



Caractérisation et Optimisation des Amplificateurs Non Linéaires

Jacques SOMBRIN, TéSA

1/02/2023


7 boulevard de la Gare – 31500 Toulouse – France
contact@tesa.prd.fr – www.tesa.prd.fr

1

Plan de la présentation

- **Introduction - Besoins futurs des liaisons de transmission et faible consommation**
- Amplificateur non linéaire
- Optimisation de la puissance RF nominale
- Optimisation de la puissance consommée
- Optimisation l'énergie consommé par bit transmis
- Améliorations et conclusion



Présentation ONERA - Jacques Sombrin - 1 février 2023

2

2

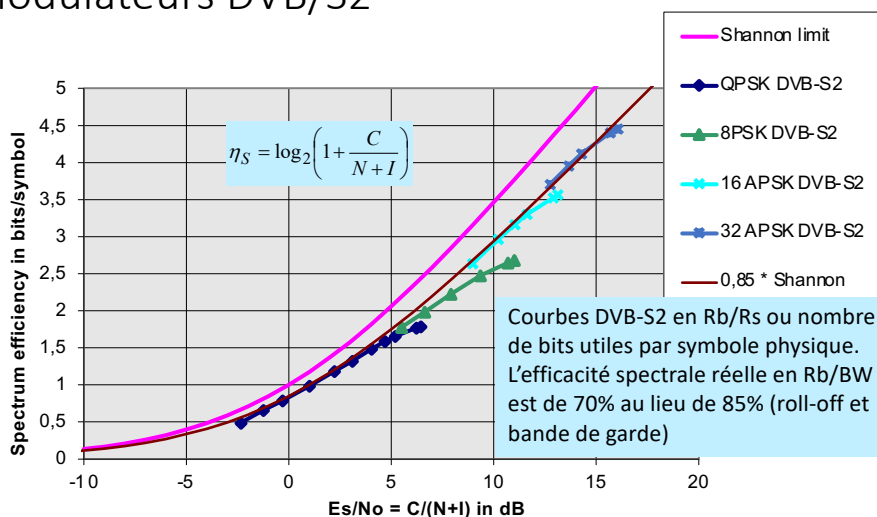
Évolutions dans les télécoms

Réponses techniques classiques

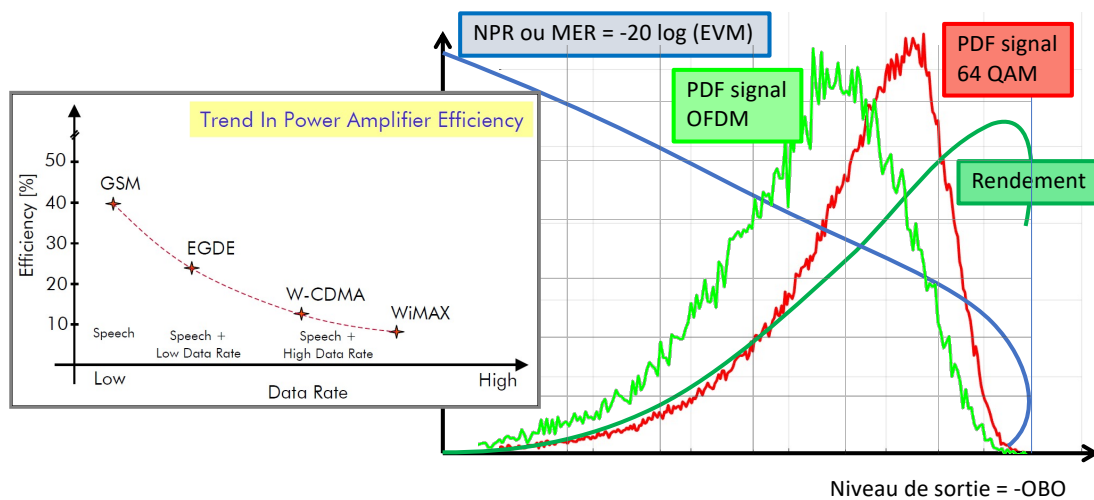
- Besoins de capacité augmentent (vidéo)
 - +24 % par an constaté en 2020
 - + 60 % en mobile par an en France
- Bandes de fréquences limitées
 - ⇒ Augmentation de l'efficacité spectrale
 - ⇒ Signaux de plus en plus complexes
- Borne de Shannon : l'efficacité spectrale dépend du rapport signal sur bruit total C/N ou C/(N+I)
 - ⇒ Augmentation de la puissance RF pour augmenter le C/N
- L'amplificateur de puissance est non linéaire.
 - Bruit d'intermodulation dans la bande s'ajoute au bruit thermique.
 - Rapport signal sur bruit d'intermodulation : C/I ou NPR
 - ⇒ Augmentation de la linéarité pour augmenter le C/(N+I)
 - ⇒ Baisse du rendement de l'amplificateur
- Effet catastrophique sur la consommation d'énergie



Courbe de Shannon et performances des démodulateurs DVB/S2



Courbes de rendement et de linéarité d'un amplificateur



TÉSA

Présentation ONERA - Jacques Sombrin - 1 février 2023

5

5

Tendance inacceptable à long terme

- En 2012, les télécoms consommaient environ 2% de l'énergie totale produite dans le monde (avec Internet et les fermes de données mais 70% pour l'accès radio)
- Au même niveau que le transport aérien

Acceptable à court terme mais



- Augmentation du secteur des télécoms plus rapide que tous les autres secteurs
- Croissance encore plus grande pour le mobile
- En France en 2018 : 5% (avec refroidissement et serveurs)
- Inquiétude très forte pour le futur

