ON4CRD

Tome 05

Le calcul des filtres



Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Mentions légales

Tome 05 · Le calcul des filtres

Éditeur du site : Radio Club Durnal ON4CRD

Responsable de publication : Comité du Radio Club Durnal ON4CRD

https://on4crd.be

Mentions légales

Propriété intellectuelle

Les textes, images, documents, logos et supports publiés sur le site restent la propriété de leurs auteurs respectifs ou du club. Toute reproduction ou réutilisation doit respecter la source, les droits applicables et l'autorisation éventuelle de l'auteur.

Responsabilité

Le club veille à publier des informations utiles et vérifiées, mais ne garantit pas l'absence d'erreur, d'omission ou d'interruption. Les informations techniques ou réglementaires doivent être vérifiées auprès des sources officielles lorsqu'elles fondent une décision.

Illustrations créées avec l’assistance d’une intelligence artificielle.

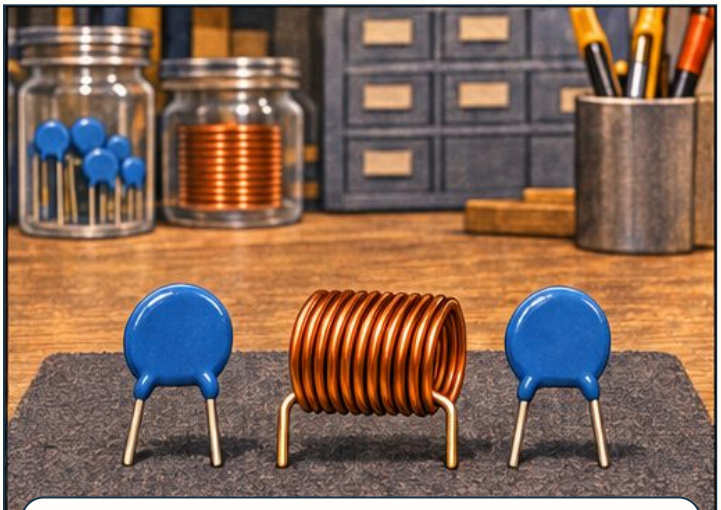
Une nouvelle mission



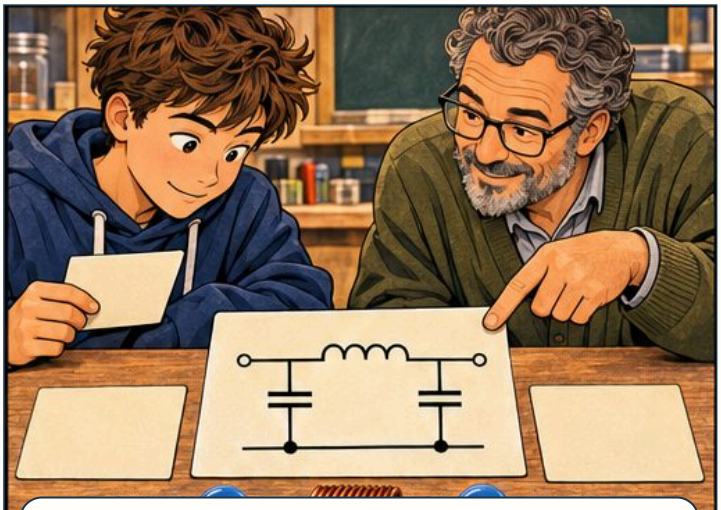
Au club, Lucas retrouve son carnet après l'atelier d'électricité.



Henri prépare une démonstration sur la qualité des signaux.



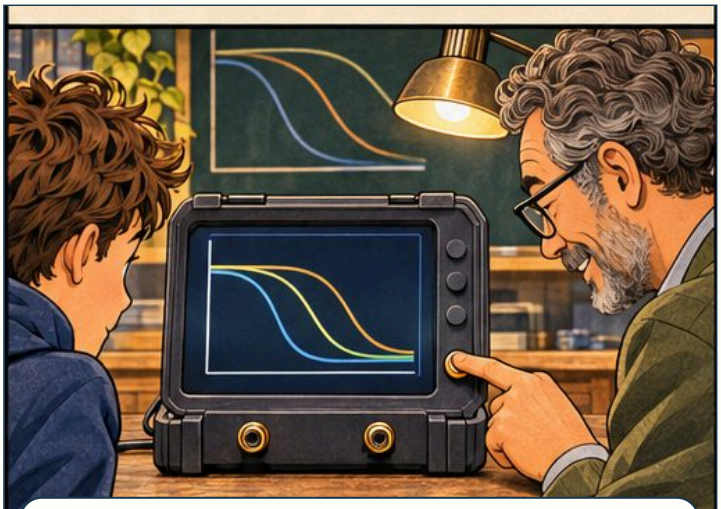
Sur la table attendent deux condensateurs et une bobine.



Le défi : comprendre, calculer, puis mesurer un filtre passe-bas.

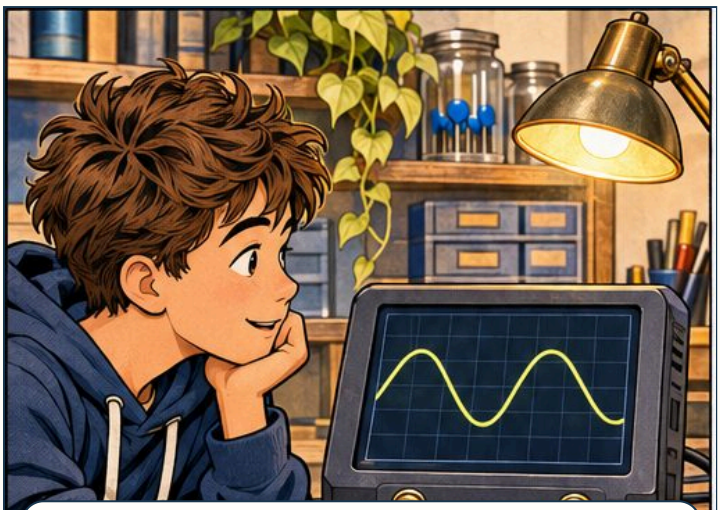


Lucas veut savoir pourquoi trois composants peuvent tout changer.

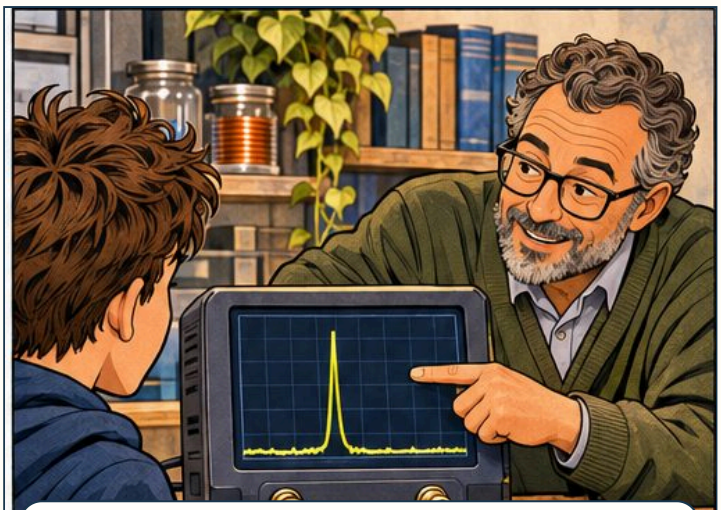


Ils commencent par regarder ce que contient un signal.

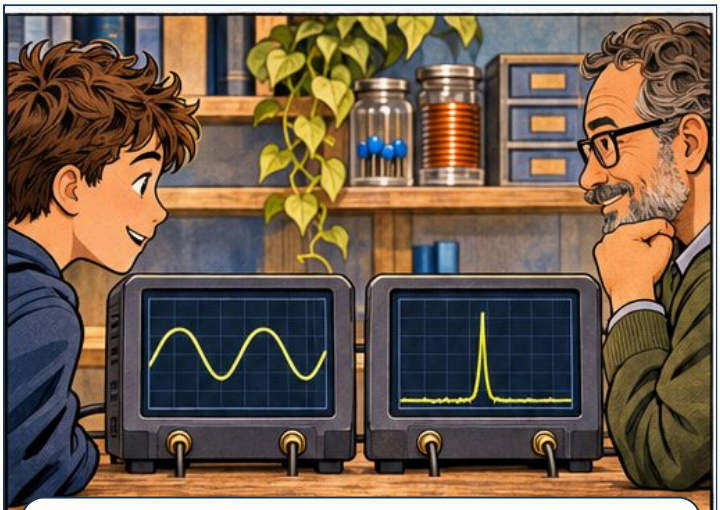
Le signal et son portrait



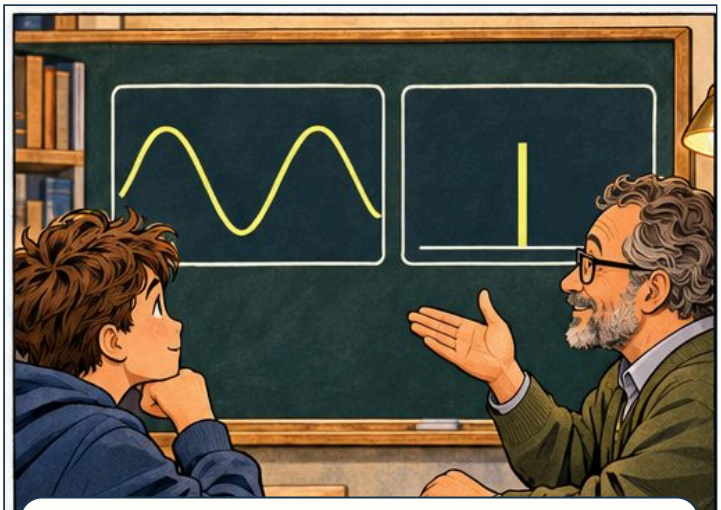
Une courbe dans le temps montre comment un signal évolue.



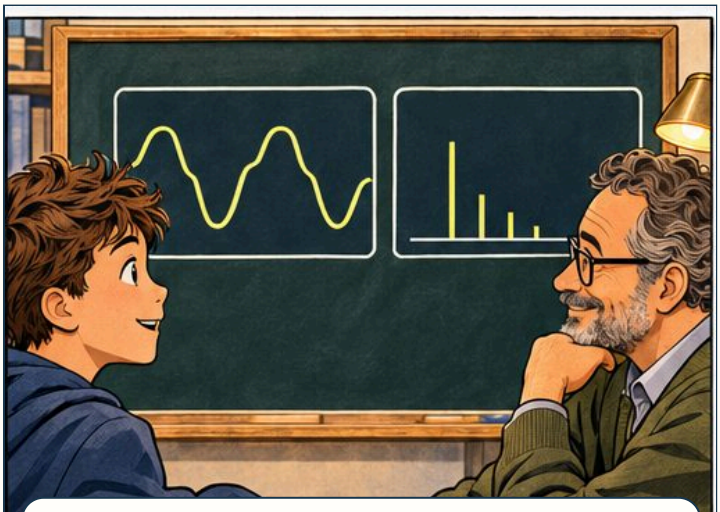
Un spectre présente ses composantes selon leur fréquence.



Les deux vues décrivent le même signal autrement.



Une sinusoïde idéale possède une seule fréquence.

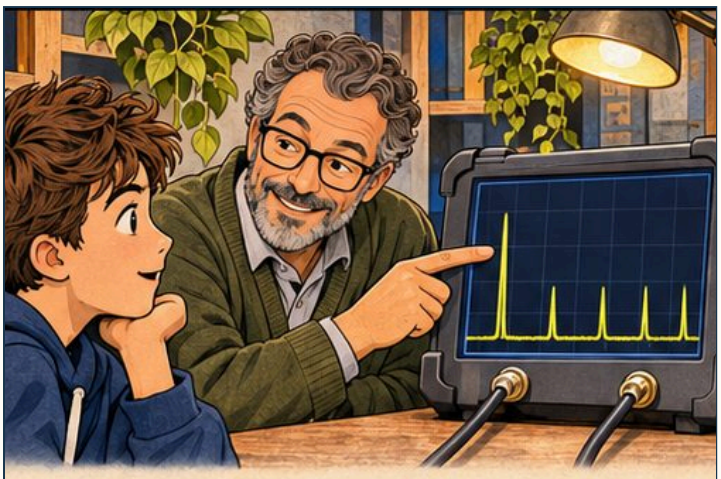


Une forme déformée peut contenir plusieurs composantes.



Lucas découvre un portrait qu'il ne savait pas lire.

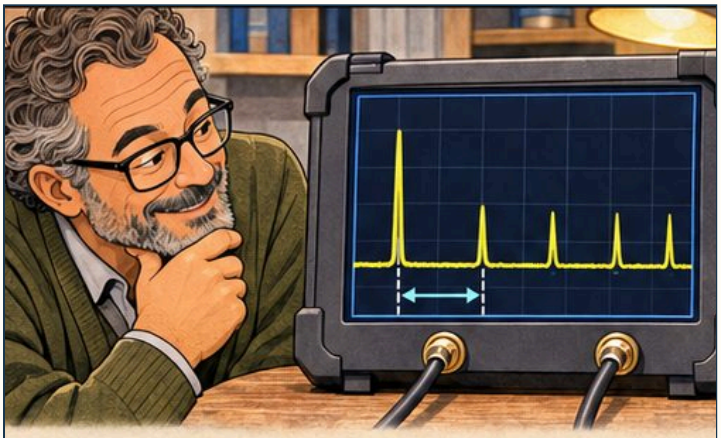
Les harmoniques se révèlent



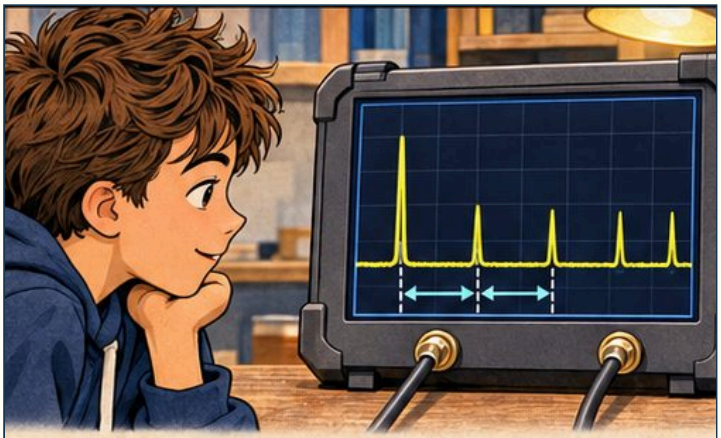
La fréquence fondamentale fournit le premier repère du signal périodique.



Ses harmoniques sont des multiples entiers de cette fréquence.



La deuxième se trouve à deux fois la fondamentale.



La troisième se trouve à trois fois cette fréquence.

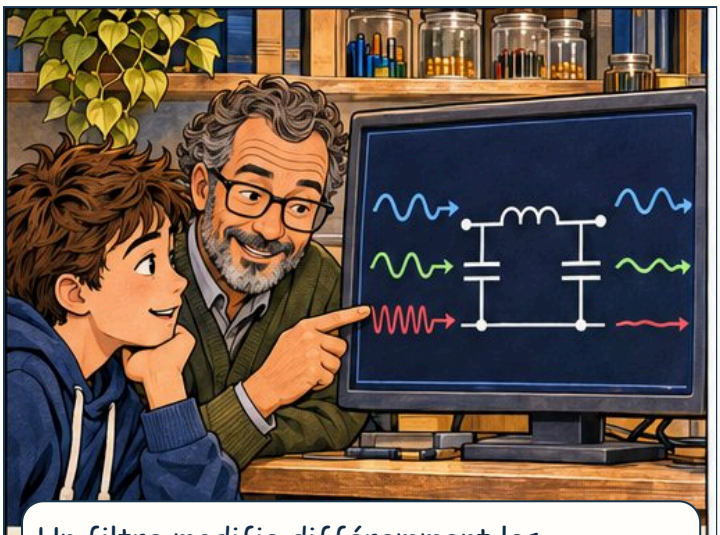


Toutes les composantes indésirables ne sont pourtant pas des harmoniques.

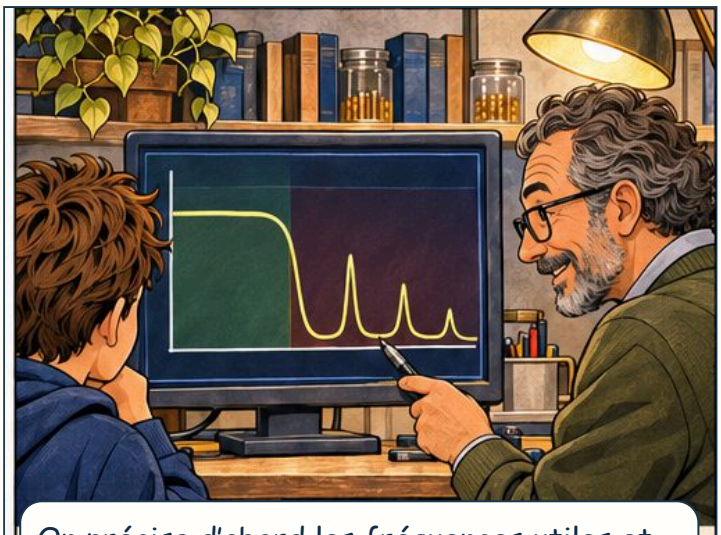


Le filtre devra répondre à un besoin précisément défini.

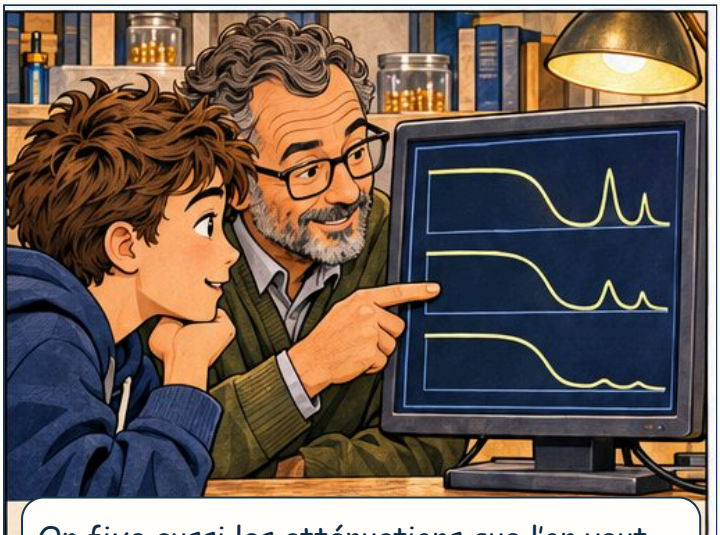
Choisir ce que l'on conserve



Un filtre modifie différemment les composantes selon leur fréquence.



On précise d'abord les fréquences utiles et les fréquences gênantes.



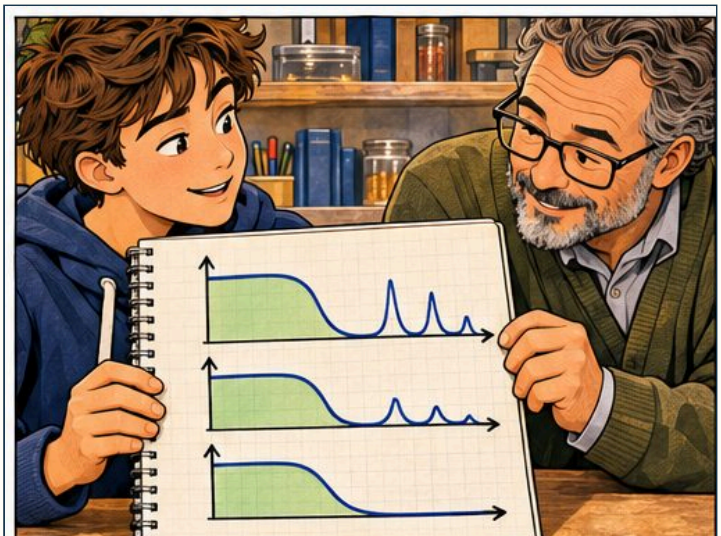
On fixe aussi les atténuations que l'on veut obtenir.



Sans ces objectifs, calculer des composants aurait peu de sens.

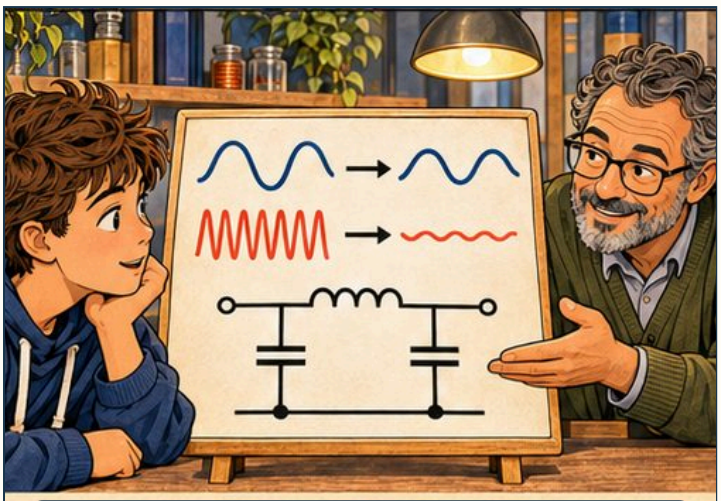


Lucas entoure la zone utile d'un spectre d'exemple.



Son carnet devient un cahier des charges.

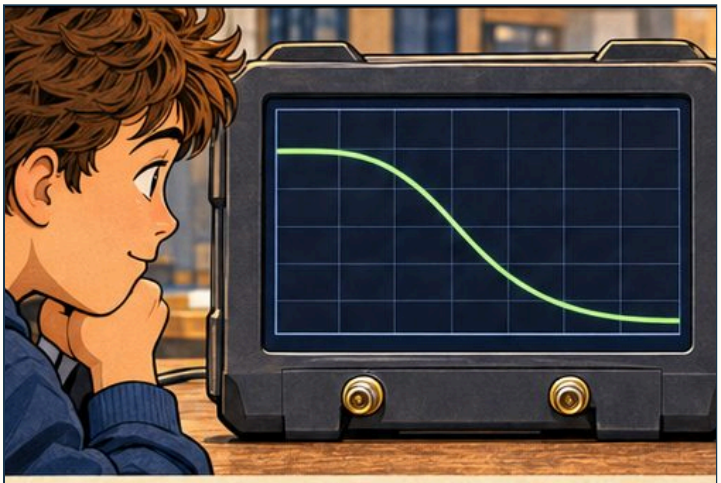
Le choix du passe-bas



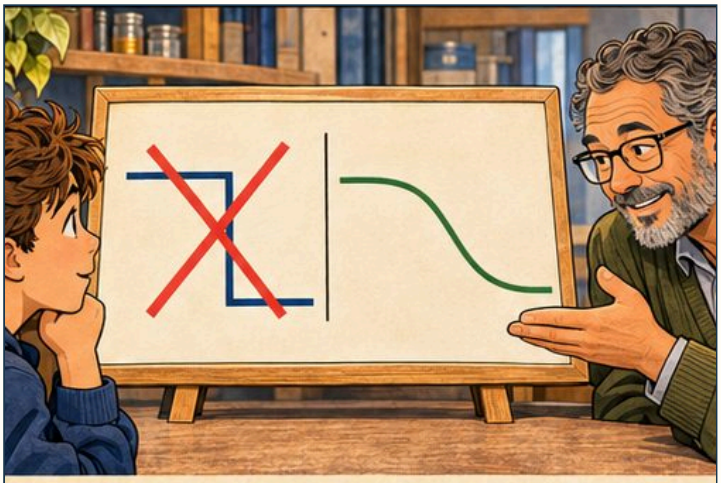
Un passe-bas transmet mieux les fréquences basses que les hautes.



Sa bande passante occupe le côté des basses fréquences.



Plus haut, l'atténuation augmente progressivement.



La transition réelle n'est jamais un mur vertical parfait.



Ce type convient à leur démonstration d'aujourd'hui.



Lucas dessine une pente plutôt qu'une barrière.

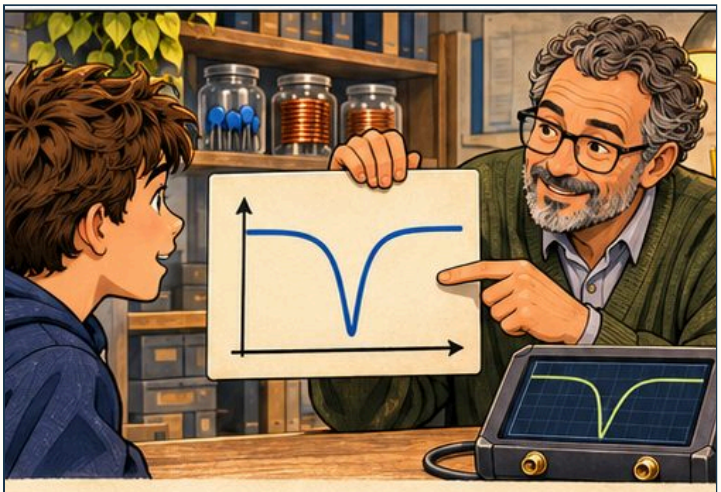
Les autres chemins possibles



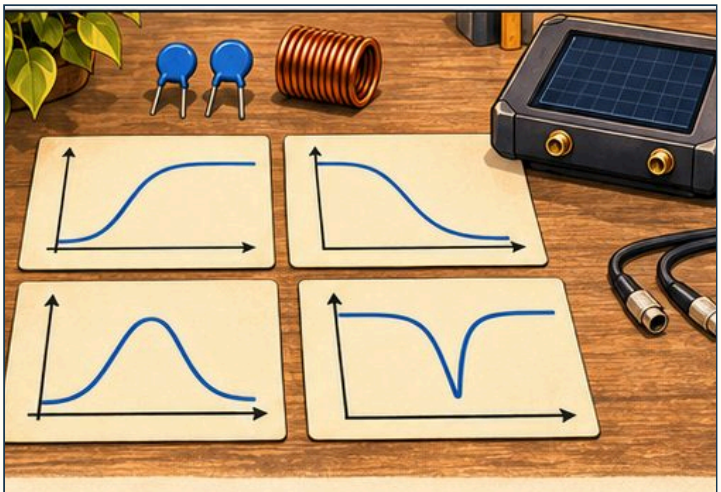
Un passe-haut atténue les basses fréquences et conserve les hautes.



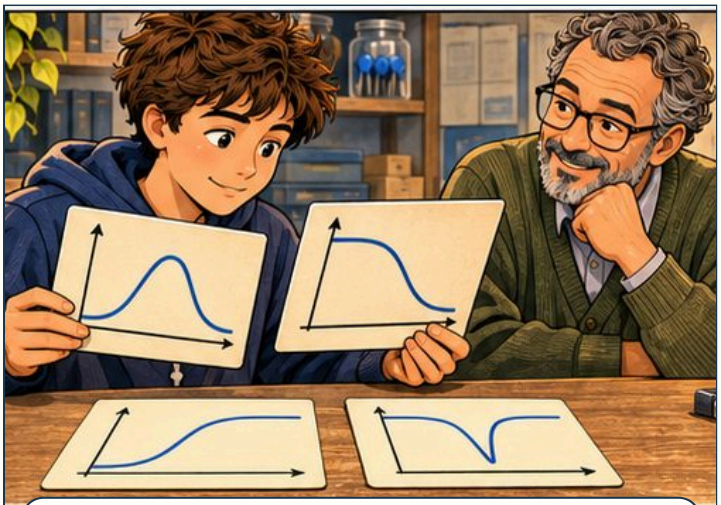
Un passe-bande privilégie une plage entre deux limites.



Un coupe-bande atténue au contraire une plage choisie.



Ces familles ne répondent pas au même besoin.

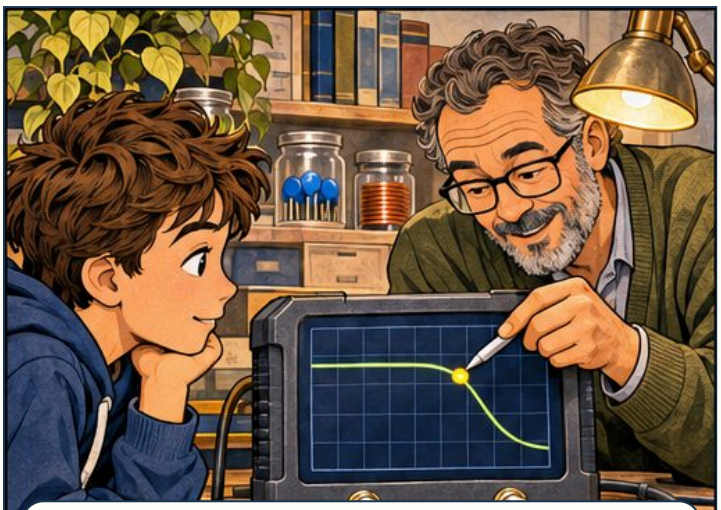


Leur nom décrit une réponse, pas une qualité universelle.



Lucas range trois cartes pour un prochain atelier.

Une coupure qui laisse passer



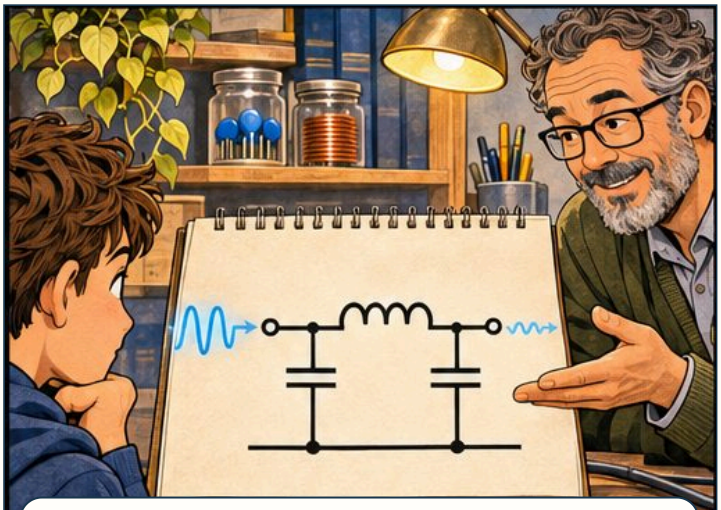
La fréquence de coupure marque ici un niveau de référence.



