



## DOSSIER POUR L'AGRÉGATION EXTERNE DE SCIENCES INDUSTRIELLES

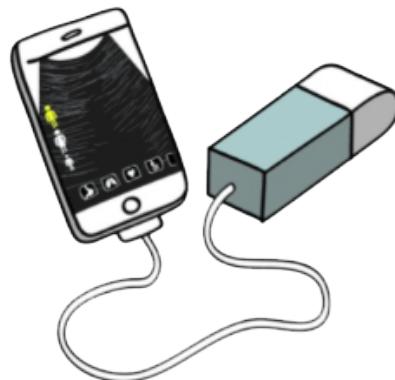
OPTION : INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

---

# Conception d'un écho-stéthoscope portable

---

Romain AGAISSE



Cette œuvre est mise à disposition sous licence Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 France. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/fr/> ou écrivez à Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

# Table des matières

<b>1 Première partie : Approche scientifique</b>	<b>2</b>
1.1 Problématique . . . . .	2
1.2 Contenu du dossier . . . . .	2
1.3 Présentation du projet echOpen . . . . .	3
1.3.1 Structure . . . . .	3
1.3.2 Objectifs et contraintes . . . . .	3
1.4 Fonctionnement de l'écho-stéthoscope portable echOpen . . . . .	6
1.4.1 Principe de base de l'échographie . . . . .	6
1.4.2 Fonctionnement du système complet . . . . .	9
1.5 Apport personnel . . . . .	14
1.5.1 Problématique . . . . .	14
1.5.2 Topologie de la solution proposée . . . . .	14
1.5.3 Dimensionnement de la structure . . . . .	16
1.6 Conclusion de la partie scientifique . . . . .	21
<b>2 Seconde partie : Approches pédagogiques</b>	<b>22</b>
2.1 Exploitation pédagogique en première STI2D spécialité SIN . . . . .	22
2.1.1 Contexte . . . . .	22
2.1.2 Structure générale de la séquence pédagogique . . . . .	23
2.1.3 Plan détaillé de la séquence . . . . .	24
2.1.4 Descriptif du mini-projet . . . . .	28
2.1.5 Résumé de la séquence . . . . .	32
2.2 Exploitation pédagogique en DUT GE2I . . . . .	33
2.2.1 Structure générale de la séquence . . . . .	33
2.2.2 Détail de la séquence . . . . .	34
2.3 Conclusion de la partie pédagogique . . . . .	38
<b>Références</b>	<b>39</b>
<b>3 Annexe 1</b>	<b>40</b>

# 1 Première partie : Approche scientifique

## 1.1 Problématique

Parmi les grands enjeux sociétaux du XXI<sup>eme</sup> siècle il en est un qui tient une place centrale : celui de la santé et de son financement.

Si d'après l'organisation mondiale de la santé la France est le pays qui présente le meilleur système de santé du monde elle présente encore néanmoins de profondes inégalités d'accès aux soins dues notamment à un fort gradient social et à des spécialistes mal répartis sur le territoire. Ce phénomène à pour conséquence dans un pays où l'espérance de vie est l'une des plus élevée au monde d'avoir également un des taux de mortalité prématuée évitable les plus forts d'Europe.

Au niveau mondial où les inégalités se creusent encore davantage de nombreux pays n'offrent aujourd'hui pas encore la prestation d'une série de services de santé de base [2]. En effet dans de nombreuses zones en développement de la planète la base de trop nombreux diagnostics est encore aujourd'hui composée de simples observations à l'oeil nu et palpations qui ne permettent pas seules de juger de l'urgence de certaines situations.

C'est dans ce contexte précis qu'un apport des techniques d'imagerie médicale est primordial et permettra de sauver de nombreuses vies. Cependant les principaux dispositifs d'imagerie d'aujourd'hui sont encombrants, coûteux et utilisés par des médecins spécialisés.

Dans le but de toucher le plus grand nombre il faudrait apporter une solution économique, peu encombrante et utilisable facilement par des professionnels tels que les médecins généralistes en France qui sont souvent une personne de confiance très abordable pour les familles ou encore les membres d'associations telles que Médecins sans frontières présents dans les pays en voie de développement.

## 1.2 Contenu du dossier

Ma collaboration avec le groupe echOpen s'étant principalement articulé en deux grandes phases, le premier objectif de ce dossier sera de les retranscrire. En effet j'ai tout d'abord été amené à étudier activement en détail le fonctionnement de la sonde échographique développée pour répondre à la problématique (notamment du point de vue de sa chaîne d'acquisition), puis en exploitant mes connaissances dans le domaine des convertisseurs statiques de puissance il m'a été demandé de proposer une solution qui permettrait d'effectivement rendre le système entièrement portable.

Le second objectif de ce dossier sera de présenter deux exploitations pédagogiques pour le cycle terminal et l'enseignement supérieur portant sur les deux phases de mon travail au sein d'echOpen.

## 1.3 Présentation du projet echOpen

### 1.3.1 Structure

La structure echOpen [1] qui m'accueille dans le cadre de ce dossier industriel est un noyau de cinq personnes qui ont rassemblé autour d'elles une communauté de plus de 200 personnes dans le but de mener à bien leur projet de conception d'un écho-stéthoscope open source à bas cout.

Soutenu par la fondation Pierre Fabre et basé à l'hôpital Hôtel Dieu sur l'île de la cité à Paris le projet echOpen a vu le jour à l'automne 2014 avec pour objectif d'obtenir un premier prototype fonctionnel le 17 février 2016 soit le jour du bicentenaire de l'invention du stéthoscope par le docteur René Laënnec.

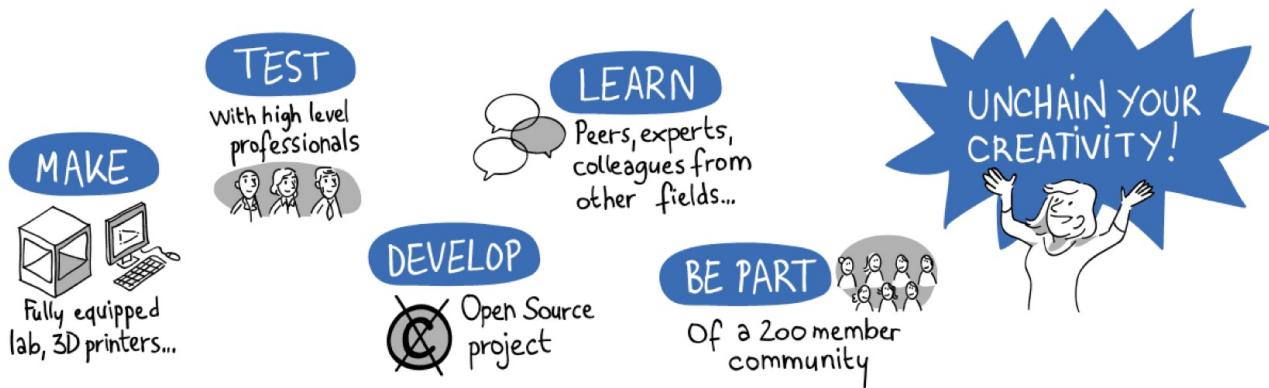


FIGURE 1 – Fonctionnement du projet echOpen

### 1.3.2 Objectifs et contraintes

A terme l'objectif principal du projet echOpen est de concevoir une sonde réalisant des échographies appelée écho-stéthoscope qui soit ultra portable, utilisable facilement par l'ensemble des personnels de santé (médecin de famille, infirmier, médecin de brousse, vétérinaire, ...) et dont les résultats soit directement visualisable sur un téléphone mobile afin que d'aider à établir des diagnostics plus fiables.

Cependant il tient également à cœur aux fondateurs du projet que celui-ci ait une visée pédagogique et puisse servir de support à la formation des étudiants de tous niveaux. Le caractère open source du projet facilitant grandement la démarche.

Ainsi ont peut résumer les usages fait du système support de ce dossier dans le diagramme suivant.

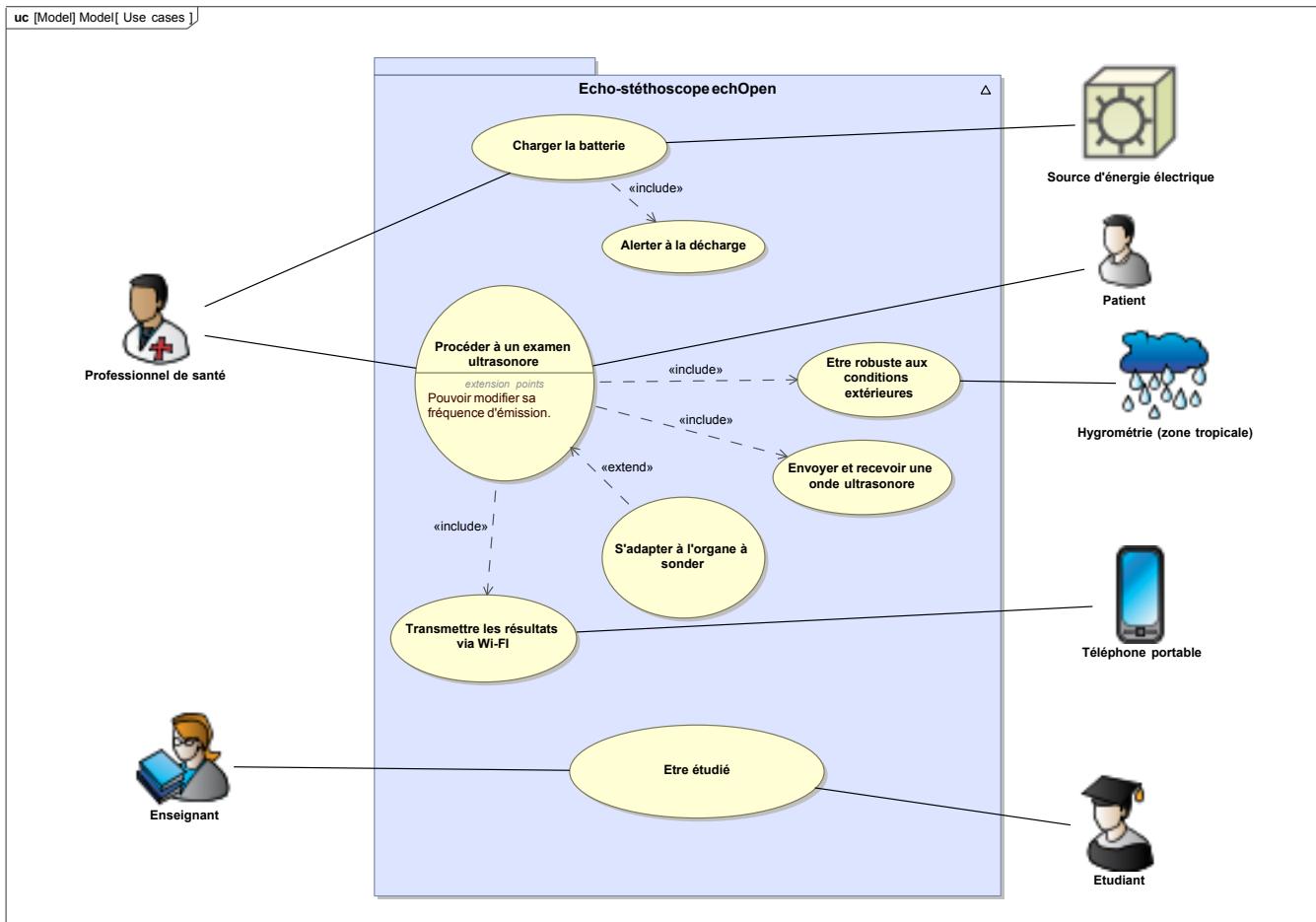


FIGURE 2 – Diagramme des cas d'utilisations

Aujourd’hui encore même dans les pays les mieux équipés médicalement lorsqu’un patient doit faire une échographie il se rend chez un spécialiste possédant une machine de pointe. Afin d’obtenir le cahier des charges de notre système nous pouvons partir du mode de fonctionnement actuel et en déduire ce qu’il faut changer pour arriver à un système utilisable dans l’ensemble des cas précédemment cités. Les principales incompatibilités des dispositifs actuels avec nos objectifs sont :

- Le prix prohibitif : un dispositif d’échographie fixe est estimé entre 8000 et 15000 €
- Le volume trop encombrant : le système actuel est encombrant et il est inconcevable de le déplacer hors d’un seul bâtiment.
- La prise en main compliquée : le dispositif actuel propose de très nombreux paramètres réglables manuellement par le spécialiste.



FIGURE 3 – Système d’échographie classique

Partant de ces quelques constatations nous savons ainsi que nous devons réaliser un système facile à prendre en main (utilisable après 48 heures de formation), ultra portable (sortable d'une poche de blouse ou d'un tiroir lorsqu'on doit l'utiliser et compatible avec un smartphone pour l'affichage), économique (environ un dixième du prix actuel) mais également ayant une qualité d'image comparable aux solutions actuellement utilisées dans les hôpitaux. En regroupant ces quelques points et en détaillant certains on aboutit ainsi au cahier des charges représenté sur le diagramme suivant.

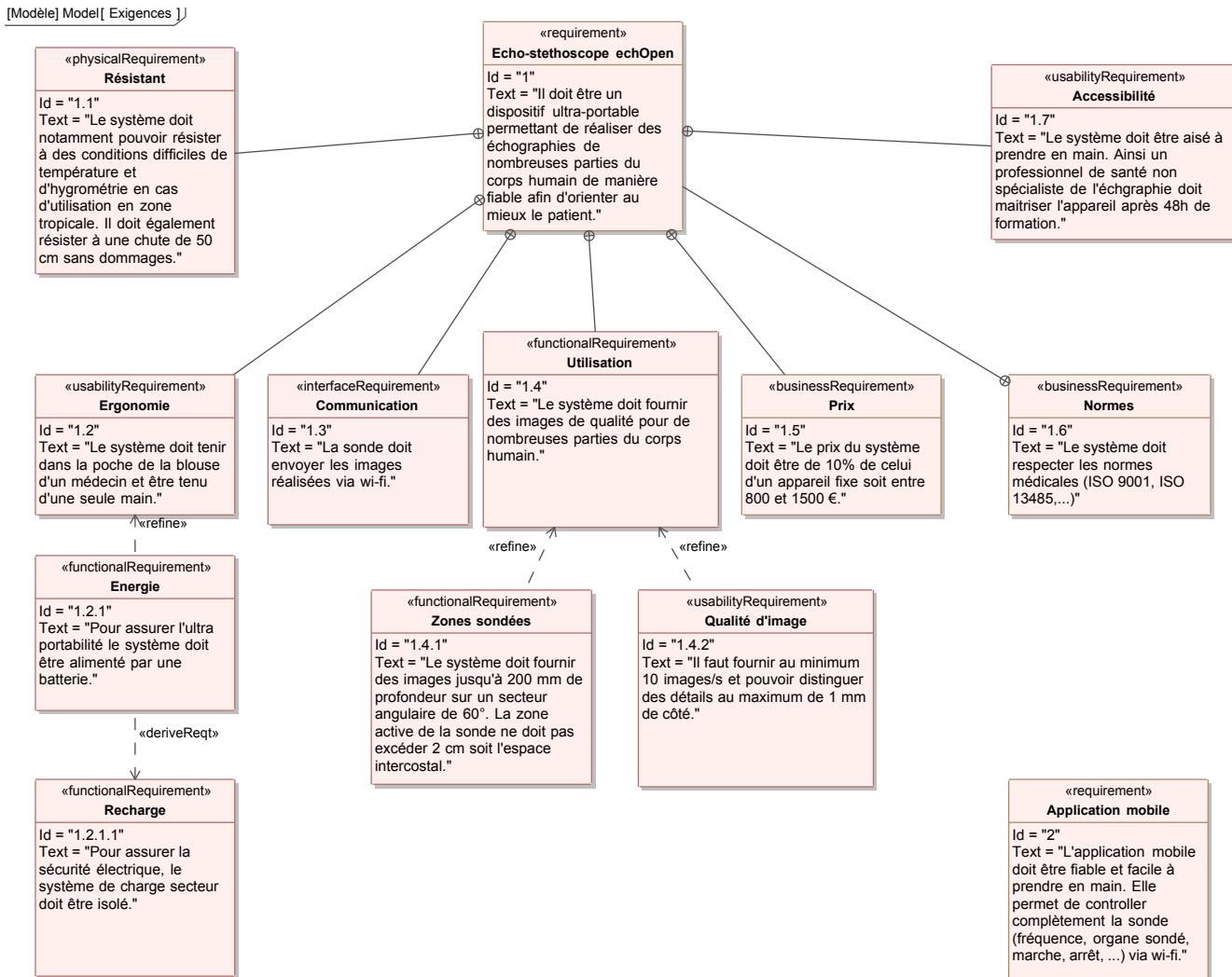


FIGURE 4 – Diagramme des exigences

## 1.4 Fonctionnement de l'écho-stéthoscope portable echOpen

L'objectif de cette partie est de présenter le fonctionnement détaillé du système dans son état actuel de fonctionnement. L'amélioration du système étant toujours en cours il est intéressant de remarquer la présence de différences encore notables entre le cahier des charges final et les performances actuelles. Concrètement le système actuel est parfaitement fonctionnel et permet déjà d'obtenir des images exploitables mais la sonde n'est pas encore dotée de toutes ses options et certains de ses paramètres sont encore optimisables.