TÉSA

Présentation ONERA - Jacques Sombrin - 1 février 2023

6

6

Convergence satellite sol

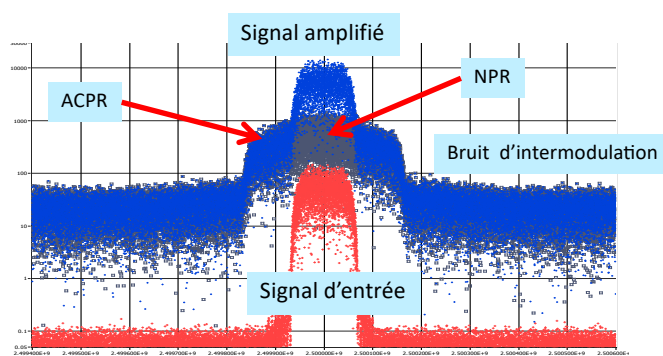
- Convergence technique
 - Intérêt d'un standard commun plutôt que des options rajoutées pour intégrer les satellites : 5G et 6G prennent en compte les NTN (non terrestrial networks)
- Convergence d'approche des conceptions
 - Satellite : compromis entre capacité et consommation (coût des équipements satellite était faible devant le coût du lancement et du segment sol)
 - Télécoms sol : compromis entre capacité et coût (le coût de la consommation était faible devant les autres coûts, aujourd'hui la consommation, la dissipation et le refroidissement posent des problèmes)
 - Il faut maintenant traiter globalement l'optimisation de la capacité, de la consommation et du coût dans les deux cas
- Téléphones mobiles avec accès direct par satellite
 - seulement les communications d'urgence pour le moment

Plan de la présentation

- Introduction - Besoins futurs des liaisons de transmission et faible consommation
- **Amplificateur non linéaire**
- Optimisation de la puissance RF nominale
- Optimisation de la puissance consommée
- Optimisation l'énergie consommé par bit transmis
- Améliorations et conclusion

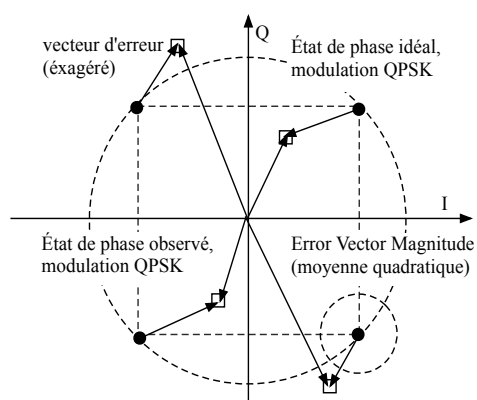
Bruit d'intermodulation : NPR, ACPR

- Modulation 16 APSK filtrée SRC 0,35
- Amplificateur SSPA
- Bruit d'intermodulation dans la bande (Noise Power Ratio) et hors bande (Adjacent Channel Power Ratio)



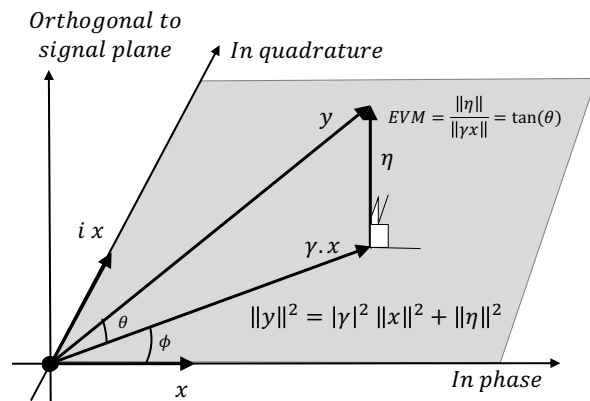
EVM : Error Vector Magnitude

- EVM : rapport de tensions, bruit sur signal, exprimé en %
- $MER = -20 \cdot \log(EVM)$ rapport S/B en dB
- Identique au NPR (valeur moyenne dans la bande) dans les mêmes conditions de signal
- Équipement de mesure commercial
- Standard utilisé par les opérateurs télécoms



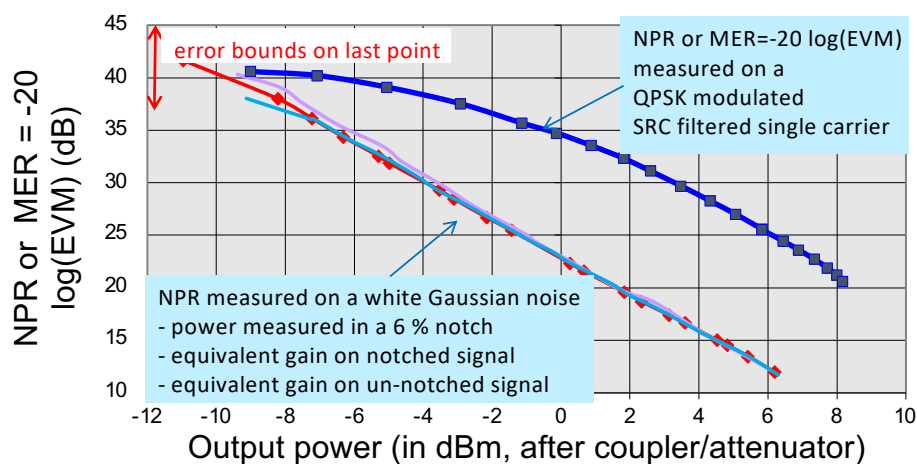
Identité des mesures d'EVM et de NPR, en particulier pour un signal OFDM

- Les deux mesures identifient le « bruit » comme la partie du signal reçu (bruité et distordu) qui n'est pas corrélée au signal transmis (idéal)
- On réalise une projection orthogonale du signal reçu y sur le signal transmis x



