



Comité National Français de Radioélectricité Scientifique

Section française de l'

Union Radio Scientifique Internationale

Siège social : Académie des Sciences, Quai de Conti – Paris

JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU CNFRS

## " VERS DES RADIOCOMMUNICATIONS RECONFIGURABLES ET COGNITIVES "

PARIS, LES 28 ET 29 MARS 2006

---

### Projet e-grain : Microsystèmes distribués autarciques

---

*Chafik Meliani*

*Ferdinand-Braun-Institut für Hochfrequenztechnik  
Gustav-Kirchhoff-Straße 4 - 12489 Berlin - Allemagne  
meliani@fbh-berlin.de*

---

#### Résumé

*Les divers systèmes de communication ont aujourd'hui atteint un niveau de miniaturisation déjà très avancé. La vision pour le futur tend vers des microsystèmes autarciques, pouvant mesurer, se positionner et communiquer. Dans le cadre de cette approche, cet article traite de l'étude du système AVM (Microsystèmes distribués autarciques). L'idée est de remplacer la classique transmission pré-configurée commune par exemple à la connexion « ordinateur-imprimante », par un mini-réseau radio composé de plusieurs mini-terminaux « décentralisés » de quelques mm<sup>3</sup> dotés d'antennes directionnelles, d'un calculateur et d'un organe sensoriel . Le réseau ainsi formé est reconfiguré en continu, mais cela ouvre aussi la voie à des applications telles que les pointeurs virtuels ou autres détection d'objets.*

*Quelques techniques et résultats circuits pour ces transmissions radio sont présentés ainsi qu'une première application pour une transmission vidéo à 24 GHz utilisant ces mini-terminaux.*

*Mots clés : réseau, radio, distribué, e-grain*

---

#### Introduction

Les divers systèmes de communication ont aujourd'hui atteint un niveau de miniaturisation déjà très avancé. Notamment, les organes de communications permettent des débits de plus en plus importants et jouent de ce fait un rôle de précurseur dans le système global. La vision pour le futur tend vers des microsystèmes autarciques, pouvant mesurer, se positionner et communiquer. Une telle approche nécessite des briques de base pouvant fonctionner à de très faibles courants et tensions d'une part, et ayant un rendement suffisamment élevé d'autre part. Ce dernier est un élément clé dans la configuration du système global, car il détermine les distances de transmissions possibles via les puissances disponibles en sortie, ainsi que le type de codage et donc de quantité d'information qu'il est possible d'envoyer. Ces deux éléments sont décisifs pour explorer les éventuelles applications.

Dans le cadre de cette approche, cet article traite de l'étude du système AVM (Microsystèmes distribués autarciques) [1].

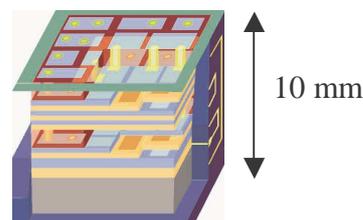
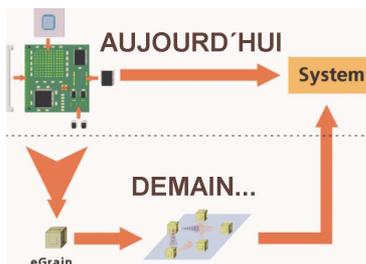


Fig. 1. e-grain

L'idée est de remplacer la classique transmission pré-configurée commune typiquement la connexion « ordinateur-imprimante », par un mini-réseau radio composé de plusieurs mini-terminaux « décentralisés » dotés d'antennes directionnelles, et d'un identifiant, et qui indifféremment serviraient de relais dans une liaison dynamique, ou seraient à l'origine d'une transmission après un événement, telle qu'une mesure d'une grandeur physique par exemple. L'avantage serait d'une part que le réseau ainsi formé est continuellement reconfiguré, et d'autre part, si un degré d'intégration suffisamment élevé est atteint pour les terminaux en question, des applications telles que des pointeurs virtuels ou autres détection d'objets seraient réalistes.

