LIVRE BLANC · ÉDITION DÉTAILLÉE · STUDIO DELTA SIGMA

Simuler un circuit, pas une courbe

Comment Midnight LCR modélise un égaliseur passif, son étage d'amplification et ses transformateurs : méthodes, choix, vérifications et limites

Dominique Spagnolo

Octobre 2026

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo. Tous droits réservés. Reproduction interdite sans autorisation écrite.

Résumé

Il existe plusieurs manières de reproduire un appareil audio analogique dans un ordinateur. Les plus répandues copient ce que l'appareil produit ; d'autres calculent ce que fait son circuit. Ce document décrit ces familles de méthodes, leurs atouts et leurs limites, puis explique en détail les choix faits pour Midnight LCR : la simulation d'un réseau passif par sa représentation d'état, sa discrétisation par la méthode des trapèzes et le rôle du suréchantillonnage ; la résolution des équations non linéaires d'un étage à transistors par la méthode de Newton-Raphson ; la modélisation physique d'un noyau magnétique avec son hystérésis. Il montre enfin comment ces modèles sont vérifiés, et quelles limites ils conservent. Il s'adresse à un lecteur curieux, sans formation en traitement du signal : chaque notion est définie, et les quelques formules sont expliquées en mots.

39	> 100	35	≈ 350 kHz
balayages de mesure du prototype réel	mesures au banc du transformateur d'entrée	tests automatiques à chaque version	cadence de calcul interne du réseau, quelle que soit la session

1. Trois façons de modéliser un appareil
2. Le circuit
3. Mettre un circuit en équations
4. Du continu au numérique
5. Le Lab : n'importe quel circuit
6. L'étage actif
7. Non-linéarité et repliement spectral
8. Les transformateurs
9. Deux modes de calcul
10. Vérifier une simulation
11. Les limites, assumées

1 Trois façons de modéliser un appareil

Reproduire un appareil analogique dans un ordinateur, c'est construire un **modèle** : une recette de calcul qui, à partir du signal d'entrée et des réglages, produit le signal de sortie. Trois grandes familles coexistent. Elles ne diffèrent pas par la qualité de leurs résultats dans l'absolu, mais par ce qu'elles savent reproduire, par ce qu'elles demandent pour être construites, et par ce qu'elles coûtent à calculer.

La boîte noire : copier ce que l'appareil fait

Dans l'approche dite **boîte noire**, on ignore volontairement le contenu de l'appareil. On lui envoie des signaux connus, on mesure ce qui en sort, et l'on construit un modèle qui reproduit ces mesures. Quatre techniques dominent.

- **L'ajustement de filtres.** On mesure la **réponse en fréquence**, la courbe du gain selon la fréquence, à un réglage donné, et l'on cherche une combinaison de **filtres numériques** élémentaires, souvent des **biquads**, qui la reproduit. C'est léger et précis pour la courbe, mais seulement pour ce réglage, et sans rien de ce qui dépend du niveau.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

- **La convolution.** On enregistre la **réponse impulsionnelle** de l'appareil : sa réaction à une impulsion très brève. Toute la réponse d'un système **linéaire et invariant** est contenue dans ce seul enregistrement. La **convolution** applique ensuite cette réponse à n'importe quel signal. Le procédé est exact pour une réverbération ou un haut-parleur à un réglage donné, mais par construction il ignore toute saturation, et ne connaît qu'un seul réglage : pour en couvrir d'autres, il faut multiplier les captures et interpoler entre elles.
- **La convolution dynamique.** Pour approcher la saturation, on capture plusieurs réponses selon le niveau du signal, ou l'on utilise des **noyaux de Volterra**, une généralisation mathématique de la réponse impulsionnelle aux systèmes non linéaires. Le résultat peut être très convaincant à un réglage, au prix d'un calcul lourd, et avec une mémoire limitée des effets lents.
- **L'apprentissage automatique.** On entraîne un **réseau de neurones** sur des heures de paires entrée et sortie, jusqu'à ce qu'il imite l'appareil. C'est la technique des amplificateurs « profilés » ou « capturés ». Elle reproduit fidèlement des comportements complexes, mais seulement dans le domaine couvert par l'entraînement ; faire varier un bouton demande d'avoir enregistré l'appareil à de nombreuses positions, et le modèle reste opaque : on ne sait pas pourquoi il réussit, ni où il échouera.

Ses atouts. Pas besoin de connaître le schéma : l'appareil est un mystère, il suffit de le mesurer. Tout ce qu'il fait au moment de la mesure est capturé, y compris des particularités que personne n'aurait su modéliser. Le résultat est souvent léger à calculer, et exact aux points mesurés.

Ses limites. Entre deux réglages mesurés, le modèle devine. Les **interactions** entre réglages demandent de mesurer toutes leurs combinaisons, ce qui devient vite impossible : cinq boutons de dix positions donnent cent mille combinaisons. Les comportements qui dépendent du **niveau** ou de l'**histoire** du signal, comme la saturation progressive ou la mémoire d'un noyau magnétique, se capturent mal. Enfin, le modèle n'a pas de sens physique : on ne peut ni changer un composant, ni comprendre pourquoi il sonne ainsi.

La boîte blanche : calculer ce que fait le circuit

Dans l'approche dite **boîte blanche**, ou **modélisation de circuit**, on part du schéma : chaque composant est décrit par sa loi physique, les connexions par les lois de l'électricité, et l'ordinateur résout l'ensemble. Le son n'est pas copié : il est **calculé**. Plusieurs méthodes existent : la **représentation d'état**, retenue pour Midnight LCR et décrite plus loin ; la **méthode nodale DK**, qui en est une variante systématique ; les **filtres numériques d'onde**, en anglais *wave digital filters*, qui décomposent le circuit en échanges d'ondes entre composants.

Ses atouts. Le modèle est juste à **tous les réglages et dans toutes leurs combinaisons**, puisqu'il ne repose sur aucune mesure de réglage : tourner un bouton change la valeur d'un composant, et le calcul suit. Les interactions, la saturation, la dépendance au niveau et la mémoire du circuit **naissent d'elles-mêmes**, sans être programmées. Le modèle a un sens physique : on peut changer un composant, et le vérifier par un simulateur de circuits indépendant.

