

Transmission sans fil en maintenance prédictive industrielle

Ing. Eryvn Gonzague
ISICHt - Mons

Résumé. Cet article traite de l'intégration de la communication sans fil dans la mesure de vibration industrielle, et en particulier de la conception d'un module de mesure, autoalimenté et communiquant sans fil. Une étude des besoins et contraintes spécifiques ainsi que des solutions d'alimentation sans fil par récupération d'énergie sont présentées.

Mots clés : maintenance prédictive, sans fil, sans piles, vibration

Abstract. This article deals with the integration of a wireless communication in an industrial vibration measurement feature, and is specifically about the conception of an accelerometer self powered and wirelessly communicating. A study of operation requirements and constraints as well as energy harvesting solutions are presented in.

Keywords: predictive maintenance, wireless, energy harvesting, vibration

1. Introduction

1.1 Contexte

Le projet décrit ci-après est en cours de réalisation dans le cadre d'un projet FIRST financé par la Région Wallonne pour une durée de 2 ans.

Ce projet est une collaboration du **Cérisic** (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Institut Supérieur Industriel Catholique du Hainaut) et d'une société spécialisée en 'asset optimization', c'est-à-dire en optimisation de l'outil de production industriel. Le travail réalisé par cette société est fondé sur une double démarche : d'une part mettre tout en œuvre afin d'éviter les pannes (maintenance proactive) et d'autre part diagnostiquer les défauts pour planifier au mieux la maintenance (maintenance prédictive).

Nous nous intéressons dans la suite plus particulièrement à l'analyse vibratoire, technique fondamentale de détection de défauts sur une machine. A l'heure actuelle, ces analyses sont réalisées à l'aide de capteurs de vibration (accéléromètres) et de collecteurs de données, qui sont connectés les uns aux autres par une connexion filaire (voir figure 1).

La présence de câbles en milieu industriel constitue la principale source de problèmes liés à l'utilisation de ce matériel : coût d'installation et de routage des câbles, ruptures accidentelles, détérioration lors des maintenances, distance de câblage limitée.

Ces problèmes ont amené cette société à se tourner vers une solution sans fil. En effet, les systèmes de contrôle sans fil sont moins soumis à l'usure, accroissent la fiabilité et réduisent les durées d'installation. De plus, ils offrent une plus grande flexibilité lors des reconfigurations de l'industrie ou des machines et apportent également une solution pour des applications où le câblage n'est pas faisable en raison de limitations mécaniques ou physiques (distance de transfert, accès difficile,...). La liste des inconvénients est beaucoup plus courte. Toutefois, la portée limitée en fonction de la technique utilisée, la compatibilité entre capteurs et maîtres, l'alimentation des capteurs et la compatibilité électromagnétique sont des sujets à maîtriser pour rendre cette solution réellement avantageuse.

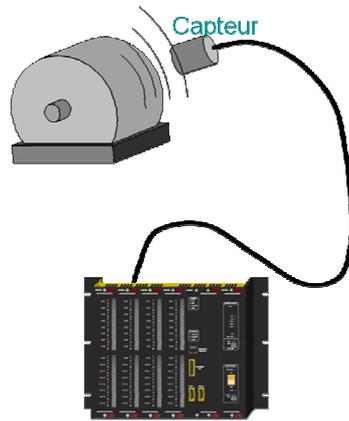


Figure 1 Représentation simplifiée de l'appareillage de mesure de vibration

Quelques réalisations sans-fil sont déjà commercialisées pour des applications similaires mais ces solutions ne correspondent pas aux réels besoins du secteur.

Les objectifs de ce projet sont donc la suppression de tout câblage entre le capteur et le collecteur, l'amélioration de la fiabilité du système, la réduction des coûts d'installation et l'augmentation des capacités de prises de mesure et de surveillance, le tout dans des conditions industrielles sévères.

2. Cahier des charges et analyse des besoins

Le système sera donc composé d'un capteur de vibration greffé sur un module de transmission et d'un récepteur connecté à un collecteur de données. En particulier, le module d'émission comprendra donc un accéléromètre, une carte d'acquisition et de prétraitement, une source énergétique autonome et un module de transmission.

Le système devra évoluer dans un milieu industriel et résister aux environnements agressifs (plage de fonctionnement de -10°C à 100°C et humidité jusqu'à 100% avec condensation). Pour cela, la conception du système sera réalisée afin de respecter les normes IP65 (étanchéité à l'eau et

la poussière), EX (protection nécessaire en environnement explosif) ainsi que la liberté d'utilisation de la bande de fréquence choisie.

Du point de vue des spécifications de mesure, le système devra présenter un poids minimum afin de ne pas réduire de manière significative la fréquence de résonance du capteur (nécessairement élevée afin d'assurer une large bande de fréquence de mesure). De même, l'encombrement du système sera limité afin de faciliter son installation sur les machines industrielles. Par ailleurs, il devra permettre une transmission à une distance minimale de 20 m. Enfin, le nombre de capteurs installés sur une machine pourrait atteindre 300 (typiquement sur une machine à papier qui est composée d'un très grand nombre de rouleaux).