Dans le cadre de cet article, nous présentons dans une première partie les quelques briques de base développées pour cette application, notamment les circuits électroniques RF intégrés dans leur environnement [2]. Ensuite, nous présentons les quelques résultats préliminaires obtenus pour une transmission vidéo à 24 GHz.

En conclusion seront présentés les possibles améliorations, mais aussi les nouvelles applications pressenties pour ces systèmes.

## 1. Architectures et implantation

La figure ci-dessous décrit succinctement la configuration du système de transmission pour lequel nous avons opté.

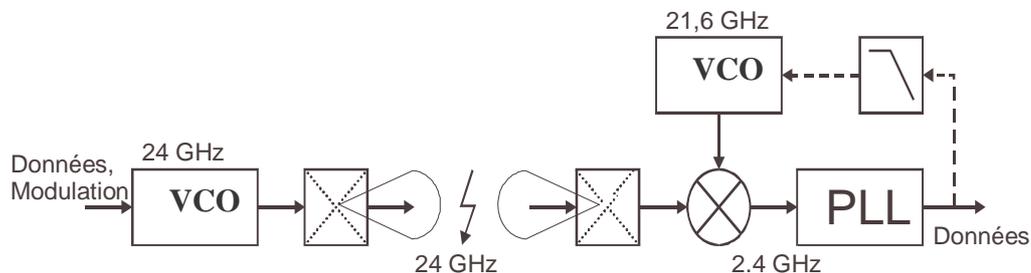


Fig. 2. Transmission à 24 GHz pour e-grain

Pour une première démonstration, c'est la modulation en fréquence qui a été choisie. La fréquence intermédiaire a été définie pour correspondre aux applications commerciales classiques à 2.4 GHz.

Quelques contraintes supplémentaires viennent encore se greffer pour fixer les caractéristiques des diverses briques de base : quelques exemplaires d'amplificateurs bas-bruit ont été réalisés au FBH en composants discrets, et les gains possibles garantissant une stabilité inconditionnelle sont de l'ordre de 40 dB. Les PLL présentant elles, une sensibilité de  $-20$  dBm à 2.4 GHz, l'on aboutit à une puissance minimale détectable de  $-60$  dBm pour un gain de 0 dB pour le mélangeur.

Le calcul des pertes de propagation à 24 GHz pour des distances de l'ordre du mètre, donne des valeurs de l'ordre de 60 dB. Un rapide budget de liaison nous mène donc à une valeur de 0 dBm émise.

Dans le cas d'une adaptation idéale, le VCO devrait fournir une puissance de 0 dBm, pour garantir la détectabilité du signal pour des gains d'antennes, et de mélangeurs nuls.

Reste cependant le problème du rendement. Le développement de la source d'énergie se faisant en parallèle, aucun ordre de grandeur n'a été fixé. La règle générale étant de fortement réduire la consommation des divers circuits en maintenant les niveaux de sortie aux valeurs précédemment indiquées. L'état de l'art pour ces domaines de fréquence et de niveaux de sortie étant de l'ordre 12% [3,4], il est réaliste de s'attendre au minimum à une consommation de quelques 50 mW pour la partie RF.

### 1.1. Technologie Circuits

C'est la filière technologique interne au FBH TBH-GaAs qui a été choisie pour la fabrication des divers circuit HF car elle répond au mieux au compromis de réactivité nécessaire lors de tests de concepts, mais aussi aux critère performances/coût : elle associe des fréquence de coupure relativement élevées de l'ordre de 40 GHz, à un coût intéressant pour la réalisation d'un faible nombre exemplaires.

### 1.2. L'antenne

La figure 3 présente une vue d'ensemble de l'antenne. Elle est formée par deux armatures connectées entre elles par une suite de plot constituant ainsi un volume d'air ayant la hauteur de ces plots.

