TéSA
Telecommunications for Space and Aeronautics

Les produits d'intermodulation passifs (PIM) dans les charges utiles de satellites de télécommunication

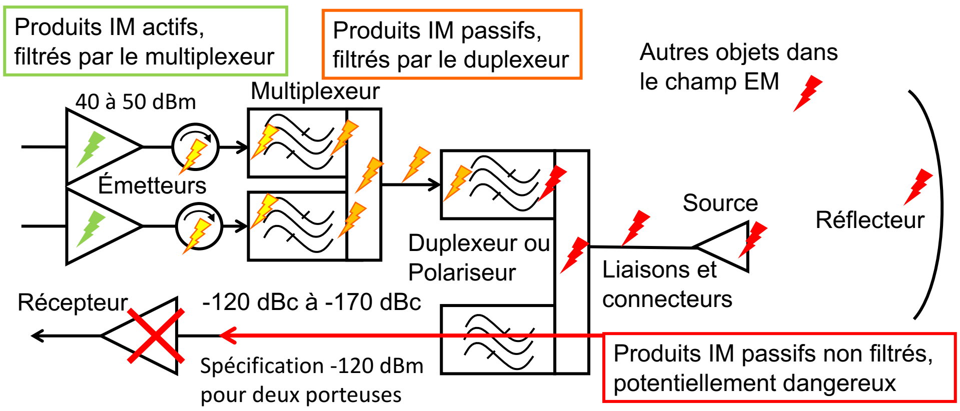
Jacques Sombrin

Séminaire TéSA 7 décembre 2017

Sommaire

- Introduction
- Effets des produits d'intermodulation passifs dans les charges utiles de satellites de télécommunications et les stations de base de téléphonie
- Les produits d'intermodulation actifs et passifs
  - En fonction de la fréquence
  - En fonction de la puissance
  - En fonction du nombre de porteuses
- Modélisation des PIM des circulateurs et isolateurs
  - Modélisation physique, hystérésis magnétique
  - Modélisation comportementale
- Autres modèles non-analytiques
  - Modèles physiques
  - Modèles mathématiques
- Conclusion

PIM dans une charge utile de satellite



- Même problème sur un avion ou dans une station de téléphonie mobile
- Il peut y avoir une antenne commune ou plusieurs antennes pour les deux émissions et la réception

Effets des PIM

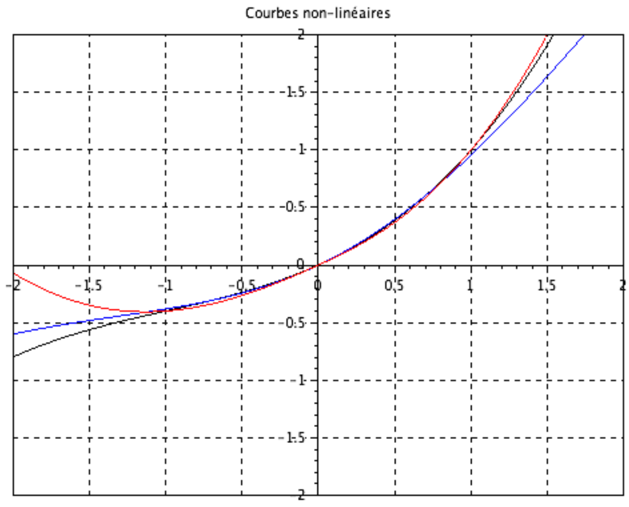
- 1974 : Problème sur le satellite FleetSatCom. Les contacts dans le tissu métallique de l'antenne déployable émission réception créent des produits dans la bande du récepteur
  - Dorure renforcée des tricots d'antennes déployables
  - Tests poussés sur les équipements communs à l'émission et à la réception, en particulier les filtres, connecteurs, guides d'ondes et brides, sources et réflecteurs d'antennes
  - Séparation des antennes émission et réception pour la même couverture => doublement du prix, encombrement, masse, limitation du nombre de couvertures possibles, pas une garantie à 100%
  - Travaux de modélisation des produits passifs
- 1990-2000 : Les porteuses de deux émetteurs se combinent sur le grillage rouillé de la clôture d'une station de téléphonie mobile et créent des produits d'intermodulation passifs dans la bande d'un récepteur
  - Maintenance préventive, vérification des grillages de clôtures, des mauvais contacts et des boulons rouillés
  - Plusieurs équipementiers proposent des câbles et connecteurs PIM-free
  - Plusieurs équipementiers proposent des appareils qui génèrent deux porteuses dont l'une est modulée. Si un produit est reçu, il est démodulé, ce qui donne accès à la distance de la non-linéarité et permet de localiser le générateur de PIM
  - Possibilité de correction numérique à l'entrée d'un récepteur

Introduction aux produits d'intermodulation (1/3)

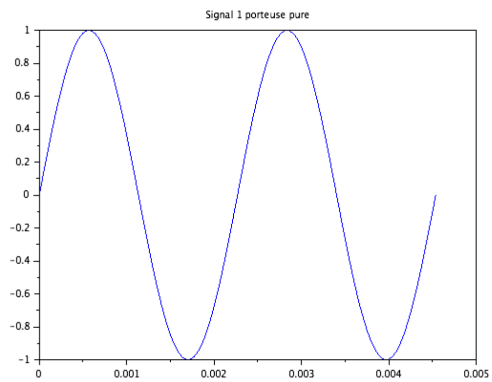
- Harmoniques créés par une non-linéarité
- Signal = une porteuse, fréquence f_1
- Harmoniques : fréquences $|m_1 f_1|$
- Rang harmonique : $\mathrm{H} = |m_1|$
- Cas particuliers
  - Fondamental : $H = 1$
  - Continu : $H = 0$
- 3 cas de non-linéarités

