

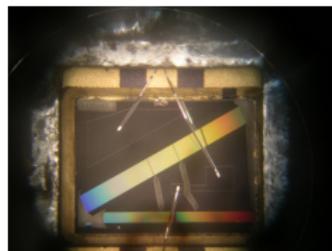
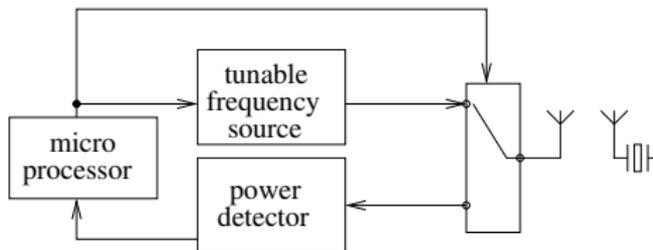
Instruments reconfigurables pour la mesure de capteurs acoustiques

J.-M Friedt, T. Rétornaz

29 avril 2008

Conception d'un capteur de température

- Deux résonateurs pour s'affranchir des sources corrélées de bruit (environnement de l'antenne, contraintes)
- Deux résonateurs sur un même substrat, propageant des ondes acoustiques selon des directions différentes pour présenter des coefficients de dérive thermique différents



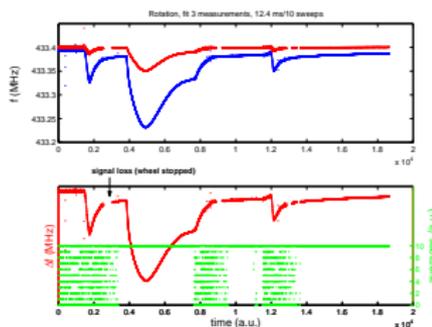
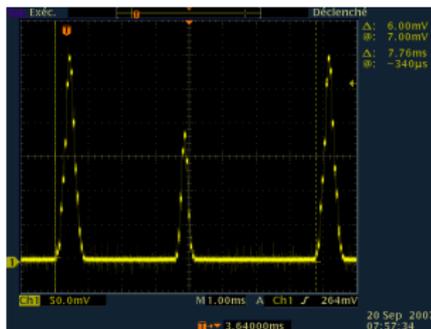
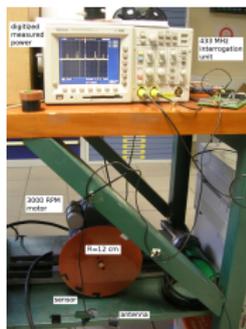
Interrogateur basé sur un principe de radar :

- 1 émission d'une source de fréquence à f
- 2 attente de τ secondes afin de charger le résonateur ($\tau \geq Q/f$)
- 3 couper l'émission et écouter la décharge du résonateur
- 4 répéter pour $f \rightarrow f + f_{step}$, $f \in$ bande ISM
- 5 après balayage, max de réponse = fréquence de résonance

Capteur de température sur une roue

Exemple de mesure de température sur roue en rotation à 3000 tours/minute

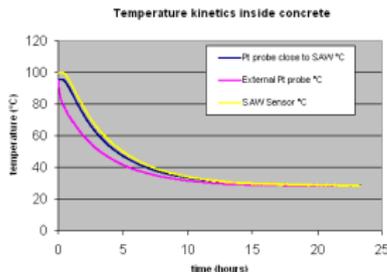
⇒ mesure de variations de température avec une précision de 0,2 à 1°C



- Mesure de température absolue nécessite un calibrage préliminaire
- Durée de l'interrogation < 10 ms
- Portée $\simeq 2$ m en espace libre, 30 cm dans la terre, quelque cm dans un corps vivant

Capteurs enterrés

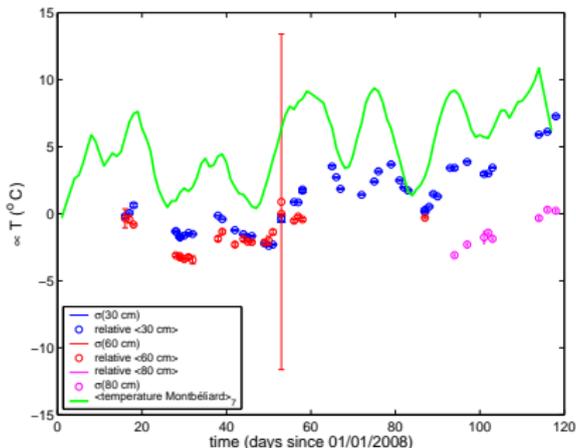
- sans fil et sans batterie \Rightarrow compatible avec une observation à long terme de bâtiments
- complément au radar de sol *Ground Penetrating Radar (GPR)* (“cible coopérative”)
- portée de 30 cm démontée dans le sol humide, devrait pouvoir être augmentée compte tenu des portées des radars de sol



Données fournies par L. Chommeloux (SENSeOR)

Capteurs enterrés (2)

Évolution de capteurs enterrés à 30, 50 cm & 80 cm (filaire), dans la terre humide ¹



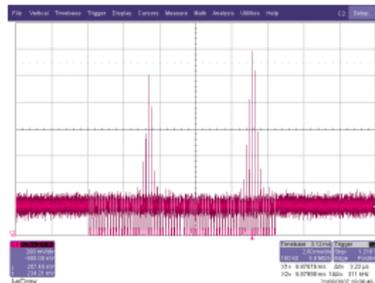
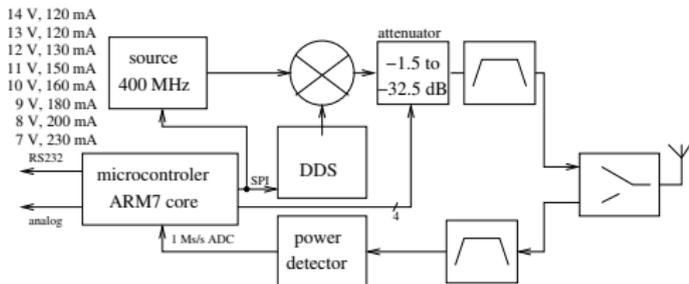
$$\varepsilon_{soil} \simeq 9 - 20 \Rightarrow \lambda_{soil}/2 \simeq 8 - 11 \text{ cm}$$

