

I Transformation des signaux - Montages non linéaires.

I.1 Introduction

Nous avons vu au premier chapitre des exemples de dipôles linéaires et non linéaires. La diode et la photodiode sont des illustrations de composants non linéaires. Il a été montré comment utiliser de tels composants en régime sinusoïdal linéaire : en linéarisant la caractéristique courant-tension autour du point de fonctionnement (i.e. en approximant la caractéristique par une droite), nous pouvons nous ramener à des dipôles linéaires et les traiter comme des résistances (cf figure 1). Cette linéarisation est valable pour les signaux de faible amplitude. Plus l'amplitude augmente, plus l'approximation linéaire est inexacte. Le signal de sortie se déforme progressivement. Lorsque les excursions du signal incident sont importantes et sont localisées à la fois dans la zone passante et dans la zone bloquée de la diode, le signal de sortie est fortement déformé et toute ressemblance avec le signal d'entrée est perdue : on n'est plus en régime linéaire.

Ce régime linéaire approximatif (ie linéarisation de la caractéristique non linéaire) n'est donc

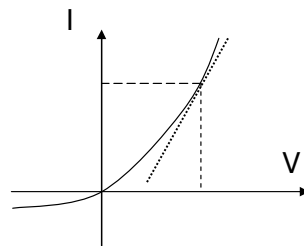


FIG. 1 – Caractéristique $I(V)$ d'une diode réelle. Linéarisation autour d'un point de polarisation (en pointillés).

valable que pour de faibles amplitudes de signaux. Les signaux véhiculant une information sont des signaux de faible amplitude afin d'utiliser la linéarité des composants. Ceci permet une propagation des signaux sans perte d'information (sans déformation). L'étude réalisée au premier chapitre est donc valable pour de tels signaux appliqués à une zone quasi-linéaire d'un composant. Mais on est limité en amplitude ! Ces non-linéarités peuvent alors être perçues comme une limite gênante pour un fonctionnement de transport et d'utilisation d'informations.

Mais elles peuvent avoir aussi des avantages. Un grand nombre d'applications utilisent de tels comportements. Citons par exemple : le redressement de signaux qui permet de générer une tension continue à l'aide d'une tension alternative, la comparaison de signaux qui est largement utilisée en électronique numérique ou la génération de signaux alternatifs.

I.2 Le redressement.

I.2.1 Généralités sur le redressement.

Le but du redressement est d'obtenir un signal continu à partir d'un signal alternatif. Cette fonction est importante en électronique de puissance. Elle est donc aussi présente dans les circuits électroniques. Tout circuit électronique actif est en effet alimenté en continu et l'énergie délivrée par l'EDF est en alternatif. Il faut donc pouvoir générer du continu à partir de l'alternatif.

Valeur moyenne d'un signal.

Nous allons dans un premier temps revenir sur la notion de valeur moyenne d'un signal, grandeur qui nous sera utile pour la caractérisation du redressement d'un signal.

Considérons un signal périodique $u(t)$, de période T . La valeur moyenne de ce signal est définie par l'intégrale suivante :

$$\langle u(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt$$

Remarque : dans la décomposition en série de Fourier d'un signal périodique, ce terme est associé à une fréquence nulle, c'est à dire à un signal qui ne varie pas dans le temps. La valeur moyenne caractérise donc bien la partie "constante" d'un signal.

Exercice : Calculer la valeur moyenne du signal représenté sur la figure 2.

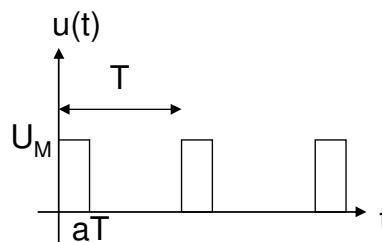


FIG. 2 – Signal créneau à rapport cyclique variable.