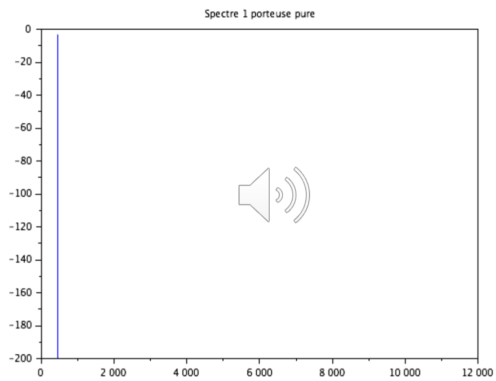
3 non-linéarités utilisées

- 3 courbes comportant une partie paire et une partie impaire, quasiment identiques sur l'intervalle -1, +1
- 3 modèles a priori proches d'un même dispositif

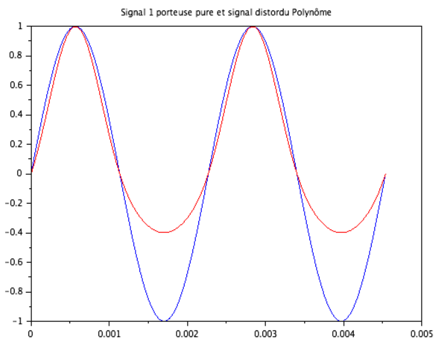


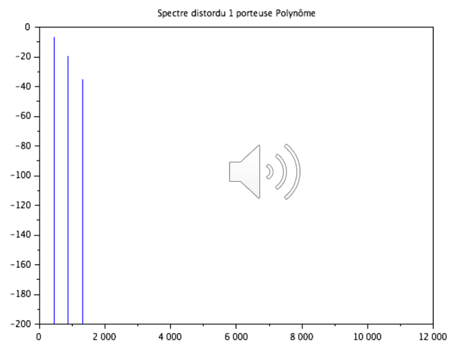
Signal d'entrée 1 porteuse pure





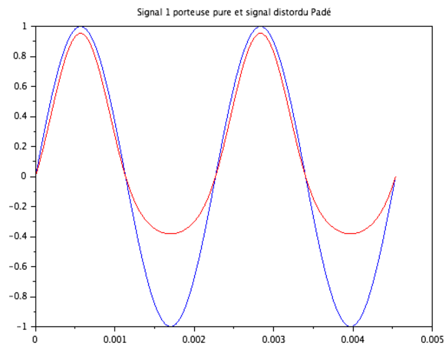
Non-linéarité polynomiale

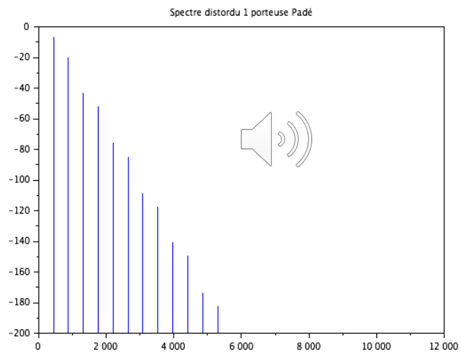




- 3 termes de degrés 1, 2 et 3 donnent des harmoniques de rangs 0, 1, 2 et 3
- Le degré 2 donne les rang 0 et 2
- Le degré 3 donne les rangs 1 (en plus du terme de degré 1) et 3

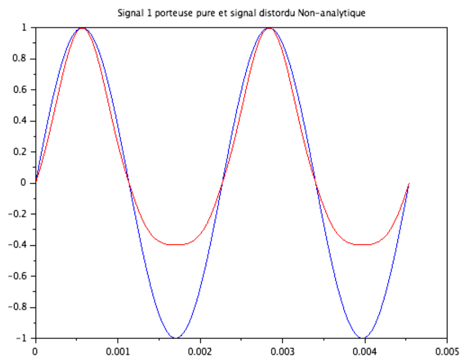
Non-linéarité rationnelle, Padé

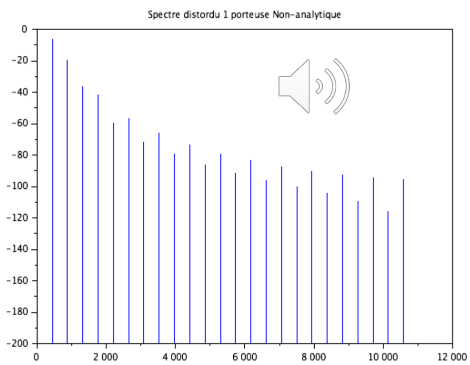




- 3 termes de degrés 1, 2 et 3 divisés par le dénominateur $1 + \alpha\, x^2$
- Développement de Taylor donne tous les rang d'harmoniques mais diverge au-delà de $1/\sqrt{\alpha}$
- Décroissance régulière des puissances des harmoniques

Non-linéarité non-analytique



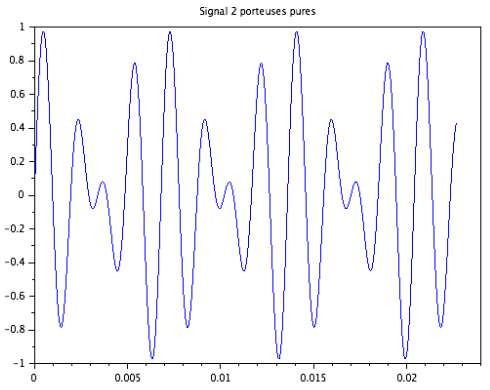


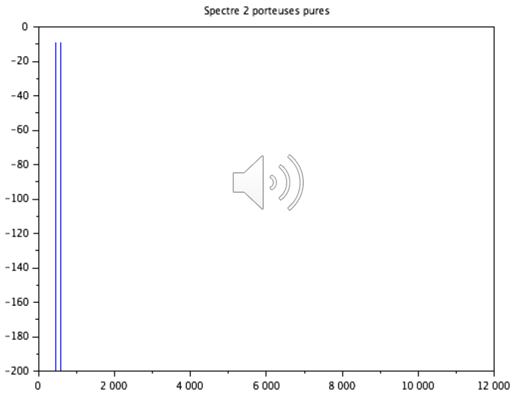
- Un terme de degré 1 et un terme de degré 2,5 avec une partie symétrique et une partie antisymétrique
- Développement de Taylor n'existe pas, discontinuité à partir de la dérivée troisième
- Décroissance très lente des harmoniques