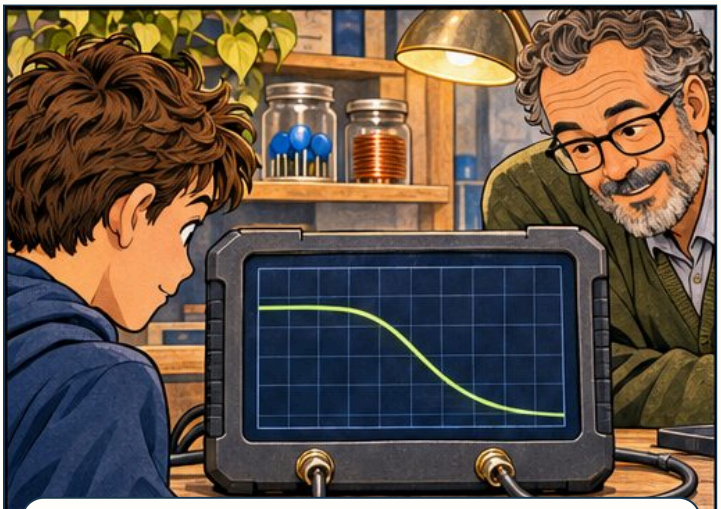
Elle ne désigne pas la disparition soudaine du signal.



Pour leur Butterworth idéal, elle correspondra à environ −3 dB.



Le filtre transmet donc encore de l'énergie à cette fréquence.



Au-delà, l'atténuation continuera d'augmenter.

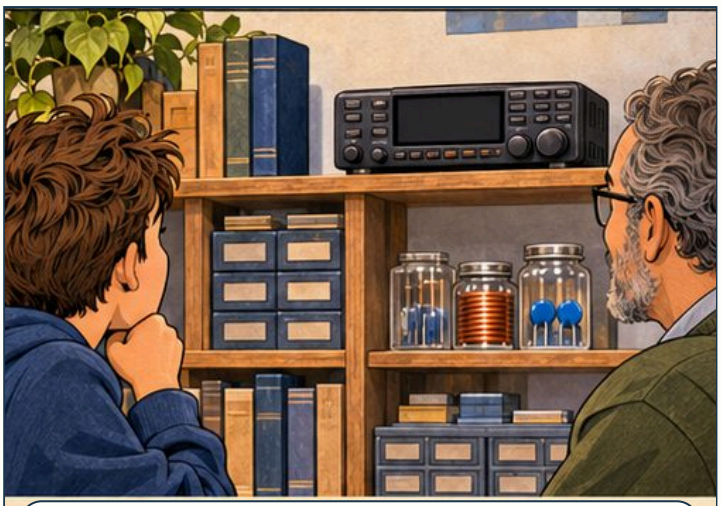


Cette précision évite une première fausse idée.

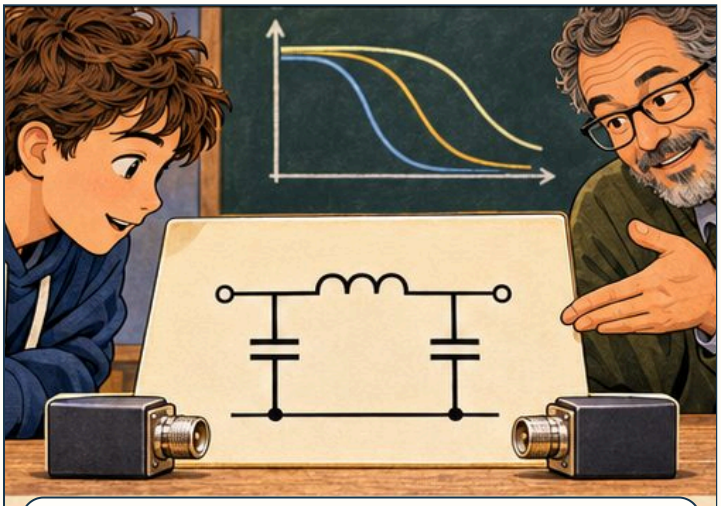
Un exemple de laboratoire



Ils choisissent une coupure théorique de 10 MHz.



Cette valeur sert à apprendre, sans définir une fréquence d'émission.



La source et la charge de référence seront de 50 Ω.



Le montage sera étudié au banc, avec un signal faible.



Aucune antenne ni aucun émetteur ne sera raccordé.

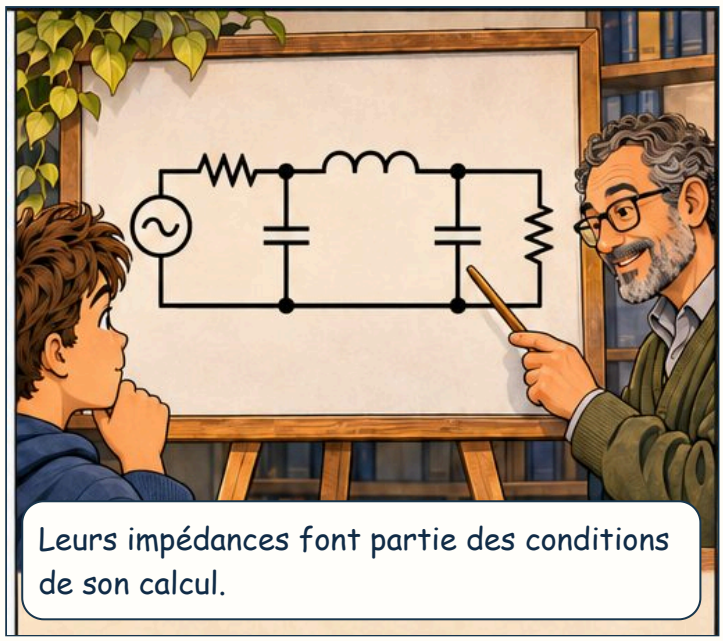


L'objectif est une réponse mesurable, pas un contact radio.

Pourquoi préciser 50 ohms ?



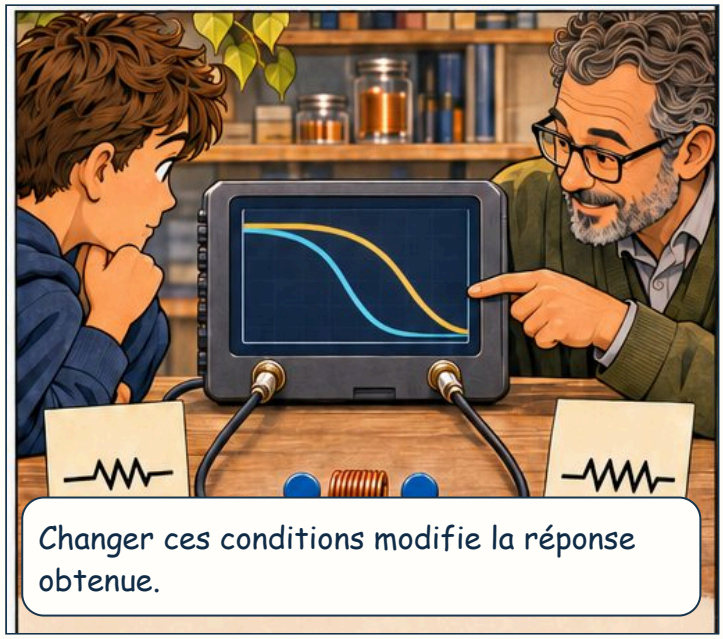
Un filtre travaille entre une source et une charge.



Leurs impédances font partie des conditions de son calcul.



Ici, chacune vaut idéalement 50 Ω, de nature résistive.



Changer ces conditions modifie la réponse obtenue.



Il ne suffit donc pas de recopier trois valeurs.



Lucas ajoute les deux terminaisons à son schéma.

Le modèle et le montage



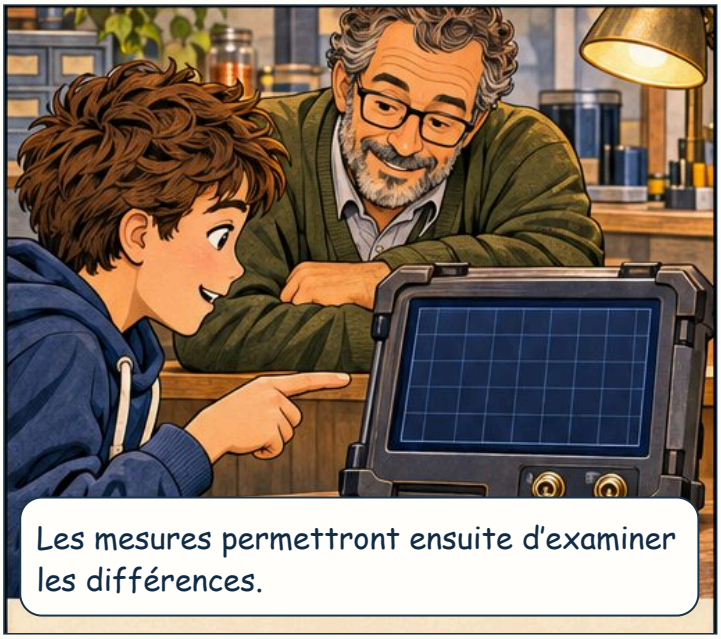
Le calcul commencera avec des composants idéaux, sans pertes.



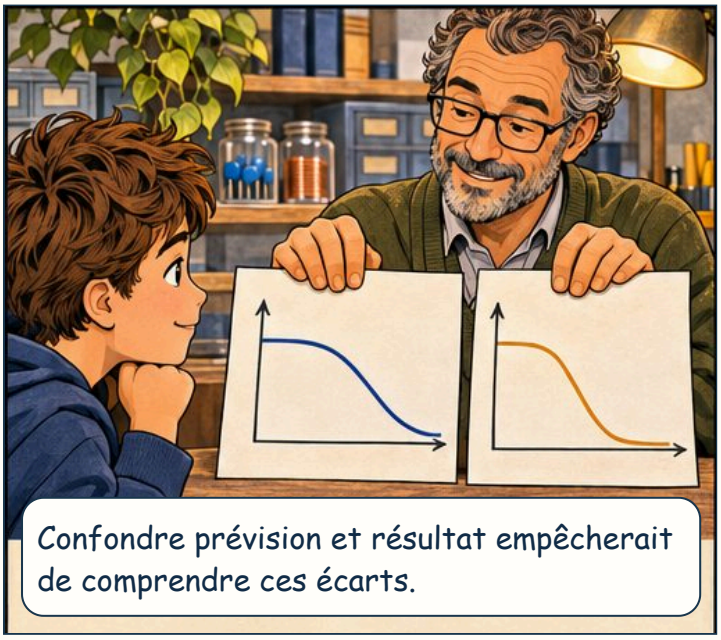
Le montage réel possédera des résistances et des effets parasites.



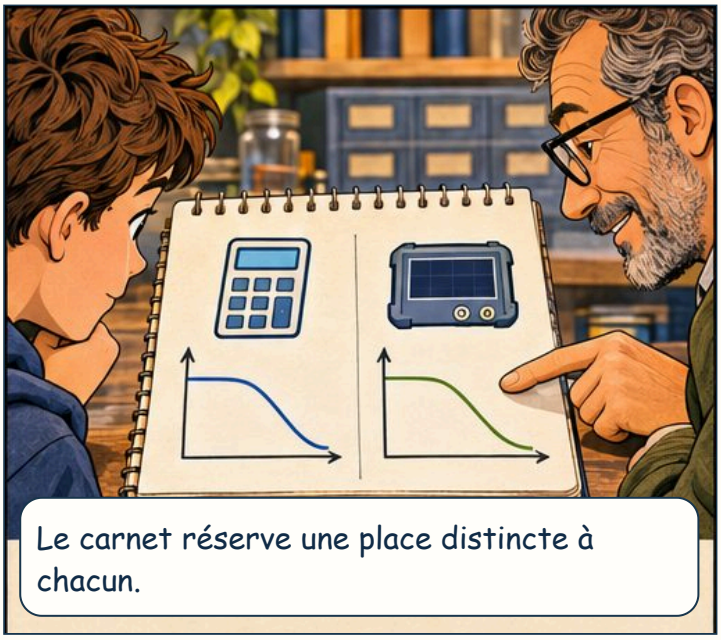
Le modèle permet de prévoir une première réponse.



Les mesures permettront ensuite d'examiner les différences.

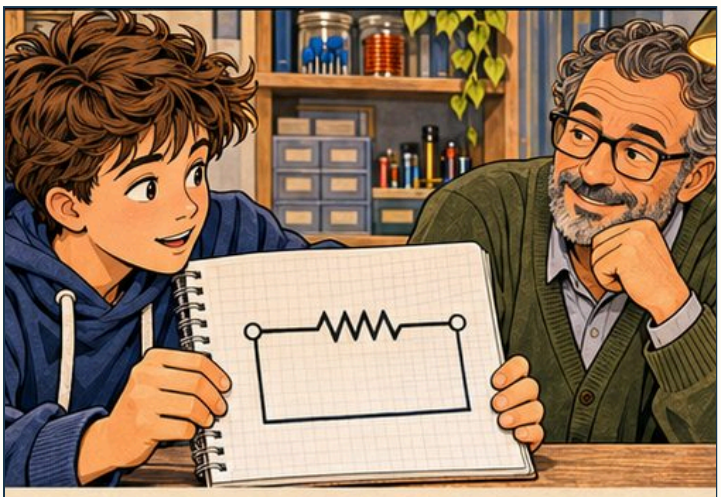


Confondre prévision et résultat empêcherait de comprendre ces écarts.

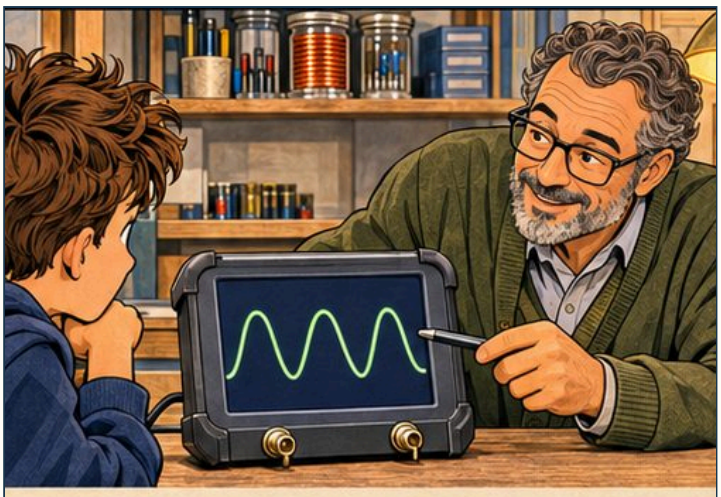


Le carnet réserve une place distincte à chacun.

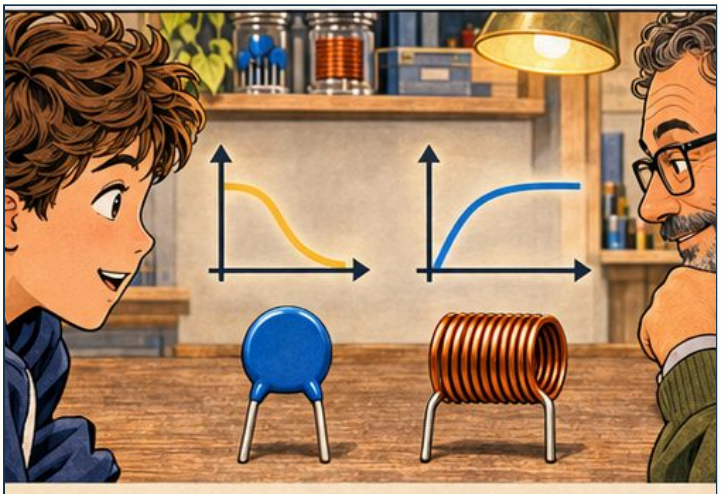
Une résistance ne suffit plus



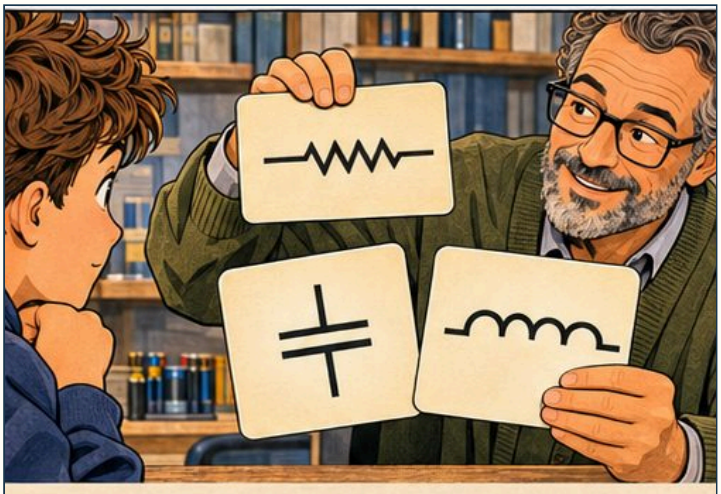
Le tome précédent reliait tension, courant et résistance en continu.



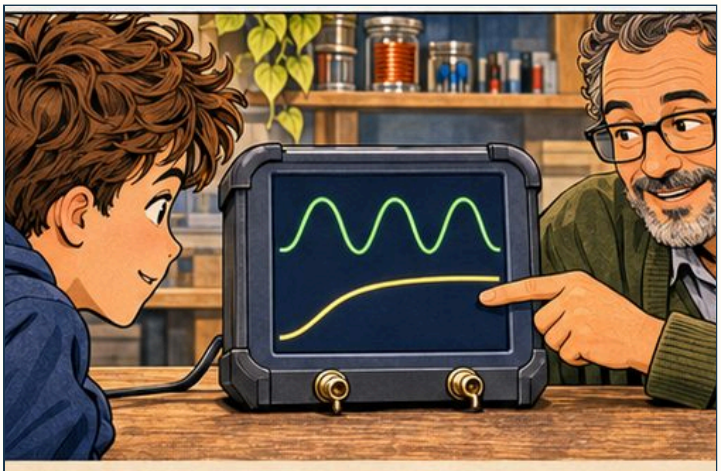
Ici, le signal varie rapidement et sa fréquence compte.



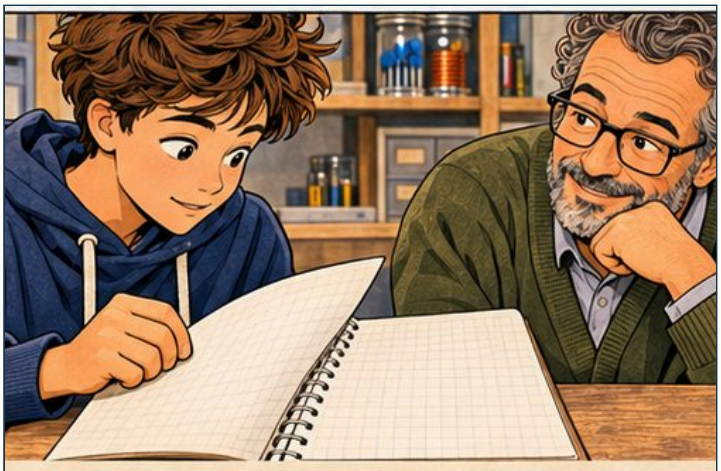
Condensateurs et bobines présentent une opposition dépendant de la fréquence.



Cette réactance ne se confond pas avec une simple résistance.



L'impédance décrit plus largement le comportement électrique en alternatif.

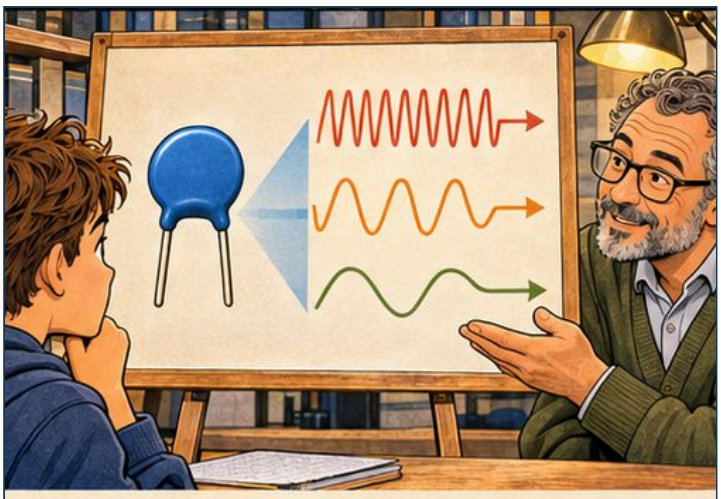


Lucas comprend pourquoi un nouveau modèle est nécessaire.

Le rôle du condensateur



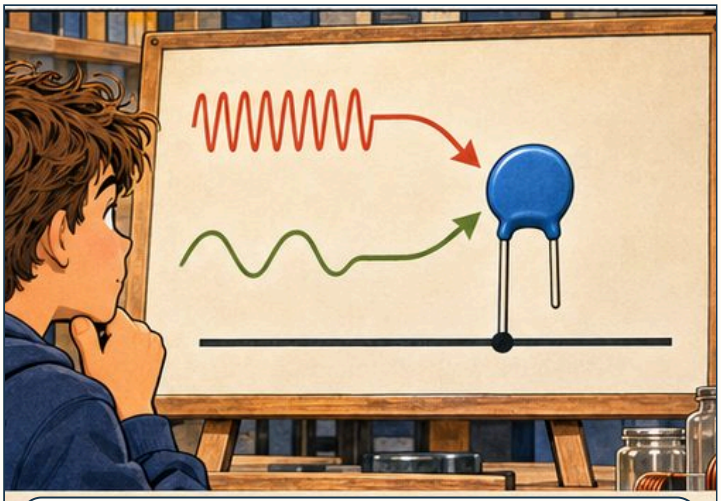
La capacité se note C et s'exprime en farads, F.



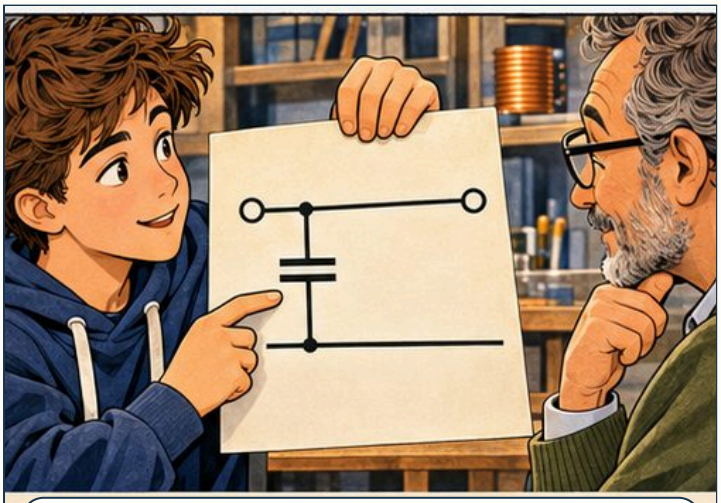
Pour un condensateur idéal, la réactance diminue quand la fréquence augmente.



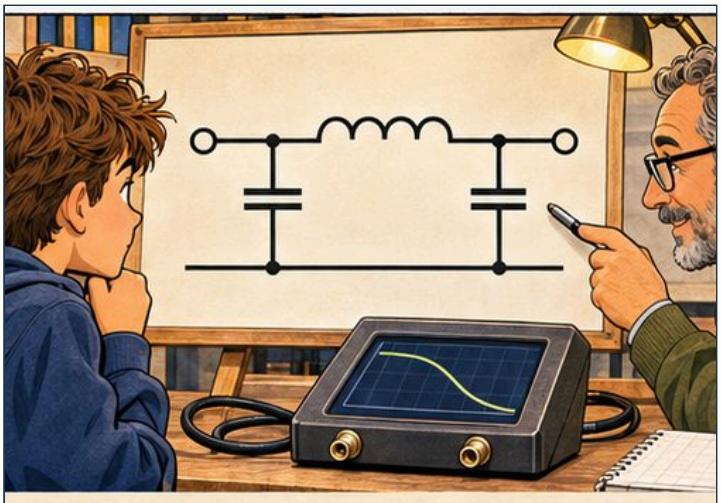
Sa valeur absolue est Xc = 1/(2πfC).



À capacité identique, les hautes fréquences rencontrent moins de réactance.



Dans leur filtre, les condensateurs seront reliés à la masse.

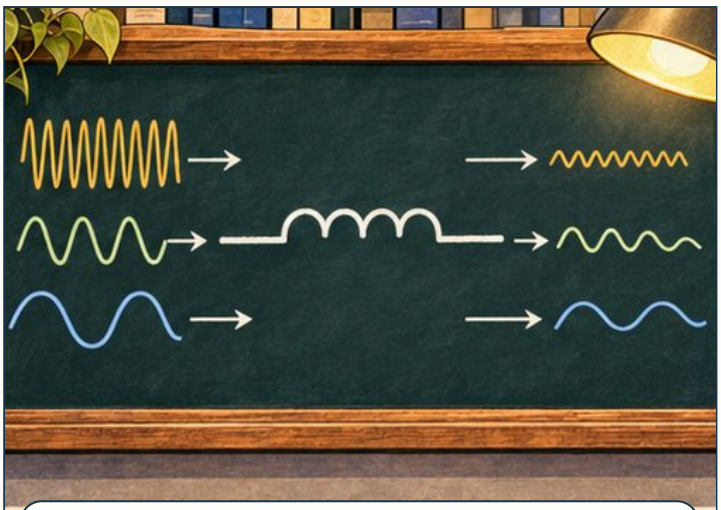


Leur rôle dépend aussi du reste du circuit.

Le rôle de la bobine



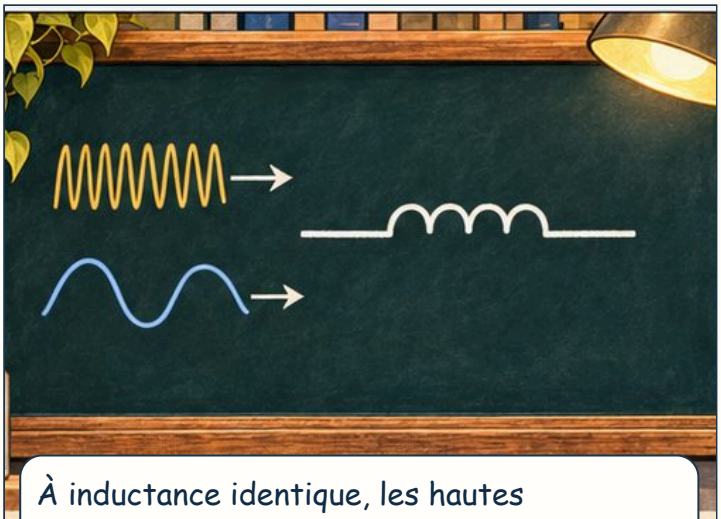
L'inductance se note L et s'exprime en henrys, H.



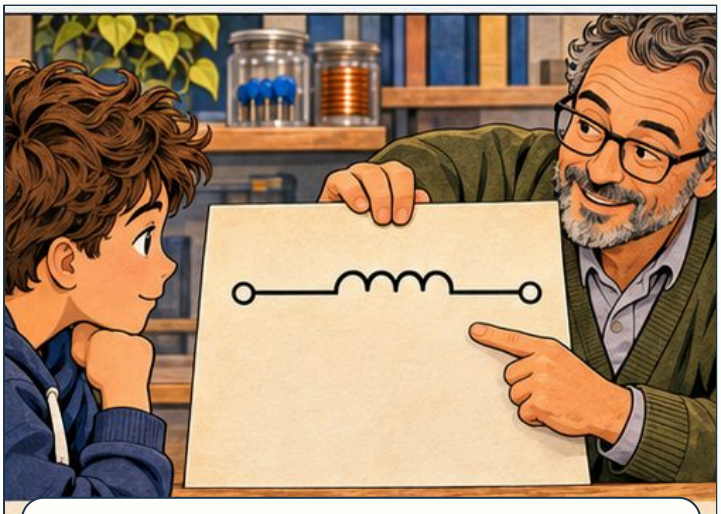
Pour une bobine idéale, la réactance augmente avec la fréquence.



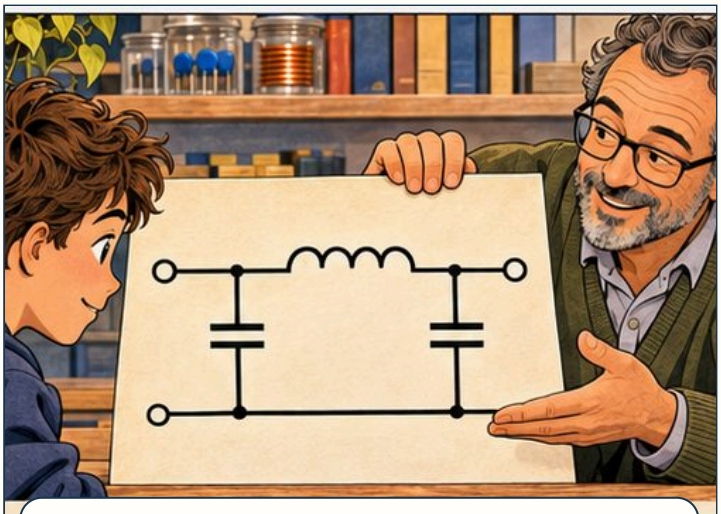
Sa valeur absolue est XL = 2πfL.



À inductance identique, les hautes fréquences rencontrent davantage de réactance.

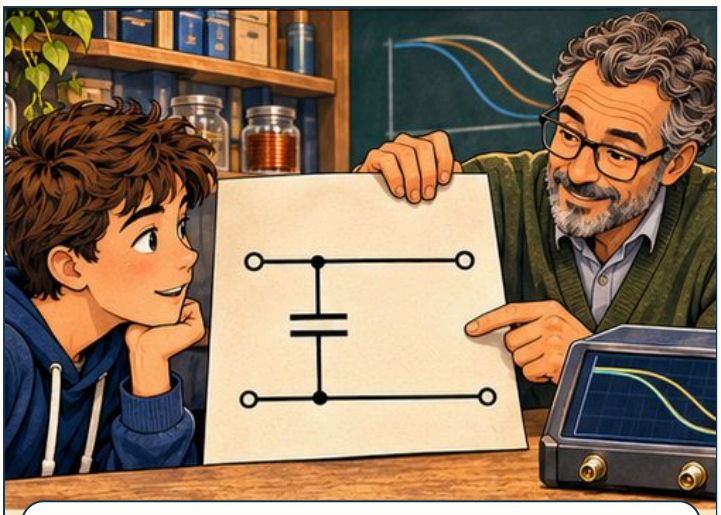


Dans leur filtre, la bobine sera sur le trajet du signal.