### 1.4.1 Principe de base de l'échographie

#### 1.4.1.1 Les ondes ultrasonores

On appelle communément ultrasons les ondes sonores dont la fréquence est comprise dans la bande 20 kHz - 1 GHz. Pour le système présenté ici la fréquence choisie est de 3,5 MHz, elle se situe dans la bande des ultrasons dits de diagnostic utilisée en médecine qui couvre la bande [2-20] MHz.

Etant une onde mécanique de pression l'onde ultrasonore nécessite un milieu élastique déformable pour se propager et provoque lors de son passage des zones de détente et des zones de compression. On peut caractériser cette onde à l'aide de différents paramètres :

- Sa fréquence :  $f = \frac{1}{T}$
- Sa vitesse  $v$  et sa longueur d'onde  $\lambda$  liées par la relation  $\lambda = \frac{c}{f}$
- Sa pression  $P$  et son intensité  $I$  liées par la relation  $I = \frac{P^2}{2Z}$  où  $Z$  est appelée impédance acoustique du milieu traversé [ $Pa.s.m^{-1}$ ]. Pour une onde plane progressive l'impédance acoustique du milieu traversé est lié à sa masse volumique  $\rho$  et à la vitesse de propagation de l'onde par la relation  $Z = \rho.v$

Les ondes ultrasonores obéissent aux lois de Snell-Descartes concernant la réflexion et la réfraction, peuvent subir de la diffusion omnidirectionnelle (ou de Rayleigh) en cas de rencontre avec de petites particules ou des surfaces granuleuses et sont assez fortement atténuées et absorbées dans le milieux organiques.

La technique d'échographie exploite les ondes réfléchies revenant vers le récepteur. Comme ce récepteur est également l'émetteur on peut alors raisonnablement faire l'hypothèse que ces ondes ont une incidence normale aux milieux rencontrés. On peut alors définir le coefficient de réflexion de l'onde ultrasonore à l'interface entre deux milieux 1 et 2 par :

$$\Gamma = \frac{I_{refléchie}}{I_{incidente}} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Ainsi en considérant une vitesse de propagation des ondes à peu près identique dans l'ensemble des milieux organiques (on considère la vitesse de propagation dans l'eau qui compose majoritairement le corps humain et qui est de  $1460\ m.s^{-1}$  tandis que dans les faits pour l'ensemble des corps mous du corps humain il existe une dispersion de  $\pm 10\ m.s^{-1}$  autour de cette valeur) l'étude de l'intensité du signal réfléchi et donc de son enveloppe donne directement une indication de l'impédance acoustique des milieux rencontrés et indirectement leur masse volumique.

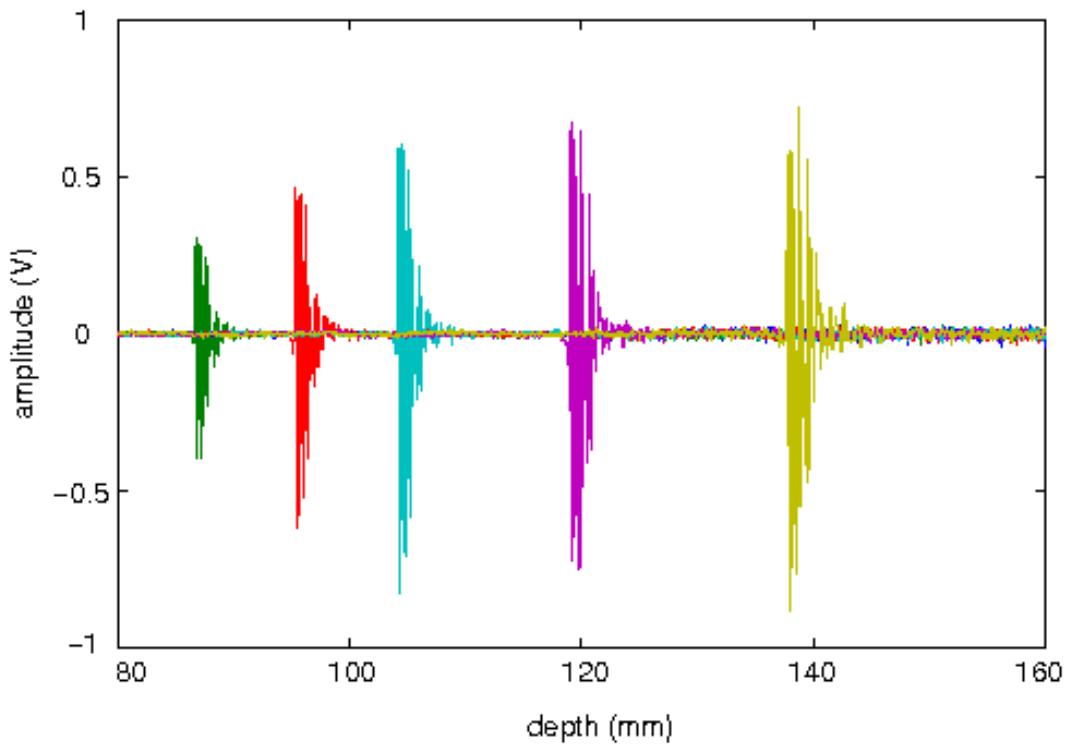


FIGURE 5 – Allure typique de l'image électrique des signaux réfléchis

La figure ci-dessus montre les échos renvoyés par une plaque métallique au transducteur. Chaque couleur correspond à une mesure distincte pour laquelle la plaque a été déplacée.

**Remarque :** Ici l'atténuation en fonction de la distance n'est pas visible car une méthode d'amplification à gain variable est déjà mise en place. Cette image valide donc juste le fait que l'on détecte la position d'une interface mais on ne peut pas conclure uniquement grâce à elle que l'on connaît aussi la nature de l'interface.

Le tableau suivant recense quelques valeurs numériques d'impédance acoustique des principaux milieux rencontrés dans le domaine médical.

Milieu	Impédance acoustique ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )
Air	$4.10^2$
Poumon	$0.26.10^6$
Os	$3,8 - 7,4.10^6$
Tissus mous	$1,3 - 1,7.10^6$
Eau	$1,5.10^6$

**Remarque :** La différence notable d'impédance acoustique entre les tissus humains et l'air reportée dans la formule du coefficient de réflexion précédemment définie interdit la présence de celui-ci sur le chemin de l'onde ultrasonore. En effet une interface air/milieu organique implique une réflexion totale qui fausse immédiatement toute mesure.

### 1.4.1.2 L'émetteur/récepteur : le transducteur piézo-électrique

L'émission et la réception des ondes ultrasonores est possible grâce un transducteur piézo-électrique focalisé (sa surface est très légèrement incurvée) de distance focale 12 cm et de fréquence de résonance 3,5 MHz ( $f = \frac{K}{e}$  avec K constante matériau et e l'épaisseur de la céramique). Ce transducteur permet l'exploration des zones les plus profondes du corps humain jusqu'à 20 cm mais est peu performant pour les zones situées juste sous la peau. Une vue en coupe de ce transducteur est donnée à la figure suivante.

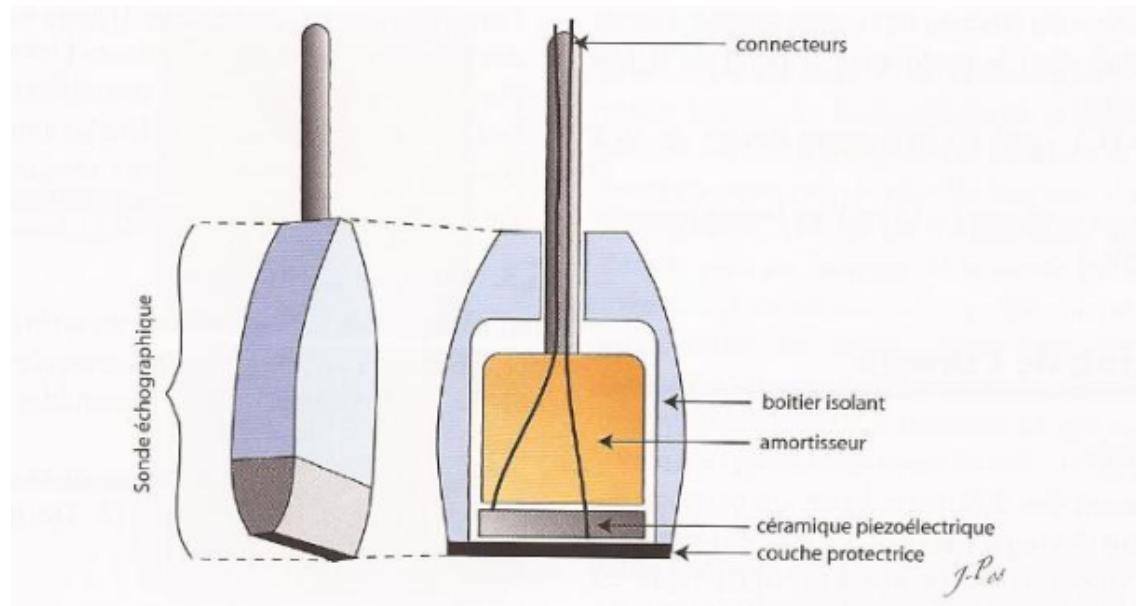


FIGURE 6 – Composition d'une sonde échographique [4]

Tout le principe physique de la sonde est basé sur le fait que la céramique piézo-électrique permet d'exploiter l'effet piézo-électrique direct (pression acoustique → Force → Polarisation du transducteur) en réception et l'effet piézo-électrique indirect (Différence de potentiel appliquée → Contraction brusque de la céramique → Emission d'une onde acoustique) en émission. Cependant il est nécessaire d'entourer ce composant de protections pour le bon fonctionnement de la sonde : le boîtier isolant assure le fait que l'air n'est pas présent sur le parcours des ondes acoustiques, l'amortisseur réduit fortement les réflexions d'ondes à l'arrière de la céramique dans le boîtier et la couche protectrice permet d'introduire une impédance intermédiaire entre celle de la céramique et celle du milieu sondé. Cette couche est recouverte de gel afin d'assurer un contact parfait entre la peau et la sonde.

**Remarque :** Dans le but de simplifier les procédures de test il est possible de se séparer du gel échographique et de la couche protectrice en plongeant simplement l'ensemble du dispositif dans l'eau.

### 1.4.2 Fonctionnement du système complet

Maintenant que nous connaissons le phénomène physique exploité afin de réaliser les échographie ainsi que le capteur permettant de recevoir les échos ultrasonores nous pouvons voir dans quel environnement nous le mettons en oeuvre. La version du système présentée ici est décomposable en deux parties : le corps de la sonde chargé d'acquérir et de conditionner les données et une application mobile chargée de les traiter et de les restituer via l'écran. La partie suivante s'attache principalement à expliquer l'ensemble des fonctions réalisées dans le corps de la sonde.

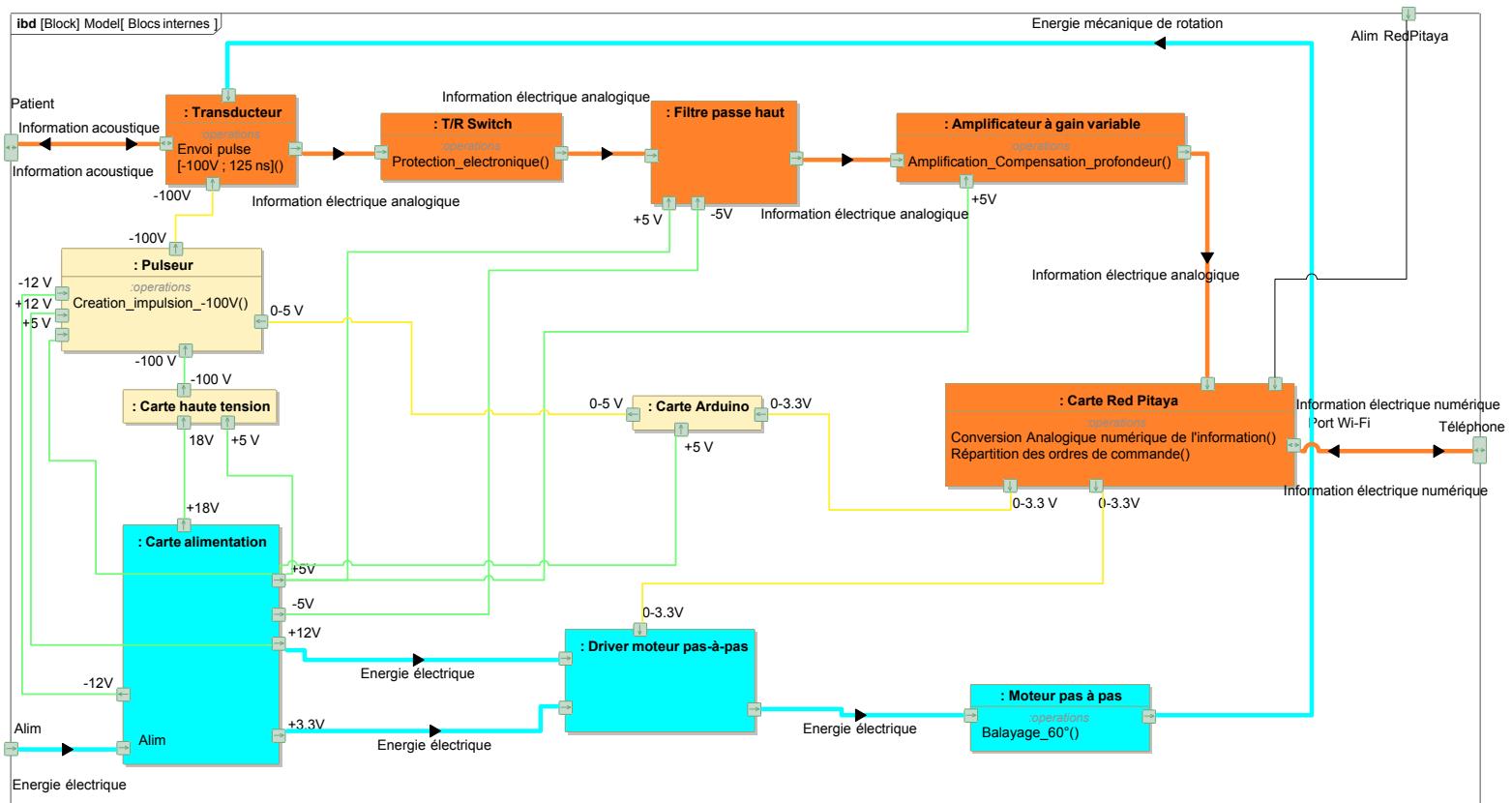


FIGURE 7 – Diagramme de blocs internes de la sonde

#### 1.4.2.1 La chaîne d'énergie

Représentée en bleu sur le diagramme de blocs internes la chaîne d'énergie du système permet de faire tourner le transducteur dans le but d'acquérir les données échographiques.

En effet le transducteur choisi étant unique et focalisé il ne peut effectuer qu'une seule ligne de mesure. Afin de reconstituer une image il faut donc faire tourner le transducteur au fur et à mesure que l'on effectue des acquisitions.