Introduction aux produits d'intermodulation (2/3)

- Produits créés par une non-linéarité
- Signal = deux porteuses quelconques f_1 et f_2
- Produits d'intermodulation : fréquences $|m_1 f_1 + m_2 f_2|$
- Ordre : $O = |m_1| + |m_2|$
- Rang harmonique : $H = |m_1 + m_2|$
- L'ordre et le rang harmonique ont la même parité
- On a toujours : $O \geq H$
- 3 cas de non-linéarités

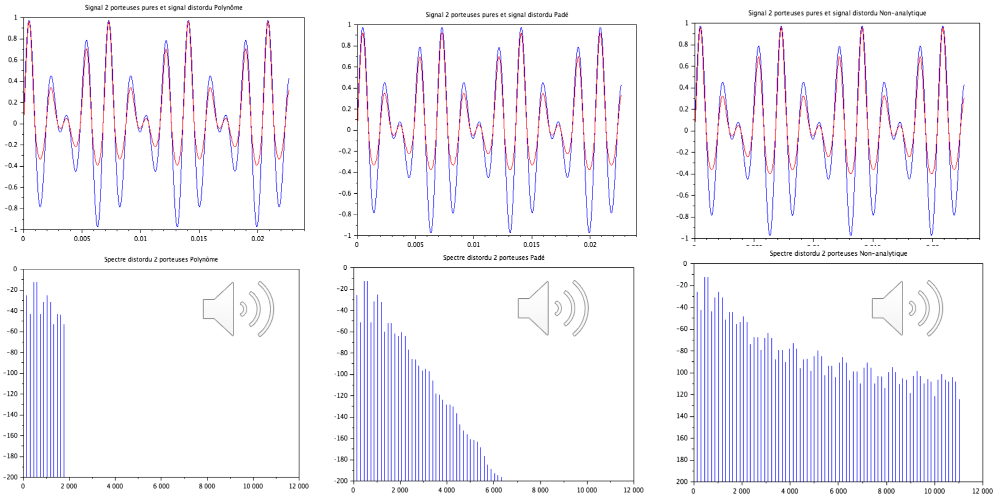
Signal d'entrée à deux porteuses pures





- Rapport des fréquences 4/3

Signaux de sortie des 3 non-linéarités

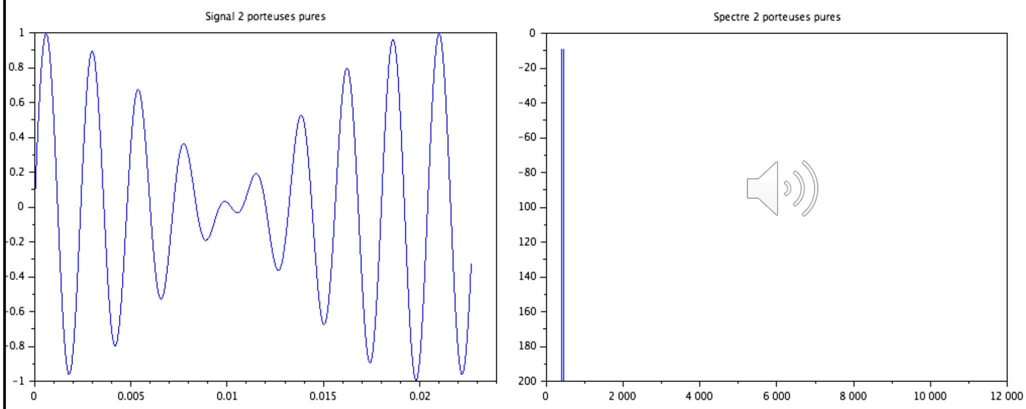


Polynôme | Padé | Non-analytique

Introduction aux produits d'intermodulation (3/3)

- Produits créés par une non-linéarité
- Signal = deux porteuses proches f_1 et f_2
- Fréquence centrale : $f = (f_1 + f_2)/2$
- Battement de fréquence, enveloppe : $\mathrm{F} = |f_1 - f_2|/2$
- Produits d'intermodulation d'ordre impair autour du fondamental $H = 1$: fréquences $f \pm (2n + 1)F$
- Produits d'intermodulation d'ordre pair autour du continu $H = 0$: fréquences $\pm(2n + 1)F$
- 3 cas de non-linéarités

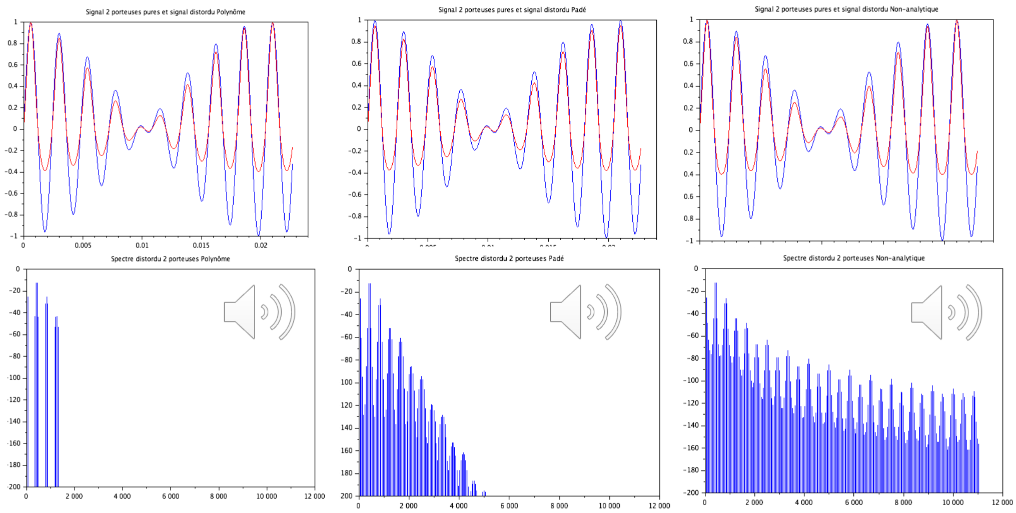
Signal d'entrée à deux porteuses proches



