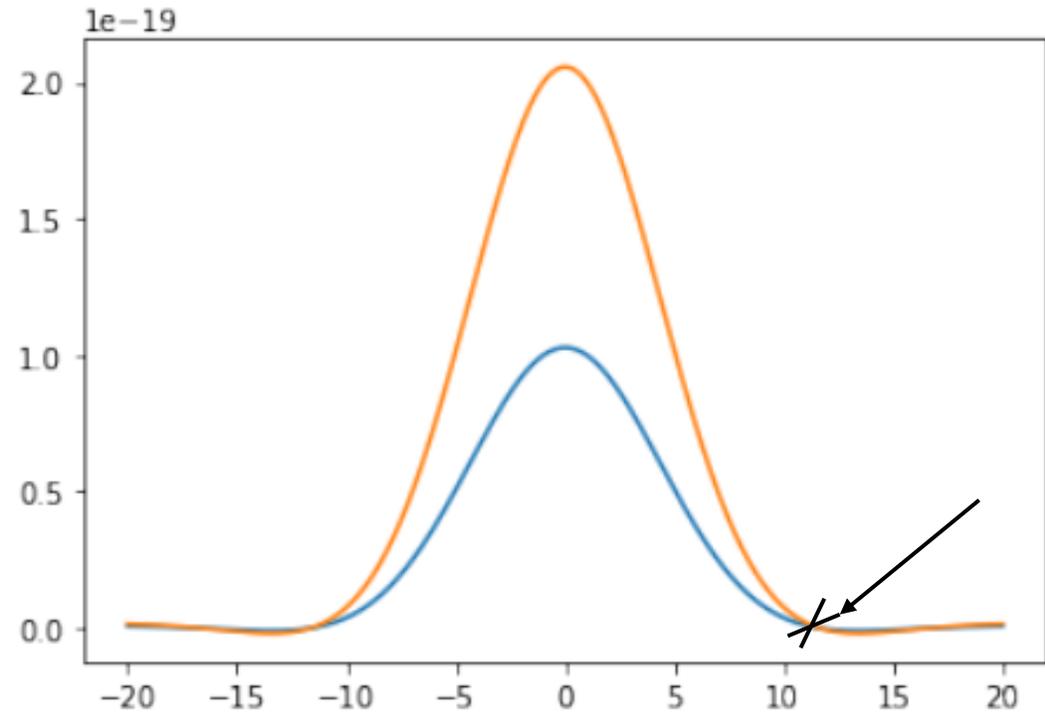
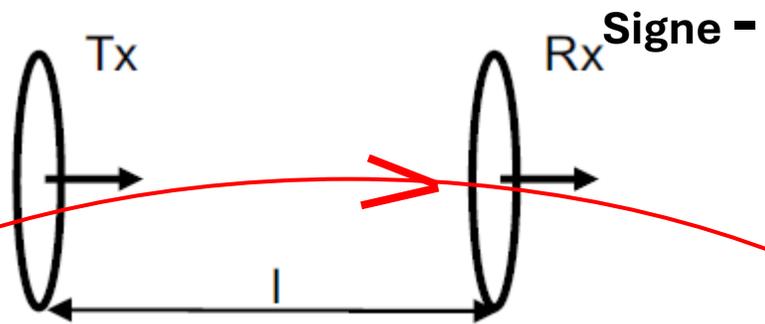