Ses limites. Il faut le schéma exact, et des **modèles de composants** fiables : une résistance est simple, un noyau magnétique beaucoup moins. Les équations non linéaires demandent une résolution itérative, plus coûteuse, avec des difficultés numériques à maîtriser. Le calcul est

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

plus lourd, et souvent suréchantillonné, d'où une latence. Le développement est long, et demande de l'expertise.

La boîte grise : la structure physique, les valeurs mesurées

Entre les deux, la **boîte grise** garde la structure physique d'un modèle, ses équations, mais **ajuste ses paramètres à des mesures**. C'est la bonne réponse quand on connaît la physique d'un composant sans en connaître les constantes : on sait comment se comporte un noyau de fer, pas la valeur exacte de ses propriétés dans un transformateur donné. On mesure alors le transformateur, et l'on cherche les paramètres qui font coïncider le modèle et les mesures.

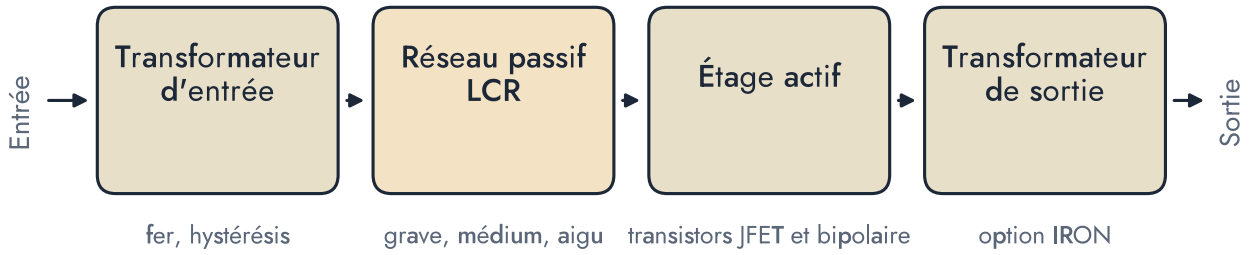
	Boîte noire	Boîte grise	Boîte blanche
Point de départ	des mesures de l'appareil	des équations physiques et des mesures	le schéma et les lois physiques
Tous les réglages	interpolés entre les mesures	oui, si la structure est juste	oui, par construction
Saturation, mémoire	difficiles, ou à un réglage	oui, dans le domaine mesuré	oui, si les modèles de composants sont justes
Changer un composant	impossible	partiellement	oui
Coût de calcul	faible à élevé	moyen	moyen à élevé
Ce qu'il faut	l'appareil	l'appareil et sa physique	le schéma et des modèles fiables

Le choix de Midnight LCR

Midnight LCR combine les approches, composant par composant, selon ce que chacun permet. Le **réseau passif** et l'**étage actif** sont en **boîte blanche** : leurs composants sont bien connus, et leurs lois physiques fiables. Les **transformateurs** sont en **boîte grise** : leur structure physique est modélisée, mais les propriétés du fer sont ajustées à plus d'une centaine de mesures au banc. Et l'ensemble est confronté à des mesures du prototype réel : la boîte blanche n'est pas un acte de foi, elle se vérifie.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

2 Le circuit



La chaîne simulée par Midnight LCR Pro.

Le cœur de l'appareil est un **réseau passif** de résistances, de condensateurs et de selfs. Leur comportement dépend de la fréquence, ce qui permet de façonner le spectre.

- **La résistance** s'oppose au courant de la même façon à toutes les fréquences.
- **Le condensateur** stocke des charges électriques. Son opposition au signal, sa **réactance**, diminue quand la fréquence monte : elle vaut $1 / (2\pi f C)$, où f est la fréquence et C la capacité. Il laisse donc passer les aigus et bloque le continu.
- **La self**, ou **inductance**, stocke de l'énergie dans un champ magnétique. Sa réactance augmente avec la fréquence : $2\pi f L$, où L est l'inductance. Elle laisse passer les graves et freine les aigus.

Associés, une self et un condensateur forment un **circuit résonant**, dont les deux réactances s'équilibrent à une fréquence précise :

$$f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{(L C)})$$

C'est sur ce principe que repose la cloche du médium : la self et le condensateur choisis par le sélecteur fixent sa fréquence centrale. Le grave et l'aigu reposent sur des cellules en plateau, où une résistance et une réactance forment un diviseur de tension qui change avec la fréquence.

Le réseau est **passif** : il ne contient aucune source d'énergie, et ne peut donc qu'atténuer. Au neutre, il perd environ 18 dB, sa **perte d'insertion** ; on « accentue » une bande en l'atténuant moins que les autres. Et parce que toutes les cellules partagent le même circuit, elles **interagissent** : la cellule d'accentuation du grave et celle d'atténuation, réglées ensemble sur une même zone, ne s'annulent pas, mais creusent juste au-dessus de la bosse. Ce comportement caractéristique des égaliseurs de programme des années 1950 n'est pas programmé dans Midnight LCR : il découle du circuit.

3 Mettre un circuit en équations

Deux lois, énoncées par Gustav Kirchhoff en 1845, suffisent à décrire n'importe quel circuit :

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

- **la loi des nœuds** : en chaque point de connexion, la somme des courants qui arrivent est égale à la somme des courants qui repartent. Rien ne se perd, rien ne s'accumule ;
- **la loi des mailles** : le long de toute boucle fermée, la somme des tensions est nulle.

Appliquées à chaque nœud et à chaque composant, elles donnent un système d'**équations différentielles**, parce que le courant d'un condensateur dépend de la vitesse à laquelle sa tension change, et la tension d'une self de la vitesse à laquelle son courant change. Ces équations s'écrivent sous une forme standard, la **représentation d'état** :

$$dx/dt = A\,x + B\,u \qquad y = C\,x + D\,u$$

En mots : u est le signal d'entrée ; y, le signal de sortie ; x, la liste des **variables d'état**, c'est-à-dire la tension aux bornes de chaque condensateur et le courant dans chaque self. La première équation dit comment l'état évolue, selon l'état présent et l'entrée ; la seconde, comment on lit la sortie. Les tableaux de nombres A, B, C et D, des **matrices**, ne dépendent que des valeurs des composants et de la position des boutons.