Au point de vue du débit, il faut noter que la quantité de données nécessaire à la création d'un spectre analysable est relativement importante. En effet, la plage de mesure minimale des vibrations industrielles est comprise entre 0 et 30g avec une résolution de l'ordre du mg. Le codage sera donc réalisé en 16 bits par échantillon pour satisfaire à cette condition. Le nombre d'échantillon est quant à lui dicté par la résolution d'affichage du spectre. Selon la précision d'affichage désirée, la quantité de données à transmettre, nécessaire à la création d'un spectre, atteint une gamme située entre 500kbits à 1 Mbits. En fonction de la fréquence d'envoi des données, on peut comprendre que le débit s'avère rapidement important.

Enfin, le système devra être commercialisable à un coût égal ou inférieur à celui des câbles classiques, tout en assurant une fiabilité comparable, voire supérieure.

3. Choix de la bande de fréquence

Le choix de la bande de fréquence a été guidé par la volonté de disposer d'une bande libre d'utilisation tant en Europe que dans le reste du monde, conformément aux exigences du cahier des charges.

Suite à l'analyse des tableaux des fréquences (en Europe et aux Etats-Unis, [1], [2], [3]), une seule possibilité correspondant à des technologies éprouvées s'offrait à nous. La bande de 2.4 GHz est en effet une bande ISM, tant aux Etats-Unis qu'en Europe et est considérée libre d'utilisation dans le

monde entier. L'utilisation à large échelle de cette bande de fréquence (WiFi, Bluetooth, ZigBee,..) nous prouve qu'elle est totalement adaptée à notre application. Néanmoins, cette forte utilisation nous force à trouver un protocole et des techniques robustes.

4. Choix du standard de communication

L'analyse du type de standard s'est basée sur une comparaison des caractéristiques principales de ceux-ci, à savoir la fréquence de transmission, le débit, les distances couvertes, le type d'architecture réseau, la consommation énergétique, les applications visées, la complexité, l'utilisation à large échelle ou non, la possibilité de l'utiliser en environnement industriel.

Le tableau suivant reprend ces caractéristiques principales.

	Fréquence	Débit	Distance couverte	Taille réseau	Consommation énergétique	Protocole bas niveau	Application visées
Bluetooth	2.4 GHz	~ 1 Mbps	1 à 10 m	7 modules	2,5 mW à 100 mW	802.15.1	Sans fil multimedia, gsm
Wibree		~ 1 Mbps			10 x - que Bluetooth		Mêmes que Bluetooth
UWB		500 Mbps	- de 10 m (WBAN)		qqes milliwatts	802.15.3	USB sans fil
WiFi	2.4 GHz	11 à 54 Mbps	1 à 100 m	32 modules		802.11	web, mail, video
ZigBee	2.4 GHz	250 kbps	1 à 100 m	max 256 modules	milliwatts	802.15.4	domotique, monitoring, contrôle
WiMax	entre 2 et 11 GHz	75 Mbps	50 km			802.16	alternative aux câbles et adsl
IrDA	infrarouge De 3.1011 Hz à 4.1014 Hz	entre 4 et 16 Mbit/s	nécessité d'une portée optique	portée optique et pas d'obstacle			transfert données pc
HyperLAN2	5,15 à 5,30 GHz	20 Mbps	~ 1 km				même que Wimax et 802.11n
TSMP	2.4 GHz	max 3 Mbps	~ 10 m		+ que zigbee	802.15.4	

Figure 2 : Tableau de comparaison des standards de télécommunication

Les protocoles correspondants à nos besoins (portée entre 10 et 50 m, très faible consommation, grand nombre de capteurs, débit modéré) sont ZigBee

et TSMP¹ qui complètent pour des réseaux structurés (mesh, star and tree network) le protocole de base IEEE.802.15.4.

A priori, vu que la gestion du réseau sera relativement simple (pas de déplacement des modules, descente d'informations à partir du concentrateur limitée à des instructions simples de configuration), il ne sera pas nécessaire d'utiliser toutes les fonctionnalités du ZigBee.

5. Evaluation des besoins énergétiques

L'idée initiale du projet était de réaliser un module qui pourrait se connecter sur les accéléromètres de type ICP® utilisés très largement en industrie et notamment par la société I'care. En effet, l'objectif du projet était uniquement le remplacement des câbles et la connexion d'un module sans fil sur les capteurs existants.

Grâce aux informations obtenues auprès d'un fabricant de capteur, l'idée initiale explicitée ci-dessus a été mise à mal.

Ce type d'accéléromètre ICP (Integrated Circuit Piezoelectric, c'est-à-dire à électronique intégrée) demande en effet pour fonctionner correctement un courant d'alimentation constant (entre 2 et 10 mA) et une tension continue située entre 18 et 30 VDC.

Le circuit interne du capteur est schématisé ci-dessous.

