

FORMATION EN ACCÈS LIBRE · ÉLECTRONIQUE · RASPBERRY PI

Une bobine, un condensateur, et la fréquence qui bouge.

Un détecteur de métaux ne détecte pas le métal. Il détecte une variation d'inductance — quelques dixièmes de pour cent, sur une bobine que vous bobinez vous-même. Tout le reste, c'est de la mesure : rendre visible un écart minuscule, et décider ce qu'il raconte. Cette formation le construit, le branche sur un Raspberry Pi sans griller de broche, et finit sur un champ de fouille que vous pouvez ratisser tout de suite.

CHAPITRE 01

Le métal ne fait rien. C'est votre bobine qui change.

Faites passer un courant alternatif dans une bobine : elle fabrique un champ magnétique qui grandit et s'effondre au rythme du courant. Approchez un objet conducteur. Ce champ variable induit dans le métal de petites boucles de courant fermées sur elles-mêmes — les **courants de Foucault**. Et ces boucles fabriquent à leur tour leur propre champ, orienté *contre* celui qui les a créées : c'est la loi de Lenz, qui dit qu'un système induit s'oppose toujours à la cause qui l'a produit.

Résultat : la bobine ne voit plus tout à fait le même monde. Son inductance change. Et comme l'inductance fixe la fréquence du circuit oscillant dans lequel elle est montée, **c'est la fréquence qui bouge**. Un détecteur de métaux est un instrument qui rend audible ou lisible ce déplacement de quelques hertz.

~0,3 %

la variation typique d'inductance produite par une pièce de monnaie à dix centimètres d'une bobine de vingt centimètres. Tout l'art est de mesurer cela proprement.

1/r⁶

la décroissance du signal avec la distance : le champ émis décroît en 1/r³, et le champ réémis par la cible décroît encore en 1/r³. Doubler la profondeur divise la réponse par soixante-quatre.

2 sens

une cible non ferreuse *abaisse* l'inductance, une cible ferreuse l'*augmente*. Le signe de l'écart de fréquence est déjà une première discrimination, gratuite.

Ce dernier point mérite qu'on s'y arrête, parce qu'il est contre-intuitif et qu'il fonde tout le reste. Un objet **non ferreux** — cuivre, argent, aluminium, or — n'est que conducteur : ses courants de Foucault s'opposent au champ, le repoussent, et l'inductance vue par la bobine **diminue**. Un objet **ferreux** est conducteur mais surtout *perméable* : il canalise les lignes de champ comme un noyau de transformateur, et cet effet-là l'emporte largement. L'inductance **augmente**.

$$f = 1 / (2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C})$$

La fréquence d'un circuit oscillant. L en henrys, C en farads, f en hertz. Si L baisse, f monte. Si L monte, f baisse. Un détecteur à battement ne fait rien d'autre que rendre ce déplacement audible.

CHAPITRE 02

Trois façons de fabriquer le même instrument

Toutes exploitent les courants de Foucault. Elles ne les interrogent pas de la même manière, et ce choix décide de ce que vous saurez faire : creuser plus profond, trier le fer du cuivre, ou travailler sur un sol qui ment.

FAMILLE	CE QU'ELLE MESURE	CE QU'ELLE DONNE	CE QU'ELLE COÛTE
BFO battement de fréquences	Deux oscillateurs, l'un avec la bobine de recherche. On mélange les deux et on écoute la différence.	Un sifflement qui monte ou descend. Discrimination pauvre, profondeur modeste.	Une douzaine de composants. C'est celui qu'on monte ici.

FAMILLE	CE QU'ELLE MESURE	CE QU'ELLE DONNE	CE QU'ELLE COÛTE
VLF induction équilibrée	Une bobine émet, une seconde reçoit, géométriquement placée pour ne <i>rien</i> recevoir. Une cible casse cet équilibre.	Amplitude et déphasage. Le déphasage donne une vraie discrimination : c'est le fameux « VDI ».	Un enroulement à régler au millimètre, une détection synchrone. Le vrai métier.
PI induction par impulsion	On envoie une impulsion de courant, on la coupe net, et on écoute la décroissance des courants dans la cible.	Insensible au sol minéralisé et à l'eau salée, profondeur excellente. Discrimination faible.	De la commutation rapide et un préampli qui encaisse la coupure. Plage de plage, plage de guerre.

