



Télécommunications Spatiales et Aéronautiques

Efficacité spectrale et énergétique

Optimisation de la capacité, de la
consommation et du coût des liaisons de
télécommunications (mobiles sol et satellite)

Présentation IRT, 13 février 2015

Jacques Sombrin



Télécommunications Spatiales et Aéronautiques

Plan de la présentation

- Les besoins des futures liaisons de télécoms et le programme Horizon 2020 de la CE
- Compromis entre efficacité spectrale et efficacité énergétique dans les amplificateurs de puissance non linéaires
- Augmentation de la capacité par réutilisation de fréquence
- Compromis entre coût et capacité
- Conclusion

Évolutions dans les télécoms : Réponses techniques classiques

- Besoins de capacité augmentent (vidéo, ...)
- 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 de la liaison C/N
- ⇒ 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)
- Effet catastrophique sur la consommation d'énergie

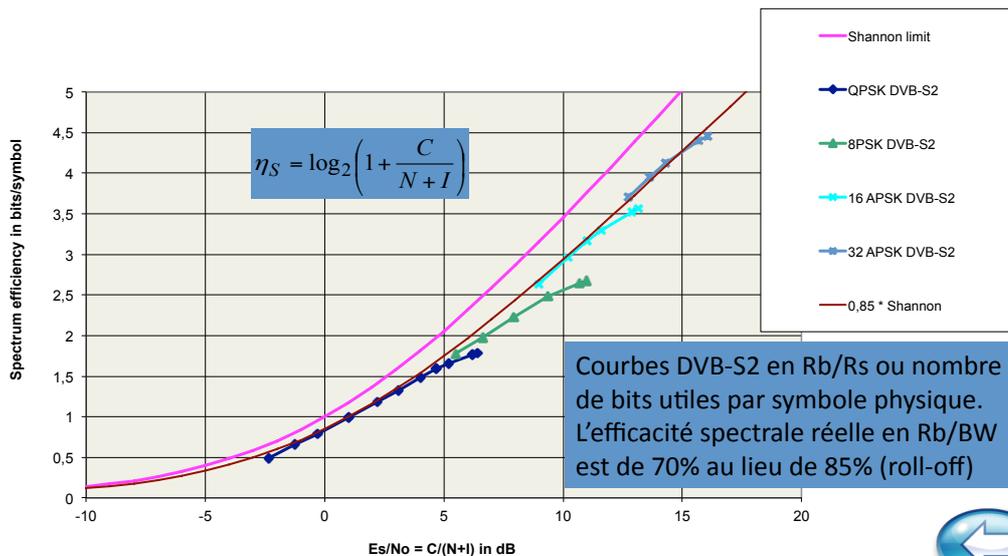


13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

3

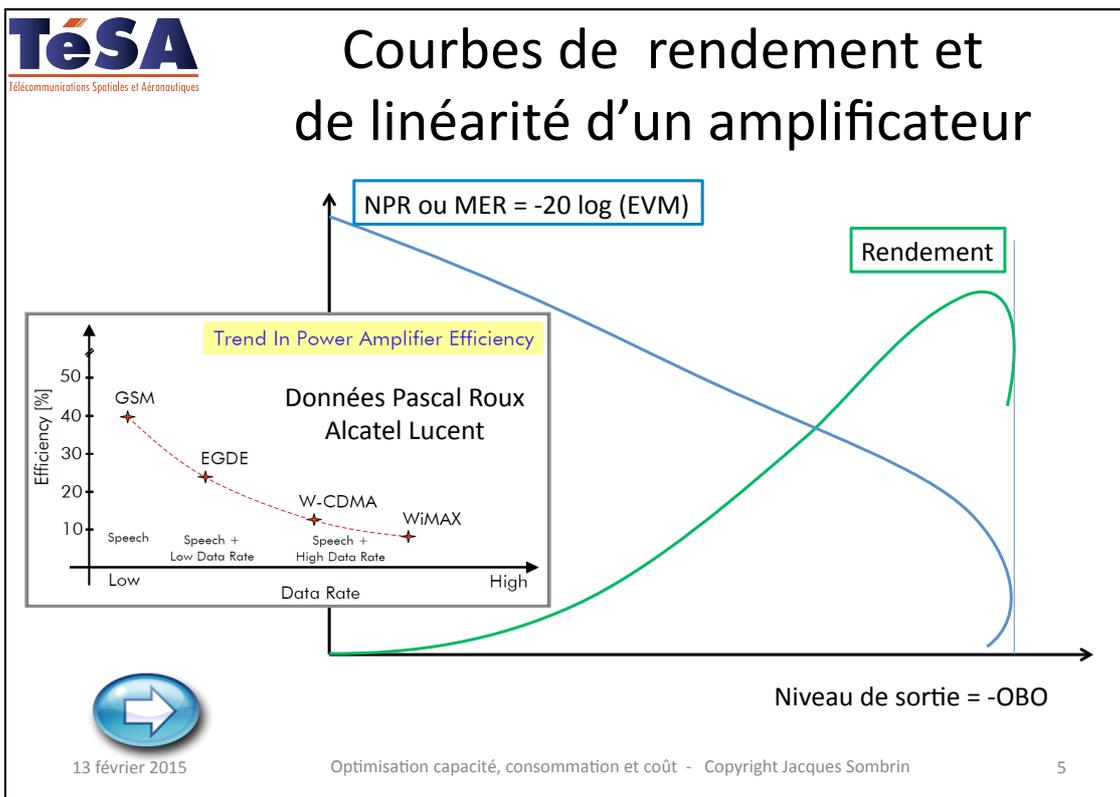
Courbe de Shannon et performances des démodulateurs DVB/S2



13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

4



TeSA
Télécommunications Spatiales et Aéronautiques

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 les autres secteurs
- Inquiétude très forte pour le futur

13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

6

Objectifs donnés à 5G PPP par la CE



- Développer une technologie 5G (télécoms mobiles de cinquième génération)
- Utilisant les réseaux sol et satellites
- Déployé en 2020, démonstrateur en 2018
- Permettant une capacité 10 à 100 fois plus grande
- Consommant 10 fois moins (à capacité égale)
- Coutant 10 fois moins par service
- Budget CE 700 M€, autant du consortium PPP

Convergence satellite et sol

- Convergence technique
 - Intérêt d'un standard commun plutôt que des options rajoutées pour intégrer les satellites
- Convergence d'approche des conceptions
 - Satellite : compromis entre capacité et consommation (coût des équipements satellite était faible devant le coût de lancement et le 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

Plan de la présentation

- Les besoins des futures liaisons de télécoms et le programme Horizon 2020 de la CE
- Compromis entre efficacité spectrale et efficacité énergétique dans les amplificateurs de puissance non linéaires
- Augmentation de la capacité par réutilisation de fréquence
- Compromis entre coût et capacité
- Conclusion

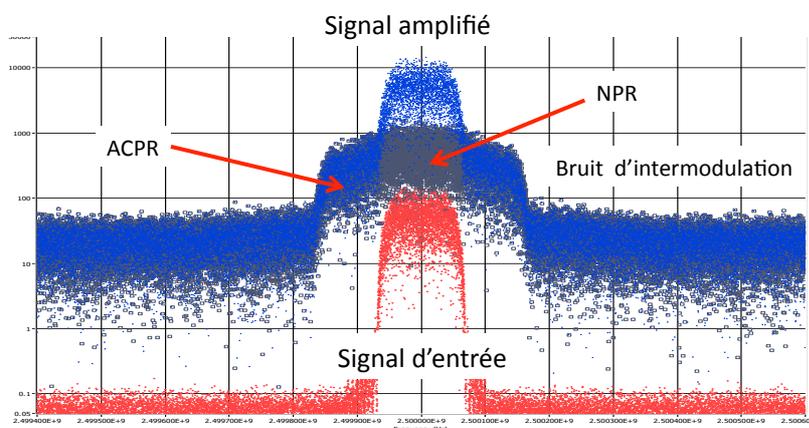
13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