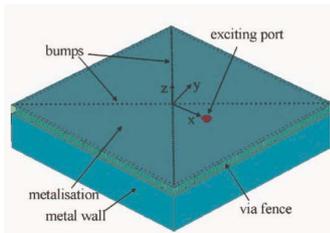


Fig.3. L'antenne.

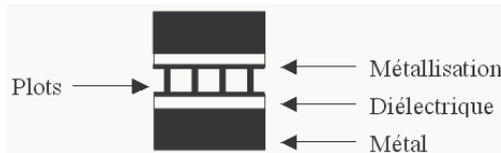


Fig.4. Structure verticale de l'antenne.

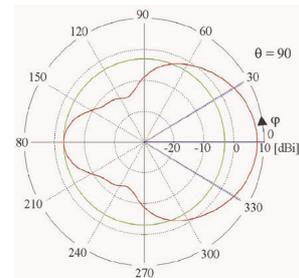


Fig.5. Caractéristique simulées de l'antenne. Directivité.

La structure globale est composée de quatre cadrans, antennes pour émettre et recevoir dans les quatre directions. Les premiers résultats montrent un gain de 3 dB et une directivité de 7 dBi à 24.5 GHz.

### 1.3. Le VCO

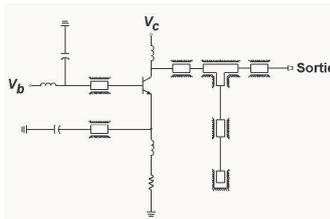


Fig.6. Schéma de l'oscillateur.

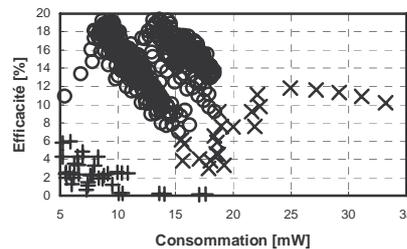


Fig.7. Rendement en fonction de la consommation pour les trois transistors : (x) 3x30, (o) 2x10, (+) 2x5  $\mu\text{m}^2$ .

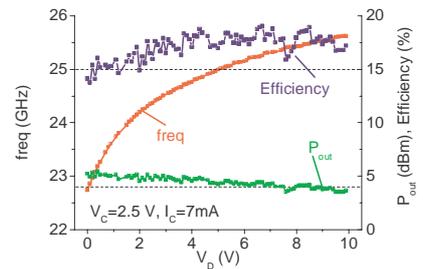


Fig.8. Rendement, niveau de sortie, et fréquence du signal en sortie du VCO.

C'est la structure à contre réaction série qui a été choisie [5] (cf. fig.6). Plusieurs versions ont été réalisées en utilisant des transistors de 3x30, 2x10, 2x5  $\mu\text{m}^2$  de surfaces d'émetteur fonctionnant à des densités de courant de 5 A/cm<sup>2</sup>. Une amélioration de la puissance en sortie est observée à consommation égale en passant du 3x30 au 2x10, qui se détériore pour le 2x5  $\mu\text{m}^2$ . Ceci est dû aux résistances de plus en plus élevées sur la base et l'émetteur du transistor, associé à un gain moins important.

**Caractérisation:** Les fréquences d'oscillation et puissances en sortie des trois oscillateurs ont été mesurées sous pointe à divers tensions et courants de collecteur. L'efficacité est calculée et présentée sur la figure 7. Comme prévu, une amélioration est observée lors du passage du transistor 3x30 à 2x10 mais pas pour le 2x5. Une valeur satisfaisante de 17% d'efficacité pour une consommation faible de 18 mW est ainsi obtenue. La puissance en sortie est de 5 dBm. Le bruit mesuré dans ces conditions est de -64 dBc/Hz à 100 kHz.

### 1.4. Le Mélangeur

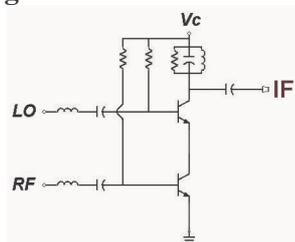


Fig.9. Schéma du mélangeur.