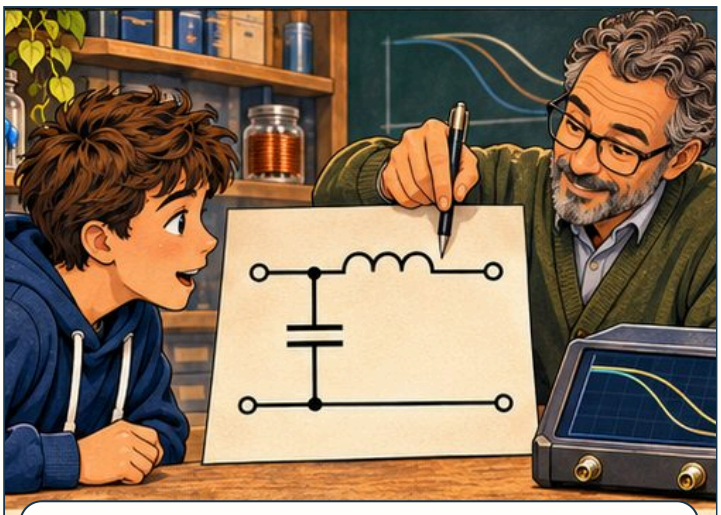


Les deux types de composants agiront ensemble.

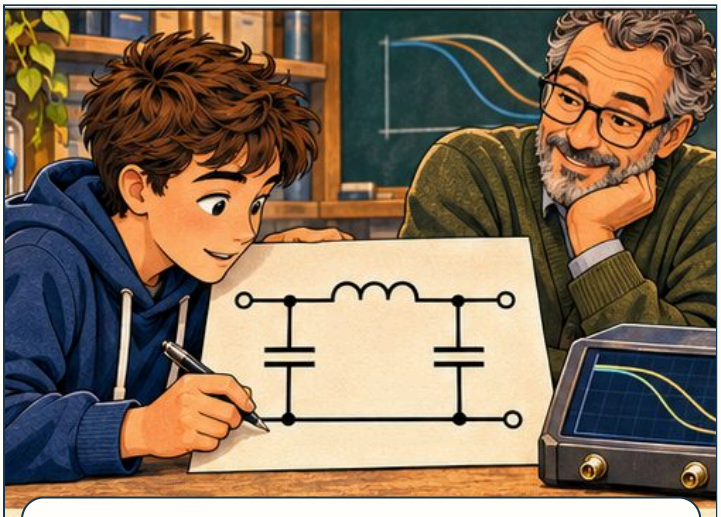
Le schéma prend la forme de π



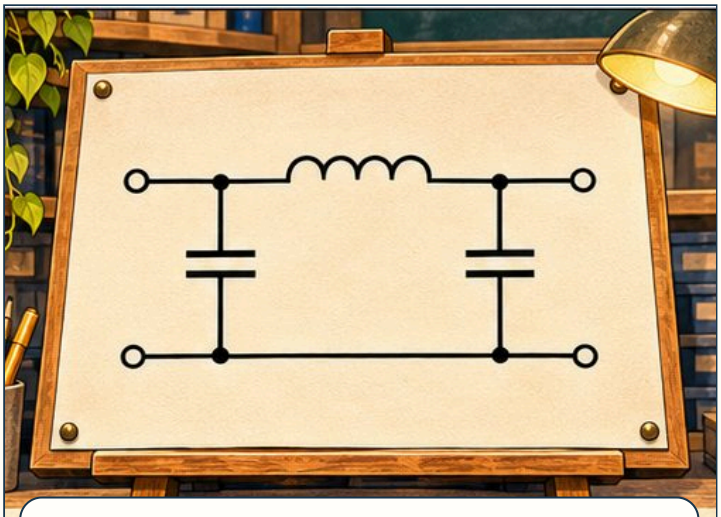
L'entrée rejoint un premier condensateur relié à la masse.



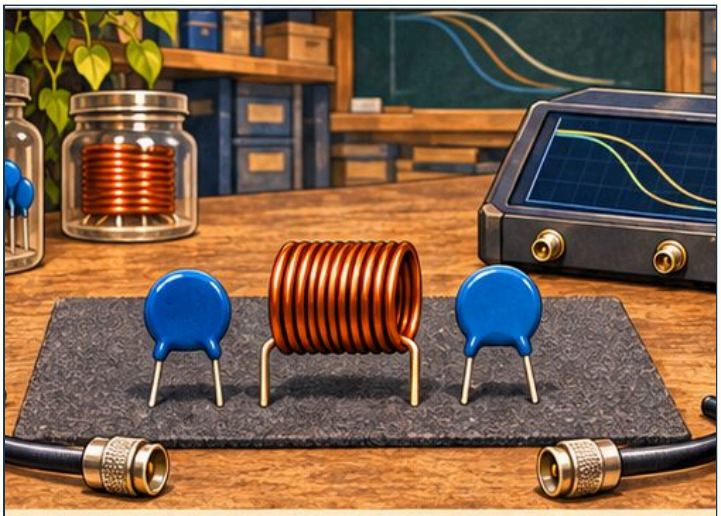
Une bobine relie ensuite l'entrée à la sortie, en série.



Un second condensateur relie la sortie à la même masse.



Deux branches descendent de part et d'autre de la bobine.



Cette disposition évoque la lettre grecque π.

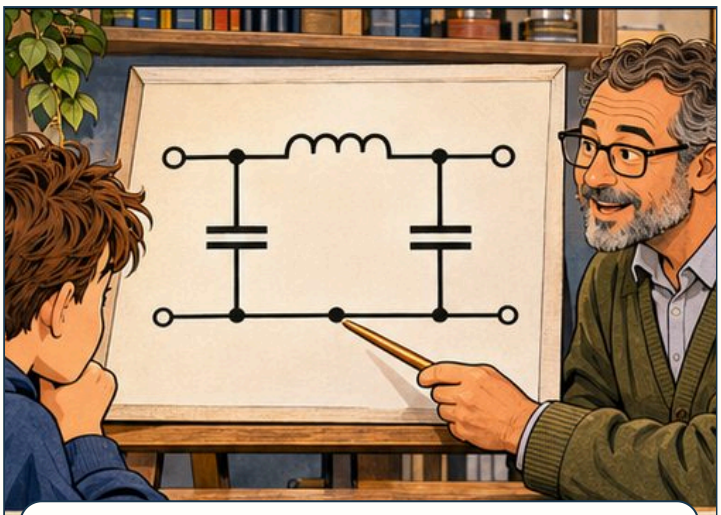


Lucas suit chaque connexion avec son crayon.

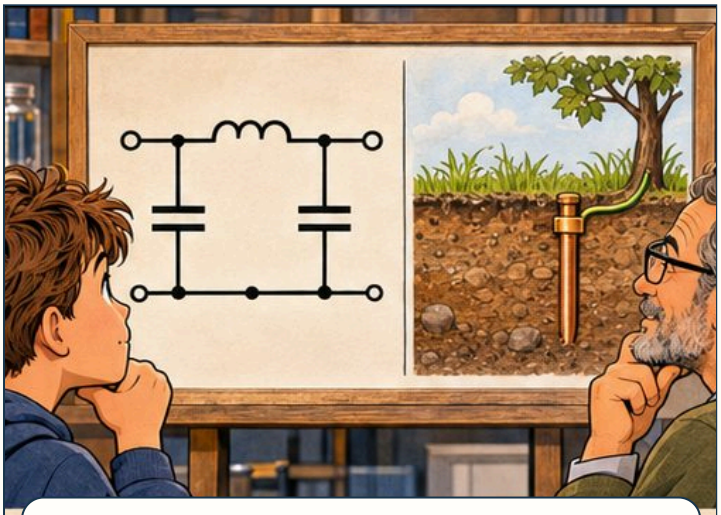
La masse du schéma



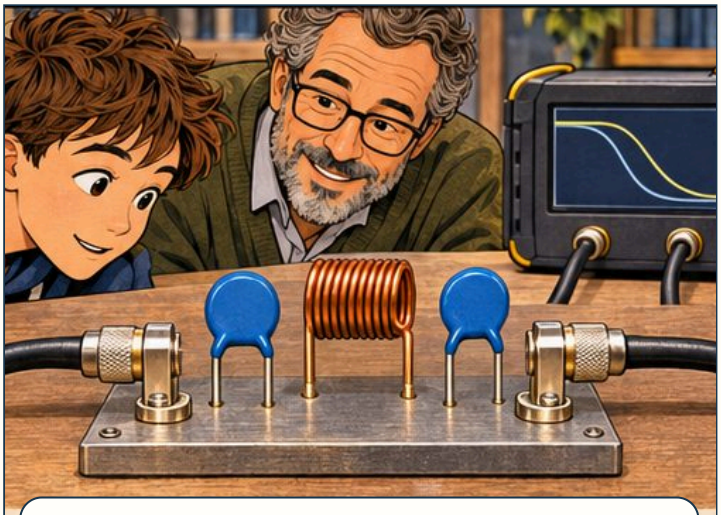
Les deux condensateurs partagent une référence électrique commune.



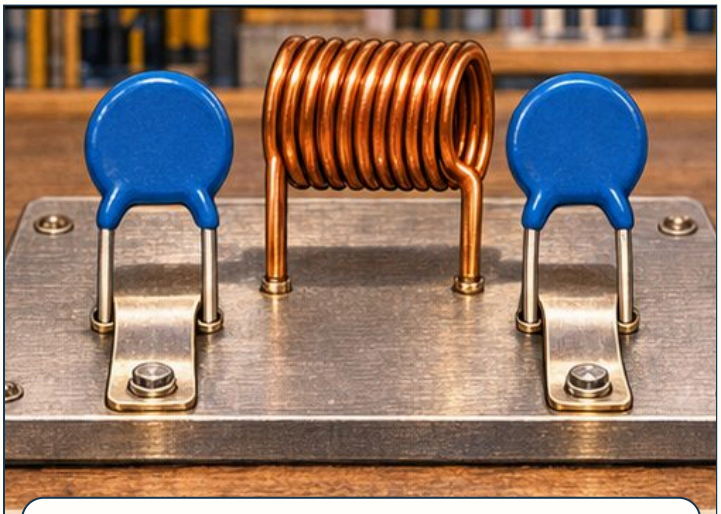
Le symbole de masse représente ici cette référence du montage.



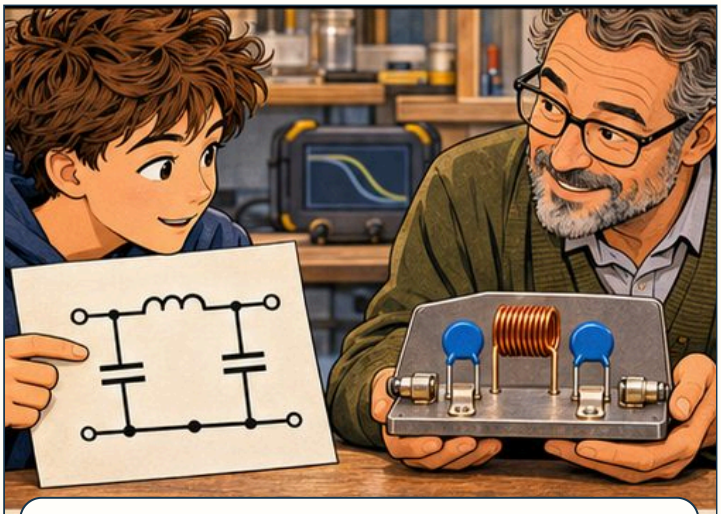
Il ne signifie pas automatiquement une connexion à la terre.



Les blindages coaxiaux rejoignent cette masse selon le montage prévu.



Une liaison courte limite certains effets parasites.

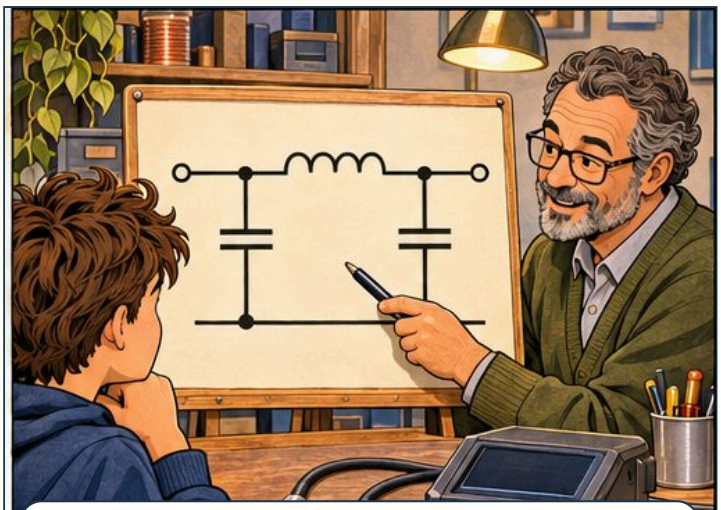


Lucas distingue le symbole et sa réalisation concrète.

Trois éléments, un ordre



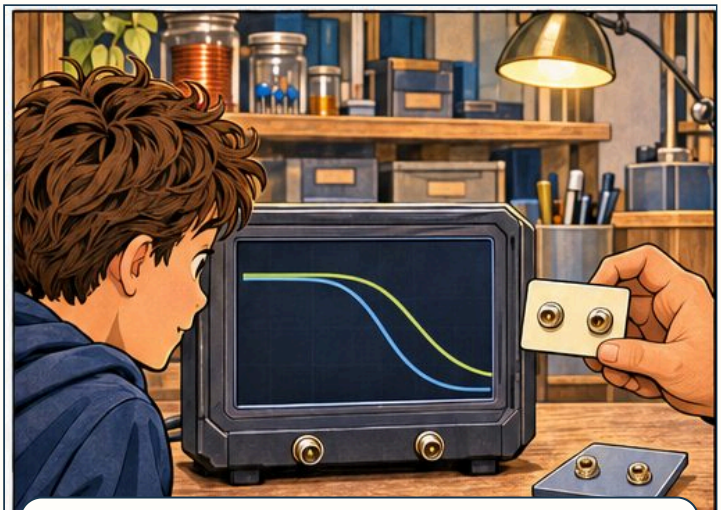
Ce réseau idéal comporte trois éléments réactifs : C, L et C.



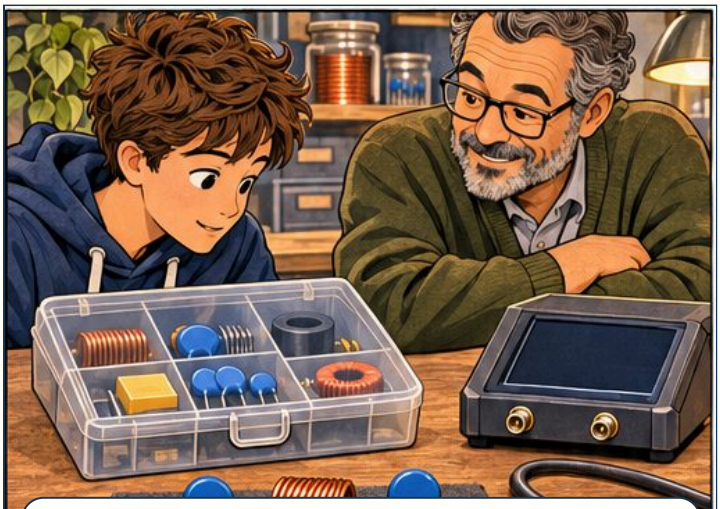
Ils réalisent ici un filtre passe-bas du troisième ordre.



L'ordre caractérise notamment la pente lointaine du modèle.



Une impédance mal choisie changerait pourtant la réponse.



Ajouter des composants au hasard ne crée pas le filtre voulu.

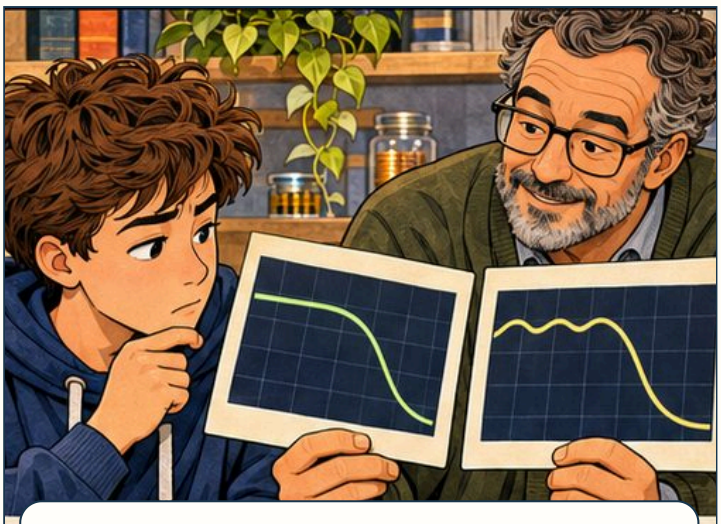


La forme du schéma doit accompagner son calcul.

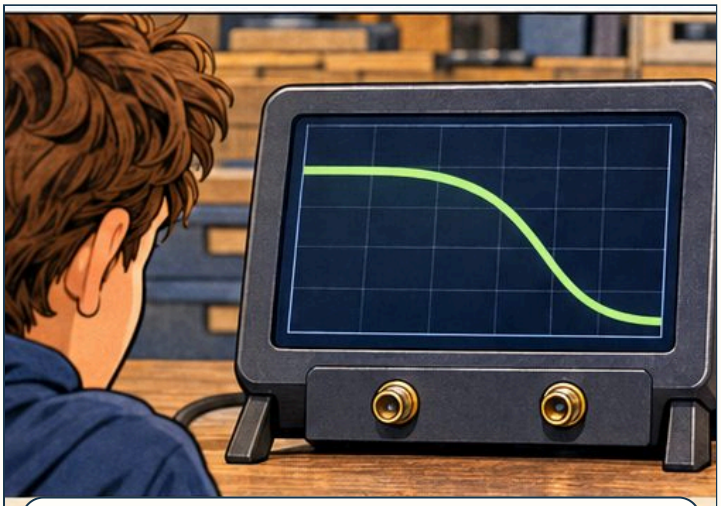
Pourquoi Butterworth ?



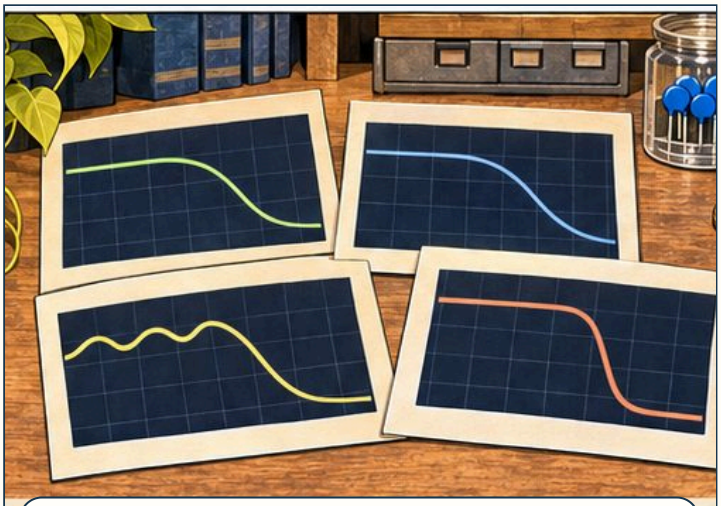
La réponse Butterworth est maximalement plate dans la bande passante.



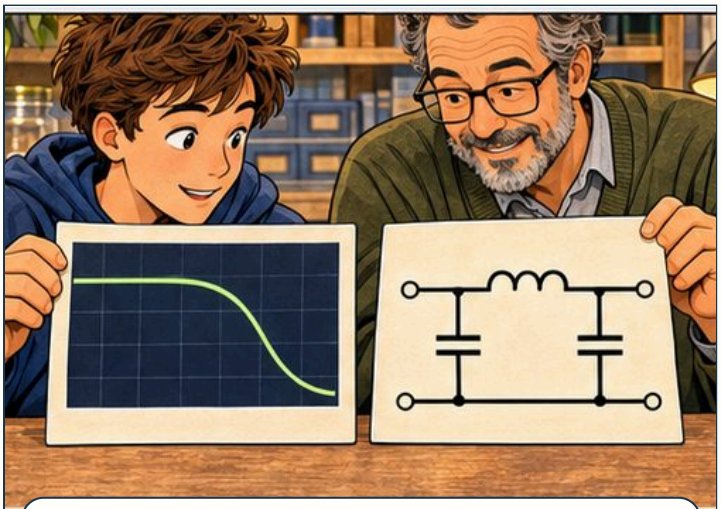
Son modèle idéal ne présente pas d'ondulations dans cette bande.



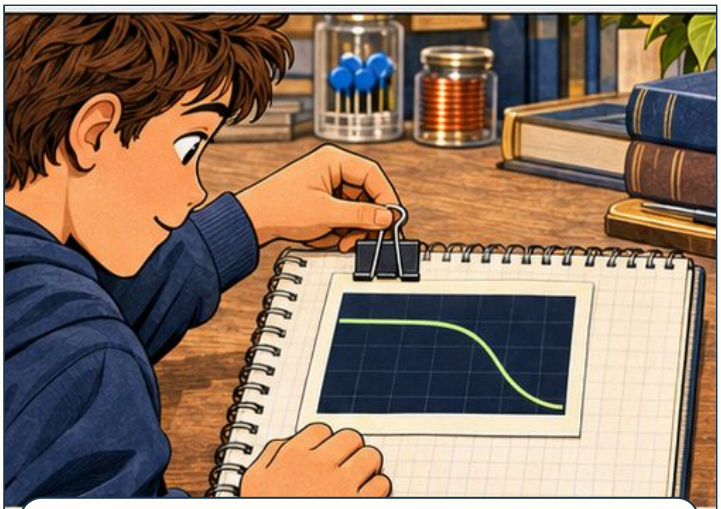
La transition reste progressive, avec une courbure caractéristique.



D'autres réponses acceptent des compromis différents.

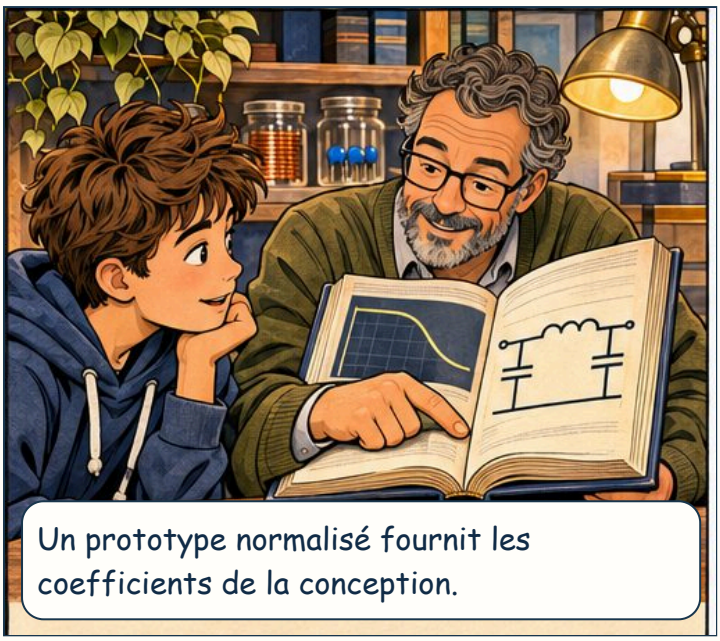


Ils choisissent cette famille pour une première conception lisible.

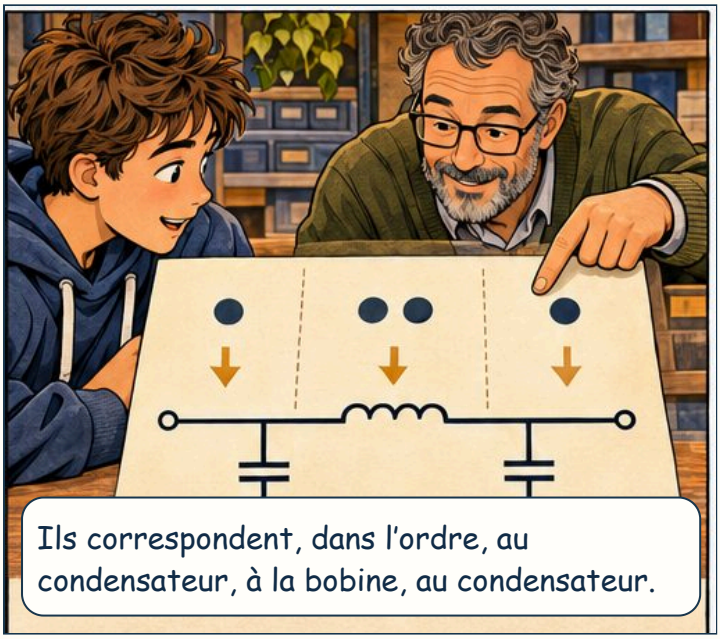


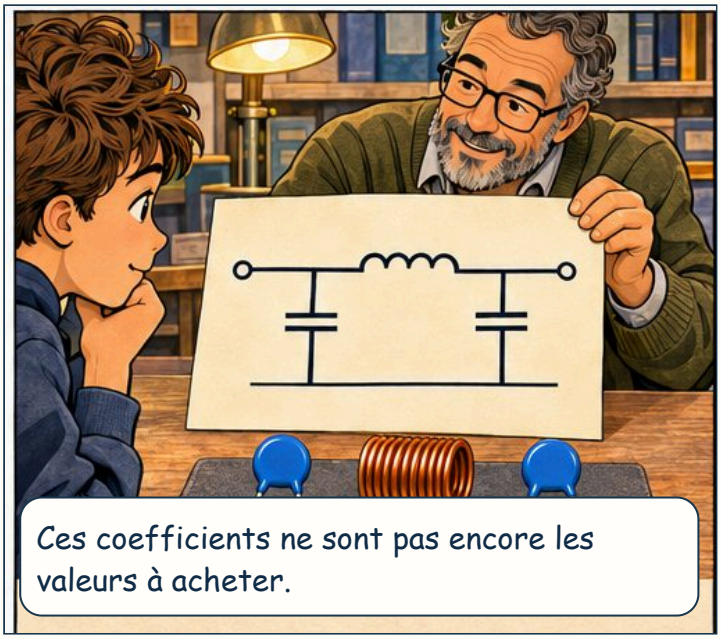
Le nom précise donc davantage que le simple mot passe-bas.