9

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)



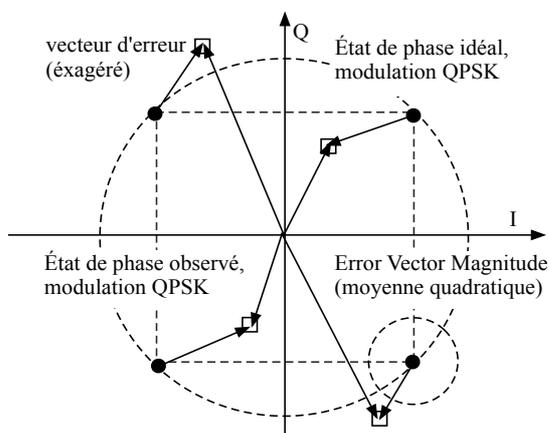
13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

10

Erreur sur les symboles : EVM et MER

- EVM : (Error Vector Magnitude) rapport de tensions, bruit sur signal, exprimé en %
- MER : (Magnitude Error Ratio) = $-20 \cdot \log(\text{EVM})$ rapport S/B en dB
- MER = NPR dans les mêmes conditions de signal
- Équipement de mesure commercial
- Standard utilisé par les opérateurs télécoms
- Différent pour chaque standard de transmission

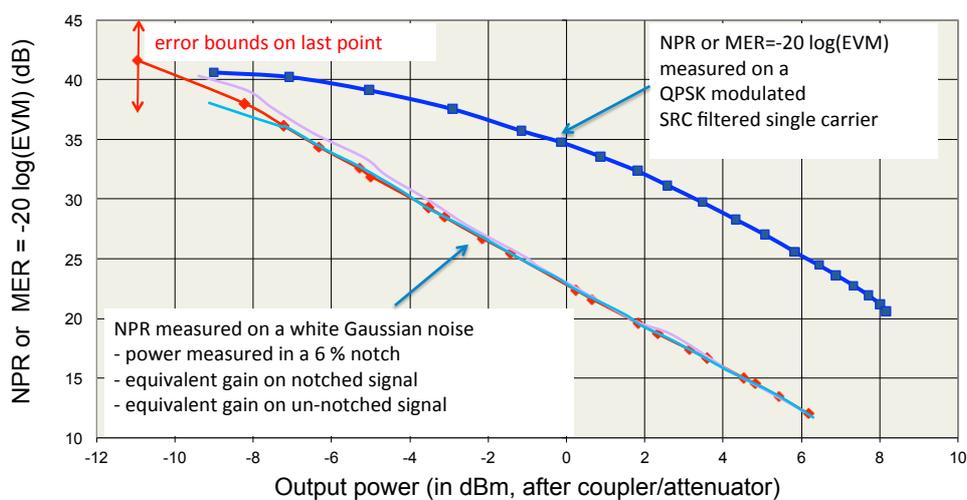


13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

11

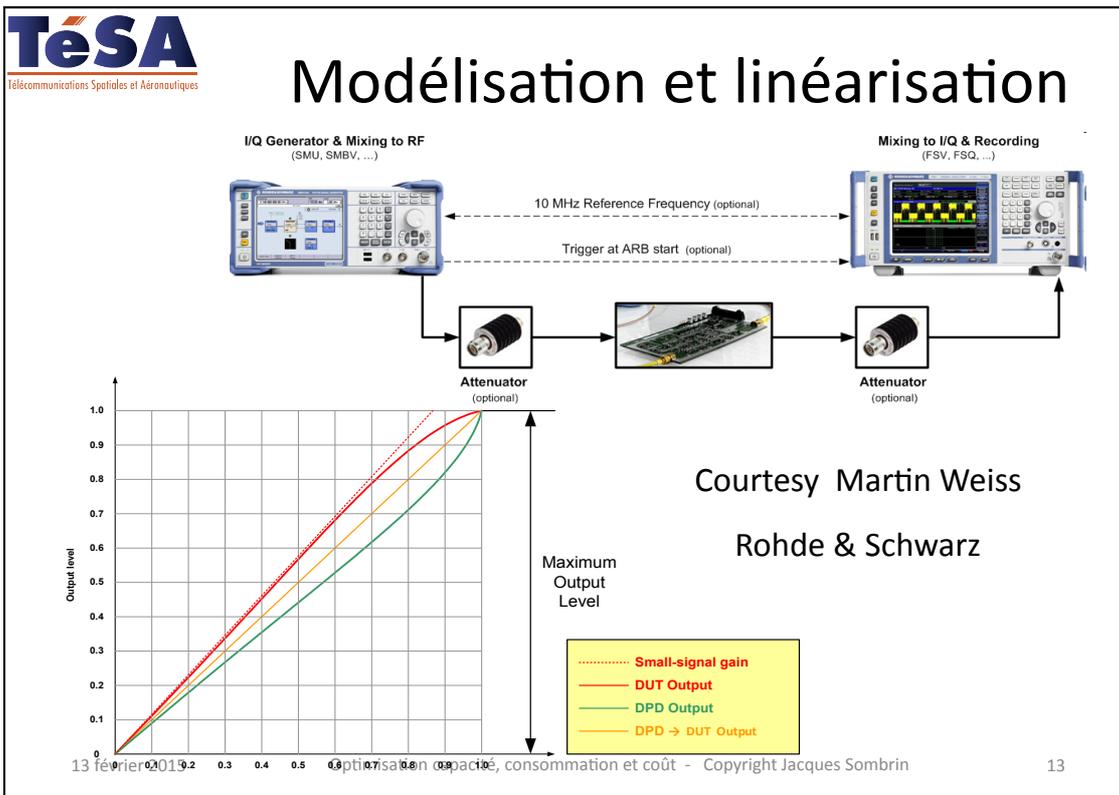
Résultats de mesure de NPR et EVM pour un ATOP linéarisé sur 500 MHz



13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

12



TeSA
Télécommunications Spatiales et Aéronautiques

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
- Le refroidissement devient prépondérant dans les stations de base de téléphonie mobile, il est toujours critique sur les satellites
⇒ Maîtriser le compromis dissipation/ linéarité
- On a souvent les 3 contraintes à la fois