Un signal alternatif est un signal périodique à valeur moyenne nulle. Un signal continu est un signal qui ne varie pas dans le temps et qui a une valeur moyenne non nulle. Pour obtenir un signal continu à partir d'un signal alternatif, on procède de la manière suivante : on redresse tout d'abord le signal, c'est à dire que l'on modifie le signal alternatif afin d'avoir une valeur moyenne non nulle (cf figure 3). Pour cela, il suffit par exemple de ne conserver que les alternances positives ou de prendre la valeur absolue du signal. Si l'on souhaite obtenir un signal constant, il faut ensuite supprimer ensuite les variations (autour de la valeur moyenne) de ce signal et ne conserver que la valeur moyenne. Un filtre passe-bas assure une telle fonction et lisse ainsi le signal. Plus la fréquence de coupure du filtre sera basse, plus le signal sera lisse et proche d'un signal constant (on ne conserve que les basses fréquences). L'obtention d'un signal continu passe donc par une étape de redressement et une étape de filtrage. L'opération de filtrage est aisée à réaliser (voir chapitres précédents). Aussi qualifie-t-on généralement un

signal de continu lorsque sa valeur moyenne est non nulle.

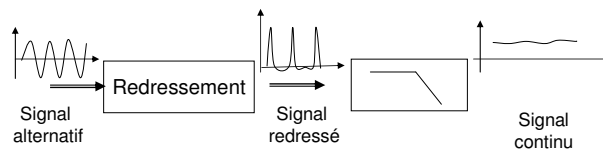


FIG. 3 – Obtention d'un signal continu à partir d'un signal alternatif.

Rappels sur les diodes.

Nous utiliserons dans la suite deux modèles de caractéristiques des diodes. La figure 4 représente les deux modèles : à gauche la diode sans seuil ($V_0 = 0$) et à droite la diode avec seuil (typ., $V_0 = 0.7 \text{ V}$).

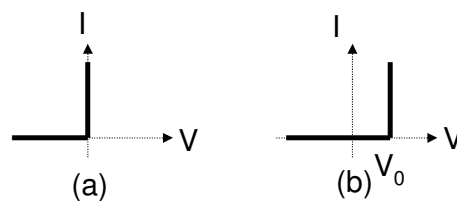


FIG. 4 – deux modèles de diodes : (a) : *diode sans seuil*; (b) *diode avec seuil*

D'après ces graphiques, nous en déduisons le comportement des diodes :

diode passante $\Leftrightarrow i \geq 0 \text{ \& } V = V_0$

diode bloquée $\Leftrightarrow i = 0 \text{ \& } v \leq V_0$

I.2.2 Redressement simple alternance.

Le schéma de la figure 5 représente le montage d'un redresseur mono-alternance. e est sinusoïdale, d'amplitude 5 V.

1. Représenter la forme des signaux s , i (courant qui circule dans la résistance) et V_d (tension aux bornes de la diode) pour les deux modèles de diode.
2. Représenter la puissance instantanée dissipée par la diode.
3. Calculer la valeur moyenne de la tension de sortie (dans le cas d'une diode sans seuil).

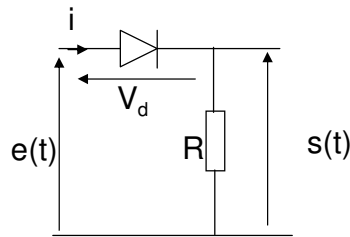


FIG. 5 – Schéma d'un redresseur mono-alternance.

I.2.3 Redressement double alternance.

Le redressement double alternances est constitué de quatre diodes (cf figure 6). Chaque diode étant caractérisée par deux états, il y a donc théoriquement $2^4 = 16$ états possibles. La méthode précédente est donc fastidieuse ... Deux autres méthodes sont plus simples. On peut montrer que deux diodes voisines ne peuvent pas être dans le même état (à faire en exercice d'entraînement !). On réduit donc considérablement le nombre de possibilités.

Enfin, on peut faire place à l'intuition : tenter de comprendre ce qui peut se passer en fonction des signes des courants et des tensions et montrer que ce sont les uniques possibilités.

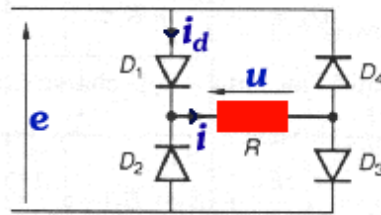


FIG. 6 – Schéma d'un redresseur double alternances.