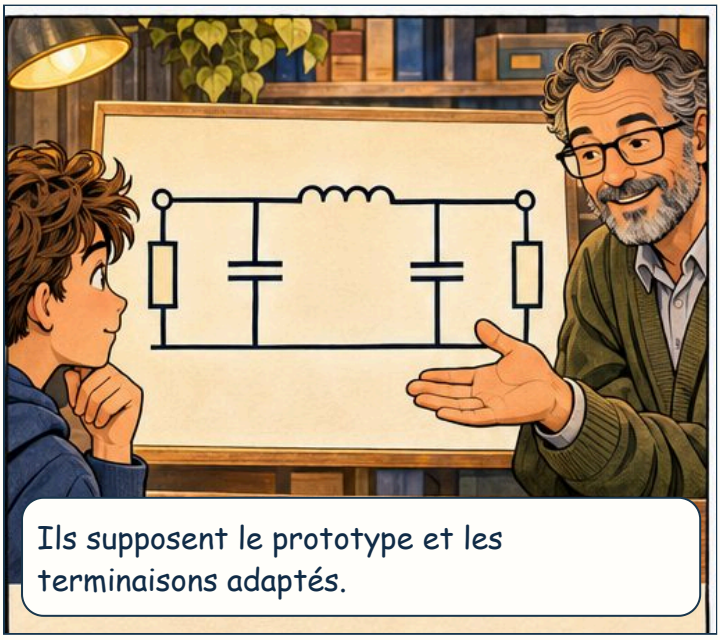
Un prototype pour commencer

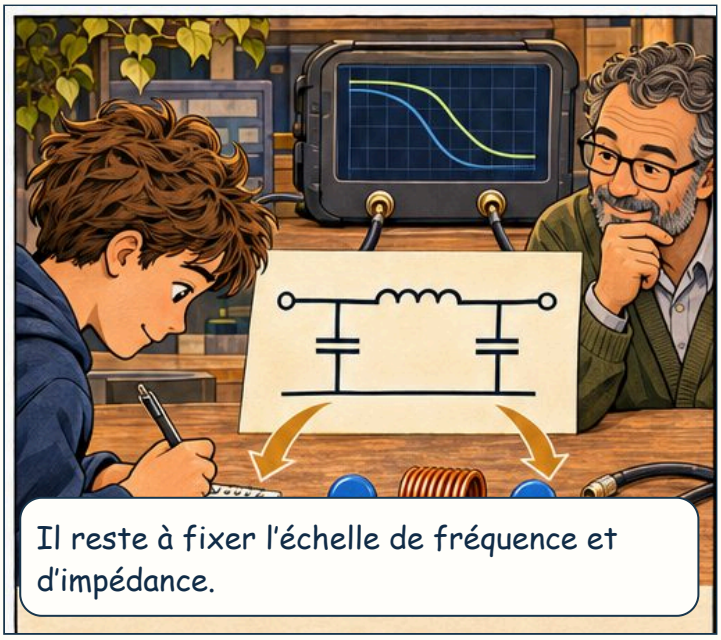




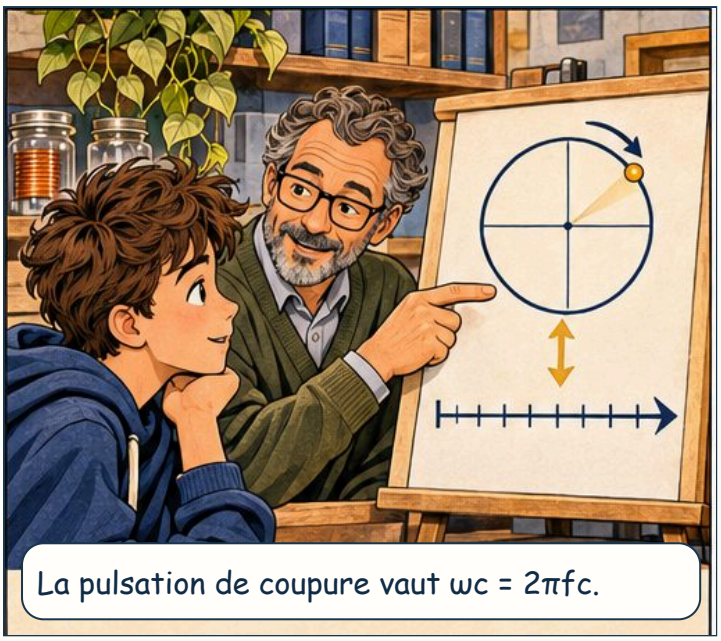




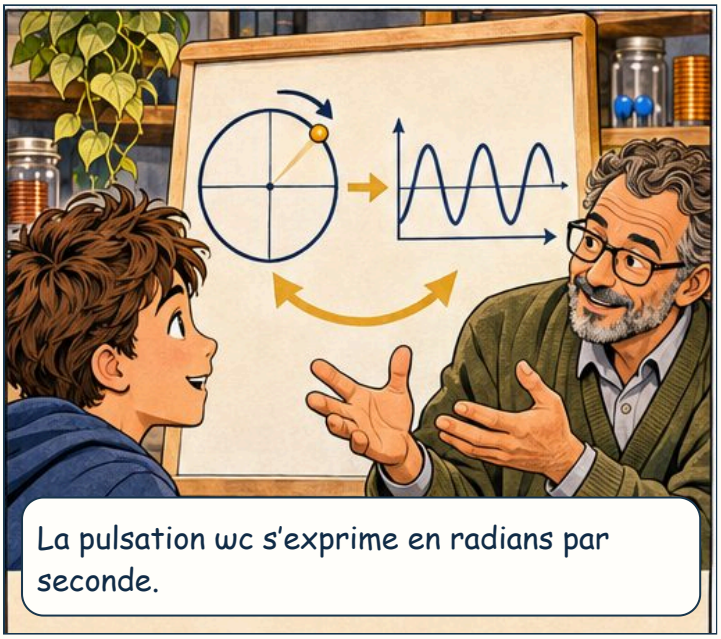


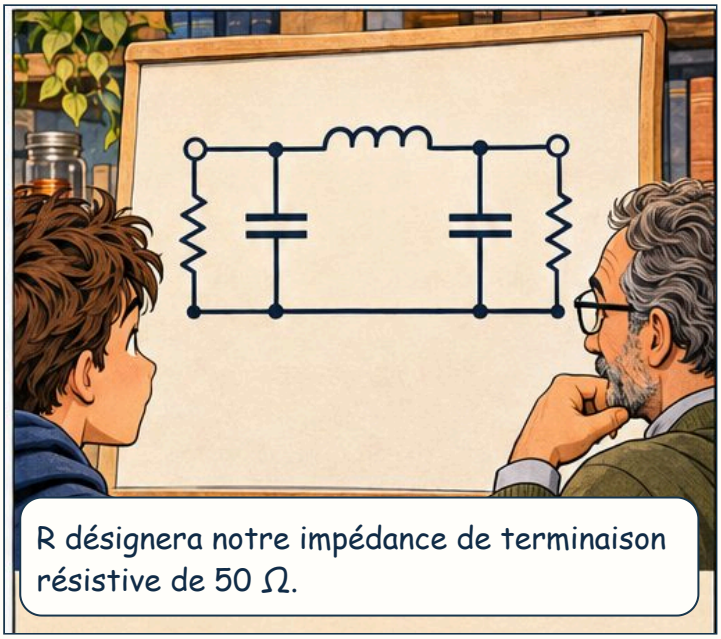


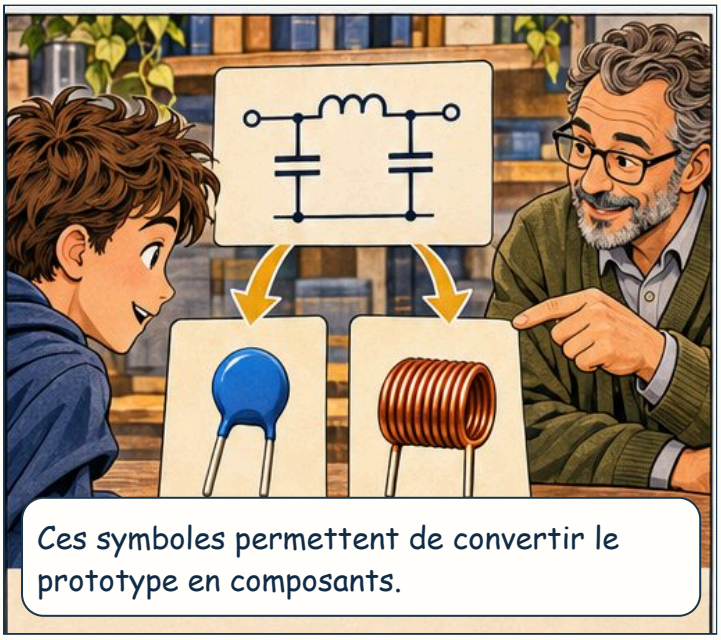
Changer d'échelle

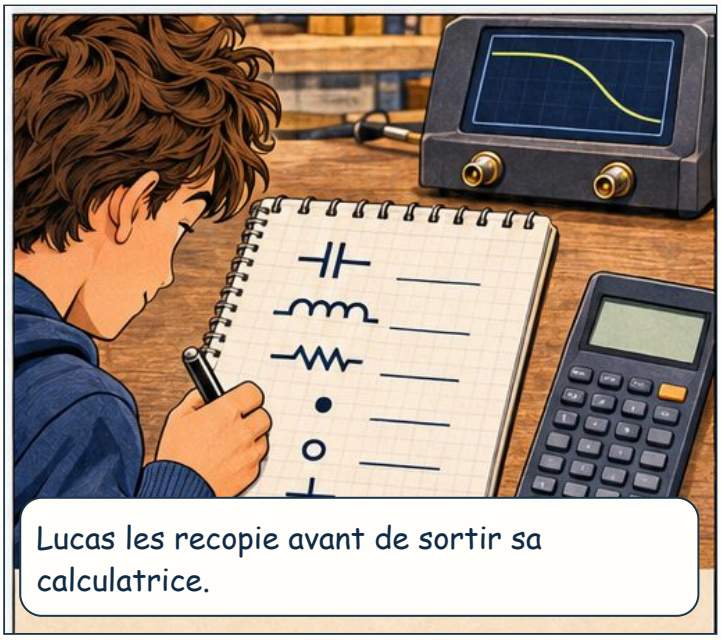








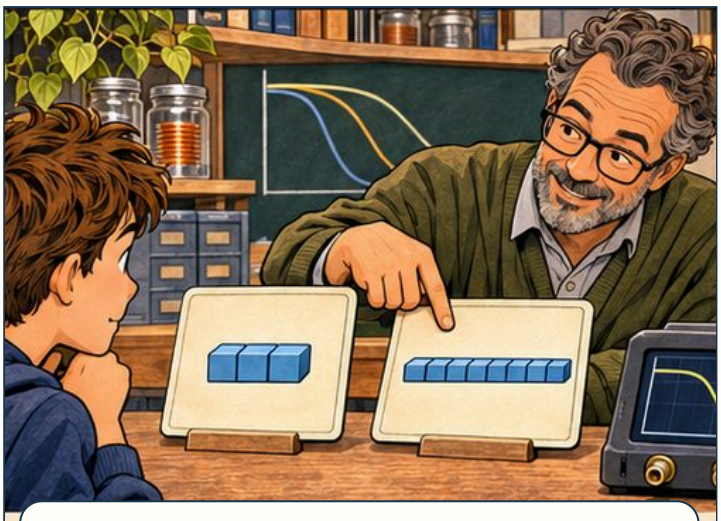




Les unités avant les nombres



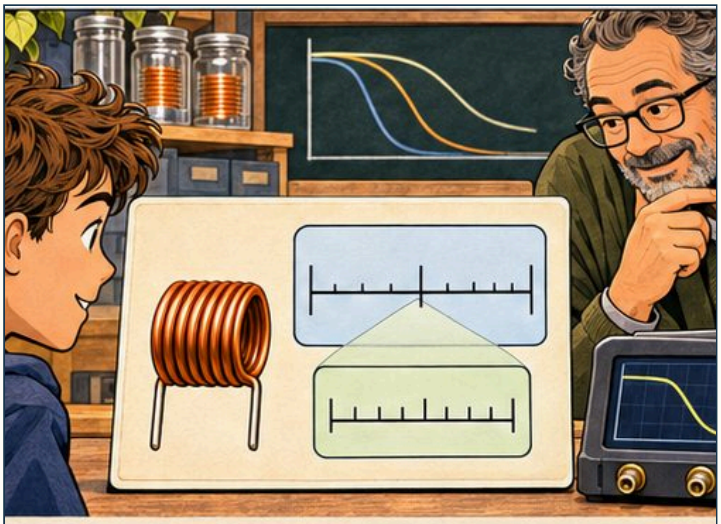
Un mégahertz vaut un million de hertz.



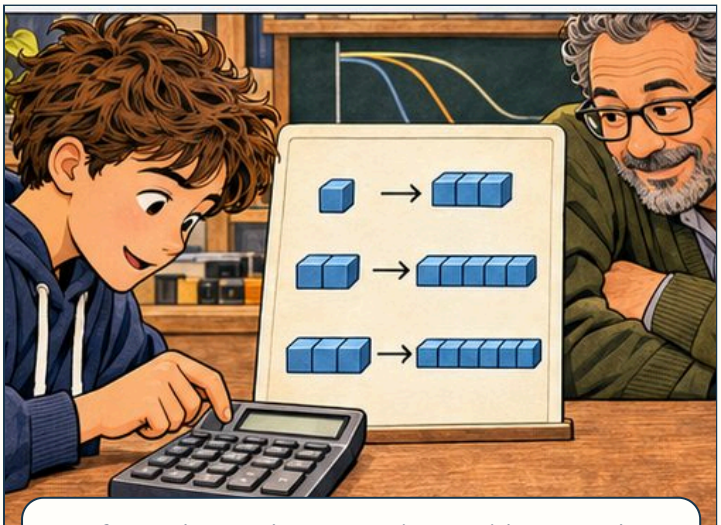
Leur coupure de 10 MHz vaut donc 10 000 000 Hz.



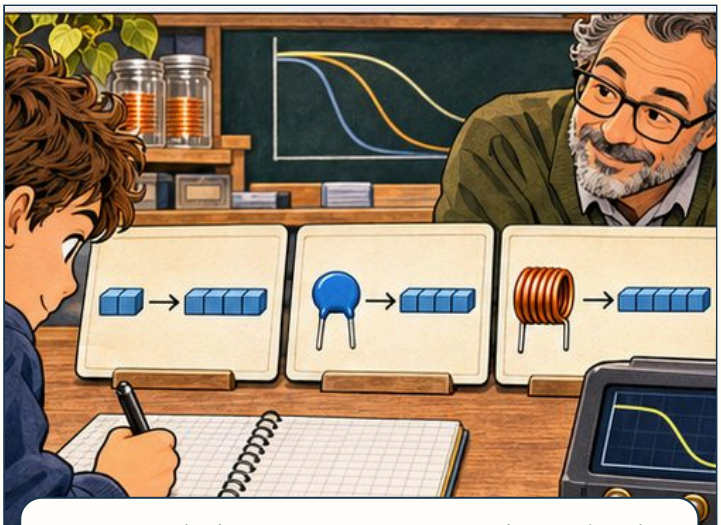
Un picofarad vaut 10^{-12} F.



Un microhenry vaut 10^{-6} H.

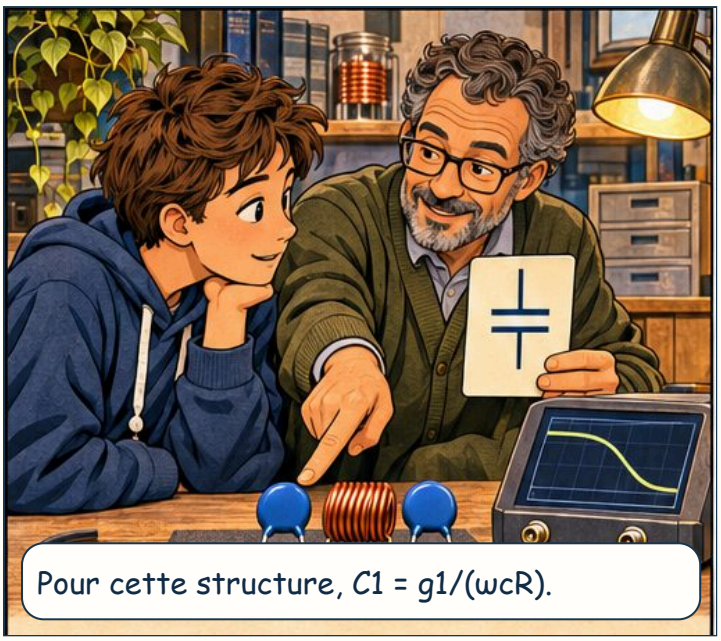


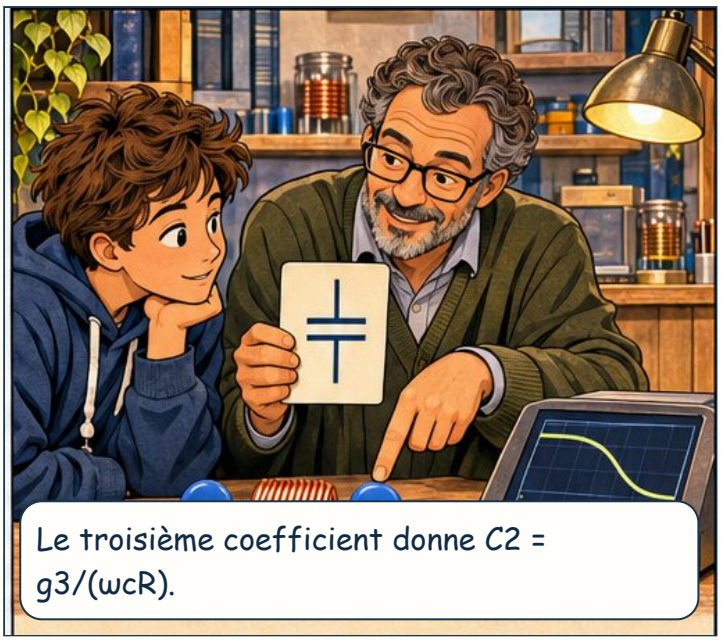
Les formules utiliseront d'abord les unités de base.

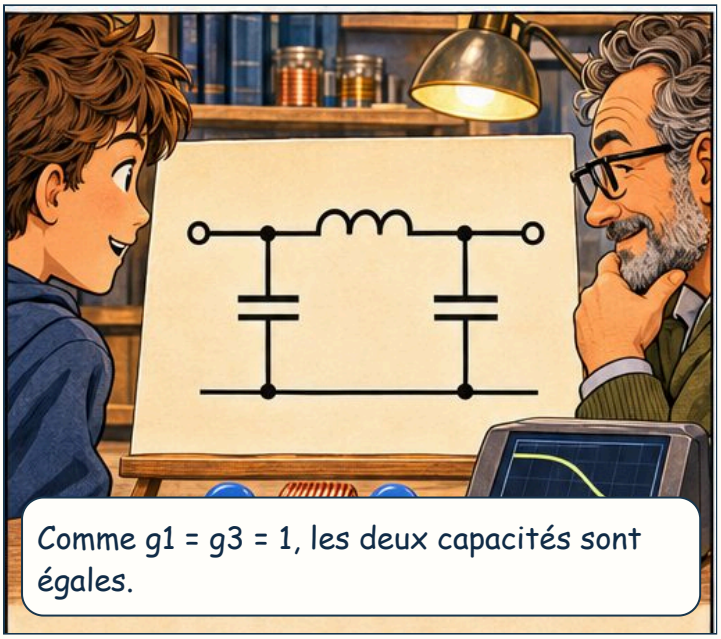


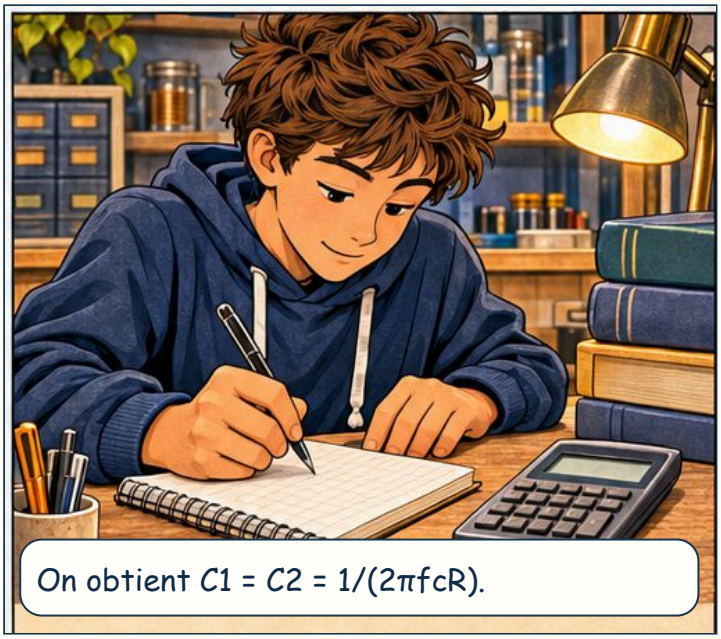
Lucas garde les conversions visibles près des calculs.

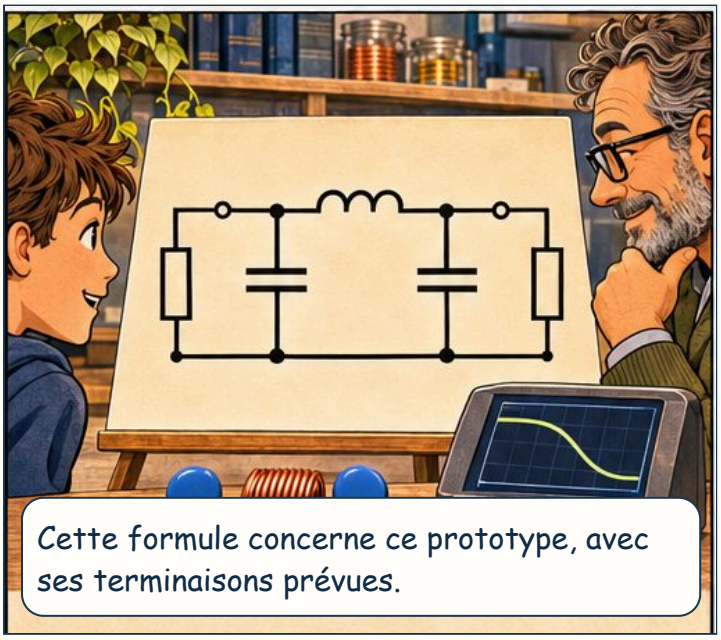
La formule des condensateurs

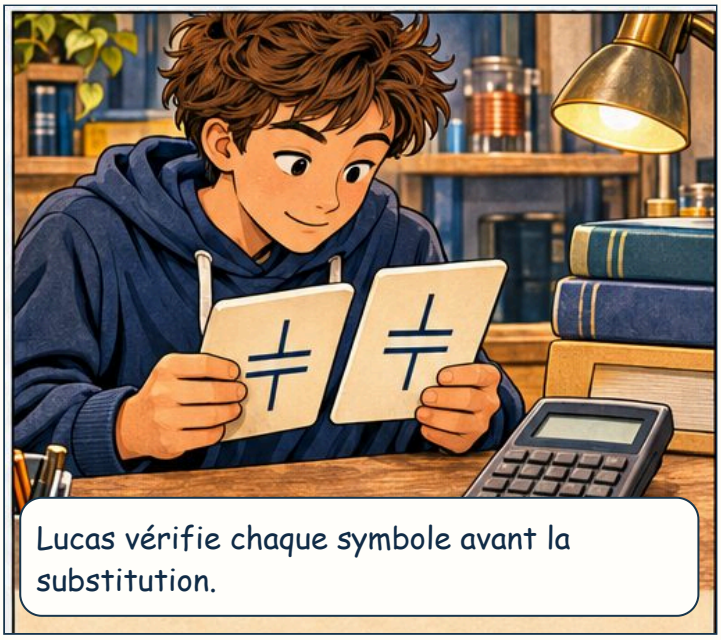




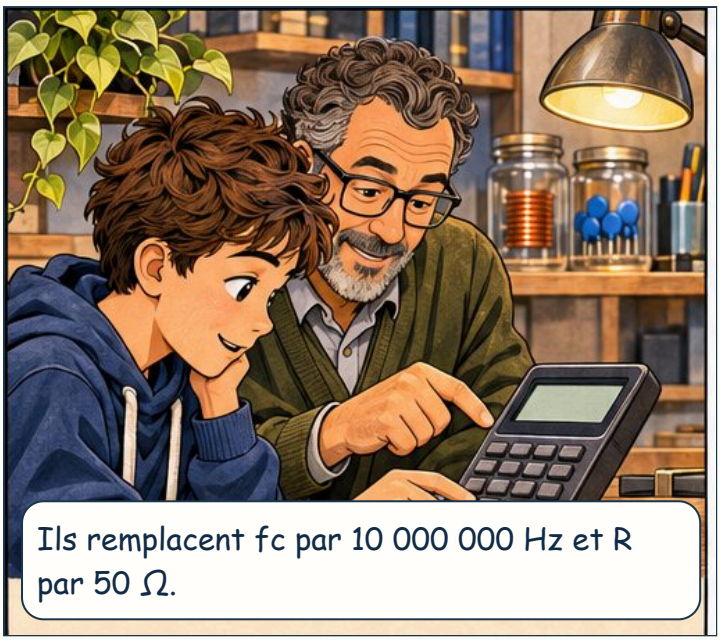








Calculer les capacités



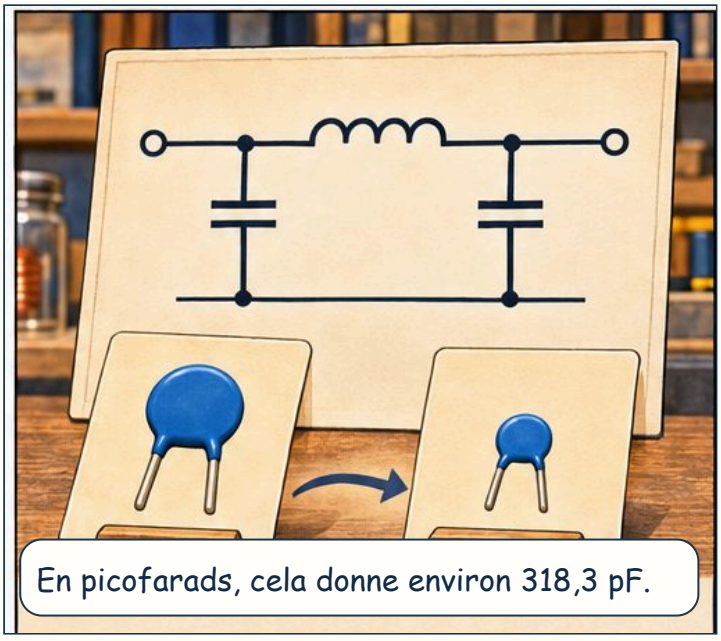
Ils remplacent fc par 10 000 000 Hz et R par 50 Ω.



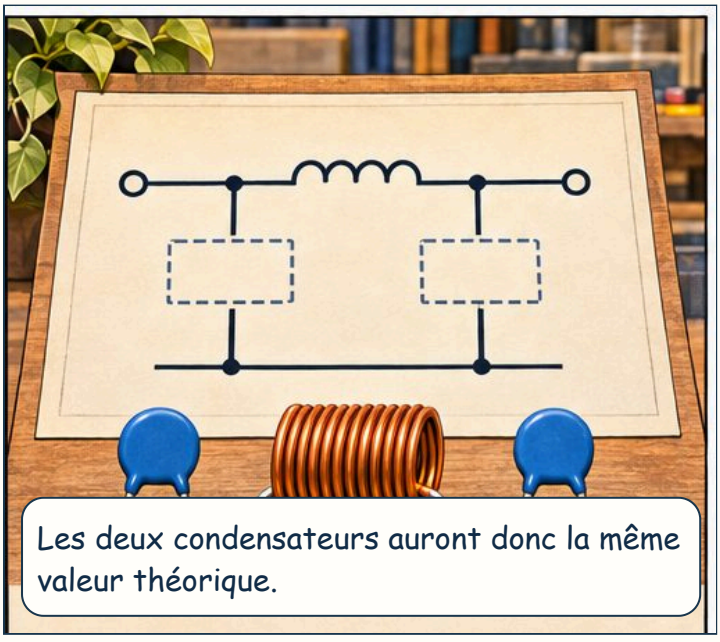
Le dénominateur vaut environ 3,142 × 10^{9}.



Chaque capacité idéale vaut environ 3,183 × 10^{-10} F.



En picofarads, cela donne environ 318,3 pF.

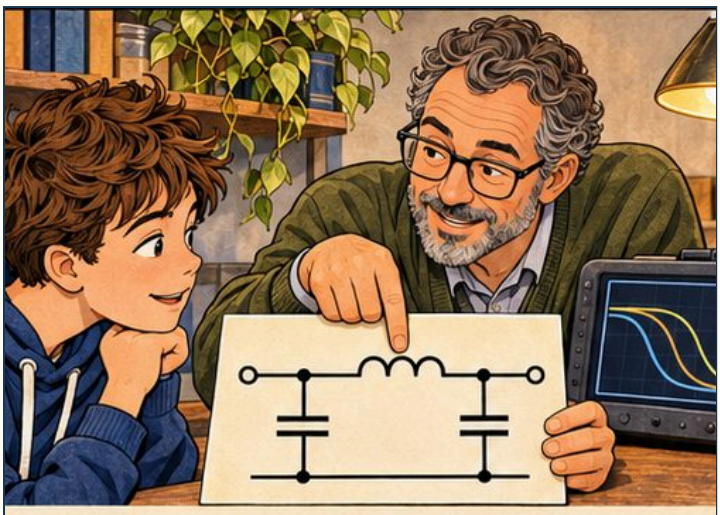


Les deux condensateurs auront donc la même valeur théorique.



Lucas inscrit le résultat sans masquer son unité.

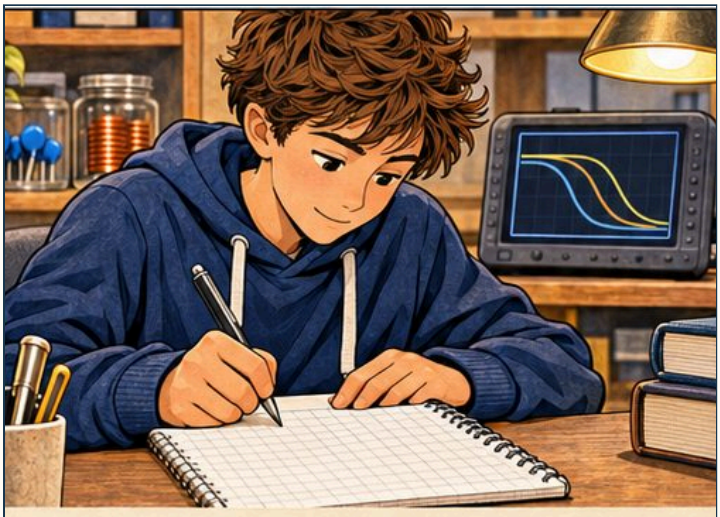
La formule de la bobine



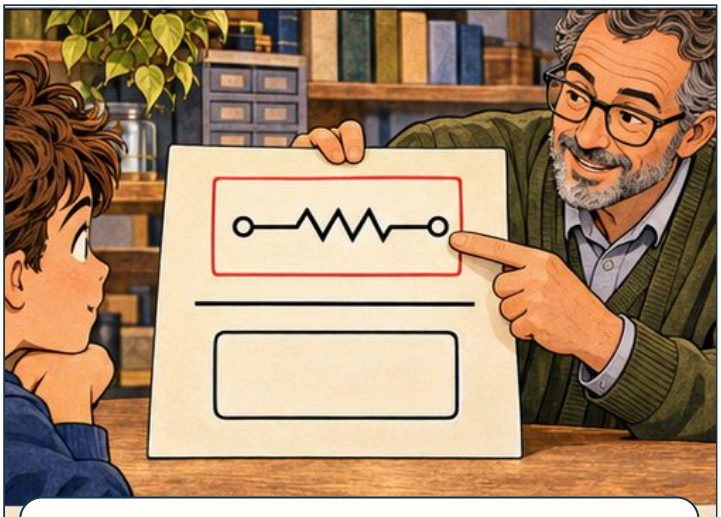
Pour la bobine série, L = g2R/ωc.



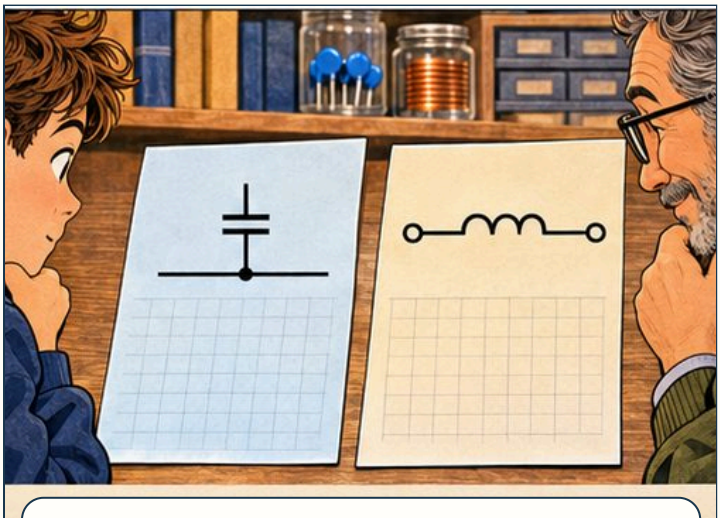
Le coefficient central vaut ici g2 = 2.



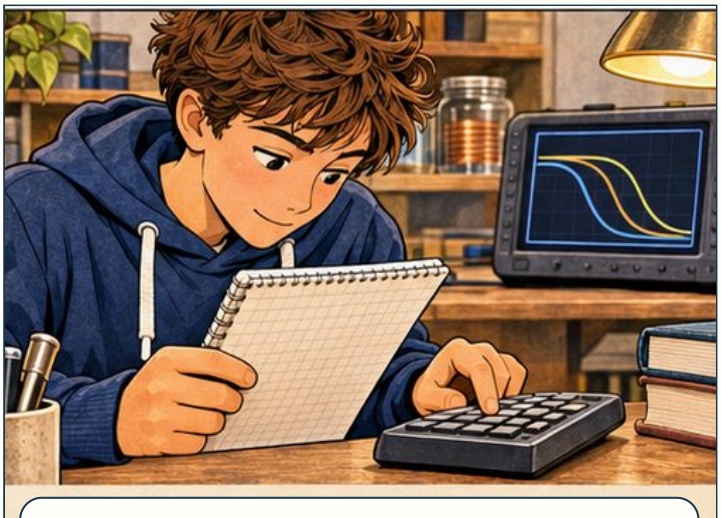
On obtient donc L = 2R/(2πfc).



