

## Amorce d'une approche organique en phase projet de conception d'un système innovant

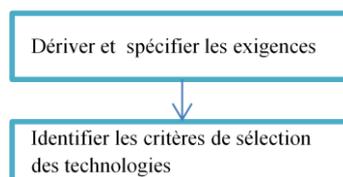
Maintenant qu'on a défini :

- Une architecture fonctionnelle (§4.2)
- L'ensemble des exigences des parties prenantes (§4.3.2)
- Les exigences dérivées des exigences des parties prenantes, qui constitue l'ensemble de la spécification des exigences, et dont on a souligné les exigences fonctionnelles en les regroupant par élément fonctionnel (§4.4.2)

On évoquera les différentes architectures organiques relatives aux architectures fonctionnelles citées dans le précédent chapitre qui répondent aux exigences fonctionnelles en dressant la liste des solutions que l'on a trouvées pour les verrous technologiques soulevés (§3.3.3).

### 5.1. Verrous technologiques et critères de sélection des technologies

Lors de la spécification d'exigence on a choisi un éventail restreint de technologies. On regardera quelles exigences n'était pas respectées par celles-ci (verrous technologique) et on tentera de les modifier en franchissant ainsi le gap technologique et en fournissant l'effort d'innovation requis pour réaliser un système viable.



Le but dans cette étape est de dresser la liste des verrous technologique, et ainsi de sélectionner les technologies les plus adéquates (dernière sélection) et de proposer des améliorations

#### 5.1.1. Verrous technologiques :

On rappelle les 4 grands verrous technologiques qu'on a identifié aux étapes précédentes en précisant pour chaque couche les problèmes qui risquent de se poser et ce qu'il est possible de faire pour lever ces verrous:

#### Robustesse et Fiabilité

- ✓ Couche Physique :
  - Modulation standard
  - Modulation rendue robuste en radio logicielle
- ✓ Couche MAC :
  - Réduire les collisions : Déterminisme
  - Eviter les perturbations : Multi-Canal
  - Eviter les pertes : accusé de réception et Retransmissions
- ✓ Couche Réseau :
  - Eviter les mauvais liens : Routage
  - Tolérer les défaillances des nœuds et des liens : Routage adaptatif

## Disponibilité fréquentielle et Compatibilité électromagnétique (annexe 8 : étude de la bande de fréquence)

- ✓ Couche MAC :
  - Eviter les fréquences brouillées ou déjà utilisées : Accès Multi-Canal
  - Cohabitation des différentes technologies utilisées

## Sécurité (annexe 9 : étude sécurité)

- Etudier les scénarios d'intrusions possibles

## Temps réel et Energie

- ✓ Couche MAC :
  - Assurer des bornes d'acheminement des messages : Déterminisme et Différenciation de services
  - Ordonner les périodes d'activité des nœuds : Duty Cycle, Réveil Forcé
- ✓ Couche Réseau :
  - Assurer des bornes d'acheminement des messages de bout en bout : Déterminisme et Différenciation de services
  - Construire des routes économes en énergie : Routage

### 5.1.2. Critères problématiques

Rappelons les différents types d'exigences vues au chapitre précédant et projetons celles-ci en termes de critères problématiques rencontrés

- Les exigences projet, générales, mémoires, matérielles, ne posent pas de réels problèmes technologiques elles ne rentreront donc pas dans notre classement
- Les exigences d'architecture physique entraînent des problématiques de déterminisme et de délai
- Les exigences de modes entraînent des problématiques de débit, de différenciation de service, et d'énergie,
- Les exigences de communication / protocole entraînent des problématiques de débit, de déterminisme, de délai, d'énergie, de tolérance aux pertes, et de différenciation de service
- Les exigences de liaison RF entraînent des problématiques de débit, de déterminisme, et de tolérance aux pertes
- Les exigences de gestion des pannes et maintenance entraînent des problématiques de délai, d'énergie, et de tolérance aux pertes
- Les exigences d'énergie entraînent des problématiques de débit, d'énergie, et de différenciation de service
- Les exigences d'interfaces du réseau entraînent des problématiques de tolérance aux pertes
- Les exigences de dimensions terminaux, routeurs et concentrateurs entraînent des problématiques de produit fini

- Les exigences de plateformes d'essais et environnement des démonstrateurs entraînent des problématiques des problématiques d'énergie, de tolérance aux pertes, et de produit fini

On peut alors reclasser les exigences par critères avec un angle de vision relatif aux verrous technologique comme suit :

- Débit : qui est l'unité mesurant la vitesse de transmission des données dans la voie de communication. Pour cette liaison numérique, il s'agit du nombre de bits transférés en un temps donné. Le débit s'exprime en kbps (kilobits par seconde).
- Déterminisme :
  - Le système étant dans l'état  $S_i$  et étant donné un événement  $E$ , on peut déterminer l'état suivant  $S_{i+1} = f(S_i, E)$
  - Les mécanismes retenus éviteront au niveau MAC les effets de la compétition (pas de tirage au sort) et au niveau de la couche physique les erreurs d'identification des événements (trame qualifiée correcte par son CRC devra l'être avec une très grande probabilité)
- Délai :
  - Délai de remise d'une information = durée écoulée entre : l'instant de demande d'émission de cette information par son producteur et l'instant de remise à son destinataire final dans le réseau considéré
  - Prend en compte le délai de transmission, la durée de propagation, la durée de séjour en file d'attente
- Energie : comme on l'a déjà signifié, développer un module d'alimentation pour notre système n'est pas une priorité. En revanche, la connaissance exacte des besoins en alimentations et leur optimisation sont des éléments qui nous intéressent et qui serviront d'entrée et d'état de l'art pour un projet complémentaire.
- Tolérance aux pertes et Robustesse : quantité d'information (nombre de bit) perdue tolérée. La perte d'information pendant la transmission dans notre cas peut être dues à des erreurs de routage, des congestions, à des connections intermittente dues aux différents obstacles de la structure.
- Différenciation de services :
  - Identifier dans le trafic soumis au réseau des classes de trafic contraintes par des exigences différentes
  - Traiter les trafics selon leur classe
- Produit Fini
  - Volume
  - Masse
  - Packaging
  - Maintenance

On obtient alors la grille de lecture suivante :

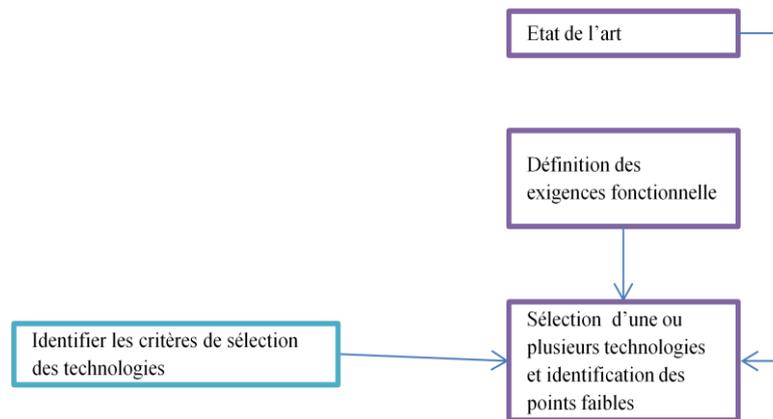
	Débit	Déterminisme	Délai	Energie	Tolérance aux pertes / Robustesse	Différenciation de services
Robustesse et Fiabilité	X	X			X	X
Disponibilité Fréquentielle et CEM	X					
Sécurité	X					
Temps réel et Energie	X	X	X	X		X

De nombreux autres critères importants du point de vue d'un produit fini ou de certaines problématiques strictement applicatives ne font pas partie des critères de sélection de notre architecture : Déploiement, Localisation, Maintenance, Masse, Encombrement pour des contraintes budgétaires et temporelles. Le respect de ces contraintes de premier ordre est fondamental et incontournable dans un projet. Le choix de faire passer tous les critères applicatifs en deuxième plan était relativement évident dans le sens où le niveau de qualification souhaité était TRL5.

On peut alors classer les critères de la façon suivante :

Critère primaire	Critères secondaire	Critères tertiaires
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Débit</li> <li>• Déterminisme</li> <li>• Différenciation de service</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Délai</li> <li>• Economie d'énergie</li> <li>• Tolérance aux pertes / Robustesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déploiement</li> <li>• Localisation</li> <li>• Exploitation</li> <li>• Maintenance</li> <li>• Masse</li> <li>• Encombrement</li> </ul>

## 5.2. Technologies finalement sélectionnées



Rappelons la liste des technologies envisagées au départ, disponibles sur le marché (état de l'art § 2.2.3.1)

- UWB
- Bluetooth
- WiFi Low Power
- ZigBee 802.15.4
- WiFi
- ISA100
- Wireless Hart
- WiDom

Les 4 dernières technologies (Wifi, ISA 100, Wireless Hart et WiDom) ont été éliminées lors du premier tri en § 2.2.4.1. En effet Wifi n'est pas envisageable à cause de la combinaison de trois facteurs que sont sa consommation d'énergie (beaucoup trop importante), la difficulté que l'on rencontrera à protéger le réseau (pas assez sécurisable) et les perturbations que pourront représenter les solutions d'*infotainment* (émission dans la même bande de fréquence que Wifi). En ce qui concerne le Wireless Hart, cette solution est trop rigide pour être modifiée et n'est viable que pour des applications de contrôle commande. Pour ce qui est du WiDom, le fait que cette technologie ne s'appuie pas sur un standard risque d'être problématique pour la pérennité de notre solution. Pour finir ISA 100 n'a pas d'implémentation commerciale connue et n'est pas assez mature pour l'envisager sérieusement.