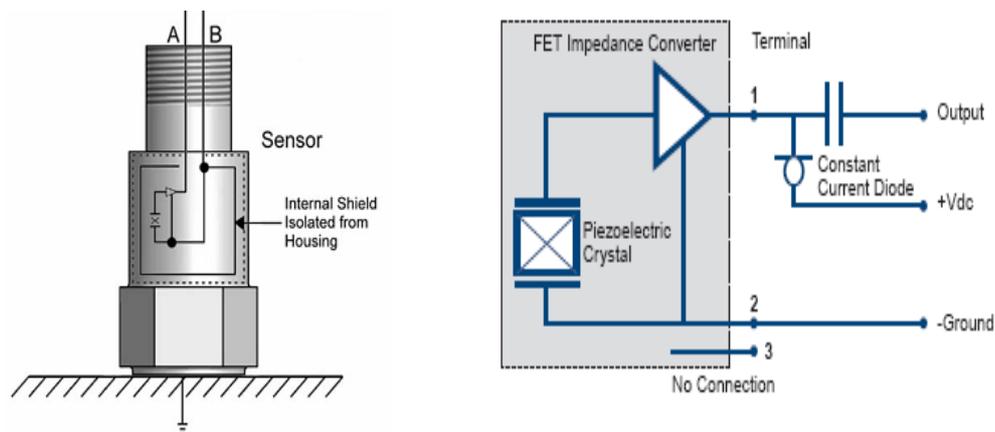


Figure 3 : Image de gauche : Schéma de principe d'un capteur ICP [5]

Image de droite : Schéma électronique [6]

¹ Protocole propriétaire de la société DustNetworks.

Chaque capteur transmet ensuite le signal temporel électrique autour de sa tension de polarisation (par exemple +/- 8 Volts sur une tension de polarisation de 12 volts). Une tension d'au moins 20-22 Volts est donc nécessaire pour avoir une étendue de mesure et une sensibilité suffisante (par exemple +/- 80 g et 100 mV/g).

Il n'est pas envisageable de fournir une alimentation 24 VDC débitant de 2 à 10 mA avec l'autonomie voulue à l'aide de piles, batteries ou par récupération d'énergie, l'encombrement du module et sa masse étant de plus limités. Par ailleurs, utiliser une tension d'alimentation inférieure ne permettrait plus d'obtenir une étendue de mesure aussi large pour une sensibilité comparable. L'utilisation des capteurs ICP traditionnels est donc, comme expliqué ci-dessus, remise en question.

Une recherche a dès lors été effectuée pour tenter de trouver une solution alternative qui pourrait remplacer les accéléromètres traditionnels, même s'il est évident qu'il n'est pas possible à l'heure actuelle de trouver un capteur à basse alimentation (souvent de type MEMS) qui comprend l'ensemble des spécifications des capteurs industriels présentés ci-dessus.

Le tableau (figure 4) présente une comparaison des caractéristiques d'un capteur ICP® typique et d'un accéléromètre à basse alimentation. , il est bon de rappeler les caractéristiques nécessaires à la mesure de vibration de machines industrielles définies dans ce projet :

Intervalle de mesure : de 0 à 30 g

Intervalle de fréquence : de 0 à 5000 Hz

Résolution : 0,001 g

Température d'utilisation : jusqu'à 100 °C

	Type de capteur	
	Hansford HS-100	PCB IMI , T0-5, configuration 3 fils
Sensibilité	100	100
Nombre d'axes	1	1
Plage de fréquence	2 Hz à 10 kHz	0,3 à 10 kHz
Plage de mesure	+/- 80 g	+/- 20 g
Résolution	0,001 g	0,001 g
Courant d'alimentation	8 mA	2 à 20 mA
Tension de bias	10 à 12 V	0,5 * tension d'excitation

Tension d'excitation	18 à 30 V	3 à 5 V
Plage de température	⇒ 140°C	⇒ 85°C

Figure 4 : Comparaison entre un capteur typique industriel et un Mems

La limitation majeure de l'accéléromètre provient de l'étendue de mesure (20 g). Des essais doivent être menés pour vérifier la fiabilité de ce type d'accéléromètre et leur potentielle utilisation pour ce projet.

6. Alimentation du capteur et production d'énergie

6.1 Evaluation de la consommation

Afin d'évaluer la consommation du futur module, il est nécessaire de connaître ses besoins énergétiques en fonction des différents paramètres de mesure.

En effet, le nombre d'axes de mesure de l'accéléromètre, la résolution (en nombre de bits), la fréquence d'échantillonnage, la durée des mesures et la fréquence de prise de mesure ont une influence considérable sur les besoins énergétiques des capteurs.

Pour expliciter ceci, différents scénarios de mesure ont été calculés sur base d'un exemple : le module commercial ZigBit de Meshnetics (qui est un module ZigBee ayant des consommations relativement faibles : 0.06 mA en mode veille ; 14 mA en fonctionnement ; 19 mA lors de la transmission).

Notons que l'autonomie de chaque senseur est mesurée sur base de deux batteries NiMH à 2700 mAh (1,2 volts) et que dans chaque cas, on ne fait varier qu'un paramètre, les autres étant fixés.