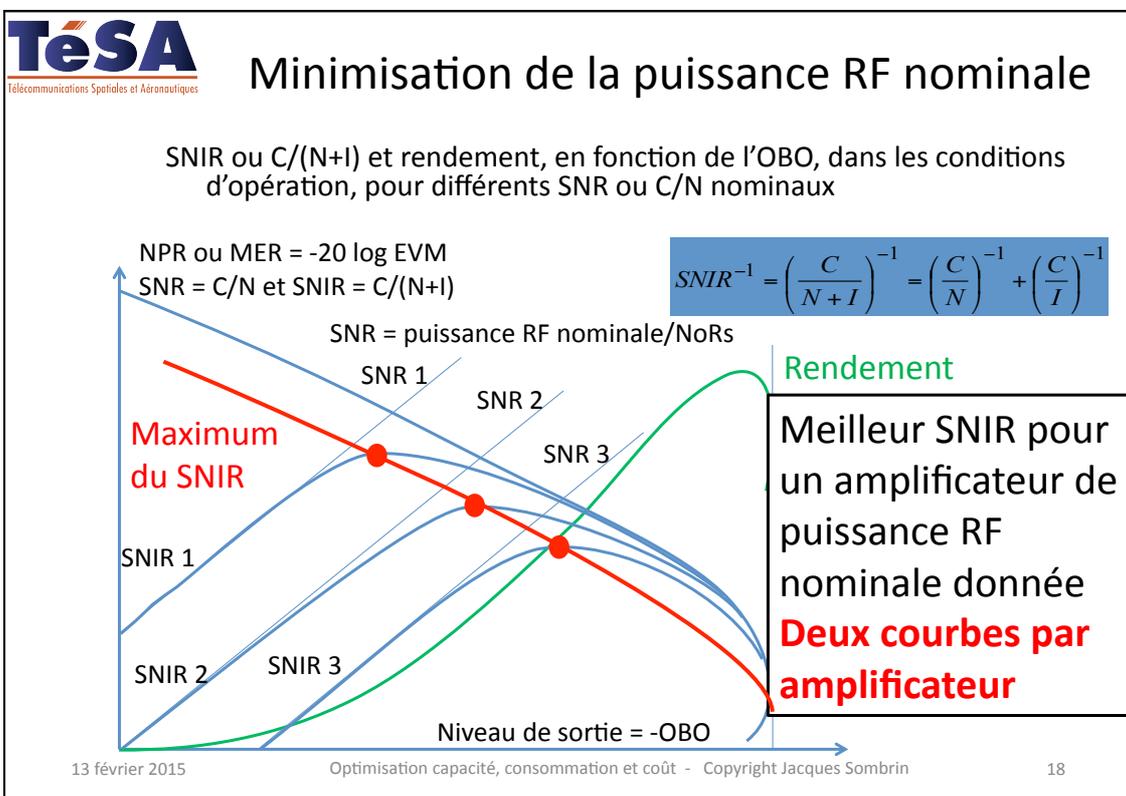
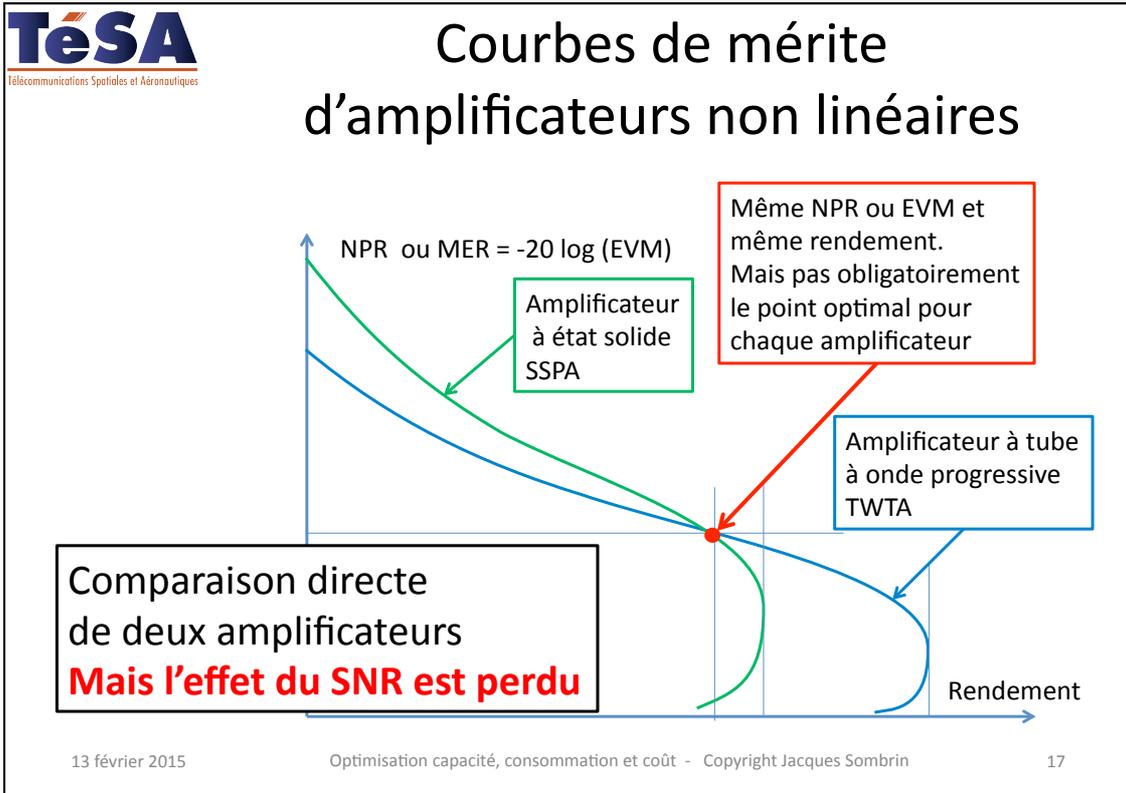
13 février 2015 Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

Pourquoi optimiser la consommation au dixième de dB près ?

- **Précision de mesure garantie après calibration 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, soit 2% , on peut augmenter d'autant la puissance RF 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

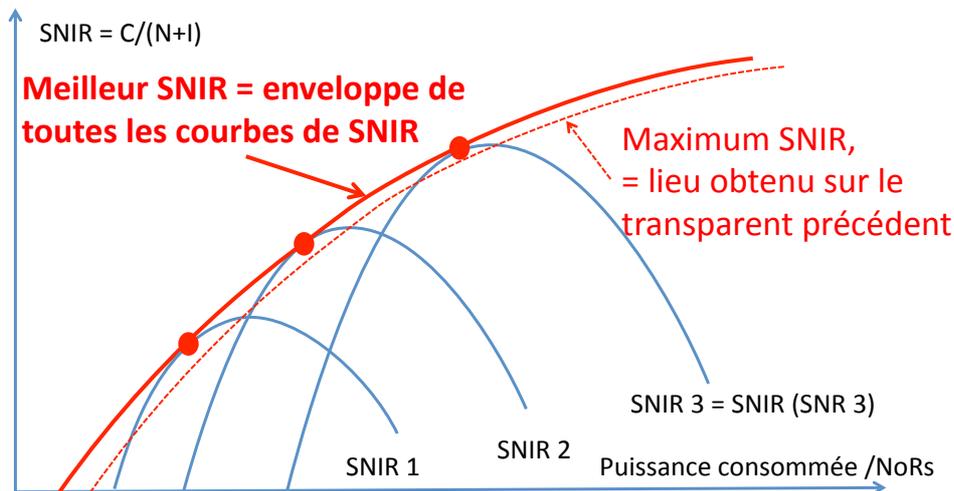
Courbes de mérite et optimisation

- On veut comparer deux amplificateurs (ou deux technologies) 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 du système, le C/N+I, l'efficacité spectrale
 - la puissance RF nominale,
 - la puissance RF utilisée, le point de fonctionnement, OBO
 - la puissance consommée,
 - la puissance dissipée,
 - ...