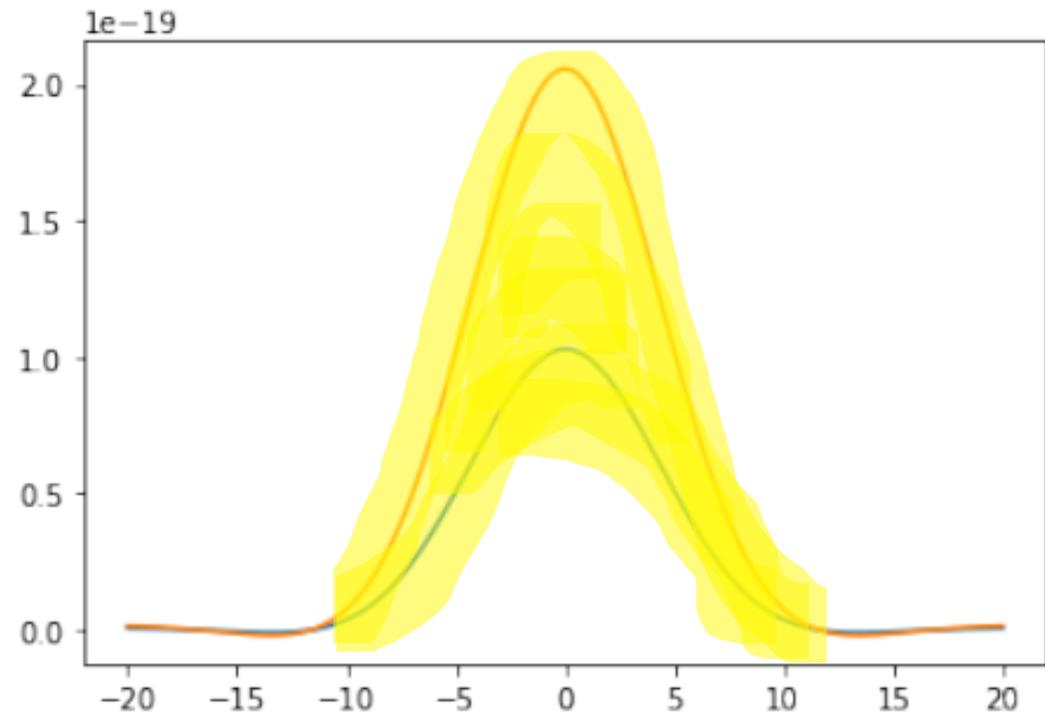
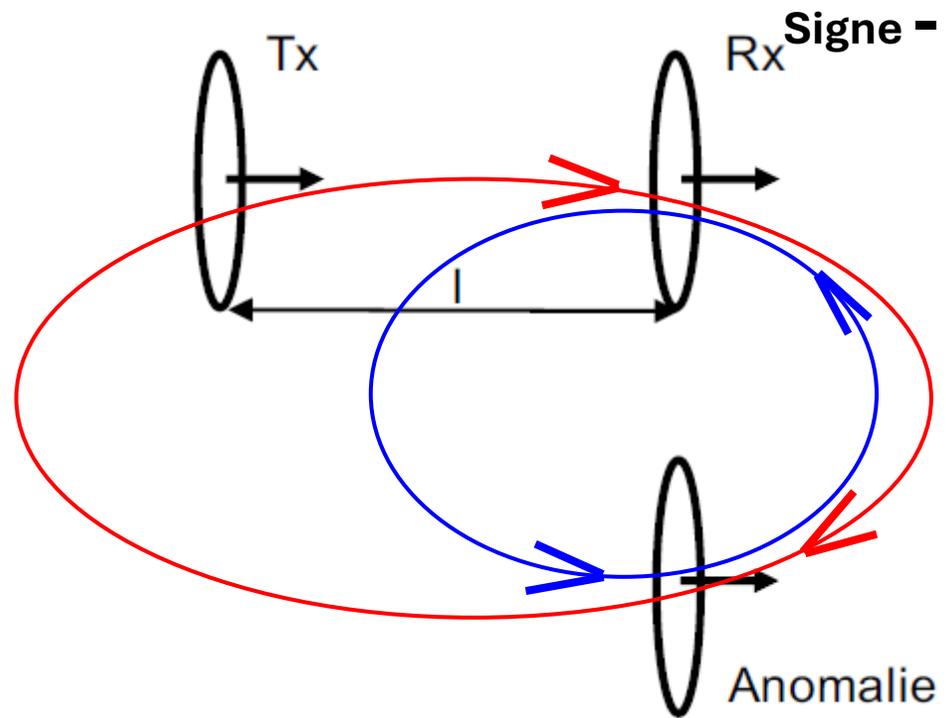


