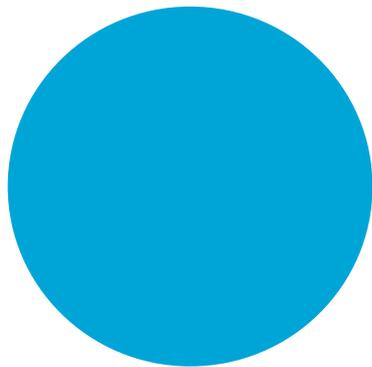


iXblue



Etat de l'art sur les modulateurs optiques analogiques et l'électronique associée



Modulation analogique

- Systèmes de communications analogiques par opposition aux communications numériques
- La transmission de signaux RF & hyper radio par fibre optique (RoF) apporte des solutions attrayantes de communications à très hautes fréquences, à faible pertes et faible dispersion
- Elle nécessite des système de modulation performants et – si possible - linéaires
- Applications
 - Systèmes militaires
 - Communications- tous types
 - Intelligence, surveillance, et reconnaissance (ISR)
 - Guerre électronique (Electronic warfare EW)
 - Systèmes Commerciaux civils
 - Communications mobiles
 - Radar d'aéroport
 - Communications inter & intra satellite
 - CATV

SOMMAIRE

Modulation analogique: modulation directe / modulation externe

Le niobate de lithium et le principe des modulateurs Mach-Zehnder

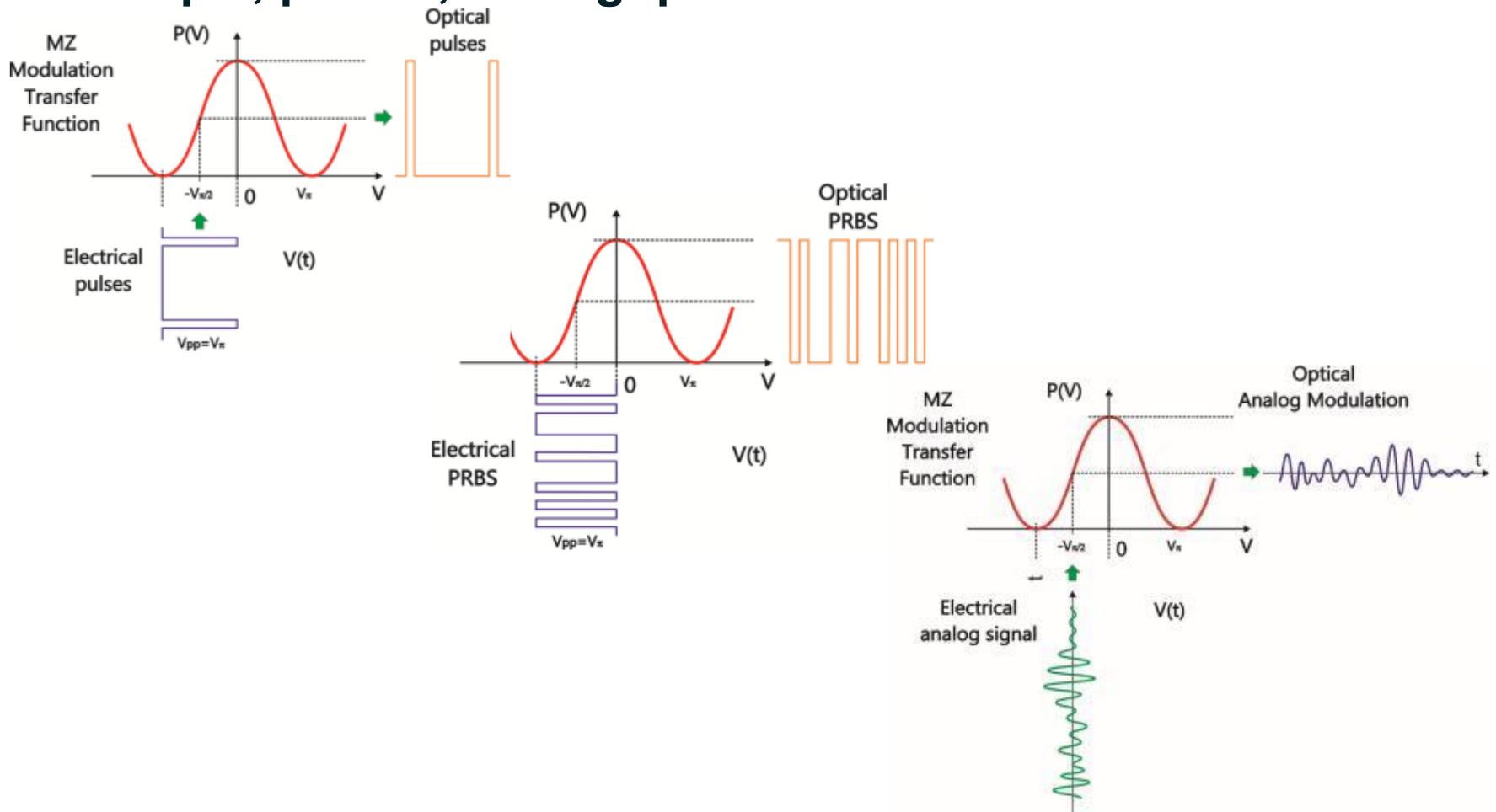
Modulation analogique avec un modulateur d'amplitude Mach-Zehnder

Amplificateur micro-onde pour modulateur

Electronique de contrôle de biais de modulateur

Autres exemples d'applications pour la modulation analogique: CS-DSB, SSB , CS-SSB

Les principaux mode de modulation avec un MZM: numérique, pulsée, analogique

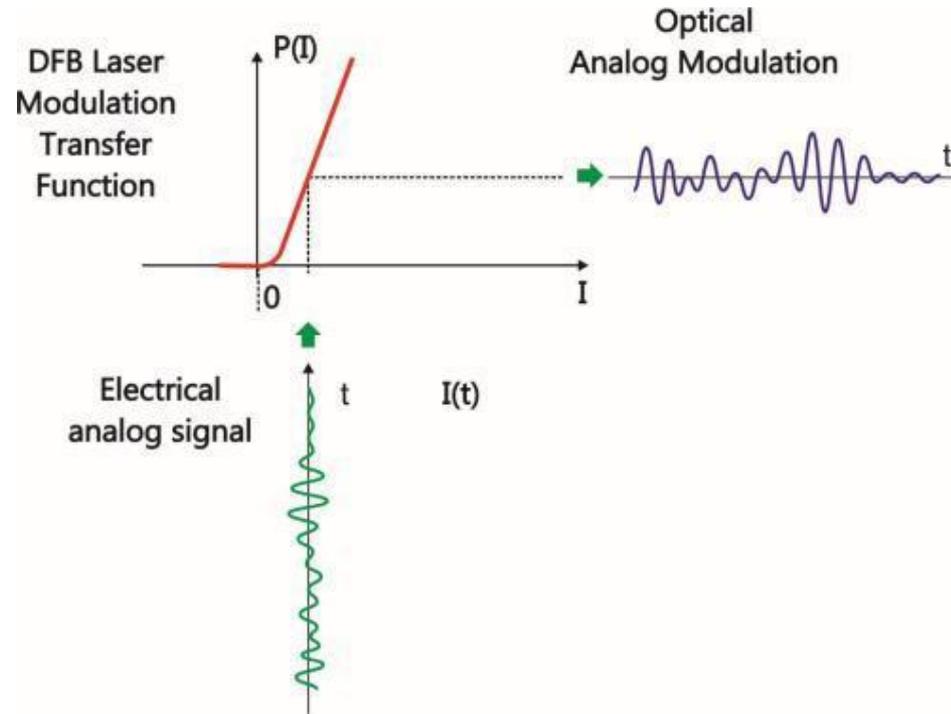


Modulation analogique : Distorsion du signal

- Modulation numérique : gigue, S/N, DER, BW, point de croisement, temps de montée et de descente
- Modulation analogique: le système de modulation doit restituer fidèlement la forme du signal sans distorsion
- Difficulté: La fonction de transfert du système peut présenter des non linéarités d'origines passive ou dynamique
- On s'intéresse notamment aux distorsions du 2ème et 3ème ordre
- Paramètres clés de la modulation numérique
 - Gain de la liaison
 - SFDR (Spurious free dynamic range)
 - Compression point
 - Interception point

Modulation directe versus modulation externe (Modulateur Mach-Zehnder)

- Idée simple : tirer parti de la réponse linéaire de la puissance émise par un laser en fonction du courant d'injection appliqué