> **Pourquoi ces variables sont la mémoire du circuit.** Un condensateur ne peut pas changer de tension instantanément, ni une self de courant : il leur faut du temps pour se charger ou se décharger. Connaître ces grandeurs à un instant, c'est donc connaître tout ce que le circuit « se rappelle » de son passé. Dans Midnight LCR Pro, le calcul linéaire du réseau et du transformateur d'entrée en compte huit ; l'étage actif, sept.

4 Du continu au numérique

Un circuit réel évolue de façon continue. Un ordinateur, lui, avance par pas : il calcule l'état du circuit à des instants séparés, au rythme de la **fréquence d'échantillonnage** du logiciel hôte, par exemple 44 100 fois par seconde. Passer des équations continues à ce calcul pas à pas, c'est la **discrétisation**.

La limite de Nyquist

Le **théorème de Nyquist-Shannon** établit qu'un signal échantillonné ne peut représenter que les fréquences inférieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage : la **fréquence de Nyquist**. À 44,1 kHz, elle vaut 22 050 Hz. Cette limite a deux conséquences, traitées plus loin : elle déforme le calcul des filtres près de la limite, et elle replie les harmoniques qui la dépassent.

Choisir une méthode de discrétisation

La méthode la plus simple, la **méthode d'Euler**, avance l'état en suivant la pente du moment présent, comme si elle restait constante jusqu'au pas suivant. Elle est intuitive, mais **instable** pour les circuits audio : les erreurs s'accumulent et peuvent faire diverger le calcul, surtout quand un circuit mêle des phénomènes très rapides et très lents, ce qu'on appelle un système **raide**.

Midnight LCR utilise la **méthode des trapèzes**. Au lieu de la seule pente du moment présent, elle utilise la moyenne de la pente au début et à la fin du pas :

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

$$x[n+1] = x[n] + (T/2) \cdot (\text{pente au pas } n + \text{pente au pas } n+1)$$

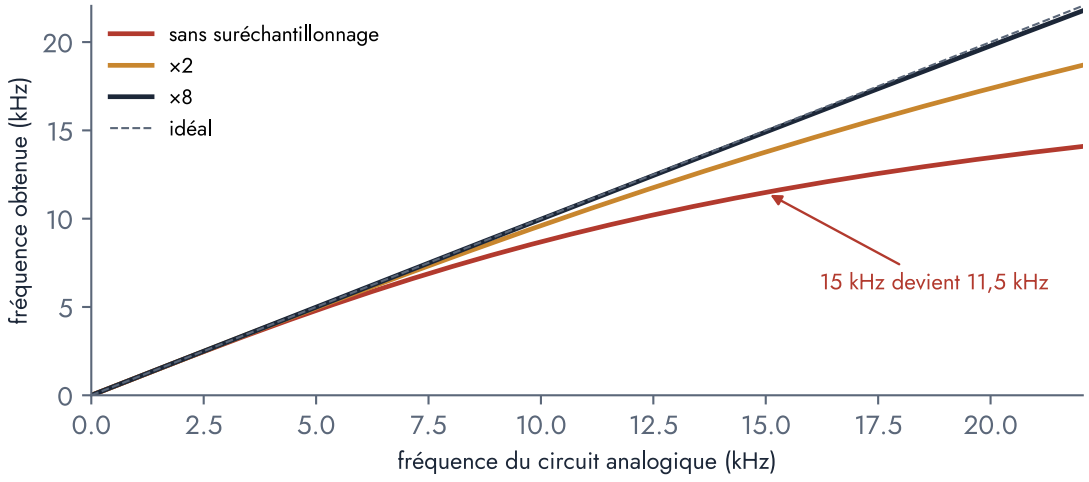
où T est la durée d'un pas. La pente au pas suivant dépendant de l'état que l'on cherche, l'équation se résout à chaque pas : on dit que la méthode est **implicite**. Son grand avantage est d'être **inconditionnellement stable** pour un circuit passif : quel que soit le pas, le calcul ne diverge jamais, même après des heures. Appliquée à un filtre, elle porte un autre nom, bien connu en audio : la **transformation bilinéaire**.

Le warping fréquentiel

La transformation bilinéaire a un défaut connu : elle conserve exactement la forme de la courbe, mais **tasse l'axe des fréquences** à l'approche de la limite de Nyquist. Une fréquence f du circuit analogique se retrouve à la fréquence :

$$f_{numérique} = (f_e / \pi) \cdot \arctan(\pi f / f_e)$$

où f_e est la fréquence d'échantillonnage du calcul. Aux basses fréquences, l'écart est négligeable ; près de Nyquist, il devient considérable. C'est le **warping fréquentiel**.



La fréquence obtenue selon la fréquence réelle du circuit, à 44,1 kHz : sans suréchantillonnage, une résonance à 15 kHz tombe vers 11,5 kHz ; suréchantillonnée huit fois, elle reste à 14,9 kHz.

Cadence du calcul	Une résonance à 15 kHz tombe à	Écart
44,1 kHz	11 490 Hz	23 %
× 2, soit 88,2 kHz	13 776 Hz	8,2 %
× 4, soit 176,4 kHz	14 658 Hz	2,3 %
× 8, soit 352,8 kHz	14 912 Hz	0,6 %

La parade est le **suréchantillonnage**, en anglais *oversampling* : calculer en interne plus vite que la session, puis revenir à sa cadence. Le tassement est repoussé loin au-delà de l'audible. C'est aussi la parade au repliement spectral, décrit plus loin.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

Le suréchantillonnage selon la fréquence de la session

Le facteur de suréchantillonnage n'est pas fixe : il **s'adapte à la fréquence d'échantillonnage de la session**, pour que le calcul interne tourne toujours à une cadence voisine, autour de 350 à 400 kHz. À 96 kHz, la session est déjà deux fois plus rapide qu'à 48 kHz : il suffit de suréchantillonner deux fois moins pour obtenir la même précision.

Session	Réseau et transformateurs	Étage actif	Cadence interne du réseau	Latence
44,1 et 48 kHz	× 8	× 4	352,8 à 384 kHz	72 échantillons, 1,6 ms
88,2 et 96 kHz	× 4	× 2	352,8 à 384 kHz	43 échantillons à 96 kHz, 0,45 ms
176,4 et 192 kHz	× 2	× 1	352,8 à 384 kHz	12 échantillons à 192 kHz, 0,06 ms

Deux conséquences pratiques. **La précision est la même à toutes les fréquences de session**, puisque la cadence interne ne change presque pas. Et **la charge du processeur varie peu** : à 96 kHz, il y a deux fois plus d'échantillons à traiter, mais chacun est suréchantillonné deux fois moins. Seule la latence diminue nettement aux fréquences élevées : il y a moins d'étages de changement de cadence à traverser, et chaque échantillon dure moins longtemps.