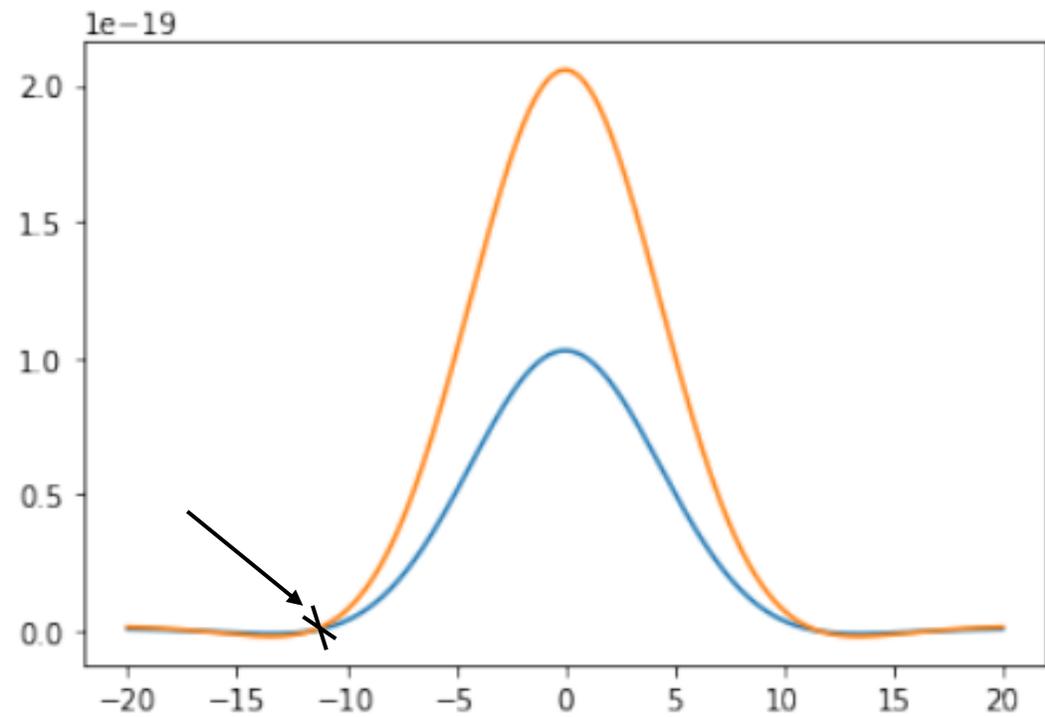