¹Température : <http://english.wunderground.com>, IVERMOND1

Balayage de fréquence en mode radar

- source de fréquence programmable (DDS) génère une fréquence d'interrogation f
- commutation switch RF afin d'émettre pendant une durée τ
- à la coupure de l'émission, écoute de la puissance retournée par le résonateur (décroissance exponentielle de l'énergie en Q/π périodes, i.e. $Q/(\pi \times f)$ s. $Q = 8000$ à $f \simeq 434$ MHz $\Rightarrow 5.9 \mu\text{s}$)
- répéter pour toutes les fréquences de la bande ISM

\Rightarrow 1 balayage de bande ISM nécessite $\simeq 10$ ms

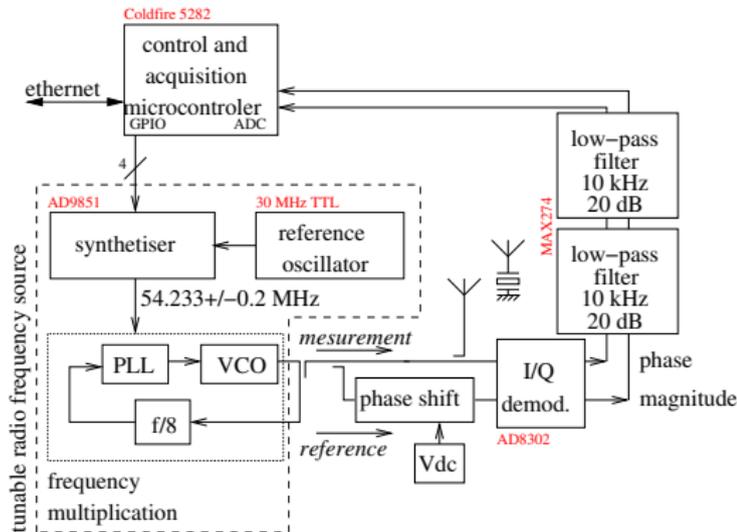


Puissance mesurée avec un atténuateur 42 dB en sortie antenne

Mode onde continue (CW)

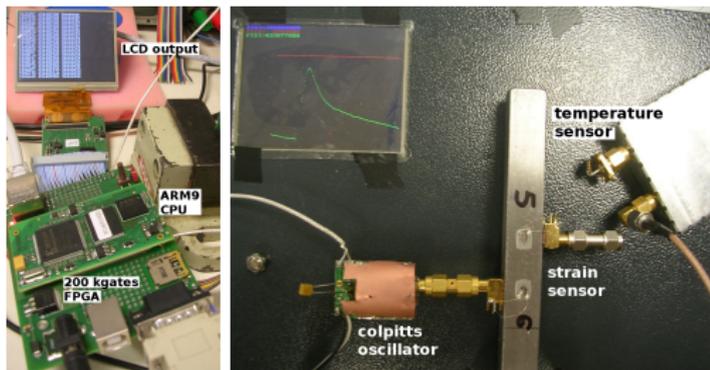
- Émission continue radiofréquence : élimine l'étalement spectral associé au hachage
- Mesure de variation d'impédance sous forme de variation de puissance transmise par le couplage et démodulateur I/Q

⇒ proche du principe des RFID (couplage magnétique d'antennes) mais sensibilité et dynamique réduite par rapport au radar



Filaire v.s sans fil

- Problème des oscillateurs : l'impédance du capteur change avec son environnement \Rightarrow conditions de Barkhausen difficiles à toujours respecter
- Deux stratégies de mesure de fréquence : direct et réciproque ²
- Un compteur direct nécessite une porte précise : cf GPS qui va suivre
- Implémentation d'un compteur réciproque dans un FPGA (3 voies : 1 référence et 2 mesures)

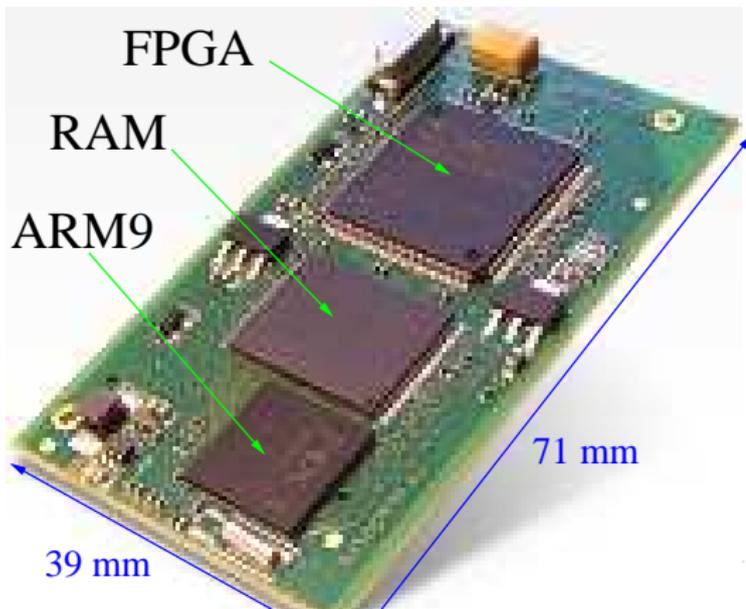


²<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/59657-7660E.pdf>

Carte ARMadeus

Conçue par une association de passionnés de Linux. Elle convient parfaitement à notre besoin de prototypage rapide, car elle offre des bus d'adresse, de contrôle et de donnée communs entre :

- ARM9 : μ contrôleur cadencé à 200 MHz
- RAM : 16 MB
- FPGA : Xilinx 200 k portes



