

Formulaire

Électrotechnique
Radiotechnique

Cédric Willemin

Table des matières

Constantes physiques	1
Électrotechnique	3
Notions de bases	3
Composants	4
Circuits	7
Filtres, circuit RC et LC	8
Puissance	8
Transformateurs et décibels	9
Radiotechnique	11
Modulation	11
Amplificateurs-opérationnels	11
Ligne de transmission	12
Antennes	14
Propagation	14
Bruit	14
Techniques numériques	15
Éléments logiques	15
Élément binaire	16
Échantillonnage	16
Ouvrages de références	
Le Radioamateur, Pilloud Olivier (HB9CEM), ISBN 978-2-7108-1184-8	
Formulaires et tables, CRM, ISBN 978-2-940621-05-7	

27 janvier 2021

Constantes physiques

Vitesse de la lumière dans le vide	c	$= 2,99792458 \cdot 10^8$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante de Coulomb	k	$= 8,98755179 \cdot 10^9$	$\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$
Resistivité de l'argent	ρ_{Ag}	$= 1,5 \cdot 10^{-2}$	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
Resistivité du cuivre	ρ_{Cu}	$= 1,75 \cdot 10^{-2}$	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
Resistivité de l'aluminium	ρ_{Al}	$= 2,6 \cdot 10^{-2}$	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
Resistivité du fer	ρ_{Fe}	$= 1 \cdot 10^{-1}$	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
Charge élémentaire	e	$= 1,60217657 \cdot 10^{-19}$	C
Masse au repos de l'électron	m_e	$= 9,10938291 \cdot 10^{-31}$	kg
Masse au repos du proton	m_p	$= 1,67262178 \cdot 10^{-27}$	kg
Masse au repos du neutron	m_n	$= 1,67492735 \cdot 10^{-27}$	kg
Permittivité électrique du vide	ϵ_0	$= 8,85418782 \cdot 10^{-12}$	$\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Permittivité magnétique du vide	μ_0	$= 1,25663706 \cdot 10^{-6}$	$\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Permittivité relative de l'air	ϵ_r	$= 1,00058986 \cdot 10^0$	
Permittivité relative du Teflon®/PTFE	ϵ_r	$= 2,1 \cdot 10^0$	
Permittivité relative du mylar	ϵ_r	$= 3,1 \cdot 10^0$	
Permittivité relative du verre	ϵ_r	$= 3 - 5 \cdot 10^0$	
Permittivité relative du mica	ϵ_r	$= 5 - 8 \cdot 10^0$	
Permittivité relative de la céramique	ϵ_r	$= 1 - > 2\,000 \cdot 10^1$	
Coefficient de vélocité de l'air	Vf	$= \simeq 1 \cdot 10^0$	
Coefficient de vélocité du Polyéthylène	Vf	$= 6,6 \cdot 10^{-1}$	
Coefficient de vélocité du Teflon®/PTFE	Vf	$= 7,2 \cdot 10^{-1}$	

Note : Les constantes ci-dessus sont valables à température ambiante, soit environ 20°C.

Électrotechnique

Notions de bases

Grandeur	Symbole	Unité	Grandeur	Symbole	Unité
Tension	U	V	Capacité	C	F
Intensité du courant	I	A	Inductance	L	H
Résistance	R	Ω	Charge	Q	C

Loi d'Ohm

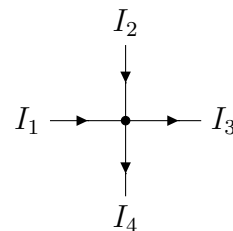
$$U = R \cdot I$$

Lois de Kirchhoff

Loi des nœuds

La somme des intensités des courants qui entrant dans *nœud* est égale à la somme des intensités des courants qui sortant de ce même *nœud*.

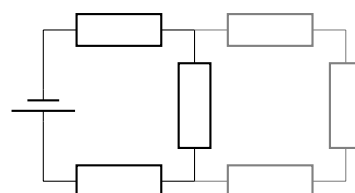
$$I = \sum_k I_k = 0$$



Loi des mailles

Une *maille* est définie comme un ensemble de branches d'un circuit qui formant une boucle. Dans une maille, la somme algébrique des différences de potentiel le long de la *maille* est constamment nulle.

$$U = \sum_k U_k = 0$$

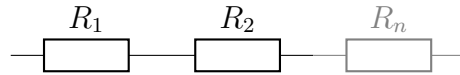


Composants

Résistances R

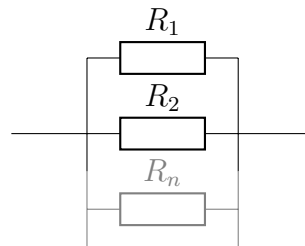
Combinaison en série

$$R_{eq} = \sum_n R_n$$



Combinaison parallèle

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_n \frac{1}{R_n}$$



Résectivité

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{s}$$

ρ : résistivité du conducteur

ℓ : longueur du conducteur

s : section du conducteur

Inductances L

Définition du Henry

L'inductance d'un circuit est de 1 *henry* si un courant parcourant ce circuit en variant uniformément à raison de 1 ampère par seconde produit à ses bornes une force électromotrice de 1 volt.