Les graphiques ci-dessous expriment l'évolution du nombre de jours d'autonomie en fonction d'un des paramètres cité ci-dessus. Pour chaque graphique, les autres paramètres sont fixés aux valeurs suivantes :

Nombre d'axes : 1

Fréquence d'échantillonnage : 10 kHz

Fréquence de prises de mesure : toutes les 10 min

Résolution de mesure (en bits) : 24

Nombre de lignes du spectre (résolution fréquentielle): 12800

Comme on peut le constater sur la figure 5, au plus la capacité d'échantillonnage du convertisseur sera importante, au plus le temps de mesure sera réduit et l'autonomie augmentée.

Par ailleurs, on peut voir que l'intervalle de temps entre les mesures doit être important si l'on désire avoir une influence significative sur l'autonomie, comme le montre la figure 6.

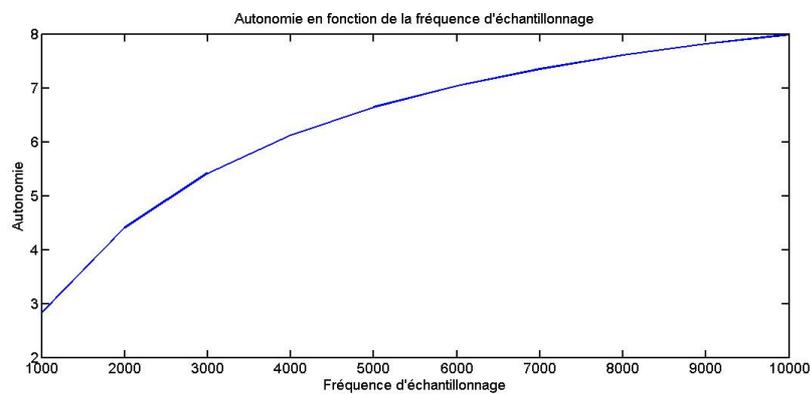


Figure 5 : Evolution de l'autonomie en fonction de la fréquence d'échantillonnage

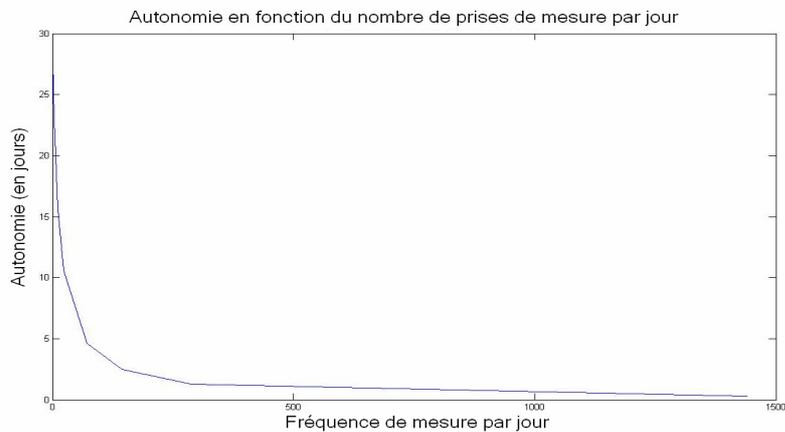


Figure 6 : Evolution de l'autonomie en fonction de la fréquence des prises de mesure au cours d'une journée

La figure 7 présente l'influence de la résolution spectrale sur l'autonomie. Celle-ci est directement proportionnelle à la fréquence maximale (ici 5000

Hz) des défauts visibles sur le spectre et inversement proportionnelle au nombre de lignes d'affichage disponibles au niveau du collecteur (100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800).

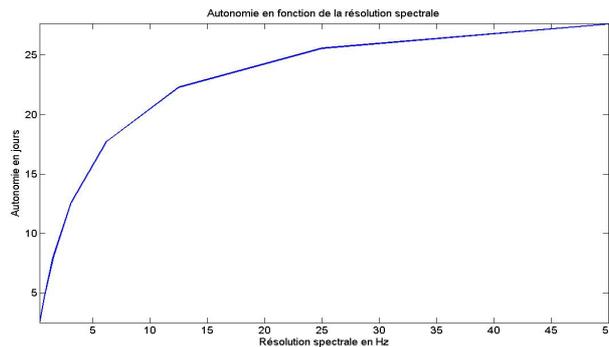


Figure 7 : Evolution de l'autonomie en fonction de la résolution spectrale

Les deux graphiques suivants (figures 8 et 9) ont pour but de montrer l'influence de la résolution en amplitude sur l'autonomie du module. La résolution spectrale est liée au nombre de bits allouables sur une plage de mesure déterminée (de 0 à 20 g pour l'exemple de la figure 8). Ce nombre de bits est directement déterminé par le convertisseur utilisé et influence le temps de transfert de par la quantité de données à transmettre.