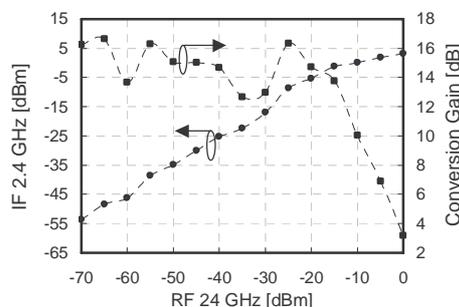


Fig.10. Niveau du signal en sortie, et gain de conversion du mélangeur pour une fréquence RF de 24 GHz.

C'est la structure Cascode qui a été choisie pour le mélangeur. Ce concept nécessite globalement le double de la tension collecteur d'un émetteur commun, mais cela, paradoxalement n'est absolument pas inintéressant dans le cadre de cette application : la batterie utilisée pour les mini-terminaux délivre un tension de 3V, un circuit nécessitant moins de tension collecteur pourrait s'avérer désavantageux, car une régulation

ou division de tension devra être réalisée, d'où un surplus de consommation d'énergie. De plus, une tension collecteur plus élevée a permis de légèrement baisser les valeurs des courants.

Par ailleurs, la configuration du système présentée dans la figure 2, nécessite une isolation élevée entre l'entrée du mélangeur (directement connectée à l'antenne !) et sa sortie, connectée à la boucle de verrouillage de phase. Le Cascode ayant une bien meilleure isolation que l'émetteur commun s'avère être le candidat adéquat.

Caractérisation: Le circuit a été réalisé et mesuré sous-pointes et a une faible consommation de 17 mW avec une sensibilité de  $-70$  dBm, et un gain de l'ordre de 14 dB.

### 1.5. Le diviseur de fréquence

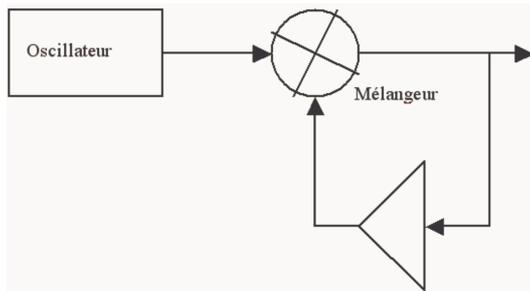


Fig.11. Principe du diviseur de fréquence à verrouillage de fréquence.

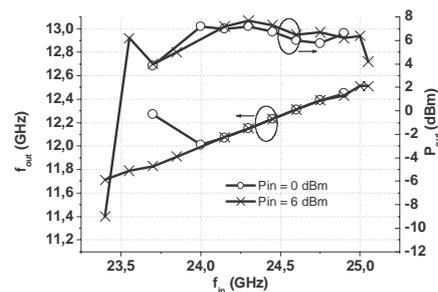


Fig.12. Puissance et fréquence du signal en sortie du diviseur de fréquence pour une consommation de 25 mW.

Le problème du diviseur de fréquence est atypique. La configuration de la figure 2 ne comprend pas, à priori de diviseur de fréquence. Pour une première réalisation, nous avons effectivement fait l'économie d'un circuit plutôt gourmand en énergie mais son utilisation pourrait être nécessaire, pour stabiliser la fréquence de l'émetteur notamment. Dans le cadre de la figure 2, l'antenne disposant d'un facteur Q relativement élevée, fixe la fréquence d'oscillation à sa fréquence de résonance propre. Néanmoins, la brique de base diviseur de fréquence devait être abordée dans le cadre de cette étude dans l'éventualité d'autres configurations.

Les structures dites statiques de ces circuits sont très gourmandes en énergie car elles comprennent plusieurs transistors. Même des architectures telles que les diviseurs dits re-génératifs [6] nécessitent un nombre relativement important de transistors car généralement basées sur des cellules de Gilbert.