Equations couplées d'évolution d'un laser semiconducteur (DFB)

- La fonction de transfert n'est linéaire qu'aux basses fréquences
- Tenir compte de la réponse dynamique

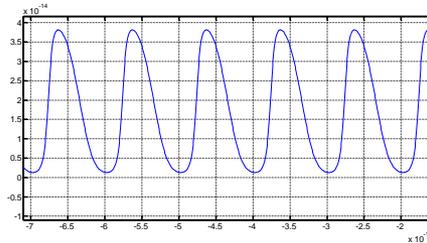
$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I}{eV} - g_o [n(t) - N_o] [1 - \varepsilon P(t)] P(t) - \frac{n(t)}{\tau_n}$$
$$\frac{dP(t)}{dt} = \Gamma g_o [n(t) - N_o] [1 - \varepsilon P(t)] P(t) - \frac{P(t)}{\tau_p} + \Gamma \beta \frac{n(t)}{\tau_n}$$
$$\nu(t) - \nu_m = \frac{\alpha_H}{4\pi} \left(\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} + \frac{\varepsilon}{\tau_p} P(t) \right)$$

- $n(t)$: number of carriers in the cavity
- $P(t)$: number of photons
- $\nu(t)$: optical frequency
- I : current (A)
- V : volume of the cavity
- e : electrical charge of the electron
- α_H : Henry coefficient
- Γ : Confinement coefficient
- g_o : optical gain
- N_o : carrier density at transparency
- ε : gain compression coefficient
- τ_n : carrier life time
- τ_p : photon life time
- β : Spontaneous emission coupling

External Modulation versus Direct modulation

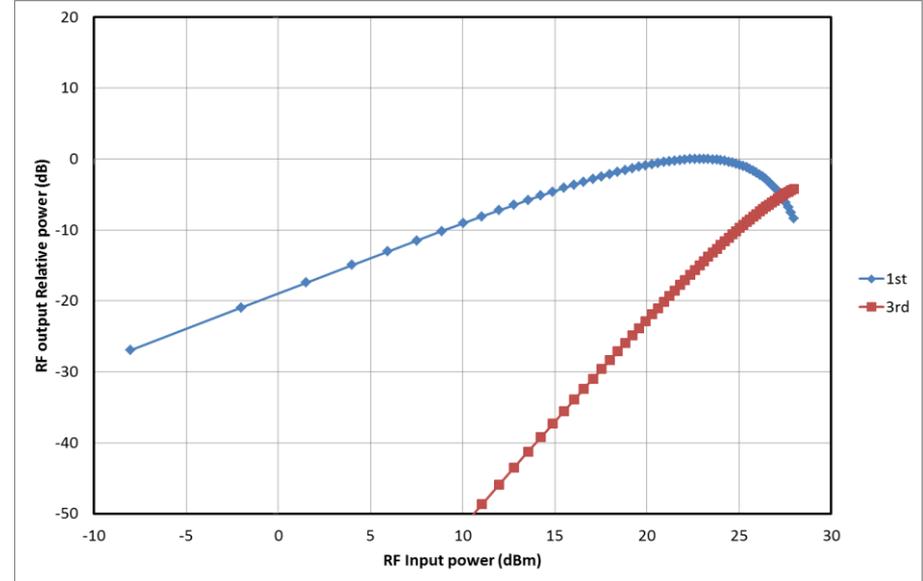
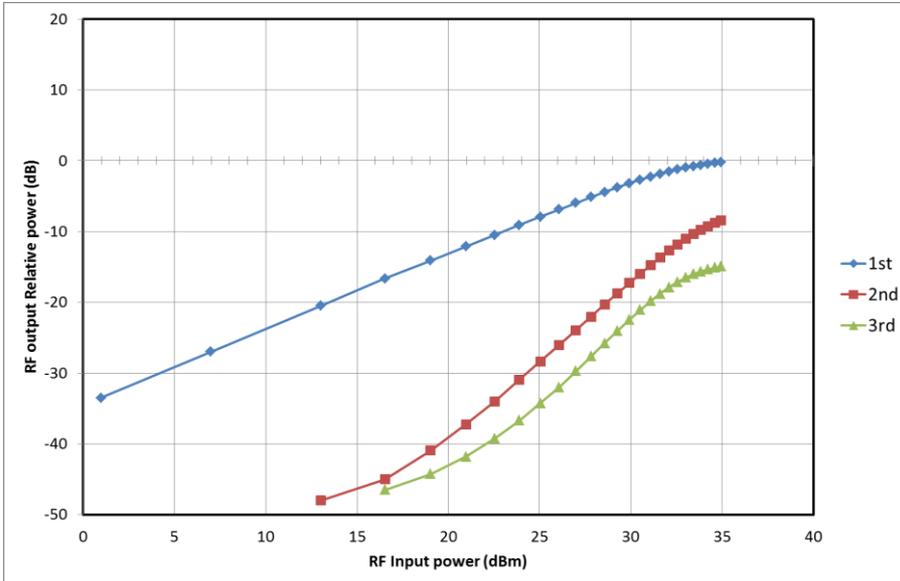
- Réponse d'un laser DFB
 - Forte distorsion du signal
 - Présence distorsion de 2nd et 3rd ordre

Exemple à 10GHz



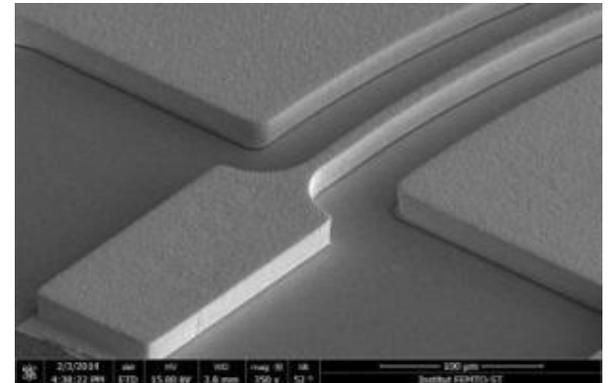
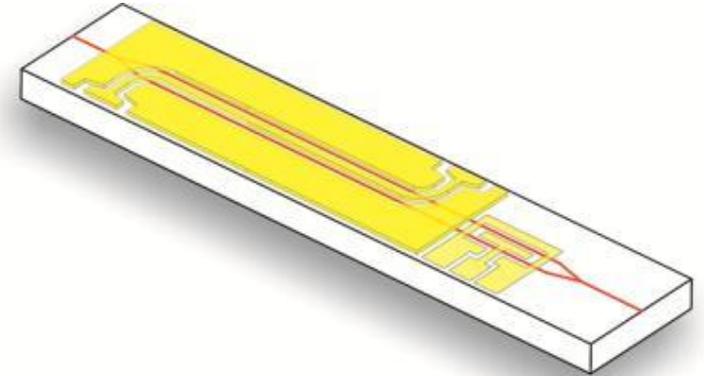
- Modulation externe par modulateur Mach-Zehnder
- Réponse en sinus de la tension appliquée
- Présence de distorsion de 3rd ordre

$$P(t) = \frac{P_o}{2} \left[1 + \sin \frac{\pi}{V_\pi} V(t) \right]$$



Modulateur optique: Définition

- Dispositif modifiant les propriétés de la lumière
 - Phase, Fréquence optique, Amplitude, Etat de polarisation
- Constitué d'un circuit de guide optique en configuration Mach-Zehnder, des électrodes RF et des électrodes DC séparées
- Modulateur: piloté par le signal électrique appliqué aux électrodes parallèles au guides optiques
- Le signal interagit avec la lumière qui traverse le guide par effet électro-optique
 - Le modulateur = convertisseur électrique optique
 - Le photo détecteur = convertisseur optique électrique



Le matériau de prédilection : le niobate de lithium

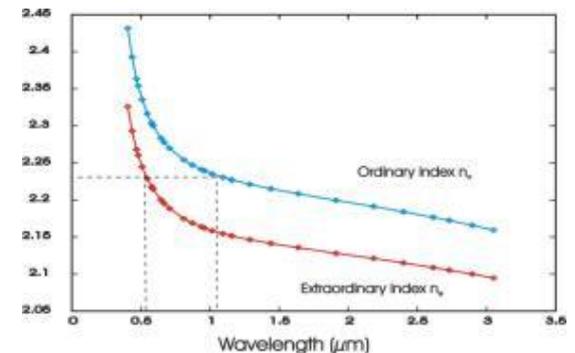
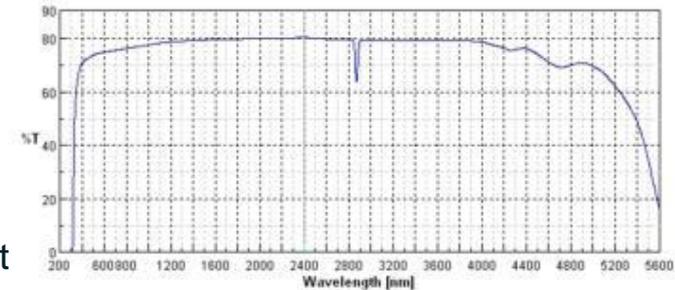
● Caractéristiques