Système d'exploitation multi-utilisateurs, multi-tâches

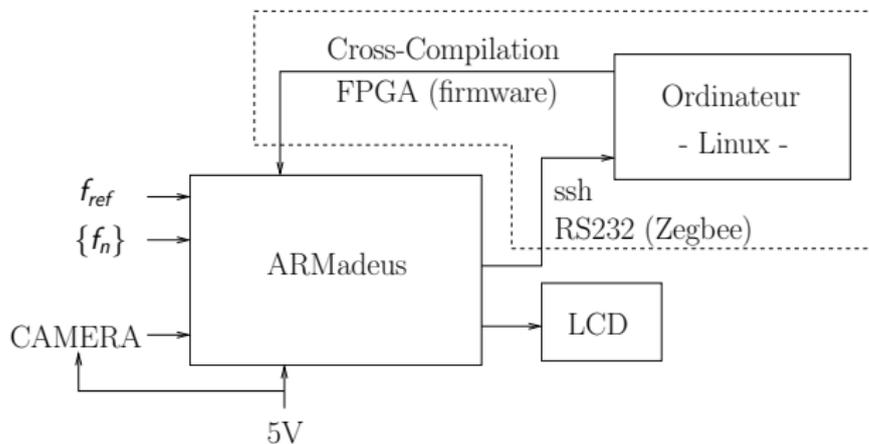
Organisé en deux espaces distincts, permettant un fonctionnement plus robuste

- Espace noyau : tâches de bas niveau, non-interruptibles, haute vitesse d'exécution
- Espace utilisateur (userspace) : tâches de haut niveau, interruptibles, autorise le calcul sur nombre flottant (ex. FFT), gestion aisée des IHM

Avantages :

- Disponibilité des sources en environnement libre
- Gain de temps dans l'élaboration de projet, par la réutilisation du travail d'autrui

Architecture complète de la plateforme



Cross-Compilation

L'association ARMadeus³ distribue⁴ (tarball, svn) un buildroot adapté :

- Génère un système d'exploitation complet (GNU/Linux) pour leur carte électronique
- Disponibilité d'un compilateur GCC spécifique à l'ARM9
- Exemple de programme porté avec succès : Mplayer, qt4-embedded
- Possibilité d'émuler le rootfs généré à l'aide de qEmu.
- Une compilation de xenomai réussie (par un membre d'ARMadeus) montre qu'il est possible d'implémenter un système temps réel dur

³irc.rezosup.org#armadeus

⁴www.armadeus.com/wiki/index.php?title=LinuxInstall

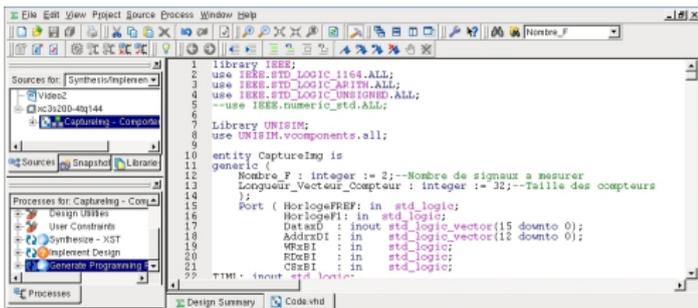
ISE de Xilinx

Environnement propriétaire de développement (\equiv IDE) pour FPGA

- Édition, simulation, compilation de code VHDL, mais aussi Verilog, diagramme
- disponible pour Linux & windows
- consulter absolument avant l'élaboration d'un projet VHDL : http://www.armadeus.com/wiki/index.php?title=How_to_make_a_VHDL_design_in_Ubuntu/Debian

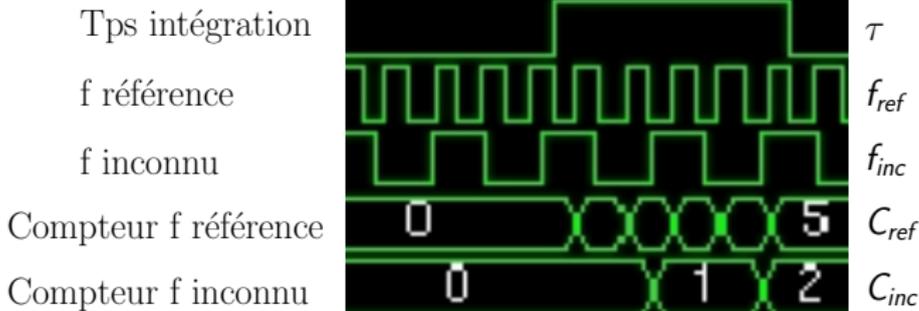
Enregistrement sur leur site pour téléchargement :

- <http://www.xilinx.com/support/download/index.htm>
- e-mail valide nécessaire



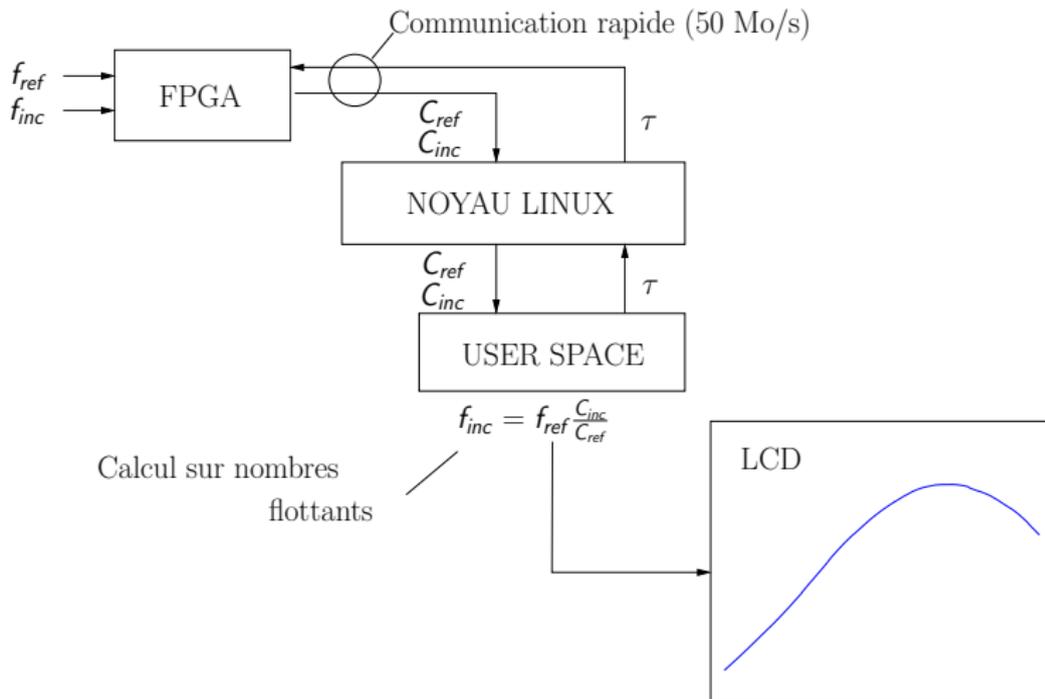
Compteur réciproque de fréquences

Évaluation des nombres d'oscillations intervenues sur deux entrées différentes, pendant un même laps de temps d'intégration τ