Le passage d'une cadence à l'autre se fait par des **filtres polyphasés à phase linéaire** : une technique qui ne calcule que les échantillons réellement utiles, et qui retarde toutes les fréquences de la même durée, sans déformer la forme d'onde. Ce retard constant est la **latence** que le plug-in annonce au logiciel hôte, qui la compense en avançant la piste d'autant.

Tourner un bouton sans claquement

Tourner un bouton change la valeur d'un composant, donc les matrices du calcul. Changées d'un coup, elles produiraient de petits claquements en escalier, le **zipper noise**. Le calcul **interpole** les coefficients : il les fait glisser progressivement, sur quelques millisecondes. Ce lissage est calculé à partir du temps du signal, et non du découpage en blocs choisi par le logiciel hôte : le résultat est donc identique, à l'échantillon près, quelle que soit la taille des blocs, en lecture comme à l'export.

5 Le Lab : n'importe quel circuit

Midnight LCR Lab, le laboratoire de prototypage de la gamme, applique les mêmes principes à un circuit quelconque. On ne lui donne pas un égaliseur, mais une **description de circuit** : des nœuds, des composants, des fils, des commandes. Il construit lui-même les équations.

1. **La structure.** À chaque changement de structure, un fil ouvert, un sélecteur tourné, une valeur changée, le moteur détermine quels nœuds sont reliés, écarte ce qui ne participe plus au signal, regroupe les composants en série, et réduit toute la partie résistive fixe à ses

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

seules bornes utiles. C'est l'**analyse nodale**, la méthode des simulateurs de circuits, fondée sur la loi des nœuds.

2. **Le modèle d'état.** Il assemble la représentation d'état du circuit réduit, dont les variables restent physiques : tensions des condensateurs, courants des selfs.
3. **La forme discrète.** Il la discrétise par la méthode des trapèzes, suréchantillonnée quatre fois jusqu'à 50 kHz de session, deux fois jusqu'à 100 kHz, et pas au-delà.
4. **Le son sans claquement.** Les boutons sont lissés ; un changement de structure, comme un fil ouvert, déclenche un fondu croisé de 20 ms entre l'ancien et le nouveau circuit.

Sa précision a été mesurée contre deux références : sur le réseau du kit, il coïncide avec le modèle de Midnight LCR à **0,000024 dB** près, sur 6 912 réglages ; et le son mesuré au sinus suit la courbe calculée à 0,04 dB près jusqu'à 15 kHz. Chaque cellule élémentaire coïncide à 4×10^{-7} dB près avec une analyse nodale écrite séparément.

6 L'étage actif

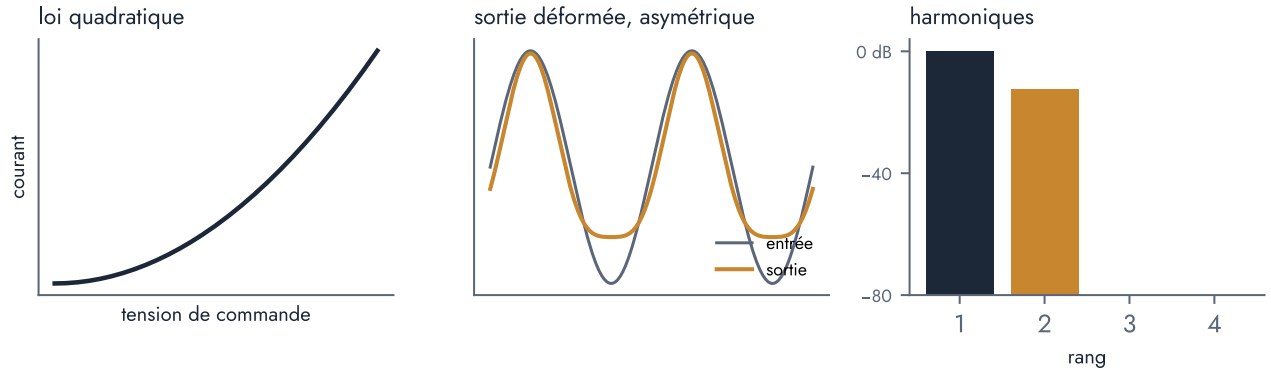
La perte d'insertion du réseau est rattrapée par un **étage actif** : deux transistors à effet de champ à jonction, des **JFET**, en amplification, puis un transistor **bipolaire** monté en suiveur, qui fournit le courant à la sortie. Cet étage fait plus qu'amplifier : il donne une part du caractère sonore.

La non-linéarité d'un transistor

Une résistance est **linéaire** : deux fois plus de tension, deux fois plus de courant. Un transistor ne l'est pas. Dans un JFET, le courant qui traverse le transistor dépend de la tension de commande selon une loi approximativement quadratique, l'**équation de Shockley** :

$$I = I_{DSS} \cdot \left(1 - V / V_P \right)^2$$

En mots : I_{DSS} est le courant maximal du transistor, et V_P sa **tension de pincement**, celle qui le bloque complètement. Ces deux constantes varient d'un exemplaire à l'autre, ce qui explique que Midnight LCR Pro propose trois modèles de transistor : trois couples de valeurs, donc trois comportements. Le transistor bipolaire suit une autre loi, exponentielle, décrite par le **modèle d'Ebers-Moll**.



La loi quadratique d'un JFET déforme une sinusoïde de façon asymétrique ; une loi parfaitement quadratique ne crée que l'harmonique 2. Dans le circuit complet, la contre-réaction et les autres composants en créent d'autres, plus faibles.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

Cette courbure crée de la **distorsion harmonique** : de nouvelles fréquences, multiples de la fréquence jouée, les **harmoniques** de rang 2, 3, 4… Une courbe **asymétrique**, comme celle d'un JFET, produit surtout des **harmoniques paires**, à l'octave et à la double octave, consonantes avec la note : on les associe à un son chaud. Une courbe **symétrique**, comme l'écrêtage d'un signal par le haut et par le bas, produit surtout des **harmoniques impaires**, perçues comme plus dures.