- Cristal ferroélectrique, 3m-Class, (LiNbO₃)
- Coefficient électro-optique très élevé ($r_{33}=30 \cdot 10^{-12}\text{m.V}^{-1}$)
- Transparent de l'UV (250nm) jusqu'à l'infra rouge loint (4800nm)
- Biréfringent $n_e=2.14$ & $n_o=2.22$
- Deux procédés de réalisation de guide d'onde possible :

- **Diffusion du titane et échange protonique**

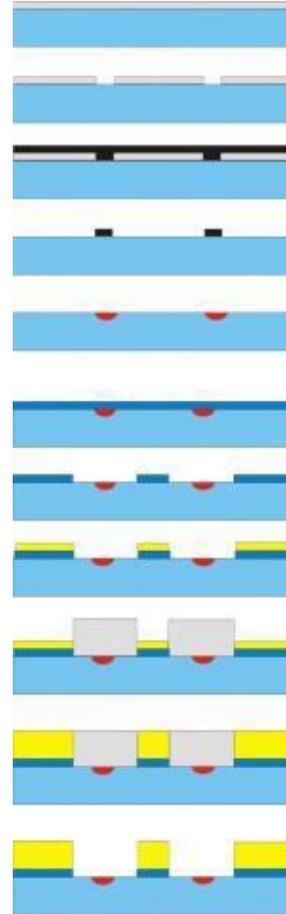
● Limites

- Permittivité diélectrique élevée $\epsilon_{11}=44$ $\epsilon_{33}=28$
- Effets pyroélectriques en coupe Z
- Effets photo-réfractifs dans le visible



Technologie: diffusion du titane

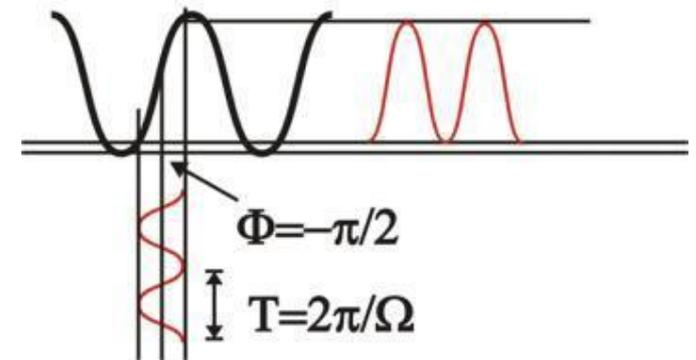
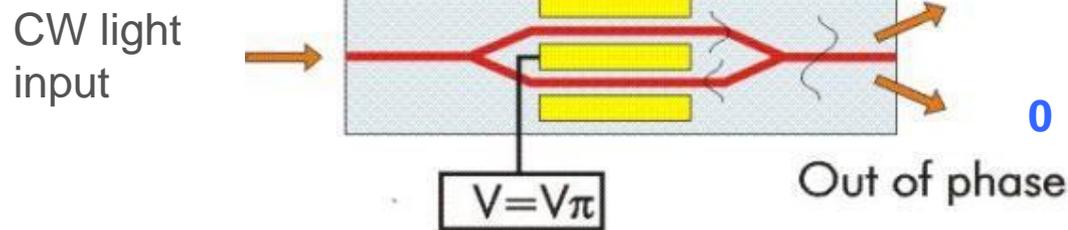
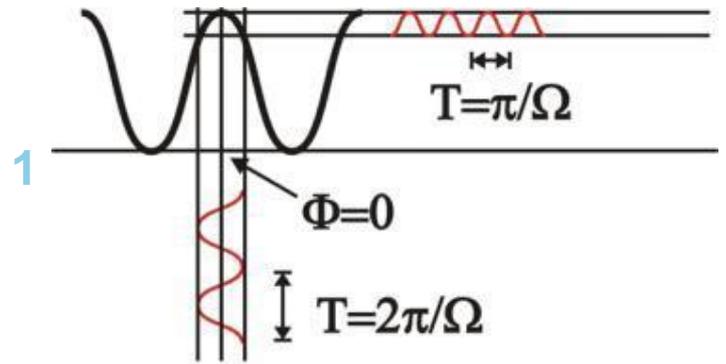
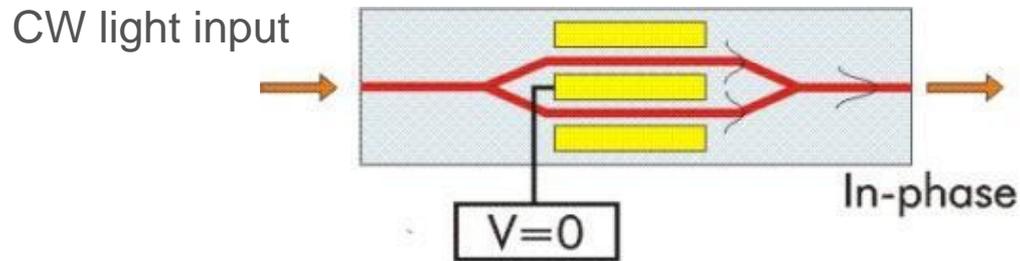
- Guide d'onde optique: dopage réalisé par diffusion de titane à haute température sur une profondeur de quelques micromètres.
- Ruban de titane caractérisé par son épaisseur τ et sa largeur w
- Diffusion caractérisée par la température θ et sa durée t
- Choix des paramètres déterminé par la longueur d'onde pour un guidage monomode
- Distribution de champ lumineux adapté à la taille du champ dans la fibre optique



Propriétés de la diffusion du titane

- Supporte les deux états de polarisation
- Excellentes propriétés de stabilité long terme à 1300nm et 1550nm avec une très faible dérive de biais (drift)
- Très faibles pertes d'insertion
- Record 2.4dB sur un Modulateur d'amplitude X à 1550nm
- Record de 1.4 dB sur un Modulateur de phase à 1550nm
- Taux d'extinction typique 25dB
- Taux d'extinction 40dB avec technologie à fort PER

Principe de fonctionnement du Mach-Zehnder



Caractéristiques essentielles d'un modulateur de type Mach-Zehnder analogique X-Cut @ 1550nm

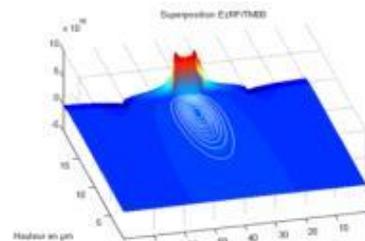
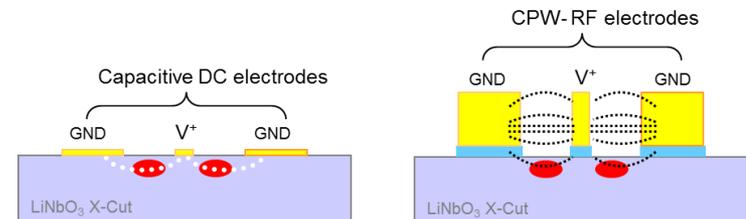
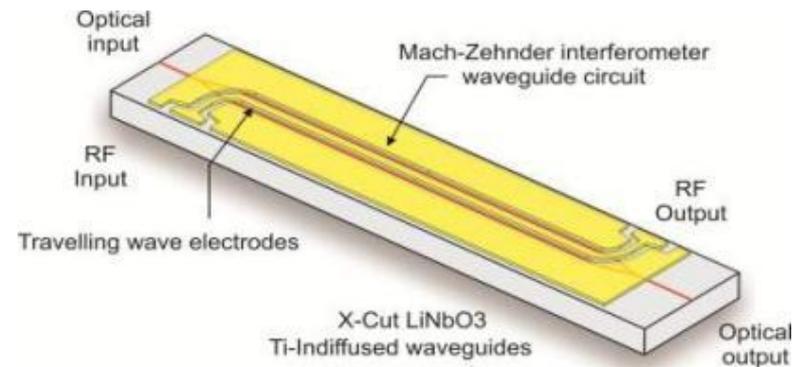
- Tension demi-onde électrode DC $V_{\pi_{DC}}$ (6-7V)
- Tension demi-onde électrode RF $V_{\pi_{RF}}$ (4-5V)
- Tension demi-onde effective : $V_{\pi_{eff}}$ @ GHz
- Perte d'insertion IL (dB) (3dB)
- Taux extinction statique SER (dB) (>30dB)
- Taux de réflexion optique ORL (dB) (>45dB)
- Taux d'extinction de polarisation PER (dB) (>30dB)
- Bande passante électro-optique : E-O S21 (dB) (15-32GHz)
- Taux de réflexion électrique : ERL ou S11 (dB) (>12dB)
- Chirp (α) <0.1