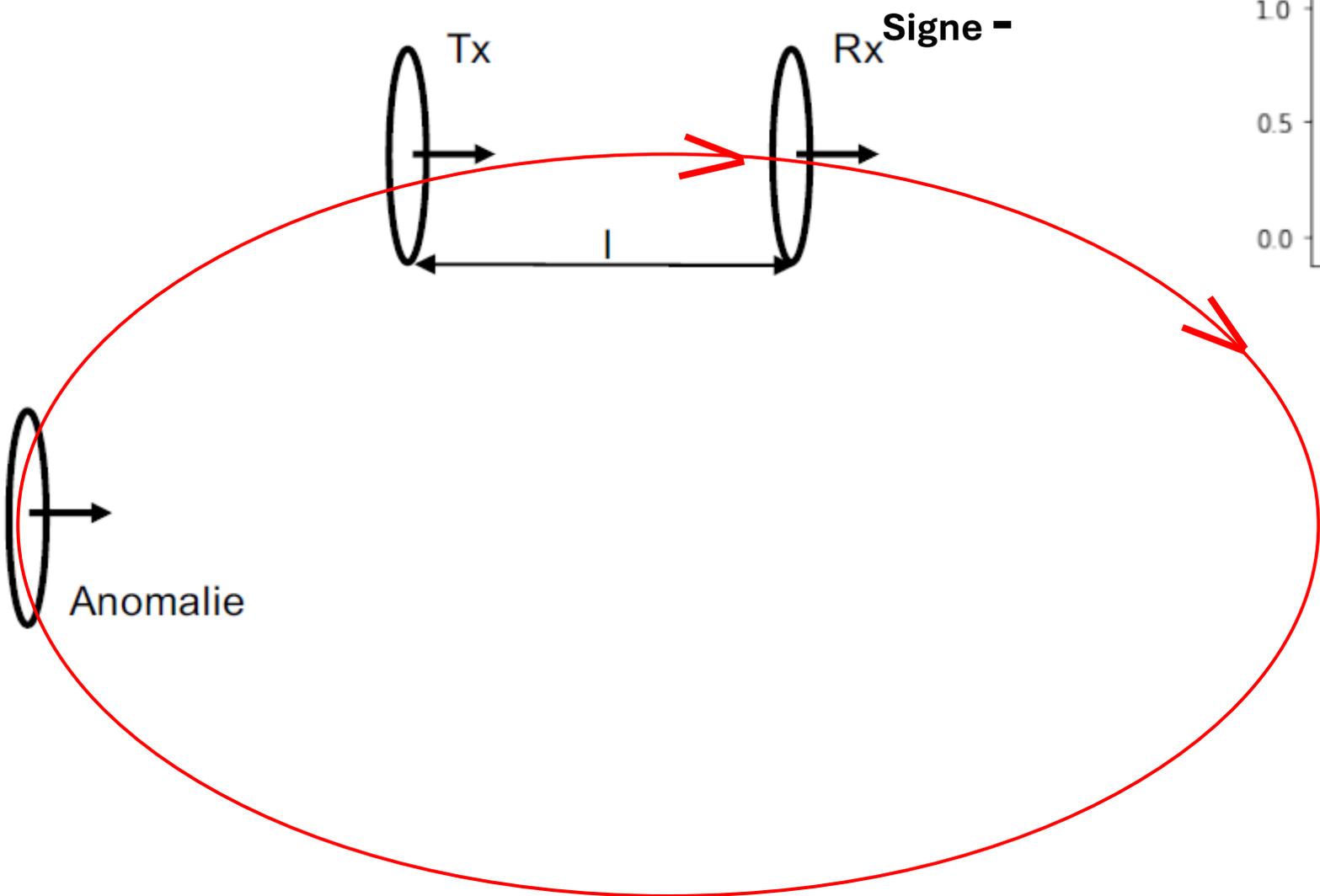