Le BFO a mauvaise réputation, et c'est mérité sur le terrain. Mais c'est le seul des trois qui rend le phénomène *visible* avec un oscilloscope à dix euros, et le seul dont chaque étage se raconte en une phrase. On le construit pour comprendre. Le VLF arrive tout seul, ensuite, quand on a compris pourquoi le BFO plafonne.

CHAPITRE 03

La bobine, calculée avant d'être bobinée

Une bobine plate — une « galette », spires enroulées côte à côte dans un même plan — a une inductance que l'on prédit très correctement avec la formule de Wheeler. C'est une approximation empirique de 1928, et elle reste à quelques pour cent près sur toute la gamme qui nous intéresse.

$$L \text{ } [\mu\text{H}] = r^2 \cdot N^2 / (25,4 \cdot (8 \cdot r + 11 \cdot w))$$

r rayon moyen de la galette en millimètres · **N** nombre de spires · **w** épaisseur de l'enroulement en millimètres (le paquet de fil, mesuré du bord intérieur au bord extérieur). Formule de Wheeler, ramenée en unités métriques.

Calculez votre bobine, et le déplacement qu'elle donnera

Bougez les curseurs. Le tableau du bas donne la fréquence à vide, puis ce qu'elle devient au passage d'une pièce et d'un clou.

DIAMÈTRE DE LA GALETTE - 200 MM

NOMBRE DE SPIRES - 30

ÉPAISSEUR DE L'ENROULEMENT - 5 MM

CONDENSATEUR D'ACCORD - 470 NF

Inductance de la galette 414 μ H

Fréquence à vide 11,40 kHz

Longueur de fil à bobiner 18,8 m

Résistance de l'enroulement 1,61 Ω

Au passage d'une pièce — la fréquence monte +17,1 Hz

Au passage d'un clou — la fréquence descend -28,4 Hz

Régime conseillé bon, plage VLF usuelle

Longueur de fil et résistance calculées pour du fil de cuivre émaillé de 0,5 mm, résistivité $1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

La liste de courses

PIÈCE	VALEUR	À QUOI ÇA SERT
Fil de cuivre émaillé	0,4 à 0,6 mm, ~20 m	La bobine de recherche. L'émail, pas le vernis : il doit tenir le grattage.
Support rigide	disque bois ou PVC Ø 200 mm	Une bobine qui se déforme, c'est une fréquence qui dérive. La rigidité est un composant.

PIÈCE	VALEUR	À QUOI ÇA SERT
Condensateur film	470 nF, type polypropylène	L'accord. Un céramique dérive avec la température et vous passerez la journée à rattraper la fréquence.
CD4069 ou 74HC04	×1	Six inverseurs : deux pour l'oscillateur de recherche, deux pour l'oscillateur de référence, un pour la mise en forme.
Quartz ou second LC	proche de la fréquence de recherche	L'oscillateur de référence. C'est l'écart entre les deux qu'on entend.
74HC86 (XOR)	×1	Le mélangeur : la sortie porte la somme et la différence des deux fréquences. Un filtre passe-bas ne garde que la différence.
74HCT14	×1	Trigger de Schmitt alimenté en 3,3 V. C'est lui qui protège le Raspberry Pi. Voir le chapitre suivant.
74HC4040	×1	Diviseur par 4096. Il transforme un problème de comptage rapide en problème de chronométrage lent.

ⓘ Bobiner droit

Enroulez les spires serrées, dans le même sens, sans croisement, et immobilisez le paquet avec du ruban avant de le sortir du gabarit. Puis **blindez** : une feuille d'aluminium enroulée par-dessus, *fendue sur un rayon* pour ne pas former de spire en court-circuit, reliée à la masse en un seul point. Sans ce blindage, votre détecteur réagit à votre main et à l'herbe humide avant de réagir au métal.

CHAPITRE 04

Le brancher sur un Raspberry Pi sans rien griller

Deux problèmes, dans cet ordre. Le premier tue la carte en une seconde. Le second vous fait perdre une soirée.