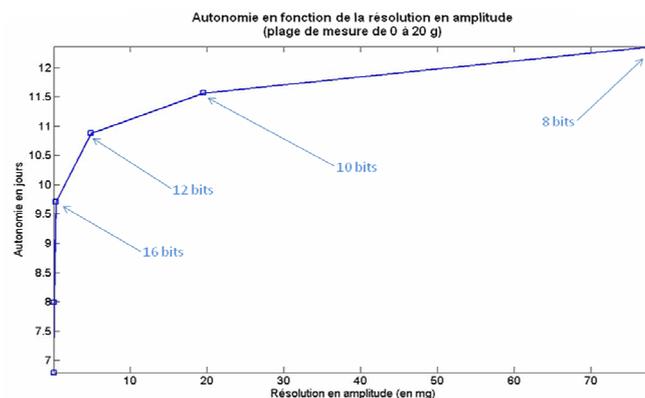


Figure 8 : Evolution de l'autonomie en fonction de la résolution en amplitude (fonction du nombre de bits de codage)

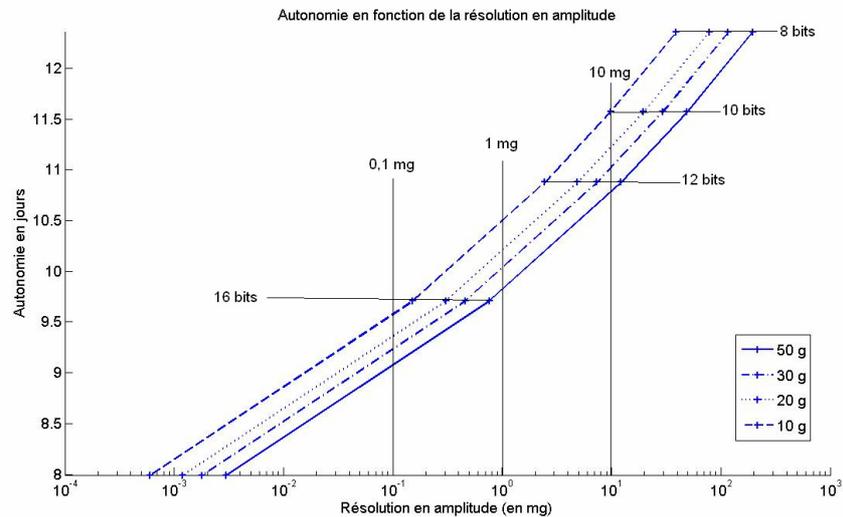


Figure 9 : Evolution de l'autonomie en fonction du logarithme de la résolution en amplitude

Comme le montre la figure 9, pour atteindre une résolution de 1 mg, dans les plages communes de vibration industrielle, il est plus que suffisant d'utiliser un convertisseur 16 bits. Par contre, 8 et 10 bits sont insuffisants pour obtenir une résolution suffisante.

On peut également constater que l'autonomie n'est que peu influencée par cette résolution vu qu'elle n'a d'influence que sur la transmission et pas sur le temps de mesure.

Comme on a pu le constater, les deux paramètres qui influencent le plus l'autonomie sont la fréquence de mesure et la résolution spectrale, cette dernière étant directement dépendante du temps de mesure.

Cet exemple permet de montrer que l'alimentation du système uniquement par batterie engendrera une autonomie de celui-ci relativement limitée (de l'ordre du mois). Ceci confirme bien l'intérêt de se tourner vers la récupération d'énergie, voire de coupler les deux solutions.

6.2 Etude du système d'alimentation par récupération d'énergie

Récupération d'énergie des vibrations

L'« energy harvesting » regroupe les différentes techniques de récupération d'énergie présentes dans l'environnement (vibrations, énergie solaire, différence de température,...).

L'objectif du projet est de permettre au capteur de fonctionner en intérieur ou extérieur. Nous ne pouvons dès lors pas miser sur la récupération de l'énergie solaire. En effet, la récupération à partir de la lumière émise par des tubes fluorescents n'est pas efficace (la densité de puissance est environ un millième de ce qui est récupéré à la lumière directe du soleil²).

Au point de vue de l'utilisation du principe thermoélectrique (effet Seebeck), les rendements des micro-générateurs actuels sont très faibles et la différence de température entre les deux substrats doit être importante (plusieurs dizaines de degrés pour obtenir des puissances fournies de quelques mW).

Comme la vibration est présente sur chaque machine instrumentée, le choix a été fait d'opter pour cette solution.

Il existe différentes manières de générer de l'énergie électrique à partir des vibrations (voir figure 10):

- Génération par effet Piézoélectrique (basée sur la polarisation d'un matériau piézoélectrique par flexion ou compression de celui-ci)
- Génération par effet Electrostatique (basée sur la variation de la capacité et la création d'une différence de potentiel)
- Génération par Induction électromagnétique (basée sur le mouvement d'une bobine dans un champ magnétique, c'est-à-dire la création d'un courant induit)

² Source : Calhoun, Daly, Cho, Chandrakasan, « Design considerations for Ultra-Low energy wireless microsensor nodes », IEEE transactions on computers, vol 54, n°6, juin 2005