Définition de la tension demi-onde d'un modulateur Mach-Zehnder en Push pull

- La tension demi-onde : la tension nécessaire pour introduire un déphasage de π radian entre deux ondes.
- Une valeur faible de $V\pi$
 - permet une consommation moindre
 - offre une plus grande sensibilité

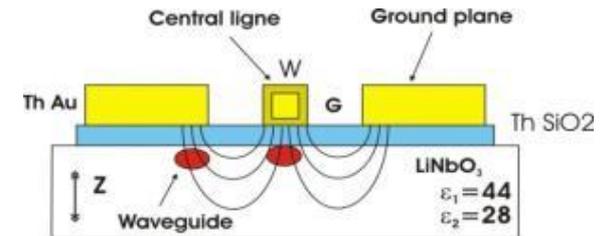
$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{2r_{33}n_e^3\eta L}$$

- avec $\eta=0.3$, $L=3\text{cm}$, $\lambda=1550\text{nm}$; $d=16\mu\text{m}$
- $V\pi=5\text{V}$



Les électrodes RF

- Les électrodes RF et leur conception permettent d'atteindre des bandes passantes très importantes (10-40GHz) tout en garantissant une faible valeur de $V\pi$
- L'impédance caractéristique doit être proche de 50Ω .
- Les pertes de propagation micro-onde : effet de peau avec une dépendance en racine carrée de la fréquence.
- Indice micro-onde. Condition d'adaptation de phase avec l'indice optique

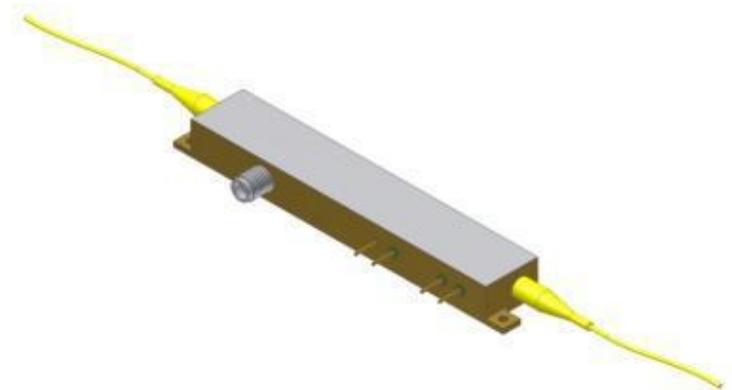
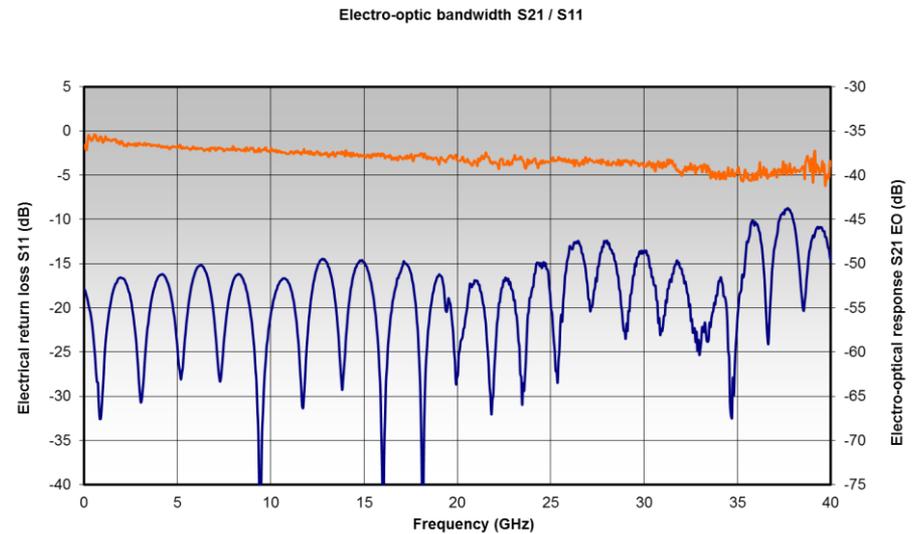


$$\Delta\varphi(f) = \frac{2\pi}{\lambda} n_e^3 r_{33} \eta \frac{V_o}{g} L \exp(-\alpha L/2) \left[\frac{\sinh^2(\alpha L/2) + \sin^2(\xi L/2)}{(\alpha L/2)^2 + (\xi L/2)^2} \right]^{1/2}$$

$$\xi = (n_\mu - n_o) \frac{2\pi f}{c} \qquad \alpha(f) = \alpha_o \sqrt{f}$$

Caractéristiques

- MX-AN-LN-40 performances at 40GHz
 - Bande passante >30GHz
 - Tension demi-onde 5V
 - Perte d'insertion <3dB
 - SFF packaging faibles dimensions 85mm
 - Faible chirp <<0.1
 - Forte réjection de polarisation par conception et technologie=Faible génération de deuxième harmonique



Notion de facteur de mérite

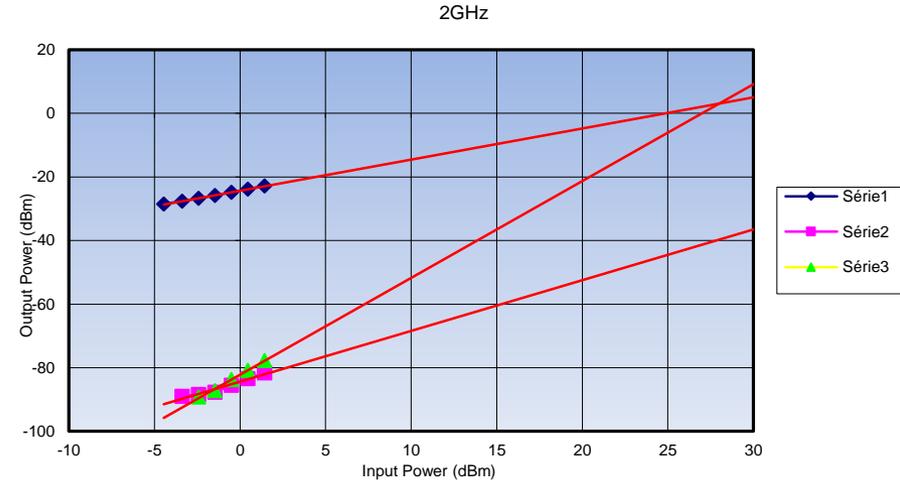
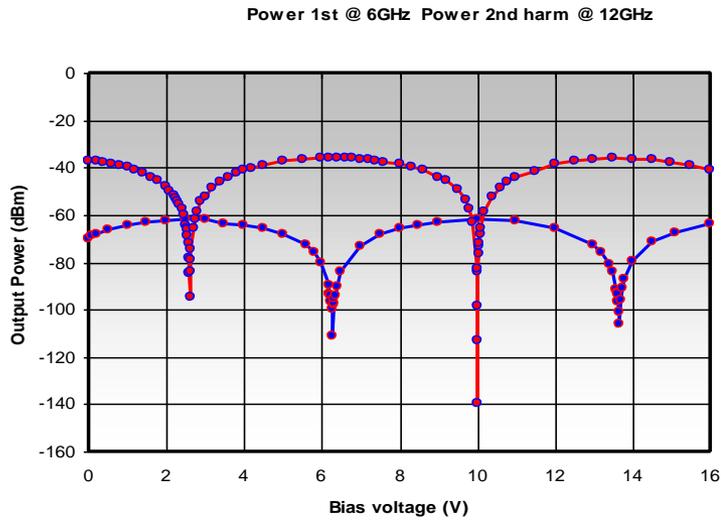
- Notion de Facteur de mérite du modulateur analogique
- Compromis entre la tension demi-onde effective à la fréquence de travail, et les pertes d'insertion.
- Traduit la puissance électrique convertie dans les raies latérales pour une puissance optique donnée:

$$\text{FoM} = (10^{-\alpha/10} / V\pi_{\text{eff}})^2$$

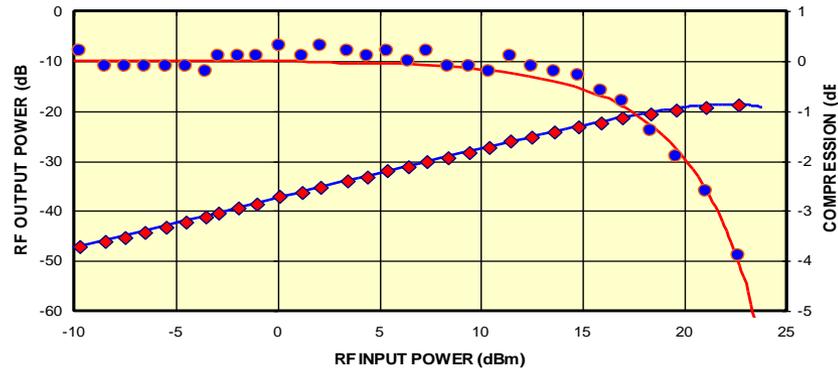
- Pertes des modulateurs: 2.6dB
- BW=35GHz @ -3dB
- $V\pi=5\text{V}$ @ DC & $V\pi_{\text{eff}}=7\text{V}$ @ 35GHz

- FoM= 1.1×10^{-2}

Caractérisation analogique



Compression & Linearity at 1.5 GHz , 1550nm wavelength and 12dBm input optical power; VpiRF=6V BW=18 GHz IL=4.0dB



- SFDR
- 2ème harmonique
- Point de compression

Données: Remplir les paramètres modulateur, laser, détecteur



Pertes modulateur(dB)	Sensibilité Photodiode (A/W)	Puissance laser (W)	Vpi @ DC	Bande passante modulateur @-3dB	Fréquence de travail (GHz)
3,00	0,80	0,01	4,80	30,00	27,00

Résultats : Performances de la liaison analogique

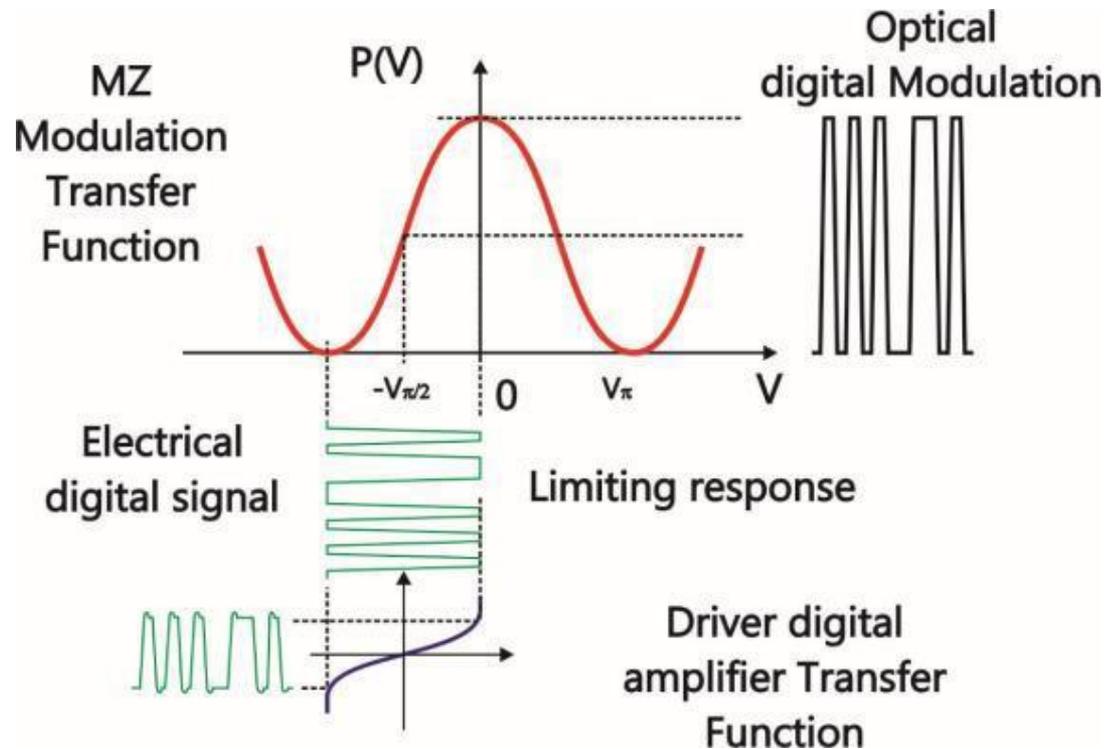
Vpi effectif (volt)	Gain de la liaison (dB)	Amplitude IIP3 (V)	Puissance (dBm) IIP3	Compression P1dB (dBm)	Puissance sortie (dBm) OIP3	Noise Figure (dB)	SFDR (dB/Hz ^{2/3})
6,55	-26,36	5,90	25,40	16,01	-0,96	39,36	106,69

Références fixes

Amplitude (Volt) pour 0dBm	Bande passante (Hz)	OSNL (dBm/Hz)	BNL (dBm/Hz)	Résistance Charge (ohm)
0,22	1,00	-161,00	-174,00	50,00

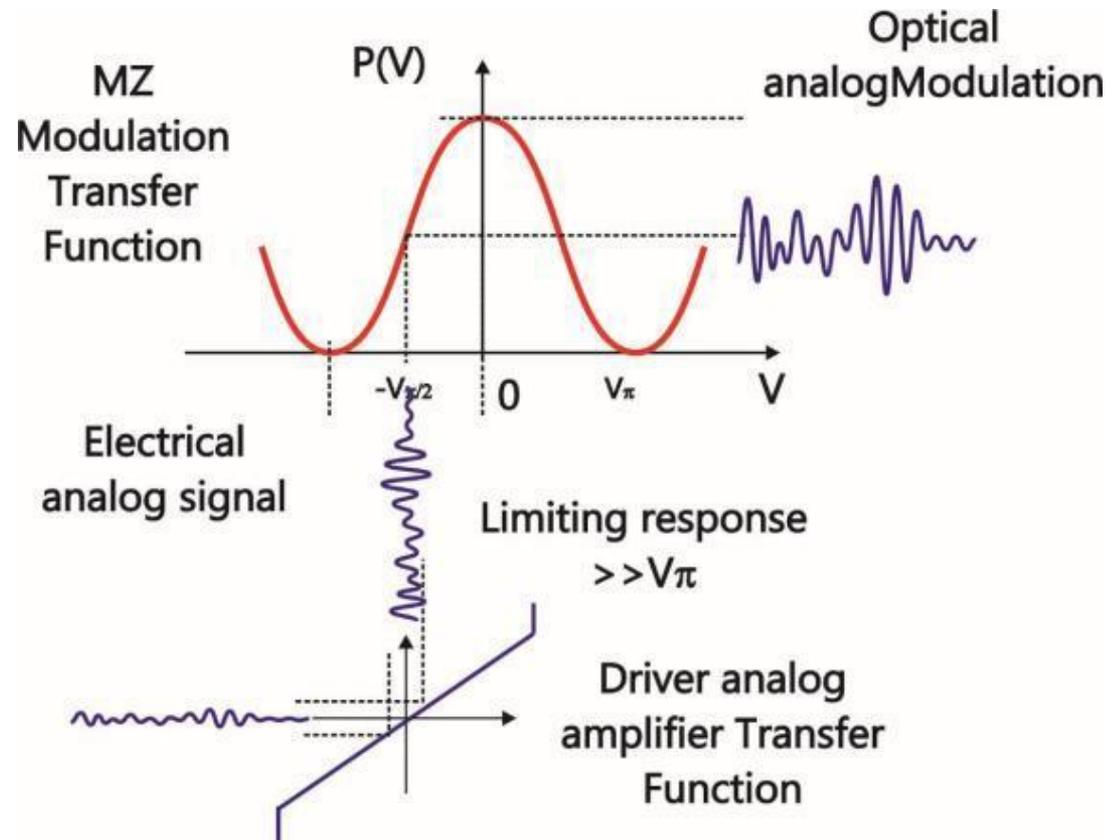
Comparaison entre un driver amplificateur numérique et analogique