La résistance de terminaison se trouve cette fois au numérateur.



Lucas compare cette formule avec celle des condensateurs.

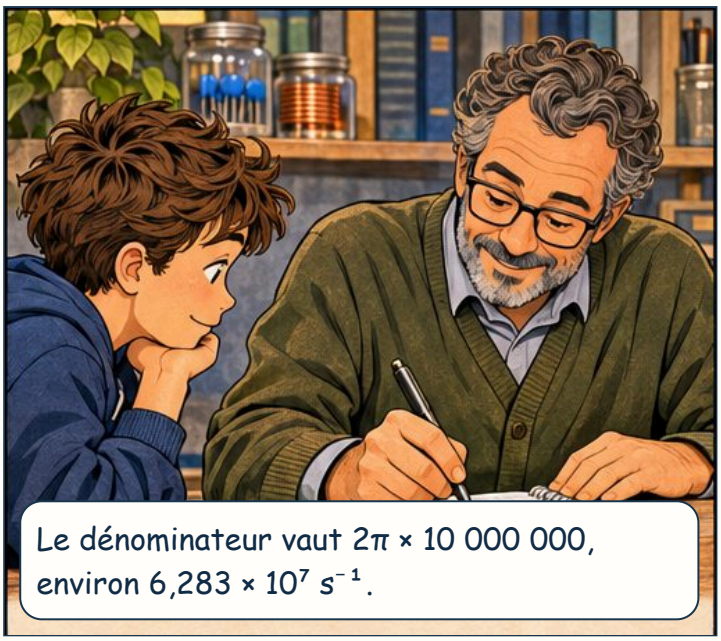


Une ressemblance visuelle ne dispense pas de relire.

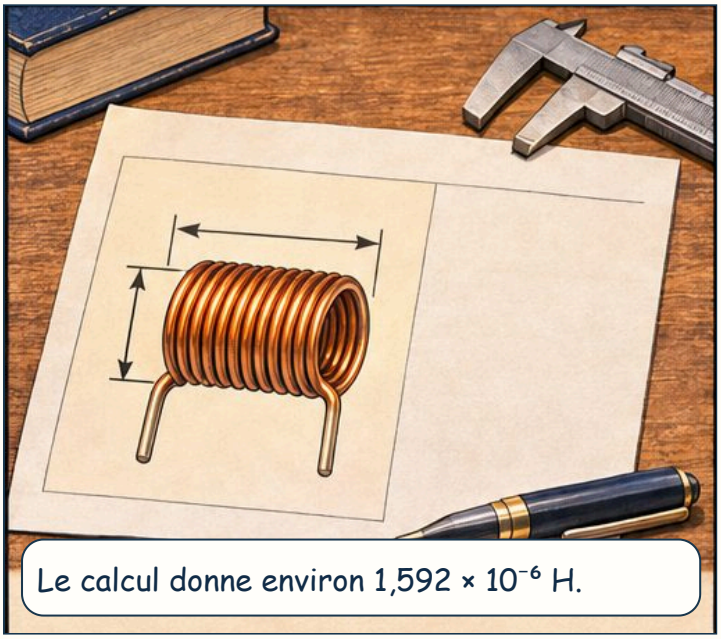
Calculer l'inductance



Le numérateur vaut 2 × 50, soit 100 Ω.



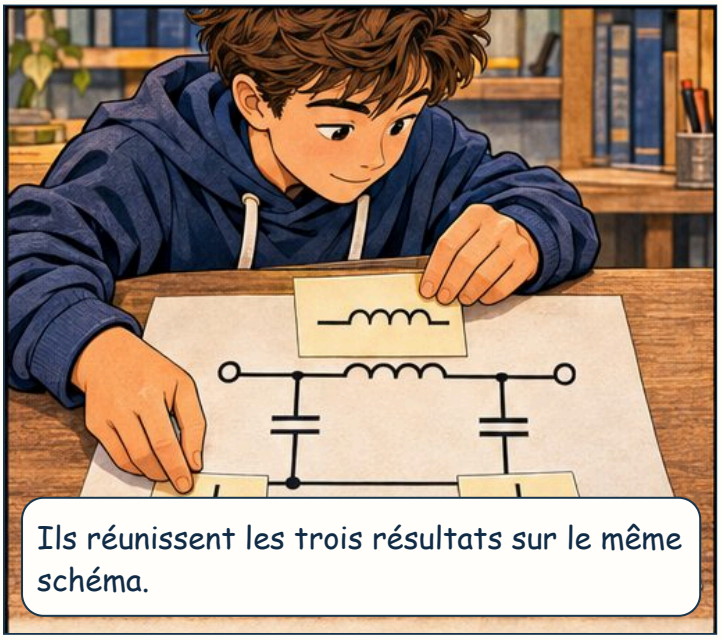
Le dénominateur vaut 2π × 10 000 000, environ 6,283 × 10^{7} s^{-1}.



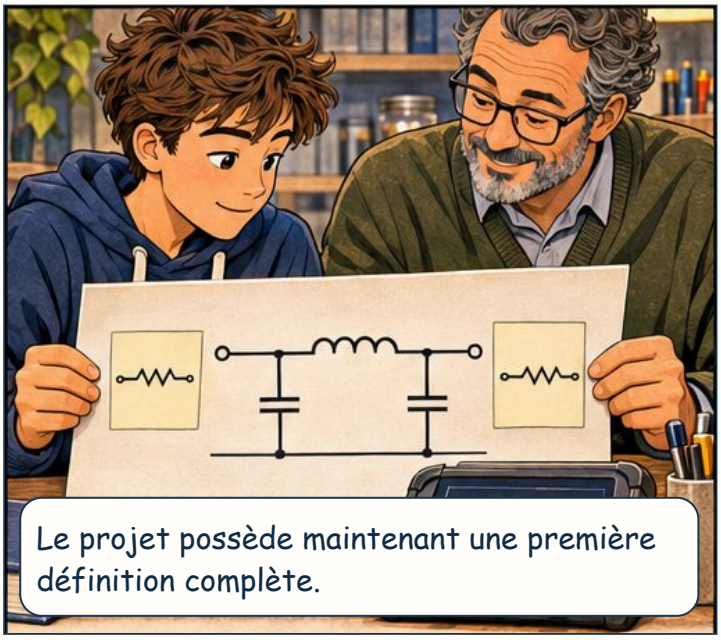
Le calcul donne environ 1,592 × 10^{-6} H.



La bobine idéale aura donc une inductance d'environ 1,59 µH.

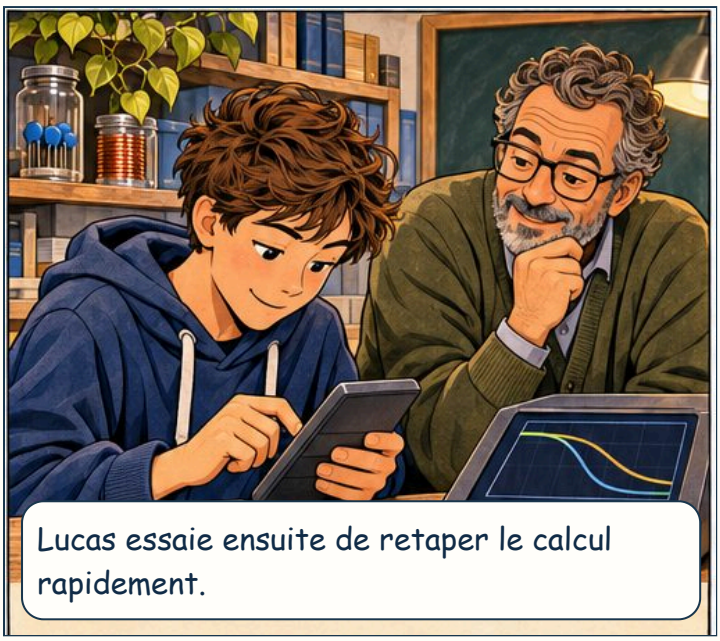


Ils réunissent les trois résultats sur le même schéma.



Le projet possède maintenant une première définition complète.

L'erreur du million



Lucas essaie ensuite de retaper le calcul rapidement.



Il saisit 10 au lieu de 10 000 000.



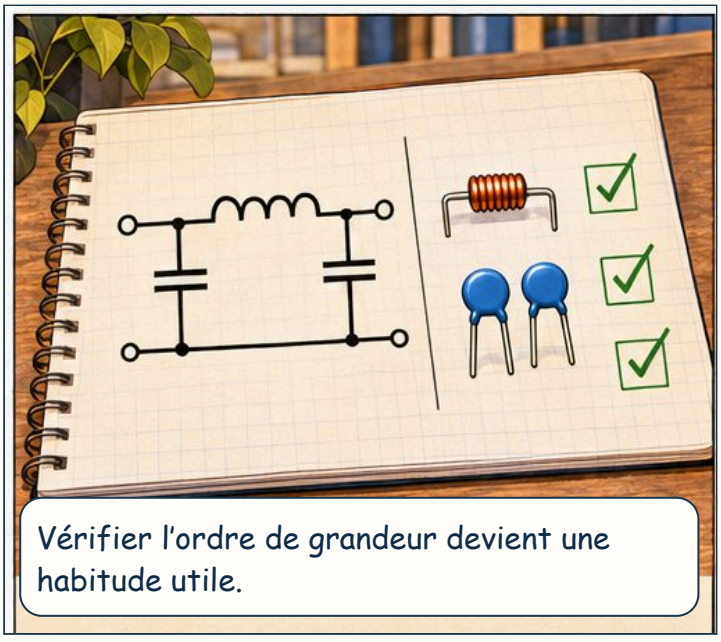
Son résultat devient un million de fois trop grand.



La comparaison avec les composants attendus révèle aussitôt le problème.



Il corrige l'entrée et refait le calcul séparément.

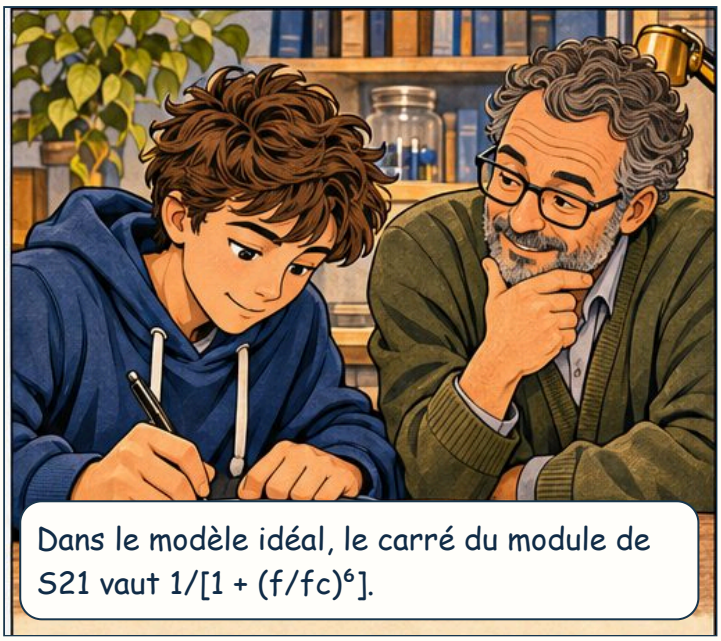


Vérifier l'ordre de grandeur devient une habitude utile.

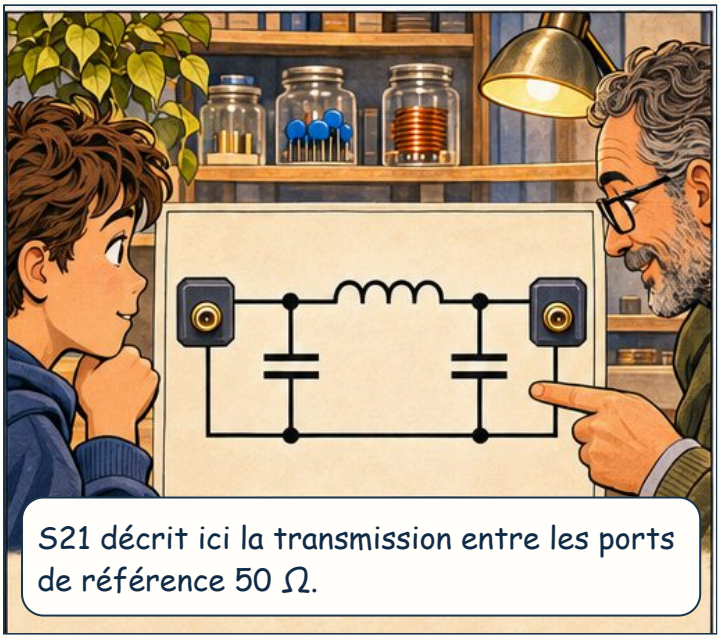
Prévoir toute une courbe



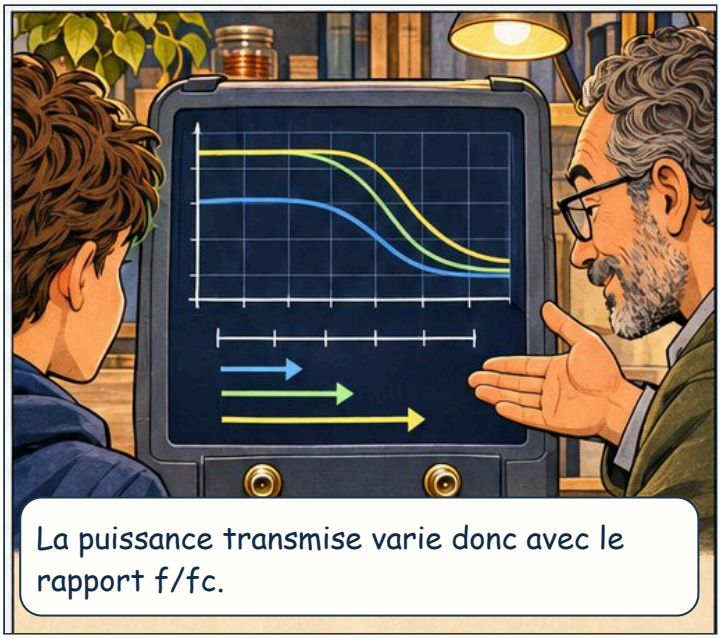
Trois valeurs ne racontent pas encore toute la réponse.



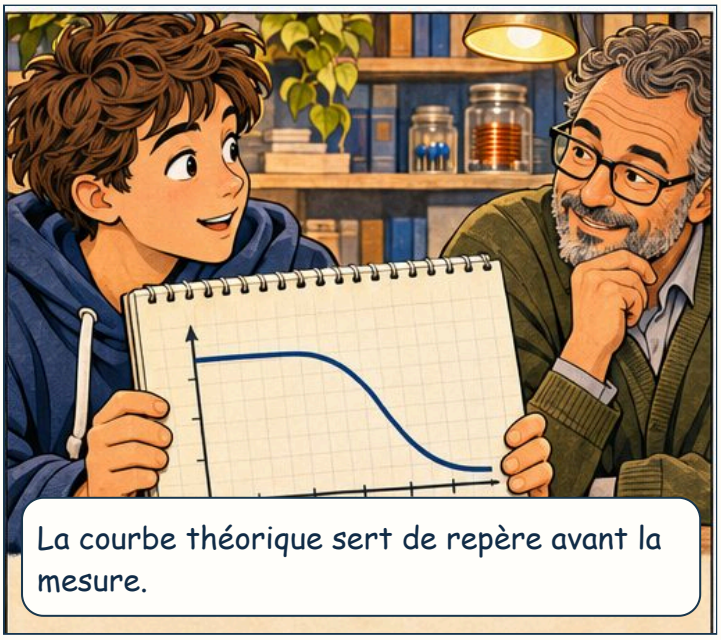
Dans le modèle idéal, le carré du module de S21 vaut $1/[1 + (f/fc)^6]$.



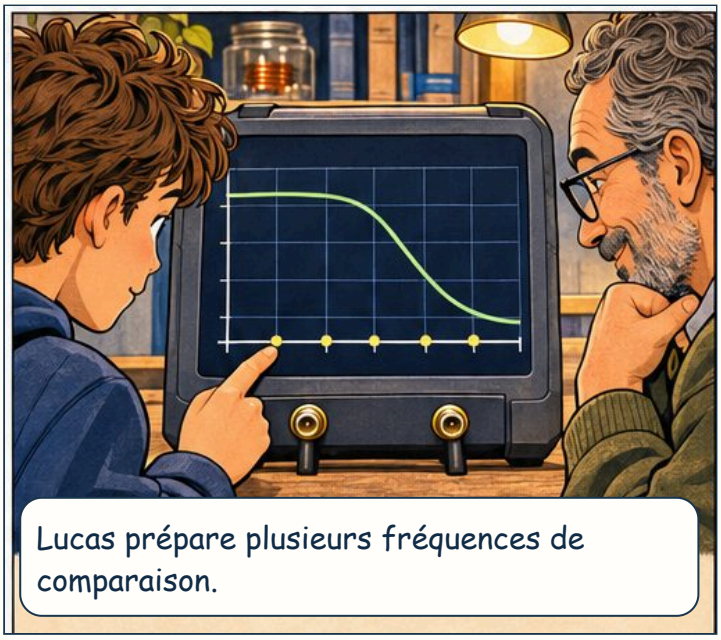
S21 décrit ici la transmission entre les ports de référence 50 Ω.



La puissance transmise varie donc avec le rapport f/fc.



La courbe théorique sert de repère avant la mesure.



Lucas prépare plusieurs fréquences de comparaison.

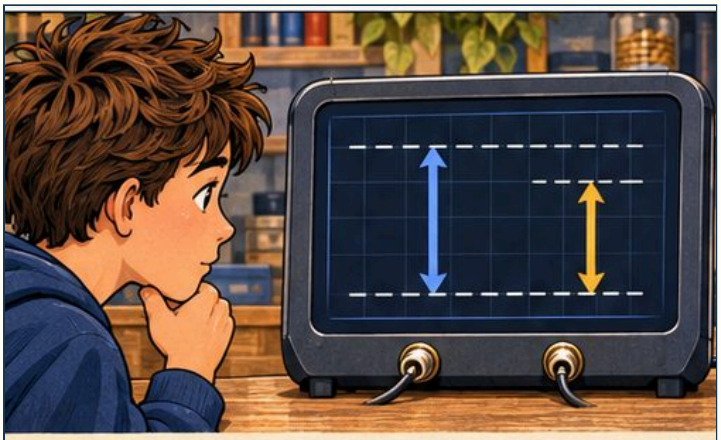
Que signifie moins trois décibels ?



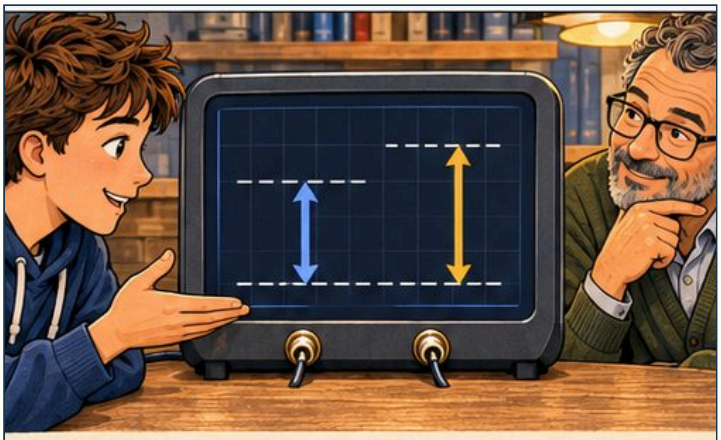
À f = fc, le rapport de puissance transmis idéal vaut 1/2.



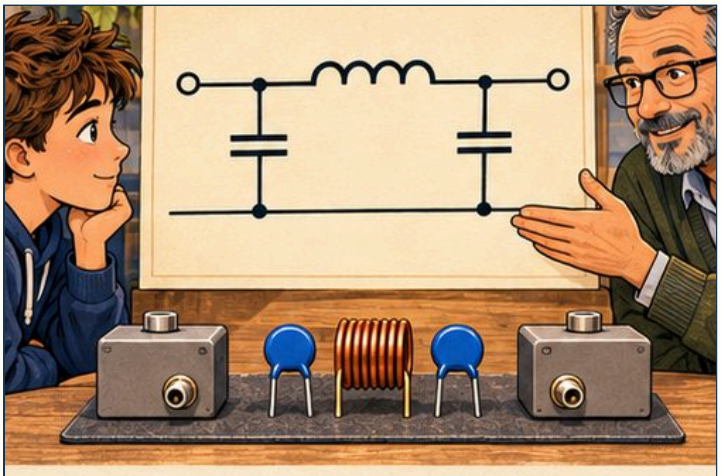
En décibels, 10 log10(1/2) donne environ −3,01 dB.



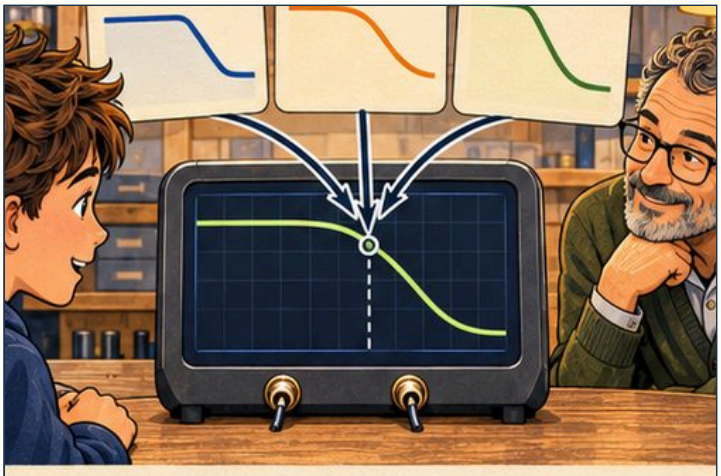
Le module de S21 vaut alors environ 0,707.



Cette amplitude ne vaut donc pas la moitié.



Le calcul utilise les références adaptées de 50 Ω.

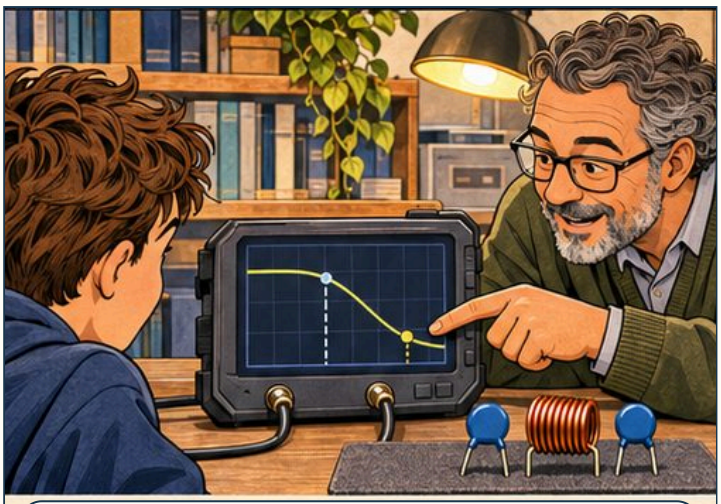


Lucas relie trois écritures du même point de courbe.

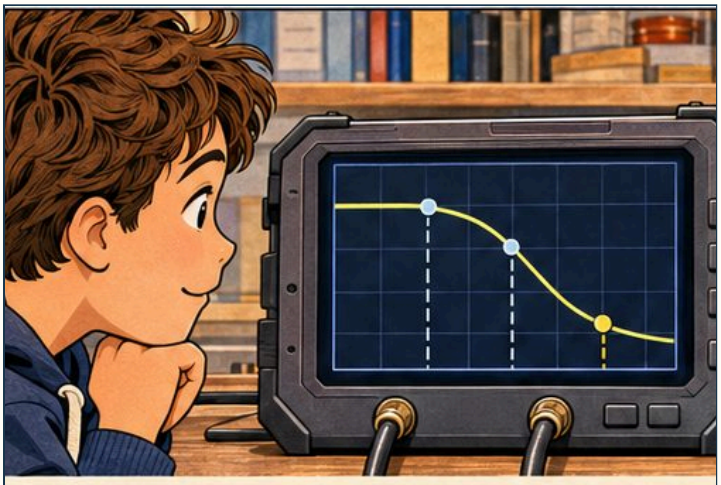
Au-delà de la coupure



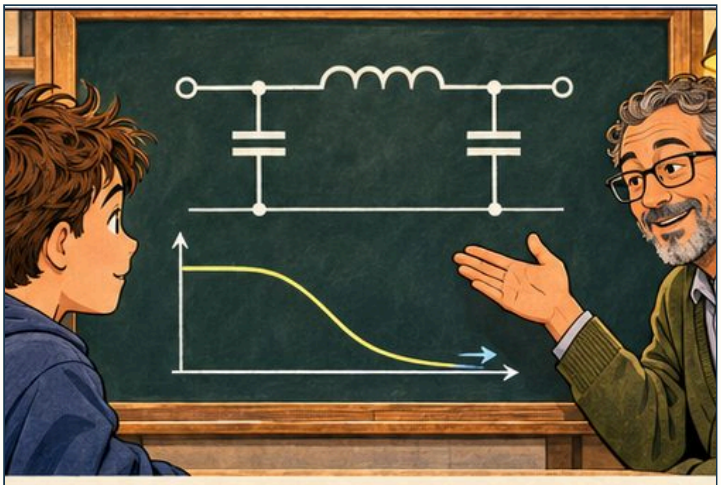
À 20 MHz, f/fc vaut 2.



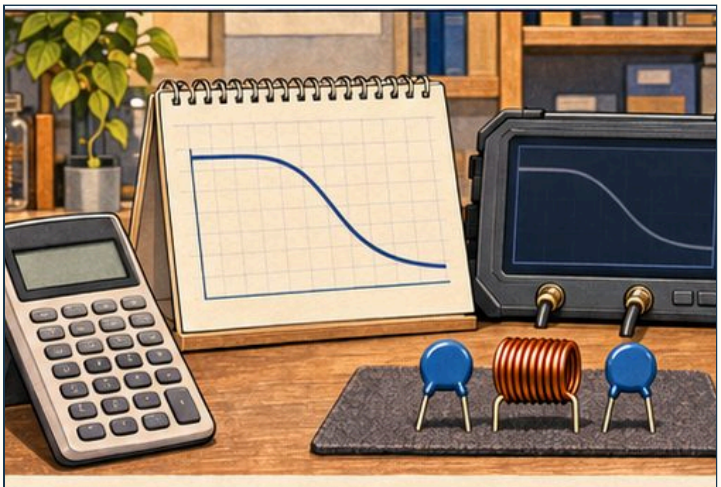
La transmission idéale devient environ −18,13 dB.



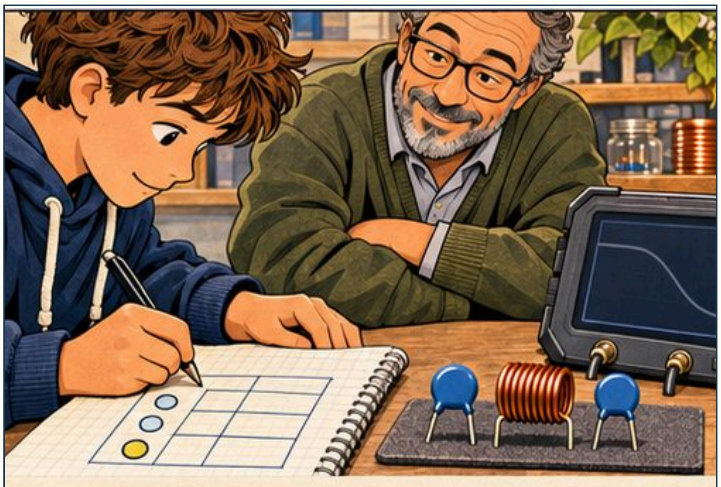
À 30 MHz, f/fc vaut 3 : environ −28,63 dB.



L'atténuation augmente, mais reste finie.

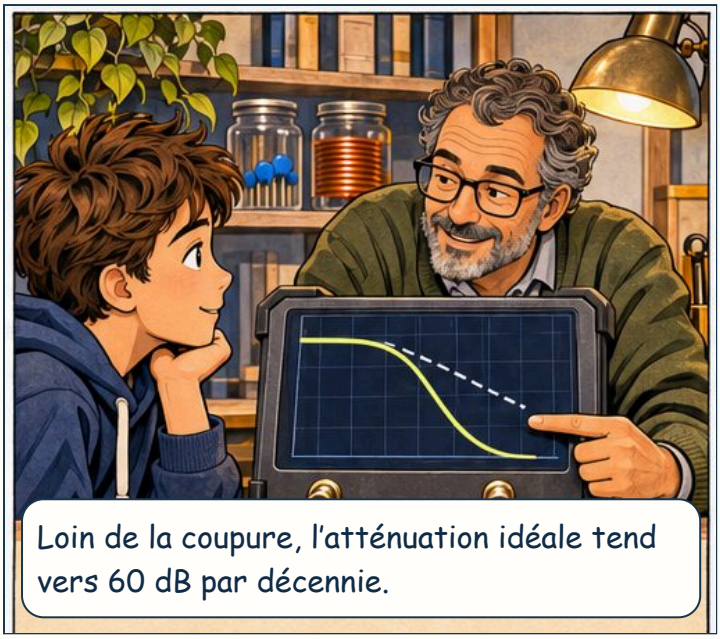


Ces nombres sont calculés, pas mesurés sur leur montage.