1. Si le courant i_d est positif, on peut supposer que le courant ne peut passer que dans la diode 1 et 3. Supposons les diodes 1 et 3 passantes et les diodes 2 et 4 bloquées (si les diodes 2 et 4 étaient aussi passantes, on aurait $e = 0$!). A quelle condition sur e reste-t-on dans cet état ? On supposera que les diodes sont sans seuil.
2. Supposons les diodes 1 et 3 bloquées et les diodes 2 et 4 passantes. A quelle condition sur e reste-t-on dans cet état ?
3. Quels sont les autres cas possibles ? Conclusions ?
4. Représenter alors les signaux e , u , v_{d1} , v_{d2} , i et i_{d1} .
5. Calculer alors la valeur moyenne de la tension u . Conclusions ?

I.3 Les comparateurs.

I.3.1 Introduction

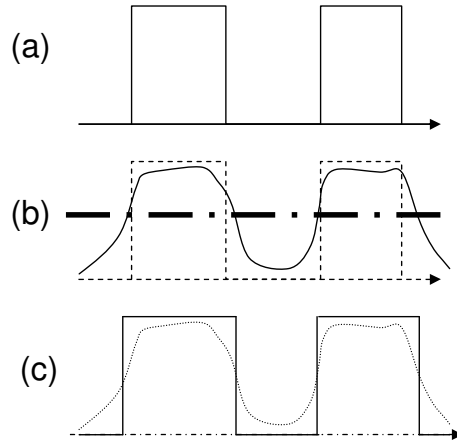


FIG. 7 – Exemple de remise en forme de signaux numériques :

(a) *signal initial*,

(b) *trait en pointillés : signal initial, trait plein : signal déformé après propagation*,

(c) *trait en pointillés : signal déformé, trait plein : signal obtenu après comparaison*.

La fonction "comparaison d'un signal à un autre" intervient à la fois dans les circuits analogiques et dans les circuits numériques. L'utilisation en logique numérique est en effet très fréquente. On peut citer deux applications typiques :

- la conversion analogique numérique. Certains convertisseurs analogique numérique (CAN) utilisent des comparateurs. Le principe des convertisseurs flash est le suivant : on compare la tension d'entrée à des tensions de référence. Il suffit ensuite de regarder à partir de quel comparateur notre signal devient plus faible qu'une tension de référence.
- la remise en forme des signaux numériques. Considérons une transmission numérique (l'information est binaire et on transmet une succession de 0 et 1 codés par exemple par une tension nulle et une tension à 5 V). Supposons qu'une telle transmission ait lieu dans des câbles électriques sur une distance suffisamment longue pour que les signaux initialement carrés se déforment. En outre, du bruit peut apparaître sur notre signal. Si nous souhaitons récupérer l'information (ie reconnaître la forme initiale des signaux sans erreur), il faut avant tout "remettre en forme" ces signaux, c'est à dire les remettre sous forme de signaux carrés (signal à 0 V ou à 5 V). La méthode la plus simple consiste à utiliser un comparateur à 2.5 V : toute tension supérieure à 2.5 V passera à 5 V et toute tension inférieure à 2.5 V sera mise à 0 V. La figure 7 montre un exemple de remise en forme de signaux numériques. On voit sur cet exemple tout l'intérêt d'une chaîne

numérique : on ne perd pas d'information ... si on sait mettre en œuvre correctement des comparateurs !

I.3.2 Les comparateurs simples.

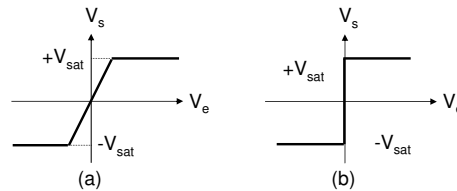


FIG. 8 – Caractéristiques tension de sortie-tension d'entrée d'un amplificateur opérationnel. (a) : caractéristique réelle, (b) caractéristique utile pour l'étude des comparateurs

La fonction de comparaison utilise les amplificateurs opérationnels (AO) en régime non linéaire. Revenons sur la caractéristique d'un amplificateur opérationnel (figure 8, (a)). On distingue trois zones : une zone à $V_s = -V_{sat}$, une zone linéaire et une zone à $V_s = +V_{sat}$. Si l'AO n'a pas une unique contre réaction sur la borne inverseuse, il fonctionne en non-linéaire c'est à dire que selon le signe de la tension $\epsilon = V^+ - V^-$ la tension de sortie vaut $V_s = \pm V_{sat}$. Dans un tel fonctionnement, on peut considérer que la caractéristique $V_s = f(V_e)$ se limite aux deux zones saturées, comme cela est représenté sur la figure 8 (b) (l'intervalle de la zone linéaire est très faible, de l'ordre de quelques dizaines voire centaine de microvolts, et peut être négligé en fonctionnement non linéaire).