Polarisation, contre-réaction, écrêtage

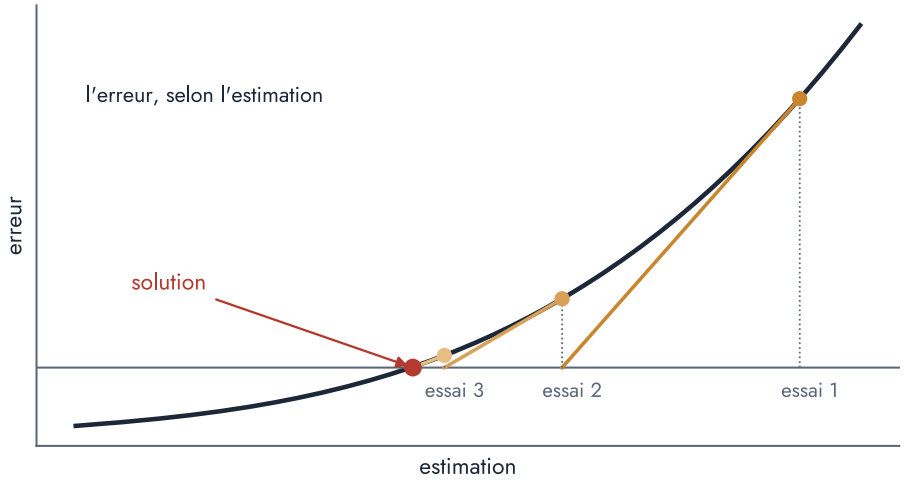
Un transistor ne fonctionne bien qu'autour d'un **point de repos**, fixé par sa **polarisation**, en anglais *bias* : des tensions continues autour desquelles le signal oscille. Midnight LCR Pro expose ces réglages sur son panneau de calibration, comme sur un appareil réel.

La **contre-réaction**, en anglais *feedback*, renvoie une partie de la sortie vers l'entrée, en opposition : elle réduit le gain, mais le stabilise et diminue la distorsion. Doser la contre-réaction, c'est donc choisir entre un étage plus propre et un étage plus coloré. Le moteur recalcule de lui-même la résistance de contre-réaction chaque fois qu'un réglage modifie le gain, pour que l'égaliseur reste à 0 dB au neutre.

Quand le signal pousse le transistor hors de sa zone de fonctionnement, vers le blocage ou vers sa limite de courant, il **écrête** : c'est le **clipping**. Dans un étage à transistors, il est **progressif** : la courbure s'accentue avant la limite. Les instruments du panneau de calibration montrent en direct l'approche de ces zones.

Résoudre l'étage : la méthode de Newton-Raphson

L'étage actif forme un système de sept variables d'état, pour ses condensateurs et sa self, et de cinq courants de transistors inconnus, liés par des lois non linéaires. Un tel système n'a pas de solution directe : on ne peut pas isoler les inconnues par un calcul fini. On le résout par approximations successives, avec la **méthode de Newton**, ou **Newton-Raphson**, imaginée au XVII^{e} siècle et au cœur de tous les simulateurs de circuits.



Chaque essai suit la tangente de la courbe d'erreur jusqu'à zéro.

Avec une seule inconnue x et une erreur $F(x)$ à annuler, chaque essai se calcule ainsi :

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

$$x_{nouveau} = x - F(x) / F'(x)$$

En mots : on calcule l'erreur et sa **pente** $F'(x)$ à l'estimation présente, et l'on suit la tangente jusqu'à l'endroit où elle s'annule. Avec plusieurs inconnues, les pentes de chaque erreur par rapport à chaque inconnue forment une matrice, la **matrice jacobienne**, et chaque essai demande de résoudre un petit système linéaire, de cinq équations ici.

La méthode a une propriété remarquable, la **convergence quadratique** : près de la solution, le nombre de chiffres justes **double à chaque essai**. Une erreur de un pour cent devient un pour dix mille, puis un pour cent millions. Deux ou trois **itérations** suffisent.

Deux raffinements la rendent rapide et sûre dans un moteur audio.

- **L'extrapolation.** Le point de départ est prédit à partir des instants précédents. Le signal variant peu d'un pas à l'autre, à plusieurs centaines de milliers de pas par seconde, on part déjà presque de la bonne réponse.
- **La méthode de secours.** Newton peut diverger si le point de départ est trop loin, par exemple sur un **transitoire** extrême. Le moteur bascule alors sur une variante plus prudente, qui résout les tensions plutôt que les courants, avec la **limitation des jonctions** du simulateur SPICE : une règle qui interdit à une estimation de faire un bond absurde sur une jonction de transistor. La convergence est ainsi garantie jusqu'à +30 dBu de crête.

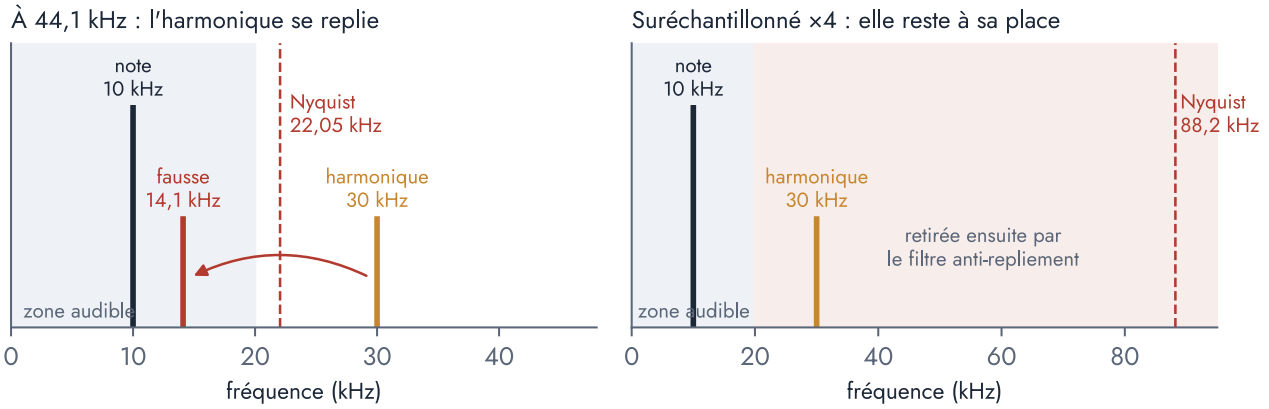
7 Non-linéarité et repliement spectral

Les harmoniques créées par l'étage actif et par le fer peuvent dépasser la fréquence de Nyquist. Elles ne disparaissent pas : elles **se replient** sous elle, comme dans un miroir dont Nyquist serait l'axe. C'est le **repliement spectral**, en anglais **aliasing**. Une fréquence f supérieure à Nyquist réapparaît à :

$$f_{repliée} = f_e - f$$

À 44,1 kHz, l'harmonique 3 d'une note à 10 kHz, à 30 kHz, réapparaît à 44,1 − 30 = **14,1 kHz** : une fréquence sans aucun rapport musical avec la note jouée, et qui ne suit pas la mélodie. C'est ce qui donne à certaines saturations numériques leur grain métallique.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite



À gauche, l'harmonique à 30 kHz se replie à 14,1 kHz. À droite, le calcul suréchantillonné lui laisse la place d'exister ; le filtre la retire ensuite.

La parade est encore le suréchantillonnage : à 44,1 kHz, l'étage actif est calculé à quatre fois la cadence, et le réseau avec ses transformateurs à huit fois. Les harmoniques ont la place d'exister ; puis un **filtre anti-repliement**, très raide, les retire avant le retour à la cadence de la session. Seule la partie audible du spectre est conservée, sans fréquences fausses.

8 Les transformateurs

Un transformateur se compose de deux bobinages, le **primaire** et le **secondaire**, enroulés sur un noyau de fer. Le courant du primaire magnétise le fer, et ce champ magnétique variable induit une tension dans le secondaire : c'est le **couplage magnétique**. En audio, il sert à adapter des impédances, à isoler des appareils, à symétriser une ligne, et il colore le son.

La partie linéaire

Une part du comportement d'un transformateur se décrit par des composants équivalents simples, assemblés en un **schéma équivalent** :

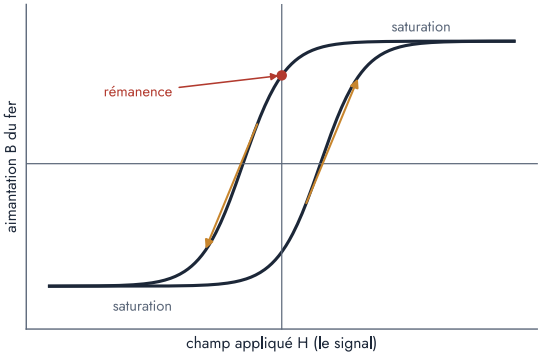
- la **résistance des enroulements**, celle du fil de cuivre ;
- l'**inductance magnétisante**, qui représente le courant nécessaire pour magnétiser le fer, et limite l'extrême grave ;
- l'**inductance de fuite**, la part du champ qui ne traverse pas les deux bobinages ;
- les **capacités parasites** entre spires et entre bobinages, qui forment avec l'inductance de fuite une légère **résonance** dans l'aigu.

Cette partie se calcule comme le réseau passif. Le plus intéressant, et le plus difficile, c'est le fer.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

L'hystérésis : la mémoire du fer

Le fer est constitué de petites régions aimantées, les **domaines magnétiques**, séparées par des frontières, les **parois**. Un champ extérieur fait grandir les domaines alignés avec lui, en déplaçant les parois. Mais ces parois s'accrochent aux imperfections du métal, et ne reviennent pas à leur place quand le champ diminue : le fer garde la trace de ce qu'il a subi. C'est l'**hystérésis**, du grec « retard ». On la représente par la **courbe B-H**, qui relie le champ appliqué, H, à l'aimantation obtenue, B : à la montée et à la descente, le fer ne suit pas le même chemin, et la courbe forme une **boucle**.



La boucle d'hystérésis, sa rémanence et sa saturation.

Deux points caractérisent la boucle : la **rémanence**, l'aimantation qui subsiste quand le champ revient à zéro ; et la **saturation**, au-delà de laquelle le fer ne peut plus s'aimanter davantage.

Le modèle de Jiles-Atherton

Midnight LCR utilise le **modèle de Jiles-Atherton**, publié en 1984 et largement employé pour simuler les matériaux magnétiques. Il décompose l'aimantation en deux parts.

- **La courbe idéale**, dite **anhystérétique** : l'aimantation qu'aurait le fer si ses parois glissaient sans frottement. Elle suit une courbe en S, décrite par la **fonction de Langevin**, issue de la physique statistique.
- **Le retard dû aux frottements** : la part **irréversible** de l'aimantation, celle des parois accrochées, court après la courbe idéale sans jamais la rejoindre tout à fait. Une petite part **réversible** représente les parois qui se déforment sans se décrocher.

Cinq paramètres règlent le modèle : l'**aimantation de saturation** ; la forme de la courbe idéale ; la force des frottements, qui fixe la largeur de la boucle ; la part réversible ; et le couplage entre domaines voisins. Ce sont ces paramètres qui ont été ajustés aux mesures du transformateur réel : c'est la partie **boîte grise** du modèle.

Une conséquence étonnante, vraie dans le plug-in comme dans le matériel : le fer ayant une mémoire, **deux passages identiques ne sonnent pas exactement pareil s'ils n'ont pas reçu la même histoire**. Le calcul reste pourtant parfaitement déterministe : à histoire identique, résultat identique, au bit près.

Pourquoi le grave sature en premier

La **loi de Faraday** relie la tension aux bornes d'un enroulement à la variation du champ dans le fer. Pour une tension sinusoïdale, l'aimantation maximale atteinte vaut :

$$B_{max} = V / (4{,}44 \cdot f \cdot N \cdot S)$$

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

où V est la tension efficace, f la fréquence, N le nombre de spires et S la section du noyau. En mots : **à tension égale, l'aimantation est inversement proportionnelle à la fréquence**. Une note à 40 Hz magnétise le fer vingt-cinq fois plus qu'une note à 1 kHz de même niveau. À fort niveau, c'est donc le grave qui approche la saturation, en premier et en douceur : la compression et les harmoniques apparaissent d'abord dans le bas du spectre, comme sur les appareils d'époque.

