



SYNTHÈSE DE PROJET

Étude de la technique de détection synchrone

(Appliquée à la mesure de signaux fortement bruités)

Auteurs :

Samy Amirat
Xingdong Yang

Encadrant :

M. Étienne Losson

Master 1 MTI – Semestre 7

Date : 7 mars 2025

Table des matières

Introduction	3
1 Détection synchrone	4
1.1 Vue d'ensemble de la détection synchrone	4
1.2 Définition et applications principales	4
1.3 Principe fondamental de fonctionnement	4
1.4 Analyse fréquentielle et filtrage	5
1.5 Conclusion du chapitre	6
2 Bruit et mesure du signal	7
2.1 Notions générales sur le bruit	7
2.2 Rapport signal sur bruit (SNR)	7
2.3 Stratégies d'amélioration du SNR	8
2.4 Exemple de mesure dans un environnement bruité	8
2.5 Conclusion du chapitre	8
3 Simulation de la détection synchrone	9
3.1 Objectif de la simulation	9
3.2 Modèle de base sous Simulink	9
3.3 Résultats et interprétation	10
3.4 Transition vers Simscape	10
3.5 Effets des variations de bruit et de la capacité	11
3.6 Conclusion de la simulation	12
4 Étude expérimentale : Réalisation et mesures	13
4.1 Présentation du matériel utilisé	13
4.2 Configuration des signaux	13
4.3 Mesures expérimentales	14
4.4 Étude de l'impact du bruit	14
4.5 Étude de l'impact de la résistance	15
4.6 Utilisation du voltmètre vectoriel TE9602	15
4.7 Conclusion expérimentale	16
Conclusion générale	17
Références	18

Table des figures

1	Poste de travail expérimental utilisé pour les mesures sur la détection syn- chrone	3
1.1	Chaîne de détection synchrone	5
1.2	Translation fréquentielle par modulation/démodulation	5
1.3	Équivalence passe-bande et passe-bas en détection synchrone	6
2.1	Modélisation du bruit thermique dans une résistance	7
2.2	Illustration d'un signal bruité et de sa récupération par détection synchrone	8
3.1	Schéma du modèle Simulink	9
3.2	Comparaison des signaux avant et après filtrage	10
3.3	Modélisation Simscape du circuit de détection	11
3.4	Impact du bruit sur la qualité de la sortie filtrée	11
3.5	Influence de la capacité sur le filtrage du bruit	12
4.1	Schéma de branchement avec AD633AN sur breadboard	13
4.2	Montage expérimental du système de détection synchrone	13
4.3	Signal bruité (jaune) vs signal filtré (bleu)	14
4.4	Effet de l'augmentation du bruit sur le signal filtré	14
4.5	Impact de la variation de R sur le filtrage	15
4.6	Réponse du filtre pour différentes résistances	15
4.7	voltmètre vectoriel TE9602	16
4.8	Système de mesure avec le voltmètre TE9602	16

Introduction

L'objectif de ce projet est d'étudier une méthode permettant de mesurer avec précision un signal utile très faible, souvent noyé dans un bruit de fond important : la détection synchrone. Cette technique, fondée sur une modulation/démodulation en phase avec un signal de référence, permet d'éliminer les perturbations non corrélées pour améliorer le rapport signal sur bruit.

Ce rapport est structuré en quatre grandes parties. La première présente les principes théoriques de la détection synchrone. La seconde s'intéresse à la nature du bruit et à la manière de le quantifier. La troisième partie développe une étude de simulation à l'aide des outils Simulink et Simscape. Enfin, la quatrième partie expose la mise en œuvre expérimentale et les résultats obtenus.

Cette étude permet de relier théorie, simulation et pratique dans le but de mieux comprendre et maîtriser les conditions de mesure de signaux faibles dans des environnements bruités.