Pour cela on utilise un moteur pas à pas et son driver alimentés par une carte fournit les niveaux de tensions adéquat et pilotés par la carte Red Pitaya. Dans cette version de laboratoire l'énergie fournie à la carte d'alimentation provient encore d'une source de tension stabilisée. Cette solution est à changer et fera l'objet de la partie "apport personnel" présentée ci après.

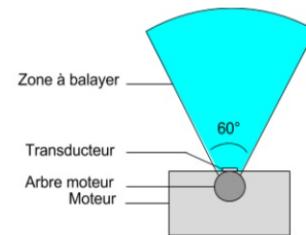


FIGURE 8 – Mouvement de balayage

#### 1.4.2.2 La fabrication des impulsions

Afin de pouvoir émettre une onde acoustique notre transducteur à besoin d'être fortement polarisé pendant une durée très courte. En effet afin d'obtenir une onde ultrasonore adapté à nos mesures nous devons envoyer une impulsion de -100V et de 125 ns au transducteur.

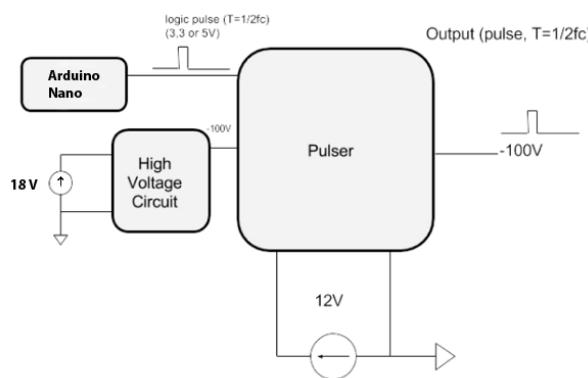


FIGURE 9 – Crédit d'un pulse

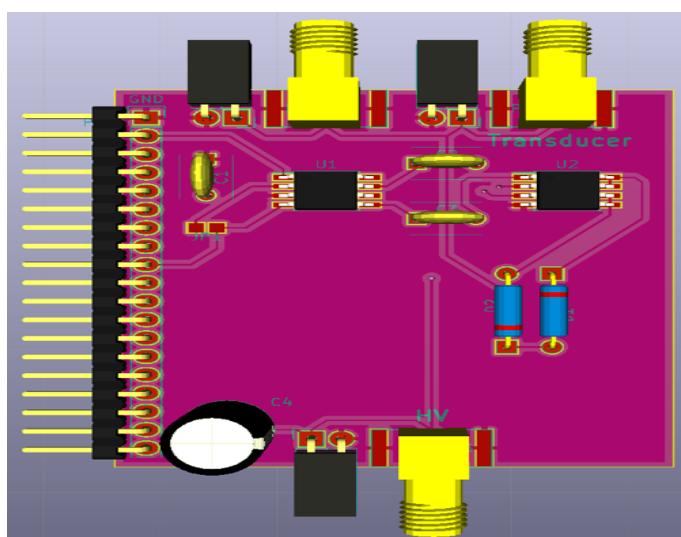


FIGURE 10 – Pulseur

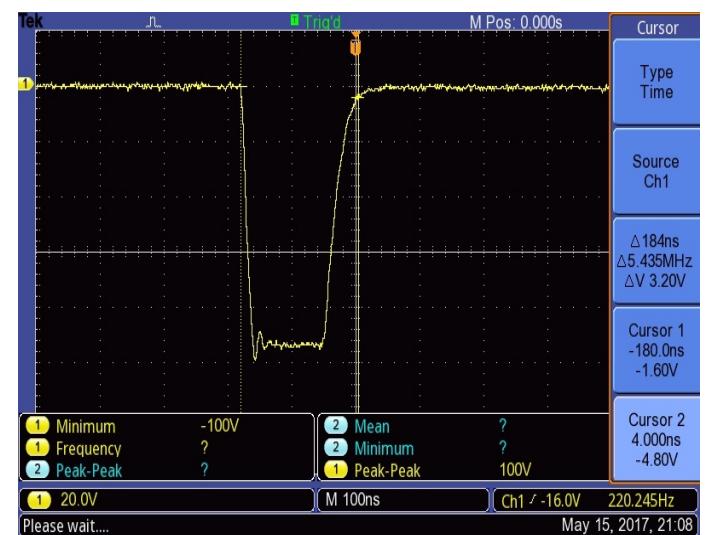


FIGURE 11 – Une impulsion

### 1.4.2.3 La chaîne d'acquisition

Dans une sonde échographique, la chaîne d'acquisition représente le cœur du système. Elle conditionne fortement la qualité des images que l'on va pouvoir créer et joue ainsi sur la qualité du diagnostic fourni au patient.

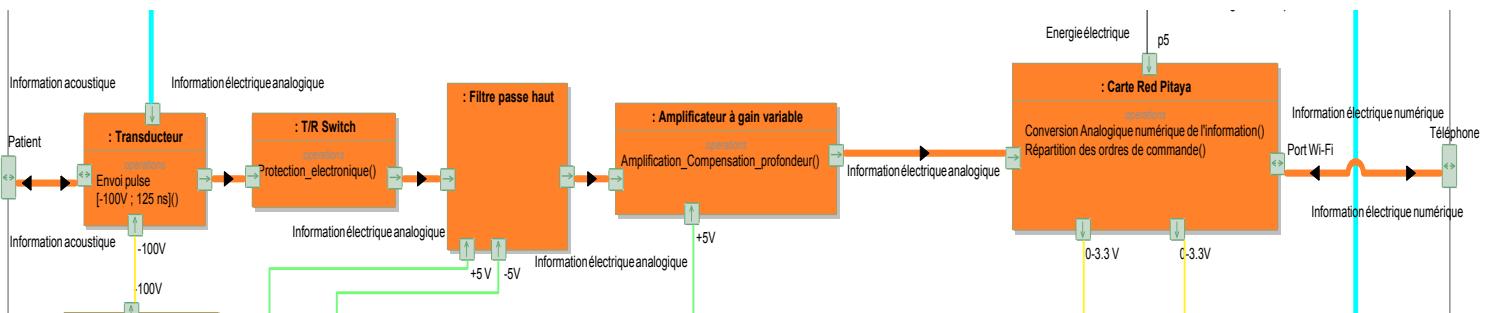


FIGURE 12 – Chaîne d'informations du système

Une fois qu'une impulsion a été générée, le transducteur se met en mode écoute, réceptionne les échos et en fabrique l'image électrique.

L'allure du signal (impulsion + échos) est donnée figure 13.

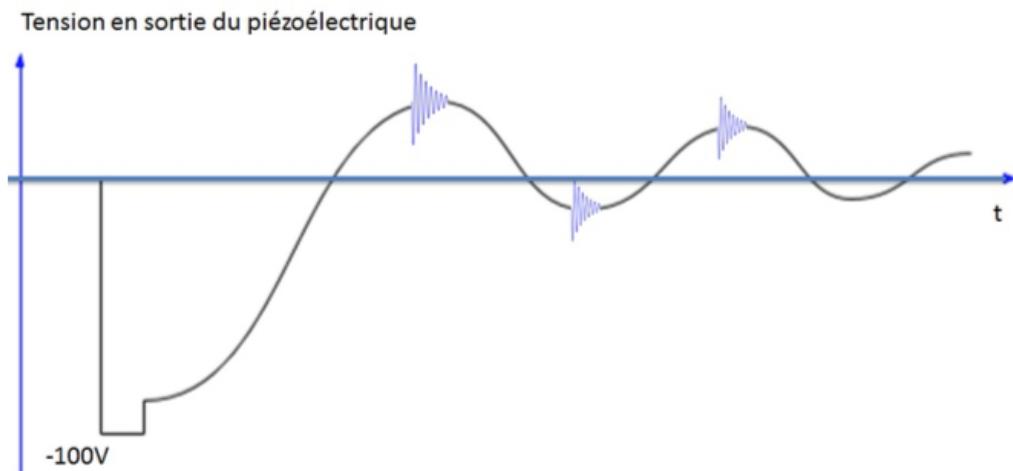


FIGURE 13 – Allure du signal en sortie du transducteur

Nous constatons qu'en plus des échos porteurs de l'information à 3,5 MHz un autre phénomène périodique de fréquence de l'ordre de la centaine de kHz apparaît.

Ce signal issu du transducteur passe ensuite par les composants suivants :

**T/R Switch** : Littéralement Transmit/Receive Switch ce composant sert à protéger l'électronique en aval des fortes tensions générées lors de l'émission et qui pourraient potentiellement se propager. Il agit simplement comme un interrupteur qui s'ouvre dès que la différence de potentiel à ses bornes est supérieure en valeur absolue à 2V.

**Filtre passe haut** : Ce filtre réalisé à partir d'une technologie active est de type passe haut et possède une fréquence de coupure de 500 kHz. Il est utilisé afin de supprimer la composante périodique à 100 kHz vue précédemment en sortir du transducteur.

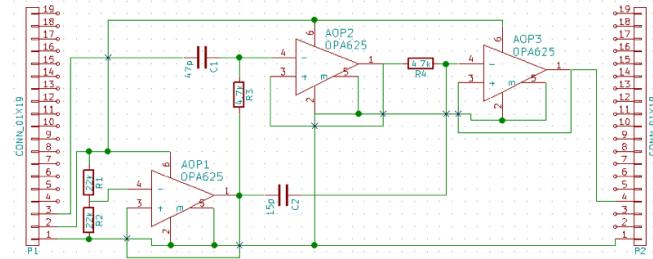


FIGURE 14 – Filtre passe haut

**Amplificateur à gain variable** : Appelé T.G.C pour Time Gain Control cet amplificateur possède une amplification variable en fonction du temps. Utilisé pour compenser l'atténuation dans les milieux organiques nous le pilotons via une loi qui agit directement sur son gain en dB (commande de 0V pour une amplification minimale de 7,5 dB et 1V pour une amplification maximale de 55.5 dB).

Sachant que notre transducteur est utile entre 8 et 16 cm de profondeur notre loi de commande est donc linéaire entre  $55 \mu\text{s}$  et  $110 \mu\text{s}$  après émission du pulse en considérant une vitesse de propagation moyenne de  $1460 \text{ m.s}^{-1}$ .

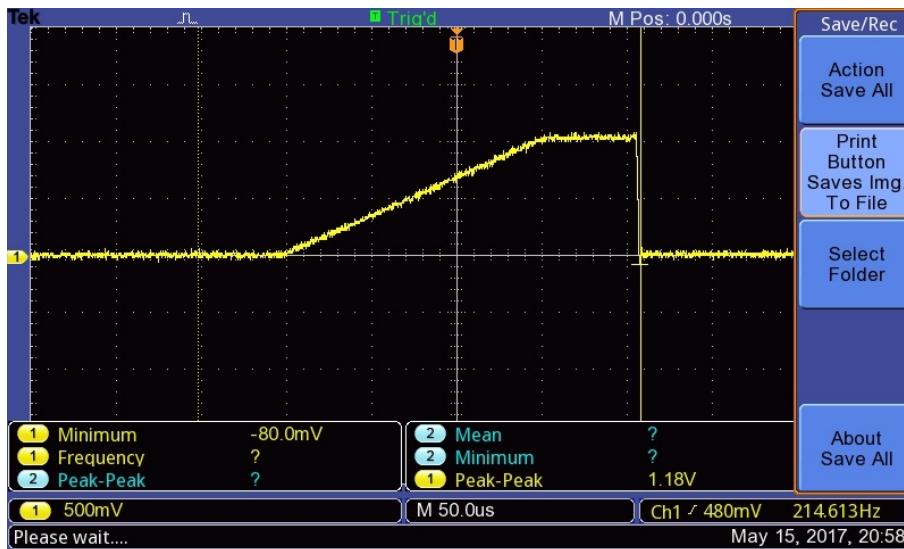


FIGURE 15 – Loi de commande du T.G.C.

**Carte Red Pitaya** : La carte Red Pitaya est chargée d'effectuer la conversion analogique numérique (14 bits) du signal. Embarquant un micro serveur elle envoi ensuite les données numérisées via Wi-Fi au téléphone portable en utilisant le protocole TCP/IP.



FIGURE 16 – Carte Red Pitaya

Les données numériques arrivent ainsi ligne de mesure par ligne de mesure à l'application présente sur le téléphone portable qui effectue successivement les opérations suivantes :

- Filtrage numérique de type passe bande ( $BP = [1-6]$  MHz)
- Détection d'enveloppe numérique (via Transformée de Hilbert) afin de récupérer l'énergie du signal.
- Stockage des lignes dans une matrice.
- Attribution d'un niveau de gris pour chaque niveau de tension de l'enveloppe, mise en forme et affichage de l'image (Echographie Mode B pour Brillance)

#### 1.4.2.4 Séquence de fonctionnement

Afin de mieux saisir l'ensemble du fonctionnement du système lorsqu'un professionnel de santé a appliqué la sonde et utilise son smartphone pour visualiser une échographie en temps réel et en continu un diagramme de séquence est présenté en annexe 1.

#### 1.4.2.5 Résultats obtenus

Lors des derniers essais publics réalisés fin 2016 avec la version du kit présente ci-dessous les résultats obtenus étaient les suivants.

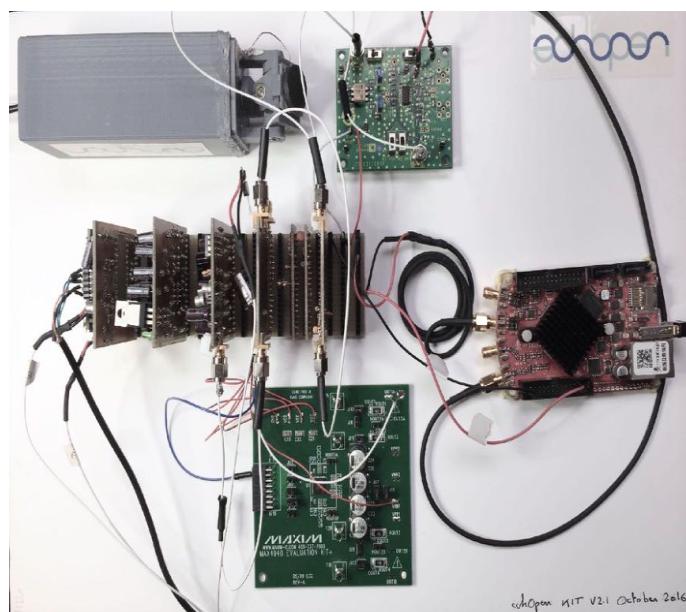


FIGURE 17 – Kit echOpen Fin 2016

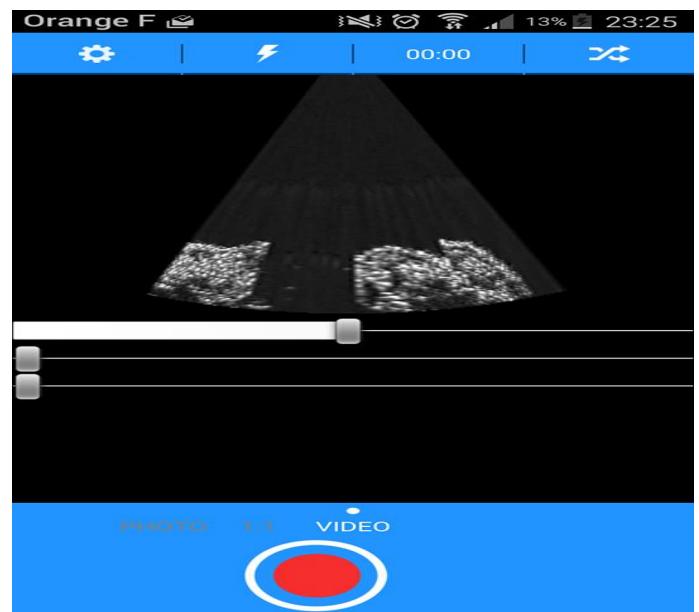


FIGURE 18 – Image obtenue

## 1.5 Apport personnel

### 1.5.1 Problématique

La version du système présentée jusque là et composée de deux unités physiques (corps de sonde + téléphone portable) est encore celle considérée comme la dernière en date pour l'ensemble de la communauté mais ceci devrait rapidement changer pour une version comportant trois unités physiques grâce au travail que j'ai effectué et que je présente dans cette partie. En effet le corps de la sonde est pour le moment alimenté via une source de tension stabilisée non adaptée à la caractéristique portable du système c'est pourquoi j'ai été amené à proposer le système suivant.