Les pertes du fer

Un noyau magnétique dissipe de l'énergie de trois façons, selon la décomposition établie par Giorgio Bertotti : les **pertes par hystérésis**, l'énergie perdue à parcourir la boucle ; les **courants de Foucault**, en anglais *eddy currents*, courants parasites induits dans le métal, qui croissent avec le carré de la fréquence ; et les **pertes en excès**, liées aux mouvements brusques des parois. Le modèle intègre les trois : elles expliquent une part de la couleur du transformateur dans l'aigu, et de sa réponse aux transitoires.

L'option IRON

L'option **IRON** fait passer un **courant de polarisation continu**, en anglais *DC bias*, de quelques milliampères, dans le primaire du transformateur de sortie. Ce courant décale le point de fonctionnement du fer le long de sa courbe : le signal ne parcourt plus la boucle de façon symétrique, et approche la saturation d'un côté avant l'autre. Comme pour le transistor, cette asymétrie crée surtout de l'**harmonique 2**.

L'identification au banc

Le transformateur d'entrée a été caractérisé par plus d'une centaine de mesures au banc : son gain et ses harmoniques, en particulier l'harmonique 3, selon la fréquence et le niveau. Les paramètres du schéma équivalent et du modèle de Jiles-Atherton ont été ajustés pour reproduire ces mesures, puis le modèle est vérifié contre elles à chaque version.

9 Deux modes de calcul

La simulation complète a un coût : la résolution par Newton, le suréchantillonnage et le modèle du fer occupent, en stéréo, de 15 à 35 % d'un cœur de processeur selon la machine. Pour l'enregistrement ou le jeu en direct, où la latence et la charge comptent, Midnight LCR Pro propose un second mode.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

	FULL	ECO
Ce qui est calculé	tout le circuit, non linéaire : hystérésis, transistors, fer	le réseau et le transformateur d'entrée, **linéarisés** autour de leur point de repos : un système linéaire à huit variables d'état ; l'étage actif et le fer remplacés par un gain idéal et un léger filtre passe-haut
Suréchantillonnage	filtres polyphasés à phase linéaire	filtres demi-bande récursifs, à très faible retard
Latence à 44,1 kHz	72 échantillons	4 échantillons
Charge, stéréo	de 15 à 35 % d'un cœur, selon le processeur	environ 1 à 2 %
Écart de courbe		moins de 0,1 dB de 100 Hz à 20 kHz ; jusqu'à 0,4 dB sous 100 Hz

Linéariser, c'est remplacer chaque courbe par sa tangente au point de repos : pour de petits signaux, la différence est infime, mais toute saturation disparaît. Écouter ECO puis FULL sur un même passage, c'est donc entendre précisément ce qu'apportent les **non-linéarités** : la courbe est la même, le caractère ne l'est pas. Quand le logiciel hôte contourne le plug-in, enfin, le moteur cesse tout calcul et se contente de retarder le signal de la latence annoncée : la charge tombe à 0,1 %.

10 Vérifier une simulation

Une simulation ne vaut que par sa vérification. Midnight LCR est confronté, à chaque version, à des références indépendantes du code qui le calcule.

- **Un modèle de référence indépendant.** Le réseau passif est recalculé par un programme écrit séparément, dans un autre langage, sur 528 réglages : les deux calculs doivent coïncider.
- **Le simulateur de circuits de référence.** L'étage actif est comparé à **ngspice**, la version libre de **SPICE**, le simulateur utilisé par toute l'industrie électronique depuis les années 1970 : tensions de repos, gain, harmoniques, écrêtage. La phase de la chaîne y est aussi comparée.
- **Les mesures du réel.** Le réseau a été comparé à 39 balayages de mesure du prototype ; le transformateur, à ses mesures au banc. Le kit monté a aussi été comparé à l'oreille au plug-in.
- **Le test de nul.** On additionne deux signaux, l'un en **polarité inversée**. S'ils sont identiques, ils s'annulent en un silence total ; la moindre différence reste audible et mesurable. Ce test vérifie qu'un export et une lecture en temps réel sont **identiques au bit près**, et qu'une nouvelle version ne change pas le son d'une précédente : le calcul est **déterministe**.
- **La non-régression systématique.** Les comparaisons sont rejouées à toutes les fréquences d'échantillonnage, de 22,05 à 192 kHz, et pour toutes les tailles de blocs que peut envoyer un

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

logiciel hôte.

Trente-cinq tests automatiques rassemblent ces vérifications, auxquelles s'ajoutent les validateurs officiels des formats de plug-ins, au niveau le plus strict.

11 Les limites, assumées

Une modélisation de circuit n'est pas l'appareil. Ses limites méritent d'être dites aussi clairement que ses forces.

- **Un modèle reproduit un exemplaire.** Les composants réels ont des tolérances : deux appareils construits avec les mêmes références ne sonnent pas exactement pareil. La simulation reproduit le circuit nominal, ajusté sur le prototype mesuré, et non chaque exemplaire possible.
- **Les modèles de composants sont des approximations.** L'équation de Shockley décrit bien un JFET dans sa zone utile, moins bien à ses extrêmes ; le modèle de Jiles-Atherton décrit la boucle principale du fer, plus approximativement certaines boucles mineures. Les vérifications indiquent où l'accord est mesuré, pas une perfection universelle.
- **Certains phénomènes sont volontairement laissés de côté**, comme la dérive thermique des composants ou leur vieillissement : leur effet sur le son est faible, et leur coût de calcul serait élevé.
- **La fidélité a un prix** : une charge de calcul plus élevée qu'un égaliseur numérique ordinaire, et une latence en mode FULL, compensée par le logiciel hôte.

Ces limites sont celles de toute simulation sérieuse. Ce qui distingue une simulation fiable, c'est qu'elles soient connues, mesurées, et vérifiées à chaque version.

> Le plug-in ne contient aucun réglage « pour faire chaud » : il contient un circuit, et la chaleur est une conséquence de la physique.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

Glossaire

Aliasing, repliement spectral
Repli, sous la fréquence de Nyquist, des fréquences qui la dépassent ; elles reviennent comme des fréquences fausses, sans rapport musical avec le signal.

Analyse nodale
Méthode qui écrit les équations d'un circuit à partir de la loi des nœuds ; base des simulateurs de circuits.

Anhystérétique
Courbe d'aimantation idéale d'un matériau sans frottement des parois magnétiques.

Biquad
Filtre numérique élémentaire du second ordre, brique de base de nombreux égaliseurs numériques.