⚠ Les broches GPIO sont en 3,3 V, et elles ne pardonnent pas

Aucune broche du connecteur n'accepte 5 V. Il n'y a ni diode de protection, ni tolérance : une entrée à 5 V détruit la broche, souvent le port voisin, parfois le processeur. Or votre oscillateur en CMOS 4000 tourne volontiers en 9 ou 12 V.

La bonne réponse n'est pas un pont diviseur seul — il laisse passer les pointes et ne donne pas des fronts propres. Faites passer le signal dans un **74HCT14 alimenté en 3,3 V** : ses seuils acceptent une entrée logique lente et sale, il sort des fronts francs, et il ne peut structurellement pas sortir plus que sa propre alimentation. Ajoutez 1 kΩ en série sur l'entrée du Pi comme dernière ceinture.

Compter 11 000 hertz avec un langage qui en compte trois mille

Une boucle Python qui lit une broche, ou même une interruption par front, plafonne autour de quelques milliers d'événements par seconde avant de perdre des coups — et un compteur qui perd des coups ne se signale pas, il ment. Trois sorties, de la plus simple à la plus fine.

MÉTHODE	COMMENT	CE QU'ON OBTIENT
Diviser d'abord recommandé pour commencer	Un 74HC4040 divise par 4096. Vos 11 kHz deviennent 2,7 Hz. On ne compte plus, on <i>chronomètre</i> l'intervalle entre deux fronts.	Une résolution de l'ordre du hertz avec une seconde d'intégration, pour un composant à un euro. Largement de quoi entendre une pièce.
Écouter le battement	On ne mesure pas les 11 kHz : on mesure la <i>différence</i> entre les deux oscillateurs, qui vaut quelques dizaines de hertz par construction.	C'est l'astuce du BFO, et elle est gratuite : le mélangeur a déjà fait la division pour vous.

MÉTHODE	COMMENT	CE QU'ON OBTIENT
Déporter sur un Pico le plus précis	Le RP2040 possède des blocs PIO : de vraies petites machines d'état qui comptent des fronts sans déranger le processeur. Le Pico compte, et envoie la valeur au Pi par le port série USB.	Plusieurs centaines de kilohertz, une mesure par milliseconde, et le Pi ne fait plus que de l'affichage. C'est l'architecture des instruments sérieux.

⚠ Le piège du Pi 5

Sur Raspberry Pi 5, les broches ne sont plus pilotées par le SoC mais par la puce **RP1**. Conséquence : **RPi.GPIO** ne fonctionne plus, et **pigpio** non plus. Écrivez avec **lgpio** (ou **gpiozero** par-dessus) : le même code tourne alors sur Pi 4 et sur Pi 5. C'est la seule ligne de cette page qui vous fera vraiment gagner une soirée.

Le câblage

SIGNAL	BROCHE	NOTE
Sortie du 74HC4040 (÷4096)	GPIO 17 — broche 11	Via 1 kΩ en série. Front montant.
Masse commune	GND — broche 6	Une seule masse, en étoile, sinon vous mesurez vos propres boucles.
Alimentation logique 3,3 V	3V3 — broche 1	Pour le 74HCT14 seulement. Jamais pour l'analogique : trop bruyé.
Bouton de remise à zéro du sol	GPIO 27 — broche 13	Entrée avec tirage interne, contact vers la masse.

Le programme de mesure

Il fait trois choses : chronométrer les fronts, remonter à la fréquence, et afficher l'écart par rapport à une référence prise sur un sol nu. Cet écart est tout le signal

utile — la fréquence absolue, elle, dérive avec la température et ne vous apprend rien.