- Driver numérique: réponse limitée pour $V_{pp}=V\pi$ saturation du signal & élimination des overshoot



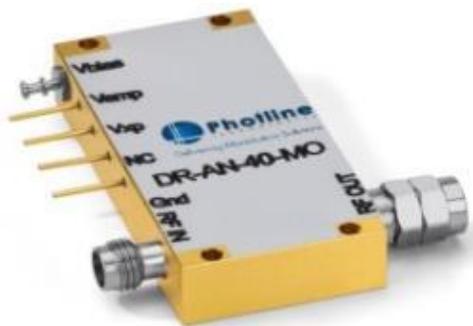
Comparaison entre un driver amplificateur numérique et analogique

- Driver analogique: V_{pp} de la section linéaire \gg Tension demi-onde V_{π} . La réponse en *sinus* du modulateur est le seul élément limitant pour la distorsion



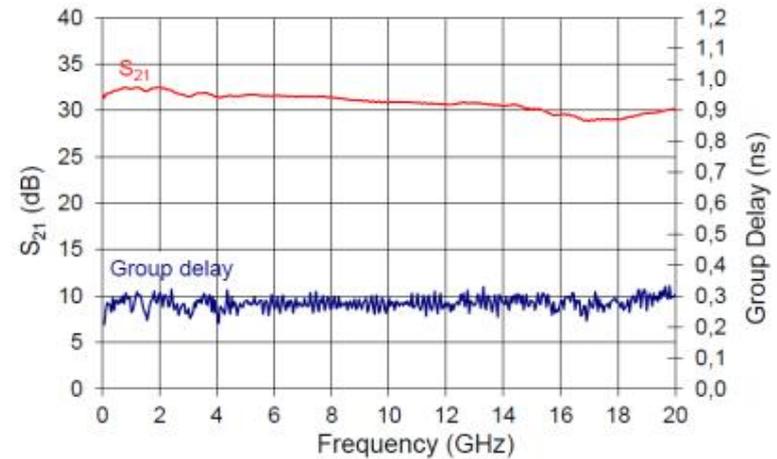
Driver amplificateur analogique

- DR-AN performances
- Bandwidth >20-30GHz
- Output swing voltage 9-12V
- Gain 18-30dB



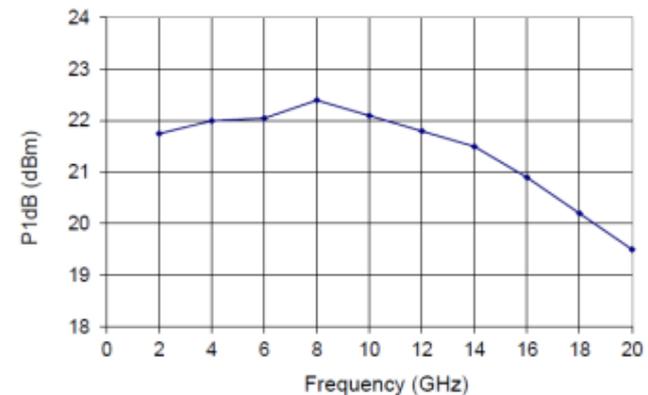
S_{21} and Group Delay Parameter Curves

Conditions: $V_{bias} = 12\text{ V}$, $V_{amp} = 1.2\text{ V}$, $I_{bias} = 300\text{ mA}$

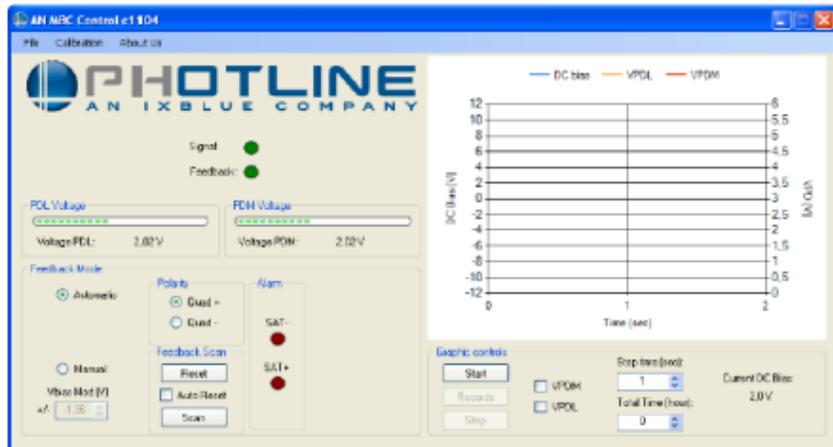
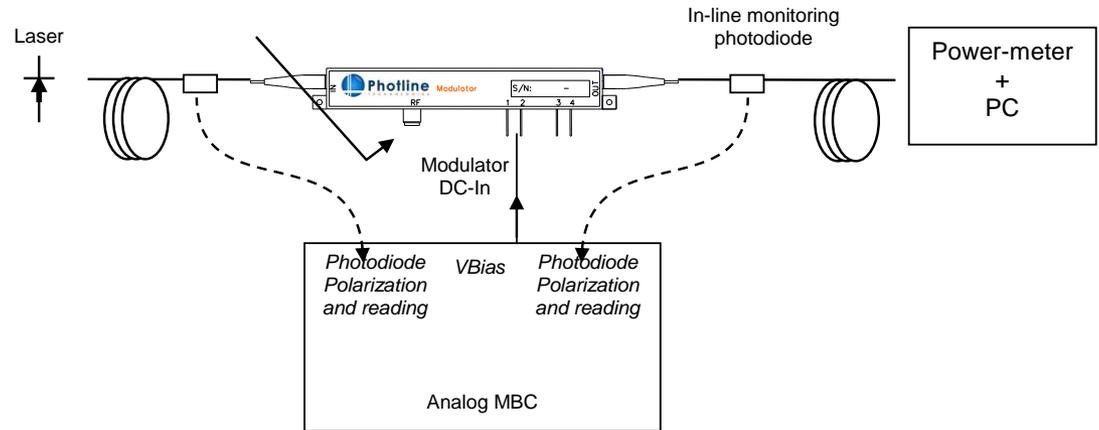


Saturated Output Power Curve

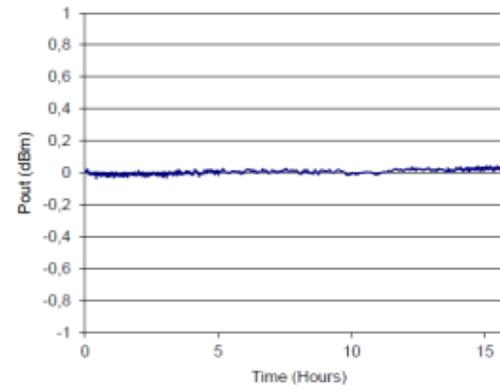
Conditions: $V_{bias} = 12\text{ V}$, $V_{amp} = 1.2\text{ V}$, $I_{bias} = 300\text{ mA}$



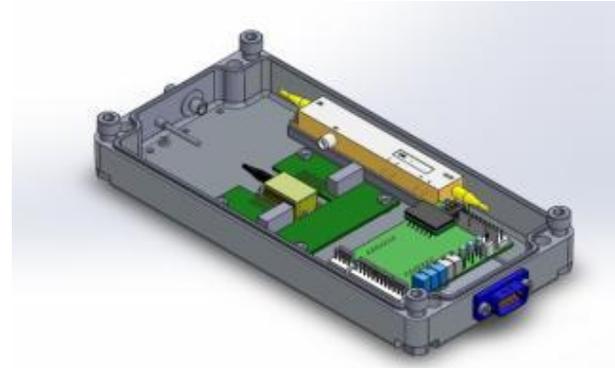
Contrôleur de biais de Modulateur MBC analogique