Boîte noire, grise, blanche
Modéliser par les mesures seules ; par la physique ajustée aux mesures ; par la physique et le schéma.

Contre-réaction
Renvoi d'une partie de la sortie vers l'entrée d'un amplificateur, pour en stabiliser le gain et réduire la distorsion.

Convergence quadratique
Propriété de la méthode de Newton : près de la solution, le nombre de chiffres justes double à chaque essai.

Convolution
Application d'une réponse impulsionnelle à un signal ; exacte pour les systèmes linéaires et invariants.

Courants de Foucault
Courants parasites induits dans un noyau de fer par un champ variable ; ils croissent avec la fréquence.

Discrétisation
Passage d'équations continues à un calcul pas à pas.

Domaines magnétiques
Régions d'un matériau ferromagnétique aimantées dans une même direction, séparées par des parois.

Écrêtage, clipping
Limitation d'un signal qui dépasse ce que le circuit peut fournir ; progressif dans un étage à transistors.

Équation de Shockley
Loi approximativement quadratique reliant le courant d'un JFET à sa tension de commande.

Filtre anti-repliement
Filtre qui retire les fréquences au-delà de Nyquist avant un changement de cadence.

Filtre polyphasé
Façon efficace de calculer un filtre de changement de cadence, qui ne calcule que les échantillons utiles.

Fréquence de Nyquist
Moitié de la fréquence d'échantillonnage : la plus haute fréquence représentable.

Harmoniques paires, impaires
Fréquences multiples de la fréquence jouée ; les paires, consonantes, sont réputées chaudes ; les impaires, plus dures.

Hystérésis
Mémoire d'un matériau magnétique : son aimantation dépend de son histoire, et décrit une boucle.

Inductance de fuite
Part du champ d'un transformateur qui ne traverse pas les deux bobinages.

Inductance magnétisante
Inductance qui représente la magnétisation du noyau ; elle limite l'extrême grave d'un transformateur.

JFET
Transistor à effet de champ à jonction.

Latence
Retard introduit par un traitement ; un plug-in l'annonce au logiciel hôte, qui la compense.

Linéarisation
Remplacement d'une loi courbe par sa tangente au point de repos ; juste pour les petits signaux.

Loi de Faraday
Relie la tension d'un enroulement à la variation du champ magnétique ; l'aimantation y est inversement proportionnelle à la fréquence.

Lois de Kirchhoff
Loi des nœuds et loi des mailles : la conservation du courant et de la tension dans un circuit.

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

Matrice jacobienne
Tableau des pentes de chaque erreur par rapport à chaque inconnue ; utilisée par la méthode de Newton.

Méthode des trapèzes, transformation bilinéaire
Discrétisation implicite et stable, qui moyenne la pente entre deux instants.

Méthode de Newton-Raphson
Résolution d'équations non linéaires par essais successifs, chacun guidé par la pente de l'erreur.

Modèle de Jiles-Atherton
Modèle physique de l'aimantation et de l'hystérésis des matériaux magnétiques, à cinq paramètres.

Noyaux de Volterra
Généralisation de la réponse impulsionnelle aux systèmes non linéaires.

Perte d'insertion
Atténuation d'un réseau passif au neutre, à compenser par un amplificateur.

Phase linéaire
Propriété d'un filtre qui retarde toutes les fréquences de la même durée, sans déformer la forme d'onde.

Polarisation, point de repos
Tensions et courants continus autour desquels un transistor fonctionne.

Réactance
Opposition d'un condensateur ou d'une self au signal alternatif, qui dépend de la fréquence.

Rémanence
Aimantation qui subsiste dans le fer quand le champ revient à zéro.

Représentation d'état
Écriture d'un circuit par ses variables de mémoire, tensions des condensateurs et courants des selfs.

Réponse impulsionnelle
Réaction d'un système à une impulsion brève ; elle contient toute la réponse d'un système linéaire et invariant.

Saturation magnétique
État où le fer ne peut plus s'aimanter davantage.

SPICE, ngspice
Simulateur de circuits de référence de l'industrie électronique, et sa version libre.

Suréchantillonnage
Calcul interne à une cadence plus élevée que celle de la session, contre le warping et le repliement.

Système raide
Système qui mêle des phénomènes très rapides et très lents, et met en difficulté les méthodes de calcul simples.

Tension de pincement
Tension de commande qui bloque complètement un JFET.

Test de nul
Addition de deux signaux, l'un en polarité inversée : s'ils sont identiques, il ne reste que le silence.

Warping fréquentiel
Tassement des fréquences proches de Nyquist par la transformation bilinéaire.

Zipper noise
Claquements en escalier produits par un réglage changé brutalement.

La gamme Midnight LCR : le **kit**, un égaliseur passif à trois bandes à construire, avec sa formation ; **Midnight LCR Lab**, le laboratoire de prototypage de réseaux passifs ; **Midnight LCR Pro**, la simulation complète de la chaîne analogique.

Ce document existe aussi dans une version simplifiée. Studio Delta Sigma · studiodeltasigma.com

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo · Tous droits réservés · Reproduction interdite sans autorisation écrite

Droits d'auteur et conditions d'utilisation

© 2026 Delta Sigma – Dominique Spagnolo. Tous droits réservés.

Ce document, ses textes, ses illustrations, ses courbes et sa mise en page sont des œuvres protégées par le Code de la propriété intellectuelle, notamment ses articles L111-1 et L122-4.

Toute reproduction, représentation, traduction, adaptation, modification ou diffusion, intégrale ou partielle, par quelque procédé et sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable de l'auteur, est interdite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L335-2 et suivants du même code.

Seules sont permises, conformément à l'article L122-5, les copies strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique, scientifique ou d'information de l'œuvre, à condition d'indiquer clairement le nom de l'auteur et la source.

Les demandes d'autorisation s'adressent à info@studiodeltasigma.com.

Midnight LCR, Midnight LCR Lab, Midnight LCR Pro et Delta Sigma sont des noms commerciaux de Dominique Spagnolo. Les autres noms de logiciels et de marques cités appartiennent à leurs propriétaires respectifs.

Ce document est fourni à titre d'information. Il décrit les logiciels à la date de sa publication, peut évoluer avec leurs versions, et n'a pas de valeur contractuelle.

Version 1.0, octobre 2026 · Delta Sigma · studiodeltasigma.com