arborescence.studio

detecteur.py – Raspberry Pi 4 et 5. Sortie du 74HC4040 sur GPIO 17.

```
import lgpio, time, statistics
```

```
BROCHE = 17
```

```
DIVISION = 4096          # le rapport du 74HC4040
```

```
FENETRE = 0.5            # secondes d'integration
```

```
h = lgpio.gpiochip_open(0)
```

```
lgpio.gpio_claim_alert(h, BROCHE, lgpio.RISING_EDGE)
```

```
fronts = []
```

```
def sur_front(puce, broche, niveau, horodatage):
```

```
    fronts.append(horodatage)          # nanosecondes
```

```
rappel = lgpio.callback(h, BROCHE, lgpio.RISING_EDGE, sur_front)
```

```
def frequence():
```

```
    global fronts
```

```
    time.sleep(FENETRE)
```

```
    lot, fronts = fronts, []
```

```
    if len(lot) < 3:
```

```
        return None
```

```
    # La mediane des intervalles, pas la moyenne : un front parasite
```

```
    # fausserait la moyenne, il ne deplace pas la mediane.
```

```
    ecarts = [(b - a) / 1e9 for a, b in zip(lot, lot[1:])] 
```

```
    return DIVISION / statistics.median(ecarts)
```

```
# On prend le zero sur un sol nu, bobine posee, sans rien dessous.
```

```
print("Bobine en l'air, on prend le zero ... ")
```

```
reference = frequence()
```

```
while True:
```

```
    f = frequence()
```

```
    if f is None:
```

```
        continue
```

```
    ecart = f - reference
```

```
    if abs(ecart) < 1.5:
```

```
        etat = "--"
```

```
    elif ecart > 0:
```

```
        etat = "NON FERREUX"          # L a baisse, donc f est montee
```

```
    else:
```

```
etat = "FERREUX"          # L a augmente, donc f est descendue
print("%9.2f Hz   ecart %+7.2f   %s" % (f, ecart, etat))
```

Dix-sept lignes utiles, et vous avez un instrument qui affiche déjà la distinction fer / non-fer. C'est exactement le contenu du chapitre 01, devenu mesurable.

CHAPITRE 05

Lire le signal : profondeur, taille, nature

Un détecteur vous donne un nombre. Ce nombre mélange trois informations que rien ne sépare complètement : à quelle profondeur est l'objet, quelle est sa taille, et de quoi il est fait. Une grosse cible profonde et une petite cible proche donnent la même amplitude. C'est l'ambiguïté fondamentale du métier, et aucun appareil ne la lève tout à fait.

arborescence.studio

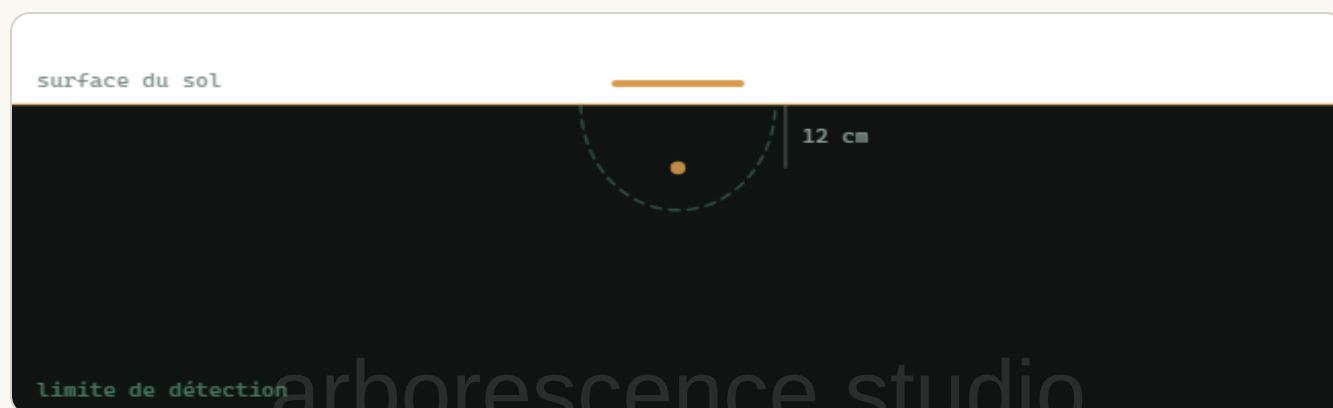
Ce que la profondeur fait à votre signal

Le champ décroît deux fois : à l'aller et au retour. Regardez ce que ça donne.