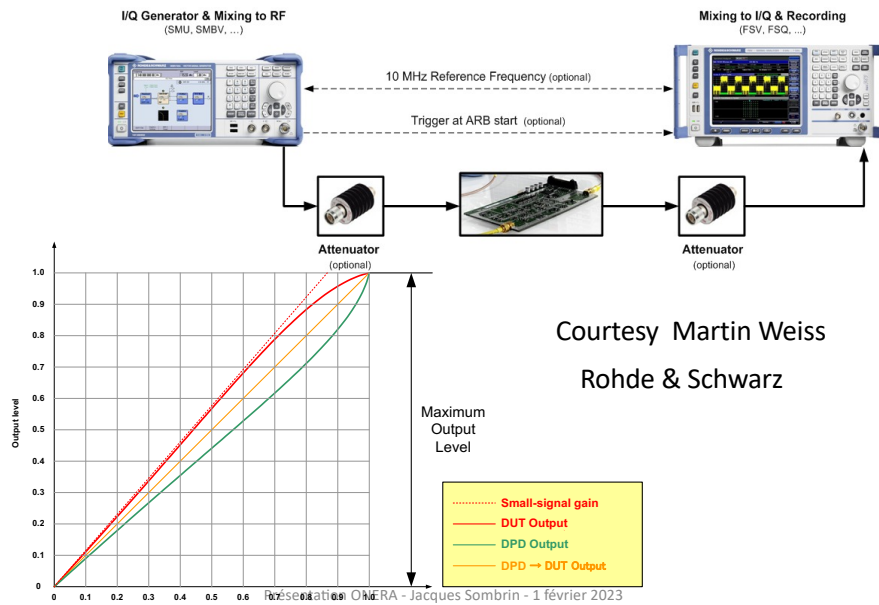
11

Résultats de mesure de NPR et EVM sur deux signaux différents pour un ATOP linéarisé sur 500 MHz



12

Modélisation et linéarisation



13

Optimisation des amplificateurs non linéaires

- Fonctionnement plus linéaire en recul de puissance
- Utiliser un amplificateur de puissance nominale plus élevée
- ⇒ Maîtriser le compromis puissance à saturation/linéarité
- Problème de consommation car le rendement diminue fortement quand on fonctionne dans la zone linéaire des amplificateurs
- ⇒ Maîtriser le compromis consommation/ linéarité
- Plus récemment, problème de dissipation et refroidissement
- Le refroidissement est toujours critique sur les satellites
- Il devient prépondérant dans les stations de base de téléphonie mobile, la consommation de la climatisation n'est plus négligeable
- ⇒ Maîtriser le compromis dissipation/ linéarité
- On a souvent les 3 contraintes à la fois

14

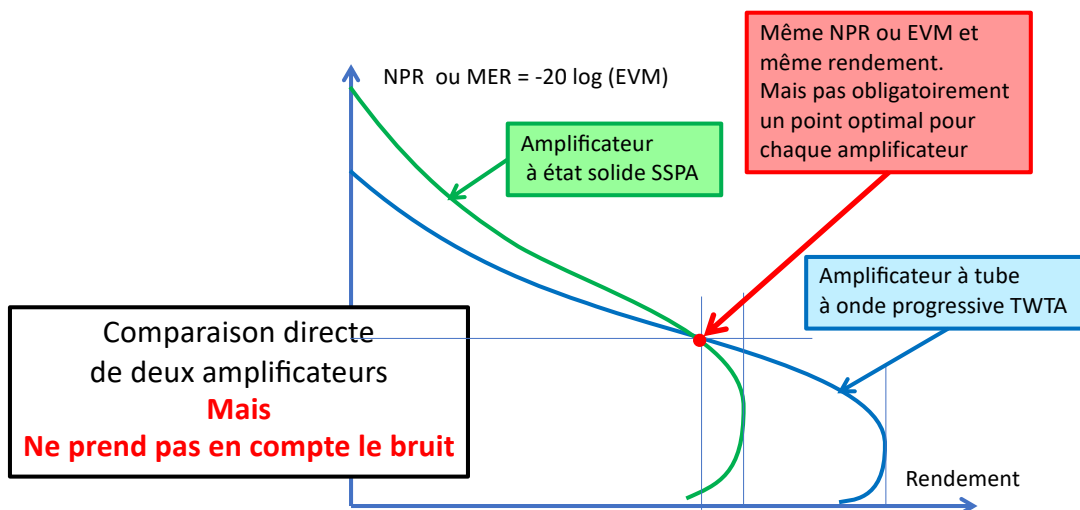
Pourquoi optimiser la consommation au dixième de dB près sur un satellite?

- **Précision de mesure sur la puissance RF absolue : 0,25 dB**
- Mais sur un satellite télécom (ou radar), la consommation de la charge utile représente 80% de la puissance des panneaux solaires et des batteries donc une grande partie de la masse au décollage et du prix du lancement
- Si on gagne 0,1 dB sur la consommation, on peut augmenter d'autant la puissance RF, soit 2% et la capacité du satellite augmente de 2% à coût quasiment identique
- Ceci permet d'augmenter le chiffre d'affaire de l'opérateur de 2% à coût identique et donc son bénéfice de 2% du CA
- Si le bénéfice attendu est de l'ordre de 20% du CA, il va passer à 22% ce qui représente une augmentation relative de 10%
- Paramètre essentiel dans un dossier présenté aux investisseurs potentiels ou aux décideurs du projet spatial
- **La consommation devient un critère très important aussi dans le domaine de la téléphonie mobile**

Courbes de mérite et optimisation

- On veut comparer deux amplificateurs afin de choisir le mieux adapté pour une transmission
- On veut comparer le même amplificateur avec des réglages différents pour choisir le meilleur réglage de la puissance nominale de l'amplificateur, du point de fonctionnement, de l'adaptation des circuits, du composant, ...
- On doit choisir (et ne pas perdre de vue dans les calculs) ce que l'on veut optimiser et ce qui est une contrainte :
 - La capacité, le $C/N+1$, l'efficacité spectrale
 - la puissance RF nominale,
 - la puissance RF utilisée, le point de fonctionnement, OBO
 - la puissance consommée,
 - Le rendement,
 - la puissance dissipée,
 - ...