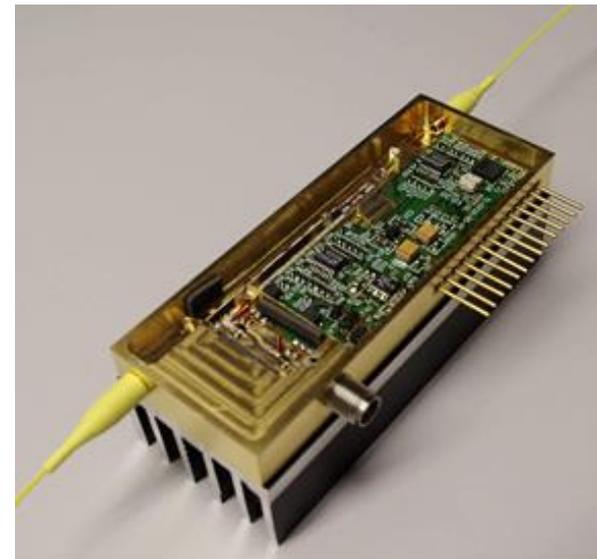
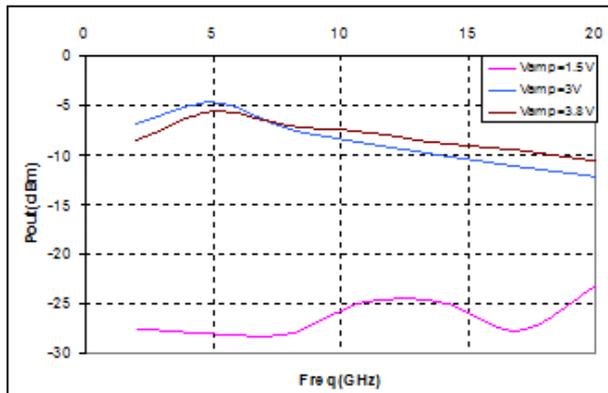
Output Power Stability



Exemple de Module compact



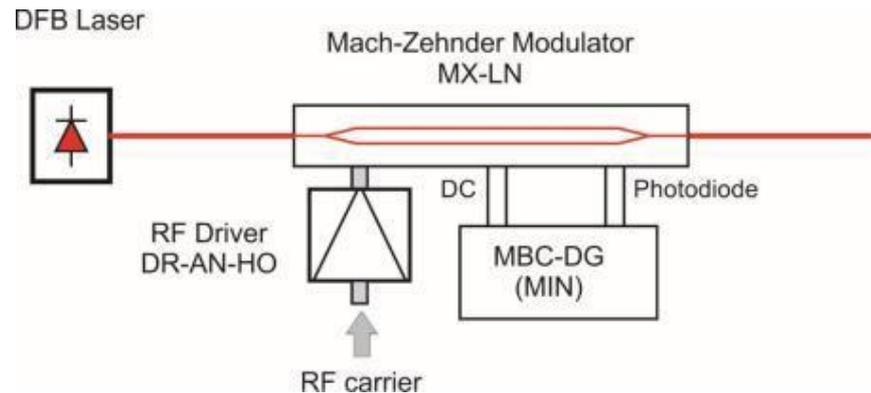
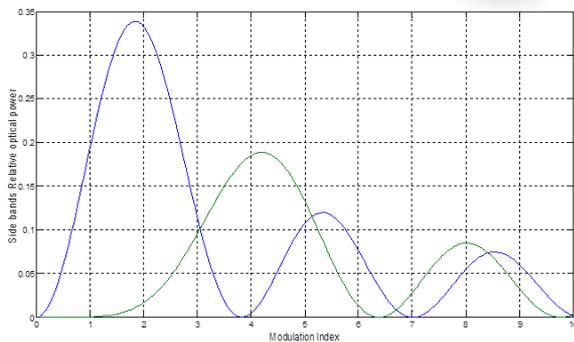
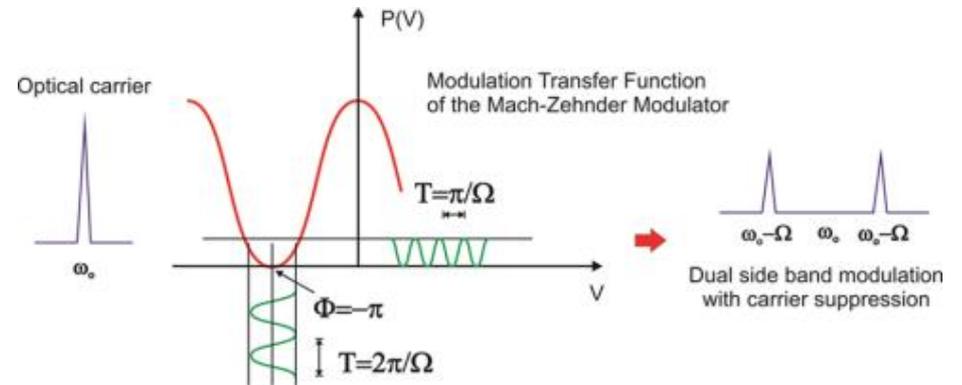
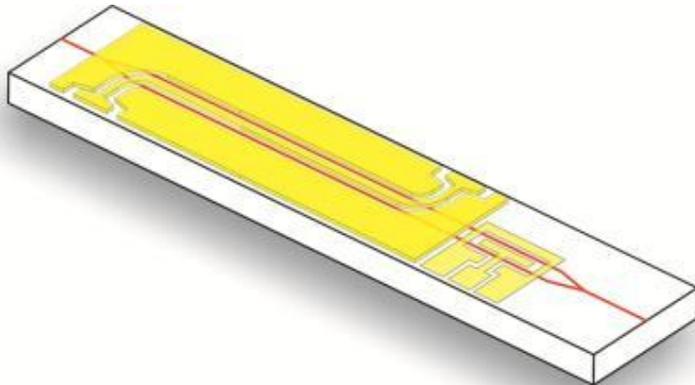
- Exemple d'intégration de combo
 - Modulateur
 - Driver analogique
 - MBC analogique



► Point de compression à 1dB

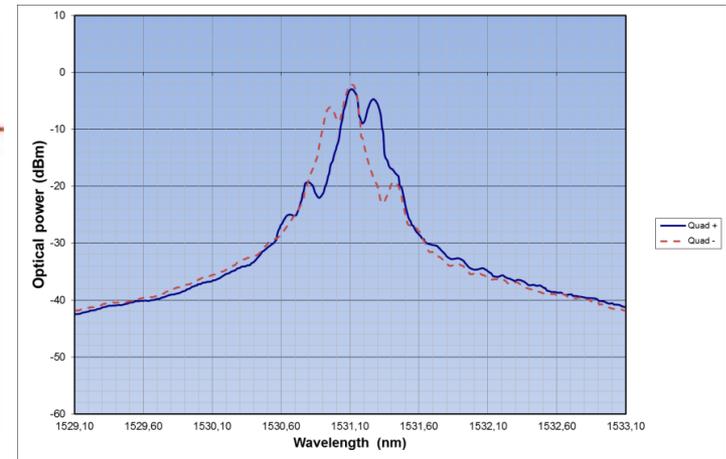
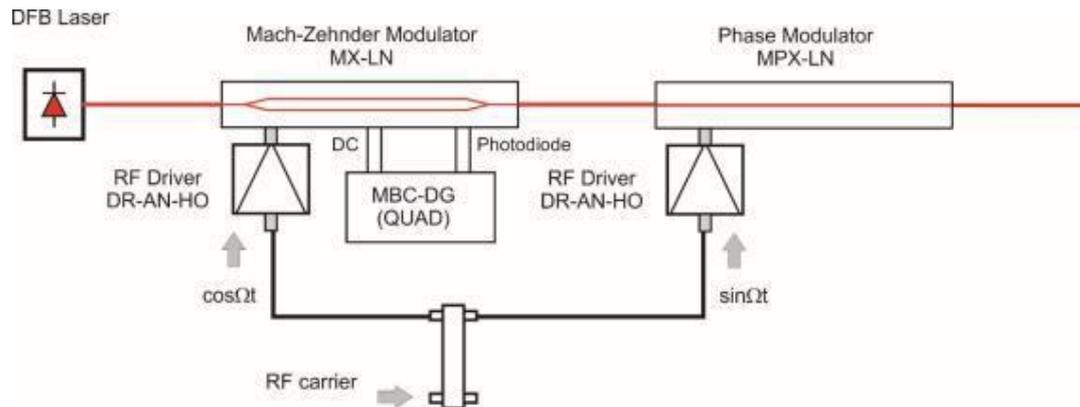
Exemple 1 : CS-DSB

- Modulation sinusoidale sur un MZM en mode MIN i.e. $-\pi$ rad
- Suppression de porteuse et génération de deux bandes latérales