PROFONDEUR DE LA CIBLE – 12 CM

DIAMÈTRE DE LA CIBLE – 24 MM

DIAMÈTRE DE LA GALETTE – 200 MM



Réponse relative à cette profondeur

0,88 %

Par rapport à la même cible en surface

÷ 64

Portée utile pour cette cible

20 cm

Verdict

déTECTABLE

Modèle simplifié : réponse proportionnelle au volume de la cible et à $(R/(R+z))^6$, R étant le rayon de la galette et z la profondeur, avec un plancher de bruit à 0,14 %. C'est ce plancher qui cale le modèle sur la règle de terrain – une galette détecte une pièce jusqu'à environ son propre diamètre – sans prétendre remplacer une mesure.

La discrimination, et ce qu'elle vous coûte

Sur un VLF, le déphasage entre le signal émis et le signal reçu dépend du rapport entre conductivité et perméabilité de la cible. On le convertit en un indice, le **VDI**, qui range les cibles sur une échelle : le fer tout en bas, les alliages d'aluminium au milieu, l'argent et le cuivre tout en haut. Régler un seuil de rejet, c'est demander à l'appareil de se taire en dessous.

Et c'est là que se cache le vrai piège, le même que sur un modèle de détection de mines : **rejeter, c'est décider de ne pas voir**. Un anneau d'or fin tombe exactement dans la plage du fer léger. Un clou couché à plat, vu par la tranche, remonte dans la plage des pièces. Chaque cran de discrimination gagné sur la ferraille est un risque pris sur ce qu'on cherchait. La page [Déminer \(deminage.html\)](#) raconte ce même arbitrage quand l'erreur ne coûte plus du temps, mais une vie.

CHAPITRE 06

Le champ de fouille

Vingt cibles enfouies, une galette de vingt centimètres, et la même arithmétique que sur le terrain : beaucoup de ferraille, quelques trouvailles, et un objet qu'il ne faut surtout pas déterrer. Le curseur de discrimination fait taire les cibles basses — à vous de voir ce que vous acceptez de manquer.

0

trouvailles

0

ferraille déterrée

—

ferraille par trouvaille

20

cibles encore enfouies

Comment jouer

1. **Balayez.** Souris ou doigt sur le terrain ; au clavier, cliquez d'abord dedans puis utilisez les **flèches**.
2. **Écoutez la jauge.** Elle monte quand une cible passe sous le centre de la galette. Plus la cible est profonde, plus le pic est étroit et bas.
3. **Creusez** avec le bouton ou la touche **Entrée**. Vous ne déterrez que ce qui est sous la galette.
4. **Jouez avec la discrimination.** À zéro vous entendez tout, y compris les clous. Montez le seuil : le bruit disparaît, et une partie des trouvailles avec.
5. **Un objet ne doit pas être déterré.** Vous saurez lequel quand il sonnera. Le chapitre 08 explique pourquoi.

CHAPITRE 07

Ce qui vient, et ce qui ne viendra pas

La physique du chapitre 01 ne bougera plus : elle est fixée depuis Foucault et Lenz. Ce qui bouge, c'est ce qu'on fait du signal. Quatre directions, dont trois sont déjà sorties du laboratoire.

DIRECTION	OÙ ÇA EN EST	CE QUE ÇA CHANGE
Multifréquence simultanée	Sur le marché. L'appareil émet plusieurs fréquences à la fois au lieu d'une.	Chaque cible répond différemment selon la fréquence : plusieurs points de vue au lieu d'un seul, donc une discrimination bien meilleure sur sol difficile.
Le tenseur de polarisabilité	Sorti du laboratoire, employé sur des chantiers de dépollution.	Au lieu d'un nombre, on mesure la façon dont la cible répond selon <i>trois axes</i> . Un obus est allongé, un éclat de tôle ne l'est pas : la forme devient mesurable, et le tri fer / munition cesse d'être une loterie.
L'apprentissage sur le signal brut	En cours, et c'est là que se joue le plus gros gain.	Plutôt que de réduire la cible à un indice, on donne la courbe de décroissance entière à un modèle. Il retrouve des régularités qu'aucun seuil ne capture — et hérite exactement du problème de seuil décrit au chapitre 05.
La fusion de capteurs	Sur drone pour la cartographie, encore lourde à la main.	Induction pour le métal, radar de sol pour les cavités et les objets non métalliques, magnétométrie pour les grosses masses ferreuses. Trois cartes du même terrain qui se corrigent l'une l'autre.