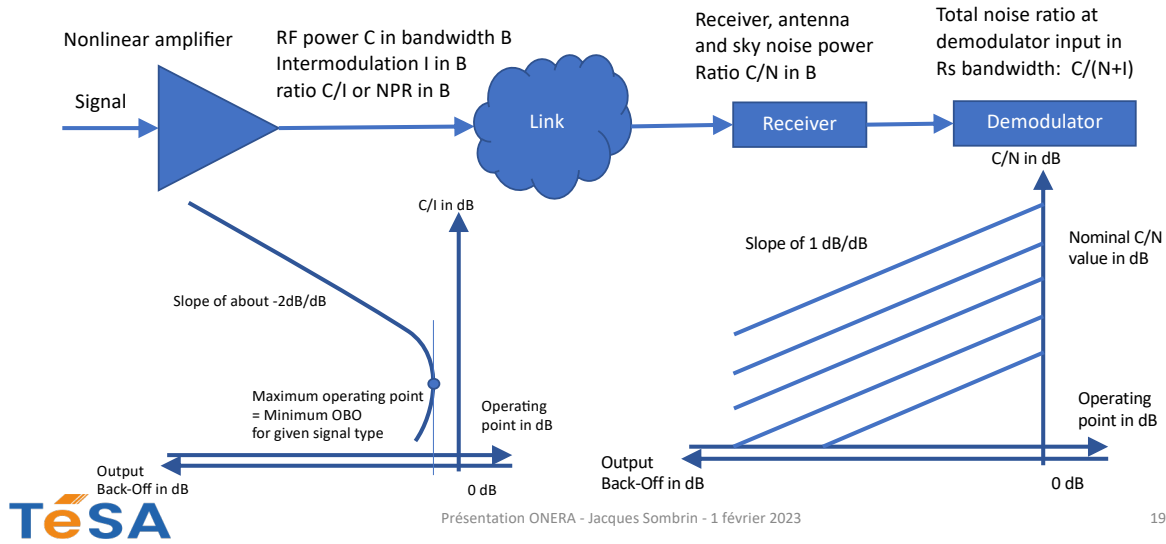
Courbes de mérite d'amplificateurs non linéaires



Plan de la présentation

- Introduction - Besoins futurs des liaisons de transmission et faible consommation
- Amplificateur non linéaire
- **Optimisation de la puissance RF nominale**
- Optimisation de la puissance consommée
- Optimisation l'énergie consommé par bit transmis
- Améliorations et conclusion

Bilan de liaison non-linéaire simplifié

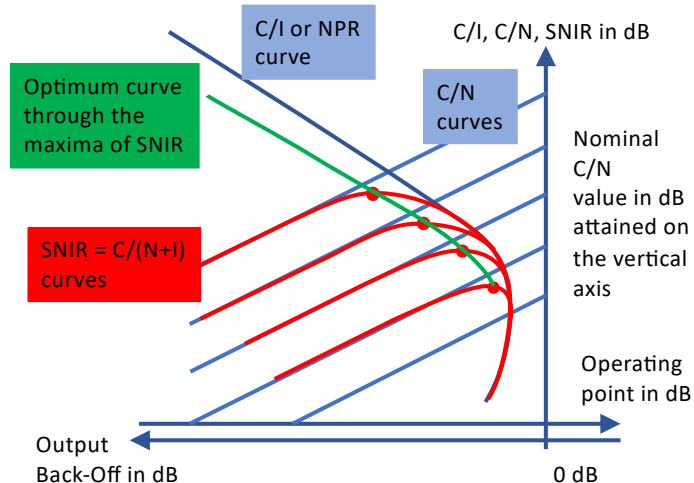


19

Combinaison géométrique du C/I et du C/N

$$\left(\frac{C}{N+I}\right)^{-1} = \left(\frac{C}{I}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{N}\right)^{-1}$$

Le lieu des maxima des courbes de SNIR ou C/(N+I) donne le meilleur point de fonctionnement pour une valeur donnée de C/(N+I)



TÉSA

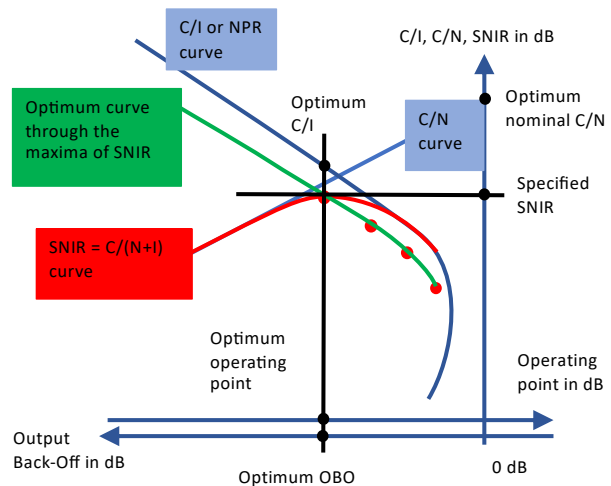
Présentation ONERA - Jacques Sombrin - 1 février 2023