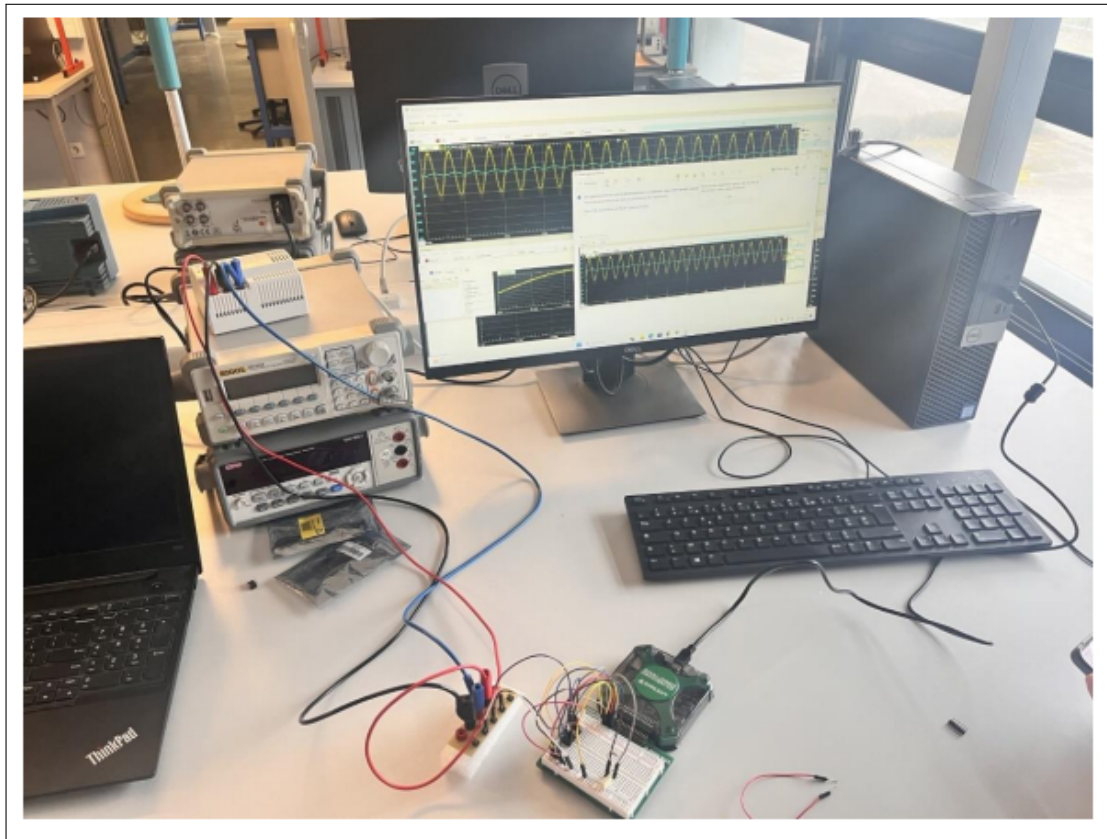


FIGURE 1 – Poste de travail expérimental utilisé pour les mesures sur la détection synchrone

Chapitre 1

Détection synchrone

1.1 Vue d'ensemble de la détection synchrone

La détection synchrone est une méthode utilisée pour récupérer un signal utile noyé dans un bruit important. Elle est principalement mise en oeuvre dans deux cas : la mesure de très faibles signaux électriques (de l'ordre du microvolt) et la réception de signaux modulés dans des systèmes de communication.

Elle repose sur quatre étapes clés :

1. Modulation du signal pour le déplacer dans une zone fréquentielle moins affectée par le bruit ;
2. Amplification sélective et filtrage pour renforcer le signal et supprimer les composantes hors bande ;
3. Démodulation synchrone via un multiplieur et un signal de référence synchronisé ;
4. Filtrage passe-bas pour extraire la composante continue représentant l'information utile.

1.2 Définition et applications principales

La détection synchrone est une technique de traitement du signal qui permet d'amplifier sélectivement les composantes synchrones à un signal de référence et de supprimer les autres. Elle est particulièrement efficace dans les situations où le bruit est dominant et empêche la mesure directe du signal, comme :

- Les mesures analogiques très faibles ;
- Les expériences physiques avec un faible rapport signal/bruit ;
- Les systèmes de télécommunications avec modulation/démodulation.

1.3 Principe fondamental de fonctionnement

Le fonctionnement repose sur un montage composé de :

- Un capteur produisant un signal modulé ;
- Un amplificateur à faible bruit ;
- Un multiplieur analogique (souvent un circuit intégré type AD633) ;
- Un filtre passe-bas (souvent de type RC).

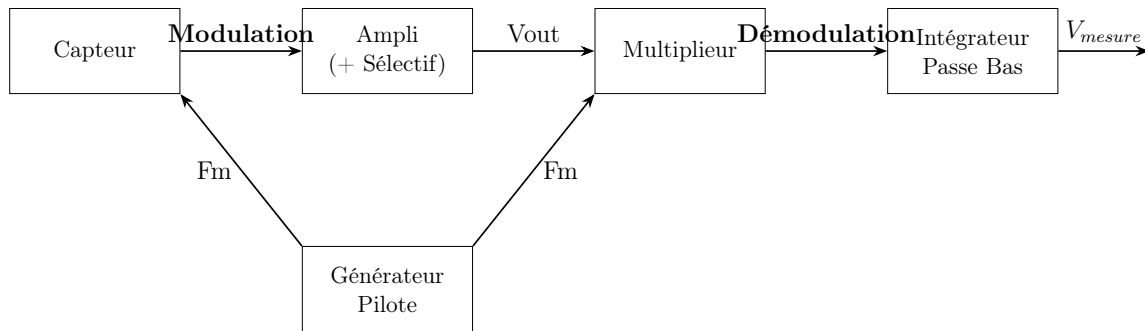


FIGURE 1.1 – Chaîne de détection synchrone

Le signal en sortie du capteur est amplifié :

$$V_{out} = E \cdot G_d \cdot A \cdot \cos(\omega_m t) + b(t)$$

Il est ensuite multiplié par le signal de référence $E \cos(\omega_m t)$:

$$V_{mult} = (EG_d A \cos(\omega_m t) + b(t)) \cdot E \cos(\omega_m t)$$

Ce qui donne après développement :

$$V_{mult} = \frac{E^2 G_d A}{2} + \frac{E^2 G_d A}{2} \cos(2\omega_m t) + b(t) \cdot E \cos(2\omega_m t)$$

Le filtre passe-bas conserve uniquement la composante continue :

$$V_{filtr} = \frac{E^2 G_d A}{2}$$

1.4 Analyse fréquentielle et filtrage

Un filtre passe-bande centré sur la fréquence de modulation permet de ne garder que la bande utile, puis un filtre passe-bas extrait la composante continue du signal démodulé.