Minimisation de la puissance consommée

En utilisant les courbes de SNIR et de rendement, on trace le SNIR en fonction de la puissance consommée (rapportée au bruit dans le canal)



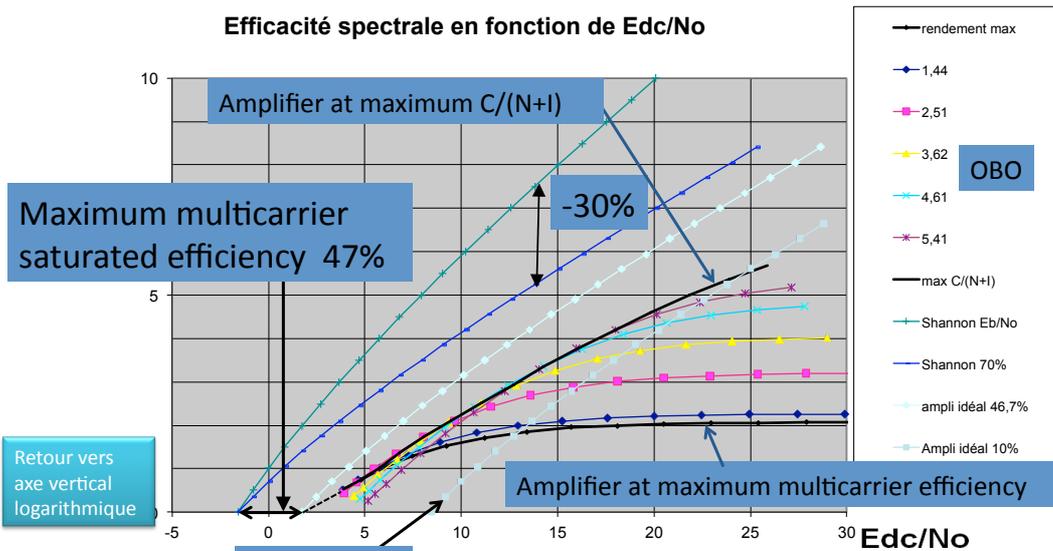
13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

19

Combinaison avec la courbe de Shannon

Efficacité spectrale en fonction de l'énergie consommée par bit transmis



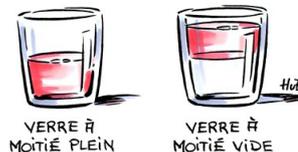
13 février 2015

capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

20

Synthèse sur les courbes de mérite

1. On est très loin (> 15 dB) de la courbe de Shannon



2. Il y a une grande marge d'amélioration

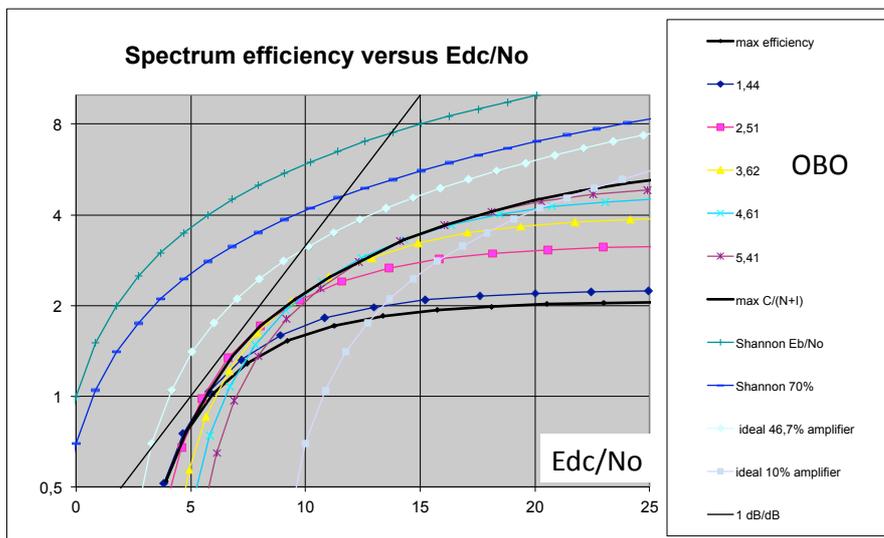
- On n'améliorera pas significativement le rendement en travaillant uniquement sur la technologie des amplificateurs ou bien sur celle des linéariseurs ou bien sur les signaux ou bien sur les égaliseurs
- Il faut améliorer globalement l'ensemble de la chaîne non linéaire et des signaux

Nouveaux signaux, DVB-SX

- Les signaux actuels sont optimisés pour une transmission sur un canal linéaire bruité en E_b/N_0 avec ISI nul.
Résultat : filtrage adapté et filtrage de Nyquist
- Ces signaux ne sont pas optimaux en E_{dc}/N_0 dans une transmission non linéaire ou avec interférences (même avec la linéarisation classique des amplificateurs sur satellite)
- 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 sol
- Peut-on faire mieux que la courbe de Shannon en éliminant les hypothèses de linéarité du canal, du filtrage de Nyquist qui permet d'obtenir des interférences inter-symboles nulles et des marges sur le filtrage de bande qui donnent des interférences entre canaux adjacents nulles ?

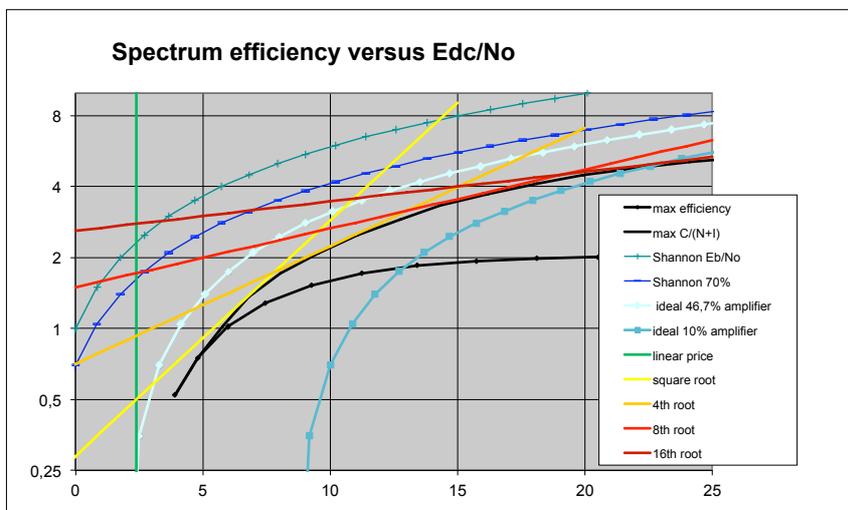
Faut-il améliorer l'efficacité spectrale ?

Satellite : sans doute pas au-delà de 2 à 3 bits par symbole



Courbe initiale :
axe vertical
linéaire

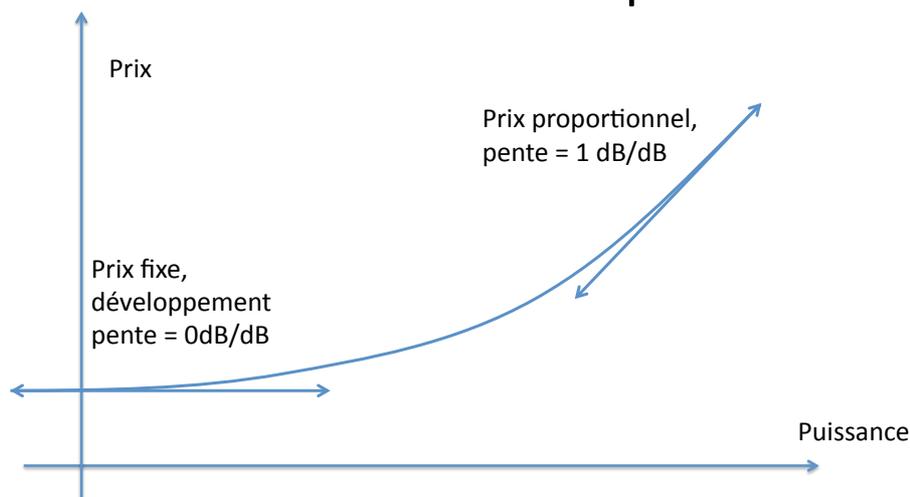
Optimum pour différentes courbes de prix des stations ou des satellites en fonction de la puissance consommée par les amplis RF : linéaire, racine carrée, quatrième, huitième ou seizième