Il reste donc UWB, ULP, Wifi Low power et ZigBee 802.15.4.

### 5.2.1. UWB

L'avènement de la technologie Ultra Large Bande (UWB pour Ultra Wide Band en anglais) vient compléter l'offre actuelle en moyens de communication à courte portée tels que WiFi, Bluetooth, ZigBee.

Ceci est prévu comme une option de la spécification du standard IEEE 802.15.4-2011 pour la couche physique avec l'utilisation de 4 canaux de 3.1 GHz à 4.84 GHz et de 11 canaux de 6.0 GHz à 10.6 GHz. Le débit brut associé est élevé mais fortement variable selon les conditions d'utilisation.

Nous pouvons recenser les limitations suivantes de cette technologie pour notre système:

- Problèmes de disponibilité du matériel et de la spécification, d'accès aux couches basses, de déterminisme, ...
- Problèmes de compatibilité fréquentielle vis-à-vis des exigences aéronef et de design de l'antenne pour des bandes de fréquences élevées.

### 5.2.2. Ultra Low Power Bluetooth

**Bluetooth** est défini comme une technologie de transmission sans fil à courte portée et à faible débit. ULP (Ultra Low Power) Bluetooth résulte de l'intégration des composants à faible consommation supportant un sous ensemble de fonctionnalités Bluetooth.

Il est caractérisé par :

- Une technologie en étoile
- Un nombre de nœuds en fonction de l'implémentation, 7 dans un piconet
- Des sauts de fréquence qui permettent de ne pas rester sur les fréquences brouillées, mais qui n'évitent pas les pertes et restent chers en énergie
- Comparé au 802.15.4, le Bluetooth ULP à une portée radio plus faible mais un plus grand débit.

### 5.2.3. WiFi Low Power

Le WiFi Low Power, noté WLP, permet de supporter un débit plus élevé que 802.15.4. Un débit brut est de 1 à 2 Mb/s

Pour le projet on rencontrera des problèmes de disponibilité du matériel, de spécification, d'accès aux couches basses et de déterminisme

### 5.2.4. 802.15.4

Le Débit brut est limité à 250 kbit/s au niveau physique pour les technologies classiques et éprouvées basées sur la couche physique 2450 DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). La nouvelle spécification du standard 802.15.4 publiée en 2011 définit en option la couche physique 2450 CSS (*Chip Spread Spectrum*). Elle permet d'atteindre un débit de 1Mb/s mais cette technologie n'a que très peu de fournisseurs et en conséquence n'est pas éprouvée.

#### 5.2.4.1. Evaluation du débit demandé par un capteur dans les conditions les plus favorables :

- Absence de perte et délai de propagation nul
- Agrégation à la source: envoi d'une trame tous les  $e$  échantillons avec paquets au niveau MAC.
- En supposant un accès déterministe, tous les capteurs sur ce canal étant sollicités à tour de rôle pour une durée

$$t_{slot} \geq t_{trans} + t_{back} + t_{ack}, \text{ (eq 1)}$$

Avec temps de retournement  $t_{back}=0.2$  ms et temps d'acquiescement  $t_{ack}=0.3$  ms

- **Exemple:**

- 10 kéchantillons/s  $\Rightarrow t_{sample}=0.1$ ms, 1 échantillon sur 1 octet

En 802.15.4 la trame comprend 8  $e$  bits utiles + 88 bits d'overhead MAC (soit 11 octets se répartissant comme suit : 2 octets Frame Control, 1 octet Sequence Number, 2 octets Pan id, 4 octets @ source et @destination , 2 octets FCS).

Dans 802.15.4, la taille de la trame max à envoyer par la couche physique est 133 octets soit : 116 octets de charges utile, 11 octets d'overhead MAC et 6 octets d'overhead Physique.

- Soit  $t_{trans}$  le temps nécessaire à l'émission de la trame de taille maximum à partir du moment où le 1er bit est émis.

$$t_{trans} = (133 * 8) / 250 \text{ ms} = 4,256 \text{ ms}$$

- Soit  $c$  le nb de capteurs connectés au même canal.

La trame de 8  $e$  bits générée par un capteur donné est émise tous les  $c t_{slot}$  unités de temps. Pour que le réseau écoule le trafic soumis, il faut

$$c t_{slot} \leq e t_{sample} \quad \text{(eq 2)}$$

- Soit  $d_{max}$  le temps max de vieillissement d'un échantillon, en supposant que la paquets est faite au niveau MAC.

$$c t_{slot} \leq d_{max} \quad \text{(eq 3)}$$

Trame agrégée compatible avec taille max utile de la trame 802.15.4 au niveau MAC

$$8e + (11 \cdot 8) \leq l_{max} \text{ avec } l_{max} = 127 \text{ octets} \quad (\text{eq 4})$$

Avec 802.15.4, la taille maximum utile est de 127 octets soit  $l_{max} = 1016$  bits.

On obtient  $e = 116$  échantillons max par trame.

→ On a alors  $t_{trans} = 4.256$  ms.

Prenons  $t_{slot} = 4.8$  ms  $> 4.756$  ms =  $t_{trame} + t_{back} + t_{ack}$ .

Pour pouvoir écouler la charge soumise et donc satisfaire l'équation 2, on ne peut gérer que deux capteurs par canal.

Si par ailleurs, le délai maximum de vieillissement est petit, l'équation 3 devient alors contraignante et c'est elle qui détermine le nombre maximum de capteurs supportés sur un canal. Au niveau recherche, nous étudierons une architecture permettant si possible de lever ce verrou.

### 5.2.4.2. Spécifications des fréquences et débits pour 802.15.4

Le tableau récapitule les spécifications en ce qui concerne les fréquences, le débit et les techniques de modulation pour le standard IEEE 802.15.4 de la version 2011.

Couche physique (Mhz)	Bande de fréquences (Mhz)	Paramètres de propagation		Paramètres de données		
		Débit de chips (kchips/s)	Modulation	débit en bits (kb/s)	Débit en symbols (ksymbol/s)	symbols
780	779-787	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
780	779-787	1000	MPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
868/915	868-868.6	300	DSSS + BPSK	20 kb/s	20	Binary
		400 (optionnel)	DSSS + O-QPSK	100 kb/s	25	16-ary orthogonal
		400 (optionnel)	PSSS + BPSK et ASK (Amplitude Shift Keying)	250 kb/s	12.5	20 bit PSSS
	902-928	600	BPSK	40 kb/s	40	Binary
		1000	DSSS + O-QPSK	250 kb/s	62.5	16-ary orthogonal
		1600	PSSS + BPSK et ASK (Amplitude Shift Keying)	250 kb/s	50	5- bit PSSS
950	950-956	---	GFSK	100	100	Binary
950	950-956	300	BPSK	100	100	Binary
2450 (DSSS)	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250 kb/s	62.5	16 ary orthogonal
UWB sub gigahertz (optional)	250-750					
2450 CSS Chirp Spread Spectrum (optional)	2400-2483.5		DQPSK avec CSS	250kb/s	62.5	8-ary
				1Mb/s	166.667	16-ary bi-orthogonal
UWB low band (optionnel)	3244-4742	Condition d'environnement (température) pour l'usage de la UWB.				
UWB high band (optionnelle)	5944-10234	Condition d'environnement (température) pour l'usage de la UWB.				