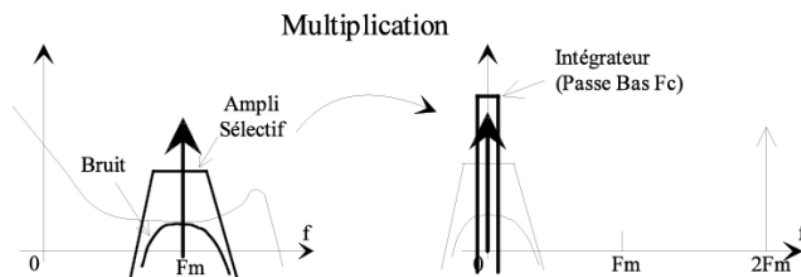


FIGURE 1.2 – Translation fréquentielle par modulation/démodulation

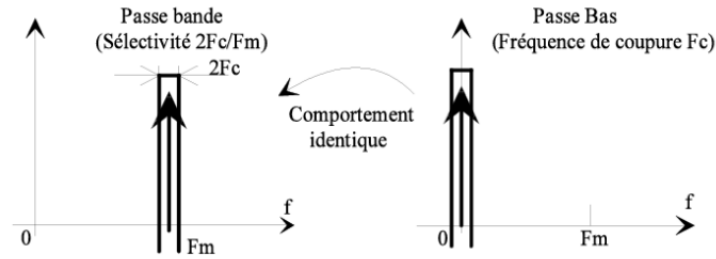


FIGURE 1.3 – Équivalence passe-bande et passe-bas en détection synchrone

1.5 Conclusion du chapitre

La détection synchrone permet d'amplifier sélectivement le signal utile synchronisé avec un signal de référence, tout en supprimant les bruits parasites. Elle améliore fortement le rapport signal/bruit et permet de mesurer des signaux que l'on ne pourrait pas détecter autrement.

Les prochaines sections détailleront l'application concrète de cette méthode en simulation et en pratique expérimentale.

Chapitre 2

Bruit et mesure du signal

2.1 Notions générales sur le bruit

Le bruit est une perturbation indésirable qui interfère avec le signal utile dans les systèmes électroniques. Il existe deux principales sources :

- Les sources externes : interférences électromagnétiques (ex : secteur 50 Hz),
- Les sources internes : bruit thermique généré par les composants électroniques.

Bruit thermique (ou bruit Johnson)

Il est causé par le mouvement aléatoire des électrons dans un conducteur. Sa densité spectrale est proportionnelle à la température T et à la résistance R :

$$\overline{v^2} = 4kTR\Delta f$$

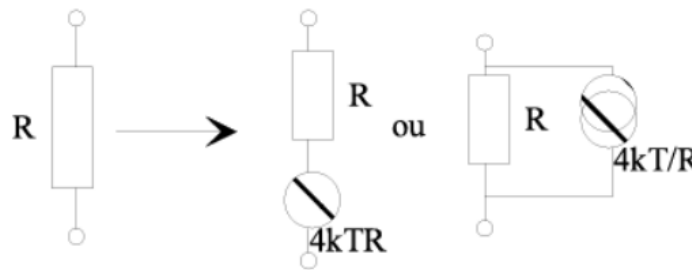


FIGURE 2.1 – Modélisation du bruit thermique dans une résistance

2.2 Rapport signal sur bruit (SNR)

Le SNR quantifie la qualité d'un signal face au bruit. Il est défini par :

$$\text{SNR}_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{bruit}} \right)$$

Un SNR supérieur à 20 dB indique un signal de bonne qualité, tandis qu'un SNR proche ou inférieur à 0 dB signifie que le bruit masque totalement l'information.

2.3 Stratégies d'amélioration du SNR

Pour améliorer le rapport signal/bruit, plusieurs techniques sont utilisées :

- Modulation du signal vers une fréquence moins bruitée,
- Filtrage sélectif autour de la fréquence utile,
- Réduction de la bande passante avec un filtre passe-bas,
- Moyennage temporel (intégration).

2.4 Exemple de mesure dans un environnement bruité

Dans les cas où le signal est noyé dans un bruit basse fréquence (bruit de scintillement $1/f$), les méthodes classiques échouent. L'introduction d'une modulation permet de déplacer le signal à une fréquence où le bruit est moindre, puis d'utiliser la détection synchrone pour le récupérer.