Suite des travaux sur ces points

- Définir quelques cas de courbes de prix (valeur de la pente locale des courbes log/log de prix en fonction de la puissance à saturation ou de la puissance consommée ou de la puissance dissipée)
- Les utiliser pour faire un changement de variable qui permet de tracer l'efficacité spectrale en fonction du rapport : prix du bit transmis/ N_0
- Combiner ces courbes pour un optimum global (puissance, consommation, dissipation) si besoin
- Prendre le minimum de prix du bit transmis (voir transparents suivants le type de courbes attendu)
- Le rapport prix/ N_0 est assez inhabituel mais raisonnable car la difficulté est proportionnelle à la densité spectrale de bruit dans le canal utilisé.
- Par ailleurs, N_0 est une densité spectrale de puissance en W/Hz
- N_0 peut aussi s'exprimer en Joules ou éventuellement en kilowatt.heure

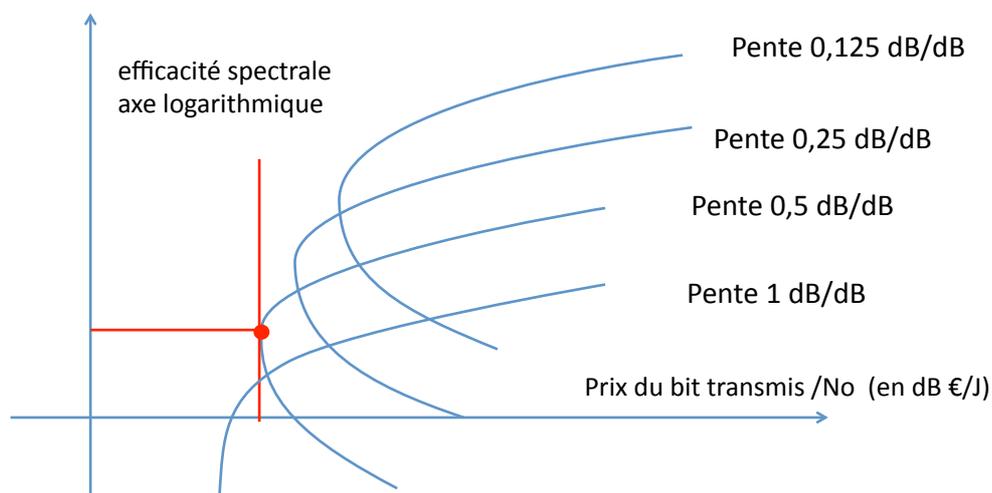
Courbe typique de prix en fonction de la puissance



Les pentes de 0 à 1 dB/dB sont raisonnables

Courbes attendues

Pour une pente locale log/log donnée de la courbe de prix en fonction de la puissance à saturation ou consommée ou dissipée



13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

27

Plan de la présentation

- Les besoins des futures liaisons de télécoms et le programme Horizon 2020 de la CE
- Compromis entre efficacité spectrale et efficacité énergétique dans les amplificateurs de puissance non linéaires
- Augmentation de la capacité par réutilisation de fréquence
- Compromis entre coût et capacité
- Conclusion

13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

28

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

13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

29

Le bilan de liaison en diffusion

- La couverture de réception est fixée :

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

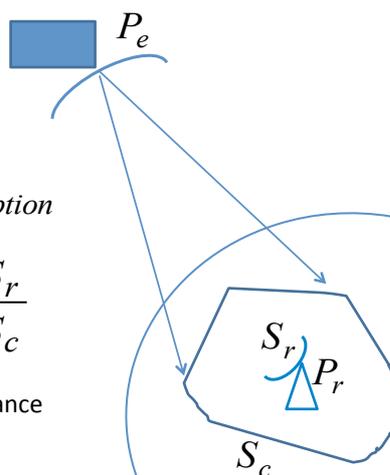
- Le diamètre et le rendement de l'antenne de réception sont fixés :

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

- 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
 - Pertes atmosphériques
 - Pertes par débordement (hors couverture)
 - Ondulation dans la couverture



13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

30

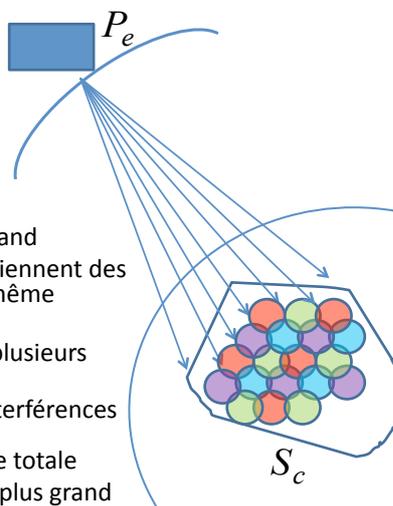
Bilan de liaison en multifaisceaux

- 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 pour la même densité de puissance par m²

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)
- La charge utile est plus complexe, en général il faut plusieurs antennes (3 ou 4)
- On divise le spectre par 3 ou 4 pour minimiser les interférences (en augmentant la distance entre faisceaux de même couleur), on peut donc baisser la puissance totale
- Intéressant si le nombre de faisceaux est nettement plus grand que le nombre de couleurs (typiquement > 20)
- Pertes de gain car antennes ne sont plus surdimensionnées



13 février 2015

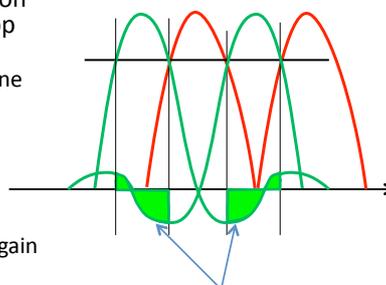
Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

31

Optimisation de l'antenne satellite multifaisceaux

- L'optique géométrique montre que des sources optimales cote-à-cote donnent des faisceaux dont l'écart angulaire est d'environ deux fois le diamètre d'ouverture du faisceau à 3 dB
- Il faut donc 3 ou 4 antennes pour couvrir correctement la couverture sans trous et sans trop de pertes
- On ne peut réutiliser les mêmes fréquence et polarisation que sur 1 faisceau sur 3 ou sur 4 sinon l'isolation est trop mauvaise
 - Schéma à 3 couleurs (3 fréquences) trop complexe car il ne profite pas de la polarisation et isolation faible
- Il n'y a pas de contrainte d'égalité du nombre d'antennes et du nombre de couleurs
- Deux cas principalement utilisés pour les satellites multimédia :
 - 4 antennes et 4 couleurs : très bonnes performances de gain et d'isolation, schéma un peu plus simple mais plus encombrant
 - 3 antennes et 4 couleurs : moins encombrant mais plus complexe

Sur un axe,
il faut au moins
deux couleurs.
Pour un plan,
au moins trois



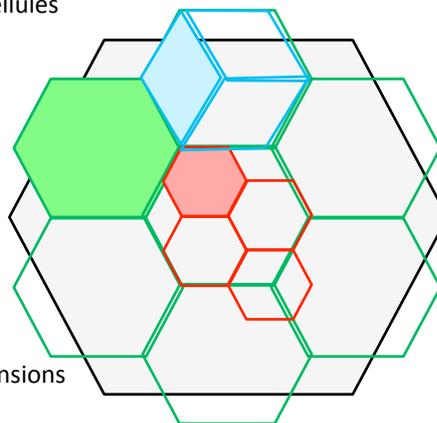
13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

32

Découpages d'une cellule sol

- On découpe une cellule hexagonale de téléphonie mobile (ou un ensemble de cellules) en sous-cellules plus petites (3, 4, 7, 12...)
- On découpe à nouveau, jusqu'à des cellules de la taille d'un appartement (femto-cell)
- Partage plus ou moins grand de la bande en fonction des interférences
- Moins de puissance par antenne
- Interférences dépendent des distances relatives entre utilisateurs et stations de base et des diagrammes d'antennes
- On utilise des antennes avec des lobes formés éventuellement des antennes intelligentes (lobes formés adaptatifs)
- Réseau plus complexe avec des cellules de dimensions différentes
- Le nombre de stations de base devient plus important et peut être rédhibitoire en zones rurales