En se basant sur les exigences du cahier des charges rappelées ci-contre il m'a donc été demandé de pourvoir une solution économique d'apport d'énergie au système.

Contrainte	Valeur
$V_{in}$	110-230 $V_{eff}$ - 50-60 Hz
$V_{out}$	18 $V_{DC}$
Puissance	18 W
Isolation	Oui

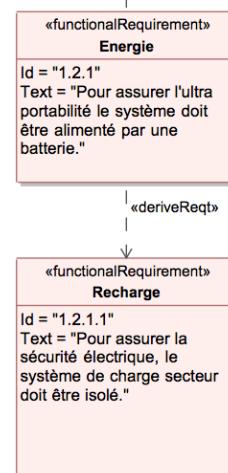


FIGURE 19 – Exigences énergie

La solution proposée devra être capable de substituer directement la source de tension stabilisée de laboratoire mais également de pouvoir charger une batterie équipée de son système de gestion (B.M.S. : Battery Management System).

### 1.5.2 Topologie de la solution proposée

Si il est aisé et très économique de fabriquer une tension continue de 18 V à partir d'un réseau d'alimentation public à l'aide de simples diodes (Pont de Graëtz) et de régulateurs cette solution n'est pas envisageable car elle ne propose pas **la fonction isolation** primordiale lorsqu'on souhaite vendre un système respectant la sécurité des personnes.

Partant de ce constat on se tourne alors vers une alimentation à découpage isol e . De plus le faible calibre en puissance et tension de sortie pousse logiquement à choisir la solution la plus simple et la plus économique à savoir **le convertisseur Flyback**.

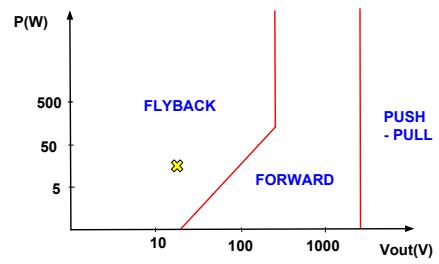


FIGURE 20 – Choix d'une topologie

La structure Flyback est un convertisseur DC-DC isolé. Dans notre cas la source d'énergie étant un réseau alternatif il faut lui associer un convertisseur AC-DC. Etant donné la faible puissance demandée par la sonde l'utilisation d'un pont redresseur capacité en tête ne pose pas de problème vis-à-vis de la norme EN 61000-3-2 qui régit l'amplitude des courants harmoniques renvoyés au réseau.

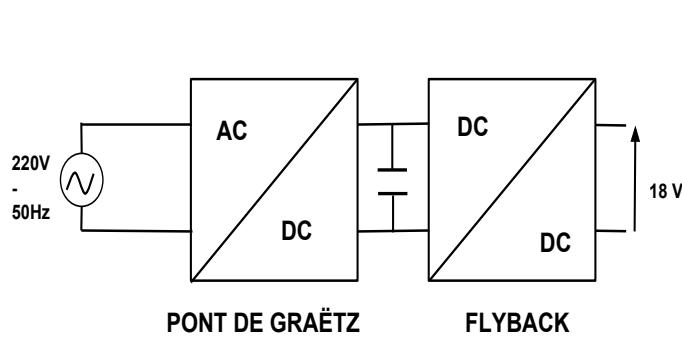


FIGURE 21 – Structure générale

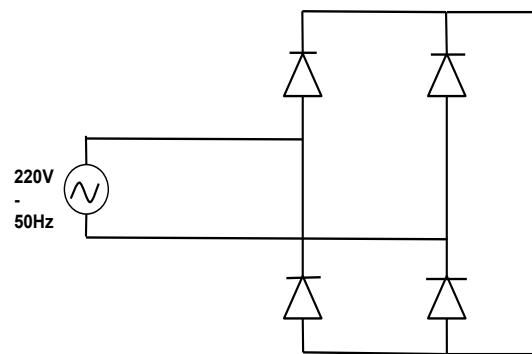


FIGURE 22 – Redresseur

La structure générale d'un convertisseur Flyback (également Buck-Boost isolé) est donnée figure 24 ci-après. Dans cette représentation  $V_e$  modélise l'ensemble réseau + redresseur + condensateur en amont et  $R$  la charge associée au convertisseur.

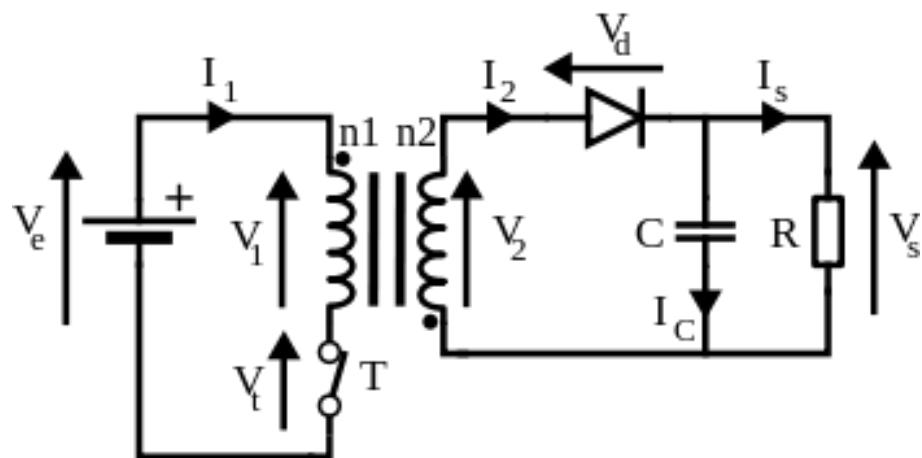


FIGURE 23 – Structure générale d'un convertisseur Flyback

Ce montage fonctionne selon le principe des vases communicants. L'interrupteur T est fermé et la diode bloquée pendant une première phase et un courant s'installe dans la maille d'entrée, un flux est alors produit par l'enroulement primaire des inductances couplées  $L_1$  et  $L_2$ . Au cours d'une seconde phase l'interrupteur est ouvert. Pour assurer la continuité du flux magnétique ( $n_1 \cdot I_{1M} = n_2 \cdot I_{2M}$ ) la diode entre alors en conduction.

On parle d'inductances couplées car au cours d'un cycle de fonctionnement ou période de découpage les deux enroulements ne sont pas simultanément parcourus par un courant. Ce mode de fonctionnement nécessite un circuit magnétique avec entrefer afin de stocker l'énergie.

### 1.5.3 Dimensionnement de la structure

#### 1.5.3.1 Principe de fonctionnement rapide

Dans cette structure à découpage le transistor servant d'interrupteur commute à une fréquence  $F_{dec}$  et est fermé pendant une portion  $\alpha$  ( $\alpha \in [0; 1]$ ) de la période de découpage  $T_{dec}$ . On considère de plus que le flux dans les enroulements ne s'annulera jamais, on se place donc en conduction continue ou démagnétisation incomplète.

On a donc le fonctionnement suivant :

Pour  $t \in [0; \alpha T_{dec}]$  :

$$V_1 = V_e$$

$$\phi(t) = \frac{V_e}{n_1} t + \phi_{min}$$

$$i_1 = \frac{V_e}{L_1} + i_{1min}$$

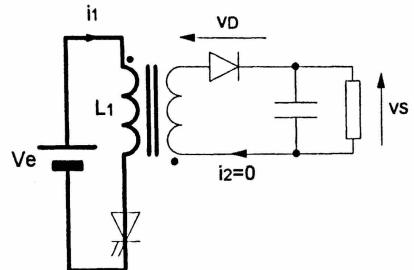


FIGURE 24 – Fonctionnement durant  $\alpha T_{dec}$

Pour  $t \in [\alpha T_{dec}; T_{dec}]$  :

$$\phi(t) = -\frac{V_s}{n_2} t + \phi_{max}$$

$$v_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt} = -\frac{n_1}{n_2} V_s$$

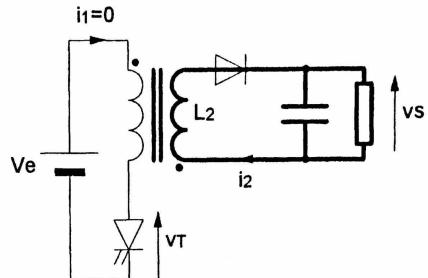


FIGURE 25 – Durant  $(1 - \alpha).T_{dec}$

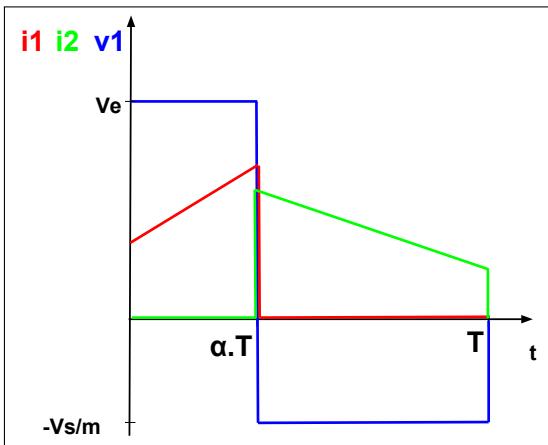


FIGURE 26 – Formes d'ondes idéales

La figure ci-contre représente l'allure de l'évolution des courants dans  $L_1$  et  $L_2$  ainsi que de la tension aux bornes de  $L_1$ .

Ainsi en considérant que la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'enroulement primaire se doit d'être nulle en régime établi sur une période de découpage il vient :

$$\langle v_1 \rangle = 0 \Rightarrow \frac{1}{T_{dec}} \cdot (V_e \cdot \alpha \cdot T_{dec} - (1 - \alpha) \cdot T_{dec} \cdot \frac{V_s}{m}) = 0 \quad \text{avec} \quad m = \frac{n_2}{n_1}$$

On en déduit la fonction de transfert statique du montage qui conditionnera l'ensemble du dimensionnement :

$$\boxed{\frac{V_s}{V_e} = \frac{m \cdot \alpha}{1 - \alpha}}$$

### 1.5.3.2 Paramètres imposés

Pour bien débuter le dimensionnement on s'impose plusieurs paramètres :

- La tension de sortie devra être de 18 V avec une ondulation maximale de 1%.
- La puissance du cahier des charges est de 18W mais on effectuera le dimensionnement pour  $P_e = 22W$  en considérant 10% de pertes en chutes de tension, un rendement des inductances d'environ 90% et une petite marge de manœuvre.
- On se place toujours en démagnétisation incomplète afin de minimiser le volume des inductances.
- On effectue le dimensionnement pour  $\alpha = 0,5$ . La marge de manœuvre permettant de fonctionner autour de 0,4 lorsque la structure demandera 18W.
- Le bus d'entrée est supposé être le réseau domestique français parfaitement redressé soit  $V_e = 325$  V.
- La fréquence de découpage est choisie égale à 50 kHz.

### 1.5.3.3 Calcul des inductances couplées

Les inductances couplées étant l'élément central de la structure, elles méritent une attention particulière pour assurer le bon fonctionnement général.

En partant des conditions imposées et de la fonction de transfert statique on commence par calculer le rapport de transformation m :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{m \cdot \alpha}{1 - \alpha} \Rightarrow m = \frac{V_s}{V_e} \cdot \frac{1 - \alpha}{\alpha} = \frac{18}{325} \cdot \frac{1 - 0,5}{0,5} \Rightarrow \boxed{m = 0,055}$$

Ensuite en se plaçant en limite de conduction continue (le flux s'annule précisément en fin de période) l'énergie à emmagasiner dans l'inductance primaire donne la valeur de celle-ci :

$$W_e = \frac{1}{2} L_1 I_{1max}^2 \Rightarrow P_e = \frac{1}{2} L_1 I_{1max}^2 F_{dec} \Rightarrow P_e = \frac{1}{2} L_1 \left( \frac{V_e \alpha T_{dec}}{L_1} \right)^2 F_{dec} \Rightarrow \boxed{L_1 = 12 \text{ mH}}$$

De plus d'après le modèle du transformateur parfait on a :  $\boxed{L_2 = L_1 \cdot m^2 = 36 \mu H}$

La suite du dimensionnement est réalisée à l'aide d'un algorithme [3] dont les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Critère de dimensionnement	Choix
Densités de courants	Arbitraire $\in [0;10]$ A.mm $^{-2}$	$J = 5$ A.mm $^{-2}$
Courant efficaces enroulements	$i_{1eff} = \frac{V_e}{\sqrt{24}L_1F_{dec}}$ $i_{2eff} = \frac{V_s}{\sqrt{24}L_2F_{dec}}$	$i_{1eff} = 0,11A$ $i_{2eff} = 2,04A$
Diamètres conducteurs	$\frac{i}{J} = S = \frac{\pi d^2}{4}$	$d_1 = 0,17mm$ $d_2 = 0,72mm$
Nature des conducteurs	Epaisseur de peau $\delta p = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = 0,3$ mm	Monobrins
Coefficients de bobinage	$\frac{S_{carre}}{S_{cercler} \text{ inscrit}}$	$k_b = \frac{4}{\pi}$
Induction maximale	$B_M < B_{sat}$	$B_M = 200$ mT
Produit des aires	$A_i = S_f \cdot S_b = \frac{L_1 \cdot I_{1max}}{n_1 \cdot B_M} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{k_{bj} \cdot n_j \cdot i_{jeff}}{J_j}$	$A_i = 1,39 \cdot 10^{-9} m^4$ mT
Circuit magnétique	$A_{i-reel} \geq A_{i-calcul}$	Pot RM-10
Surfaces réelles	Lecture datasheet	$S_f = 83mm^2$ $S_b = 41,5mm^2$
Nombre de spires	$n_1 = \frac{L_1 I_{1max}}{B_M S_f} = \frac{n_2}{m}$	$n_1 = 199$ $n_2 = 11$
Entrefer	$e = \frac{\mu_0 n_1^2 S_f}{L_1}$	$e = 0,35$ mm

Les images de la réalisation pratique de ce transformateur sont données ci-dessous :

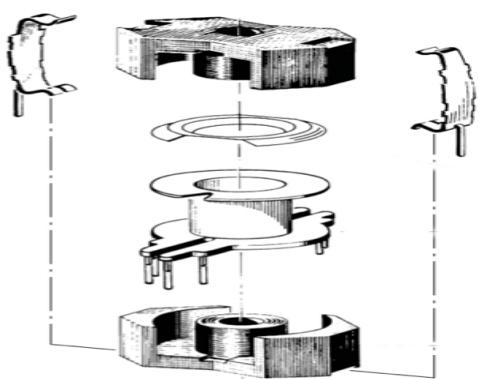


FIGURE 27 – Pot RM-10

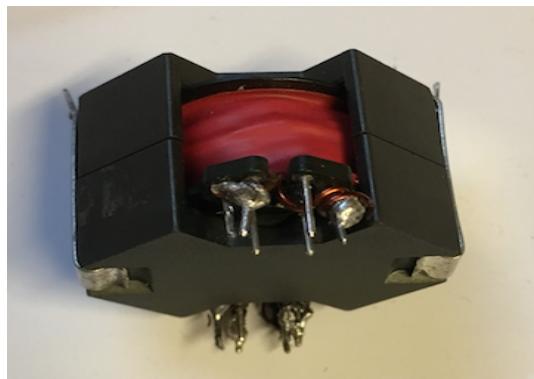


FIGURE 28 – Inductances couplées

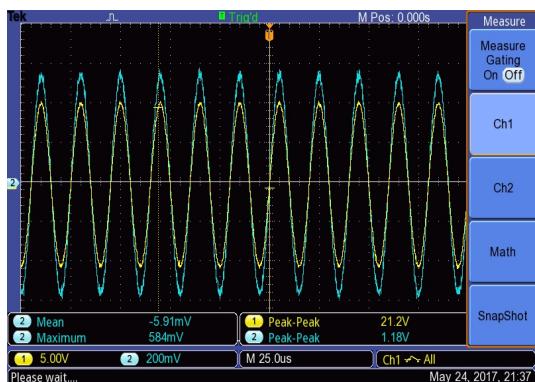


FIGURE 29 – Rapport de transformation

### 1.5.3.4 Essais de simulation

Afin de vérifier les calculs précédents ainsi que la faisabilité de la structure il est possible de la simuler entièrement avec l'aide de l'outil Simscape de Matlab®. Le schéma de la structure réalisée est présenté figure 28.