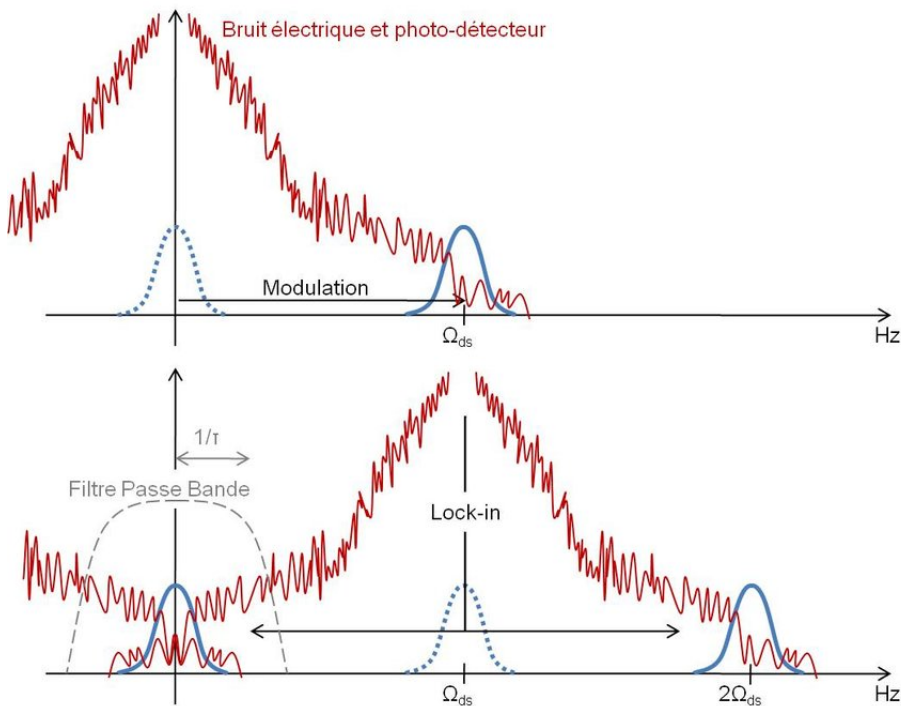


FIGURE 2.2 – Illustration d'un signal bruité et de sa récupération par détection synchrone

2.5 Conclusion du chapitre

La présence de bruit est inévitable en électronique. La connaissance de ses sources et de ses caractéristiques permet d'adapter les systèmes de mesure pour garantir une détection fiable. La détection synchrone s'inscrit dans cette logique comme une solution robuste pour extraire un signal faible dans un environnement fortement bruité.

Chapitre 3

Simulation de la détection synchrone

3.1 Objectif de la simulation

L'objectif de cette partie est de simuler le fonctionnement d'un système de détection synchrone afin d'observer la récupération du signal utile à partir d'un signal bruité. La simulation sera réalisée dans un premier temps sous Simulink, puis affinée avec des composants physiques dans Simscape.

3.2 Modèle de base sous Simulink

Le modèle de départ comprend :

- Un générateur de sinusoïde (signal utile),
- Un générateur de bruit (aléatoire),
- Un bloc somme pour créer un signal bruité,
- Un multiplieur (produit des deux signaux),
- Un filtre passe-bas modélisé avec une fonction de transfert.

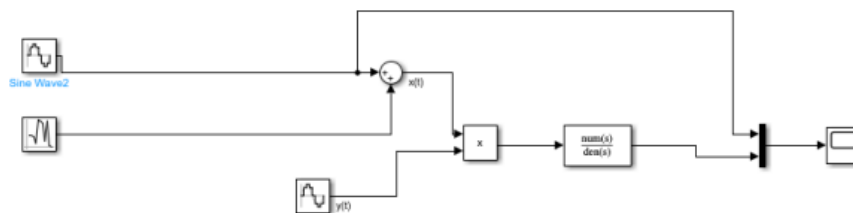


FIGURE 3.1 – Schéma du modèle Simulink

Le filtre passe-bas est défini par :

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad \text{où } \tau = 0,001 \text{ s} \Rightarrow f_c \approx 159 \text{ Hz}$$

Après simulation, le signal en sortie présente une composante continue d'amplitude $A/2$ si le bruit est correctement atténué.

3.3 Résultats et interprétation

- **Avant filtrage** : le signal est fortement bruité avec une composante à 2ω .
- **Après filtrage** : le signal est stabilisé, on récupère une composante continue représentant l'amplitude utile.