Ce qui ne viendra pas, en revanche : l'appareil qui annonce « pièce d'argent, quatorze centimètres » sans se tromper. L'ambiguïté taille-profondeur-nature est structurelle, pas technologique. On la réduit, on la déplace, on l'assortit d'une probabilité. On ne la supprime pas.

Déminer : drone, robot et IA

Le même capteur, quand déterrer la mauvaise cible tue. Trois simulations, dont l'arbitrage faux positifs / faux négatifs.

(deminage.html)

Archéologie

Ce qu'on lit dans un sol sans le retourner, et pourquoi un objet sorti de son contexte perd l'essentiel de ce qu'il avait à dire.

(archeologie.html)

Piloter du matériel par le code

La suite naturelle du chapitre 04 : lire des capteurs, commander des sorties, et ne pas griller la carte.

(code-pilote.html)

CHAPITRE 08

À lire avant de sortir avec

✚ En France, l'usage est encadré

L'article **L. 542-1 du Code du patrimoine** soumet à autorisation administrative préalable l'emploi de matériel de détection des métaux *à l'effet de recherches* de monuments ou d'objets pouvant intéresser la préhistoire, l'histoire, l'art ou l'archéologie. L'autorisation est délivrée par la préfecture de région, sur avis du service régional de l'archéologie, pour une recherche précise et délimitée.

Ce n'est pas une formalité oubliée : la détection sans autorisation est sanctionnée, le matériel peut être saisi, et les objets trouvés ne vous appartiennent pas. Il faut **en plus** l'accord écrit du propriétaire du terrain — l'un ne remplace jamais l'autre. Toute découverte fortuite doit être déclarée sans délai au maire.

Rien de tout cela n'interdit de construire l'appareil, de l'étalonner sur des pièces posées dans votre jardin, ni de chercher vos clés dans l'herbe. La ligne est claire : elle porte sur la *recherche de patrimoine*.

⚠ Si ça ressemble à une munition, on s'arrête

Une grande partie du sol européen porte encore des restes explosifs de guerre, et un objet enfoui depuis un siècle est *plus* instable, pas moins. On ne creuse pas, on ne déplace pas, on ne nettoie pas, on ne rapporte pas chez soi. On note l'endroit, on s'éloigne, et on appelle la **gendarmerie ou la police**, qui saisit le service de déminage de la Sécurité civile.

C'est la seule cible du jeu ci-dessus qu'il faut apprendre à ne pas déterrer. Elle y est pour ça.

RÉFÉRENCES

Sources

Les formules d'inductance et d'oscillation sont les relations classiques ; l'approximation de Wheeler pour une galette plate date de 1928 et reste la référence pratique. Les valeurs de composants sont celles des montages BFO courants, et le comportement décrit du Raspberry Pi 5 correspond au passage des entrées-sorties par la puce RP1.

Documentation Raspberry Pi — entrées-sorties

raspberrypi.com · les caractéristiques électriques des broches, à lire avant de brancher quoi que ce soit
(<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>)

Code du patrimoine, livre V, titre IV

legifrance.gouv.fr · le texte de l'autorisation préalable, dans sa version en vigueur
(https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074236/LEGISCTA000006159951/)

Ministère de la Culture — Archéologie

culture.gouv.fr · les services régionaux de l'archéologie et la marche à suivre pour une découverte
(<https://www.culture.gouv.fr/Thematiques/Archeologie>)

Sur cette formation. Les schémas, les calculs et le champ de fouille sont construits ici et tournent entièrement dans votre navigateur : rien n'est envoyé nulle part. Les valeurs de composants sont des points de départ éprouvés, pas un plan certifié — un montage se règle toujours à la mesure. Et le chapitre 08 n'est pas une clause de style : lisez-le avant de sortir avec l'appareil.



Fabriquer un détecteur de métaux, et le brancher sur un Raspberry Pi | Arborescence — formation en accès libre d'Arborescence, studio numérique et formation.

Librement réutilisable pour l'enseignement. Merci de conserver cette mention et le lien vers la source.

Source : <https://arborescence.studio/detecteur-metaux.html> • Version imprimée le 1 septembre 2026 • Sources et références complètes en ligne

arborescence.studio