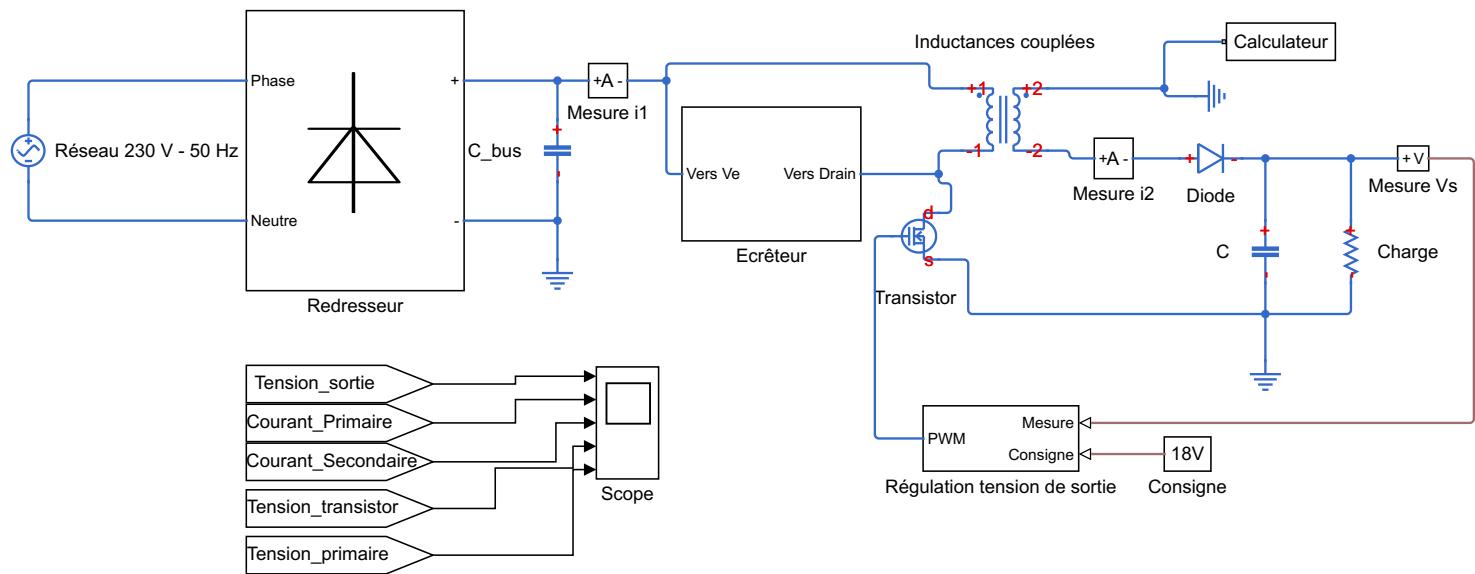


FIGURE 30 – Modélisation Simscape du convertisseur

Sur ce modèle on distingue la structure générale de l'alimentation Flyback ainsi que le redresseur à diodes capacité en tête et le réseau précédemment cités. Les inductances sont paramétrées avec les valeurs issues des calculs précédents auxquels il est possible d'ajouter la prise en compte de fuites magnétiques.

Deux blocs supplémentaires essentiels au bon fonctionnement sont également présents : un bloc de commande permettant de réguler la tension de sortie à la valeur souhaitée et un bloc d'écrêtage permettant de diminuer les contraintes en tension subies par le transistor.

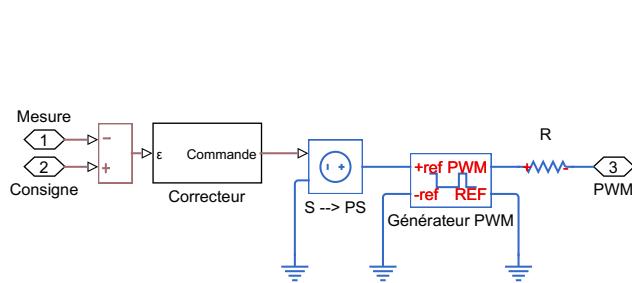


FIGURE 31 – Circuit de commande

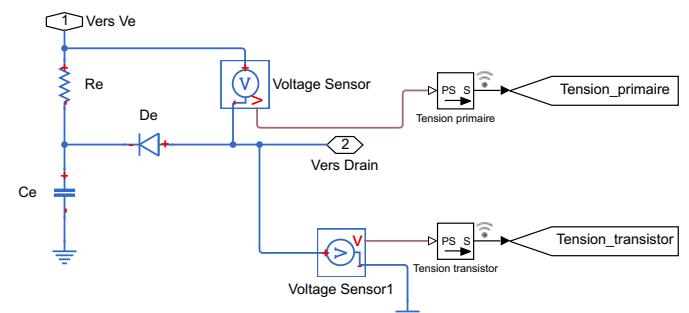


FIGURE 32 – Circuit écrêteur

**Le circuit de commande** permet de maintenir la tension de sortie à la consigne de 18V par comparaison et correction proportionnelle intégrale. La commande ainsi élaborée permet de générer un signal PWM contrôlant l'ouverture et la fermeture du transistor.

**Le circuit écrêteur** permet de protéger le transistor des imperfections des inductances couplées. En effet le couplage n'étant pas parfait il existe des fuites magnétiques. Il est alors possible de modéliser ces fuites par une inductance  $l_{fp}$ . Cette inductance emmagasine de l'énergie qu'il faut libérer à chaque période de découpage. Le circuit écrêteur permet de dissiper cette énergie sans appliquer de fortes surtensions au transistor.

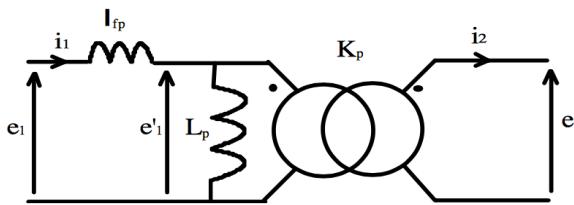


FIGURE 33 – Modèle du transformateur avec fuites au primaire [5]

Les résultats obtenus avec ce modèle sont les suivants :

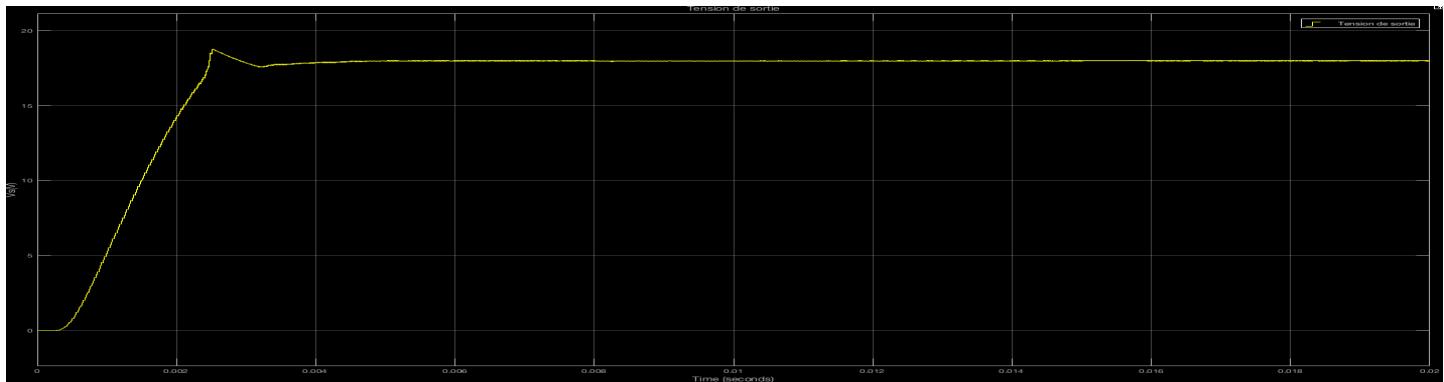


FIGURE 34 – Allure de la tension de sortie au démarrage

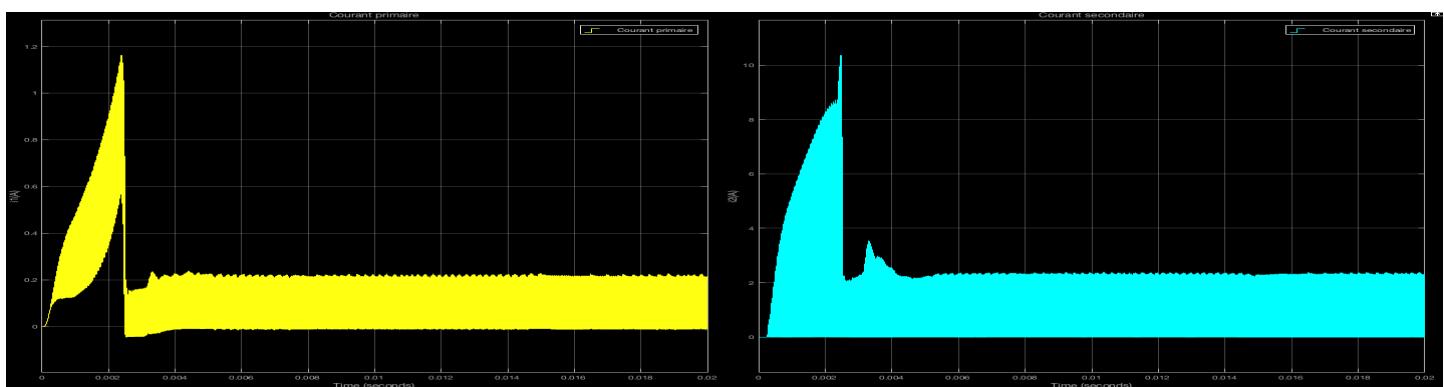


FIGURE 35 – Allures des courants dans les enroulements

Si les allures générales semblent satisfaisantes il est également intéressant de zoomer afin de voir si on retrouve bien les formes d'onde attendues.

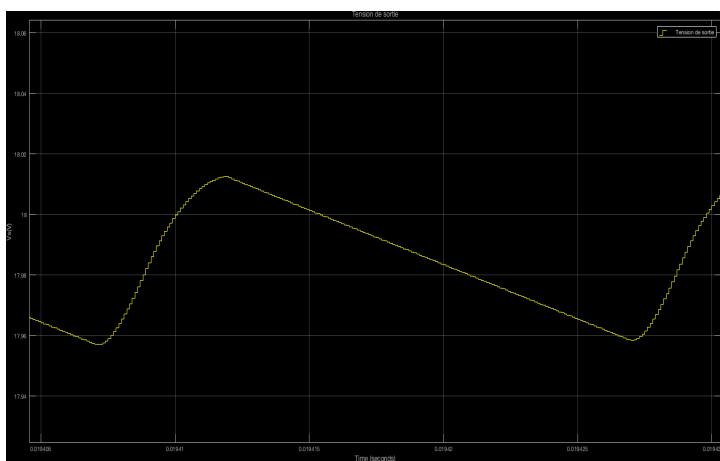


FIGURE 36 – Ondulations tension de sortie

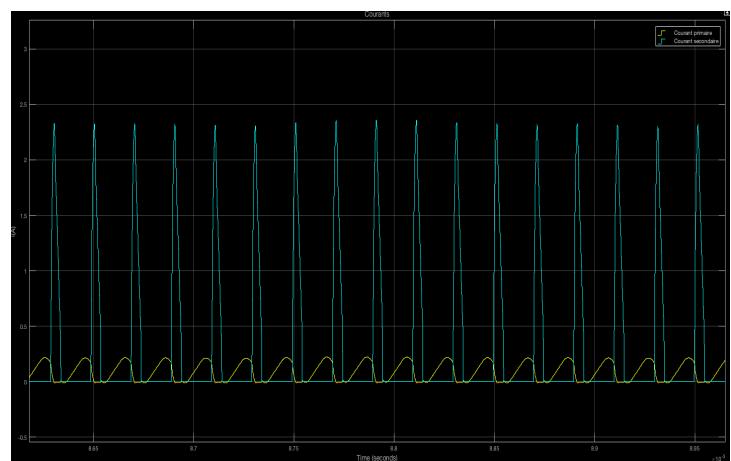


FIGURE 37 – Ondulations de courant

#### 1.5.3.5 Système réel

Le système réel finalement choisi est en tout point identique au système simulé à l'exception faite du circuit de commande. Celle-ci est en effet basée sur une puce Texas Instruments UCC28740 qui à partir d'une image de la tension de sortie obtenue via un optocoupleur gère l'ouverture et la fermeture du transistor.

### 1.6 Conclusion de la partie scientifique

Ma collaboration avec echOpen m'a dans un premier temps permis d'étudier le fonctionnement d'un appareil d'échographie portable qui sera sans nul doute une future aide précieuse pour améliorer le diagnostic de milliers de personnes dans le monde et ainsi diminuer le taux de mortalité évitable. Dans un second temps j'ai été amené à participer encore plus activement au projet puisque j'ai pu mettre à profit mes connaissances sur les convertisseurs de puissance dans le but d'apporter une proposition de solution rendant le système effectivement plus mobile et ainsi plus proche que jamais de remplir son cahier des charges complet.

Les deux parties de mon travail au cours de cette collaboration étant relativement différentes cela m'offre une certaine richesse scientifique qu'il m'est possible de mettre à profit dans la suite de ce dossier en proposant deux applications pédagogiques possibles relatives à chacune d'elles.

## 2 Seconde partie : Approches pédagogiques

### 2.1 Exploitation pédagogique en première STI2D spécialité SIN

#### 2.1.1 Contexte

La filière STI2D (Sciences et Technologies de l'Industrie et du Développement Durable) est née en 2011 de la réforme des baccalauréats technologiques qui faisait suite à une baisse importante des effectifs de la filière STI.

Si l'enjeu des filières technologiques à longtemps été d'amener les élèves vers une formation post-baccaulauréat courte (type S.T.S. ou I.U.T) la donne a aujourd'hui changé. La filière STI2D est devenue un parallèle à la filière générale scientifique. La filière STI2D vise une formation par la technologie et la démarche inductive mais ce n'est plus une filière professionnalisaante et l'objectif est aujourd'hui de permettre aux élèves de s'engager dans des études supérieures longues type école d'ingénieur.

Afin de renforcer cette volonté d'apprentissage par la technologie et d'arriver à amener les élèves à acquérir les connaissances et compétences nécessaires à leurs études futures la voie STI2D s'est dotée de 4 spécialisations. Cela permet aux élèves d'approfondir dans un domaine concret qui les intéressent, les rassurent et les valorisent notamment via le travail de projet en équipes.

La spécialité qui m'intéresse pour cette application pédagogique est la spécialité Système d'information et numérique (SIN). Cette spécialité propose dans le prolongement de ce qui est étudié dans l'enseignement transversal de faire l'étude de système pluri-techniques intégrant une composante informationnelle significative.

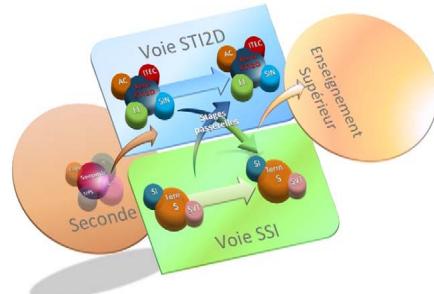


FIGURE 38 – Placement de la filière STI2D



FIGURE 39 – Spécialités en STI2D

C'est dans ce contexte que j'ai choisi de développer ma première séquence pédagogique portant sur l'étude de la chaîne d'information d'une version en kit adaptée pour le lycée de la sonde d'échographie echOpen.

### 2.1.2 Structure générale de la séquence pédagogique

Au cours de ma collaboration avec echOpen j'ai été principalement amené à travailler sur une version pédagogique du kit d'échographie portable. Déjà distribuée au près d'écoles d'ingénieurs cette version présentée sous formes de "stacks" (empilement de cartes électroniques assurant chacune une fonction) possède les avantages d'offrir un accès total à l'ensemble de ses composants, de permettre une localisation aisée de l'ensemble de ses fonctions et d'être complètement modulable. C'est en particulier cet aspect modulable que je tends à exploiter au maximum lors de cette séquence pédagogique. En effet étant donné que le système est sans cesse sujet à des améliorations de la part de la communauté plusieurs solutions technologiques sont disponibles pour chaque fonction de la chaîne d'information.