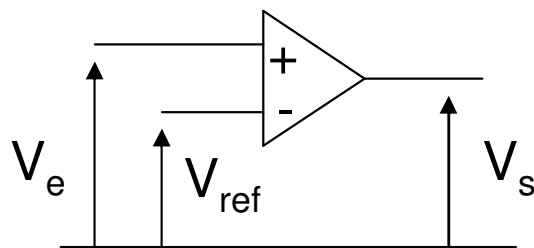


FIG. 9 – Montage comparateur simple.

Considérons le montage de la figure 9. La tension d'entrée V_e est une sinusoïde pure d'amplitude 5 V. Pour $V_{ref} = 0V$ et $V_{ref} = 2.5V$, tracer la tension de sortie V_s sur deux périodes du signal V_e .

Cette comparaison "simple" a un inconvénient majeur. La figure 11, page 8 montre la transmission d'une information numérique bruitée et déformée. Lors de la remise en forme du signal

avec un comparateur simple (partie de gauche), le bruit va générer des oscillations du signal de sortie, ce qui peut gêner les circuits de lecture numérique lors de la lecture de l'information. Pour remédier à ce problème, l'utilisation de comparateurs plus complexes, comme les comparateurs à hystérésis, est à envisager.

I.3.3 Le trigger de Schmitt ou comparateur à hystérésis.

Il existe différentes versions du trigger de Schmitt. Nous allons étudier une des versions les plus simples, illustrée sur la figure 10.

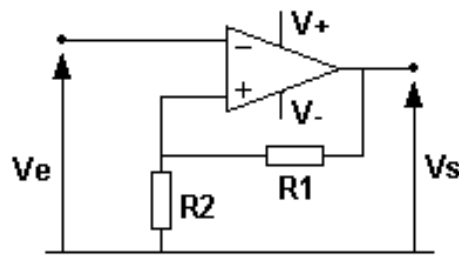


FIG. 10 – Schéma d'un trigger de Schmitt inverseur.

1. En supposant l'AO saturé "positivement" ($V_s = +V_{sat}$), déterminer à quelle condition on reste dans cet état.
2. Même question si l'on suppose l'AO saturé "négativement" ($V_s = -V_{sat}$).
3. Tracer alors la caractéristique $V_s = f(V_e)$.
4. Comment pourrait on modifier le montage pour centrer cette caractéristique autour d'une tension V_{ref} ?

Les valeurs de R_1 et R_2 permettent ainsi de régler la largeur du cycle d'hystérésis. En choisissant bien ces valeurs par rapport aux caractéristiques du bruit, on peut limiter l'influence du bruit sur la reconstruction du signal numérique. La partie de droite de la figure 11 reprend l'exemple du signal bruité étudié au paragraphe précédent. La remise en forme du signal s'effectue, sur cet exemple, correctement, sans oscillation du signal final.