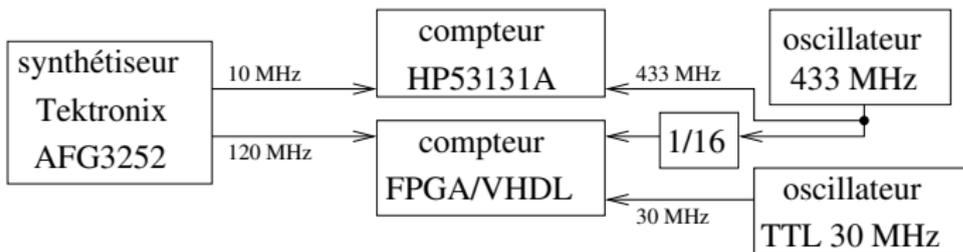
$$f_{inc} = f_{ref} \cdot \frac{C_{inc}}{C_{ref}}, \quad \Delta(f_{inc}) = \frac{1 + \frac{f_{inc}}{f_{ref}}}{\tau} \Big|_{f_{inc}=f_{ref}} = \frac{2}{\tau}$$

Architecture du système embarqué



Calcul sur nombres flottants

Expérimentation



```
signal Compteur : std_logic_vector (31 downto 0);
process ( Signal, GateTIME, RAZ )
begin
  if RAZ = '1' then -- Remise @ 0
    Compteur <= "00000000000000000000000000000000";
  elsif rising_edge ( Signal ) and GateTIME = '1' then
    Compteur <= Compteur + 1;
  end if ;
end process ;
```

Expérimentation 2

Capteurs passifs sans fil

État des lieux

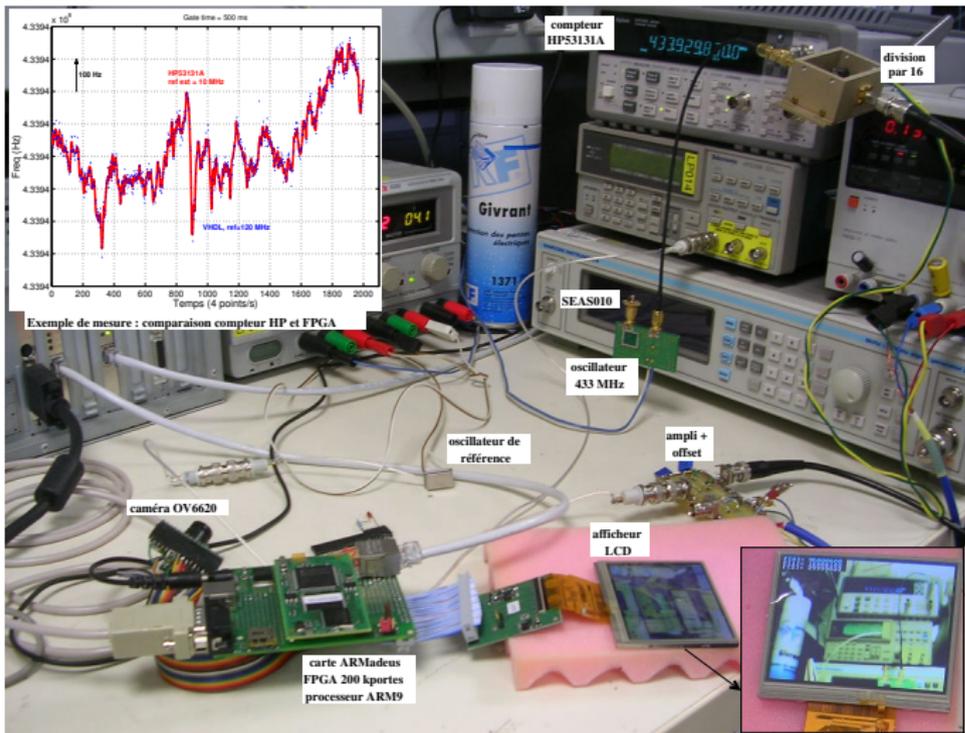
Environnement de travail

Application à notre besoin

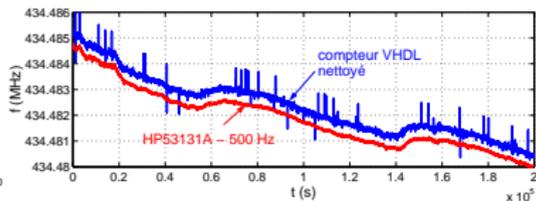
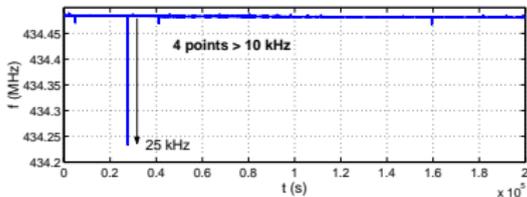
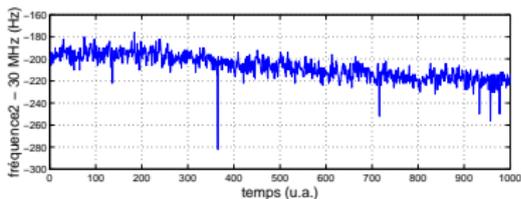
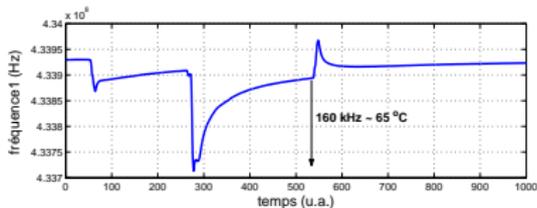
Caractéristiques de notre dispositif