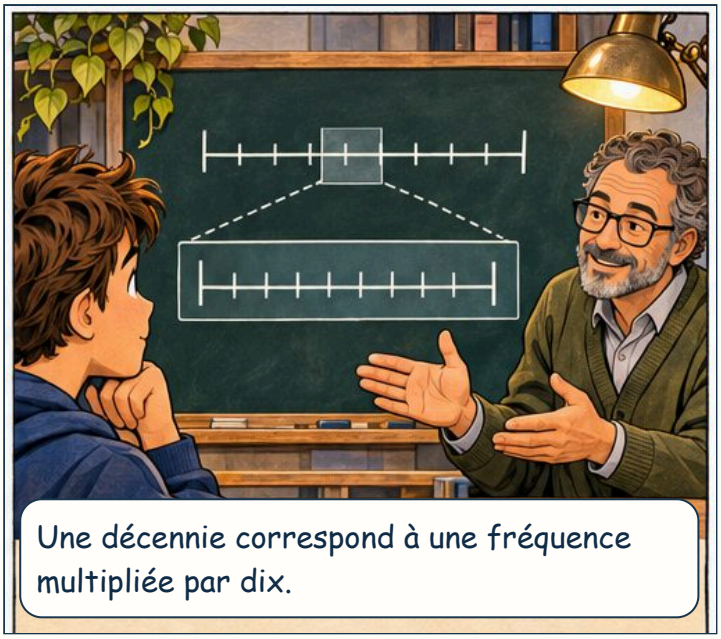


Lucas les place dans la colonne des prévisions.

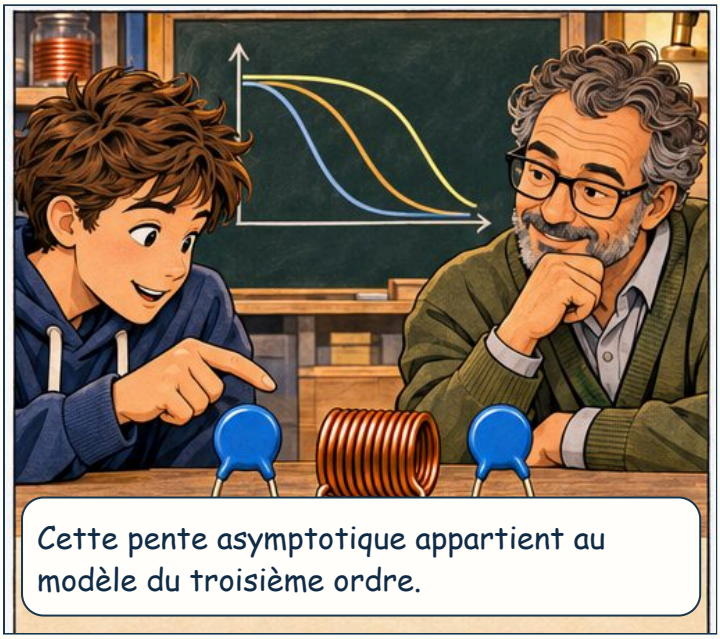
La pente n'est pas une promesse



Loin de la coupure, l'atténuation idéale tend vers 60 dB par décennie.



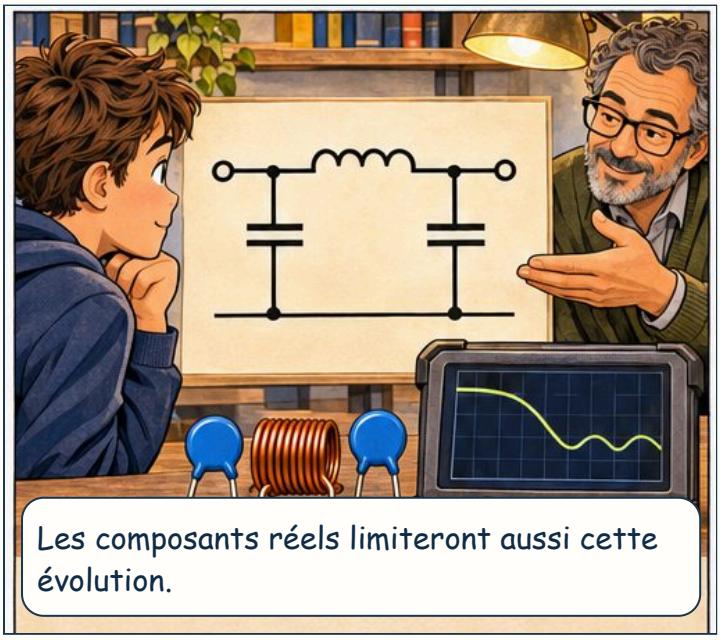
Une décennie correspond à une fréquence multipliée par dix.



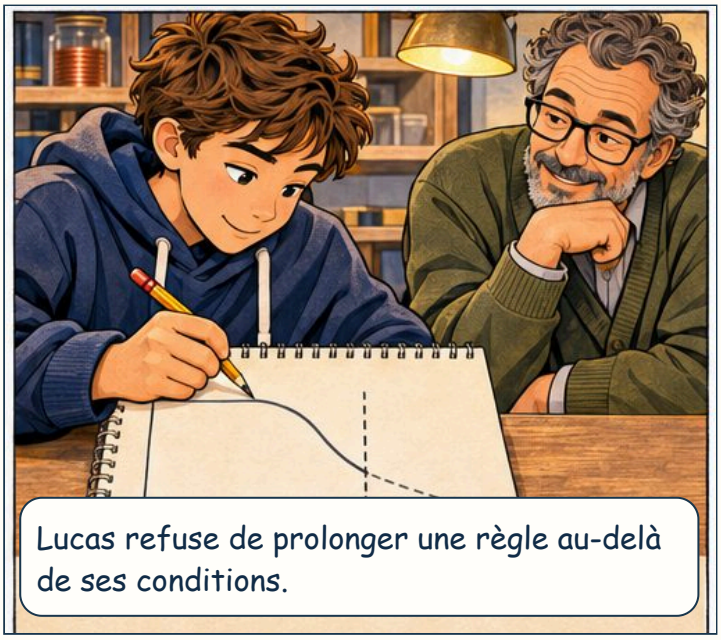
Cette pente asymptotique appartient au modèle du troisième ordre.



Près de la coupure, la courbe n'est pas une droite.

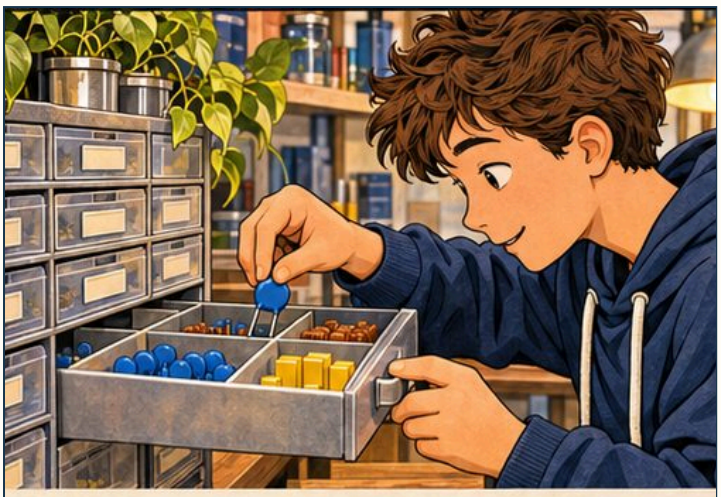


Les composants réels limiteront aussi cette évolution.

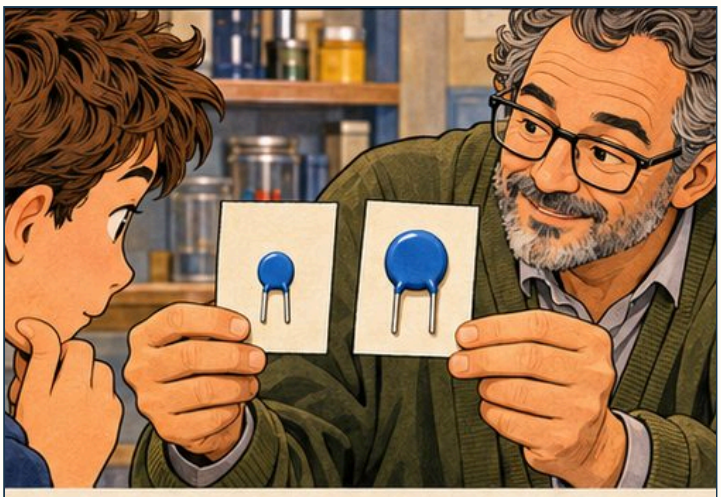


Lucas refuse de prolonger une règle au-delà de ses conditions.

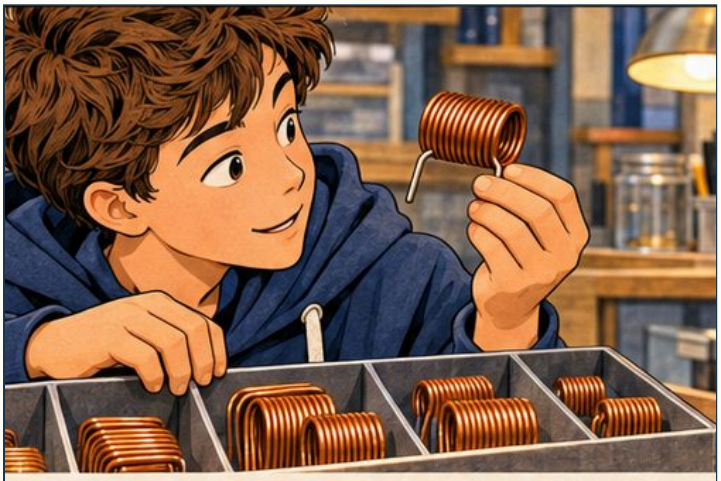
Les valeurs que l'on trouve



Le tiroir ne contient pas forcément des condensateurs de 318,3 pF.



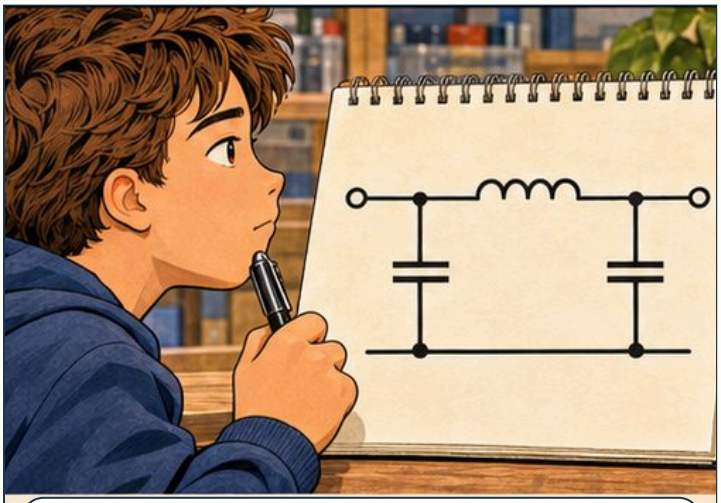
Une valeur courante de 330 pF n'est pas identique.



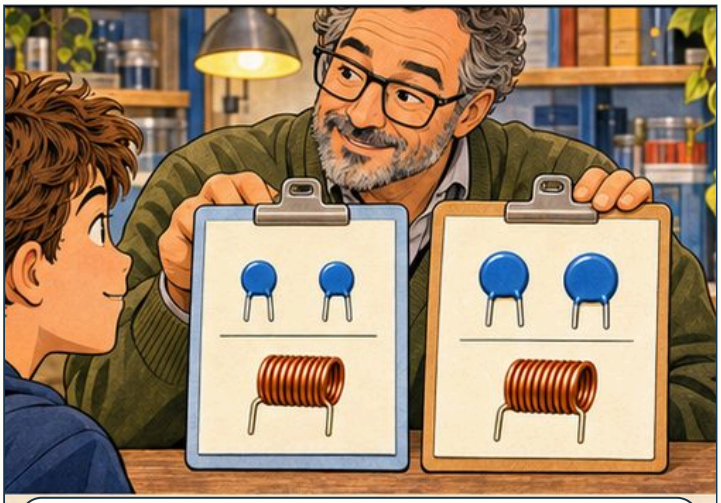
Une bobine de 1,6 µH approche leur valeur calculée.



Choisir ces valeurs impose de recalculer ou simuler la réponse.

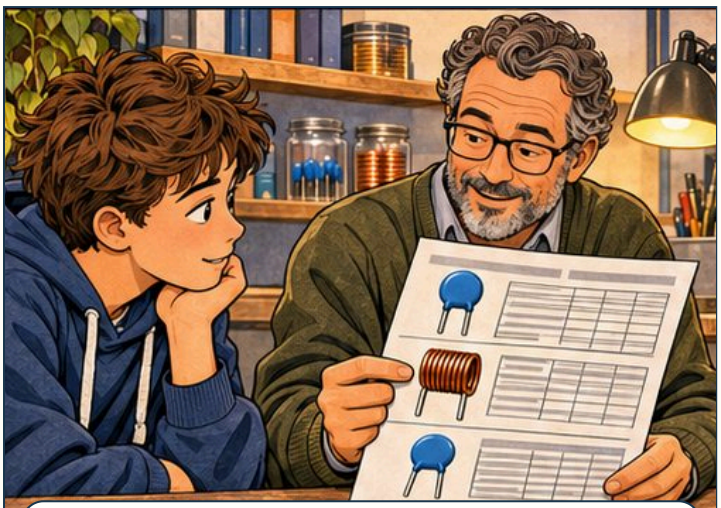


On ne baptise pas automatiquement ce montage « exactement 10 MHz ».



Lucas conserve séparément valeurs idéales et valeurs retenues.

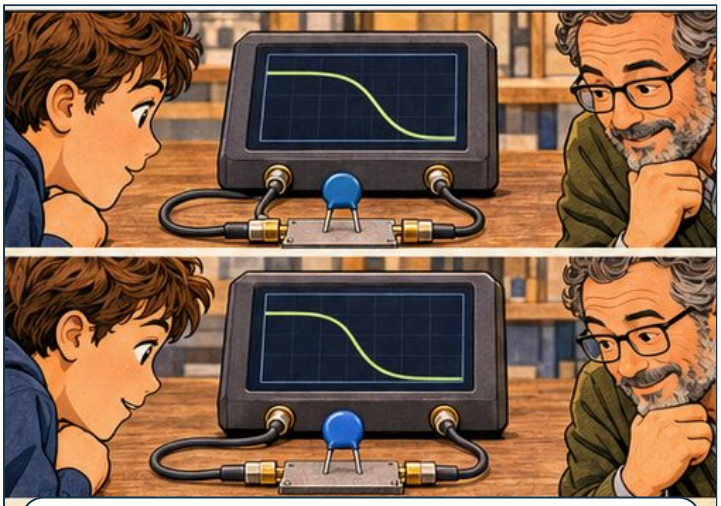
Chaque pièce a sa tolérance



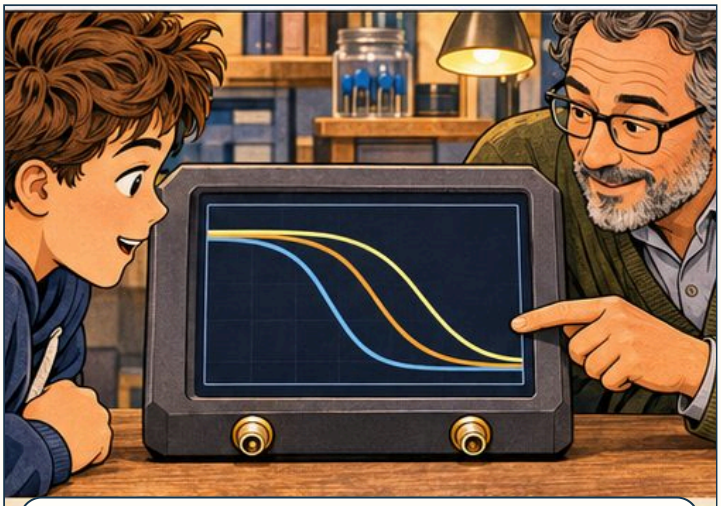
Une valeur nominale n'est pas une valeur exacte garantie.



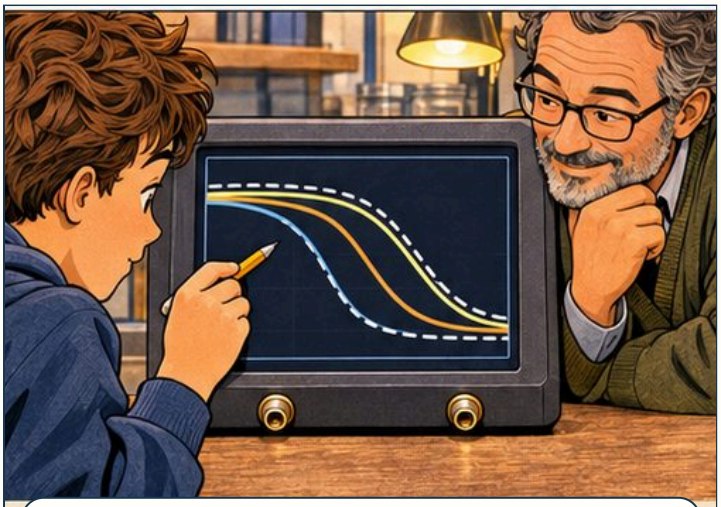
Les tolérances des condensateurs et de la bobine comptent.



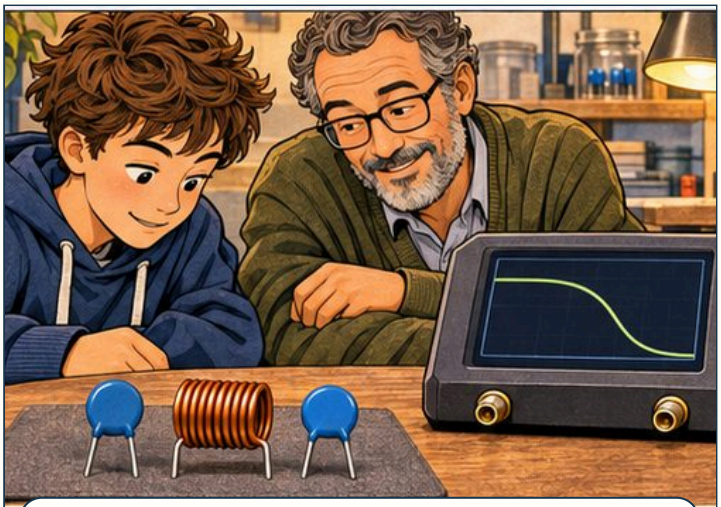
Deux composants portant la même inscription peuvent différer légèrement.



Une simulation peut explorer plusieurs combinaisons de valeurs.



Elle aide à anticiper une plage de réponses possibles.



La mesure examinera ensuite les pièces réellement utilisées.

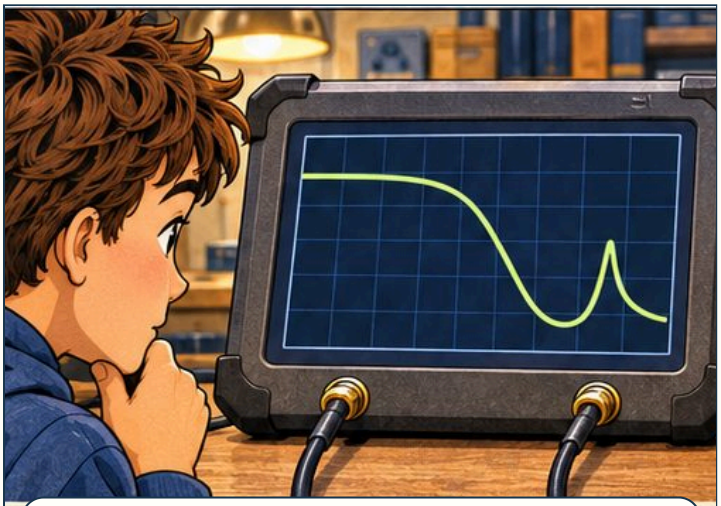
Les composants cachés



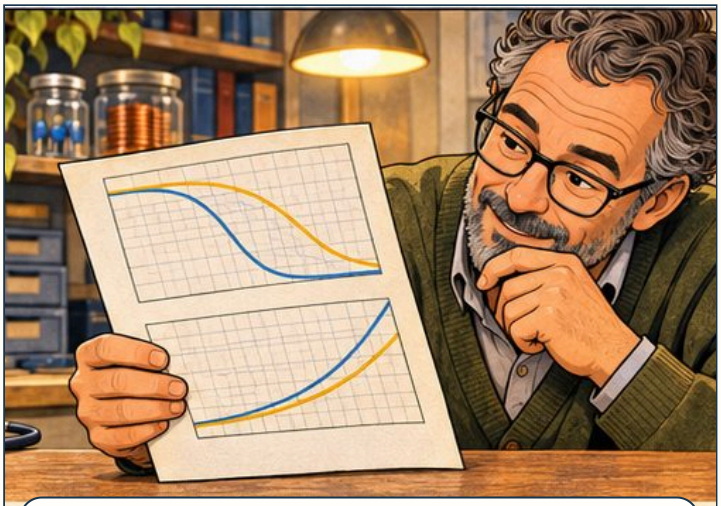
Une bobine réelle possède aussi une résistance et une capacité parasite.



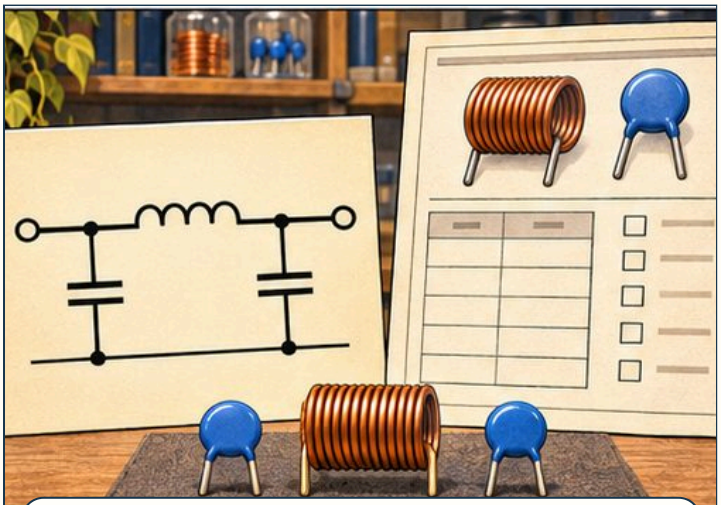
Un condensateur possède notamment des pertes et une inductance parasite.



Leur comportement change lorsque l'on approche certaines résonances.



Les fiches techniques indiquent des limites à examiner.



La valeur en picofarads ou microhenrys ne suffit donc pas.

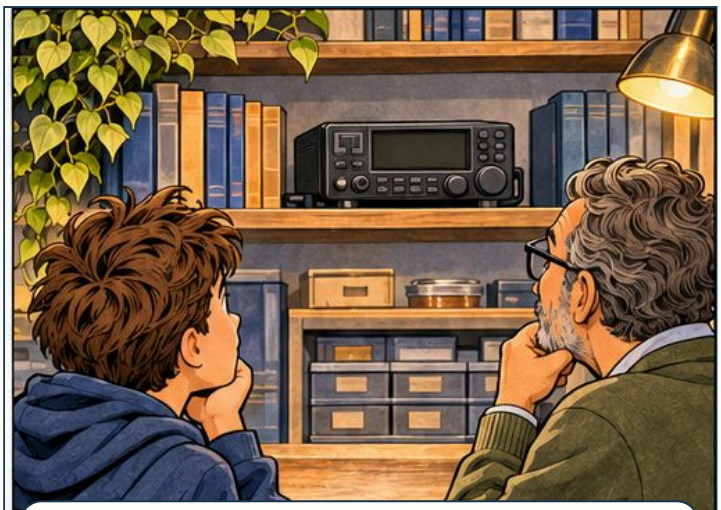


Lucas apprend à lire au-delà de la première ligne.

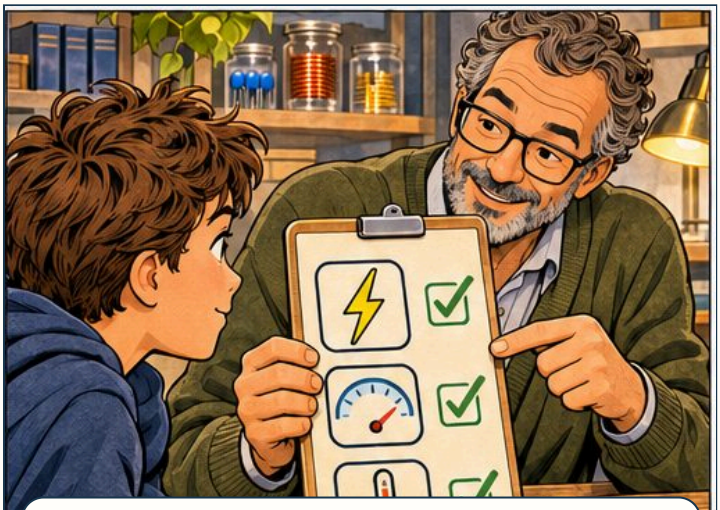
Un banc ne qualifie pas un émetteur



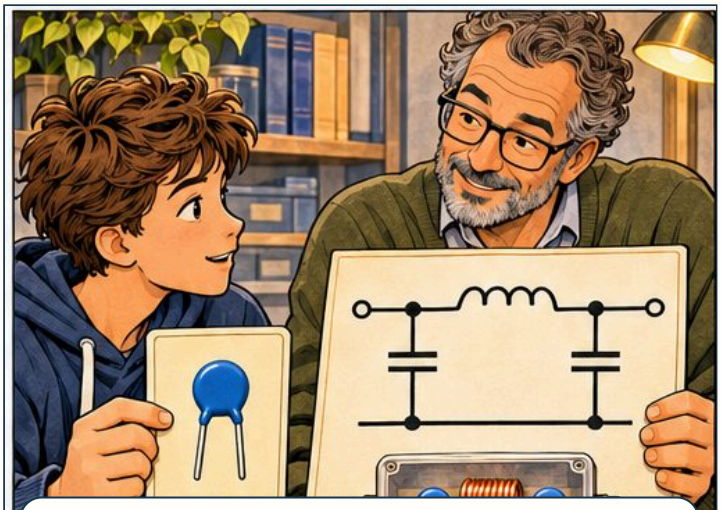
Leur démonstrateur reçoit uniquement le faible signal prévu par l'analyseur.



Une utilisation en émission demanderait d'autres vérifications.



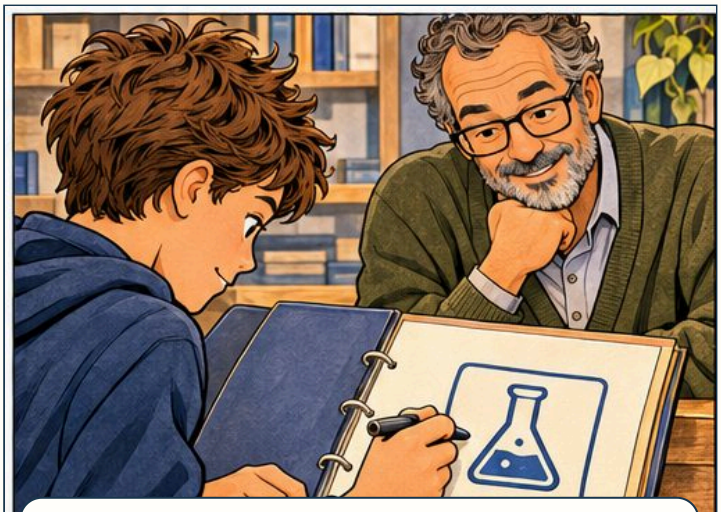
Tensions, courants, échauffement et puissance admissible devraient être étudiés.



La tenue d'un condensateur ne qualifie pas tout le filtre.

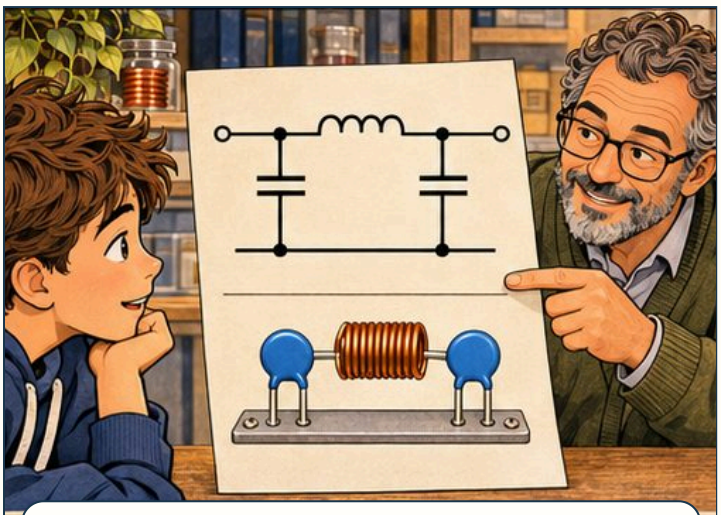


Aucun essai de puissance n'appartient à cet atelier.

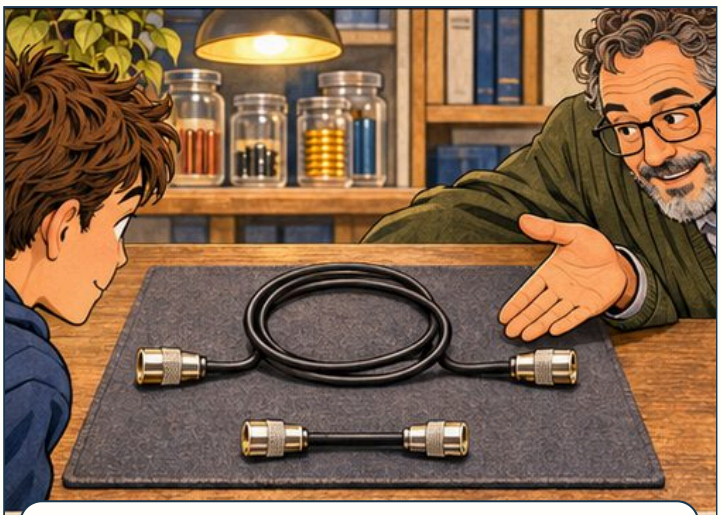


Lucas écrit clairement la limite de leur réalisation.