### 5.2.5. Comparaison des différentes technologies

Fort des critères problématiques primaires §5.1.2, comparons les quatre technologies finalistes afin d'affiner notre choix:

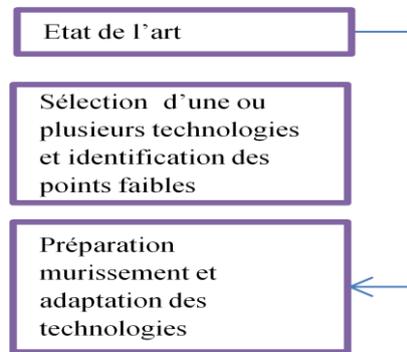
	Débit	Consommation énergétique	Portée	Déterminisme
802.15.4	250 kb/s	20 mW– 40 mW	< 30m	-Oui en mono saut. -Extension possible en multi sauts.
Wifi Low Power	921,6 kb/s	Rx :85 mA Tx : 154 mA	50-70M Indoor	NON
<b>Wifi Low Power IEEE</b> 802.11 b/g RN-XV	Plus de 1 Mb/s jusqu'à 54 Mb/s	Rx: 35 mA Tx: 120 mA Sleep: 4 $\mu$ A	200m (outdoor)	NON
UWB	1 Mb/s 27Mb/s (802.15.4a)		<30m	NON
ULP Bluetooth	1 Mb/s	Tx : 24 mA Rx : 19.6 mA	<10 m	Oui en mono saut

RN\_XV (802.11b/g)

Puissance de sortie	Consommation 802.11 b (2Mbps)	Consommation 802.11g(24Mbps)
0	120 mA	135 mA
2	130 mA	150 mA
4	170 mA	190 mA
6	175 mA	200 mA
8	180 mA	210 mA

### 5.3. Préparation et adaptation des protocoles sélectionnés :

D'après l'étude comparative ci-dessus, déduite des résultats obtenus jusqu'ici, on a choisi d'investiguer et de modifier deux protocoles (répondant au maximum d'exigences et satisfaisant au mieux les critères problématiques soulignés) : le 802.15.4 pour les applications dynamiques et le 802.11 Low power pour les applications statiques :



Voici les objectifs d'amélioration possibles pour chaque technologie envisagée :

#### 5.3.1. 802.15.4

Technologie	Topologie	Objectif d'Amélioration	Moyen Innovant Investigué	Conséquences sur Matériel	
802.15.4	Module	Antenne			
		Multi-interface			
		Modulation	Robustification de la modulation	Modulation robuste***	
	Etoile	Débit	Accès au Médium Multi-canal		(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (2) ... et rendre la méthode d'accès multi-canaux
			Concentrateur multi-interfaces homogènes (*) (indispensable)		(3) Conception module intégrant plusieurs interfaces
		Déterminisme	Accès au médium déterministe en mono-saut		(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut
		Robustesse aux perturbations	Accès au Médium Multi-canal		(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (2) rendre la méthode d'accès multi-canaux
			Sélection des meilleurs canaux à utiliser		(5) Indication du canal utilisé par pilotage de la couche MAC

	Ilot	Consommation d'énergie	Ordonnancement des périodes d'activité et d'inactivité	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut
		Débit	Accès au Médium Multi-canal	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (2) rendre la méthode d'accès multi-canaux (6) ... et synchroniser les nœuds en multi-sauts
			Concentrateur multi-interfaces homogènes	(3) Conception module intégrant plusieurs interfaces
		Déterminisme	Accès au médium déterministe en multi-sauts et mono-saut	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (6)
		Robustesse aux perturbations	Accès au Médium Multi-canal	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (2) rendre la méthode d'accès multi-canaux
			Sélection des canaux utilisés	(5) Indication du canal utilisé par pilotage de la couche MAC
		Consommation d'énergie	Ordonnancement des périodes d'activité et d'inactivité	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (6) synchroniser les nœuds en multi-sauts

### 5.3.2. 802.11 Low Power

Technologie	Topologie	Objectif d'Amélioration	Moyen Innovant Investigué	Conséquences sur Matériel
802.11 Low Power	Module	Antenne		
		Multi-interface		
		Modulation	Robustification de la modulation	Modulation robuste***
	Etoile	Déterminisme	Accès au médium déterministe en mono-saut	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut
		Robustesse aux perturbations	Accès au Médium Multi-canal (**)	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès et (2) rendre la méthode d'accès multicanaux
			Sélection des canaux utilisés (**)	(5) Indication du canal utilisé par pilotage de la couche MAC
		Consommation d'énergie	Ordonnancement des périodes d'activité et d'inactivité	(1) Possibilité d'accès aux couches basses pour modifier la méthode d'accès (4) ... et synchroniser les nœuds à 1 saut
	Ilot	Au vu du débit et de la portée radio offerts par la technologie, on limite l'étude du WiFi à une étoile pour le démonstrateur		

(\*) Homogène : de la même technologie

(\*\*) Si les deux technologies cohabitent il est peu pensable de tirer bénéfice de l'usage du multi-canal au niveau 802.11.

(\*\*\*) Identification d'une modulation robuste permettant la coexistence du WIFI Low Power et le IEEE 802.15.4

## 5.4. Amélioration du débit (critère majeure identifié)

Deux technologies ont été sélectionnées pour répondre à notre besoin et seront implémentées sur SAHARA mais celles-ci devront être modifiées. On exposera ici les améliorations possibles sur le débit puisqu'il a été identifié comme critères problématique primaire.

Nous citons ci-dessous différentes techniques permettant d'améliorer le débit et de réduire l'*overhead* (l'enveloppe de l'information utile aux applications) des protocoles de communication. Cependant, il faut s'assurer du respect des autres critères importants dans la conception de l'architecture du réseau tels que le délai, la consommation en énergie...

### 5.4.1. Agrégation

Les techniques d'agrégation sont des techniques visant à réduire l'*overhead* résultant des protocoles de communication.

#### 5.4.1.1. Agrégation à la source

**Agrégation temporelle des échantillons pour un capteur:** les échantillons étant codés sur 1 ou 2 octets, il est possible de concaténer plusieurs échantillons dans une même charge utile de paquet (*payload*).

**Estimation du nombre maximum d'échantillons agrégeable :** environ 100 échantillons/paquet 802.15.4. Cette estimation résulte de la contrainte imposée par la taille maximum des données utilisateur (*payload*) dans une trame 802.15.4 et la taille d'un échantillon, supposée égale à un octet. (Voir équation 4 en section 5.2.4.1)

#### 5.4.1.2. Agrégation sur un nœud intermédiaire

**Agrégation multi-sources:** Les sources  $S_1, \dots, S_N$  émettent chacune un échantillon de taille  $M$  octets. Le nœud  $A$  est un agrégateur.

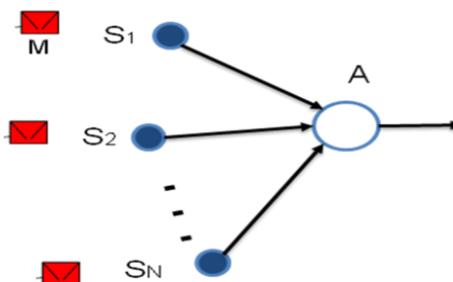


Figure 34 : Agrégation sur nœud intermédiaire

**Estimation du nombre maximum d'échantillons agrégeables :** la taille des échantillons agrégés doit être inférieure à la taille maximum de la *payload* d'une trame. Le nombre d'échantillons agrégés peut varier d'une source à l'autre.

## 5.4.2. Compression sans pertes

### 5.4.2.1. Compression à la source

L'intérêt du codage à la source consiste à transformer une suite de données (ou de bits) en une suite plus courte. Cette opération de codage utilise des algorithmes particuliers pour rendre la représentation compressée plus courte que la représentation d'origine.

### 5.4.2.2. Compression dans le réseau

Plusieurs algorithmes de compression sans pertes ont été proposés afin de réduire la quantité des données qui doivent être transmises à travers le réseau.

Exemple de technique : *Coding by ordering*

Les données de plusieurs capteurs sont combinées par un nœud de compression. Certaines données sont supprimées. Cependant, les données abandonnées peuvent être calculées à partir de l'ordre de codage des données incluses.

Exemple : On a 4 nœuds dont les identifiants sont : N1, N2, N3 et N4 qui envoient leurs données vers un agrégateur de données « A ». Chacun des 4 nœuds génère une donnée dont la valeur appartient à l'ensemble  $\{0..5\}$ . L'agrégateur « A » peut décider de supprimer le paquet du nœud N4 et choisit un ordre approprié des paquets des nœuds N1, N2 et N3 pour indiquer la valeur générée par le nœud N4. Le tableau montre un « mapping » possible des permutations des 3 identifiants vers des entiers entre 0 et 5.

ordre des paquets dans le message	Valeur
N1 N2 N3	0
N1 N3 N2	1
N2 N1 N3	2
N2 N3 N1	3
N3 N1 N2	4
N3 N2 N1	5

Ainsi, on peut remplacer la donnée du paquet de N4 en utilisant une des permutations données dans le tableau.

*Remarque* : Dans cette technique, on considère que l'ordre des paquets pour l'application n'est pas important.

### 5.4.3. Multi-interfaces

#### 5.4.3.1. Multi-interfaces mono-technologie

Il s'agit d'équiper un nœud avec un certain nombre d'interfaces physiques de la même technologie et de faire travailler ces interfaces en parallèle. Cela permet d'augmenter le débit offert par cette technologie au niveau du réseau.

Exemple pour la technologie 802.15.4 :

- Une interface 802.15.4 = 250 kb/s au niveau physique.
- Deux interfaces 802.15.4 parallélisées < 500 kb/s.

