

La Radio Ultra Large Bande :
enjeux et perspectives pour
une radio sans licence

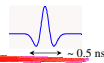
Stéphane Paquelet
Gwillerm Froc
Alexis Bisiaux
Stéphane Mallégo



Plan

- **Historique de l'ULB**
 - radio ultra large bande : tour d'horizon de 1962 à 2006
 - état de l'art haut-débit
- **Problématique réglementaire**
 - position du problème
 - radio cognitive
- **Couche physique par impulsion : quel choix ?**
 - justifications théoriques
 - performances
 - architectures matérielles, perspectives technologiques
 - propriétés cognitives

Historique de l'ULB
1962-2002



- 1962 G. F. Ross – expérimentations sur impulsions électromagnétiques
- 1968 Hewlett-Packard – outil d'instrumentation : oscilloscope
- H. F. Harmuth – *A Generalized Concept of Frequency and some Applications*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-14, No. 3, May 1968
- 1972 K. Robbins – Short Base-band Pulse Receiver : U.S. Patent n°3,662,316
- 1973 G. F. Ross – 1er brevet communications ULB : US Patent n°3,728,632
- 1974 R. N. Morey – Conception d'un radar UWB à pénétration dans le sol pour Geophysical Survey System, Inc (GSSI)
- 1987 L. W. Fullerton – Création de la société Time Domain depuis, plusieurs brevets majeurs en ULB par impulsion
- 1993 R. A. Scholtz – de nombreux articles académiques, cosignés avec M. Win, sur les performances des systèmes par impulsion à code d'étalement
- 1998 FCC – Lancement du processus de réglementation ULB aux EU
- 1999 Time Domain – Premier chipset ULB : PulsON 100
- 2001 CEPT – Lancement du processus de réglementation ULB en Europe, Mainz
- 2002 FCC – « First Report and Order », le 14 février

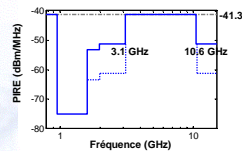
Historique de l'ULB
1962-2002

- 1962 G. F. Ross – expérimentations sur impulsions électromagnétiques
 - 1968 Hewlett-Packard – outil d'instrumentation : oscilloscope
 - H. F. Harmuth – *A Generalized Concept of Frequency and some Applications*, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-14, No. 3, May 1968
 - 1972 K. Robbins – Short Base-band Pulse Receiver : U.S. Patent n°3,662,316
 - 1973 G. F. Ross – 1er brevet communications ULB : US Patent n°3,728,632
 - 1974 R. N. Morey – Conception d'un radar UWB à pénétration dans le sol pour Geophysical Survey System, Inc (GSSI)
 - 1987 L. W. Fullerton – Création de la société Time Domain depuis, plusieurs brevets majeurs en ULB par impulsion
 - 1993 R. A. Scholtz – de nombreux articles académiques, cosignés avec M. Win, sur les performances des systèmes par impulsion à code d'étalement
 - 1998 FCC – Lancement du processus de réglementation ULB aux EU
 - 1999 Time Domain – Premier chipset ULB : PulsON 100
 - 2001 CEPT – Lancement du processus de réglementation ULB en Europe, Mainz
 - 2002 FCC – « First Report and Order », le 14 février
- **Paradigme : radio par impulsion**
forte résistance aux évanouissements
réduction des interférences
- **Spectre des impulsions : < 3 GHz**
Solutions technologiques à bas coûts
Bonnes propriétés de propagation à travers les parois
- **Applications anticipées**
Transmissions discrètes à bas débits
Radar, localisation, imagerie (bande = résolution spatiale)
Réseaux de capteurs, Sécurité
- **Problèmes majeurs :**
synchronisation
récupération du potentiel énergétique

Historique de l'ULB
réglementation FCC

Le 14 février 2002, la FCC :

- Définit l'ULB
 - bande fractionnelle $B/f_c \geq 20\%$
ou
 - largeur de bande $B \geq 500$ MHz
- Autorise des émissions ULB sans licence avec
 - puissances moyennes limitées
0.5 mW sur [3.1 - 10.6 GHz]
 - puissance pic limitée à 0 dBm dans toute bande de 50 MHz
- Calcul de la borne de Shannon
 - 10 Gbit/s à 4 m
 - ULB définitivement potentiel énorme
 - Mais ... sans expliciter le schéma de transmission adapté



M. Kamoun et al. «Data rate upper bounds for UWB link with IEEE 802.15.3a channel model », International Conference on UWB, Zurich, sept. 2005