20

20

Puissance RF minimale

- Rapport signal sur bruit+intermodulation donné dans le démodulateur :
 - point sur la courbe optimale
 - OBO optimal
 - courbe SNIR
 - courbe C/N
- Minimisation de la puissance RF nominale de l'amplificateur permettant d'obtenir ce rapport signal sur bruit+intermodulation dans le démodulateur



Plan de la présentation

- Introduction - Besoins futurs des liaisons de transmission et faible consommation
- Amplificateur non linéaire
- Optimisation de la puissance RF nominale
- **Optimisation de la puissance consommée**
- Optimisation l'énergie consommé par bit transmis
- Améliorations et conclusion

Prise en compte du rendement

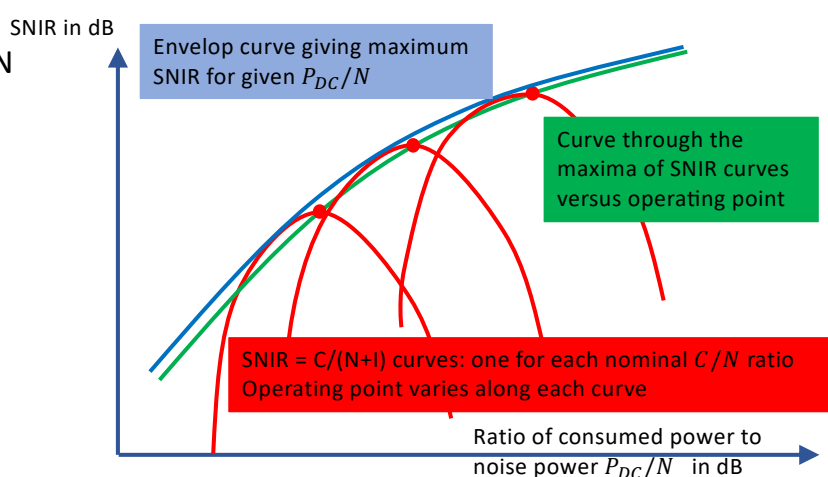
- On a aussi une courbe donnant le rendement de l'amplificateur en fonction du point d'opération (ou de l'OBO)
- On peut combiner la valeur du rendement en un point donné avec la valeur du C/N et celle de l'OBO pour obtenir la puissance consommée :

$$\frac{P_{DC}}{N} = \frac{C}{N} \frac{10^{-OBO/10}}{\eta(OBO)}$$

- Les courbes de C/(N+I) en fonction de OBO deviennent des courbes de C/(N+I) en fonction de la puissance consommée

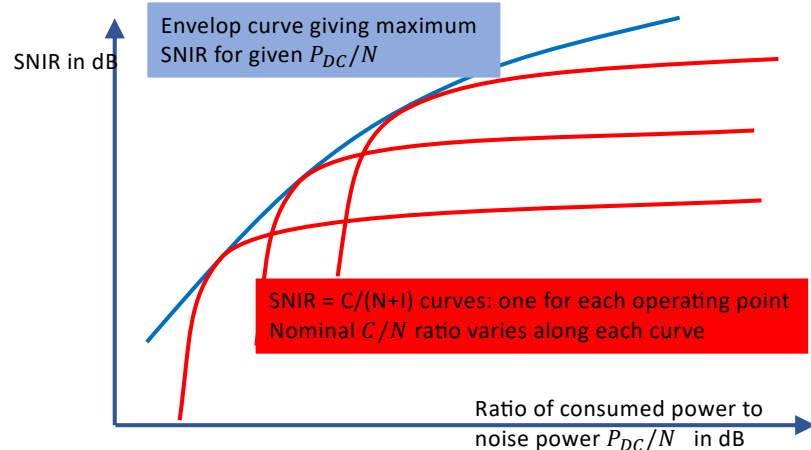
Enveloppe des courbes de C/(N+I)

- Une courbe pour chaque valeur de C/N
- L'OBO varie sur chaque courbe
- Mêmes courbes que dans les figures précédentes
- L'enveloppe est au-dessus des maxima de chaque courbe



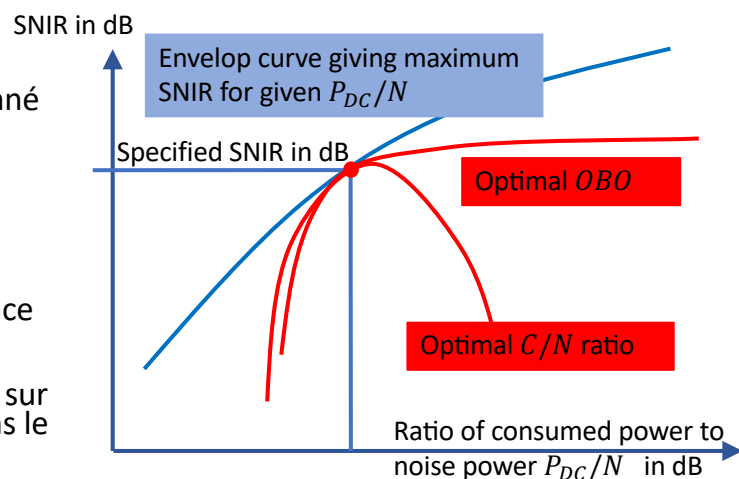
Autre présentation du réseau de points

- Une courbe pour chaque valeur d'OBO (donc de rendement)
- Le C/N varie sur chaque courbe
- Pas de maxima sur les courbes du réseau mais des asymptotes
- Même enveloppe



Utilisation de l'enveloppe

- Rapport signal sur bruit+intermodulation donné dans le démodulateur :
→ point sur la courbe enveloppe optimale en puissance consommée
→ OBO optimal
→ C/N optimal
- Minimisation de la puissance consommée par l'amplificateur permettant d'obtenir ce rapport signal sur bruit+intermodulation dans le démodulateur