$$H = \frac{V \cdot s}{A} \Leftrightarrow L = \frac{U \cdot t}{I}$$

Inductance

$$L = k \cdot \frac{N^2 \cdot s}{\ell}$$

k : perméabilité (μ) du noyau

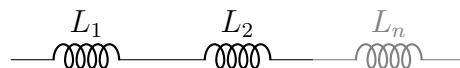
N : nombre de spires

s : section de l'inductance

ℓ : longueur de l'inductance

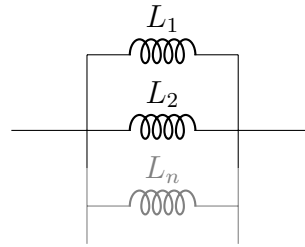
Combinaison en série

$$L_{eq} = \sum_n L_n$$



Combinaison parallèle

$$\frac{1}{L_{eq}} = \sum_n \frac{1}{L_n}$$



Condensateurs C

Définition du Farad

Le *farad* est défini comme la capacité aux borne de laquelle un courant de 1 ampère pendant 1 seconde provoque une différence de potentiel de 1 volt.

$$F = \frac{A \cdot s}{U} \Leftrightarrow C = \frac{I \cdot t}{U}$$

Capacité

$$C = k \cdot \frac{A}{d}$$

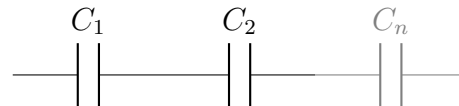
k : constante diélectrique de l'isolent entre les lames

A : surface des lames

d : distances entre les lames

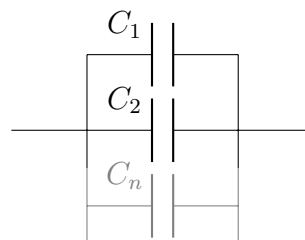
Combinaison en série

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_n \frac{1}{C_n}$$



Combinaison parallèle

$$C_{eq} = \sum_n C_n$$

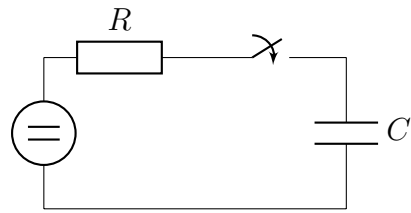


Quantité d'électricité et charge électrique

$$Q = C \cdot U$$

Constante de temps τ

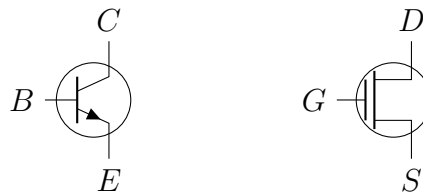
$$\tau = R \cdot C$$



Temps de chargement d'un condensateur¹ : $5 \cdot \tau = 5 \cdot RC$

Après un temps τ , le condensateur aura 63% de sa charge maximale.

Transistors et semi-conducteurs



Matériaux semi-conducteurs

Matériau	U_{BE}
Silicium	0,65V
Germanium	0,3V

Gain en courant de transistors bipolaires

$$\beta = H_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

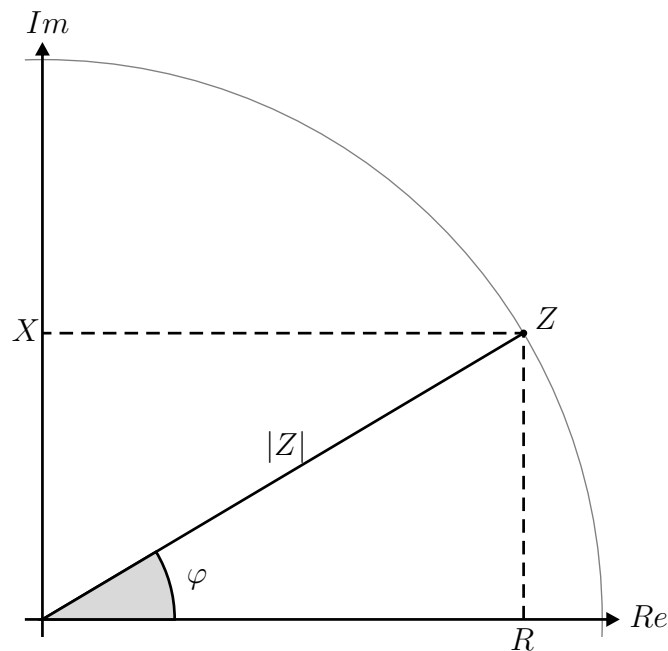
Transconductance

$$G_m = \frac{I_D}{U_G}$$

1. Après ce temps, le condensateur aura 99,3% de sa charge maximale ; le condensateur est considéré comme complètement chargé à toutes fins pratiques