Historique de l'ULB
2002-2006

- février 2002 FCC – « First Report and Order »
- juin 2002 XtremeSpectrum – Premier chipset ULB hauts débits (< 100 Mbit/s)
- déc. 2002 Appel à propositions pour le standard de communications ULB hauts débits IEEE 802.15.3a (480 Mbit/s à quelques mètres)
- mars 2003 Premières propositions pour le standard IEEE 802.15.3a
- mars 2004 CEPT - Constitution du TG3 pour donner un cadre réglementaire à l'ULB en Europe
- août 2004 Premières propositions pour le standard de communications ULB bas débits IEEE 802.15.4a
- avril 2005 CEPT- Publication du Rapport 64
- déc. 2005 standard ECMA 368, 369 sur la base d'une proposition MB-OFDM
- jan. 2006 Dissolution du groupe IEEE 802.15.3a

Historique de l'ULB 2002-2006

février 2002 | FCC - « First Report and Order »

juin 2002 | XtremeSpectrum - « Ultra Large Bandwidth (ULB) à hauts débits (< 100 Mbit/s) »

déc. 2002 | XtremeSpectrum - « Ultra Large Bandwidth (ULB) à hauts débits (< 100 Mbit/s) »

août 2003 | XtremeSpectrum - « Ultra Large Bandwidth (ULB) à hauts débits (< 100 Mbit/s) »

avril 2005 | XtremeSpectrum - « Ultra Large Bandwidth (ULB) à hauts débits (< 100 Mbit/s) »

déc. 2005 | standard ECMA 368, basé sur la base d'une proposition MB-OFDM

jan. 2006 | Dissolution du groupe IEEE 802.15.3a

Applications hauts débits
Forts enjeux commerciaux (débits > 480 Mbit/s à 3 mètres)
pas encore de véritable réponse technique

→ **Problèmes de :**
synchronisation,
estimation canal,
égalisation

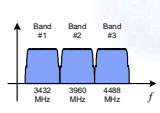
**d'autant plus difficiles que désormais
les débits envisagés sont voisins de 1 Gbit/s**

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 6

Historique de l'ULB état de l'art hauts débits 802.15.3a

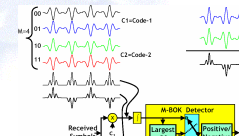
Solution MB-OFDM

- défendue par l'alliance Wimedia-MBOA : Intel, Texas, STM et al.
- saut de fréquence sur 3 sous-bandes de 528 MHz
- modulation OFDM - QPSK sur 128 porteuses
- débits
 - brut : 640 Mbit/s (utilisation de 3 sous-bandes)
 - utile : de 55 à 480 Mbit/s



Solution DS-UWB

- défendue par Freescale init. Motorola, Xtremespectrum
- solution par impulsion étalée par CDMA :
 - symp : 24 chip modulé (+1,0,-1), 1chip = 400 ps
 - duplexage sur 2 sous-bandes
 - modulation : PSK (polarité) M-BOK
 - débits théoriques : de 28.5 à 1200 Mbit/s



* Multi-band OFDM physical layer proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a, Anuj Batra et al., IEEE P802.15-03/208r3, 2004
 * XtremeSpectrum CFP Presentation, M. Welborn, IEEE 802.15/03/153r3, 2003

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 7

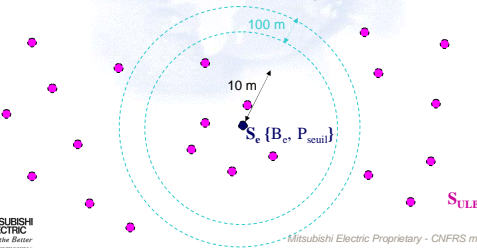
Problématique réglementaire aspects réglementaires : deux options continentales

- Aux Etats-Unis**
 - nécessité de dynamiser l'innovation et l'économie des TIC
 - mise en concurrence sur marché émergent d'applications à courte distance
 - douées d'ubiquité, centrées sur l'utilisateur
 - complémentaires des infrastructures existantes
 - postulat de la FCC : faible dsp par équipement = préservation services existants
- En Europe**
 - FCC réglemente émetteurs ULB sans hypothèse sur densité e.m des émissions
 - CEPT veut garantir la protection des services
 - existants
 - éventuellement futurs : donc sans préjuger des modulations ni du positionnement spectral
 - activité TG3, Rapport 64 : attention particulière
 - aux puissances agrégées (débat sur les facteurs d'activité)
 - aux interférents directs (DAA)
 - prudence
 - demande méthodes démontrées de réduction des interférences
 - réglementation provisoire