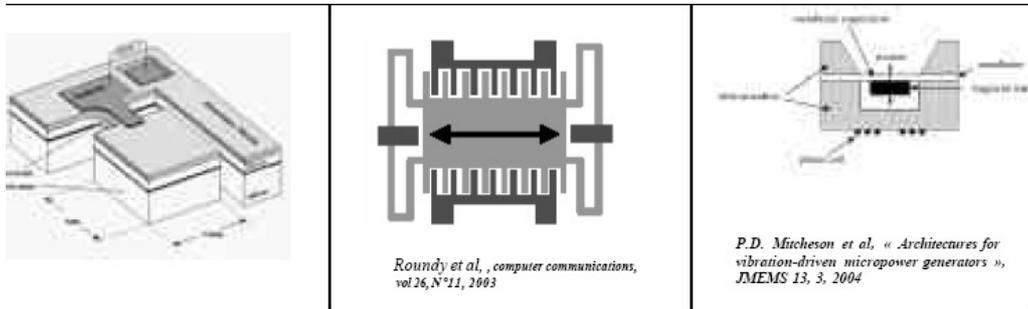


Figure 10 : Schéma de comparaison des différentes techniques, [8]

Induction électromagnétique

Ce type de générateur fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique. Le courant est généré par induction dans une bobine du fait de la variation du champ magnétique (due au mouvement d'un aimant permanent).

Comme on peut le voir sur la figure suivante, les aimants sont localisés à l'extrémité d'une poutre cantilever. Une masse additionnelle est ajoutée en plus des aimants afin que la masse vibrante génère le flux maximum à travers la bobine.

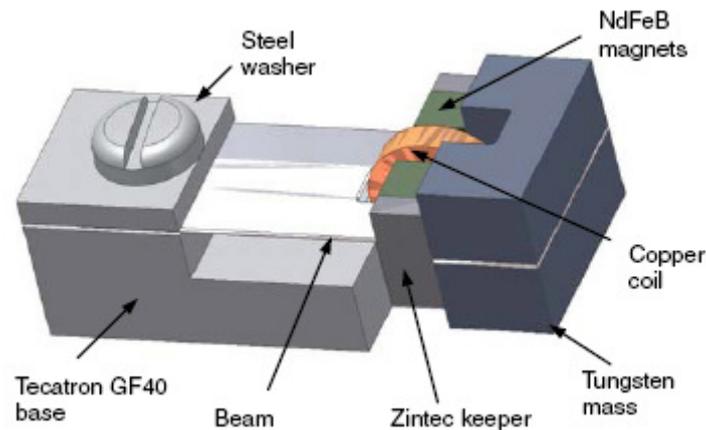


Figure 11 : schéma de principe d'un générateur électromagnétique [9]

La génération d'énergie est très dépendante de la fréquence de la vibration (voir figure 17). Celle-ci sera maximum pour la fréquence de résonance du système. On peut donc imaginer une amélioration du système en permettant

le réglage de la longueur de la poutre cantilever afin de pouvoir adapter le système à la fréquence précise de la machine (notamment sur les machines asynchrones).

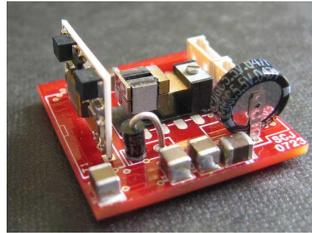


Figure 12 : Exemple de réalisation par l'université de Southampton

Effet piézoélectrique

Le générateur piézoélectrique utilise également une structure cantilever et une masse vibrante. Le matériau piézoélectrique est placé sur la surface supérieure de la poutre. La déformation de celle-ci due à la vibration engendre une déformation du matériau piézoélectrique qui génère alors une tension électrique.



Figure 13 : Exemple de générateur piézoélectrique [10]

Conversion électrostatique

Les structures de conversion électrostatique sont généralement composées d'une électrode fixe et d'une électrode mobile. La distance séparant au repos l'électrode fixe de l'électrode mobile est appelée distance d'entrefer. Ainsi, l'amplitude maximale de vibration admissible correspond à la valeur de l'entrefer au repos entre partie fixe et partie mobile.

L'énergie électrique récupérée au cours du déplacement de la partie mobile dépend de la variation de capacité créée lors de ce déplacement. La valeur

de la capacité est donc minimale au repos, et maximale lorsque l'amplitude du mouvement se rapproche de la valeur de la distance d'entrefer.

Si la vibration diffère fortement de la vibration pour laquelle la structure a été optimisée, la capacité variable et l'énergie emmagasinée peuvent devenir très faibles.

Le schéma ci-dessous présente un exemple de réalisation :

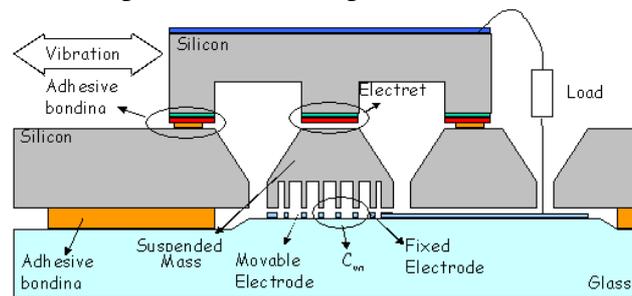


Figure 14 : Schéma de principe d'un générateur électrostatique [11]

L'électrode mobile est la masse suspendue. Ce type de générateur utilise un « electret », c'est-à-dire une source permanente de polarisation (formée par couches diélectriques qui capturent des charges à leur intersection). Ceci permet de ne pas utiliser une batterie pour créer la polarisation des électrodes.