- Rapport des fréquences 8/9

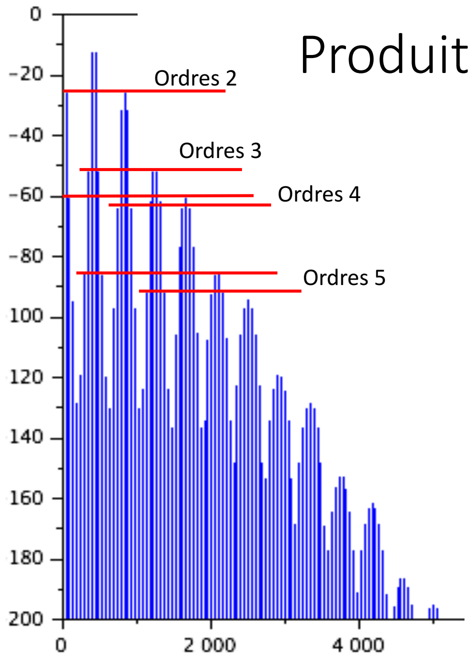
7 décembre 2017 Jacques Sombrin - Produits d'intermodulation passifs 15

Signaux de sortie des 3 non-linéarités



Polynôme Padé Non-analytique

7 décembre 2017 Jacques Sombrin - Produits d'intermodulation passifs 16



Produits d’intermodulation

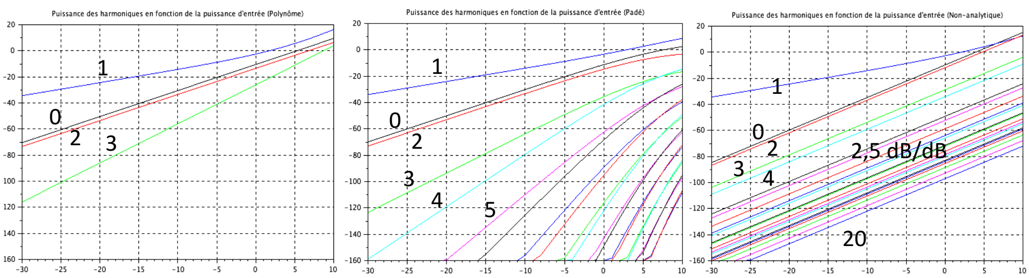
- Les produits de rang donné sont groupés autour des harmoniques de même rang
- Les produits ayant les mêmes coefficients m_1 et m_2 (au signe près) ont la même amplitude

$$f_1 + f_2 \text{ et } f_1 - f_2$$
$$2f_1 + f_2 \text{ et } 2f_1 - f_2$$
$$2f_1 + 2f_2 \text{ et } 2f_1 - 2f_2$$
$$3f_1 + f_2 \text{ et } 3f_1 - f_2$$
$$3f_1 + 2f_2 \text{ et } 3f_1 - 2f_2$$
$$4f_1 + f_2 \text{ et } 4f_1 - f_2$$

- Certains produits retombent sur des produits ou porteuses de fréquences identiques. Exemple, ordre 3 :

$$f_1 + f_2 - f_2 = f_1$$

Puissance des harmoniques ou des produits en fonction de la puissance d’entrée

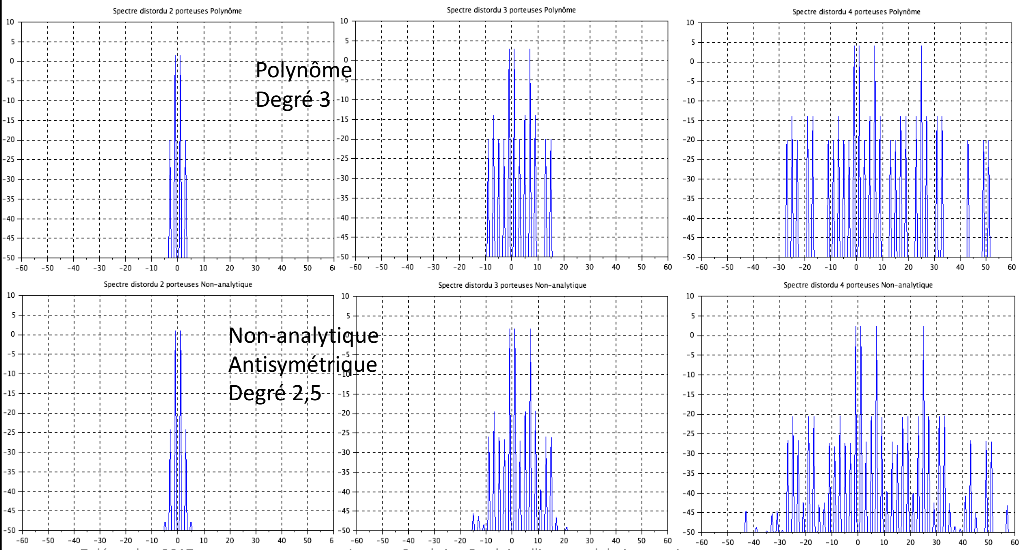


- Polynôme Padé Non-analytique
- Pentes en dB/dB égales au degré d (entier ou pas) du terme dont vient l’harmonique ou le produit
- Pas au rang de l’harmonique H ou à l’ordre du produit O