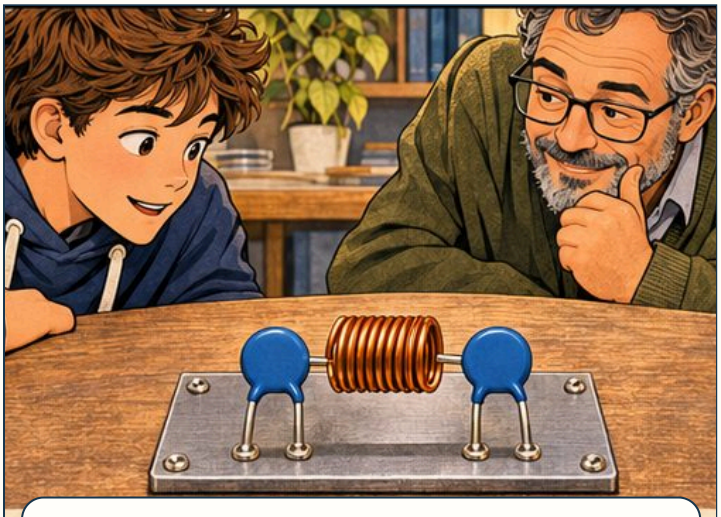
Dessiner l'implantation



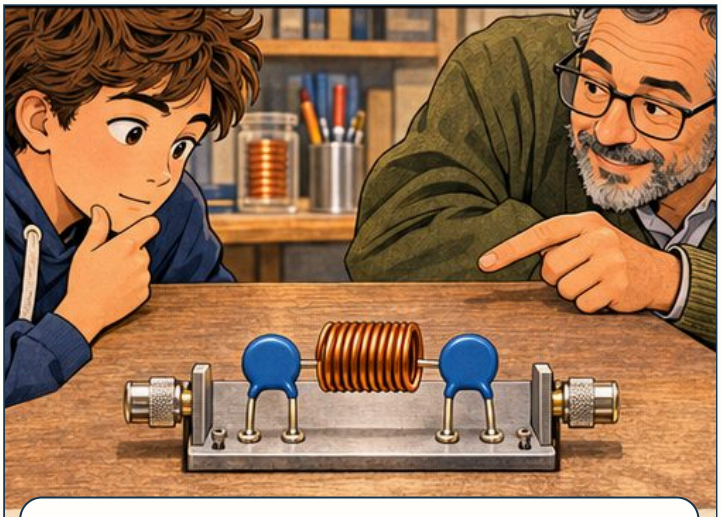
Le schéma indique les connexions, mais pas toute leur géométrie.



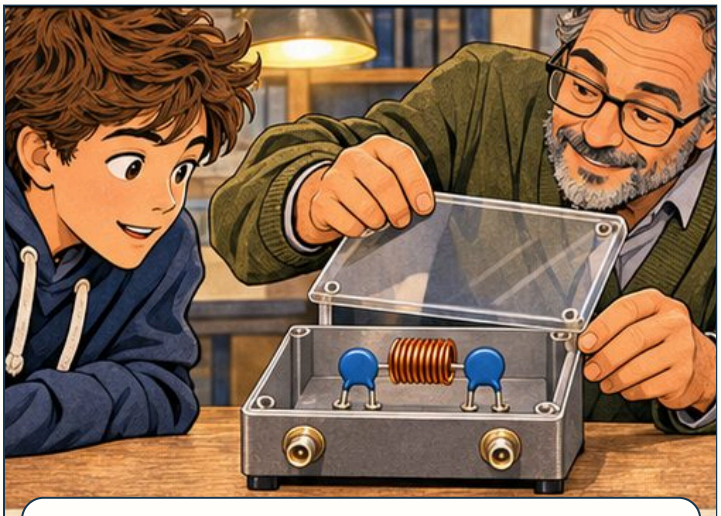
À ces fréquences, longueur des liaisons et implantation peuvent compter.



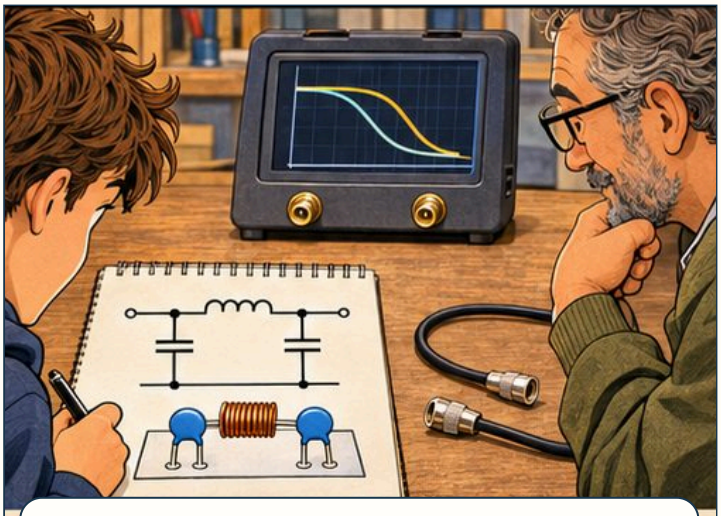
Ils prévoient une masse commune et des connexions courtes.



Ils éloignent aussi les trajets pouvant se coupler directement.



Henri prépare un démonstrateur adapté à la mesure.

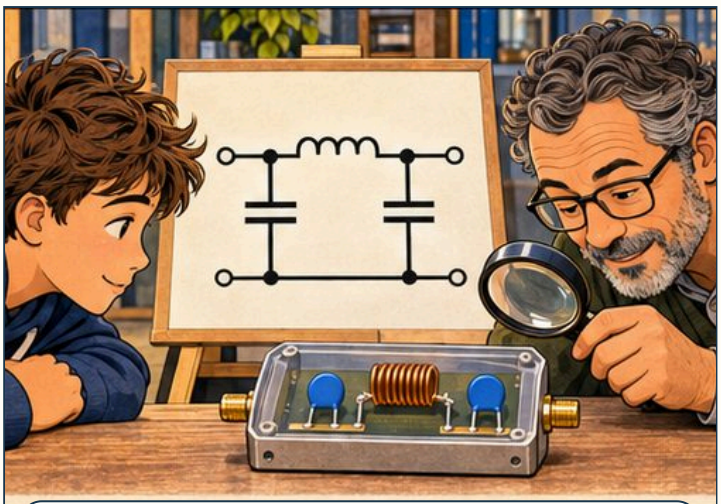


Lucas compare l'implantation au schéma, liaison après liaison.

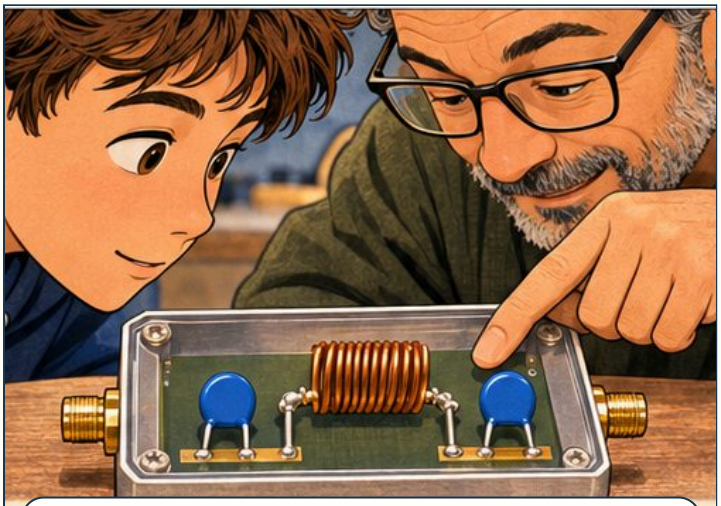
Vérifier avant de raccorder



La source de mesure reste arrêtée pendant la préparation.



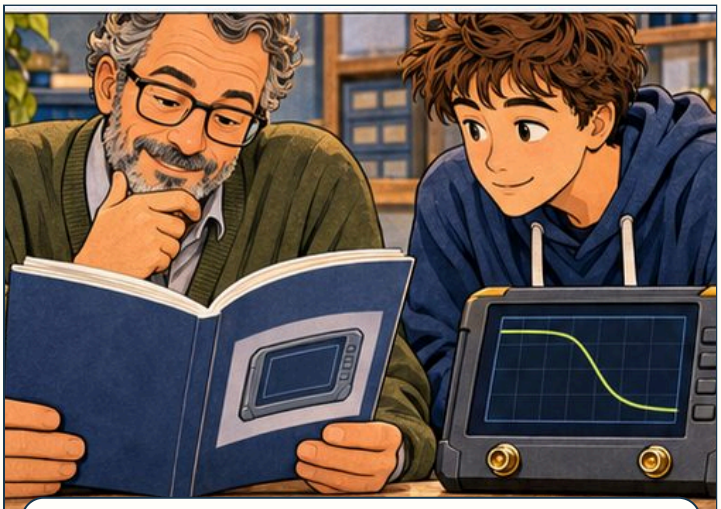
Ils contrôlent les connexions, les composants et la masse commune.



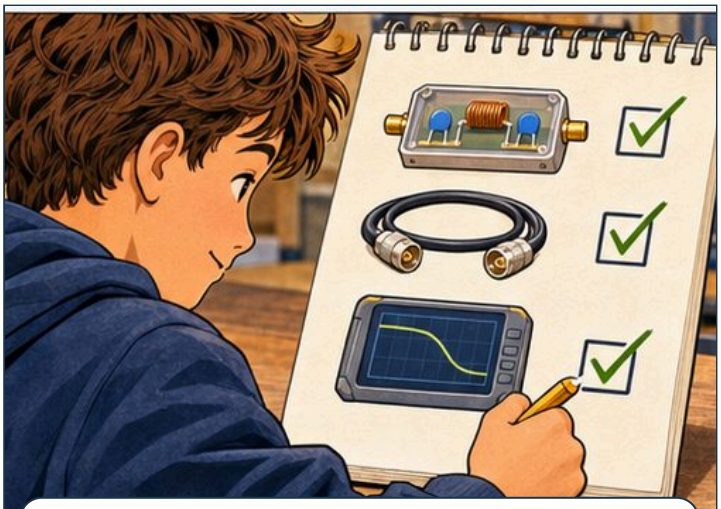
Ils recherchent court-circuit, erreur de branchement ou pièce endommagée.



Les connecteurs et les câbles sont inspectés à leur tour.



Henri vérifie les limites d'entrée de l'appareil.

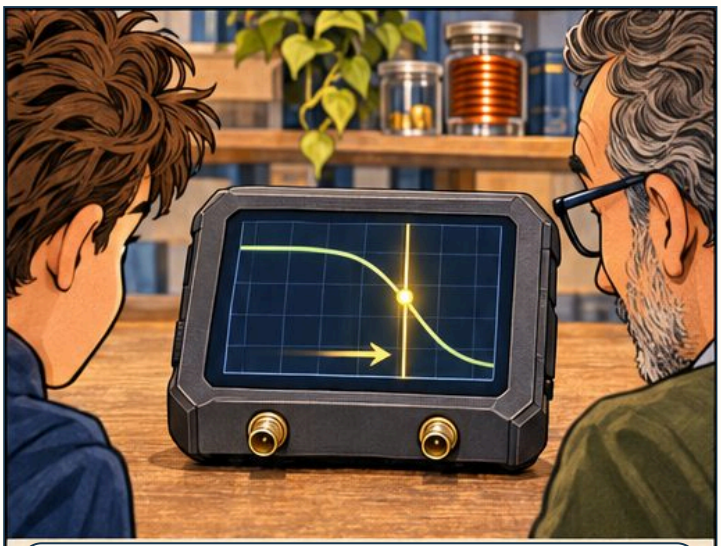


Lucas termine sa liste avant le premier balayage.

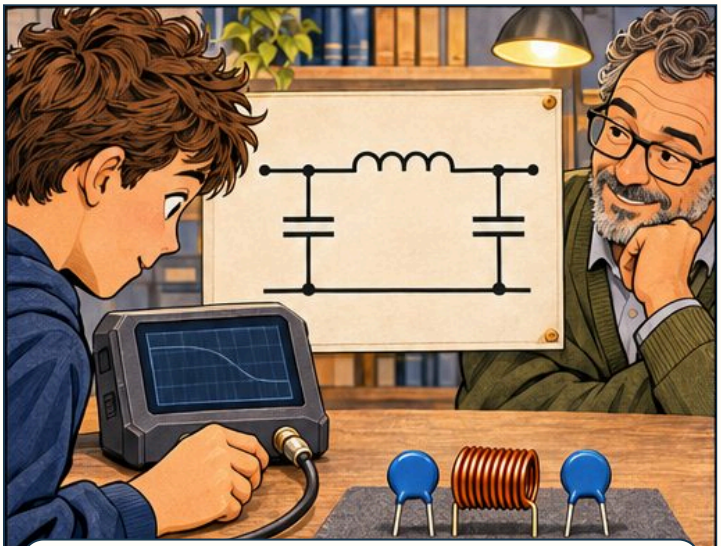
L'analyseur pose ses questions



L'analyseur de réseau envoie un faible signal connu.



Il balaie une plage de fréquences choisie.



Le port 1 alimente l'entrée du filtre.



Le port 2 observe la transmission à sa sortie.



Le paramètre S21 permet de suivre cette transmission.



Les ports fournissent les références de 50 Ω prévues.

Étalonner au bon endroit



Les câbles et les adaptateurs participent à la mesure.



Ils suivent donc la procédure d'étalonnage prévue par l'appareil.



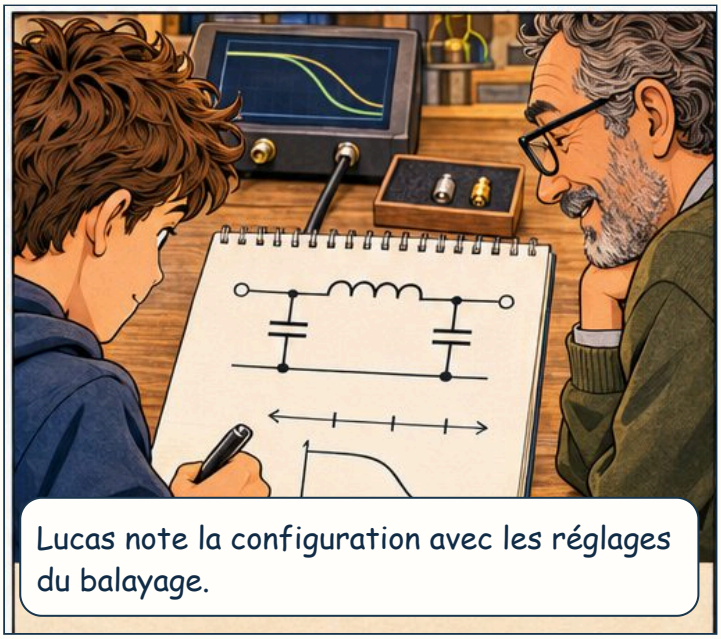
Les étalons adaptés sont raccordés selon sa notice.



Les plans de référence sont placés aux extrémités des câbles.



Après l'étalonnage, ces connexions sont conservées autant que possible.



Lucas note la configuration avec les réglages du balayage.

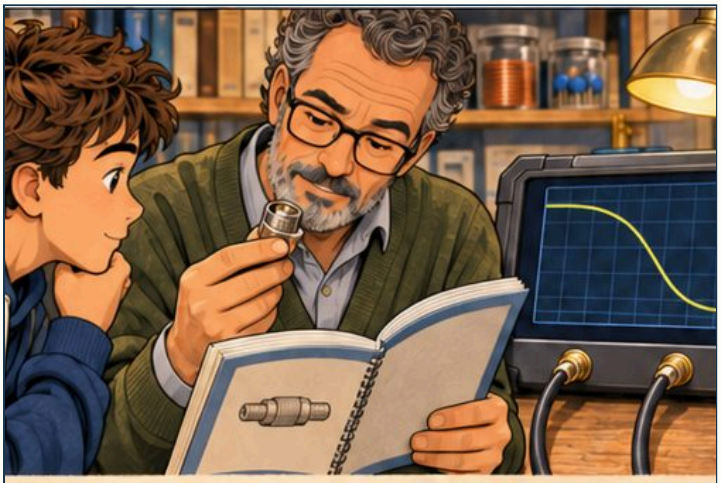
Contrôler le chemin direct



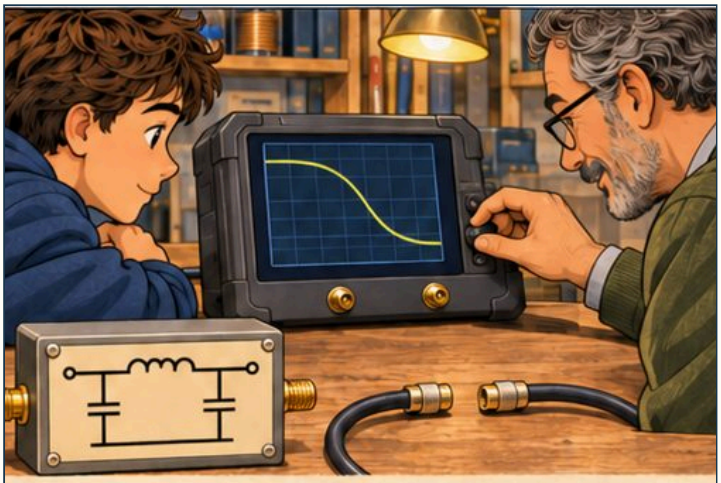
Avant le filtre, une liaison directe permet de vérifier la référence.



La transmission attendue doit être compatible avec cette liaison.



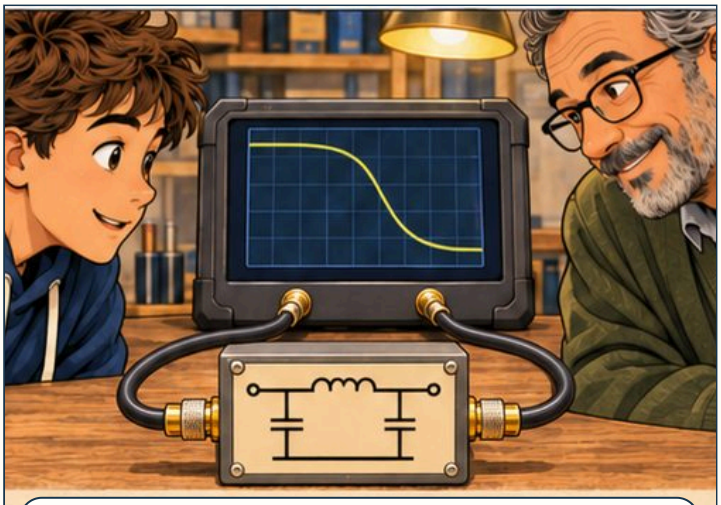
Une anomalie impose d'examiner câbles, étalonnage et réglages.



On ne corrige pas un filtre pour cacher un défaut du banc.



La vérification terminée, la source est arrêtée pour le raccordement.

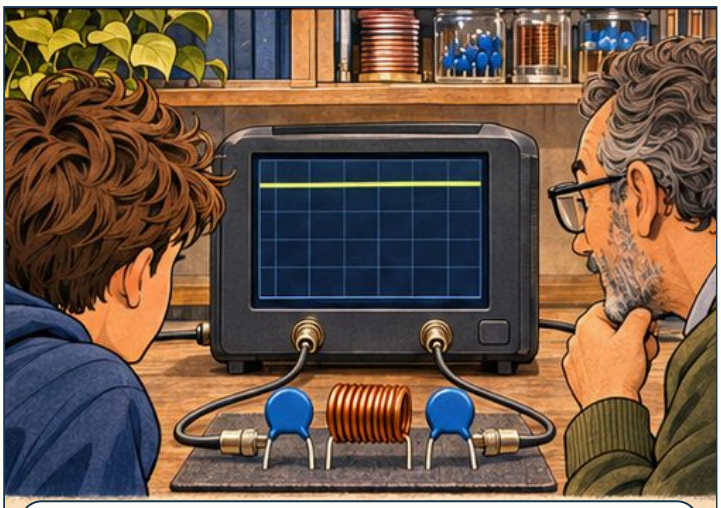


Le filtre prend ensuite sa place entre les deux câbles.

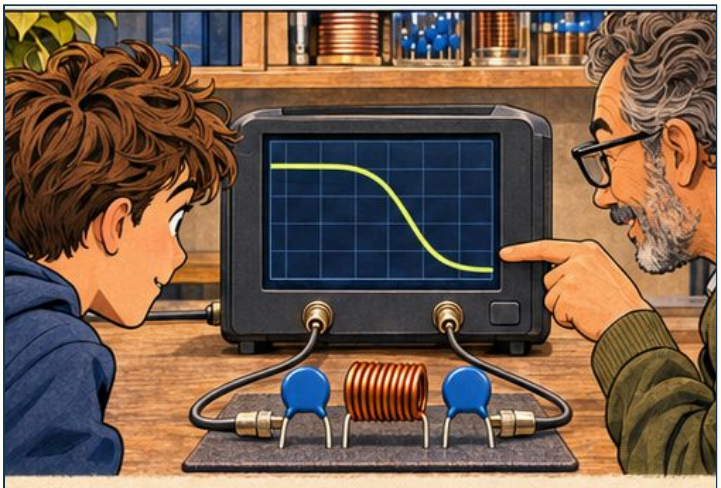
Le premier balayage



Ils lancent un balayage couvrant la bande utile et la transition.



La trace reste plus haute aux basses fréquences.



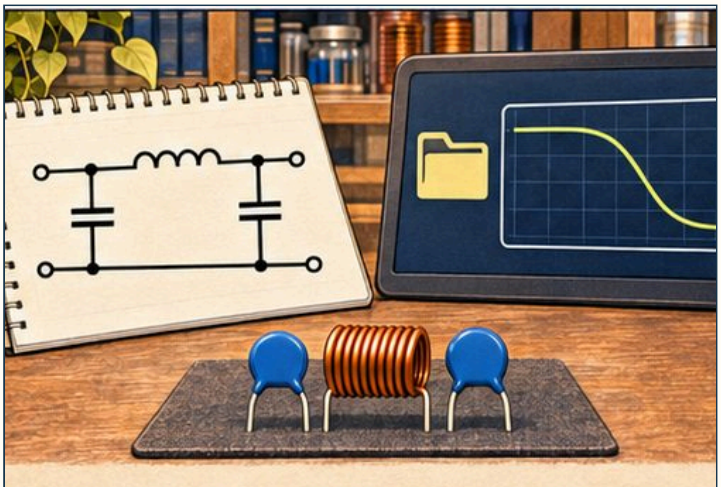
Elle descend ensuite quand la fréquence augmente.



Lucas retrouve l'allure prévue, sans supposer une égalité parfaite.

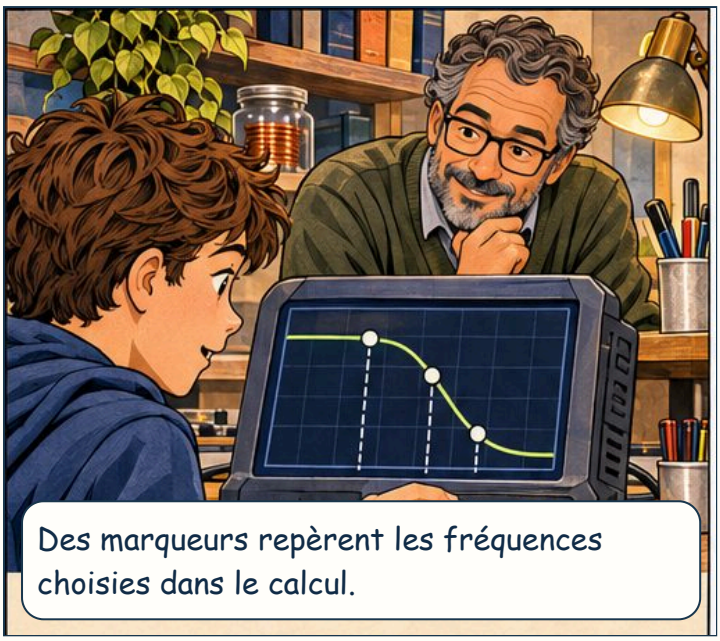


Il sauvegarde la trace et les conditions de mesure.

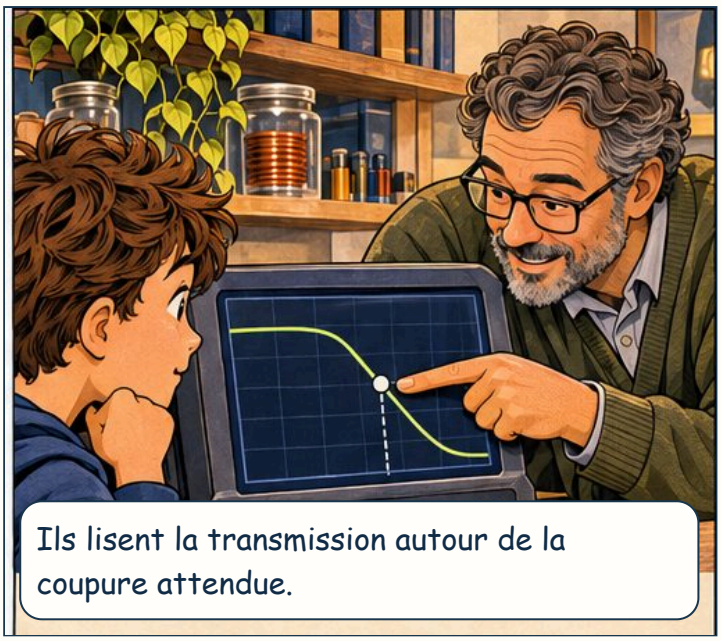


Un résultat conservé pourra être comparé après chaque modification.

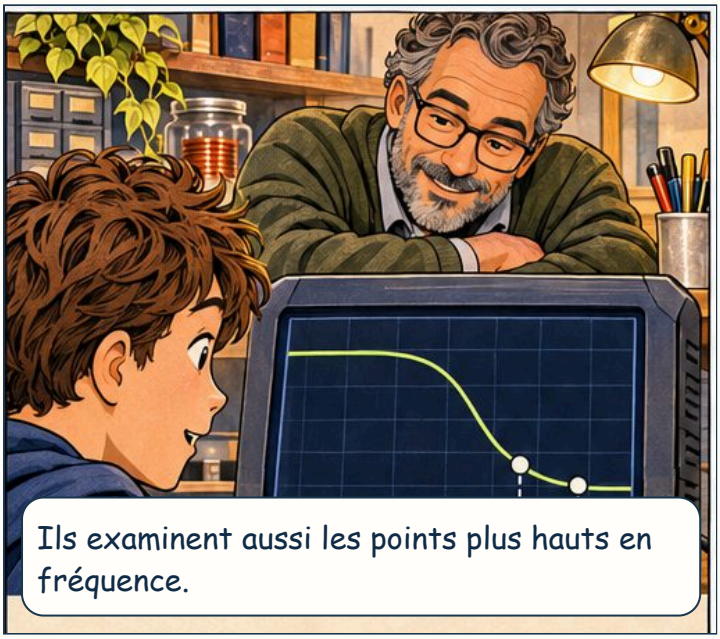
Lire des points précis



Des marqueurs repèrent les fréquences choisies dans le calcul.



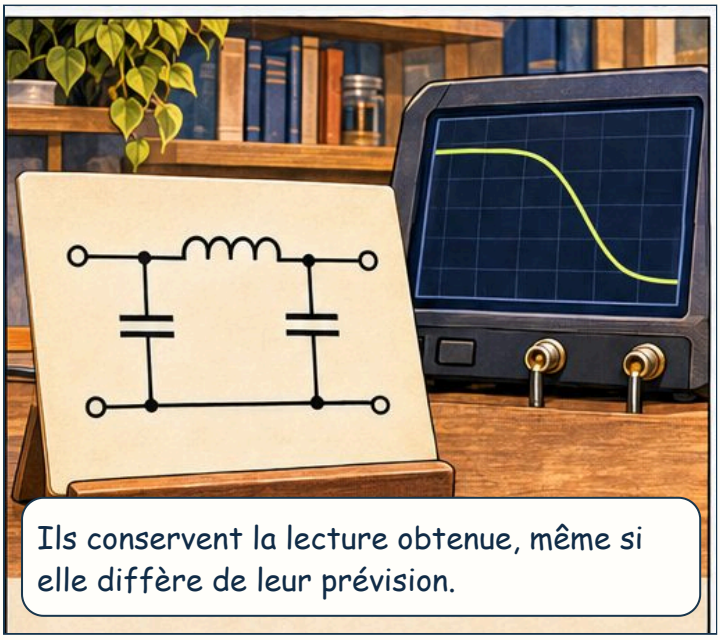
Ils lisent la transmission autour de la coupure attendue.



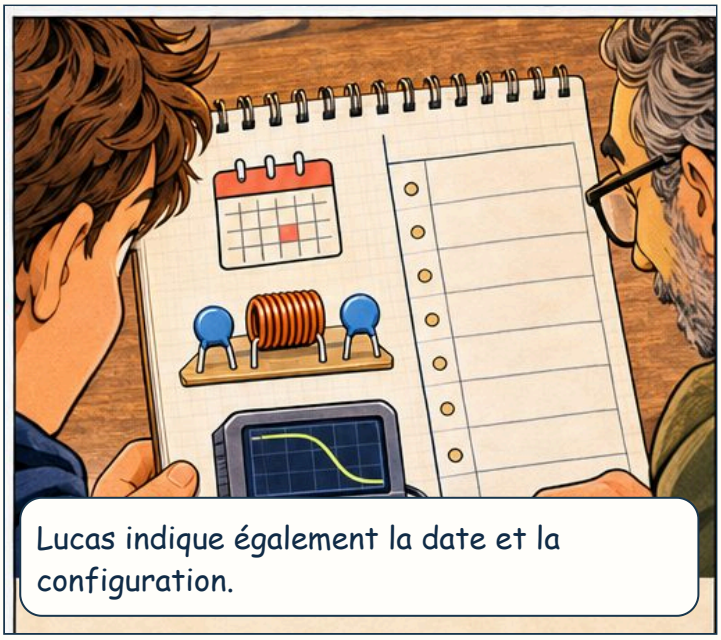
Ils examinent aussi les points plus hauts en fréquence.



Les valeurs réellement lues vont dans la colonne des mesures.

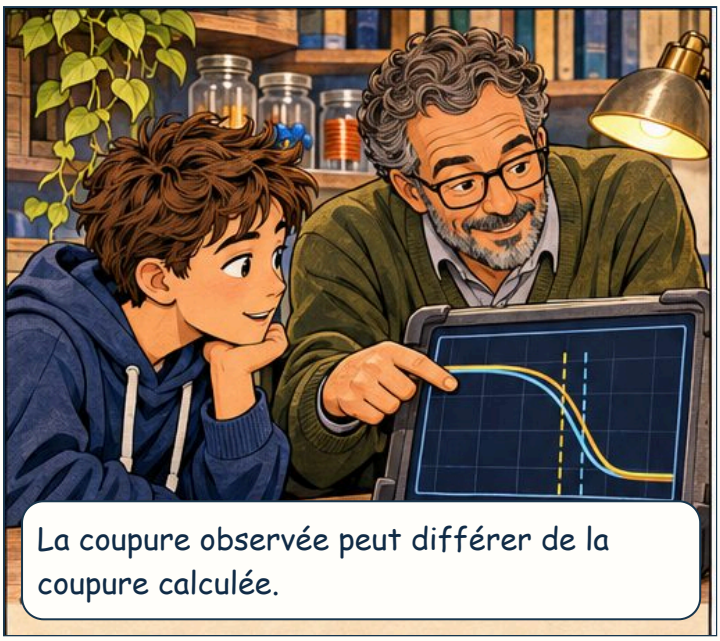


Ils conservent la lecture obtenue, même si elle diffère de leur prévision.