##### 5.4.3.1.1. Multi-interfaces multi-technologies

Il s'agit d'équiper un nœud avec un certain nombre d'interfaces physiques de technologies différentes. Du point de vue débit, cela permet de passer d'une technologie « bas débit et courte portée » vers une autre technologie « haut débit et moyenne portée ». Du point de vue délai, on minimise le nombre de sauts en raison de la portée radio de la technologie « haut débit ».

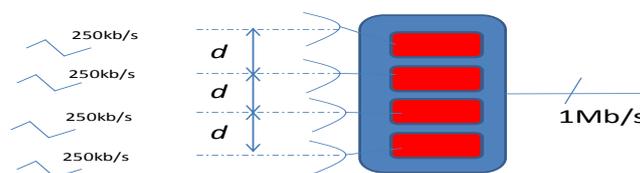
##### 5.4.3.1.2. Problématique des nœuds multi-interfaces

Le problème majeur des nœuds radio multi-interfaces est causé par les interférences des interfaces multiples du nœud.

##### 5.4.3.1.3. Multi-interfaces mono ou bi-technologies

**Interférence entre émission et réception simultanées sur deux interfaces d'un même nœud radio** : difficulté de réalisation du design des cartes au niveau CEM en raison du différentiel de puissance de signal entre la réception et la transmission simultanées.

Le problème est le suivant : peut-on estimer la distance minimum (voir schéma ci-dessous) entre les interfaces d'un nœud radio multi-interfaces afin d'éviter une dégradation des communications radiofréquences qui serait liée aux interférences mutuelles ?



**Figure 35 : Nœud radio multi-interfaces**

Le nœud radio multi-interfaces dispose de plusieurs interfaces, par exemple 4 sur la Figure 35, chaque interface opère sur un canal. Le nœud radio travaille en parallèle sur les 4 canaux à la fois, mais ne fait pas forcément la même chose sur tous les canaux : ex.: en réception sur canal 1 et en émission sur canal 2.

**Objectif visé** : multiplier le débit par 4 => pour obtenir 1Mb/s, les 4 interfaces du nœud radio multi-interfaces travaillent en parallèle sur 4 canaux différents, chaque canal a un débit de 250kb/s

Exemple de combinaison possible :

Le nœud multi-interfaces transmet ou reçoit sur canal 1,  
tout en transmettant ou recevant sur canal 2,  
tout en transmettant ou recevant sur canal 3,  
et tout en transmettant ou recevant sur canal 4.

Evaluation de la distance minimum  $d$  :

En se basant sur des études qui ont porté sur la coexistence RF 802.11 et 802.15.4 on considère un brouilleur Zigbee qui interfère sur une communication entre nœuds Zigbee. Afin de limiter la puissance du brouilleur à -26dbm (0.05 mw), ce dernier doit être placé à une distance  $d$  minimum de l'ordre de quelques dizaines de centimètre. Dans la problématique qui est la nôtre nous considérons 3 brouilleurs ; sous réserve de vérifications ultérieures, la distance  $d$  minimum est encore plus grande et donc de l'ordre de quelques dizaines de centimètres.

Remarques à propos des solutions proposées pour satisfaire les contraintes de débit :

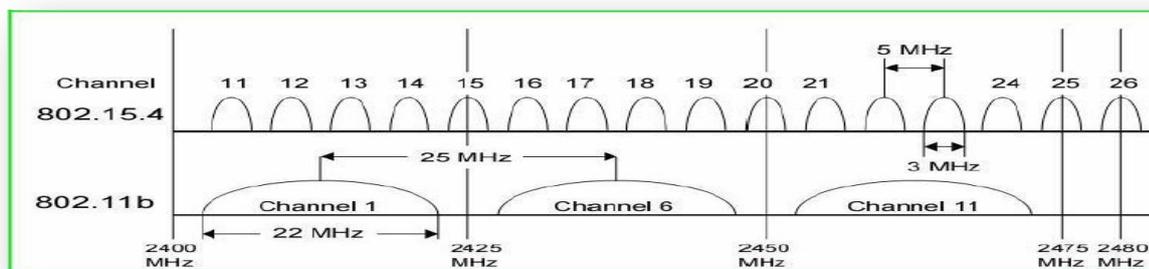
Cette solution met en avant des débits, qui sont des débits théoriques du IEEE 802.15.4 qui ne sont jamais atteints en pratique.

Pour diminuer la distance  $d$  , il serait nécessaire d'utiliser des canaux IEEE 802.15.4 suffisamment éloignés pour ne pas interférer entre eux. Le nombre de canaux d'écart à respecter dépend de la qualité du transceiver utilisé. En pratique, sur les 16 canaux du IEEE 802.15.4 dans la bande du 2.4 GHz seuls 5 à 7 canaux maximum pourraient probablement être utilisés sur un nœud radio multi-interfaces.

Une évaluation des distances  $d$  de la Figure 35 peut être envisagée, mais elle pose la question de la pertinence des résultats que nous obtiendrons vis à vis de l'environnement réel dans lequel seront placés les capteurs.

#### 5.4.3.1.4. Multi-interfaces mono bi-technologies

**Coexistence fréquentielle de technologies différentes:** la Figure 36 illustre un exemple de coexistence fréquentielle 802.15.4 /802.11 Amérique du Nord : nous avons seulement 4 canaux 802.15.4 qui ne sont pas brouillés par une activité WiFi cohérente (i.e. sur des canaux sans recouvrement comme indiqué dans la Figure 36 pour 802.11b).



**Figure 36 : Spectre fréquentiel des technologies 802.11 Amérique du Nord**

La Figure 36 varie légèrement selon qu'il s'agisse des bandes de fréquences utilisables en Europe ou celles en Amériques du Nord, cette remarque ne change pas la nature du problème.

#### 5.4.4. Techniques de modulation

Pour améliorer le débit au niveau de la couche physique, on peut avoir recours à différentes techniques de modulation.

##### 5.4.4.1. Changement en ligne de technique de modulation

Le changement en ligne de technique de modulation permet d'augmenter le débit en s'adaptant aux types de bruit en diminuant le BER (Bit Error Rate). Ainsi, il est possible d'augmenter le nombre de bits par symbole. Ceci peut nécessiter le recours à la radio logicielle.

La radio logicielle, notée SDR pour Software Defined Radio, est composée d'un matériel de réception du signal radio fréquence pilotée par une plate-forme logicielle. L'objectif consiste à utiliser des composants logiciels à la place du matériel pour le traitement du signal.

Ce système est composé principalement d'un ordinateur/ordinateur embarqué exécutant la plate-forme logicielle, d'une sortie radio fréquence RF et d'un convertisseur analogique/numérique ADC (et/ou d'un convertisseur numérique/analogique DAC). Une radio logicielle est meilleure si les convertisseurs ADC et DAC sont les plus proches de l'antenne radio. Ce qui permet de grandes possibilités de traitement du flux numérique au niveau logiciel. La plate-forme logicielle permet de définir un traitement spécifique au flux numérique entrant et sortant des convertisseurs. La Figure 37 montre une architecture générale d'une radio logicielle.

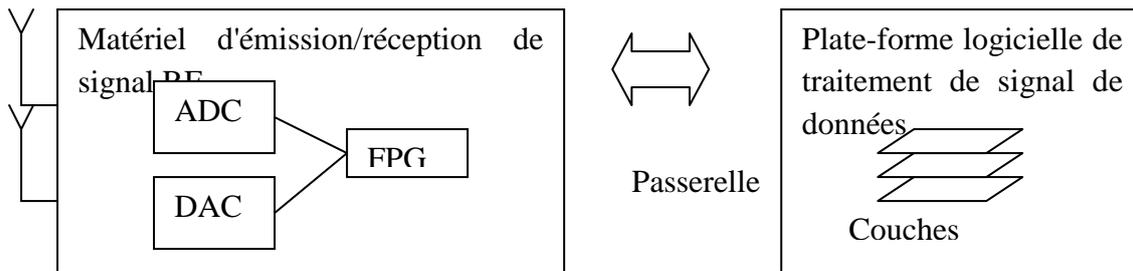


Figure 37 : Architecture générale d'une radio logicielle

#### 5.4.4.1.1. Avantage :

- **L'avantage majeur de la radio logicielle est la flexibilité, la multifonctionnalité** et le coût bas des développements. La reconfigurabilité de la plate forme assure une réutilisabilité du matériel. Ceci minimise la complexité de conception des terminaux RF. Les performances d'une SDR peuvent être améliorées par l'usage d'un simple FPGA qui est programmable pour plusieurs applications, ce qui réduit la taille, le coût et le temps du développement.
- Les spécifications des standards des couches basses sont principalement mises en œuvre en matériel, avec la radio logicielle il est possible d'implémenter, modifier et adapter ces spécifications en logiciel.
- Adaptation de la transmission sans fil au contexte par un changement de modulation. Une modulation avec moins de niveaux permet un Bit Error Rate (BER) faible, mais au détriment du débit.
- Possibilité d'un accès dynamique au spectre dans le cas de pénurie de fréquence ce qui répond au problème de coexistence fréquentielle de technologies différentes.