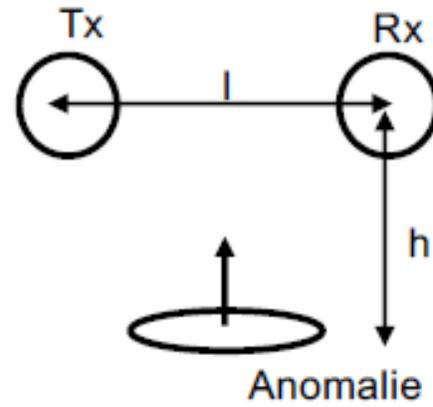








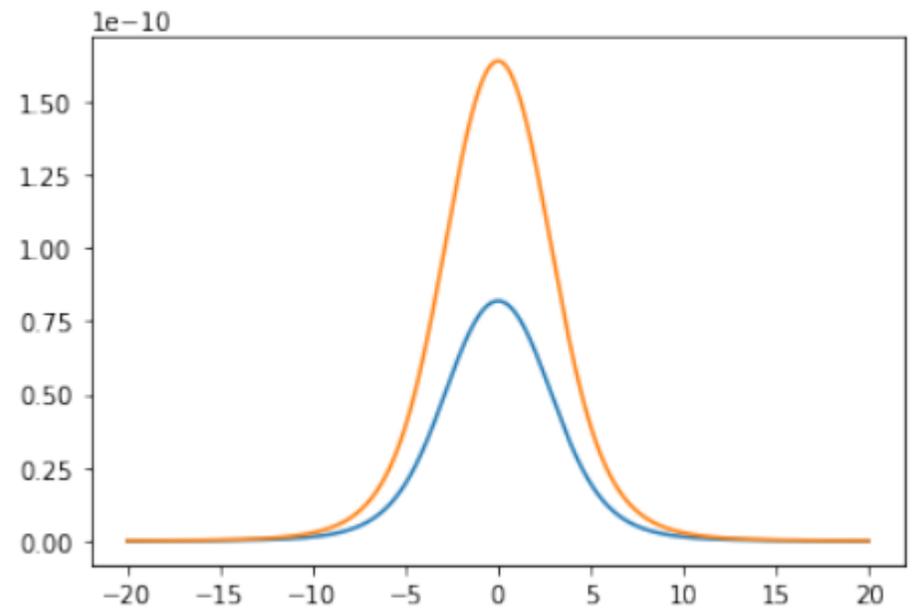
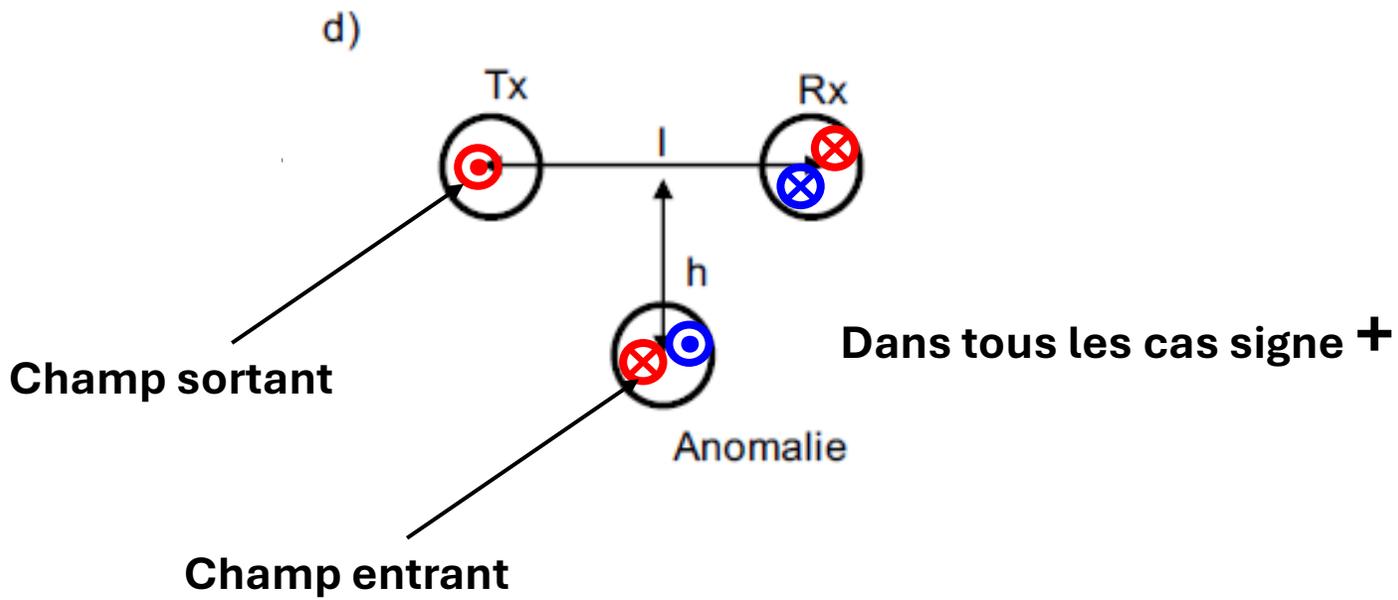
c)



Dans ce cas, le transmetteur est un dipôle en y , tandis que l'anomalie est une boucle dont la normal est en z . Quand $y=0$, la composante en z du dipôle est toujours nulle:

$$H_z = \frac{IS}{4\pi r^3} \frac{3zx}{r^2} = 0$$

Ainsi, l'anomalie est toujours nulle dans ce cas.



Question 2

Refaites la question 1 en vous basant sur la solution pour un système à 3 boucles, donnée par :

$$\frac{\mathcal{E}_s}{\mathcal{E}_p} = - \frac{M_{01}M_{12}}{M_{02}L} \frac{i\alpha}{1 + i\alpha}$$

Vous devez calculer les inductances mutuelles entre les 3 boucles en fonction de l'espacement entre les dipôles l , la profondeur de l'anomalie h et la distance le long du levé du dispositif d'acquisition par rapport à l'anomalie d (anomalie à $d=0$).

Voir la deuxième partie du solutionnaire des méthodes Ems.