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 8

Problématique réglementaire proposition de formalisation

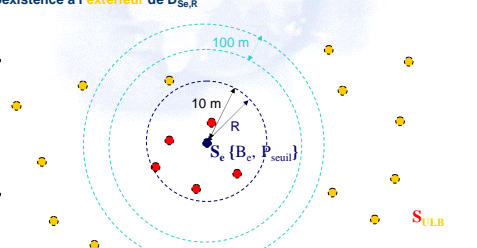
- Configuration typique de déploiement terrestre (scénario 2D)**
 - service existant S_e :
 - tolère puissance P_{seuil} dans sa bande B_e
 - ensemble d'équipements ULB sans licence S_{ULB} :
 - assujéti à une réglementation de type FCC (dsp/appareil fixée)
- ∃ conditions nécessaires et suffisantes sur S_{ULB} pour assurer la coexistence ?



Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 9

Problématique réglementaire proposition de formalisation

- Soit 2 échelles spatiales en fct du critère : un élément isolé de S_{ULB} gêne-t-il S_e ?
 - Intérieur et extérieur du disque $D_{Se,R}$ (typ. $R=10$ m)
- Dès lors le problème de coexistence se réduit à deux sous-problèmes indépendants :
 - coexistence à l'intérieur de $D_{Se,R}$
 - coexistence à l'extérieur de $D_{Se,R}$

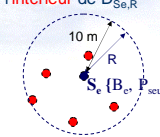


Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 10

Problématique réglementaire proposition de formalisation

Intérieur de $D_{Se,R}$

- Réciprocité du canal de propagation
 - Chaque élément de S_{ULB} a priori capable de mesurer sa proximité à S_e
 - ⇒ Extinction ou réduction de puissance d'émission dans B_e : « détection et évitement »
- Si réduction de puissance envisageable
 - nécessité d'interdire interférences inter S_{ULB} dans $D_{Se,R}$
 - protocole pour assurer émission simultanée de quelques ULB au maximum
 - ⇒ Coexistence réglée à l'intérieur de $D_{Se,R}$



ULB = bruit thermique
KO dans cette configuration

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 11

Problématique réglementaire proposition de formalisation

Extérieur de $D_{Se,R}$

- Effet collectif des S_{ULB} dominant
- assurer la coexistence, c'est agir sur $P_{agrégée}$ de S_{ULB}
- Large échelle de déploiement + faible variation spatiale des c.e.m dans $D_{Se,R}$
- $P_{interférente}$ vue par $S_e = P_{agrégée}$ de S_{ULB} vue par ses éléments au voisinage de $D_{Se,R}$

Donc assurer la coexistence, c'est $P_{agrégée}$ de S_{ULB} bornée en chacun de ses éléments

ULB = bruit thermique
OK dans cette configuration

S_{ULB}

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 12

Problématique réglementaire de la réglementation à la radio cognitive

Conclusions de la formalisation proposée

- 2 types de procédures pour réduire les interférences
 - échelle locale : type « détection et évitement »
 - large échelle : contrôle déterministe $P_{agrégée}$ de S_{ULB} en chacun de ses éléments
- Equivalence formelle entre problèmes
coexistence avec systèmes bande étroite \Leftrightarrow optimisation de ressource radio inter S_{ULB} aux seuils de tolérance près
- Méthodes de résolution
Problèmes typiques de la *radio cognitive* sur la base de modèles de propagation et d'interférence éprouvés (i.e. acceptés par les différentes communautés), on pourra utiliser
 - Radiotechnique statistique
 - Automatique
 - Protocoles
 - etc.

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 13

Couche physique par impulsion Démodulation par détection d'énergie : justification

S. Paquelet, L.M. Aubert et al. UWBST 2004.
« An Impulse Radio Non-coherent Transceiver for High Data Rates »

- Le canal ULB
 - 85% de l'énergie dans 60 trajets
 - ~ 0.5 ns
 - graphé $p(t)$
- Détection d'une impulsion
 - bande du signal grande B / bande du récepteur $\frac{1}{\Delta T} \rightarrow B\Delta T = 10$
 - test de décision asymétrique (maximiser P_{det} à P_{fa} fixée)

$$H_0 : y(t) = w(t)$$

$$H_1 : y(t) = A \cdot p(t - \tau) + w(t), \quad \tau \sim U\left(-\frac{\Delta T}{2}, \frac{\Delta T}{2}\right), \quad A \neq 0 \text{ inconnu}$$