#### 5.4.4.1.2. Inconvénients

- Dans l'état actuel, la technologie radio logicielle ne permet pas de respecter les exigences d'encombrement du projet SAHARA mais reste une perspective intéressante pour valider des choix technologiques.

#### 5.4.4.2. Étalement de spectre

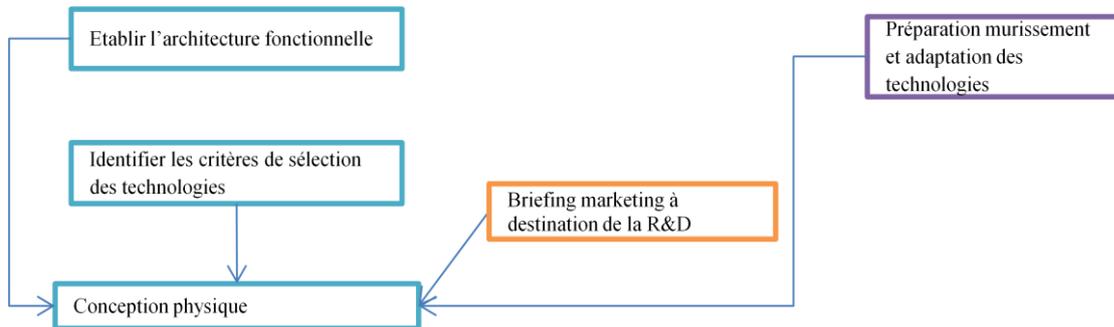
L'usage de technique **d'étalement de spectre** spécifique. Augmentation du débit dans les nouvelles spécifications du standard IEEE 802.15.4 publié en 2011 par l'usage de la CSS (Chirp Spread Spectrum) avec une modulation DQPK. Le débit peut être amené à 1Mb/s dans la bande de fréquence 2400MHz.

Nous pouvons également mentionner l'utilisation de l'Ultra Wide Band (UWB) pour augmenter le débit sans le recours aux multi-interfaces. UWB présente l'avantage de permettre une localisation fine <50 cm.

**Réserves :** UWB est une perspective au-delà du projet

## 5.5. Approche organique en phase projet

Conception physique (ou technique)



### 5.5.1. Architecture générique

#### 5.5.1.1. Les composants

##### 5.5.1.1.1. Terminal mono-interface:

Un terminal est un module radio (satellite autonome) qui peut être 802.15.4 ou Wifi Low Power. Il est connecté à un ou plusieurs capteurs (de pression, température, manomètre, etc.). Son rôle est de transmettre les informations capturées de son environnement vers d'autres modules.

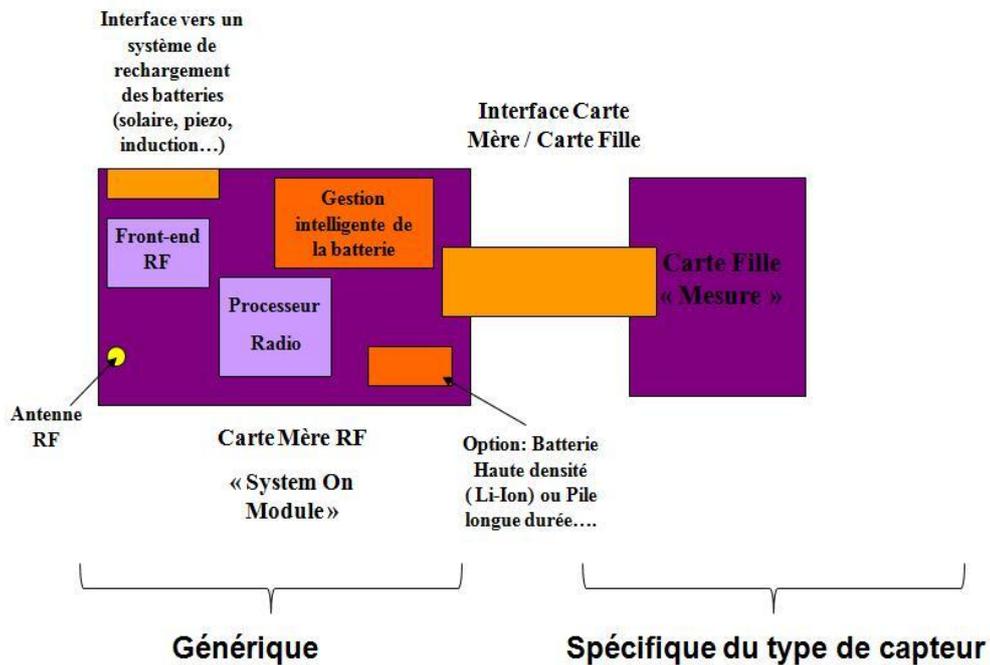


Figure 38 : Architecture modulaire proposée pour un terminal

L'architecture modulaire proposée pour un terminal est composée de 2 cartes : une carte « Fille » qui joue le rôle du « sensor » et une carte « Mère ». Cette dernière est composée du Front-end RF, du Processeur Radio, d'un microcontrôleur et de la batterie.

Cette architecture a pour avantage de conserver la généricité de la carte mère sur laquelle on peut connecter une grande variété de cartes filles. Ces cartes filles sont spécifiques du type de capteur (température, pression, ...)

#### 5.5.1.1.2. Routeur / Concentrateur

Un Routeur a pour rôle d'acheminer les informations reçues de terminaux ou d'autres routeurs vers une entité de collecte de données appelée concentrateur. Un Routeur ne dispose pas de raccord avec le système hôte.

Le Concentrateur est un nœud du réseau sans fil qui est connecté au réseau filaire de l'aéronef. Par conséquent, il n'y a pas de contrainte de consommation d'énergie, de calcul et de mémoire. Les fonctions du Concentrateur en se référant aux spécifications des utilisateurs finaux sont :

- Concentration des données capturées par les terminaux capteurs.
- Contrôler la communication des capteurs à travers des ordres.

Un Routeur/Concentrateur peut être :

- **Mono-interface:** Il peut être 802.15.4 ou Wifi Low Power.
- **Multi-interfaces mono-technologie :** plusieurs interfaces 802.15.4 comme illustré sur la Figure 38.

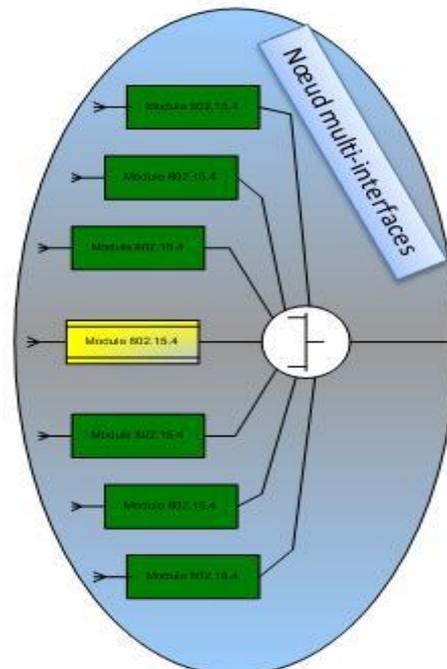


Figure 39 : Exemple d'architecture d'un module radio multi-interfaces

L'architecture de la Figure 39 présente un module radio composé de plusieurs interfaces 802.15.4 dont l'une peut être réservée au pilotage de la communication avec d'autres modules radio distants et ses propres interfaces (exemple : appariement sur un canal donné)

- **Multi-interfaces bi-technologies** : Une ou plusieurs interfaces 802.15.4 / une seule interface Wifi Low Power ou éventuellement plusieurs.

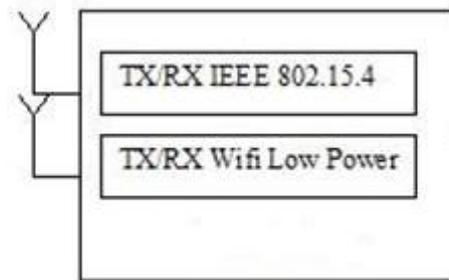


Figure 40: Module bi-technologies

- **Mono-interface bi-technologies** : la radio logicielle permet de basculer entre les deux technologies Wifi Low Power et IEEE 802.15.4 selon les besoins sur une même interface.