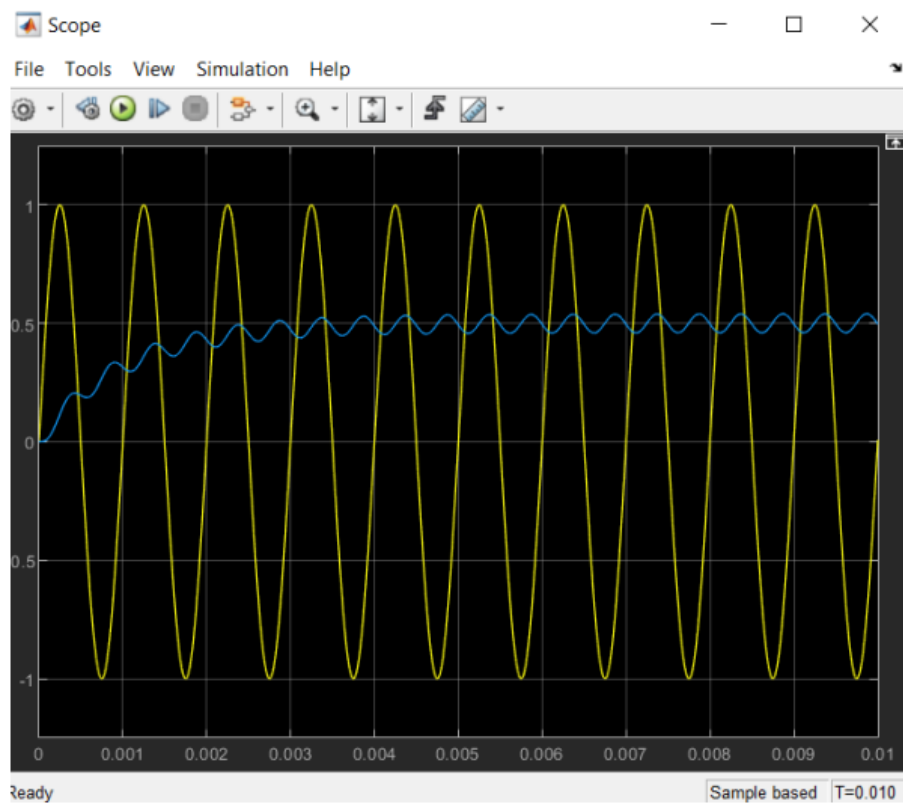


FIGURE 3.2 – Comparaison des signaux avant et après filtrage

3.4 Transition vers Simscape

Pour une représentation plus fidèle, le système est reconstruit dans Simscape avec :

- Un générateur de tension contrôlée (pour simuler le signal),
- Un circuit RC réel (résistance et condensateur),
- Un multiplicateur analogique simulé,
- Des voltmètres pour observer les signaux.

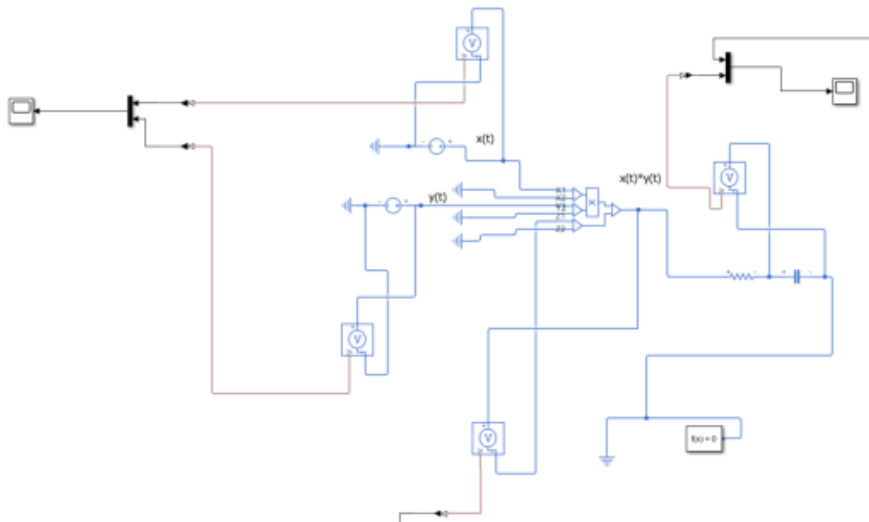


FIGURE 3.3 – Modélisation Simscape du circuit de détection

3.5 Effets des variations de bruit et de la capacité

Influence du bruit

En augmentant la variance du bruit, on observe une dégradation du signal de sortie. Le filtre atténue toujours partiellement les perturbations mais laisse passer des oscillations résiduelles.

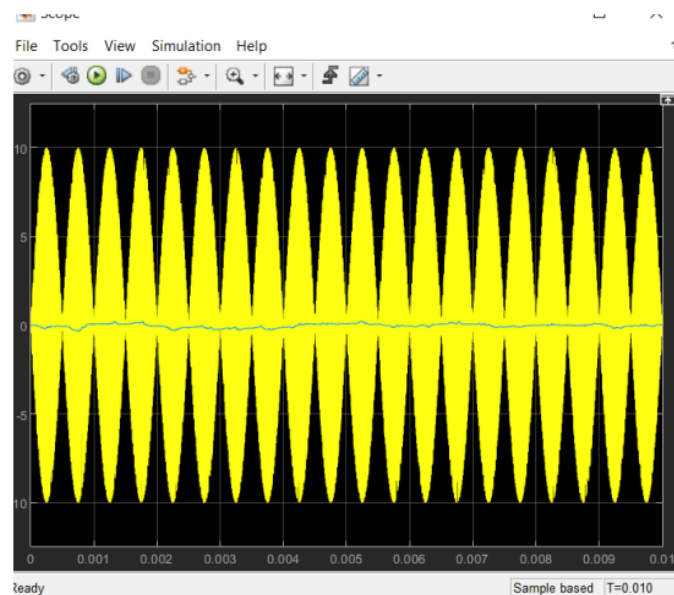
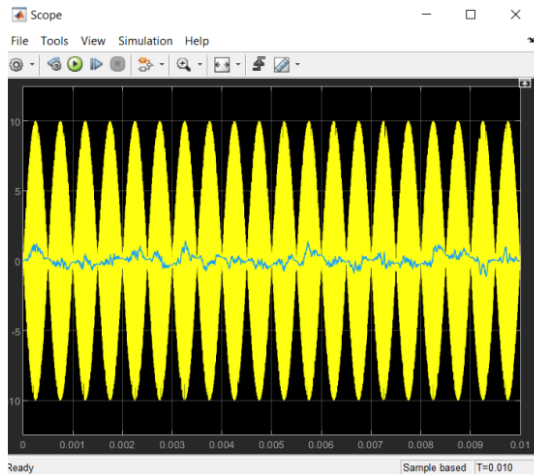