Question 4

- a) Expliquez ce qu'est la profondeur de peau et comment elle affecte la profondeur d'investigation des méthodes FEM.
- b) Calculez la profondeur de peau pour un shale de résistivité de 100 ohm.m et une fréquence d'émission de 3.6 kHz.
- c) Pour le dispositif HCP, déterminez la profondeur d'investigation grâce à la formule de la courbe cumulative en définissant $R=0.1$. Quels sont les facteurs affectant la profondeur d'investigation ?
- d) Selon la réponse obtenue en c), est-ce que la profondeur de peau affecte la profondeur d'investigation des levés FEM ? Est-ce que cette interprétation est toujours valide et sinon, quelles sont ses limites ?

L'onde EM est atténuée:

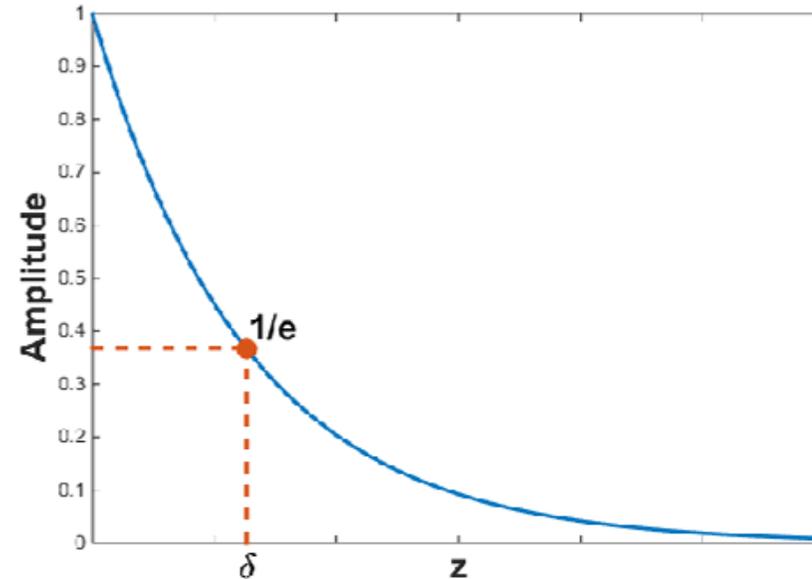
$$H_x = H_0 e^{-z/\delta} e^{i(\omega t - z/\delta)}$$

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.



- **La profondeur de peau δ est la distance à laquelle l'amplitude d'un champ électromagnétique diminue à 37 % de sa valeur de surface dans un milieu conducteur.**
- **Plus ρ est élevé ou f faible, plus δ est grande.**
- **Elle limite la profondeur à laquelle les méthodes FEM peuvent efficacement sonder.**

- b) Calculez la profondeur de peau pour un shale de résistivité de 100 ohm.m et une fréquence d'émission de 3.6 kHz.

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

Pour un shale de $\sigma = 100 \Omega \cdot \text{m}$ et $f = 3.6 \text{ kHz}$:
→ $\delta = 84 \text{ m}$.

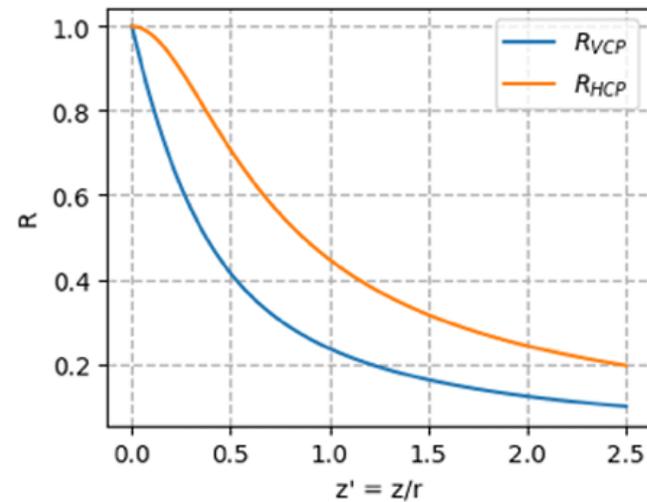
c) Pour le dispositif **HCP** déterminez la profondeur d'investigation grâce à la formule de la courbe cumulative en définissant **R=0.1**. Quels sont les facteurs affectant la profondeur d'investigation ?

$$R(z') = \int_{z'}^{\infty} \phi(z') dz'$$

Ce qui donne:

$$R_{HCP} = \frac{1}{\sqrt{4z'^2 + 1}}$$

$$R_{VCP} = \sqrt{4z'^2 + 1} - 2z'$$



Pour $R(z') = 0.1 \rightarrow z' = 4.97$

Z = 5 fois l'espacement entre les bobines.

d) Selon la réponse obtenue en c), est-ce que la profondeur de peau affecte la profondeur d'investigation des levés FEM ? Est-ce que cette interprétation est toujours valide et sinon, quelles sont ses limites ?