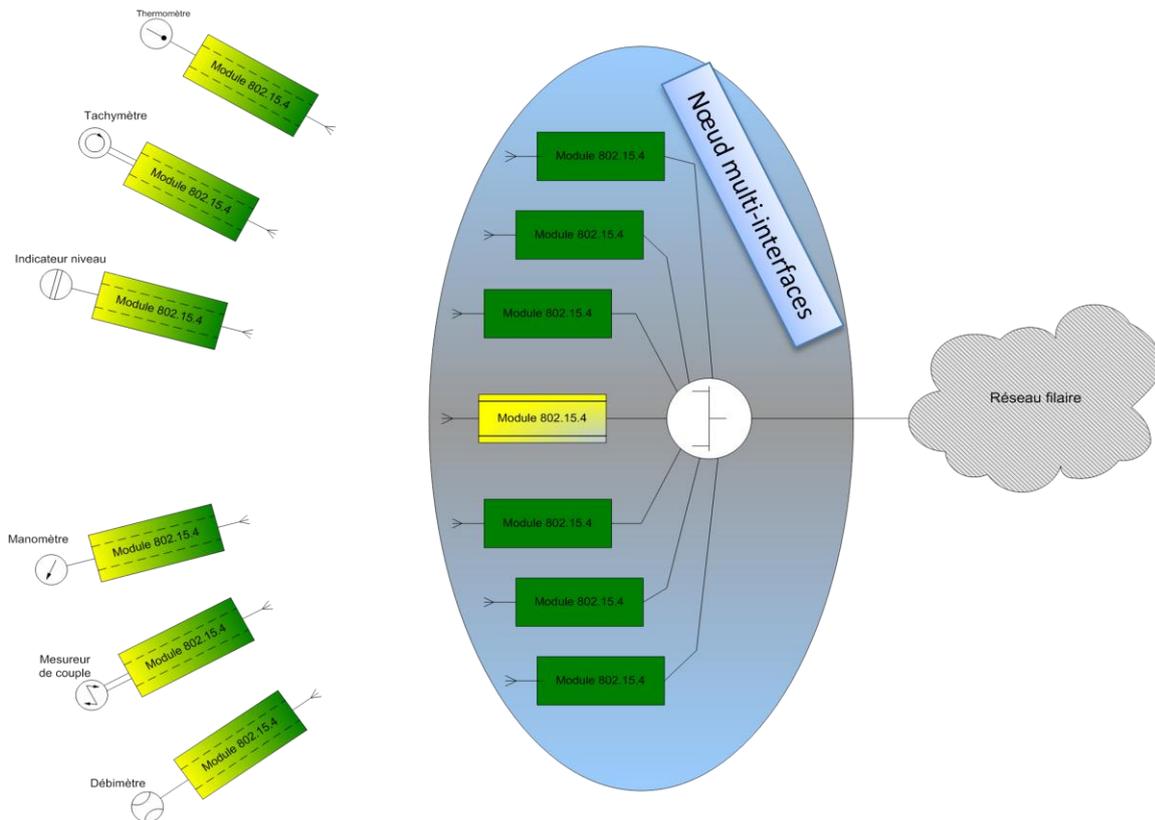
### 5.5.1.2. L'étoile

#### 5.5.1.2.1. Etoile Wifi Low Power

L'ensemble des nœuds est mono-interface. Dans cette architecture subsiste la difficulté d'assurer le déterminisme si les couches basses de la technologie ne peuvent pas être modifiées.

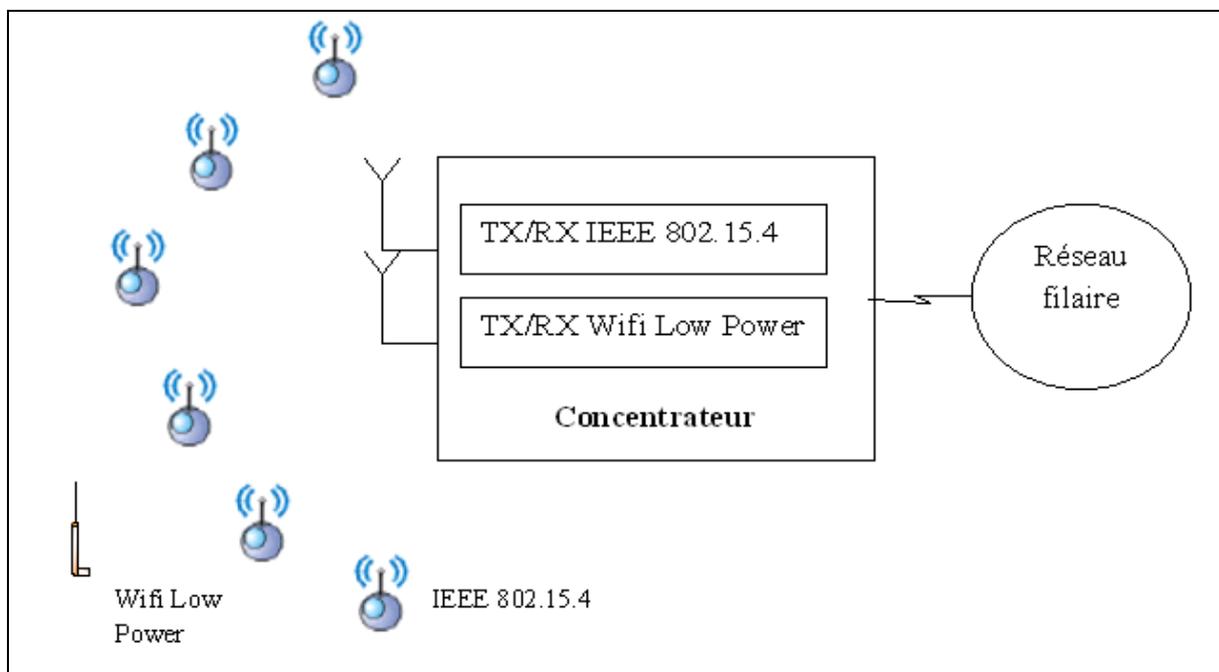
#### 5.5.1.2.2. Etoile Multi-interfaces 802.15.4

Les nœuds terminaux ont une seule interface 802.15.4 et le coordinateur d'étoile est multi-interfaces.



**Figure 41 : Etoile multi-interfaces 802.15.4**

Chaque terminal communique avec une interface du module multi interfaces qui joue le rôle de concentrateur, sur un canal défini par le protocole de communication.



**Figure 42 : Etoile en radio logicielle**

Il est possible d'avoir une plate forme radio logicielle avec un usage adaptatif d'une couche physique spécifique pour chaque technologie :

- Wifi Low Power
- IEEE 802.15.4.

Grace à la radio logicielle, il est possible d'avoir une étoile contrôlant des modules WiFi Low Power et 802.15.4 comme l'illustre la Figure 42.

#### Les avantages de la radio logicielle sont :

- Mise en place d'un seul concentrateur pour les deux types de technologies.
- Différentiation de service à travers les deux types de nœuds de capteurs : déterminisme avec IEEE 802.15.4 et débit plus élevé avec Wifi Low Power.
- Centralisation de traitement des données reçues et de la coordination des modules capteurs.

#### Les réserves sont :

- Synchronisation du concentrateur pour basculer entre des nœuds communicants avec IEEE 802.15.4 et Wifi Low Power.
- Contraintes d'énergie, de calcul et de mémoire des modules de capteurs.

#### 5.5.1.3. L'ilot

La topologie en étoile impose que la distance de tout capteur vers un concentrateur soit inférieure à la portée radio. Ceci n'est pas vrai dans le cas général. C'est le cas pour une partie seulement des applications visées par SAHARA.

Il est donc nécessaire d'avoir une solution multi sauts.

#### 5.5.1.3.1. Ilot mono-technologie

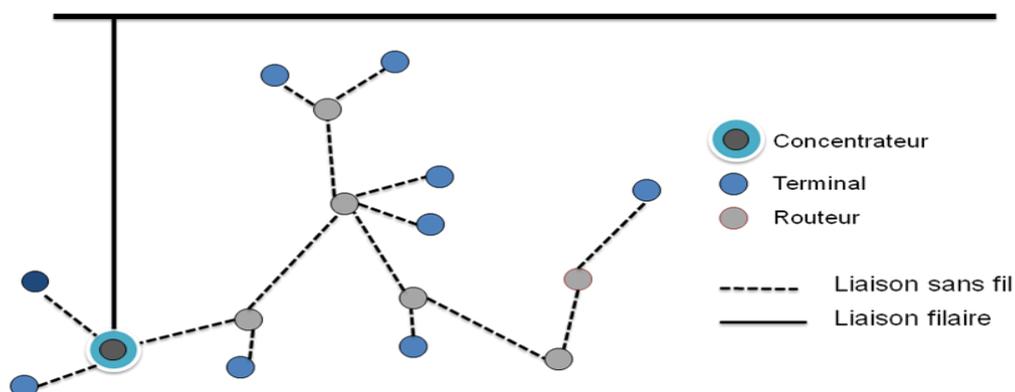


Figure 43 : ilot mono-technologie

- Wifi Low Power: cette technologie n'assure pas le déterminisme.
- 802.15.4: problème du débit faible → multi-interfaces ou bi-technologies → mécanismes de gestion d'allocation des canaux au sein de la technologie 802.15.4 et entre les technologies 802.15.4 et Wifi Low Power (exemple : cohabitation d'îlot 802.15.4 et une étoile WiFi Low Power).