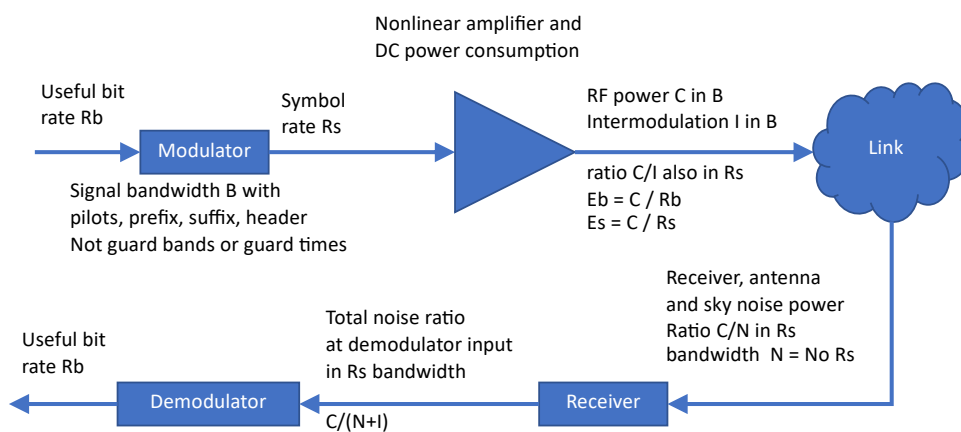


Plan de la présentation

- Introduction - Besoins futurs des liaisons de transmission et faible consommation
- Amplificateur non linéaire
- Optimisation de la puissance RF nominale
- Optimisation de la puissance consommée
- **Optimisation l'énergie consommé par bit transmis**
- Améliorations et conclusion

27

Optimisation du système complet



On va prendre en compte la courbe de Shannon ou les performances du démodulateur pour calculer l'énergie consommée par bit utile transmis

28

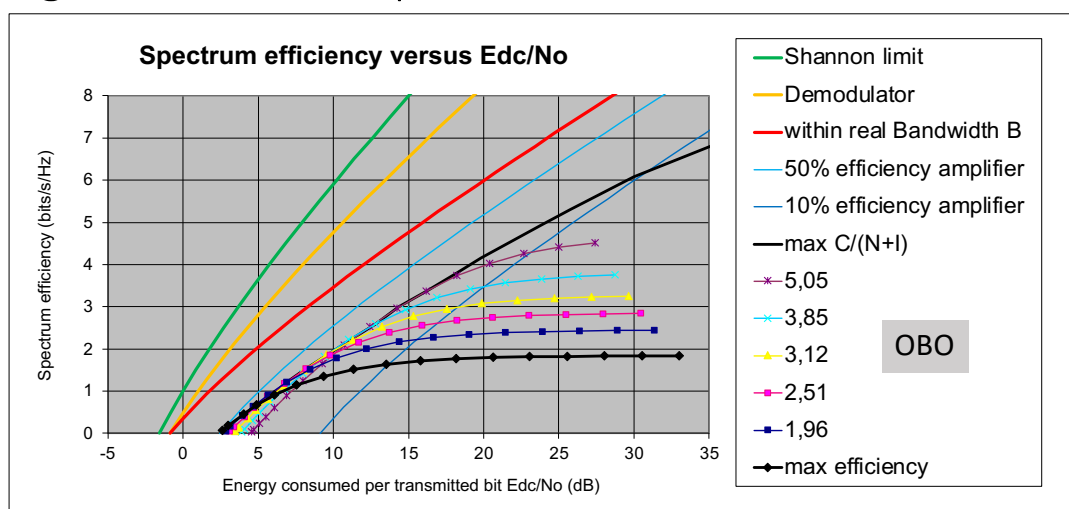
Transformation des courbes

- La courbe de performance du démodulateur permet d'obtenir le nombre de bits utiles par symbole que l'on peut obtenir pour une valeur de $C/(N+1)$ spécifiée
- On peut alors transformer la puissance consommée en énergie consommée par bit :

$$\frac{P_{DC}}{N} = \frac{E_{DC}}{N_0} \frac{R_b}{R_s}$$

- Sur l'axe vertical, on utilise l'efficacité spectrale R_b/B en bit/s/Hz
- Il faut prendre en compte la bande passante B qui est supérieure à R_s (roll-off 10 à 30% et bande de garde 10%)

Courbes d'efficacité spectrale en fonction de l'énergie consommée par bit

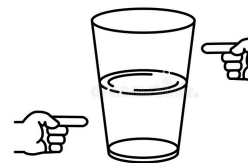


Plan de la présentation

- Introduction - Besoins futurs des liaisons de transmission et faible consommation
- Amplificateur non linéaire
- Optimisation de la puissance RF nominale
- Optimisation de la puissance consommée
- Optimisation l'énergie consommé par bit transmis
- **Améliorations et conclusion**

Synthèse sur les courbes de mérite

1. On est très loin de la courbe de Shannon
2. Il y a une grande marge d'amélioration



- On n'améliorera pas significativement le rendement en travaillant uniquement sur la technologie des amplificateurs ou bien sur celle des linéariseurs ou bien sur les signaux ou bien sur les égaliseurs
- Il faut améliorer globalement l'ensemble de la chaîne non linéaire et des signaux

Nouveaux signaux

- Les signaux actuels sont optimisés pour une transmission sur un canal linéaire bruité en E_b/N_0 avec ISI nul.
Résultat optimum : filtrage adapté et filtrage de Nyquist
- Ces signaux ne sont pas optimaux en E_c/N_0 dans une transmission non linéaire ou avec interférences
- Nouveaux signaux : « Time packing », « frequency packing », porteuses compactes, « faster than Nyquist », SC-OFDM, ...
- Nécessité d'égalisation à la réception et éventuellement de pré-distorsion à l'émission
- Peut-on faire mieux que la courbe de Shannon en éliminant l'hypothèse de linéarité du canal et du filtrage de Nyquist qui permet d'obtenir des interférences inter-symboles nulles ?