Caméra CMOS

Conclusions

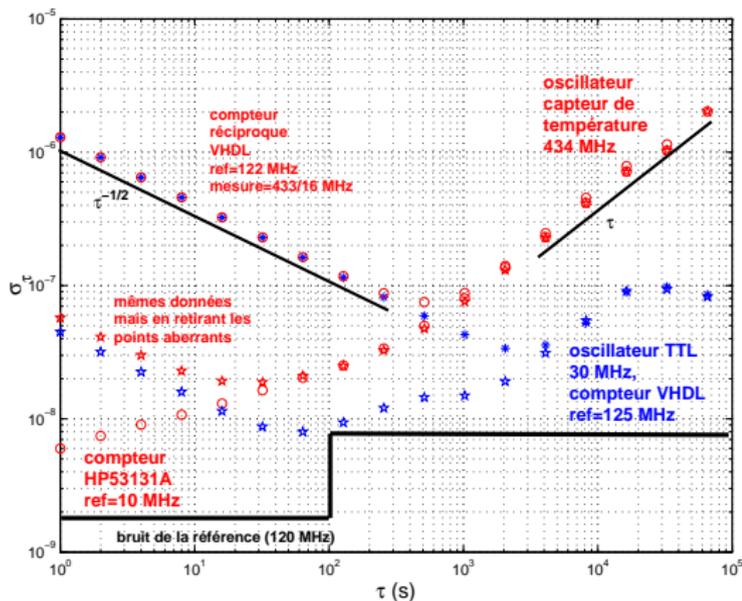


Expérimentation 3



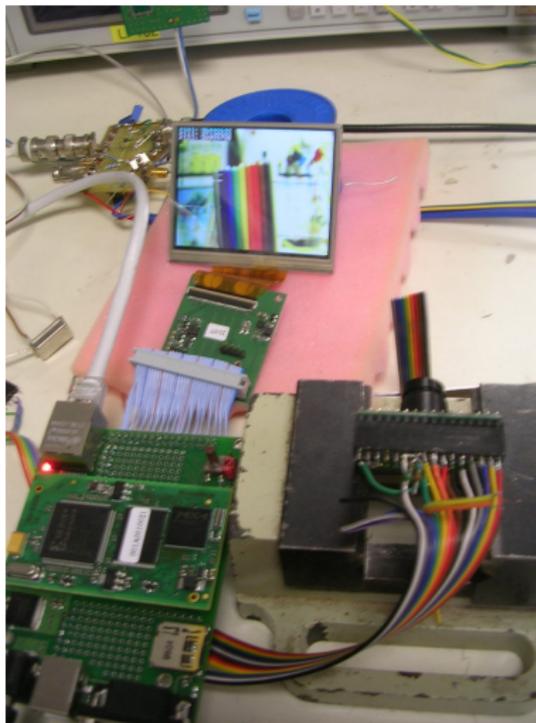
Variance d'Allan

- Dans notre cas : $f_{inc} \approx 27$ MHz, $f_{ref} = 120$ MHz et $\tau = 1$ s
- En théorie $\Delta(f_{inc}) = \frac{1+27/120}{1} = 1,225$ Hz
- La variance d'Allan sur 200 k points à 1 seconde :
 $\Delta(f_{inc}) = 27 \cdot 10^6 \times 5 \cdot 10^{-8} = 1,35$ Hz ($\approx 1/2$ Hz à 20 secondes)

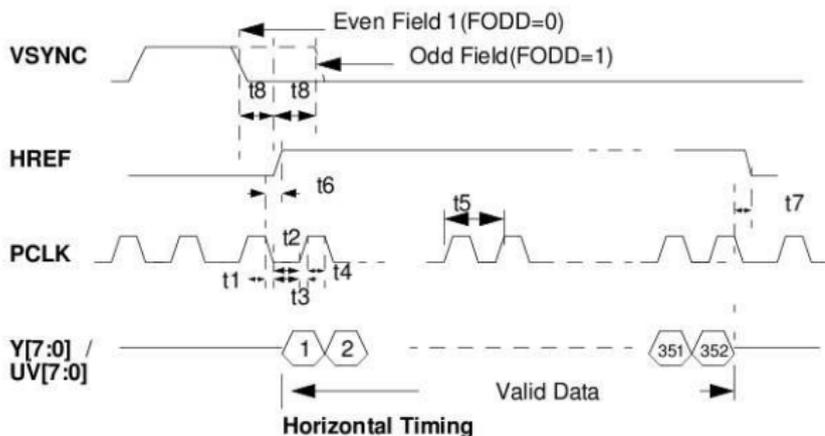


Capture d'images

- Interfaçage d'une caméra CMOS (300 k pixels) avec le FPGA
- Une impulsion nous informe de la disponibilité d'une nouvelle valeur de pixel sur le bus de données (\sim horloge du compteur)
- Commutation de signaux à haute vitesse (> 15 MHz)
- Corrélation d'une grandeur physique, à une image de la scène de la mesure



Chronogramme des signaux de contrôle envoyés par la caméra :



On utilise PCLK comme source de signal oscillant, afin d'incrémenter un compteur, utilisé pour l'adressage de la valeur des pixels dans une mémoire (RAM) synthétisée dans le FPGA

Principe de réception d'une image

VSYNC, HREF, PCLK : gestion d'une RAM interne au FPGA

- instantiation de bloc RAM Xilinx : simple à mettre en œuvre
- RAM double port (16 et 8 bits)

Enclenchement d'une interruption de l'ARM9 par le FPGA lorsque la RAM est pleine

- programmation du module (`request_irq`) pour le noyau Linux
- Lecture rapide de la RAM par l'ARM9 : stockage temporaire dans la mémoire noyau

La taille de la RAM ne pouvant contenir une image entière, ces étapes sont répétées de nombreuses fois ($\approx 50X$)

Affichage, stockage de l'image

Transfert de l'image contenue dans la mémoire noyau dans l'espace utilisateur

Transformation des données brutes, en une matrice de pixels codés en (R,G,B), par le filtrage de Bayer