FIGURE 3.4 – Impact du bruit sur la qualité de la sortie filtrée

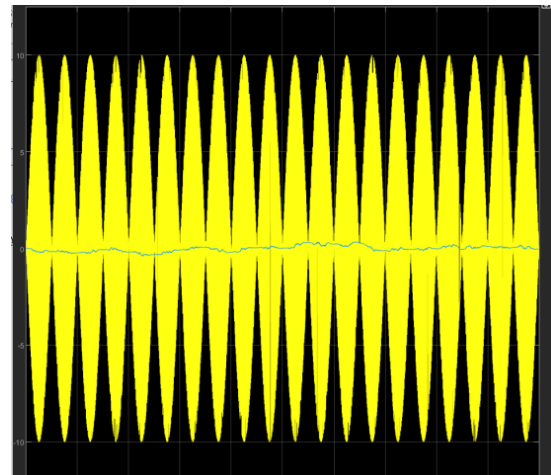
Influence de la capacité

- Si la capacité est faible (ex : 150 nF), la fréquence de coupure est plus élevée : le bruit passe plus facilement.

— Si elle est trop grande (ex : 900 nF), la réponse devient lente et amortie.



(a) Réponse pour $C = 150$ nF



(b) Réponse pour $C = 900$ nF

FIGURE 3.5 – Influence de la capacité sur le filtrage du bruit

Un compromis est donc nécessaire pour préserver la composante utile tout en supprimant le bruit.

3.6 Conclusion de la simulation

La simulation confirme que la détection synchrone permet d'extraire efficacement une composante continue en présence de bruit, à condition d'un bon dimensionnement du filtre. Le passage à Simscape permet de mieux visualiser le comportement réel des composants et d'optimiser le circuit.

Chapitre 4

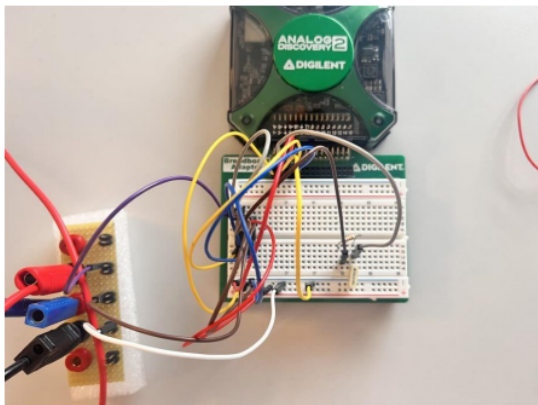
Étude expérimentale : Réalisation et mesures

4.1 Présentation du matériel utilisé

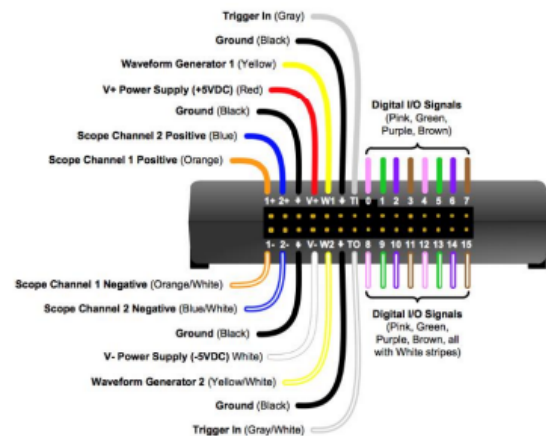
L'expérience repose sur l'utilisation du multiplicateur analogique **AD633AN**, de composants passifs (résistances, condensateurs), et d'une plateforme de mesure type *Analog Discovery* avec le logiciel *Waveforms*.

- **AD633AN** : circuit de multiplication analogique, alimenté en ± 15 V,
- **Réseau RC** : permet de créer le filtre passe-bas en sortie,
- **Breadboard** : montage rapide du circuit,
- **Waveforms** : génération et acquisition des signaux via PC.

FIGURE 4.1 – Schéma de branchement avec AD633AN sur breadboard



(a) Montage réel sur breadboard



(b) Connexion des signaux sur l'Analog Discovery

FIGURE 4.2 – Montage expérimental du système de détection synchrone

4.2 Configuration des signaux

Deux signaux sont injectés dans le circuit :

- $x(t)$: une sinusoïde de 1 kHz à laquelle est ajouté un bruit aléatoire,
- $y(t)$: une sinusoïde de 1 kHz synchronisée (référence).