Application aux constellations

- Le même principe est applicable aux constellations de satellites en orbite basse ou moyenne
- Chaque satellite crée un ou plusieurs faisceaux
- Réutilisation de fréquence entre les faisceaux du même satellite (et des satellites voisins si les antennes sont assez directives et si le recouvrement des faisceaux est maîtrisé)
- La distance est plus faible, ce qui ne change pas la densité de puissance par m^2 nécessaire au sol (si le diamètre d'antenne est le même) donc ne change pas la puissance nécessaire pour une couverture donnée mais réduit seulement la dimension de l'antenne satellite
- Le terminal sol est :
 - Soit plus petit (ex : antenne omni pour la téléphonie sur Iridium et Globalstar), parce que l'antenne doit avoir un diagramme assez large pour toujours recevoir au moins un des satellites en visibilité
 - Soit plus complexe (ex : deux aériens à gain élevé qui suivent deux satellites différents pour garantir la disponibilité sur Skybridge ou O3B) pour avoir plus de surface de collection de puissance donc plus de gain et une ouverture plus étroite

Problèmes de la réutilisation de fréquence

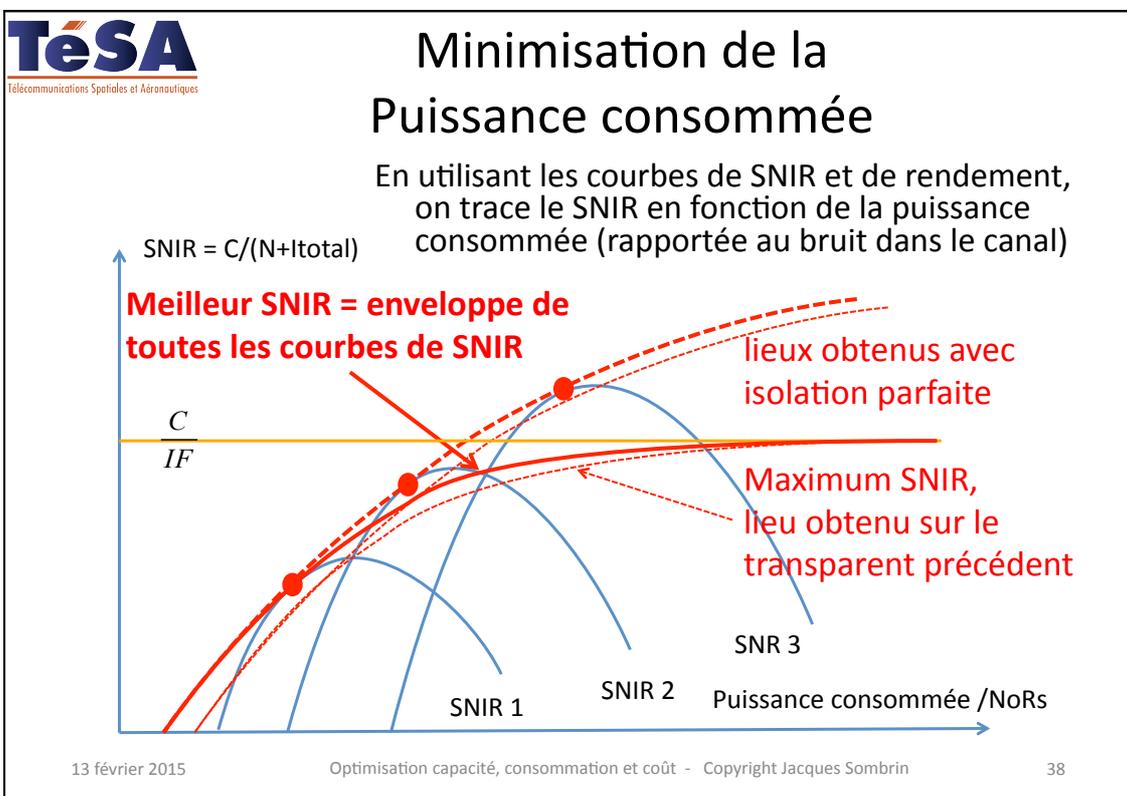
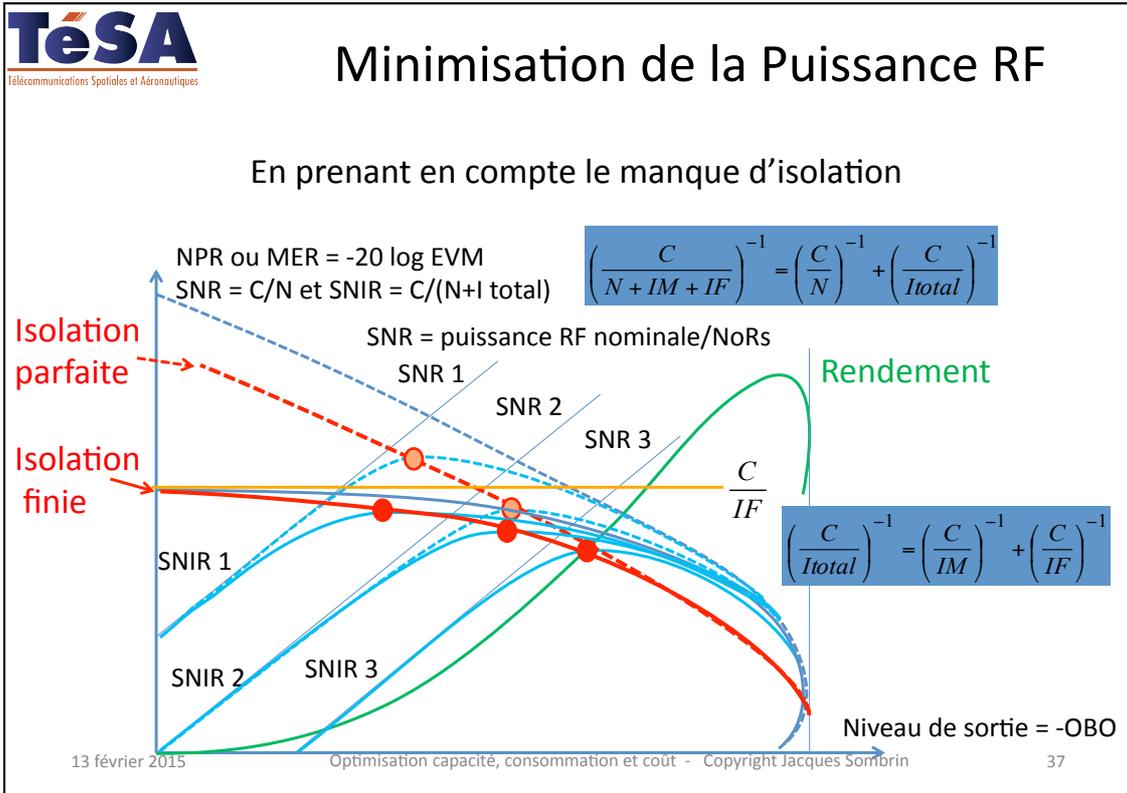
- Découpage en faisceaux ou cellules de couleurs différentes, diminution de la bande dans chaque faisceau ou cellule, nombre nécessaire beaucoup plus grand que le nombre de couleurs pour avoir un gain
- Isolation imparfaite change le point de fonctionnement optimal des amplificateurs et dégrade l'optimisation
- Le manque d'isolation peut être pris en compte comme une dégradation de la courbe de C/I des amplificateurs
- Complexité plus grande à prendre en compte dans le compromis entre capacité et coût