Il est alors possible :

- d'afficher l'image sur le LCD, par l'utilisation d'un mappage mémoire (frame buffer)
- de stocker l'image sur un support (carte SD) dans le format ppm⁵

⁵portable pixmap file format

Évolution du code VHDL : CMOS

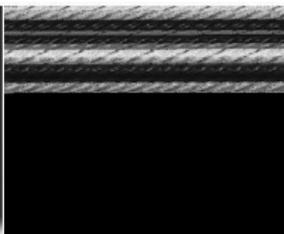
18/01/08



18/01/08



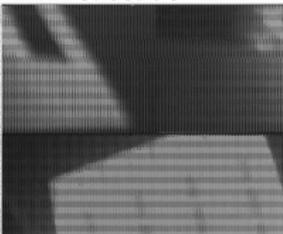
20/02/08



26/02/08



3/03/08



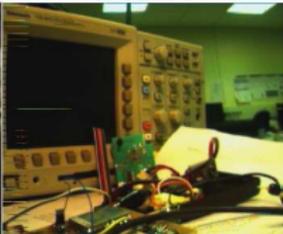
4/03/08



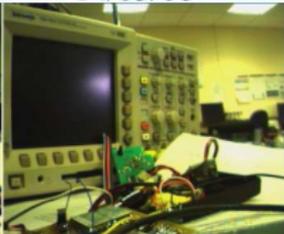
5/03/08



13/03/08

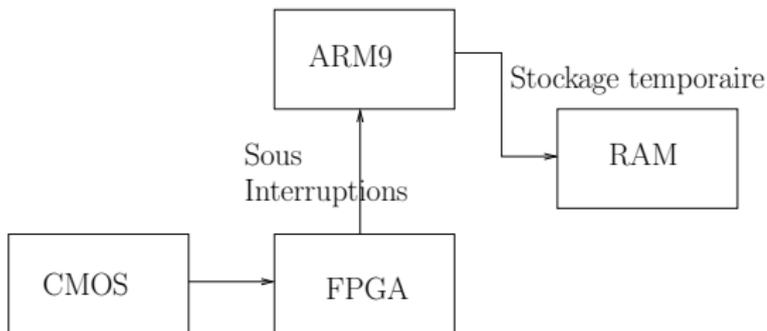


14/03/08



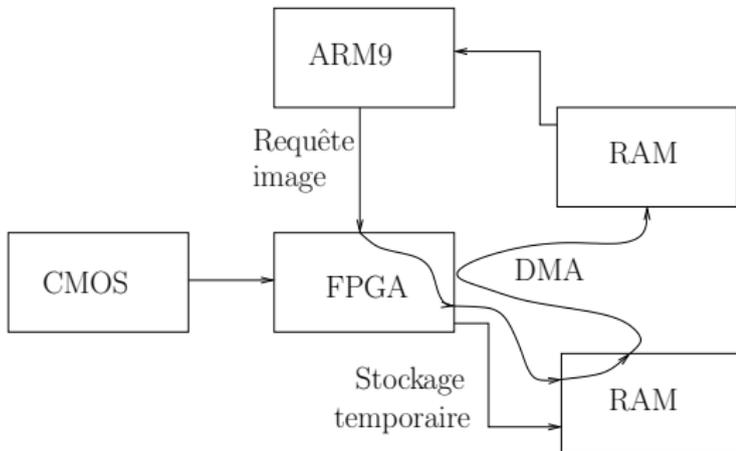
Flux des données CMOS

Réception actuel des images :



Flux des données CMOS

Architecture à mettre en place avec la nouvelle version de la carte ARMadeus :



Insertion dans le FPGA

Taux d'occupation du FPGA :

- Compteur seul : 3%
- Caméra seule : 6%
- Compteur + Caméra : 10%

Cela indique clairement, que nous n'utilisons qu'une faible proportion du FPGA, et qu'il est possible d'y inclure encore une grande quantité de tâches

Sauvegarde des mesures

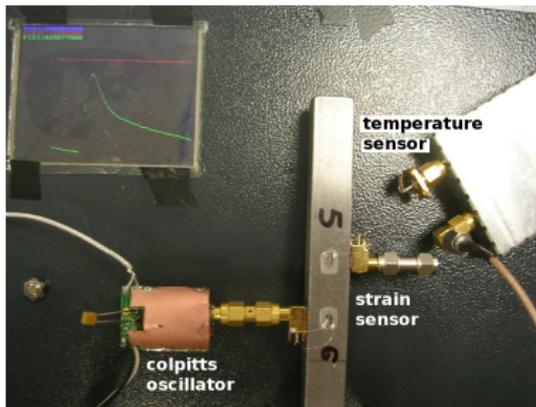
La carte ARMadeus offre divers moyens de sauvegardes et de communications des mesures :

- Écran LCD : affichage des fréquences sous forme de graphes
- Liaison ethernet
- Liaison RS232 \equiv liaison sans-fil (Zigbee)
- Mémoire Flash interne : 16 Mo - Taille(Σ) \approx 2 Mo
- Mémoire Flash externe (carte SD) : 1, 2, 8 Go

À titre d'exemple à l'aide d'une carte SD d'un Go, il est possible d'enregistrer en continu plus de 3 ans de mesure (de 2 fréquences inconnues) par seconde.

Prototypage achevé & validé

- Variance d'Allan sur 200 k points, en accord avec les performances prédites
- Validation du process VHDL du compteur réciproque de fréquences sur une architecture FPGA (Xilinx)
- Implémentation d'une gestion d'un capteur CMOS, et affichage sur LCD
- Développement d'un prototype qui va servir de plateforme de démonstration et d'enregistrement



Local reference stability issue

Differential measurement : the uncertainty on the local oscillator is seen on the frequency *difference*

If a differential (two resonator setup) is not feasible

- Assume we want a sensor working in -20 to 120°C range.
- Assume we wish to comply with 433-ISM regulation (1.5 MHz bandwidth)
- Assume we have a referenced (2 resonance) temperature sensor

⇒ 750 kHz/140 K=5.4 kHz/K *i.e.* 12 ppm/K.