\Rightarrow La théorie de la décision dit qu'il faut considérer la statistique

$$y(t) \xrightarrow{h(t)} \left(\int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} \right)^2 \rightarrow x \Leftrightarrow x = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} (h(t) * y(t))^2 dt$$

D. Middleton, « An Introduction to Statistical Communication Theory », McGraw-Hill, 1960
Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 14

Couche physique par impulsion Multi-bandes et modulation de l'énergie : justification

Pour des haut débits par impulsion

- Sync. sur trajets avec précision requise pour récepteurs *Rake* impossible
- traitement de signal statistique demande de prélever l'énergie du canal
- démodulation non linéaire et ISI doit être limitée avec une période symbole proche de l'étalement canal
- Habituellement la modulation de l'information est portée par
 - Amplitude \Rightarrow On-Off à deux états la plus simple (ordre plus élevé ultérieurement)
 - Phase (i.e. décalage temporel) à cause de l'ISI
- Pour utiliser la capacité totale \Rightarrow augmenter la dimension de la constellation (s)
 - grande variété de canaux ULB (filtres H) et pas de capacité d'estimation
 - choisir une base (s) t.q les caractéristiques des (s) stabilisées par action des H
 - mathématiquement (s) doivent avoir des supports spectraux disjoints

Conclusion
Multi-bandes On-Off Keying par impulsion radio est le choix approprié

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 15

Couche physique par impulsion Multi-bandes et modulation/détection de l'énergie : synthèse

- Émission/réception
 - modulation On-Off Keying
 - récepteur non-cohérent : détection d'énergie \Rightarrow capture énergie disponible

$T_r > T_d \Rightarrow$ pour éviter interférence inter-symbole
 T_r évalué pendant estimation du canal (procédure synchronisation)

- extension pour multiples sous-bandes \Rightarrow atteindre capacité du canal

- Interprétation
- borne de Shannon $C = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \log_2 \left(1 + \frac{|H(f)S(f)|^2}{N_0/2} \right) df$
- interprétation naturelle $C = \sum_{f_i} C_i = \sum_{f_i} \log_2 \left(1 + \frac{|H(f)S(f)|^2}{N_0/2} \right)$ Émettre ou non de l'énergie dans une bande
Capacité faible ≈ 1

\Rightarrow efficacité de (Théorie de l'Information + Synthèse Statistique)

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 16

Couche physique par impulsion règle optimale de démodulation

S. Paquelet, L.M. Aubert et al. UWBST 2004.
« An Impulse Radio Non-coherent Transceiver for High Data Rates »

- Problème de démodulation *énergétique* de l'OOK (une bande)

deux hypothèses symétriques $\begin{cases} H_0 : x = \int_0^T [w(t)]^2 dt \\ H_1 : x = \int_0^T [s(t) + w(t)]^2 dt \end{cases}$

Objectif : minimiser la probabilité d'erreur en connaissant B et ayant estimé T_r , $E = \int_0^T s^2(t) dt$, N

- Densités de probabilité $\begin{cases} P_0(y) = \frac{y^{M-1} e^{-y}}{\Gamma(M)}, y \geq 0 \\ P_1(y) = \left(\frac{y}{L}\right)^{L-1} e^{-y/L} I_{L-1}(\sqrt{2yL}), y \geq 0 \end{cases}$ où $\begin{cases} y = \frac{E}{N} \\ L = \frac{E}{N} \\ 2M = 2B T_r + 1 \end{cases}$

\Rightarrow démodulation par un seuillage spécial

Seuil optimal $\frac{P_{err}}{N}$ $P_0\left(\frac{P_{err}}{N}\right) = P_1\left(\frac{P_{err}}{N}\right)$
 $\frac{P_{err}}{N} = \frac{L}{4} + M + \sqrt{M-1} \phi(L)$ où $\phi(L)$

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 17

Couche physique par impulsion performances

S. Paquelet, L-M. Aubert et al, UWBST 2004.
« An Impulse Radio Non-coherent Transceiver for High Data Rates »

Récepteur RAKE cohérent :
⇒ énergie collectée sur peu de trajets alors que

Détection d'énergie :
⇒ toute l'énergie disponible est traitée

Rake atteint P_e comparable s'il collecte 33% à 40% de l'énergie disponible.