La chaîne d'informations du système présentant des fonctions classiques pour la filière STI2D (amplification, filtrage) mais aussi plus spécifiques (amplification à gain variable, détection d'enveloppe) elle est adaptée à une étude lors de l'enseignement de spécialité SIN plutôt que de tronc commun. Toutefois elle sera menée en parallèle ou à la suite directe des enseignements de tronc commun sur la structure d'une chaîne d'information et les premiers contacts avec la conversion analogique numérique.

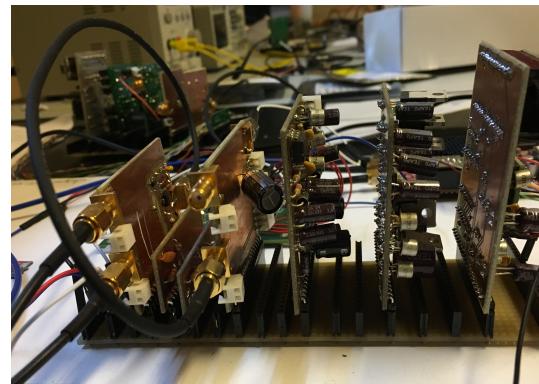


FIGURE 40 – Première version d'un kit modulable

La séquence proposée vise un public de première STI2D au cours de l'enseignement de spécialité SIN. Elle prend place au second semestre à la rentrée des vacances de février. Dans l'hypothèse d'une classe de STI2D composée de 30 élèves ayant choisi pour moitié l'enseignement de spécialité ITEC et pour moitié la spécialité SIN cette séquence concerne un public de 15 élèves. L'encadrement est par conséquent réalisé par un seul enseignant. La séquence est développée sur trois semaines. En première l'enseignement de spécialité est alloué d'un volume horaire de 5 heures hebdomadaires que je divise en deux séances de 2h et 3h. En ajoutant une heure d'accompagnement personnalisé en fin de séquence on atteint un volume horaire total de 16h.

L'ensemble de la séquence est construite autour d'un mini-projet dont le support est la sonde echOpen. On adoptera donc une approche générale inductive.

<b>Niveau d'enseignement</b>	Première STI2D : Spécialité SIN
<b>Effectif</b>	16 élèves
<b>Encadrement</b>	1 enseignant technologique
<b>Volume horaire</b>	16 h
<b>Planning</b>	Deux séances de 2h et 3h durant 3 semaines
<b>Approche</b>	Inductive autour d'un mini-projet

### 2.1.3 Plan détaillé de la séquence

L'objectif principal de cette séquence est d'amener les élèves à bien maîtriser l'ensemble de la chaîne d'acquisition d'un capteur de celui-ci jusqu'à la numérisation tout en les sensibilisant au thème sociétal qu'est la santé et plus précisément sa protection. L'approche par projet vise à donner de l'autonomie aux élèves en les amenant à effectuer des choix personnels, c'est le prolongement naturel des activités pratiques réalisées en enseignement transversal. De plus le support de projet est idéal si la séquence intervient dans les semaines suivant les enseignements de sciences physiques sur les ondes sonores et ultrasonores et les quelques notions d'analyse médicale.

D'un point de vue des textes officiels la séquence est construite sur les points suivants :

Item du bulletin officiel	Référence	Précisions
<b>Thème sociétal</b>	Santé	Permettre d'investiguer les différents paramètres de santé sans intrusion.
<b>Centres d'intérêt</b>	CI 2 CI 6	Instrumentation/Acquisition et restitution de grandeurs physiques. Traitement analogique de l'information
<b>Objectifs</b>	CO7.sin2 CO8.sin1 CO9.sin2	Caractérisation de fonction Choix de solution matérielle Configuration d'un système réel.
<b>Prérequis</b>	P-C 1.8 P-C 1.9.5 ETT 2.1.2	Quelques outils de diagnostic médical Ondes sonores Organisation fonctionnelle d'une chaîne d'information

Du point de vue des connaissances et compétences attendues en fin de séquence on trouve :

Connaissances	Compétences
Architecture de la chaîne d'information Niveau taxonomique 2	<b>Identifier</b> la fonction définie par un besoin exprimé
Acquisition, conditionnement et filtrage d'une information analogique Niveau taxonomique 2	<b>Rechercher et choisir</b> une solution matérielle au regard de la définition d'un système
Conversion analogique numérique Niveau taxonomique 3	<b>Connaitre</b> les principes et enjeux de la numérisation
Adaptation d'une chaîne d'acquisition aux caractéristiques des grandeurs à acquérir Niveau taxonomique 3	<b>Mettre en oeuvre</b> la chaîne d'acquisition.

La séquence s'intitule **"Bien acquérir l'information : un problème vital!"** et le détail des séances qui la composent est le suivant :

### **Séance 1 : Séance d'activation - Lundi matin 8h/10h**

#### **Introduction professeur (30min) :**

Le professeur présente le thème de la séquence tout en l'introduisant comme la continuité logique des enseignements de la semaine précédente en enseignement transversal. Il présente ensuite rapidement le déroulement des semaines à venir puis enchaîne sur le travail demandé lors de la séance du jour.

#### **Recherches documentaires (1 heure) :**

Les élèves en binômes (1 trinôme) utilisent les postes réseaux afin de rechercher sur internet des éléments d'actualité et médiatiques mêlant santé et électronique (ex : cœur artificiel, imagerie médicale, pacemaker, ...). L'objectif est de les sensibiliser à la multiplicité des applications électroniques dans le domaine médical et aux progrès de la médecine grâce à elles. L'utilisation du web permet la visualisation de vidéos et autres représentations graphiques motivantes pour les élèves et induisant normalement une volonté d'en connaître plus dans le domaine durant la séquence.

#### **Synthèse de l'activité de recherche (30 minutes) :**

Les élèves se regroupent et indiquent au professeur les systèmes qu'ils ont trouvé. Le professeur les recense au tableau tout en listant leurs caractéristiques principales. L'objectif est de montrer aux élèves les différences et points communs des systèmes trouvés et d'y identifier certaines fonctions qu'ils connaissent déjà via d'autres supports.

### **Séance 2 : Travaux dirigés - Jeudi matin 8h/11h**

#### **Travail dirigé sur l'Hemomixer (2 h 30min) :**

L'Hemomixer est le système didactisé de la société didastel correspondant au thème sociétal de la santé. Il comporte la chaîne de conditionnement d'un capteur de pesée ainsi que plusieurs convertisseurs analogiques numériques. L'objectif de cette séance de travaux dirigés est de renforcer les connaissances déjà acquises en tronc commun et de donner confiance aux élèves pour les projets de la semaine suivante en ayant vu récemment un cas pratique avec le groupe classe et le professeur. Les questions du TD sont orientées de manière à étudier l'organisation générale de la chaîne d'information, la justification d'choix d'un convertisseur analogique numérique et enfin les éléments perturbateurs des capteurs (parasitage, sensibilité, défaut de linéarité,...)

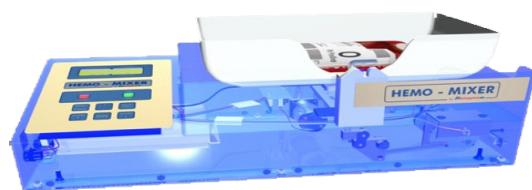


FIGURE 41 – Le système Hemomixer

### **Synthèse du TD et présentation des projets (30 min) :**

Le professeur élabore une liste des points clés à retenir de la structure étudiée lors du TD en ayant à l'esprit le projet de la semaine suivante. Ensuite on évoque les mini-projets, le support, l'objectif à atteindre. On forme trois groupes de cinq élèves dont un est désigné chef d'équipe pour les mini-projets.

### **Séance 3 : Mini projet partie 1 - Lundi matin 8h/10h**

Le descriptif détaillé du mini-projet est disponible à la sous-section suivante.

#### **Etude de dossier technique (1 h 45 min) :**

La première séance du mini-projet est basée sur l'étude du dossier technique fourni par le professeur. Il s'agit de s'approprier le système, de reconnaître les similitudes avec ce qui a été vu en TD et de proposer de premières idées en rapport avec la problématique.

#### **Evaluation formative (15 min) :**

Le professeur passe en fin de séance dans chaque groupe et évalue par de brèves questions orales l'envie des élèves ainsi que leur compréhension du cahier des charges et leurs premières idées. Il réoriente les élèves en cas de nécessité. A ce stade il ne possède qu'une information qualitative de l'implication des groupes mais cette première impression sera combinée avec les évaluations formatives des autres séances de projet.

### **Séance 4 : Mini projet partie 2 - Jeudi matin 8h/11h**

#### **Investigations (2 h 45 min) :**

La seconde séance de mini-projet qui constitue réellement le cœur de celui-ci. C'est durant cette séance que les élèves qui se sont répartis les tâches pratiquent leurs investigations, mesures et simulations afin de faire un choix définitif de solutions. Une bonne organisation lors de cette séance est primordiale afin de ne pas se disperser, ainsi il est important que le professeur effectue des passages réguliers dans les groupes même si il n'est pas sollicité.

#### **Evaluation formative (15 min) :**

A la fin de cette deuxième séance de projet une nouvelle série de questions est posée à chaque groupe dans le vérifier qu'ils ont bien saisi l'ensemble des démarches effectuées ainsi et qu'ils ont bien réagit suite aux éventuelles réorientations de fin de première séance. Cette évaluation combinée avec les impressions de fin de première séance donnent désormais l'orientation de la note de projet qui sera attribuée à l'issu de l'évaluation sommative.

**Séance 5 : Mini projet partie 3 - Lundi matin 8h/10h****Finalisation et validation du projet (2h) :**

La troisième et dernière séance du mini-projet sert éventuellement à terminer rapidement les dernières mesures mais il faut ensuite rapidement passer à la validation de la structure réalisée afin de pouvoir ensuite regrouper les résultats et démarrer la préparation d'un support numérique de présentation des solutions envisagées et finalement retenues.

**Séance 6 : Evaluation et synthèse - Jeudi matin 8h/11h****Evaluation sommative (1 h 30 min) :**

L'évaluation sommative pour cette séance est constituée d'une présentation orale de chaque groupe d'une durée de 15 minutes suivie de 15 minutes de questions visant à vérifier la bonne compréhension du travail effectué par l'ensemble des membres du projet.

**Synthèse de fin de séquence (1 h 30 min) :**

Le professeur reprend la main et après un débriefing des présentations de projet évoque les points clés à retenir de la séquence. Il distribue la fiche de synthèse regroupant l'ensemble des relations pertinentes vues au cours de la séquence. Il peut en plus distribuer une seconde fiche regroupant les points abordés mais qui entrent dans la catégorie "pour aller plus loin" afin que les élèves marquent bien la différence entre l'essentiel et les apports supplémentaires de culture générale.

	Orthographe /2	Lisibilité /2	Clarté des explications /2	Réponses aux questions /2	Implication /4	Nature des signaux /2	Cohérence structure /2	Fonctions de base /2	CAN /2	Total /20
Elève 1										
Elève 2										
Elève 3										
Elève 4										
Elève 5										

FIGURE 42 – Proposition de grille d'évaluation pour les présentations orales

### 2.1.4 Descriptif du mini-projet

Le guide d'accompagnement de STI2D présente sous la forme d'un tableau les objectifs et modalités de réalisation d'un mini-projet technologique.

<b>Projet technologique</b>	Système réel associé à une situation problème aboutissant à un prototype, une maquette, une simulation, à la validation de solutions et à une soutenance	Synthétiser et approfondir ses connaissances par le biais d'un travail collaboratif
-----------------------------	--	---

FIGURE 43 – Un projet en filière STI2D

L'orientation que je souhaite donner à ce projet entre exactement dans ce cadre. Le support utilisé est le suivant.

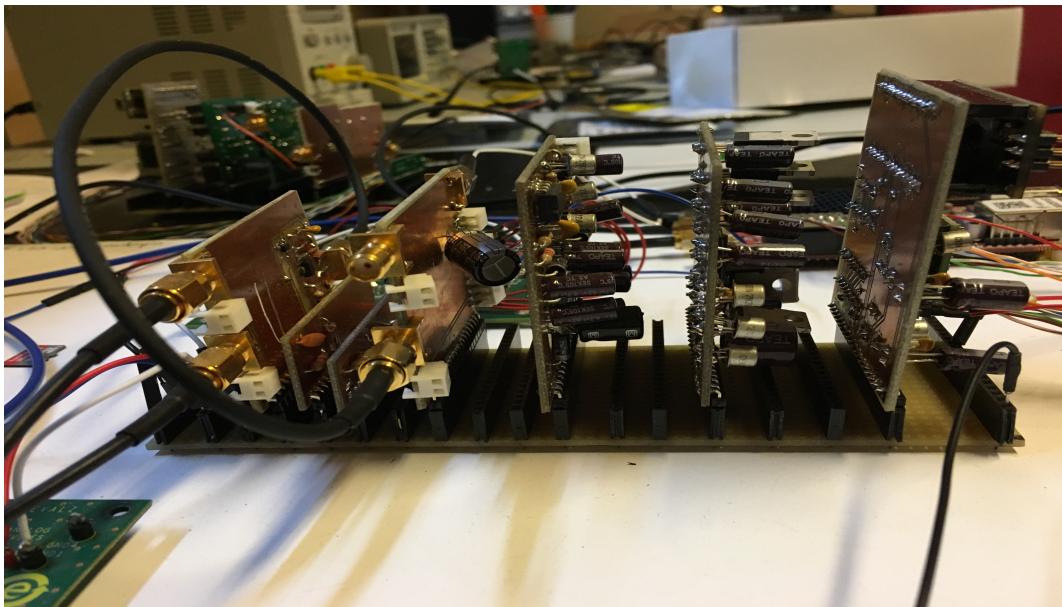


FIGURE 44 – Le système support : écho-stéthoscope sous forme de modules

Le système est fait de telle manière à ce qu'une interaction totale soit possible. Ainsi il est possible de retirer un module et d'en enficher un autre réalisant la même fonction à sa place. C'est la fonctionnalité qui est utilisée lors de ce projet.

**L'objectif** pour les élèves est de partir du système auquel on a retiré l'ensemble des modules assurant les fonctions entre le capteur et le convertisseur analogique numérique. Ils doivent alors collaborer entre eux par groupe de cinq afin de proposer une solution matérielle fonctionnelle en fin de projet. Pour cela on met à leur disposition plusieurs modules pour chaque fonction à réaliser ainsi on conserve une démarche entière de conception tout en s'affranchissant de l'étape de réalisation de PCB qui est chronophage.

La démarche effectuée tout au long de ce projet est donc une démarche de créativité.