Ces signaux sont générés depuis *Wavegen*, puis injectés dans les entrées du multiplieur. La sortie est connectée à un filtre RC.

4.3 Mesures expérimentales

Les tensions sont observées avant et après filtrage. Pour différents niveaux de bruit, on observe :

- la forme des signaux,
- leur valeur moyenne (DC),
- leur composante alternative (RMS AC).

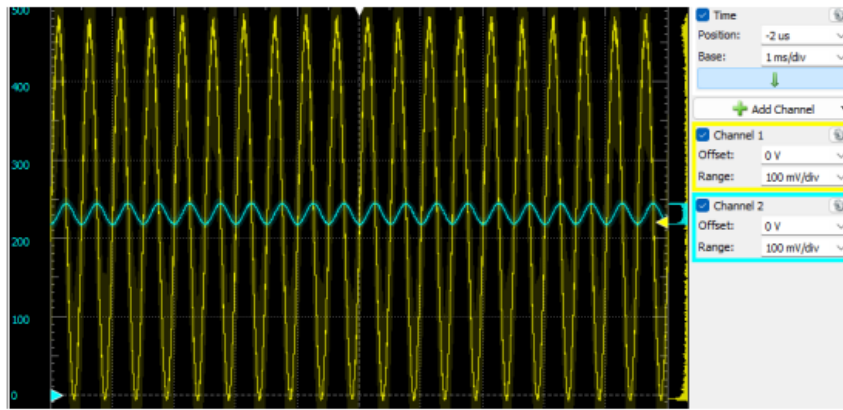


FIGURE 4.3 – Signal bruité (jaune) vs signal filtré (bleu)

4.4 Étude de l'impact du bruit

En augmentant l'amplitude du bruit (ex : $A=0.1$, $A=0.5$, $A=10$), on observe :

- une augmentation de l'ondulation résiduelle,
- une baisse de la précision du signal de sortie.

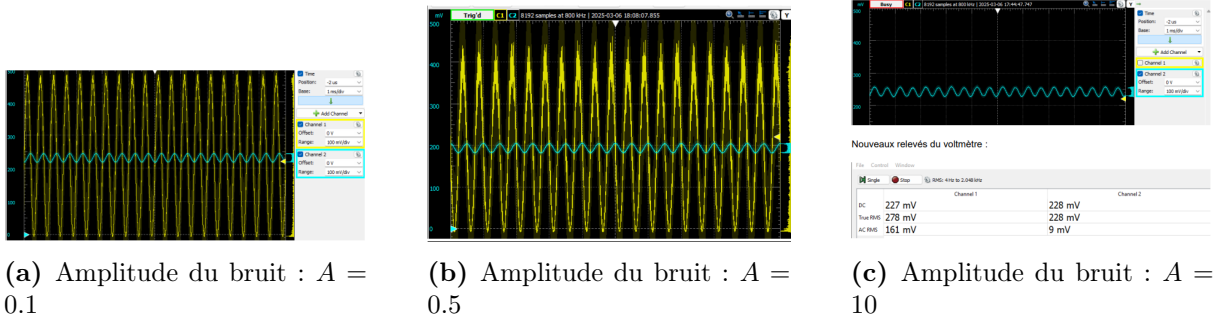


FIGURE 4.4 – Effet de l'augmentation du bruit sur le signal filtré

4.5 Étude de l'impact de la résistance

Pour une capacité constante ($C = 150 \text{ nF}$), on fait varier la résistance :

- $R = 10 \text{ k} \Rightarrow f_c = 106 \text{ Hz}$
- $R = 100 \text{ k} \Rightarrow f_c = 10.6 \text{ Hz}$
- $R = 1 \text{ M} \Rightarrow f_c = 1 \text{ Hz}$

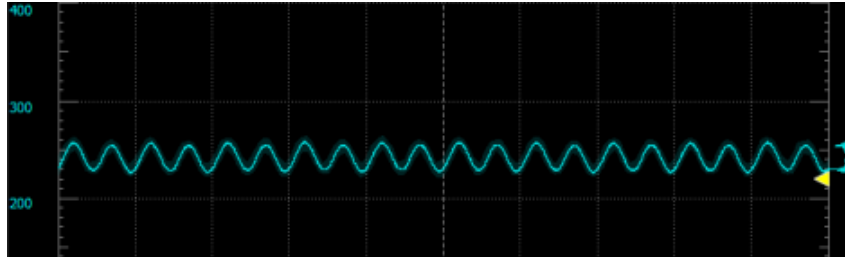
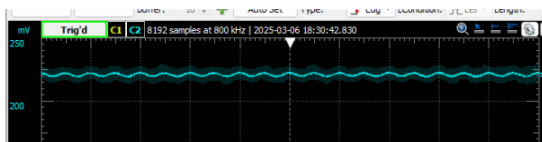


FIGURE 4.5 – Impact de la variation de R sur le filtrage



(a) Réponse pour $R = 100 \text{ k}\Omega$



(b) Réponse pour $R = 1 \text{ M}\Omega$

FIGURE 4.6 – Réponse du filtre pour différentes résistances

On constate que plus R est grande, plus le bruit est atténué, mais le signal utile est aussi lissé.