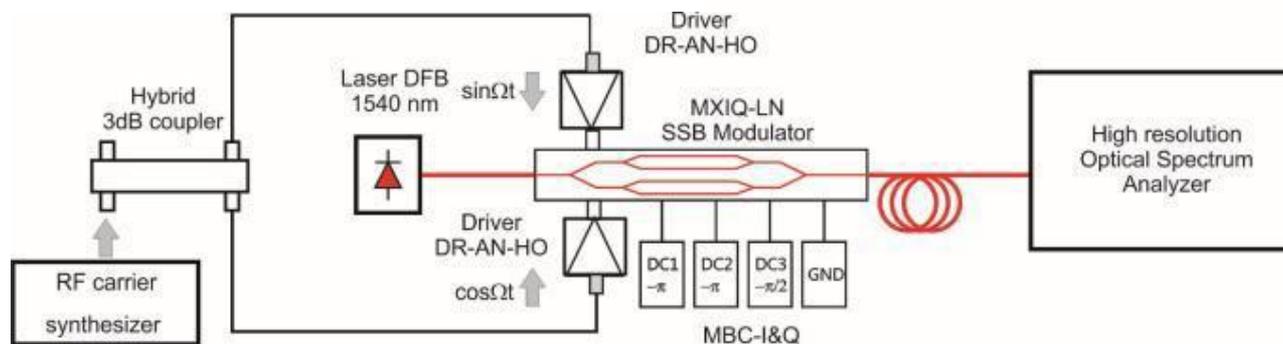
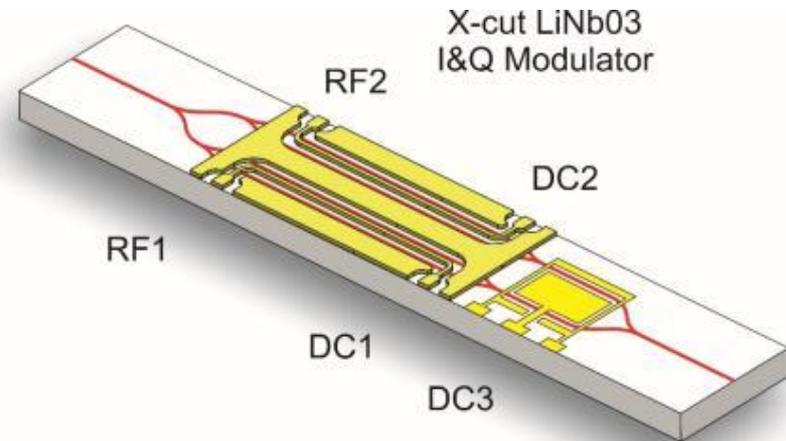
Exemple 2 : SSB (Single side Band) avec combinaison PM+MZM

- Configuration basée sur un MZM en cascade avec un modulateur de phase
- Signal cosinusoidal sur le MZM et signal sinusoidal sur le PM
- Le MZM est au biais à $-\pi/2$, ie (en quadrature)



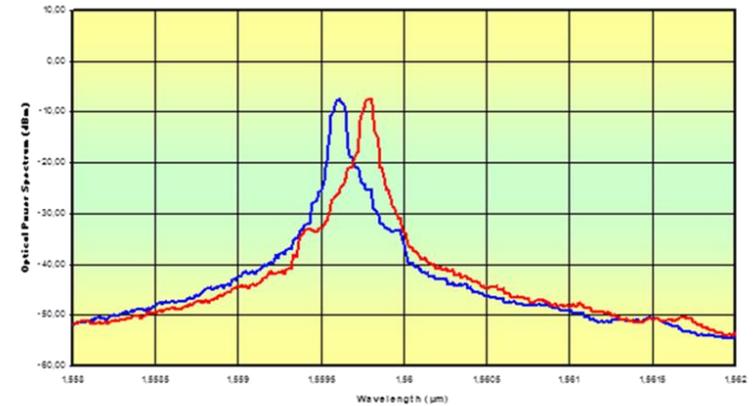
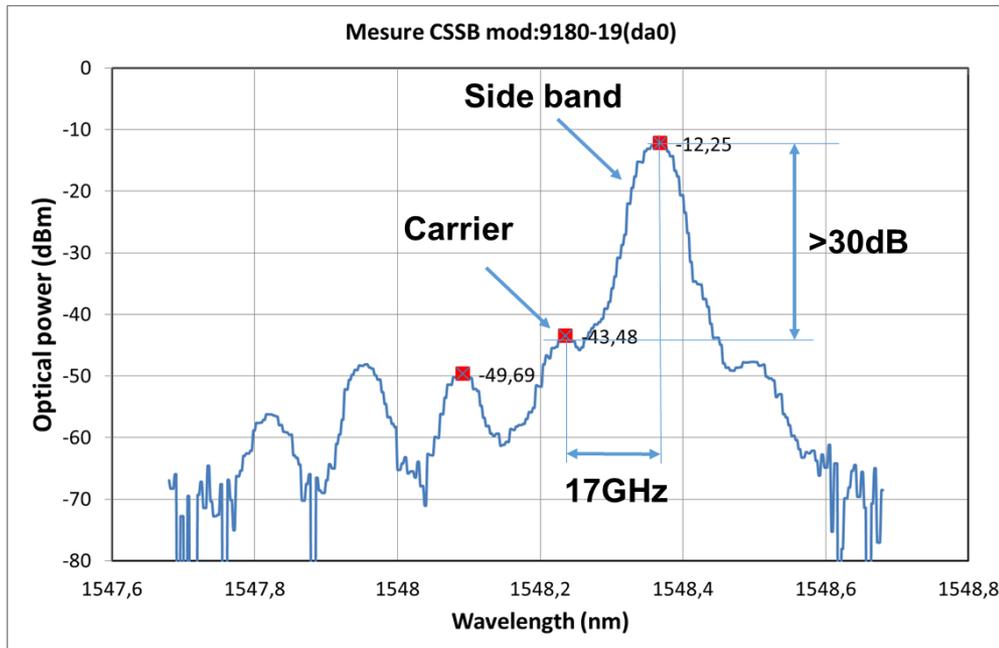
Exemple 3 : CS-SSB avec modulateur I&Q

- Modulateur I&Q X-Cut SSB
- Chaque port RF d'entrée modulée avec porteuse en quadrature
- Chaque MZM est au biais à MIN ($-\pi$)
- Entre les deux MZM, mise au biais en quadrature à $-\pi/2$ or $+\pi/2$

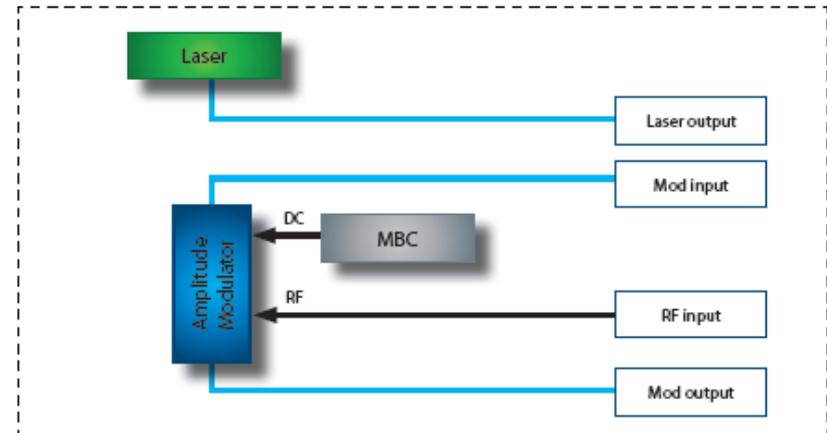


Expérimental: modulation CS-SSB avec modulateur MXIQ

- QUAD+ à QUAD- ➡ $\omega_0 - \Omega$ à $\omega_0 + \Omega$



Des instruments complexes et complets : ModBox Analogiques



- La ModBox-VNA-850nm-30GHz est un émetteur Optique large bande passante conçu pour compléter les fonctions des Analyseurs de Réseau Vectoriel dans le domaine optique.
- La ModBox-VNA-850nm-30GHz incorpore une source laser DBR à 852 nm de faible bruit et un étage de modulation basé sur un modulateur analogique LiNbO₃ de large bande passante couplé à un circuit de contrôle de biais automatique.

Conclusions

- Niobate de lithium=technologie photonique mature & fiable
- Production industrielle contrôlée
- Grande flexibilité dans les architectures et les configurations
- Grande richesse de solutions pour les problèmes de communications analogiques
- La réponse en fréquence uniforme sur plusieurs dizaines de GHz autorise toutes les applications notamment dans les bandes X, Ku, K, Ka, jusqu'à la bande Q aujourd'hui.
- Sont concernés les domaines civils et militaires, les radars et les satellites.
- Disponible à toutes longueurs d'onde avec une seule filière technologique (790nm → 2500nm)