### 5.5.1.3.2. Cohabitation de deux îlots avec technologies différentes

Nécessité de mécanismes de gestion d'allocation des canaux entre les deux technologies.

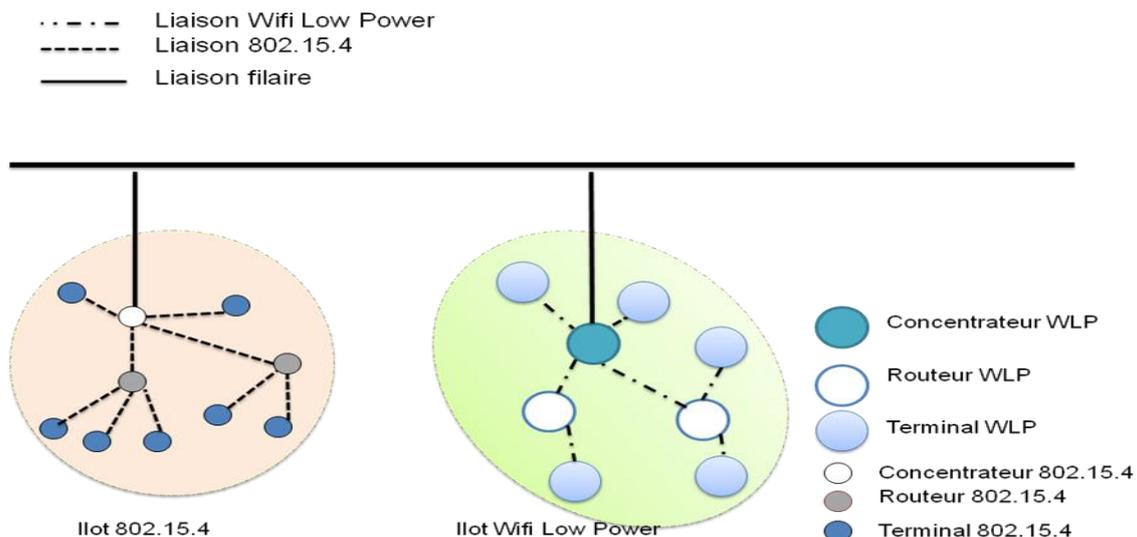


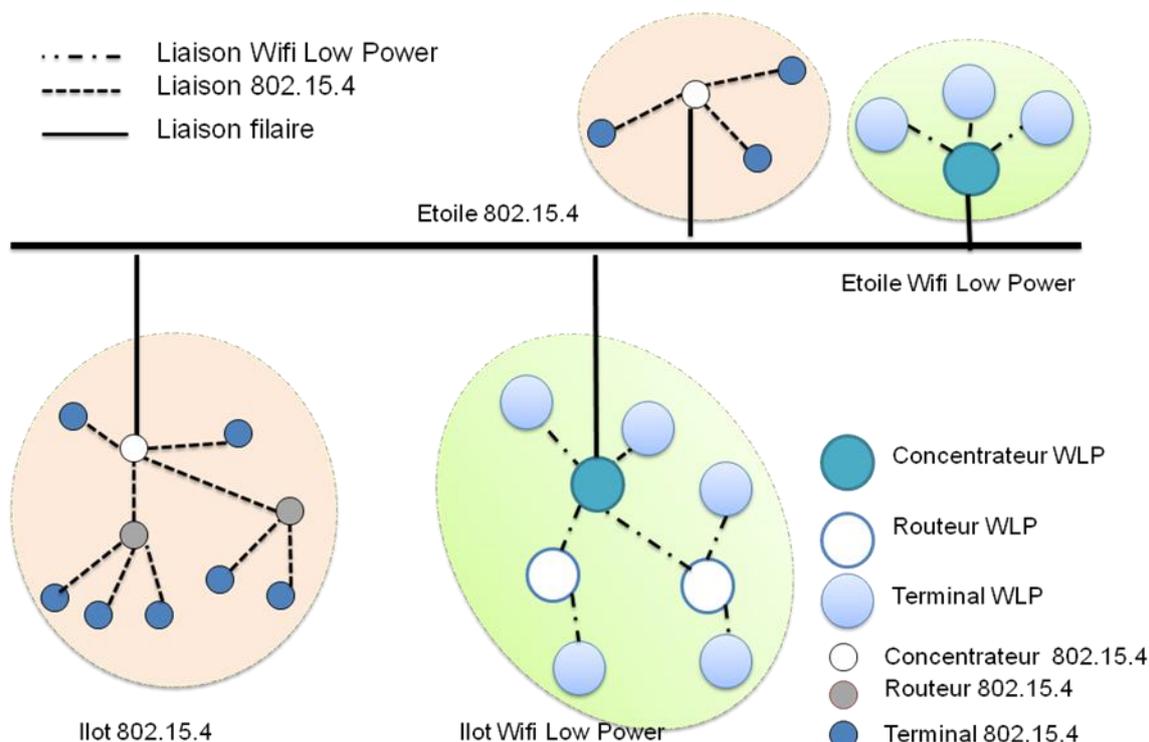
Figure 44 : Cohabitation de deux îlots avec deux technologies différentes

### 5.5.1.3.3. Ilot bi-technologies

- Dans ce type d'îlot, il y a la présence de routeurs multi-interfaces bi-technologies.
- Le choix de router un flux suivant une technologie ou une autre permet la différenciation de services.
- Problématique de faisabilité au niveau du design des modules bi-technologies (Routeur, Concentrateur).

### 5.5.2. Architecture du démonstrateur SAHARA

Notre but est de concevoir une architecture générique qui pourrait être instanciée en fonction des réponses que les partenaires apporteront aux contraintes technologiques mentionnées dans précédemment et des différentes applications ciblées par les *end users*.



**Figure 45 : Architecture Démonstrateur**

Des îlots mono-technologie cohabitent fréquemment. Les étoiles sont des îlots particuliers avec un seul saut.

**Proposition** : séparer les besoins de mesure :

- Mesure bas débit / capteurs situés dans des zones peu accessibles : IEEE 802.15.4 est probablement la bonne solution.
- Mesure haut débit : WiFi Low Power est envisageable pour satisfaire les exigences de débit.
- Pour les capteurs situés dans des zones peu accessibles et nécessitant un débit élevé (et des envois fréquents de trames), il sera probablement délicat d'obtenir une autonomie énergétique de l'ordre de 5 ans => ils devront soit être alimentés par une alimentation externe au capteur, soit bénéficier des techniques de récupération d'énergie. Des lors l'autonomie énergétique ne serait plus une contrainte.

**Conclusion** : L'adéquation entre les exigences applicatives et les performances que l'on peut raisonnablement espérer des architectures proposées reste un verrou, compte-tenu des technologies actuellement disponibles.

### 5.5.3. Architecture de Recherche

Cette architecture est conditionnée par la faisabilité technique des routeurs bi-technologies.

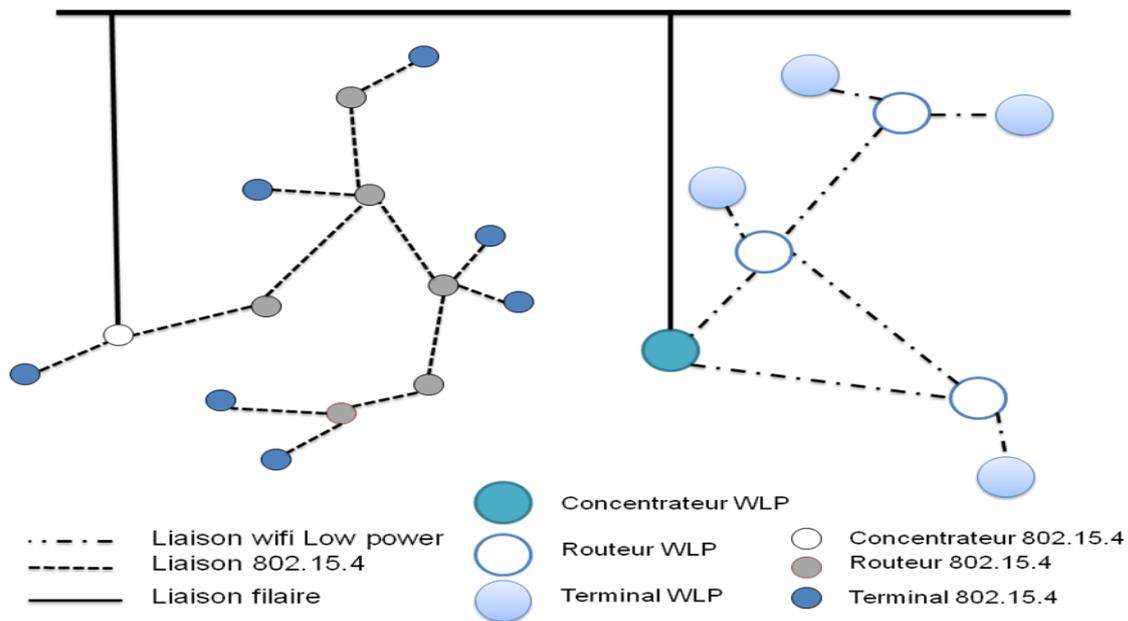


Figure 46 : Architecture étendue (1)

Dans ce type d'architecture, deux types d'îlot existent comme le montre la Figure 46 : un premier avec la technologie 802.15.4 et un deuxième avec la technologie WiFi Low Power. Ces îlots ne font pas que cohabiter mais ils sont combinés à l'aide des routeurs bi-technologies, comme indiqué sur la Figure 46. Un flux pourrait être routé par l'une ou l'autre des technologies en fonction de la qualité de service exigée par l'application. Cette architecture permet de rechercher le meilleur compromis entre des différents critères de performances recherchés (débit, délai, déterminisme, robustesse ...).