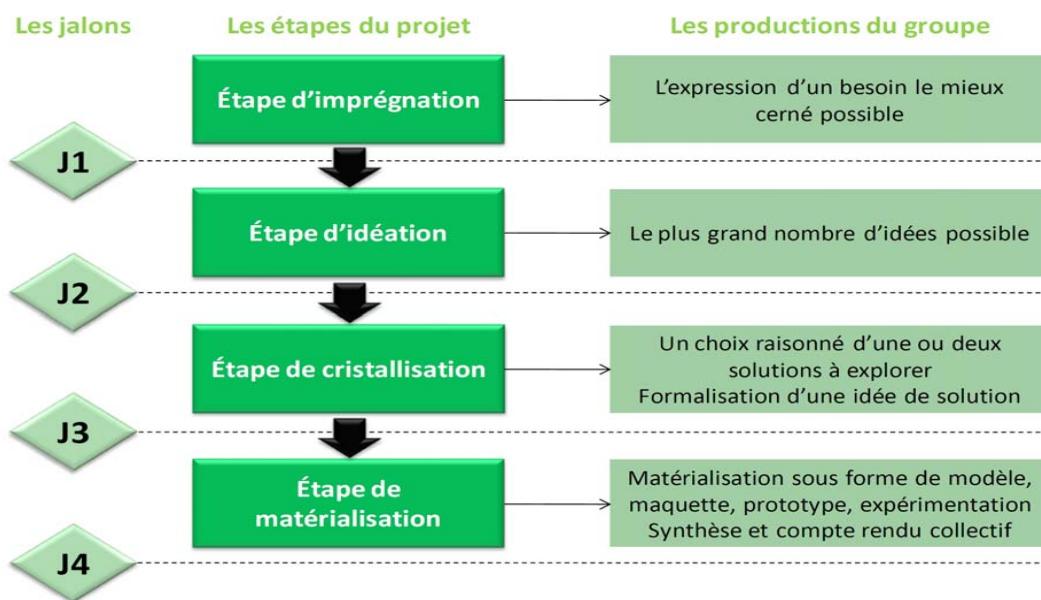


FIGURE 45 – Les étapes de la démarche de créativité

**L'étape d'imprégnation :** Cette étape qui consiste à explorer le sujet et à le comprendre est matérialisée ici par les actions suivantes :

- Distribution d'un cahier technique partiel du système. Ce cahier est complet pour l'ensemble du système hormis la partie d'acquisition et de conditionnement du signal qui n'est que partiellement décrite. Il présente l'environnement du produit, ses usages et ses relations avec les usagers ce qui clarifie par exemple le fait qu'un amplificateur à gain variable soit déjà dans la chaîne pour compenser l'atténuation dans les tissus biologiques.
- Mise à disposition de la maquette pourvue d'une chaîne d'acquisition partielle.
- Les élèves doivent relever les signaux provenant directement du capteur et étudier la documentation technique du convertisseur analogique numérique (1 modèle différent par groupe).
- En s'inspirant de la structure étudiée en travaux dirigés, en demandant éventuellement des précisions à l'encadrant et en utilisant les mesures faites et le cahier technique les élèves doivent normalement avoir cerné du mieux possible le besoin et franchissent alors le premier jalon.

**L'étape d'idéation :** C'est l'étape où la créativité des élèves s'exprime. En s'aidant de leurs connaissances personnelles ainsi que des moteurs de recherche à leur disposition ils se concertent afin de proposer le maximum d'idées possible. C'est également l'étape où l'organisation en îlots commence à prendre son sens. On multiplie les points de vue et les idées lors d'un brainstorming. L'élève désigné chef de groupe à alors la responsabilité de rassembler les idées sur un tableau blanc placé devant chaque îlot de façon à mieux faire se remémorer chaque idée et ensuite les partager avec l'enseignant.

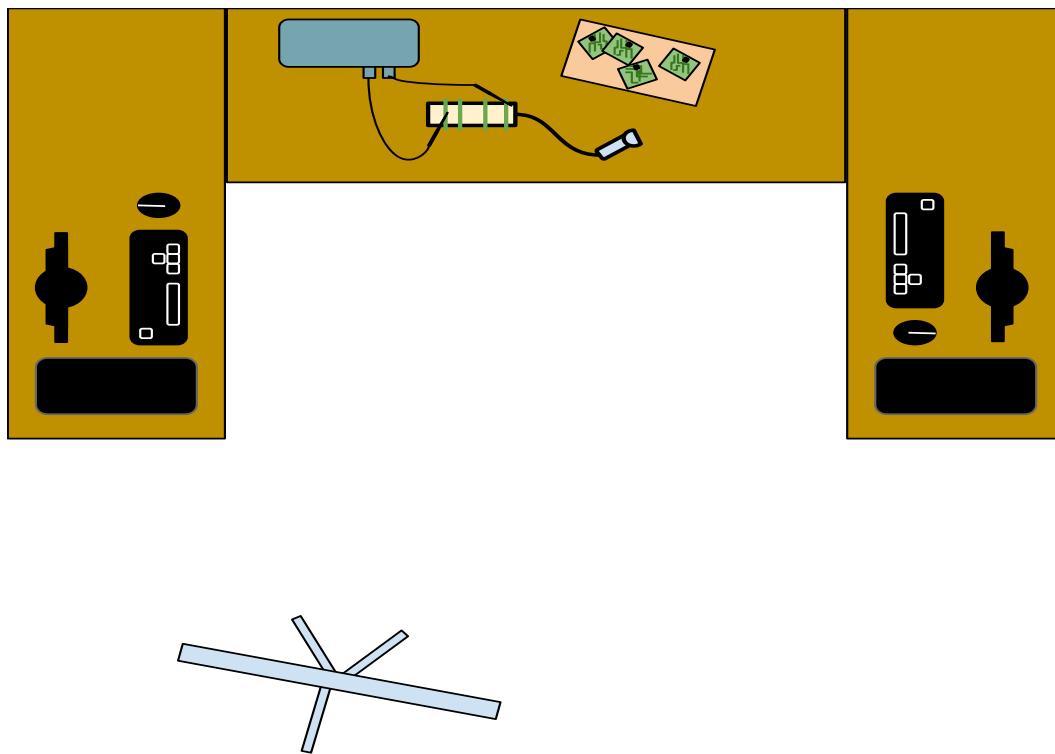


FIGURE 46 – Un exemple de disposition d'ilôt

La fin de cette deuxième étape est marquée par le jalon 2 qui correspond dans notre cas à la première évaluation formative. Nous sommes alors à la fin de la première séance de projet et le professeur présente les modules dont les caractéristiques sont les plus proches de celles proposées par les étudiants.

**L'étape de cristallisation :** Dès le début de la deuxième séance les élèves font le choix d'au maximum deux modules par fonction qu'ils veulent réaliser. Ils utilisent désormais l'ensemble des moyens mis à leur disposition (mesures, simulations par gabarit pour les filtres,...) afin de caractériser au mieux ces modules et de vérifier qu'ils conviennent bien. Une fois les modules validés les élèves réfléchissent à l'ordre précis dans lequel ils veulent les aligner.

Si un groupe est particulièrement performant et semble en avance étant donné que nous sommes en spécialité il est possible de leur demander de comprendre le principe des fonctions moins communes comme l'amplificateur à gain variable (observation de sa loi de commande) ou encore le détecteur d'enveloppe analogique (ceci constituerait une première mise en contact avec un circuit qu'il retrouveront lors des l'étude de la démodulation d'amplitude plus tard dans leur cursus).

A la fin de cette séance on atteint le troisième jalon. La seconde évaluation formative vient alors valider le bon avancement du projet et le professeur offre normalement son aval au montage de la maquette et aux tests de fonctionnement en début de troisième séance.

**L'étape de matérialisation :** L'étape la plus valorisante du point de vue de l'élève, c'est à ce moment qu'il voit le fruit de son travail. La validation du projet est faite par des mesures des signaux d'entrée et de sortie de chacun des modules insérés dans la chaîne complète ainsi que d'un test de fonctionnement de la sonde complète sur un volontaire.

Pour vérifier le bon fonctionnement global et apporter ainsi un aspect encore plus attrayant aux élèves j'ai été amené à développer au cours de ma présence chez echOpen un programme Matlab qui remplace totalement le téléphone portable puisqu'il se connecte via wi-fi à la sonde et récupère les informations numérisées. A partir de là, le programme effectue des opérations de traitement du signal et affiche sur l'écran du PC en temps réel le signal brut récupéré, l'enveloppe du signal pour que les élèves fassent le lien avec leurs leçons de sciences physiques dans lesquels ils ont appris l'importance de l'énergie du signal et enfin l'image reconstituée de l'organe sondé.

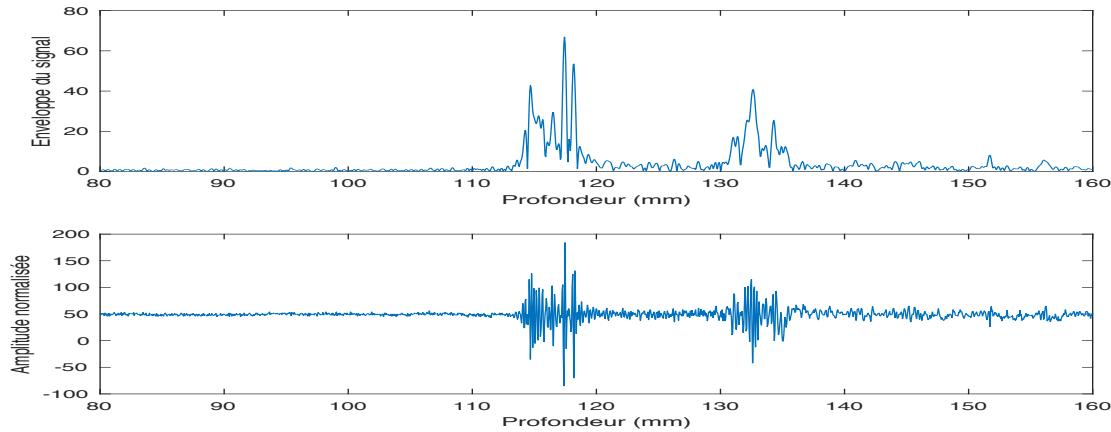


FIGURE 47 – Signaux visualisés : en bas le signal récupéré, en haut son enveloppe

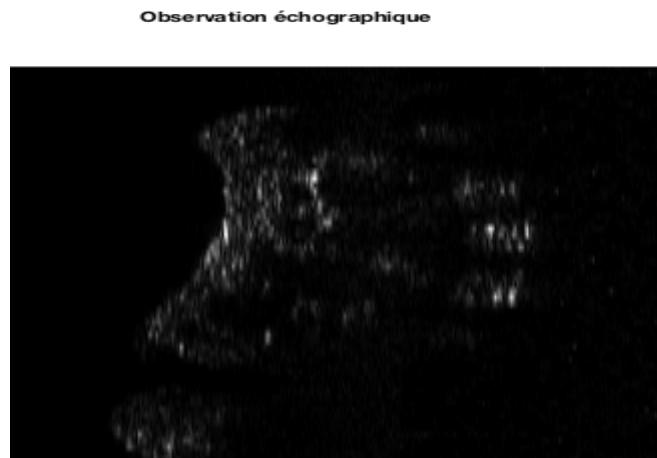


FIGURE 48 – Image obtenue : ici une vue en coupe d'une main

La séance s'achève par le début de la réalisation du support de présentation des élèves. Sont attendus dans cette présentation une description des choix effectués, un diagramme montrant la structure finale de la chaîne réalisée et précisant les choix technologiques, les mesures les plus caractéristiques et enfin une image d'une main par exemple. Cette présentation qui sera évaluée durant la séance suivante représente le quatrième et dernier jalon de la démarche de créativité.

### 2.1.5 Résumé de la séquence

La figure suivante résume l'ensemble de cette séquence à l'aide de l'outil logiciel pySequence.

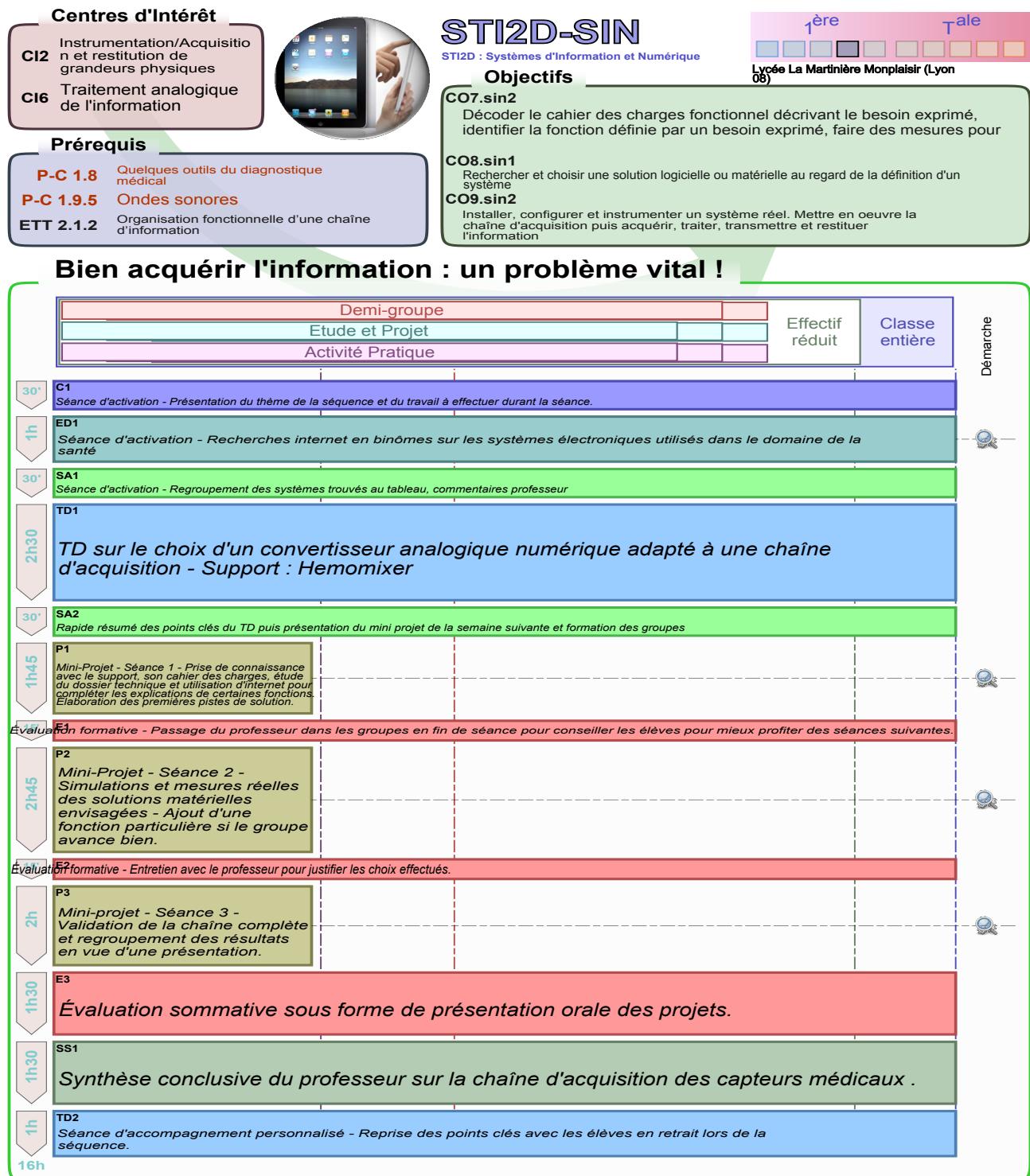


FIGURE 49 – Résumé de la séquence pédagogique en STI2D SIN

## 2.2 Exploitation pédagogique en DUT GE2I

### 2.2.1 Structure générale de la séquence

Cette seconde séquence pédagogique vise à intégrer la seconde partie de mon travail scientifique à savoir le dimensionnement d'une alimentation à découpage.

Il s'agit du module **Conversions d'énergie (2)** (Référence M 3101 (Ener 3)) appartenant à l'unité d'enseignement 31 "Composants, systèmes et applications" et placé au troisième semestre de la formation des étudiants en **I.U.T GEII** (Génie électrique et informatique industrielle).

Objectif du module : Approfondir la culture technique nécessaire pour comprendre le fonctionnement et les enjeux des convertisseurs d'énergie électrique.

A l'issu du module les étudiants auront normalement acquis les compétences suivantes :

- Analyser et mettre en oeuvre les systèmes électroniques de conversion et de transformation de l'énergie.
- Réaliser le bilan de puissance d'un équipement.
- Exploiter les informations d'une plaque signalétique.
- Dimensionner un convertisseur électromécanique.

Ayant déjà suivi des modules traitant de l'énergie ( M 1101, M 2101, M2302 ) et possédant déjà un bagage mathématique associé à l'électricité (Grandeurs complexes, ...) le étudiants aborderons successivement les thèmes suivants :

- Conversion DC/DC : hacheurs et alimentations à découpage.
- Conversion DC/AC : onduleurs de tension et leur commande en modulation de largeur d'impulsion.
- Machines à courant alternatif : Notion de champ tournant, Machine synchrone, Machine asynchrone.
- Association machine asynchrone et onduleur de tension.

Afin d'aborder l'ensemble de ces thèmes et que les compétences soient solidement ancrées à l'issue du module il ne faudra pas hésiter à mettre en oeuvre l'ensemble des moyens pédagogiques mis à disposition à savoir les outils numériques (Simulation,...), les travaux pratiques et l'environnement numérique de travail pour mettre en place des exercices en ligne notés encourageant le travail personnel des étudiants et entrant parfaitement dans le cadre de "l'apprendre autrement".