Comparaison des trois types de conversion

La figure 15 présente les puissances produites (exprimées en mW) en fonction du volume du générateur ou de la fréquence de vibration pour différents prototypes existants.

A la vue des figures, il semble clair que la puissance produite augmente avec le volume et diminue avec la fréquence, ce qui est intéressant pour nos applications (vibrations à basse fréquence – 25 ou 50 Hz pour les machines classiques et encombrement disponible de l'ordre de la dizaine de cm³ pour le générateur).

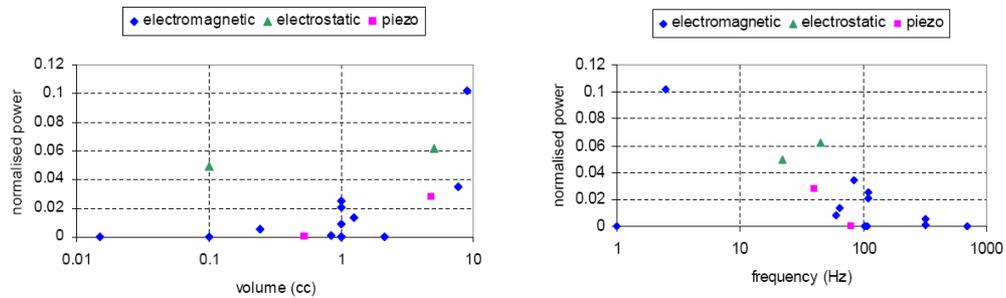


Figure 15: Comparaison des puissances produites (en mg) pour différents démonstrateurs en fonction du volume (à gauche) et de la fréquence de vibration (à droite) [12]

Pour un volume de 10 cm³, la puissance produite pourrait atteindre une valeur entre 10 et 100 μ W. Ces puissances sont insuffisantes pour l'alimentation de l'accéléromètre industriel classique.

Néanmoins, ces solutions ne sont à l'heure actuelle que des prototypes de laboratoire. Nous pouvons dès lors espérer leur amélioration vers des puissances plus importantes.

Solutions commerciales

Le tableau suivant présente 4 solutions commercialisées à l'heure actuelle. Le PMG17 de Perpetuum est basé sur le principe électromagnétique, le VEH-3 de Ferro sur une combinaison des techniques piézoélectrique et électromagnétique, le Volture et KCF sur un matériau piézoélectrique.

ENERGY HARVESTING COMPARISON			
PERPETUUM PMG17 Microgenerator	FERRO SOLUTIONS VEH360	MIDE Vulture	KCF Vibration Power Harvesting
			
Power output @ 60 Hz		Power output @ 120 Hz	
Acceleration	0,025 g 0,8 mW 0,1 g 3,5 mW 1 g 40 mW	Acceleration	24 g 43 mW 12 g 20 mW
Bandwith (deltaf = 2Hz)		Bandwith (deltaf = 3 Hz)	
Peak frequency	100 Hz	Peak frequency	de 50 Hz à 150 Hz
50% power delivered	+/- 1.5 Hz	50% power delivered +/- 1 Hz	
Dimensions		Dimensions	
Height	55 mm	Length	92 mm
Diameter	55 mm	Width	43 mm
Mass	700 g	Height	9,9 mm
Specific Power		Specific Power	
Acceleration	25 milli g 1,14 mW/kg 0,1 g 5 mW/kg 1 g 57,14 mW/kg	Acceleration	24 g 2,77 mW/kg 12 g 10,72 mW/kg 37,37 mW/kg

Figure 16 : Tableau comparatif des démonstrateurs commerciaux

Comme on peut le constater dans le tableau comparatif ci-dessus, la solution proposée par la société Volture nécessite une vibration d'intensité bien supérieure à celle des autres solutions pour fournir une puissance similaire. Malgré l'intérêt d'une faible masse et d'un encombrement limité, la gamme d'accélération est trop élevée par rapport au niveau moyen de vibration rencontré sur les machines industrielles.

La société FerroSolutions ne propose son module qu'à 60 Hz (basé sur la fréquence électrique américaine). Suite à un contact avec eux, il ne semble pas prévu de le produire en version européenne à 50 Hz pour le moment en tout cas.

Très peu d'informations sont disponibles sur le module de la société KCF. Néanmoins, les niveaux de puissance atteints à niveau de vibration égal sont plus faibles que les autres modules.

A priori, l'ensemble de ces modules pourraient fournir une solution très intéressante. Néanmoins, comme le montre la figure 17 (issue de mesures réalisées par Perpetuum), la puissance produite n'atteint des valeurs

importantes que pour une fréquence de vibration très proche de la fréquence de résonance du système, ce qui ne permet pas de répondre à une exigence d'adaptabilité à différents types et vitesses de machines.