4.6 Utilisation du voltmètre vectoriel TE9602

Cet appareil mesure directement la composante synchrone X et Y d'un signal sinusoïdal faible, et fournit :

- l'amplitude réelle du signal utile noyé dans le bruit,
- l'angle de phase entre le signal et la référence.

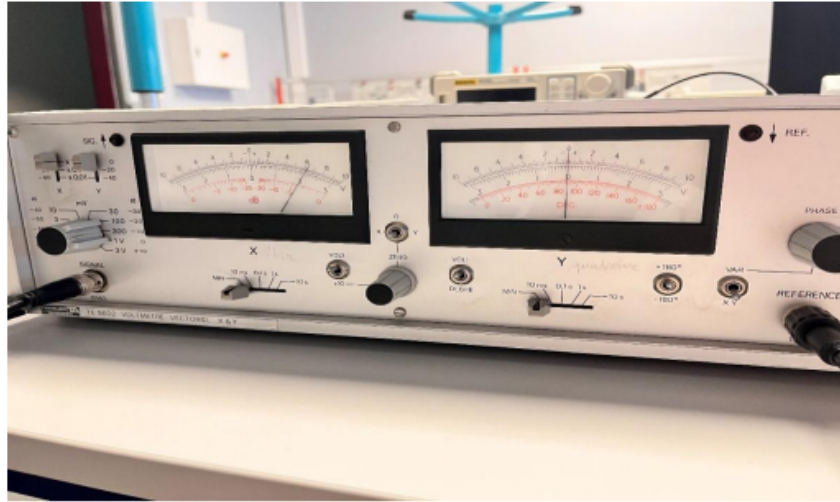


FIGURE 4.7 – voltmètre vectoriel TE9602

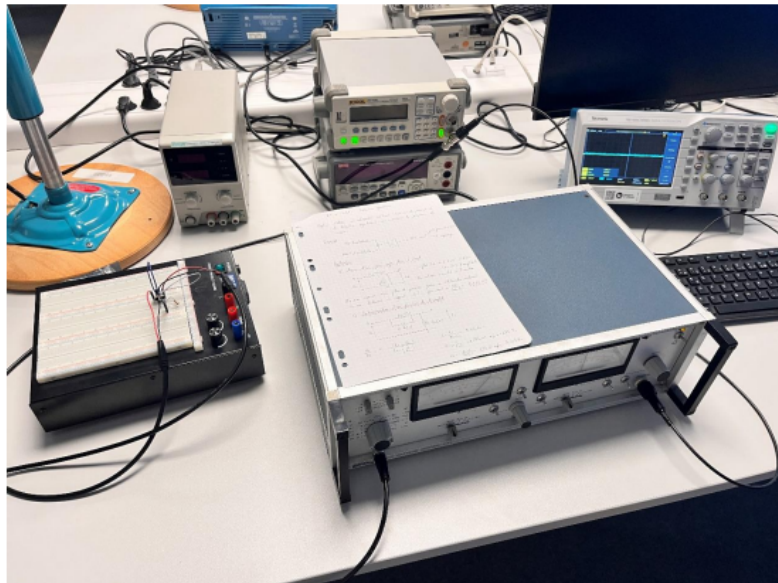


FIGURE 4.8 – Système de mesure avec le voltmètre TE9602

4.7 Conclusion expérimentale

L'expérimentation confirme les résultats obtenus en simulation. La détection synchrone permet de reconstruire un signal faible même lorsqu'il est noyé dans un bruit important. Le choix des composants du filtre (R et C) est crucial pour garantir la stabilité et la précision de la mesure.

Conclusion générale

Ce projet nous a permis d'appréhender l'intérêt et l'efficacité de la détection synchrone dans un contexte de mesure bruitée. Nous avons pu observer que cette technique repose sur des principes simples mais puissants : modulation, multiplication synchrone et filtrage adapté.

L'étude théorique nous a fourni les bases nécessaires à la compréhension du fonctionnement. La simulation a permis de valider les performances du système dans un environnement contrôlé. L'expérimentation a ensuite confirmé les résultats, en soulignant l'importance du choix des composants dans la chaîne de mesure.

Ce travail illustre parfaitement l'intérêt de combiner modélisation, simulation et pratique dans les sciences de l'ingénieur. Il ouvre aussi des perspectives vers d'autres domaines utilisant la détection synchrone, notamment en instrumentation médicale, en télécommunications ou dans la détection optique.

Références

- 1 O. Français, 2013. Présentation sur la détection synchrone.
- 2 R. L. Goff, "Modulation d'amplitude, détection synchrone".
- 3 Fiche technique AD633AN – Analog Devices. Disponible en ligne : <https://www.analog.com/en/products/ad633.html>
- 4 Documentation Analog Discovery – Digilent.
- 5 Manuel utilisateur TE 9602 X&Y – Voltmètre vectoriel.