Le volume horaire alloué à ce module est de 45 heures réparties en 10 heures de cours magistraux, 14 heures de travaux dirigés et 21 heures de travaux pratiques. Il compte pour un cinquième de la note de l'unité d'enseignement "Composants, systèmes et applications" et ses modalités d'évaluations seront :  $\frac{1}{3}$  comptes rendus de TP ,  $\frac{1}{6}$  exercices maison ,  $\frac{1}{2}$  examen final.

## 2.2.2 Détail de la séquence

La répartition horaire des enseignements dans le supérieur n'étant pas aussi arrêtée qu'en pré-bac il est tout de même préférable que le module se déroule sur des semaines consécutives. La figure suivante montre une proposition de répartition horaire débutant à la rentrée de septembre pour les étudiants de seconde année.

Semaine 1						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
			Cours / TD 4h			

Semaine 6						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
			Cours / TD 4h	TP 3h30		

Semaine 2						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
			Cours / TD 4h			

Semaine 7						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
			TD 2h	TP 3h30		

Semaine 3						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
			TD Simu 2h			

Semaine 8						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
				TP 3h30		

Semaine 4						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
			Cours / TD 4h			

Semaine 9						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
				TP 3h30		

Semaine 5						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
			Cours / TD 4h			

Semaine 10						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
				TP 3h30		

Semaine 11						
Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
				TP 3h30		

FIGURE 50 – Répartiton horaire de la séquence en IUT GEII

Pour cette promotion je fais le choix de consiédérer une promotion d'une soixantaine d'étudiants. Ainsi les cours magistraux sont effectués en amphithéâtre puis le groupe est scindé en trois fois 20 étudiants pour les TD dispensés par trois encadrants différents.

Le détail des séances est le suivant :

### Semaine 1

#### Cours 1 : 2h

Le premier cours de la séquence commence par une introduction mettant en évidence le fait que les convertisseurs d'énergie électrique sont partout. On présente par exemple le fait que la production d'électricité français est assurée par les alternateurs ou encore que des petits convertisseurs se cachent partout comme dans les chargeurs de téléphone portable par exemple.

On effectue ensuite une étude de la structure générale d'un hacheur qui exprime la réponse à un besoin. On parle alors des principaux composants de puissance (transistor IGBT, MOSFET, diode,...) et des règles d'association des sources et on aboutit à la forme finale du hacheur série.

On peut finir la séance par une comparaison entre alimentation à découpage et alimentation linéaire par exemple.

### TD 1 : 2h

Le TD 1 reprend les notions vues lors du premier cours. L'objectif est de valider le fonctionnement d'un hacheur un quadrant de type boost. On vérifiera particulièrement que le système possède bien un caractère survoltage et on s'intéressera aux ondulations de tension et courants.

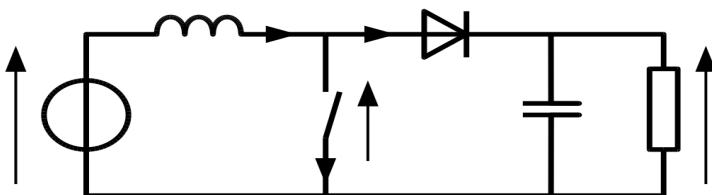


FIGURE 51 – Hacheur de type BOOST

## Semaine 2

### Cours 2 : 2h

Le deuxième cours commence par une extension aux hacheurs possédant deux et quatre quadrants de fonctionnement. On parle des conséquences du besoin de réversibilité sur un hacheur et on introduit alors la cellule de commutation classique (Transistor - Diode anti-parallèle).

La seconde partie de ce cours introduit les principaux types d'alimentations à découpage (Flyback, Forward) : leur utilisation, leurs avantages par rapport aux hacheurs simples (isolation galvanique).

### TD 2 : 2h

Le deuxième TD concerne la fabrication d'un hacheur. On fournit aux élèves un cahier des charges et ils doivent en déduire la structure du hacheur qui convient (quadrants de fonctionnements, nature des interrupteurs, éventuel ajout d'inductance pour associer les sources,...) et qui soit le plus économique possible.

## Semaine 4

### TD 3 : 2h

Le troisième TD se déroule en salle informatique. On fournit aux étudiants en binôme le modèle Simscape présenté en partie scientifique d'une alimentation Flyback. Les principales équations de fonctionnement étant fournies les étudiants doivent retrouver les formes d'ondes caractéristiques de la structure. On leur demande ensuite à partir d'un cahier des charges de modifier judicieusement les paramètres de leur choix afin de réaliser une structure permettant d'atteindre des niveaux différents (exemple : passer d'une structure 325 → 18V à une structure 5 → 12 V).

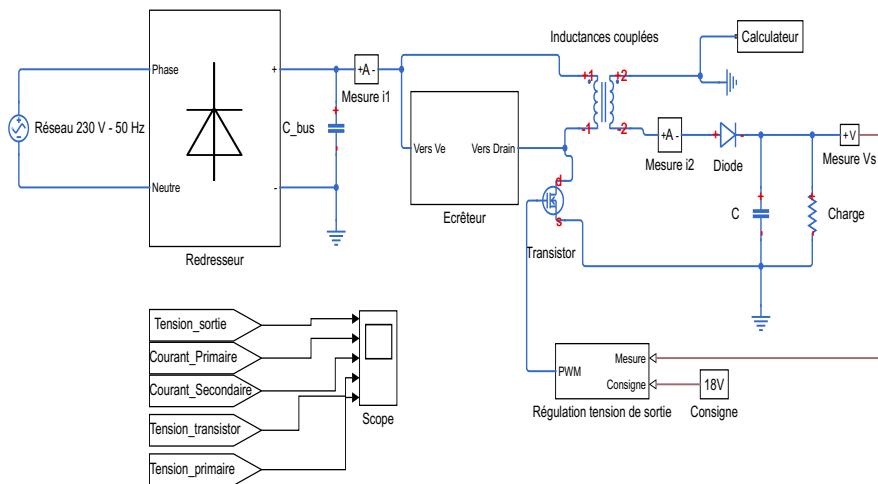


FIGURE 52 – Modèle proposé aux étudiants pour les simulations

**Semaine 5**Cours 3 : 2h

Ce cours marque le début de l'étude des convertisseurs DC/AC. Il montre aux élèves que la structure physique de l'onduleur est identique à celle d'un hacheur 4 quadrants puisque les grandeurs sont alternativement positives et négatives.

Le point essentiel de ce cours est donc d'introduire la loi de commande d'un onduleur et donc le principe général de la MLI.

TD 4 : 2h

Le sujet du quatrième TD est un onduleur monophasé en demi-pont capacitif débitant sur une charge RL. Ce TD montre que dans un montage du type la loi de commande est primordiale avec notamment le fait que le seul moyen d'équilibrer les tensions sur chaque condensateur est d'avoir un rapport cyclique moyen  $\alpha = \frac{1}{2}$ .

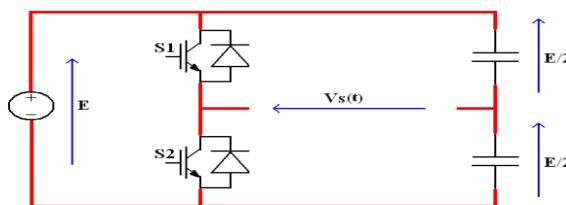


FIGURE 53 – Onduleur monophasé à demi pont capacitif

**Semaine 6**Cours 4 : 2h

Les quatrième cours est un cours préparatoire à l'étude des machines à courant alternatif. Il aborde les notions de champ tournant et de champ pulsant. On étudie la façon dont on alimente (courants triphasés équilibrés) et on place géométriquement des bobinages (répartition sinusoïdale) de façon à obtenir un

champ tournant. On finit par évoquer la structure physique des machines électriques suivantes : machine asynchrone , machine synchrone à aimants permanents, machine synchrone à rotor bobiné. Les machines synchrones sont uniquement à pôles lisses.

### TD 5 : 2h

Le TD cinq est un TD de simulation avec pour objectif de mieux se représenter les principes physiques du champ tournant.

## Semaine 7

### Cours 5 : 2h

Le dernier cours de la séquence concerne l'étude détaillée des machines synchrones et asynchrones. On parlera notamment de leurs applications les plus courantes, de leurs ponts communs mais aussi de leur différences. On donne les schémas équivalents monophasés des deux machines.

### TD 6 : 2h

Le sixième TD est utilisé pour réaliser un bilan de puissance complet sur une machine asynchrone. On démarrera notamment l'étude à l'aide de la lecture de sa plaque signalétique.

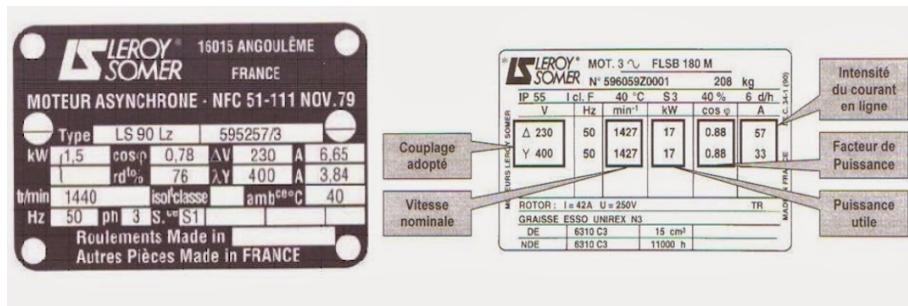


FIGURE 54 – Plaque signalétique d'une machine asynchrone

## Semaine 8

### TD 7 : 2h

Le dernier TD exploite le schéma équivalent monophasé afin de tracer les caractéristiques de couple de la machine asynchrone et de mieux saisir les notions de glissement, de vitesse de synchronisme et d'identifier les zones de la caractéristique dans lesquelles on travaille en pratique.

### **Séances de travaux pratiques**

Pour les séances de travaux pratiques l'effectif est divisé en 5 groupes de 6 binômes. Par soucis de matériel ces séances sont situées à la fin de la séquence même si elles illustrent l'ensemble de celle-ci. On propose 6 sujets de travaux pratiques sur lesquels les élèves tournent au cours des six séances de travaux pratiques de 3h30 :

- Commande en couple d'une machine à courant continu. Commande d'un hacheur 4 quadrants.
- Maquettes didactisées des deux alimentations à découpage flyback/forward. Visualisation des formes d'ondes caractéristiques, vérification du fonctionnement et bilan de puissance.
- Onduleur de tension sur charge RLC. Etude des filtres d'entrée et de sortie.
- Identification des paramètres d'une machine synchrone.
- Couplage d'un alternateur synchrone au réseau.
- Variation de vitesse de la machine asynchrone.

### **2.3 Conclusion de la partie pédagogique**

Le système de sonde échographique est un dispositif qui embarque une composante informationnelle très importante. Faisant partie du thème sociétal de la santé cela m'a permis d'en tirer une séquence pour le cycle terminal technologique centrée sur un mini-projet qui devrait intéresser les élèves car il laisse une large part à leur créativité et s'inscrit pleinement dans la spécialité SIN qu'ils ont choisi car elle correspond à leur goût.

En exploitant la suite de mon travail scientifique portant sur une partie singulière de la sonde qui est son système d'alimentation j'ai également pu envisager une séquence pédagogique cette fois-ci orientée énergie pour le supérieur. Ces deux séquences très différentes montrent l'étendue des possibilités pédagogiques qu'offre un système du monde réel de l'industrie.

Il serait encore possible d'envisager d'autres pistes pédagogiques exploitant ce système en s'intéressant par exemple aux communications entre le corps de sonde et le téléphone portable ou encore au traitement numérique de l'information.

## Références

- [1] *Le projet echOpen*, echOpen. [http://echopen.org/about\\_us](http://echopen.org/about_us).
- [2] *Financement de la santé*, O.M.S. [http://www.who.int/health\\_financing/strategy/fr/](http://www.who.int/health_financing/strategy/fr/).
- [3] Jean-Paul Ferrieux et François Forest. *Alimentations à découpage, convertisseurs à résonance*. Dunod, 2006.
- [4] Claudine Zorn Jean-Philippe Dillenseger, Elisabeth Moerschel. *Guide des technologies de l'imagerie médicale et de la radiothérapie*. Elsevier Masson, 2016.
- [5] Bernard Multon. Modèles électriques du transformateur électromagnétique. *revue 3EI*, 1997.

### 3 Annexe 1

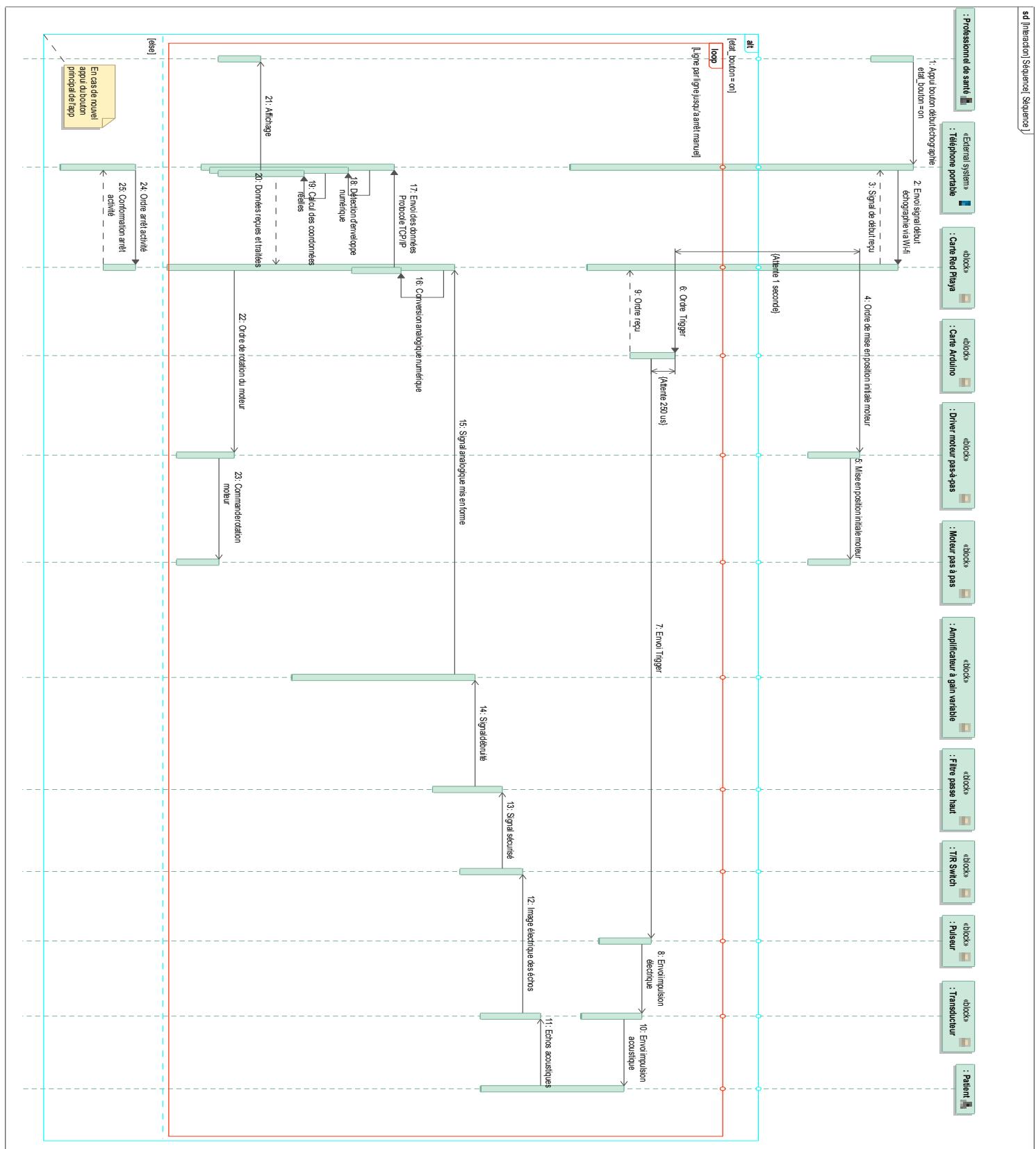


FIGURE 55 – Diagramme de séquence