Signaux multiporteuses

- On augmente le nombre de porteuses (à même puissance par porteuse)
- Pour un polynôme, les produits d'ordre 3 à 2 porteuses conservent la même puissance (leur nombre augmente)
- Les produits à 3 porteuses $(f_1+f_2-f_3)$ sont 6 dB plus puissants que les produits à 2 porteuses $(2f_1-f_2)$
- Pour un degré inférieur à 3, la puissance des produits à 2 porteuses diminue lorsque l'on augmente le nombre de porteuses
- Pour un degré de 2,5 et un grand nombre de porteuses, la diminution atteint 4 dB
- Pour un degré de 2, diminution de 8 dB
- Permet de relâcher certaines spécifications et d'utiliser des équipements moins lourds ou moins cher (réflecteurs d'antennes en fibre de carbone)

Signaux à 2, 3 et 4 porteuses



Transformée de Chebyshev

- Lorsque l'entrée est un signal sinusoïdal : $u = \mathrm{a}.\cos(\theta)$
- La sortie est :

$$f(u) = f[\mathrm{a}.\cos(\theta)] = \frac{1}{2} f_0(a) + \sum_{m=1}^{\infty} f_m(a).\cos(m\theta)$$

- La transformée de Chebyshev d'ordre m donne l'amplitude de l'harmonique m :

$$f_m(a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f[a.\cos(\theta)] \cos(m\theta)\, d\theta$$

- Si on applique la transformée de Chebyshev une deuxième fois à la non-linéarité qui donne l'amplitude du fondamental, $f_1(a)$, (le gain complexe au fondamental, courbes AM/AM et AM/PM) on obtient de nouvelles non-linéarités qui donnent les amplitudes des produits d'intermodulation autour du fondamental

Calcul des harmoniques générés par un terme de degré réel donné

- Les termes symétriques : $f(u) = |u|^p$

donnent uniquement des harmoniques pairs :

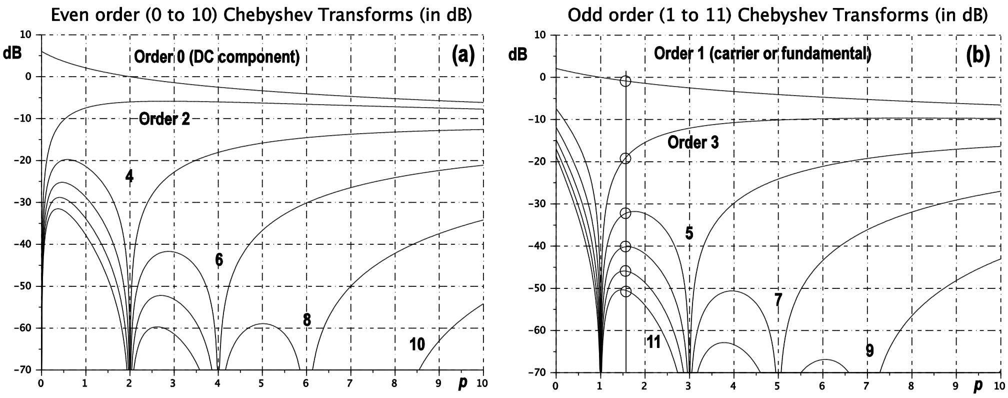
$$f_m(a) = 2\left(\frac{|a|}{2}\right)^p \frac{\Gamma(p+1)}{\Gamma\left(\frac{p+m}{2}+1\right)\,\Gamma\left(\frac{p-m}{2}+1\right)}$$

- Les termes antisymétriques : $f(u) = \mathrm{signe}(u).|u|^p$

donnent uniquement des harmoniques impairs :

$$f_m(a) = 2\,\mathrm{signe}(a)\left(\frac{|a|}{2}\right)^p \frac{\Gamma(p+1)}{\Gamma\left(\frac{p+m}{2}+1\right)\,\Gamma\left(\frac{p-m}{2}+1\right)}$$

Puissances des harmoniques



Ordres pairs

Ordres impairs

Mesures publiées

- De nombreuses publications montrent que les modèles classiques (polynôme, fonction rationnelle, développements de Taylor ou de Padé) s’appliquent très mal aux produits passifs et nécessitent un nombre de coefficients rédhibitoire
- Beaucoup de mesures n’ont pas été publiées : « considérées comme erronées parce qu’elle ne pouvaient pas être expliquées avec les modèles »
- Quelques publications commencent à prendre en compte des fonctions discontinues (sans trop le dire, utilisation du degré 2 antisymétrique dans le modèle) ou bien approximation des courbes en log-log (mais ce n’est pas un modèle prédictif)
- La plupart continuent à essayer de trouver un développement de Taylor avec des dizaines de coefficients

Mesures publiées

Chapman, Rootsey, Polidi, Davison, “Hidden threat multicarrier passive component IM generation”, AIAA 6th Communications Satellite Systems Conference, April 1 976, Montreal, Canada, pp. 296/ 1-9

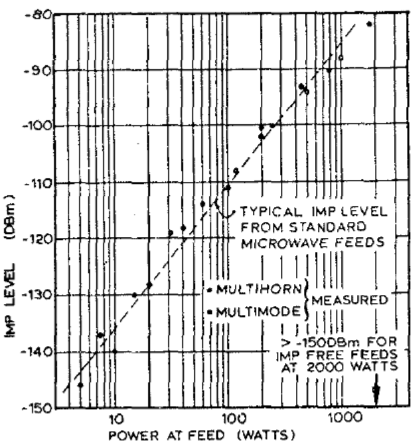


FIGURE 2 IMP LEVELS FROM TYPICAL STANDARD MICROWAVE FEEDS

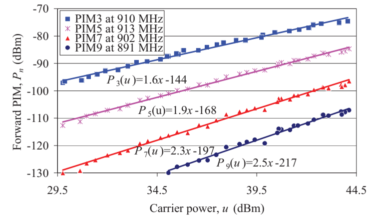
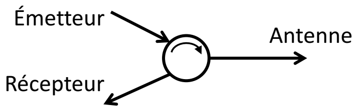


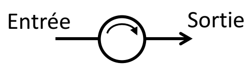
Fig. 4 Measured forward PIM3, PIM5, PIM7 and PIM9 products vs. carrier power on the microstrip line with central section of width W_c=7.44 mm with the tapered matching transformers.