Pour un shale de $\sigma = 100 \Omega \cdot m$ et $f = 3.6 \text{ kHz}$:

→ $\delta = 84 \text{ m}$.

Pour $R(z') = 0.1 \rightarrow z' = 4.97$

→ $z = 5$ fois l'espace entre les bobines.

- En régime de faible induction, typique des conductivimètres de terrain, la profondeur d'exploration est donc principalement contrôlée par la géométrie du champ primaire (espacement et configuration des boucles) plutôt que par l'atténuation par effet de peau.
- Valable seulement à faible nombre d'induction, donc en présence de sol résistive.
- Si le sol devient conducteur, l'effet de peau redevient prépondérant et limite la profondeur effective d'investigation

Question 5

On désire cartographier l'étendue d'un ancien dépôt à neige afin de déterminer une possible contamination aux chlorures dans des puits d'approvisionnement municipaux à proximité. Des prélèvements d'eau directement sous l'ancien dépôt à neige indiquent une ~~conductivité~~ électrique de l'eau de 1 ohm.m, tandis que l'eau naturelle est habituellement autour de 100 ohm.m.

résistivité

- a) Grâce à la loi d'Archie, obtenez les conductivités totales des dépôts affectés et non affectés par la contamination au chlorure :

$$\rho_{eff} = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_{eau}$$

Prenez $a \sim 1$, $m \sim 2$ et $n \sim 2$, S est la saturation entre 0 et 1. Les dépôts consistent en un sable de porosité de 0.3. La nappe est à 3 m de profondeur, et la saturation résiduelle dans la couche non saturée est approximativement de 20%. Calculez les conductivités totales pour la couche non saturée et saturée.

- b) Vous effectuez un levé FEM avec la configuration HCP afin cartographier les variations de résistivités. Calculez les résistivités apparentes au-dessus de la zone contaminée et de la zone non contaminée. Le dispositif HCP est opéré à 1.2 m de la surface, possède une séparation des boucles de 3.66 m et une fréquence de 9.8 kHz.
- c) Quels sont les critères pour que la résistivité apparente mesurée soit valide ? Est-ce que ces critères sont respectés pour les deux modèles en b) ?

- a) Grâce à la loi d'Archie, obtenez les conductivités totales des dépôts affectés et non affectés par la contamination au chlorure :

$$\rho_{eff} = a\phi^{-m}S^{-n}\rho_{eau}$$

Prenez $a \sim 1$, $m \sim 2$ et $n \sim 2$, S est la saturation entre 0 et 1. Les dépôts consistent en un sable de porosité de 0.3. La nappe est à 3 m de profondeur, et la saturation résiduelle dans la couche non saturée est approximativement de 20%. Calculez les conductivités totales pour la couche non saturée et saturée.

ρ_{eff}	a	m / n	ϕ	S	ρ_{eau} (ohm.m)	ρ_{eff} (ohm.m)	σ_{eff} (mS/m)
$\rho_{saturé-affecté}$	1	2	0.3	1	1	11.1	90.00
$\rho_{non.saturé-affecté}$	1	2	0.3	0.2	1	277.8	3.60
$\rho_{saturé-non.affecté}$	1	2	0.3	1	100	1111.1	0.90
$\rho_{non.saturé-non.affecté}$	1	2	0.3	0.2	100	27777.8	0.04

b) Vous effectuez un levé FEM avec la configuration **HCP** afin cartographier les variations de résistivités. Calculez les résistivités apparentes au-dessus de la zone contaminée et de la zone non contaminée. Le dispositif HCP est opéré à 1.2 m de la surface, possède une séparation des boucles de 3.66 m et une fréquence de 9.8 kHz.