R *	150	240	600	Mbit/s
d	10	5	3	m
B	500	500	250	MHz
N _{max}	12	12	24	
T _r	80	50	40	ns
CM	4	3	2	
T _i	50	40	30	ns
P _e *	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	

CM: modèles de canaux IEEE
- 2: NLos 0-4 mètres
- 3: NLos 4-10 mètres
- 4: extrême NLos multi-trajets

* sans code correcteur

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 18

Couche physique par impulsion Multi-bande OOK : synoptique d'architecture matérielle

S. Paquelet, L-M. Aubert et al, UWBST 2004.
« An Impulse Radio Non-coherent Transceiver for High Data Rates »

Contraintes matérielles relaxées
- sync. approximative suffit ⇒ robuste vis-à-vis de la gigue des horloges
- traitement bas sur le bande ⇒ robuste vis-à-vis de la distorsion et non-linéarité de phase (conception simplifiée: antennes, amplificateurs, filtres)
- Princip. de détection d'énergie passifs ⇒ faible consommation

Flexibilité
- contraintes relaxées/flexibilité
- débits réglables
- gestion de la ressource radio ⇒ FDMA/TDMA

Débits attendus > 500 Mbit/s @ 3 mètres

N _{bandes}	entre 15 et 26
B	entre 250 et 500 MHz
PRF	typiquement 30 MHz
T _r	entre 20 et 100 ns
Cadence ADC	typiquement 30 MHz

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 19

Couche physique par impulsion Perspectives technologiques : générateur d'impulsions

Objectif : concevoir un générateur d'impulsions ULB avec des composants du commerce pour réaliser un démonstrateur

- Principe simple à base de portes logiques (composants numériques)
- Problème: vitesse de commutation limitée des composants discrets

Premier prototype

- impulsions de 140ps à mi-hauteur
- Forme gaussienne
- Bande à -10dB: 0 à 4,5GHz

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 20

Couche physique par impulsion Perspectives technologiques : (De)multiplexeur passif

(Dé)multiplexeur :
- faibles pertes d'insertion (typ <3 dB)
- équi-répartition d'énergie par sous-bande.
- uniquement des filtres, nombre réduit de composants ?

Utilisation d'un réseau d'interconnexion des filtres à base de lignes de transmission (ou équivalent électrique) → réseau « égalisateur » de conductances
Brevet : Appl. No. EP 05291677.2

Prototype : quadriplexeur 3,1-4,2 GHz

Taille: 67.86 * 45.6 mm²

Potentialités d'intégration résultats de mesure
Systèmes SIP pour filtres et réseau d'interconnexion (structures multicouche)

Filtres à base de résonateurs à onde acoustique

- Technologie microruban,
- 4 filtres passe-bande form ouverte (pertes d'insertion)
- 1 filtre passe-bas pour une sélection bande de 30 dB

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 21

Conclusion

- Technologie ULB**
 - événements montrent que la maturité n'est pas atteinte principes théoriques et technologiques
 - travaux annoncés sur de nouvelles architectures cf. TES, PULSE-LINK, etc.
- Réglementation**
 - identification de fonctionnalités à assurer par ULB ⇒ programme commun entre communautés : ULB, bande étroite, CEPT
 - résolution des problèmes de radio cognitive
 - modèles de propagation
 - renouvellement des thèmes classiques du traitement de signal télécom
 - ⇒ réglementation provisoire : voie prudente
- Architecture nouvelle par impulsion radio et détection d'énergie**
 - performances a priori en phase avec attentes ULB
 - nouvelles thématiques traitement de signal, technologie, protocoles
 - capacités cognitives naturelles (DAA, flexibilité gestion de la ressource...)

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 22

Références

- Publications**
 - « An Impulse Radio Non-coherent Transceiver for High Data Rates », S. Paquelet, L-M. Aubert and B. Uguen, UWBST Kyoto, May 2004,
 - « An Energy Adaptive Demodulation for High Data Rates with Impulse Radio », S. Paquelet, L-M. Aubert, RAWCON, Atlanta 2004,
 - « RF Front-End considerations for SDR ultra wideband communication Systems », S. Paquelet, C. Moy, L-M Aubert, RF Design magazine, July 2004.
- Thèse de doctorat**
 - Louis-Marie Aubert, « Mise en place d'une couche physique pour les futurs systèmes de radiocommunications hauts débits UWB ». <http://tel.ccsd.cnrs.fr>

Mercii

MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

Mitsubishi Electric Proprietary - CNFRS mars 2006 - Slide 23