A. Shitvov, D. Zelenchuk, A. Schuchinsky, “Carrier-Power Dependence of Passive Intermodulation Products in Printed Lines”, 2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference, 16-17 November 2009, pp. 177-180

Voir aussi papiers de Airbus DS et de Space System Loral en références

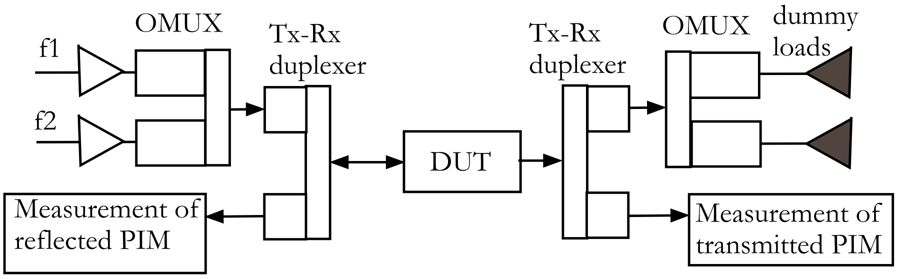
Circulateurs et isolateurs





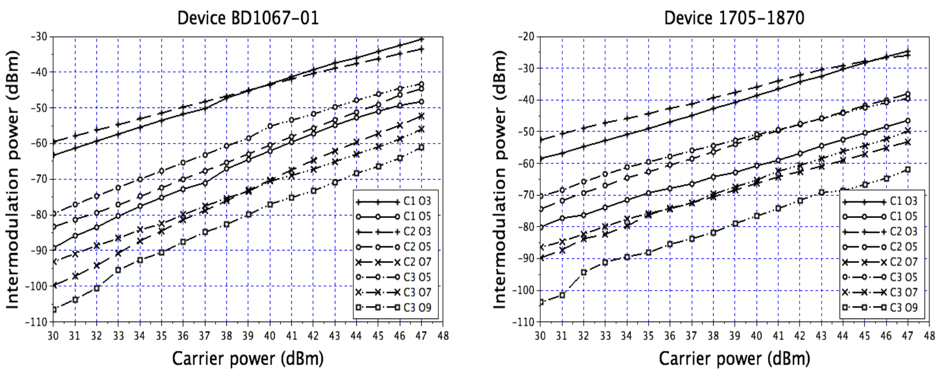
- Dispositifs non-réciproques utilisant une ferrite polarisée par un champ magnétique continu de forte valeur
- La puissance ne passe que dans un seul sens dans un isolateur
- Utilisation des isolateurs à l’intérieur des équipements hyperfréquences et pour améliorer l’adaptation entre les équipements à puissance inférieure à 1 watt
- Quasiment jamais utilisé en puissance sauf :
  - Radar (1 seule porteuse, émission et réception décalées dans le temps)
  - Sortie amplificateur télécom (filtrage ensuite, produits passifs << produits actifs)
  - Multiplexeur de sortie (si on ne sait pas faire autrement)
- Seraient très utiles si on pouvaient les utiliser entre les amplificateurs d’émission et les antennes en multiporteuse
- Mesures par Cobham dans le cadre d’un marché R&T CNES dans le but de réaliser des modèles plus précis

Mesures de deux isolateurs Cobham



- Mesures des produits d'ordre 3, 5, 7 et 9 à deux porteuses
- Banc de mesure adapté, très faibles produits
- Pentes de tous les ordres d'environ 2,5 dB/dB comme dans de nombreuses mesures publiées

Mesures obtenues pour les ordres 3, 5, 7 et 9

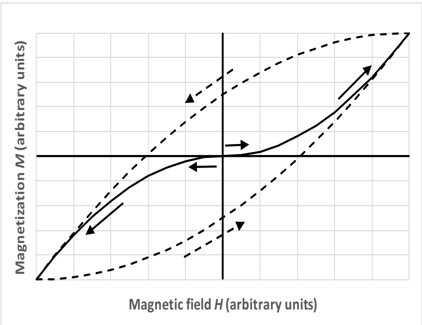


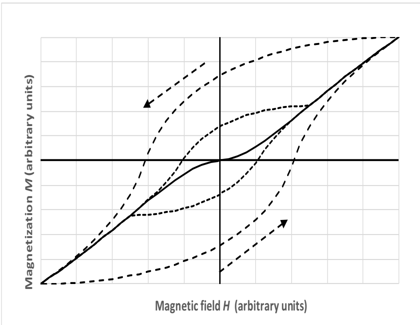
- Deux isolateurs ont été mesurés, courbes très semblables
- Difficiles à expliquer avec un modèle classique (polynôme, série entière ou développement de Taylor, fonction rationnelle ou développement de Padé)

Hystérésis magnétique (1)

- Mesure de l'aimantation $M(H)$ d'un barreau de fer en fonction du champ magnétique appliqué H par Ewing en 1885 (qui invente le mot hystérésis) et Rayleigh en 1887
- L'induction magnétique B dépend du champ magnétique et du matériau
- $B = \mu H$ peut aussi être écrite $B = \mu_0 H + M(H)$
- On peut encore enlever la partie linéaire de $M(H)$
- La partie non-linéaire dépend du carré de H (Rayleigh, 1887)
- Elle est antisymétrique, donc $M(H) = \mathrm{signe}(H).|H|^2$
- Discontinuité des dérivées à partir de l'ordre 2
- Pentes de 2 dB/dB