Due to fabrication dispersion, we actually use 6 ppm/K

For 0.1 K accuracy, we must provide a long term local oscillator stability better than 0.5 ppm over the whole temperature range.

One conceivable solution (if applicable) : lock local oscillator on GPS.

GPS reference

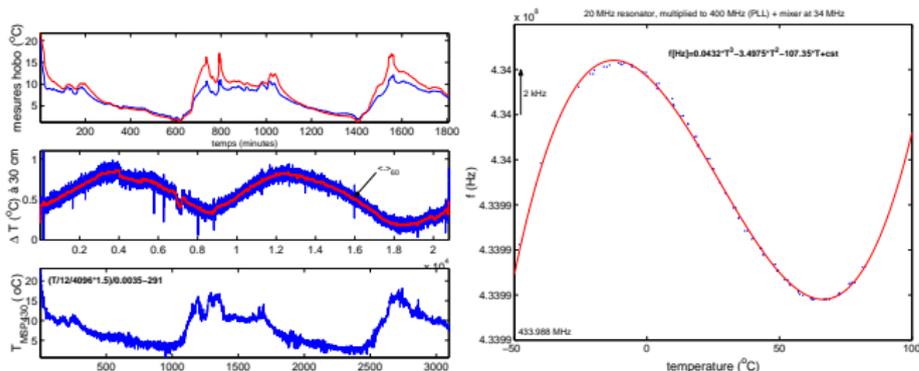
UT ONCORE™ (Precision Timing)		Standard Features	
R1121A111x	<50ns	X	RA/O5X Binary
R1121A115x	<50ns	X	ST/O5X Binary
R1221A111x	<50ns	X X	RA/O5X Binary
VP ONCORE™ (All Apps)		Thales A12	
B3121B111x	BIN/RTCM	X	RA/O5X BIN/NMEA
B3221B111x		X X	RA/O5X BIN/NMEA
B3121P111x	BIN/RTCM <50ns	X	RA/O5X BIN/NMEA
B4121P115x	BIN/RTCM <50ns	X	ST/O5X BIN/NMEA
B3121Z111x	BIN/RTCM <50ns	X X	RA/O5X BIN/NMEA
B3221Z111x	BIN/RTCM <50ns	X X X	RA/O5X BIN/NMEA
Motorola Oncore VP		Novatel Superstar2	
<ul style="list-style-type: none"> Operating temperature range of -30°C to +75°C 1PPS output aligned on GPS Time ± 200 ns 1Hz measurement output aligned on GPS Time Support for 62 predefined datums Field-upgradeable firmware (stored in Flash memory) through the TTL serial port Code and Carrier Phase tracking of L1 GPS frequency for increased accuracy 		<p>The SUPERSTAR II also takes advantage of the corrections offered by SBAS systems such as WAAS and EGNOS for improved accuracy. For precise timing applications, the SUPERSTAR II features a 1PPS accuracy of 50 nanoseconds (typical).</p>	

200 ns on a 1 s 1PPS signal ⇒ 0.2 ppm relative stability (< 0.5 ppm) *on the long term* since the GPS signal will not be affected by thermal drift, stress etc ...

(aging and drift monitored and compensated for by the ground segment of GPS)

Local reference stability issue (2)

- A reference oscillator might display a relative short term (<100 s) stability in the $10^{-9} - 10^{-10}$ range *under stable environmental condition*
- Embedded sensor monitoring \Rightarrow the reference oscillator is subject to large temperature variations (TTL oscillator)



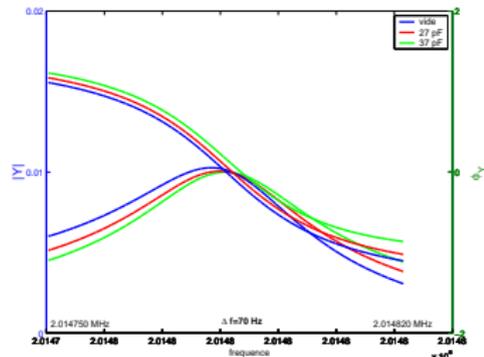
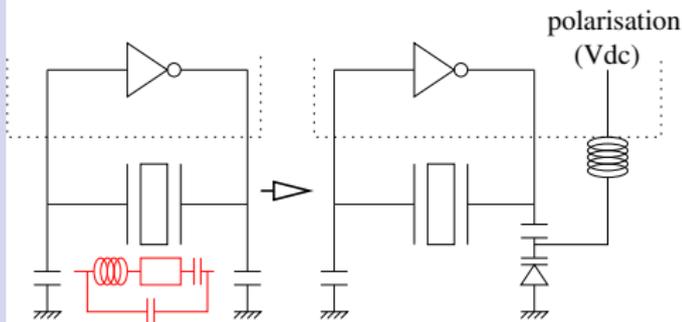
Left : 2.5-day measurement (1 measurement/min), interrogation unit outdoor

Middle : 4 month measurement (1 measurement/day), interrogation unit indoor

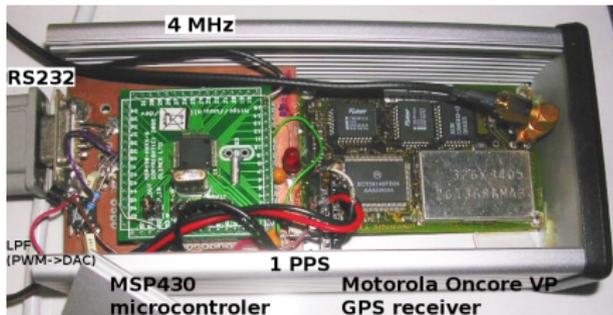
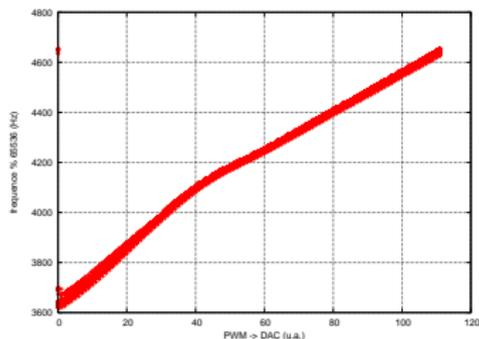
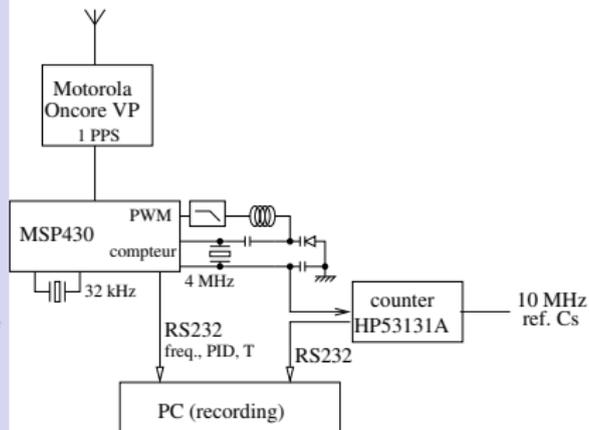
Right : reference output (20 MHz) multiplied to 433 MHz output, function of T