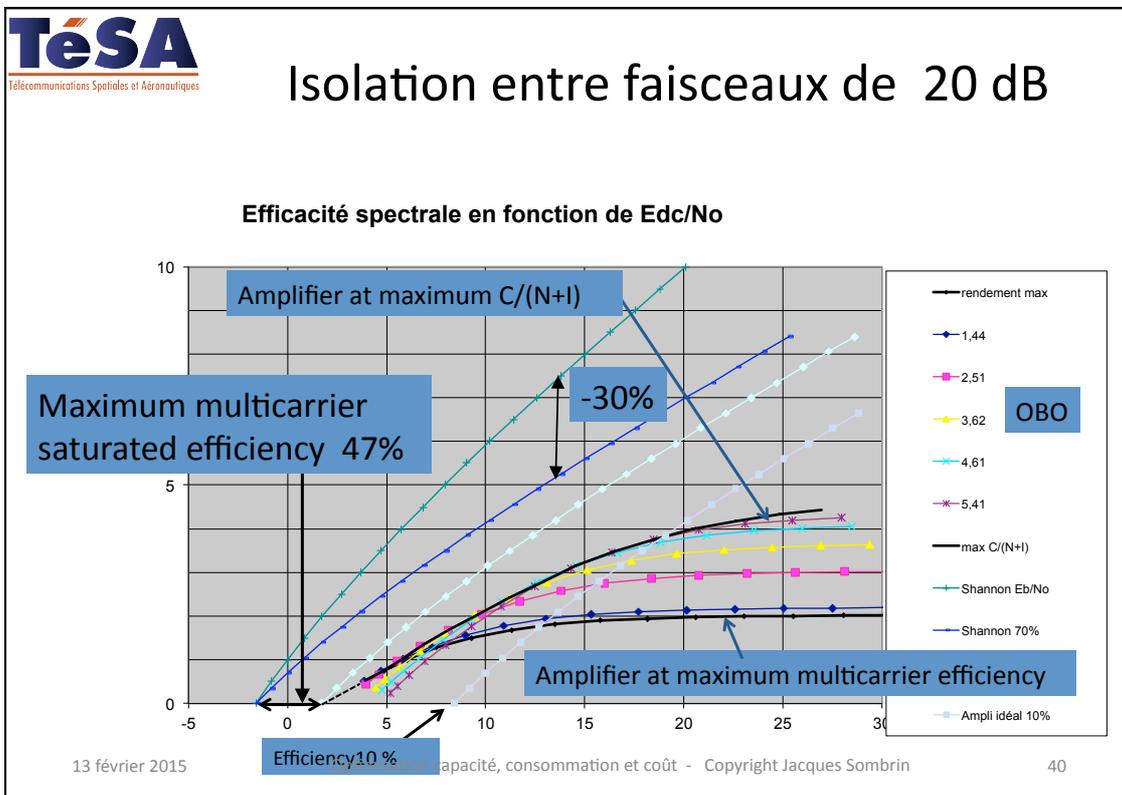
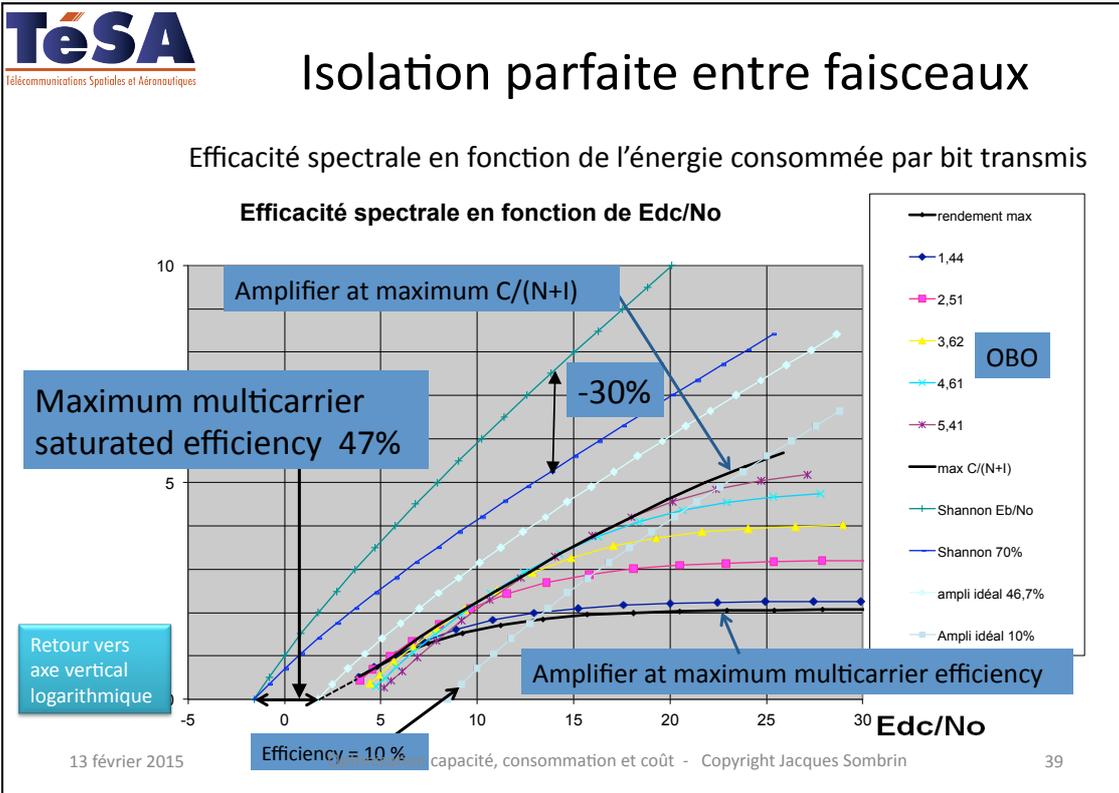
Optimisation avec prise en compte des interférences

- On définit un rapport porteuse sur interférence (ou isolation) C/IF où C est la puissance de la porteuse utile et IF est la somme des puissances des porteuses interférentes au même point de la couverture
- Le bruit IF doit être ajouté au bruit d'intermodulation IM de l'amplificateur (bruit donné par C/IM ou le NPR)
- Le rapport C/IF est indépendant du point de fonctionnement
- Effet de limitation sur le rapport signal à bruit total en faible signal :

$$\left(\frac{C}{I_{total}}\right)^{-1} = \left(\frac{C}{IM + IF}\right)^{-1} = \left(\frac{C}{IM}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{IF}\right)^{-1} > \left(\frac{C}{IF}\right)^{-1}$$

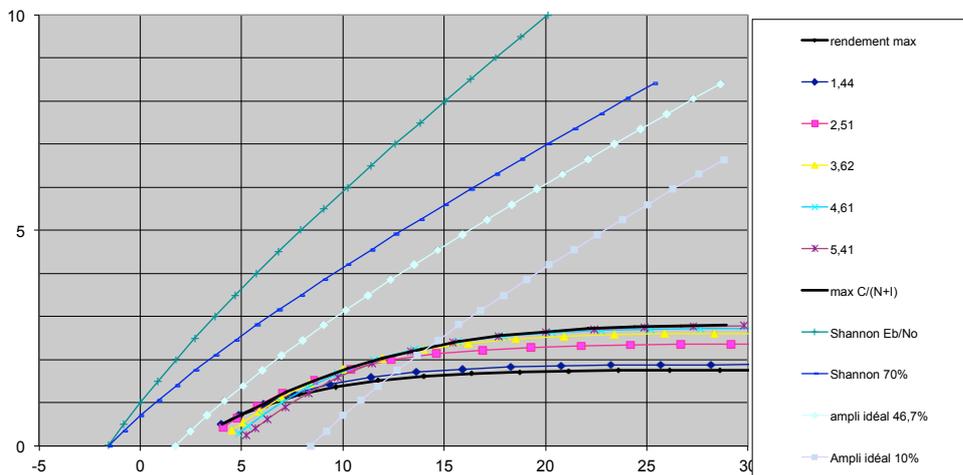
- Bruit total : $\left(\frac{C}{N + IM + IF}\right)^{-1} = \left(\frac{C}{N}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{IM}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{IF}\right)^{-1}$