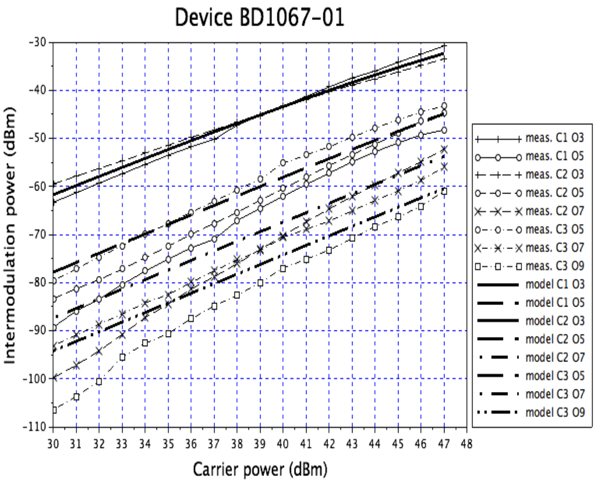
Hystérésis magnétique (2)





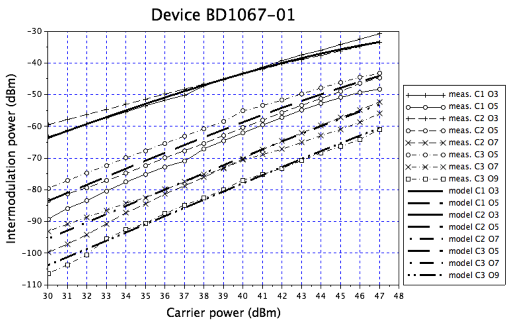
- Lorsque l'on inverse la direction de variation du champ H, l'aimantation ne revient pas sur la même courbe
- Le point décrit une courbe d'hystérésis
- Calcul des harmoniques par Rayleigh en 1887
- La deuxième courbe est déformée par la saturation magnétique

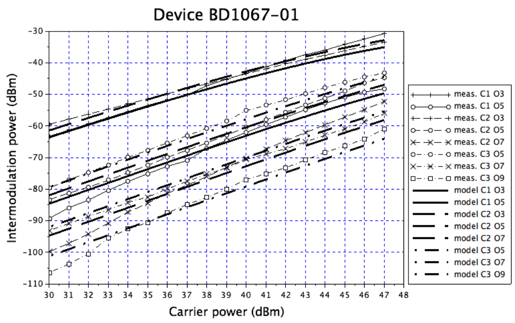
Modélisation physique



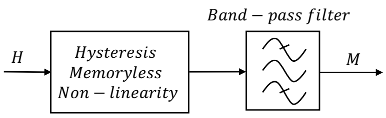
- On simule le fonctionnement de l'hystérésis avec saturation
- En signal sinusoïdal ou pour des porteuses proches on obtient un modèle physique sans hystérésis qui permet de calculer les produits proches des porteuses
- L'erreur reste assez importante car la pente obtenue est proche de 2 dB/dB (sauf saturation)

Modélisation comportementale



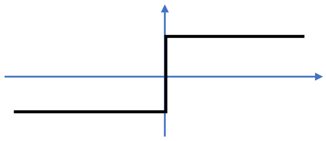


- Les pentes ne sont pas égales à 2 mais plutôt à 2,5 dB/dB
- La puissance des produits dépend un peu de la fréquence, modèle de Hammerstein, pente de 2,3 dB/dB

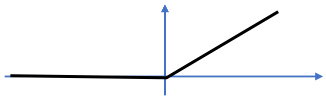


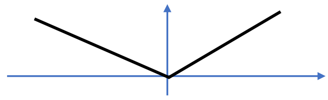
Autres modèles physiques non-analytiques

- Relais ou trigger de Schmidt
  pente 0 dB/dB

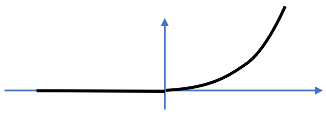


- Redresseur linéaire simple ou double alternance
  pente 1 dB/dB

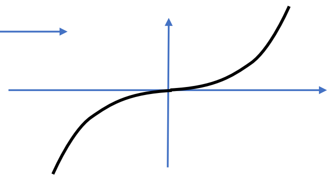




- Diode à vide $V = k\,I^{3/2}$
  pente 1,5 dB/dB



- Résistance non stabilisée en température
  pente 2 dB/dB possible



Modèles mathématiques

- Un modèle mathématique possible est donné par l'équation différentielle ordinaire linéaire et homogène du premier ordre :

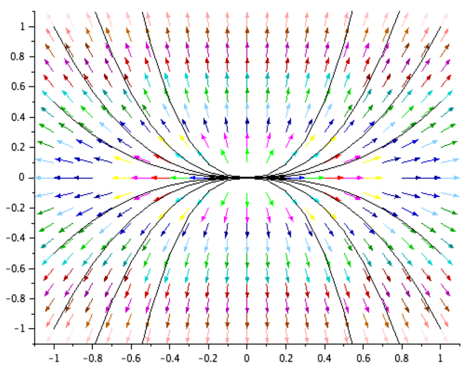
$$xy' + p(x)y = 0 \quad \text{avec} \quad p(x) = \textstyle\sum_{k=0}^{\infty} p_k x^k$$

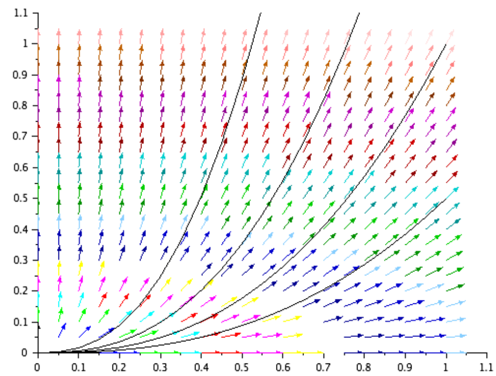
- Si on pose : $y = \alpha\, x^r$, on a : $y' = \alpha. r. x^{r-1}$, d'où : $\quad r. x^r + \sum_{k=0}^{\infty} p_k x^k\, x^r = 0$
- Pour le degré r, soit $k = 0$, on a l'équation indicielle : $\quad r + p_0 = 0$ soit $r = -p_0$
- Alors, la fonction $y = \alpha\, x^r$ (α indéterminé) est une solution particulière de l'équation :

$$x\,y' = r\,y \quad \text{ou} \quad \frac{dy}{y} = r\frac{dx}{x} \quad \text{ou} \quad \frac{dy}{dx} = r\frac{y}{x}$$