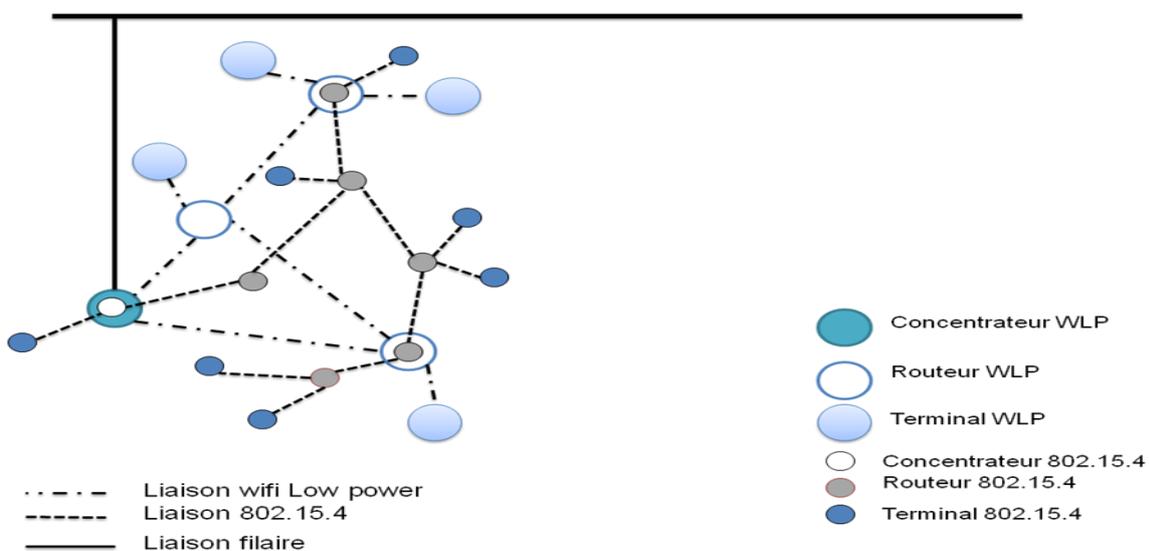


Figure 46 : Architecture étendue (2)

## Avantages

- Flexibilité du design électronique (mono-technologie, bi-technologies) des Routeurs pour les fournisseurs de matériels.
- Différenciation de services : Déterminisme possible avec le 802.15.4.
- Redondance possible.

## Discussions

- L'accessibilité au code des couches basses Wifi Low Power et la possibilité de le modifier conditionnent le déterminisme.
- Les contraintes d'encombrement et les conditions de coexistence fréquentielle des antennes d'une solution multi interfaces vont limiter le nombre d'interfaces et par conséquent le débit.
- Complexité du système: il faut des Routeurs bi-technologiques pour passer d'une technologie à une autre.
- Il reste à vérifier les contraintes autres que le gain en débit : délai, consommation d'énergie,...

En passant d'un nœud 802.15.4 mono interface à un nœud 802.15.4 multi interfaces (N interfaces), nous estimons que le débit est quasiment multiplié par N, Par conséquent, sous réserve de faisabilité, nous pouvons atteindre les performances du Wifi Low Power en terme de débit comme le montre le schéma ci-dessous.

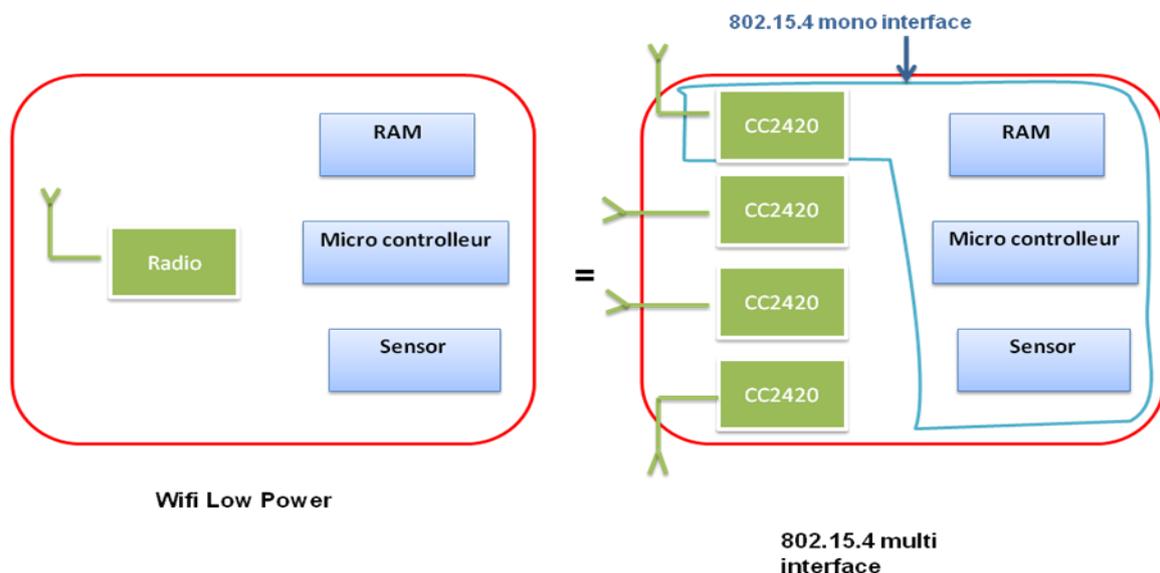


Figure 47 : Nœud multi-interfaces 802.15.4 "équivalent" à un nœud mono-interface WLP

Sous l'hypothèse que les deux modules contiennent les mêmes microcontrôleurs, les mêmes modules mémoire RAM et les mêmes capteurs, la consommation en énergie peut être estimée à l'aide du calcul suivant :

- 802.15.4 multi interfaces :  $N * E(CC2420) + \text{Constante}$
- Wifi Low Power :  $E(MRF24WB0Mx^1) + \text{Constante}$ .

	Wifi Low Power	802.15.4 mono-interface	802.15.4 multi-interface
Tx	154 mA	17.4 mA	$N * 17.4 \text{ mA}$
Rx	85 mA	19.7 mA	$N * 19.7 \text{ mA}$

Ordre de grandeur : Une étoile 802.15.4 (sur un canal donné) permet d'espérer un débit max utile de l'ordre de 160 kbps. Dès que l'architecture est plus complexe (un îlot par exemple) le débit chute et la latence augmente.

#### 5.5.4. Discussions sur les Exigences Système des End-Users

##### 5.5.4.1. Exemples d'exigences difficiles ou impossibles à satisfaire

###### 1) Débit :

Un Concentrateur ne pourra pas gérer 40 capteurs produisant chacun 10koctets/s.

###### 2) Synchronisation des modules radio à 1 microseconde

Cette exigence reste à évaluer à 1 saut mais elle est impossible à plusieurs sauts

- **Sortie du mode veille forcée par radio**

###### 3) Durée de vie = 5 ans

Cette exigence semble incompatible avec l'activité des nœuds.

Exemple : Une pile lithium 9V tient 180h pour alimenter le chip radio en réception sans passage en mode sommeil. Cette exigence ne peut être satisfaite que si on dispose des mécanismes de récupération d'énergie.

###### 4) Support de 2000 modules radios

Cette exigence ne sera pas satisfaite dans SAHARA. Le nombre effectivement supporté dépendra des possibilités d'accès et modifications des couches basses des technologies utilisées.

Au niveau recherche, nous étudierons comment se rapprocher de cette valeur.

## 5) Tolérance aux fautes

Dans le système SAHARA un module radio défaillant ne peut pas prévenir de sa défaillance. Exemple : un module n'a plus suffisamment d'énergie pour pouvoir communiquer. En revanche, le système SAHARA pourra satisfaire l'exigence suivante : ne pas remonter à l'application une info qui a été endommagée durant son transfert.

### *5.5.4.2. Exemples d'exigences lourdes sur protocoles réseau*

**Protection des données échangées :** Le cryptage systématique des données a de lourdes conséquences sur les performances espérées du réseau sans fil.