Isolation entre faisceaux de 12 dB

Efficacité spectrale en fonction de Edc/No



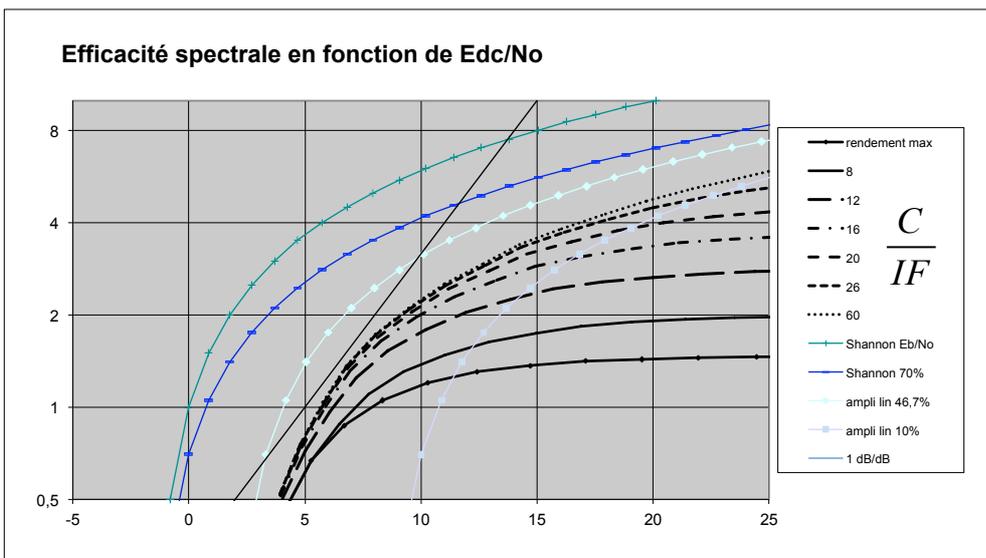
13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

41

Dégradation en fonction de l'isolation avec axe vertical logarithmique

Efficacité spectrale en fonction de Edc/No



13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

42

Modification du compromis efficacité spectrale efficacité énergétique

- Dès que l'isolation se dégrade (20 dB ce serait très bon sur une antenne multifaisceaux) le compromis entre efficacité spectrale et efficacité énergétique se dégrade aussi très rapidement
- Possibilités d'augmentation de la capacité:
 - Augmenter le plus possible le nombre de faisceaux ou de cellules et utiliser une efficacité spectrale plus faible (1 à 2 au lieu de 4 à 5) :
 - Charge utile plus complexe, 2 à 4 fois plus de spots,
 - Nombreux amplificateurs, sources d'antennes et guides d'ondes
 - Utiliser des signaux robustes à faible $C/(N+I)$
 - Utiliser de nouveaux signaux optimisés pour des liaisons non linéaires
 - Améliorer l'isolation par traitement du signal au sol ou sur le satellite :
 - MIMO en voie retour ou pré-codage en voie aller
 - Pour chaque utilisateur, dans chaque bande passante et chaque trame ou slot temporel
 - Choisir les fréquences utilisées en fonction des interférences locales (cognitive radio)
- Faire tout ce que l'on peut avec les technologies disponibles :
Ne pas attendre une rupture technologique d'ici 2020 mais utiliser toutes les synergies de technologies possibles

Plan de la présentation

- Les besoins des futures liaisons de télécoms et le programme Horizon 2020 de la CE
- Compromis entre efficacité spectrale et efficacité énergétique dans les amplificateurs de puissance non linéaires
- Augmentation de la capacité par réutilisation de fréquence
- Compromis entre coût et capacité
- Conclusion

Compromis entre coût et capacité (une liaison)

- La diminution de la puissance consommée va dans le sens d'une réduction du coût, en particulier des amplificateurs de puissance RF et du refroidissement de ces amplificateurs
- On cherche d'abord le meilleur compromis possible entre capacité et consommation par bits émis,
- Ensuite on cherche à obtenir le meilleur compromis entre coût et capacité
- Pour doubler la capacité sur une seule liaison, en passant de 2 à 4 bits/symbole et il faut multiplier l'énergie consommée par bit par 8 donc la puissance consommée par 16
- Mais le coût de la liaison n'est pas forcément proportionnel à la puissance RF ou à la puissance consommée par les amplificateurs
- Au-delà d'une certaine valeur d'efficacité spectrale, il est plus intéressant d'augmenter le nombre de liaisons en parallèle même si les auto-interférences font que la capacité augmente moins vite que le nombre de liaisons

13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

45

Compromis entre coût et capacité (plusieurs liaisons)

- La multiplication de petites cellules ou de petits faisceaux peut exploser les coûts. On peut :
 - éliminer la plus grande partie des infrastructures en installant des femto-cells ou des box Wi-Fi chez les utilisateurs
 - utiliser le satellite pour des grandes cellules dans les zones rurales ou non couvertes par le réseau sol
- Les traitements complexes augmentent le coût mais on peut tabler sur une amélioration des technologies numériques grand public au sol et une diminution des coûts de traitement dans le temps
- Il restera des coûts importants de développement des ASICs, des équipements, du réseau...
- Augmentation de la bande passante allouée au service ?
Effet limité en bande UHF et VHF
- Montée en fréquence ? Possible mais augmente aussi les coûts, intérêt si on fait des faisceaux pointés, des antennes intelligentes

13 février 2015

Optimisation capacité, consommation et coût - Copyright Jacques Sombrin

46

Choix entre les deux solutions

- Le choix entre l'augmentation de puissance des amplificateurs et la multiplication des liaisons dépend principalement:
- De la variation du coût d'une liaison avec la puissance de l'amplificateur, donc :
 - Du coût relatif des amplificateurs dans la liaison
 - De la variation du coût d'un amplificateur avec sa puissance
 - Du coût relatif de la consommation et du refroidissement
- Du coût relatif de la complexité de la réutilisation de fréquence et de la variation de la capacité avec le nombre de liaisons



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)
 - Terminaux intelligents, prise en compte de la distance, device to device, prise en compte des interférences (cognitive radio), annulation d'interférences (précodage), antennes intelligentes, 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

Plan de la présentation

- Les besoins des futures liaisons de télécoms et le programme Horizon 2020 de la CE
- Compromis entre efficacité spectrale et efficacité énergétique dans les amplificateurs de puissance non linéaires
- Augmentation de la capacité par réutilisation de fréquence
- Compromis entre coût et capacité
- Conclusion

Conclusion

- L'optimisation de la consommation à capacité donnée va dans la bonne direction pour la diminution des coûts
- 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
- 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
 - L'augmentation du nombre de cellules et la diminution de leur taille pour les télécommunications mobiles
- Le manque d'isolation (auto-interférences) peut changer radicalement l'optimum de fonctionnement des amplificateurs et les signaux à utiliser
 - Cela diminue l'efficacité spectrale optimale
 - Il faudra améliorer l'isolation par un traitement du signal approprié
- Limite par le coût et la complexité du système
- 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)

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/HY, 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

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

Répartition de la consommation dans une station de base

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