- On s'arrête là si les coefficients suivants du polynôme $p(x)$ sont nuls
- La solution donnée ainsi n'est définie que pour les $x \geq 0$
- Pour la prolonger vers les $x < 0$, on peut prendre une solution symétrique ($y = \alpha\,|x|^r$) ou bien antisymétrique ($y = \beta\ \text{signe}(x)\ |x|^r$) ou bien quelconque (puisqu'il n'y a pas de continuité en 0).
- La solution générale est de la forme : $\quad y = \alpha\,|x|^r + \beta\ \text{signe}(x)\ |x|^r$

Solutions pour $r = 2{,}5$





- Fonctions complètes

Zoom sur la partie positive

Séries de Frobenius

- Si les autres coefficients du polynôme p ne sont pas nuls, la solution est une série de Frobenius de la forme :

$$y(x) = x^r \sum_{k=0}^{\infty} a_k(r) x^k$$

- Alors : $$y'(x) = x^r \sum_{k=0}^{\infty} (k+r).\, a_k(r) x^{k-1}$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} (k+r).\, a_k(r) x^k + \sum_{k=0}^{\infty} p_k x^k . \sum_{k=0}^{\infty} a_k(r) x^k = 0$$

- On a toujours : $r = -p_0$
- Le terme a_0 de degré minimum de y est indéterminé, on prend $a_0 = 1$
- Le terme suivant est donné par : $(r+1)a_1 + p_1 a_0 + p_0 a_1 = 0$
  soit $a_1 = -p_1 a_0 = -p_1$
- Les termes suivants sont obtenus par récurrence
- La série de Frobenius est une série de Taylor multipliée par un terme de degré réel, en général non-entier
- Pour prolonger la solution vers les $x < 0$, comme dans le cas précédent, on peut prendre une solution symétrique ou bien antisymétrique ou bien quelconque (puisqu'il n'y a pas de continuité en 0)
- Si r n'est pas entier, ou si la symétrie ne correspond pas à la parité la solution n'a pas de développement de Taylor en 0

Conclusion

- Suite de la R&T CNES (proposition en cours avec Cobham)
  - Mesures avec 3 porteuses
  - Mesures avec des porteuses de puissances différentes
  - Autres types de saturations
  - Modèle de Wiener-Hammerstein
- Recherche d'un modèle physique de l'hystérésis plus détaillé avec une pente comprise entre 2 et 2,5 dB/dB
  - Application à d'autres modèles de non-linéarités (résistances, mauvais contacts, …)
- Mesure et modélisation de mélangeurs à FET froids (proposition de R&T CNES avec LAAS pour 2018)

Références

- J. A. Ewing, "Experimental Researches in Magnetism", *Philosophical Transaction R. Soc. London,* 1885 **176**, January 1885, pp. 523-640
- Lord Rayleigh, "Notes on electricity and magnetism – III. On the behaviour of iron and steel under the operation of feeble magnetic forces", *Philosophical Magazine and Journal of Science*, March 1887, pp. 225-245
- C. P. Steimetz, "On the law of hysteresis*", Trans. Of the American Inst. of Electrical Engineers*, Vol. 9, No. 1, January 1892, pp. 1-6
- C. P. Steimetz, Part II 1892, part III 1894
- L. Néel, "La loi d'approche en α/H et une nouvelle théorie de la dureté magnétique", Journal Physisque Radium, May 1948, Vol. 9, No. 5, pp. 182-192
- Chapman, Rootsey, Polidi, Davison, "Hidden threat multicarrier passive component IM generation", *AIAA 6th Communications Satellite Systems Conference*, April 1 976, Montreal, Canada, pp. 296/ 1-9
- J.-T. Hsu and K. D; T. Ngo, "A Hammerstein-based dynamic model for hysteresis phenomenon", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 12, No. 3, May 1997, pp. 406-413
- A. Shitvov, D. Zelenchuk, A. Schuchinsky, "Carrier-Power Dependence of Passive Intermodulation Products in Printed Lines*", 2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, 16-17 November 2009, pp. 177-180
- A. De Sabata and A. Ignea, "Passive intermodulation distortions induced by ferromagnetic materials at GSM frequencies", *Proc. of the international Symp. On Signals, Circuits and Systems*, ISSCS2013, Iasi, Romania, July 2013
- J. Sombrin, "Non-analytic at the origin behavioral models for active or passive non-linearity", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 133-140
- J. Sombrin, Soubercaze-Pn, I. Albert, "Multicarrier Passive Inter-Modulation Prediction from 2-Carrier Measurements", *31st AIAA International Communication Satellite Systems Conference*, October 14-17 , 2013, Florence
- A. Shayegani, J. Salmon, RR. Singh, "Multicarrier PIM Behavior and Testing in Communications Satellites", *32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference*, August 2014, San Diego
- Un-Pyo Hong, "Investigation of PIM Contribution by MLI and Studs on Spacecraft Structure Sample", 8th Int. WS. On Multipactor, Corona and Passive Intermodulation, September 2014, Valencia
- Un-Pyo Hong, M. Schneider, V. Claudet, "Analysis and measurement of passive intermodulation for feed components for telecommunication satellites", 8th Int. WS. On Multipactor, Corona and Passive Intermodulation, April 2017, Nordwijk
- J. Sombrin et al. "Physical and Behavioral Models of Intermodulation Products Generation in Microwave Ferromagnetic Devices", *under review*