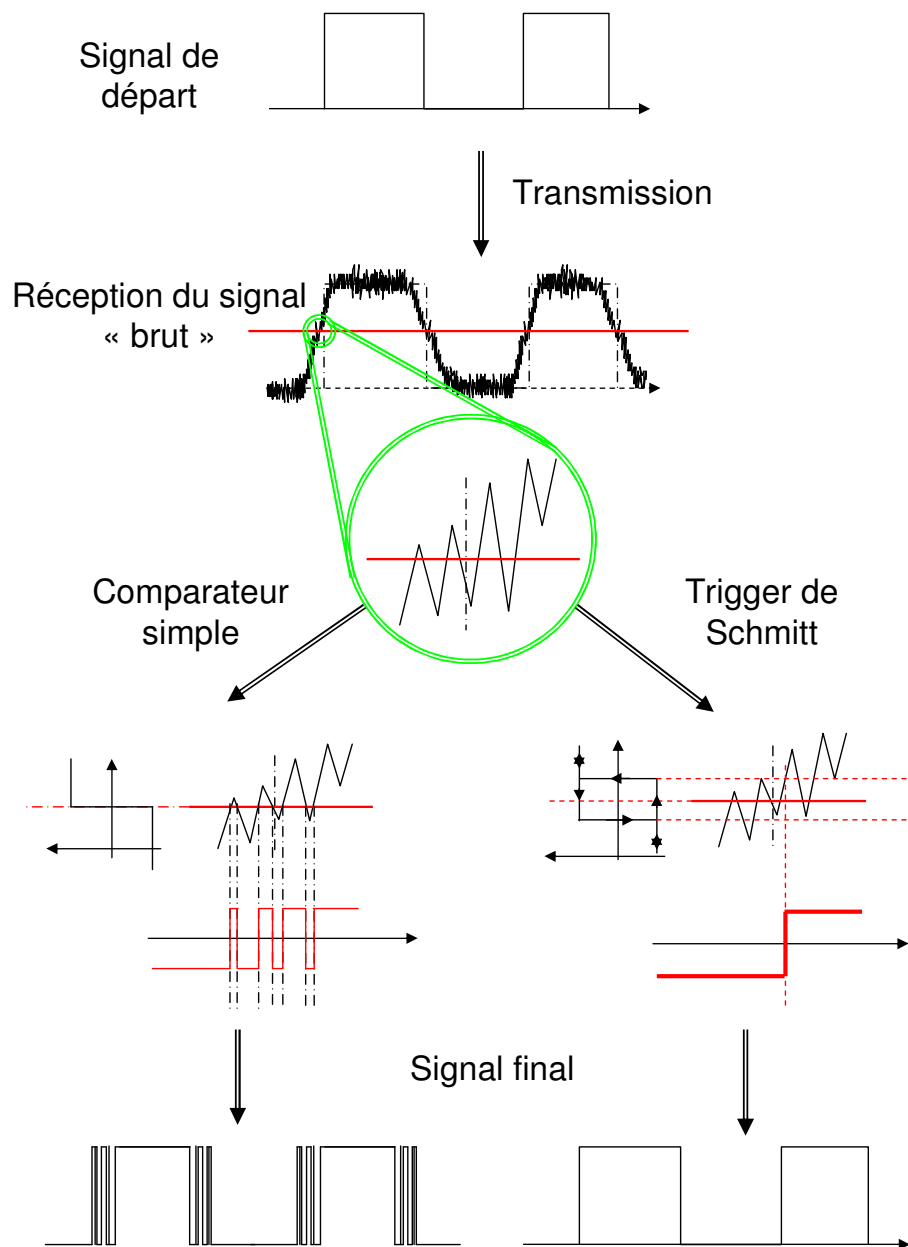


FIG. 11 – Comparaison de la sensibilité au bruit des comparateurs simples et à hystérésis.

I.4 Pour aller plus loin ...

I.4.1 Bibliographie

- Malvino, ed. Dunod, Principes d'électronique : un grand classique de l'électronique analogique. L'approche est simple. Il contient beaucoup d'exemples et d'exercices corrigés. Parfois difficile de s'y retrouver à cause de la quantité d'illustrations (remarques, exercices, exemples technologiques) ...mais très complet.
- Horowitz and Hill, ed. Elektor, Traité de l'électronique (version française de l'édition : The art of electronics, cambridge university press) : l'essentiel de l'électronique y est. Les montages courants sont présentés. Il est moins détaillé mais il va plus loin dans l'électronique. Un bon complément du "Malvino".

I.4.2 ... Et sur le web :

<http://perso.wanadoo.fr/xcotton/electron/coursetdocs.htm> : un site personnel qui répertorie les sites essentiels concernant la physique appliquée et l'électronique. Il est régulièrement mis à jour et classé par thèmes. Un site incontournable.

<http://phytem.ens-cachan.fr/> : le site de la filière physique de l'ENS de Cachan. Il y a peu d'électronique et plus de physique appliquée.