Il existe un troisième type de diviseurs, qui s'apparente au deuxième : le diviseur à verrouillage de fréquence. Le principe en est le suivant : si un signal de fréquence  $f$  est injecté dans un oscillateur de fréquence d'oscillation libre  $f_0$ . Sous certaines conditions de puissance d'entrée et de facteur Q de l'oscillateur, ce dernier peut fonctionner en régime forcé à  $f$ . Le même raisonnement peut être établi pour un signal d'entrée à  $2xf$ . Dans ce dernier cas : un signal à la fréquence  $f$  est généré, verrouillé en phase à un signal d'entrée  $2xf$ . Une division par deux est donc effectuée.

L'avantage de cette approche est qu'elle peut être adaptée aux besoins de basse consommation. Le circuit que nous avons proposé est simplement un oscillateur à fréquence d'oscillation libre de 12 GHz, disposant d'une entrée sur la base du transistor, le nœud à l'impédance la plus haute. L'injection d'un signal sur à ce nœud, modifie la fréquence propre d'oscillation.

Caractérisation: Grâce à cette technique, il a été possible d'obtenir des valeurs de consommation du diviseur de fréquence tout à fait comparable à celle obtenues en CMOS ! Le circuit consomme 25 mW pour une puissance en sortie de 6 dBm à 12 GHz. Un intervalle de verrouillage de 1 GHz pour une puissance en entrée de 0 dBm.

## 2. Transmission à 24 GHz

Les conditions de puissance pour le bilan de liaison établi dans la première partie ont été finalement remplies. Pour une distance de transmission de l'ordre du mètre, l'on dispose en théorie d'environ 15 dB de marge. (5 dBm de plus pour l'oscillateur, quelques dB de plus pour l'antenne, et une dizaine de dB de gain pour le mélangeur). L'on verra par la suite que les pertes de couplage, vont consumer une partie de cette avance.

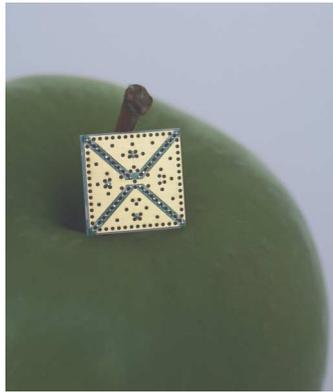


Fig.13. Un mini-terminal e-grain.

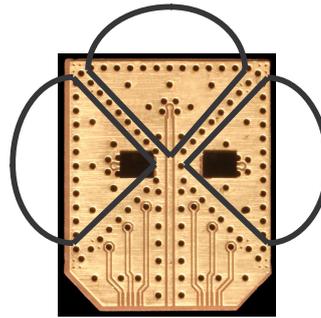


Fig.14. Vue détaillée des antennes avec les VCO montés.

**Caractérisation:** Les premières mesures ont été faites pour des distance de l'ordre du mètre. Les puissances reçues sont plus faibles que celles prévues à cause, notamment des pertes de couplage oscillateur-antenne et lors du montage mécanique. Néanmoins, ces résultats ont été suffisants pour démontrer la faisabilité d'un tel système, et une transmission vidéo à 24 GHz a pu être expérimentée pour une consommation globale de la partie RF de 38 mW : Une caméra a été montée sur un e-grain. La fréquence de l'oscillateur est modulée par le signal vidéo. La démodulation se fait à la réception suivant la configuration de la figure 2.