Solution possible : Multiplication du nombre de liaisons

- Utiliser des liaisons identiques en parallèle (coût à peu près proportionnel au nombre de liaisons donc à la capacité mais interférences entre les liaisons)
- Augmenter la bande passante (coût presque constant mais faible disponibilité car il y a d'autres utilisateurs)
- Réutiliser la même bande passante un grand nombre fois sur plusieurs liaisons en maîtrisant les auto-interférences
 - Augmentation du nombre de faisceaux ou de cellules et augmentation de la couverture
 - Augmentation du nombre de faisceaux ou de cellules dans une couverture donnée
 - Augmentation du gain antenne et diminution de la puissance nécessaire pour chaque liaison à capacité identique

Le bilan de liaison en diffusion

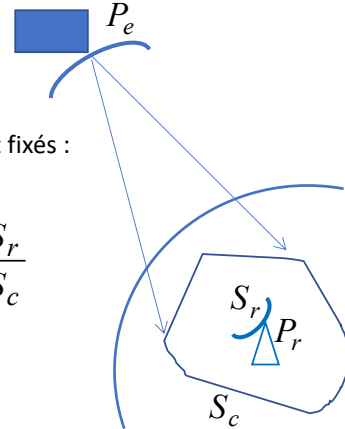
- La couverture de réception est fixée :

$$S_c = \text{Surface Couverture}$$

- Le diamètre et le rendement de l'antenne de réception sont fixés :

$$S_r = \text{Surface équivalente Antenne de réception}$$

- Puissance reçue, en première approximation : $P_r \approx P_e \frac{S_r}{S_c}$
- Elle est indépendante de la fréquence et de la distance
- Il faut prendre en compte :
 - Pertes des équipements (dépendent de la fréquence)
 - Pertes atmosphériques (dépendent de la fréquence)
 - Pertes par débordement (hors couverture)
 - Ondulation dans la couverture

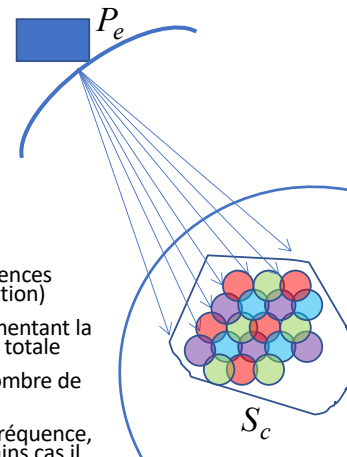


Bilan de liaison en multifaisceaux

- Si on découpe la couverture en cellules
- Et si on est capable de fabriquer des antennes dont chaque faisceau couvre une cellule
- **Même puissance totale d'émission**

Mais

- Le diamètre de l'antenne bord est nettement plus grand
- Les pertes par débordement de chaque faisceau deviennent des interférences pour les faisceaux de même couleur (même fréquence et même polarisation)
- On divise le spectre par 3 ou 4 pour minimiser les interférences (en augmentant la distance entre faisceaux de même couleur), on peut baisser la puissance totale
- Intéressant si le nombre de faisceaux est nettement plus grand que le nombre de couleurs (typiquement > 20)
- La charge utile est plus complexe, centaine de voies de changement de fréquence, de filtrage et d'amplification, routage de centaines de guides, dans certains cas il faut plusieurs antennes (3 ou 4)



Montée en fréquence et en bande passante

- C'est une solution technique intéressante
- L'augmentation de bande passante permet une augmentation proportionnelle de la capacité pour une augmentation proportionnelle de puissance émise
- Alors que l'augmentation de la complexité des signaux à bande passante fixée nécessite beaucoup plus de puissance pour la même augmentation de capacité
- À plus haute fréquence, les antennes sont plus petites pour un même gain et il est possible de réaliser de très nombreux faisceaux avec une taille d'antenne maîtrisée et une faible puissance par élément
- La formation de faisceaux par des antennes actives en émission et en réception devient plus intéressante que le MIMO
- Par contre le coût du matériel hyperfréquence et antenne à plus haute fréquence est nettement supérieur, d'autant plus pour les antennes actives
- Une partie du gain doit être utilisée pour diminuer les interférences et auto-interférences

Conclusion

- L'optimisation de la consommation par bit transmis va dans la bonne direction
- Il faut pour cela maîtriser les non linéarités (linéariseurs) et optimiser le fonctionnement des amplificateurs non linéaires (en puissance RF nominale ou en énergie consommée par bit transmis ou en énergie dissipée par bit transmis) pour une efficacité spectrale donnée
- Les courbes optimales montrent la limite de l'augmentation d'efficacité spectrale si on optimise seulement l'amplificateur
- Au-delà, il faut augmenter le nombre de liaisons en parallèle :
 - L'augmentation du nombre de faisceaux à couverture totale constante est le moyen le plus sûr pour augmenter la capacité du système satellite à puissance constante
 - L'augmentation du nombre de cellules et la diminution de leur taille pour les télécommunications mobiles
- Limite par le coût et la complexité du système mais cette limite se déplace suite à l'augmentation du coût de l'énergie consommée et dissipée
- L'hybridation des satellites et des réseaux sol peut diminuer les coûts en utilisant la technologie la plus appropriée dans chaque cas (urbain, suburbain, rural)

Des questions ?