En présence de contamination:

$$\begin{aligned}\sigma_{app-aff} &= \left(R\left(\frac{0}{3.66}\right) - R\left(\frac{1.2}{3.66}\right) \right) \times \sigma_{air} + \left(R\left(\frac{1.2}{3.66}\right) - R\left(\frac{4.2}{3.66}\right) \right) \times \sigma_{n.s-aff} + \left(R\left(\frac{4.2}{3.66}\right) - R\left(\frac{\infty}{3.66}\right) \right) \times \sigma_{s-aff} \\ &= (1 - R(0.33)) \times 0 + (R(0.33) - R(1.15)) \times 3.6 + (R(1.15) - 0) \times 90 \\ &= (1 - 0.84) \times 0 + (0.84 - 0.40) \times 3.6 + (0.40 - 0) \times 90 \\ &= 37.58 \text{ mS/m}\end{aligned}$$

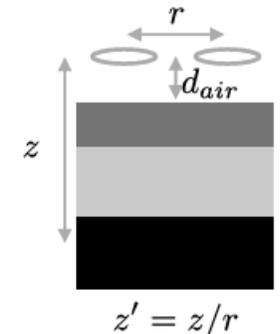
En absence de contamination:

$$\begin{aligned}\sigma_{app-n.aff} &= \left(R\left(\frac{0}{3.66}\right) - R\left(\frac{1.2}{3.66}\right) \right) \times \sigma_{air} + \left(R\left(\frac{1.2}{3.66}\right) - R\left(\frac{4.2}{3.66}\right) \right) \times \sigma_{n.s-n.aff} + \left(R\left(\frac{4.2}{3.66}\right) - R\left(\frac{\infty}{3.66}\right) \right) \times \sigma_{s-n.aff} \\ &= (1 - R(0.33)) \times 0 + (R(0.33) - R(1.15)) \times 0.04 + (R(1.15) - 0) \times 0.09 \\ &= (1 - 0.84) \times 0 + (0.84 - 0.40) \times 0.04 + (0.40 - 0) \times 0.09 \\ &= 0.375 \text{ mS/m}\end{aligned}$$

On peut utiliser la sensibilité pour calculer la résistivité apparente:

$$\rho_a = \int_0^{\infty} \phi(z') \sigma(z') dz'$$

Attention! L'intégration commence à la hauteur du dispositif!



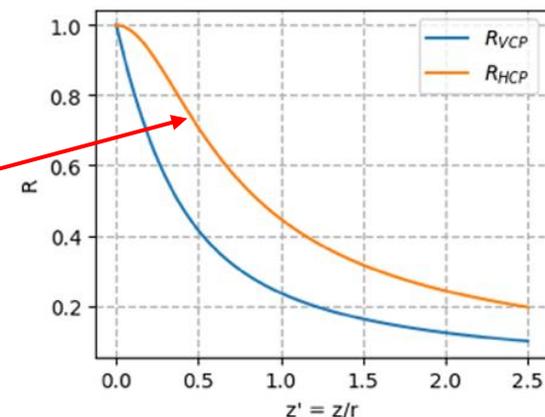
Pour faciliter les calculs, on utilise habituellement la courbe cumulative:

$$R(z') = \int_{z'}^{\infty} \phi(z') dz'$$

Ce qui donne:

$$R_{HCP} = \frac{1}{\sqrt{4z'^2 + 1}}$$

$$R_{VCP} = \sqrt{4z'^2 + 1} - 2z'$$



- c) Quels sont les critères pour que la résistivité apparente mesurée soit valide ? Est-ce que ces critères sont respectés pour les deux modèles en b) ?

Attention! Les appareils donnant des conductivités supposent la limite de faible nombre d'induction.

$$\alpha = r \sqrt{\frac{\sigma \mu_0 \omega}{2}} \ll 1 \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kg m A}^{-2} \text{ s}^{-2}.$$

$$\alpha = 3.66 \times \sqrt{\frac{37.58 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 2\pi \times 9.8 \times 10^3}{2 \times 1000}} = 0.14$$

Faible nombre d'induction, donc oui mesure valide.