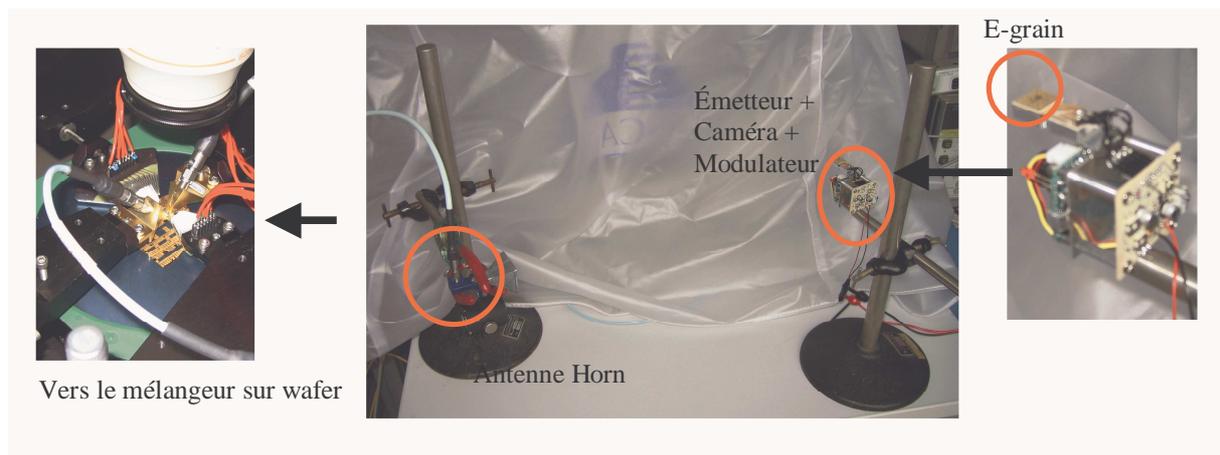


Fig.15. Test final : Transmission video à 24 GHz

### Conclusion

Le projet e-grain en cours au sein du FBH a été présenté. L'idée consiste à réaliser un réseau radio à 24 GHz utilisant des mini-terminaux directionnels disposant d'un calculateur et d'un organe sensoriel. Dans le cadre de cet article, les principe de base de ce système ont été abordés ainsi que les aspects fabrication et conception de circuits RF.

La contrainte principale pour ces systèmes devant être autarciques et miniaturisés est bien évidemment la consommation d'énergie. Les techniques et architectures liées à la conception de ces briques de base avec des contraintes de très basse consommation ont été évoquées et quelques premiers résultats ont été présentés. Les premières valeurs de consommation inférieures à 40 mW pour toute la partie RF sont encourageants, et ont rendu réaliste l'intégration dans un seul boîtier des fonction émission.

Un premier démonstrateur a été réalisé lors d'une transmission vidéo à 24 GHz utilisant ces mini-terminaux.

Des améliorations sont bien évidemment encore nécessaires, mais cela ouvre une voie intéressante pour les applications à base de réseaux reconfigurables.

## Références bibliographiques

[1] [www.e-grain.org](http://www.e-grain.org)

[2] C.Meliani, P.Talukder, J.Hilsenbeck, M.Huber, G.Böck, and W.Heinrich, « Integrated circuits and 3D packaging for low power 24GHz Front-End », dans la revue Frequenz, 58, 03-04/2004.

[3] Hayama, N., Shimizu, J., and Honjo, K., "Fully monolithic 22 GHz-band AlGaAs/GaAs HBT oscillator", Electron. Lett., Sept. 1991, pp. 1862-1863.

[4] Donghyun, B., Jeonggeun, K., Songcheol, Ho., "A dual-band (13/22-GHz) VCO based on resonant mode switching", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 13, Oct. 2003, pp. 443-445.

[5] Schott, M., Kuhnert, H., Lenk, F., Hilsenbeck, J., Würfl, J., and Heinrich, W., "38 GHz Push-Push GaAs MMIC Oscillator", Proc. MTT-S, Int. Microwave Symp., Seattle 2002.

[6] Knapp, H., Wurzer, M., Meister, TF., Aufinger, K., Böck, J., Boguth, S., Schäfer, H., "86 GHz Static and 110 GHz dynamic frequency dividers in SiGe Bipolar technology", IEEE MTT-S Digest, 2003.