Local reference stability issue (3)

- Tuning a reference signal is performed by varying the capacitor on one of the arms of the quartz resonator
- A frequency counter monitors the oscillator frequency (here the gate time is accurate) and compensates for any drift from the setpoint frequency
- Direct counter \Rightarrow extremely simple to add to any microcontroller : use input capture and internal timer to monitor the oscillator

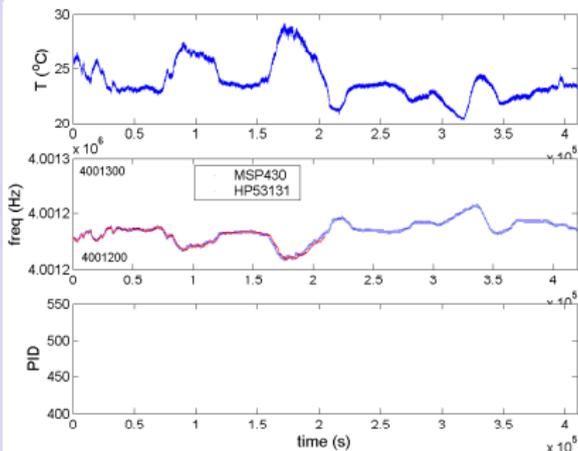


Local reference stability issue (4)

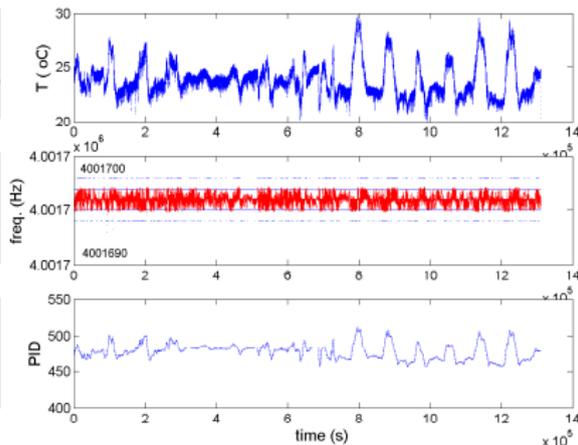


- Evolution of the frequency as a function of DC tuning voltage (open loop).
- 1 kHz tuning around 4 MHz (250 ppm)

Local reference stability : time analysis

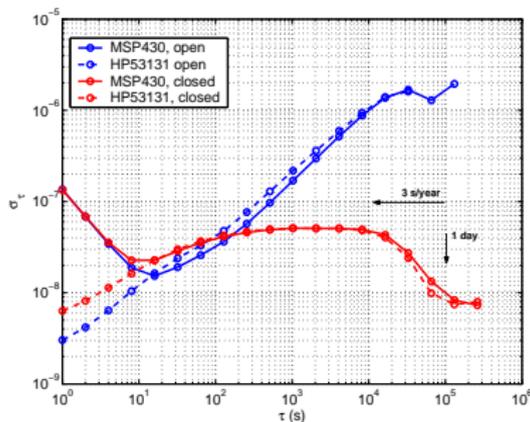
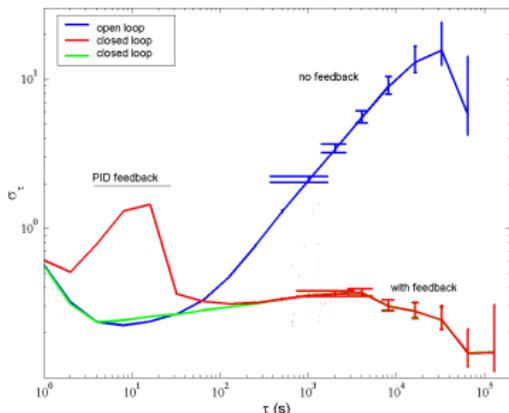


Open loop : -1 ppm/K around 25 $^{\circ}\text{C}$, temperature fluctuations are visible on the frequency



Closed loop : temperature fluctuations are visible on the feedback control

Local reference stability issue (5)



frequency deviation Δf

relative frequency deviation $\Delta f/f$

- $5 \times 10^{-8} = 0.05$ ppm is consistent with 50 ns relative stability
- Such a stability is enough for our sensing applications
- Global reference for *all* interrogation units, even widely spaced apart

Conclusion

Dans le cadre de l'interrogation de capteurs acoustiques radiofréquences :

- nous avons acquis la capacité à exploiter une électronique reconfigurable rapide (FPGA) pour la réalisation de circuits électroniques simples (compteurs)
- démontré les performances sur des mesures de capteurs de température et de contrainte (SAW), avec des performances proches des limites théoriques
- identifié une cause possible de dégradation de la qualité de la mesure en l'instabilité de l'oscillateur de référence
- proposé une solution à ces fluctuations de l'oscillateur de référence
 - compatible avec les contraintes de coût et en accord avec la consommation électrique de solutions concurrentes – avec l'asservissement sur le GPS.

Perspectives

- implémenter l'asservissement sur le GPS *dans* le FPGA sur un oscillateur à plus haute fréquence
- améliorer les performances du compteur en incluant les traitements numériques du signal proposés dans la littérature



<http://www.femto-st.fr>



<http://www.sensor.com>