Lucas indique également la date et la configuration.

Comprendre un écart



La coupure observée peut différer de la coupure calculée.



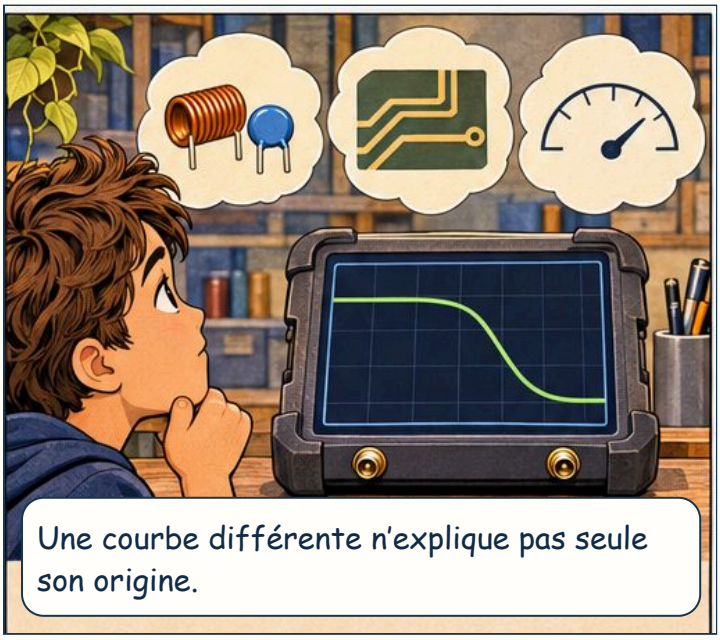
Les valeurs retenues et leurs tolérances fournissent des premières pistes.



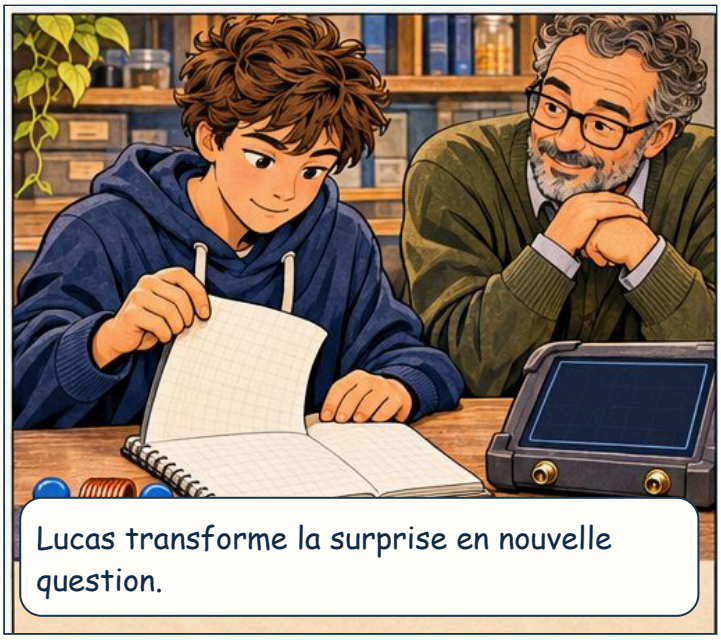
Les pertes, l'implantation et l'étalonnage méritent aussi un examen.



Ils vérifient ces hypothèses avant d'accuser une formule.

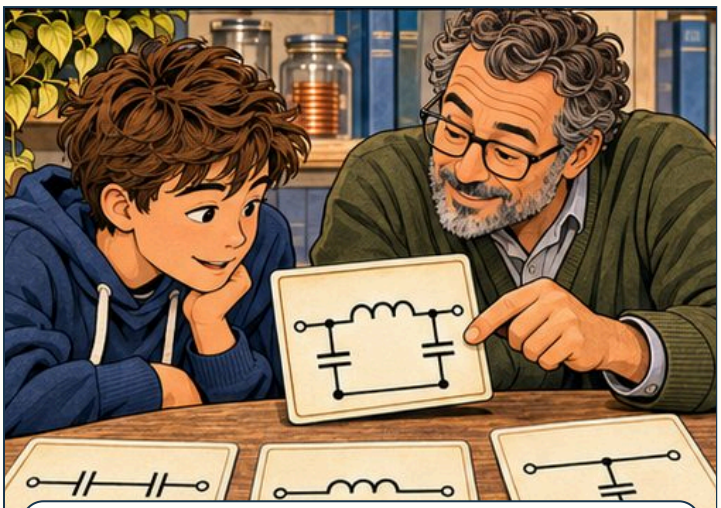


Une courbe différente n'explique pas seule son origine.

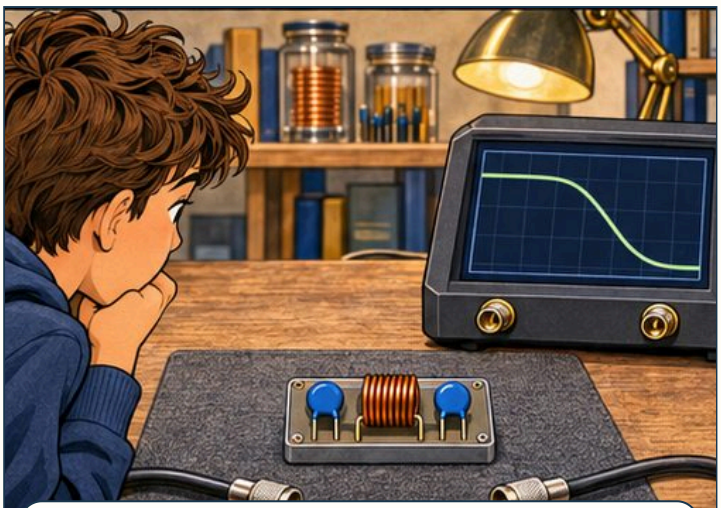


Lucas transforme la surprise en nouvelle question.

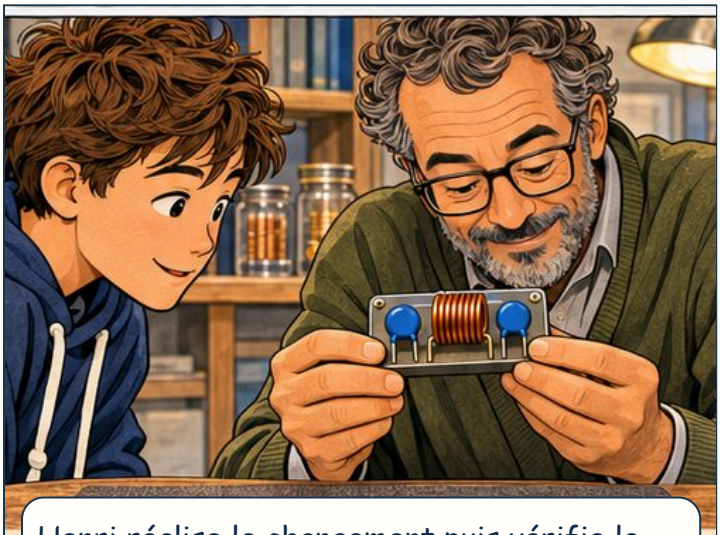
Une modification à la fois



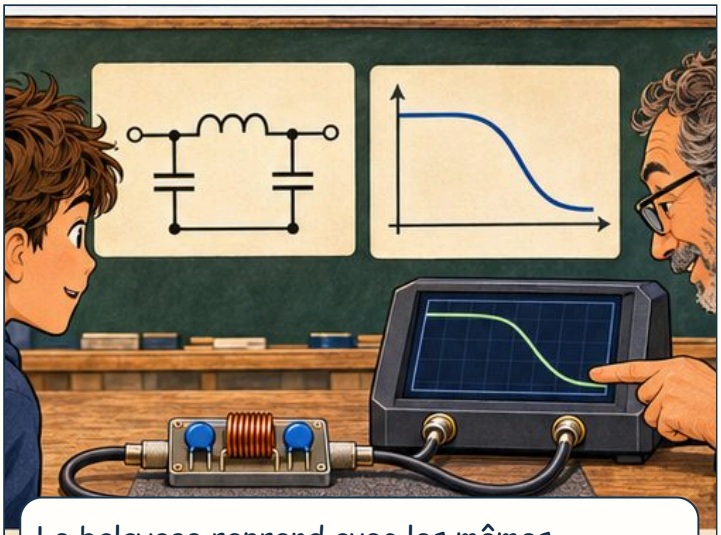
Ils choisissent une seule hypothèse et préparent une modification justifiée.



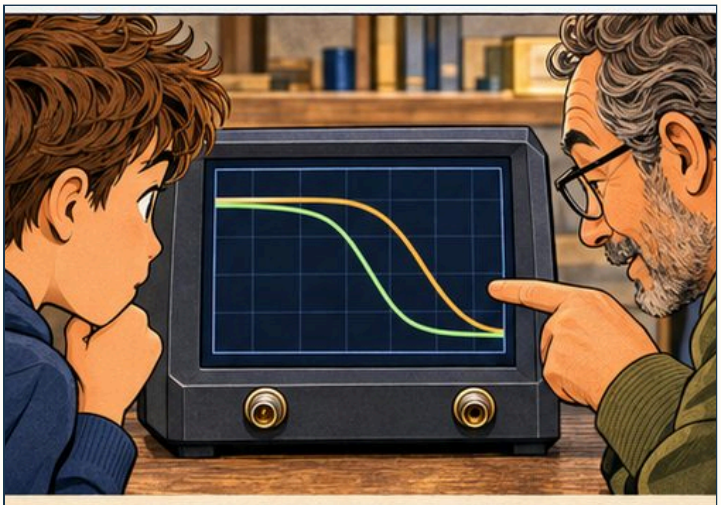
La source est arrêtée et le module déconnecté avant intervention.



Henri réalise le changement puis vérifie le montage.



Le balayage reprend avec les mêmes conditions documentées.

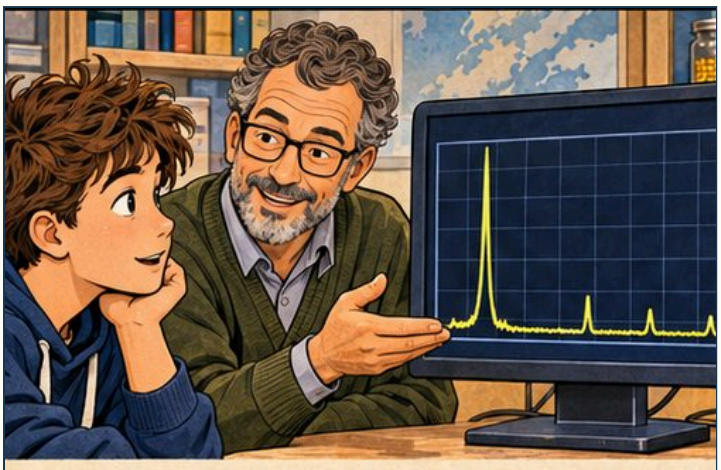


Ils comparent l'ancienne trace et la nouvelle.

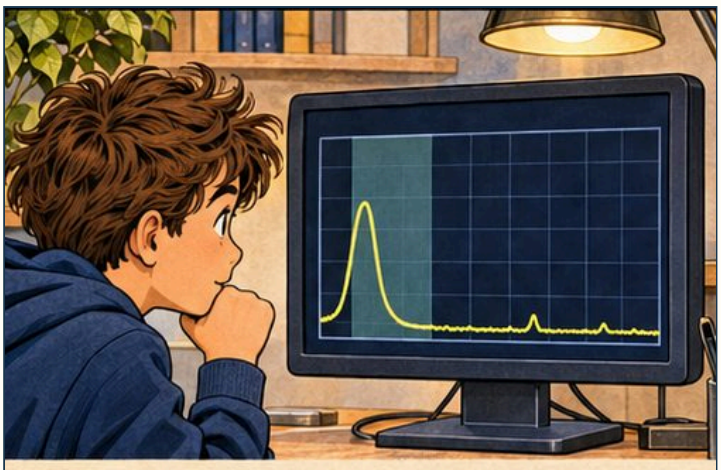


La méthode évite de mélanger plusieurs causes possibles.

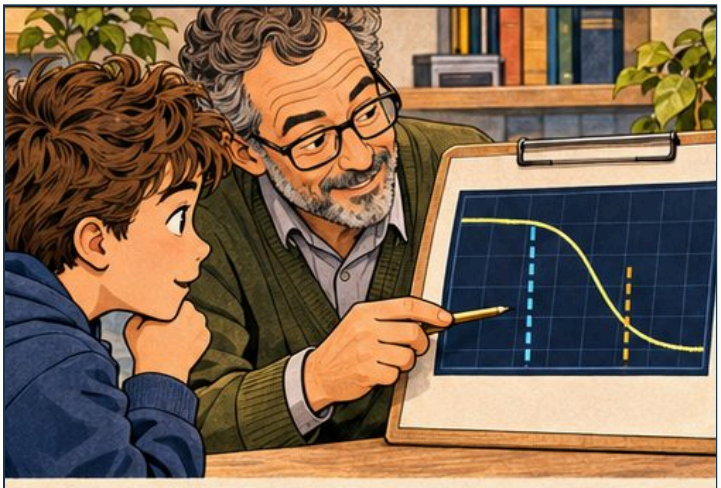
L'atténuation a ses limites



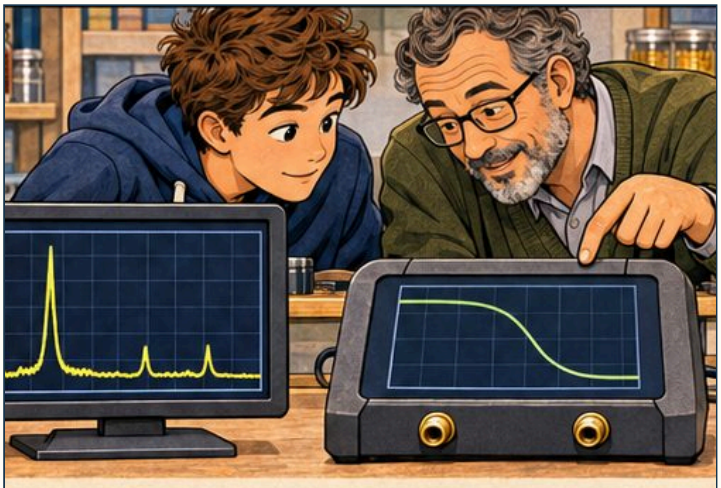
Un passe-bas n'efface pas toutes les composantes indésirables.



Une composante dans sa bande passante sera peu atténuée.



La réjection dépend de la fréquence et de la réalisation.



Un contrôle spectral complet demanderait des mesures supplémentaires adaptées.

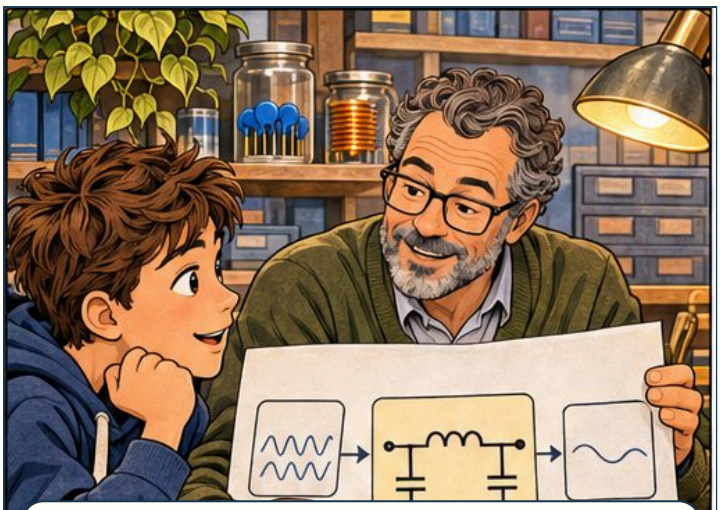


La présence du filtre ne prouve pas la conformité d'une station.

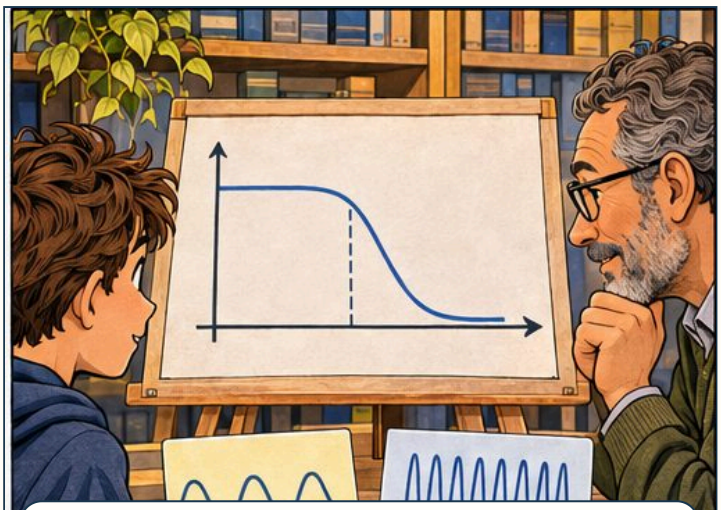


Lucas distingue une fonction utile d'une garantie générale.

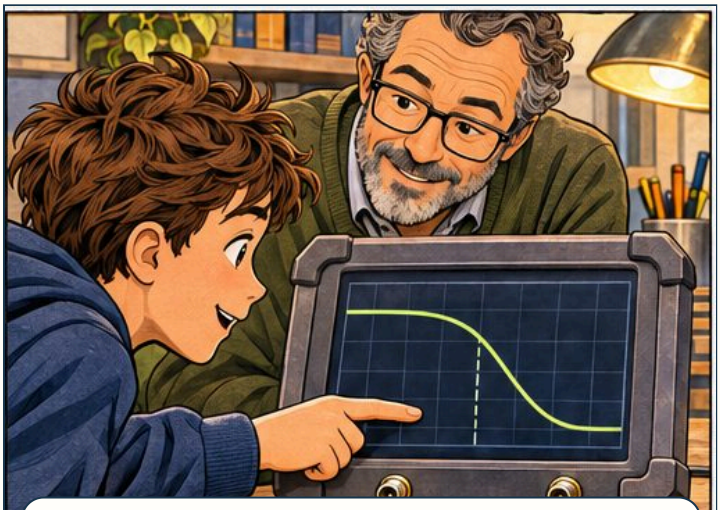
La fréquence utile doit passer



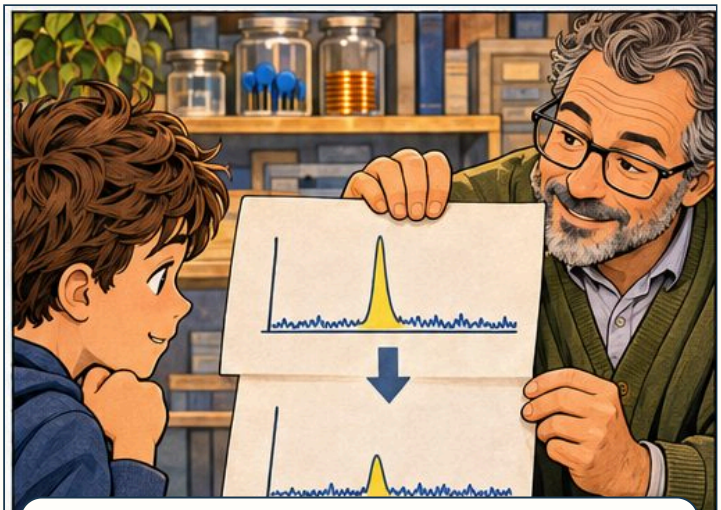
Henri propose enfin un piège dans un dessin de station.



Le dessin associe 14,2 MHz à leur coupure de 10 MHz.



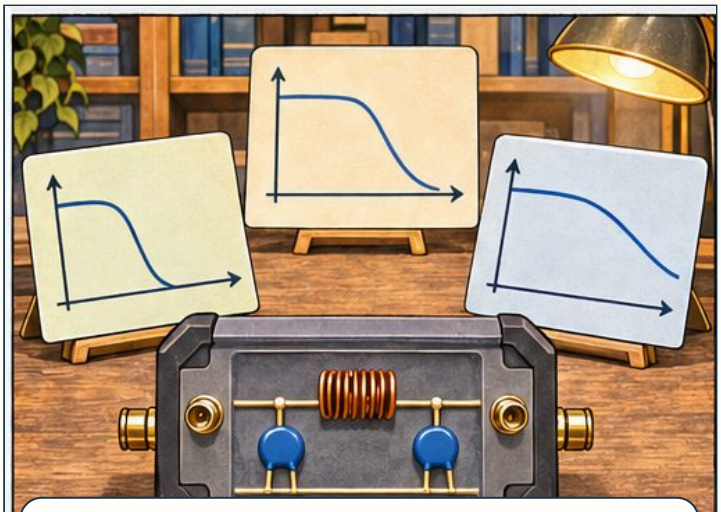
Lucas remarque que 14,2 MHz est au-dessus de cette coupure.



Ce choix atténuerait aussi le signal que l'on veut conserver.

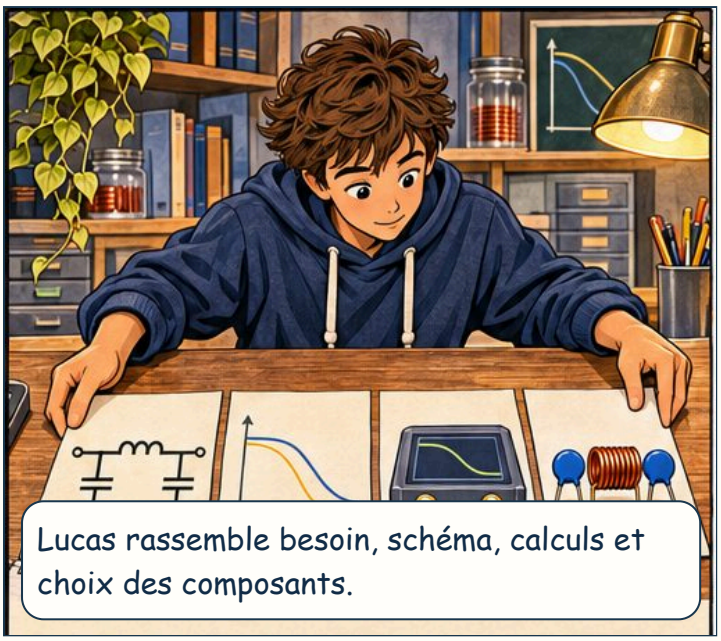


Il faut reprendre le cahier des charges avant toute utilisation.



Un exemple de calcul n'est pas un filtre universel.

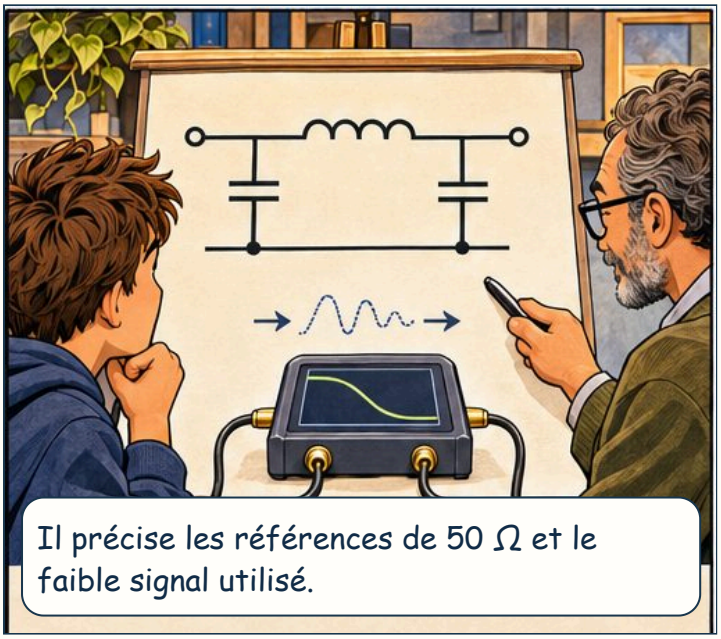
Préparer une explication partageable



Lucas rassemble besoin, schéma, calculs et choix des composants.



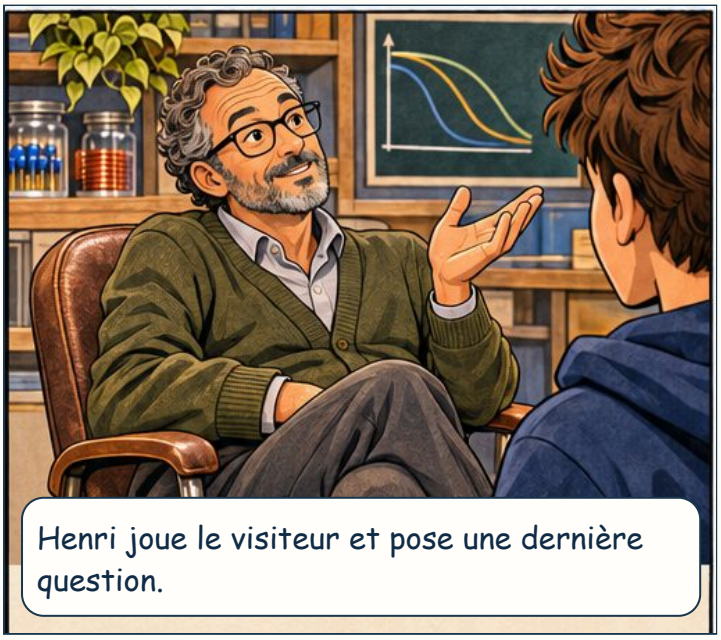
Il distingue les prévisions des résultats réellement observés.



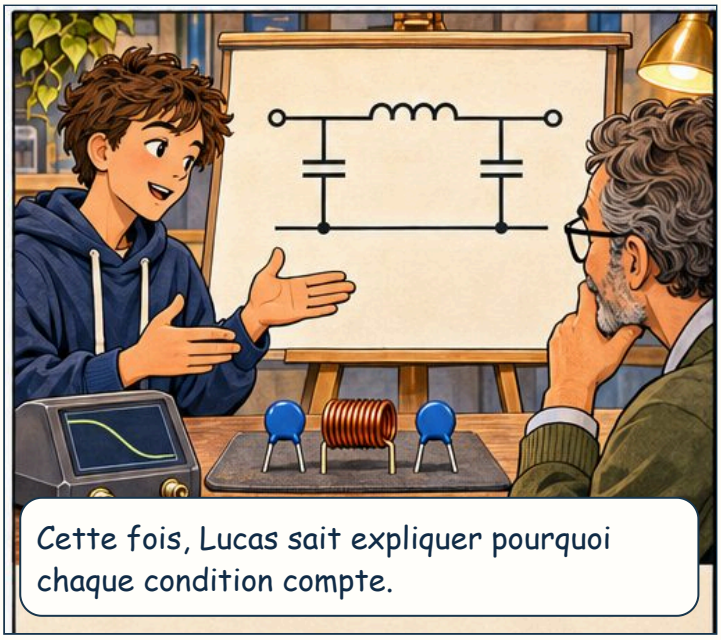
Il précise les références de 50 Ω et le faible signal utilisé.



Il conserve les traces, l'étalonnage et les limites de l'expérience.



Henri joue le visiteur et pose une dernière question.



Cette fois, Lucas sait expliquer pourquoi chaque condition compte.

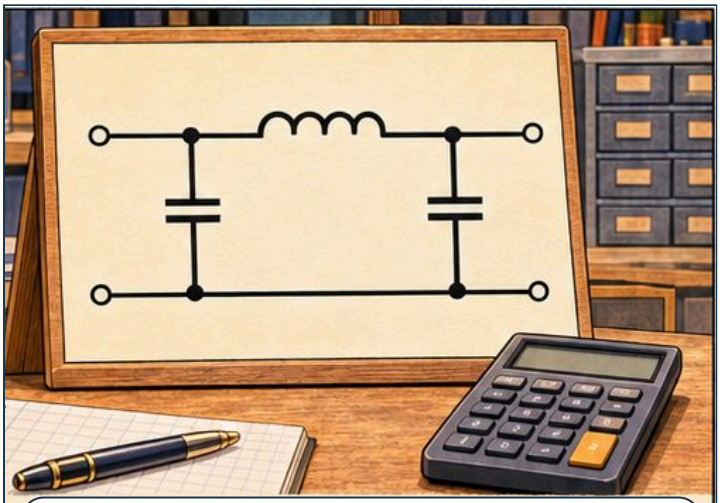
Comprendre, calculer, mesurer



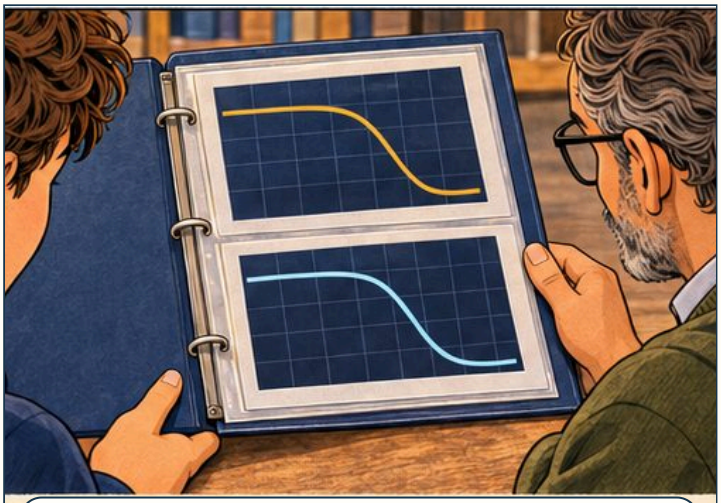
Les trois composants retrouvent leur place dans la boîte pédagogique.



Lucas sait maintenant relier un besoin à une réponse de filtre.



Il sait calculer ce Butterworth en π et vérifier ses unités.



Il sait aussi mesurer, comparer et questionner les écarts.



Son carnet conserve une méthode, avec ses hypothèses et ses limites.



Au club, la prochaine découverte commence déjà par une question.