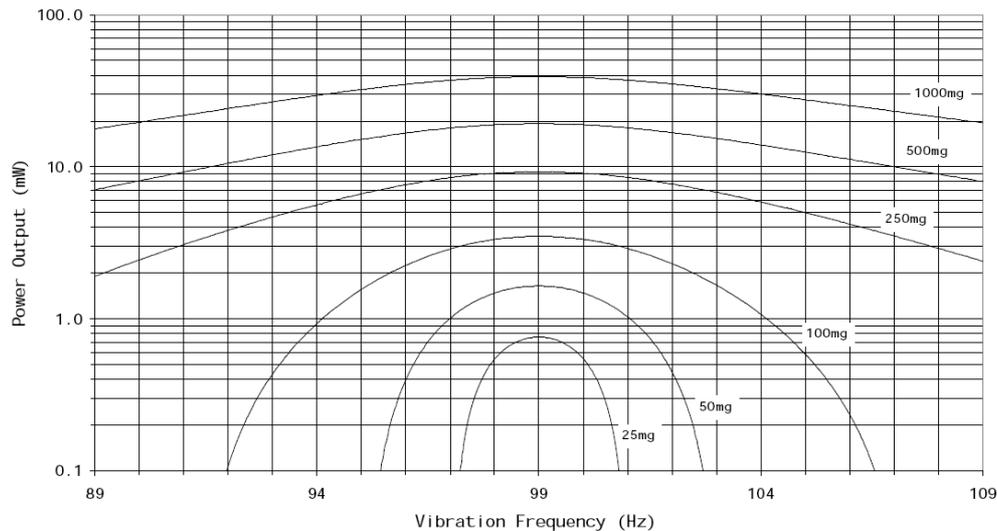


Figure 17 : Evolution de la puissance fournie en fonction de la fréquence de vibration pour un module optimisé à 100 Hz [13]

7. Conclusions

L'analyse des besoins et des technologies existantes a mené au choix du protocole 802.15.4 et de son extension Zigbee afin de permettre la mise en réseau organisé des capteurs.

La sélection du type de capteur et des techniques d' « energy harvesting » par la voie vibratoire est en cours de validation. On peut en effet avancer les éléments importants suivants.

Les structures sont conçues et optimisées pour un environnement bien défini en termes d'amplitude et de fréquence de vibration. Elles sont donc beaucoup moins efficaces pour des environnements dont les paramètres varient au cours du temps, ce qui correspond en fait à la plupart des environnements vibratoires industriels.

D'autre part, des solutions larges bandes de fréquence qui font l'objet de recherches actuellement (IMEC, LETI, MIT,...) pourraient également répondre à nos besoins. Des prototypes de laboratoire ont été présentés lors d'une présentation à l'IMEC. Ceux-ci sont pour l'instant dédiés spécifiquement à des applications de micro-capteurs mais les recherches s'élargissent également vers la gamme de puissance nécessaire à notre projet.

Par ailleurs, le cadre de ce projet sert actuellement de base à un travail réalisé par les étudiants de 2^e Master Sciences de l'Ingénieur industriel en électronique. L'objectif est de réaliser un prototype sur base d'un environnement de développement existant (AVRRAVEN de ATMEL ou Arduino), qui permettra le transfert à un pc de mesures vibratoires.

Le projet permettra aux étudiants de se familiariser avec le protocole IEEE802.15.4 et de réaliser une acquisition de données ainsi qu'une interface pc utilisateur. L'objectif sera également de tester les limitations en transmission et la création d'un petit réseau de quelques modules.

7. Bibliographie

- [1] Tableau d'allocation des fréquences, ERO (European Radiocommunications Office), www.efis.dk.
- [2] US Frequency Allocation Chart, NTIA (National Telecommunications and Information Administration),
<http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf>
- [3] Tableau d'allocation des fréquences, IBPT,
<http://www.ibpt.be/fr/217/ShowContent/1057/Table/Table.aspx>
- [4] Zigbee, www.zigbee.org
- [5] Datasheet capteur 100 mV/g, www.hansfordsensors.com
- [6] Support technique capteurs ICP®,
http://www.pcb.com/techsupport/tech_signal.php
- [7] J. G. Stockholm, Génération thermoélectrique, « *Energie portable : autonomie et intégration dans l'environnement humain* », Cachan – Journées Electrotechniques du Club EEA, 21-22 mars 2002.
- [8] ROSSI Carole, Etat de l'art LAAS-CNRS « *Les micro sources d'énergie et microsystèmes de gestion de l'énergie* ».
- [9] BEEBY S., TORAH R., etc, « *A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting* », Journal of Micromechanics and microengineering, 5 june 2007.
- [10] STAMOS, etc, (2008) Screen Printed Piezoelectric Generator for Helicopter Health and Usage Monitoring Systems. In: *The 8th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS 2008)*, 9-12th November 2008, Sendai, Japan.
- [11] <http://www.powermems.be/>
- [12] YEATMAN Eric, “*Motion energy Harvesting: myths and opportunities*”, Seminar at the Imperial College of London, Sept 2007.
- [13] www.Perpetuum.com, Datasheet, PMG17