Références

Mesure des non linéarités C/I, NPR, EVM, MER, TD (total degradation)

- N. Blachman, "Band-Pass Nonlinearities", IEEE Trans. on Information Theory, April 1964, pp. 162-164
- R. J. Westcott, "Investigation of multiple FM+FDM carriers through satellite TWT operating near to saturation", Proc. IEE, Vol. 114, No. 6, June 1967, pp. 726-740
- J. Sombrin, "Non-linéarités des tubes à onde progressive", Note Technique CNES N° 28, janvier 1976
- J. Sombrin, "Simulation des non-linéarités", Note Technique CNES N° 74, juillet 1977
- A. Saleh, "Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers", IEEE Trans. On Communications, Vol COM-29, NO. 11, November 1981, pp. 1715-1720
- M. Begue, "Testing new digital RF communication systems with smart stimulus and analysis", The 1995 advanced test solutions for aerospace and defence seminar, Hewlett-Packard
- S. W. Chen, W. Panton, and R. Gilmore: "Effects of nonlinear distortion on CDMA communication systems", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. 44, no 12, December 1996, pp 2743-2749
- A. Mashhour and A. Borjak: "A method for computing error vector magnitude in GSM EDGE systems-simulation results", IEEE COM Letters, vol. 5, No 3, March 2001, pp. 88-91
- Anakabe, A et al.: "Ka-band multi-port amplifier characterisation for space telecommunication operation", in 6th Int. Vacuum Electronics Conf., IVEC 2005), 20-22 April 2005, Noordwijk, The Netherlands.
- J. Sombrin "Conditions d'équivalence des mesures ou simulation de NPR et d'EVM", JNM 2011, 4D-1
- J. Sombrin "On the formal identity of EVM and NPR measurement methods: Conditions for identity of Error Vector Magnitude and Noise Power Ratio " EuMC 2011, Manchester

Références

C/(N+I), TD, Critères de comparaison et d'optimisation d'amplificateurs

"Definition of C/(N+I)", COMSAT Technical Review, Vol. 2, N° 2, Fall 1972, pp. 454-475

Sombrin, J.: "Critère de comparaison, d'optimisation et d'utilisation optimale des amplificateurs de puissance non-linéaires", Note Technique CNES DT-96-16-CT/AE/TTL/HV, 24 mai 1996.

Sombrin, J.: "A new criterion for the comparison of TWT and linearized TWT and for the optimization of linearizers used in transmission systems", ESA-NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, 7-10 April 1997, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.

Casini, E.; De Gaudenzi, R.; Ginesi, A.: "A semi-analytical method to assess satellite nonlinear channel performance", Proc. 23rd AIAA ICSSC, 2005, Session ACT3, Paper 1000071

M. Aloisio, E. Casini and A. Ginesi, "Evolution of space travelling wave tubes requirements and specifications for modern communication satellites", IEEE Trans on Electron Devices, Vol. 54, No 7, July 2007, pp. 1587-1596

L. Lapiere, J. Sombrin : "A New Criterion for the comparison of Non-Linear Amplifiers and the Optimization of Linearizers and Amplifiers used in Transmission Systems", workshop EuMW 2010

J. Sombrin: "Optimization criteria for power amplifiers", International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Volume 3, issue 1, pp. 35-45, published on-line February 3, 2011

J.Sombrin, "Critères d'optimisation des amplificateurs non linéaires", Note Technique CNES 2011

M. Weiss, "Powerful software handles nonlinear effects in amplifiers", R&S News, 201/10, pp. 10-12



Références

Ruptures 5G et 6G

F. Boccardi, R. Heath, A. Lozano, T. Marzetta, P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G", IEEE Communications Magazine, February 2014, pp. 74-80

Dossier 5G IEEE Communications Magazine, February 2014, pp.81-145

"5G from Space: Airbus and partners to study standards", October 2021

Strinati, Barbarosa, "6G networks: Beyond Shannon towards semantic and goal-oriented communications", Computer Networks 190, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.107930>

Réflexions sur la consommation des télécommunications

Cardoso et al, "Energy Efficient Transmission Techniques for LTE", IEEE Communications Magazine, October 2013, pp. 182-190

Schinella, "Télécommunications et économies d'énergie", 24èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - La transition écologique des mégapoles, Feb 2013, Créteil, France. Hal-00806294

Campana, Cuegniet, Schmitt, Siben, "Réduire la consommation énergétique du numérique", Min. Economie et des Finances, décembre 2019

Dedryver, "Maîtriser la consommation du numérique : le progrès technologique n'y suffira pas", France Stratégie, octobre 2020
de Brux, Ferreboeuf, Guillet, Laly, "Déploiement de la 5G en France : Quel impact sur la consommation d'énergie et l'empreinte carbone ?", Haut Conseil pour le Climat, décembre 2020



Ruptures possibles ?

- Référence : IEEE COM Magazine, February 2014
 - Nouvelles architectures de réseau, formes d'ondes, relais...
 - Utilisation des ondes millimétriques, large bande disponible, formation de faisceaux très fins, femto-cells
 - MIMO massif (milliers de voies)
 - Formation de faisceaux, antennes réseaux
 - Terminaux intelligents, prise en compte de la distance, device to device, prise en compte des interférences (cognitive radio), annulation d'interférences (précodage), antennes intelligentes, réjection des interférences, caching...
 - M2M nécessite très grand nombre de liaisons bas débit et à courte distance
- Directions de recherche et non ruptures technologiques
- Toutes nécessaires car elles adressent des problèmes de nombres d'utilisateurs et de débits différents
- Reste encore à faire dans le cadre de la 6G