Circuits

Représentation



Circuit série		Circuit parallèle	
Résistance	R	Conductance	$G = 1/R$
Réactance	X	Susceptance	$B = 1/X$
Impédance ²	$Z = R + Xj$	Admittance	$Y = 1/Z$
Unité : ohm Ω		Unité : siemens S	

Impédance

Bobine

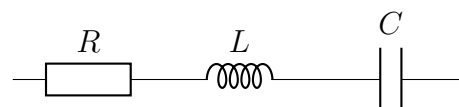
$$x_L = \omega L \Leftrightarrow x_L = 2\pi f \cdot L$$

Condensateur

$$x_C = \frac{1}{\omega C} \Leftrightarrow x_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C}$$

Circuit RLC série

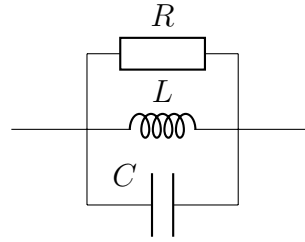
$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \Leftrightarrow Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}$$



2. L'impédance correspond au module du nombre complexe formé par les composantes réactives et résistives, la phase correspond à l'argument.

Circuit RLC parallèle

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \Leftrightarrow \frac{1}{Z} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_L} - \frac{1}{x_C}\right)^2}$$



Filtres, circuit RC et LC

Fréquence de résonance

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Facteur de qualité

$Q = x_L/R_s = x_C/R_s$ (à f_0 pour un circuit en série)

$Q = R_p/x_L = R_p/x_C$ (à f_0 pour un circuit en parallèle)

Bande passante Normalisée

Bande passante Normalisée = f_0/Q

Facteur de forme

$$\text{Facteur de forme} = \frac{\text{Bande passante à -60dB}}{\text{Bande passante à -3dB}}$$

Fréquence de coupure

$$\text{Circuit } RC \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{Circuit } RL \quad f_c = \frac{R}{2\pi L}$$

Puissance

Puissance en courant continu

$$P = U \cdot I \text{ [W]}$$

Rendement η

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie absorbée}}$$

Puissance apparente

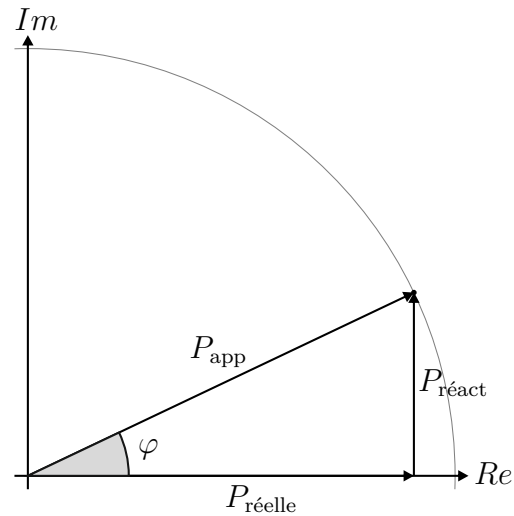
$$P_{\text{app}} = U \cdot I \text{ [VA]}$$

Puissance réelle

$$P_{\text{réelle}} = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \text{ [W]}$$

Puissance réactive

$$P_{\text{réact}} = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \text{ [var]}$$



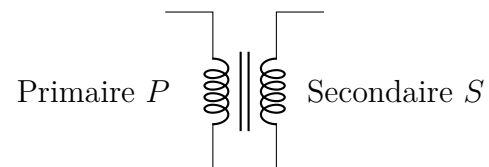
Puissance PEP

$$P_{\text{PEP}} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R}$$

Transformateurs et décibels

Rapport de transformation

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{U_P}{U_S} = \frac{I_S}{I_P} = \sqrt{\frac{Z_P}{Z_S}}$$



Rapport de puissance

$$\text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Rapport de tension ou de courant

$$\text{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right)$$

$$\text{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

Note : L'impédance d'entrée Z_1 doit être égale à l'impédance de sortie Z_2 .

Unités de mesures

Décibels	dB
Décibels relatifs au milliwatt	dBm
Décibels relatifs au microvolt	dB μ V
Décibels relatifs à la porteuse ³	dBc
Décibels relatifs a une antenne isotrope	dBi
Décibels relatifs a une antenne dipôle	dBd

3. decibels relative to the carrier

Radiotechnique

Modulation

Amplitude modulation

$$B_{AM} = 2 \cdot f_{\text{mod}_{\text{max}}}$$
$$\text{Taux (\%)} = (U_{BF}/U_{BF}) \cdot 100$$
$$\text{Taux (\%)} = \frac{(U_p - U_c)}{(U_p + U_c)} \cdot 100$$

Frequency modulation

$$\text{Indice de modulation} = \frac{\Delta_f}{f_{\text{max}}}$$
$$B_{FM} = 2 \cdot (\Delta_f + f_{\text{max}})$$

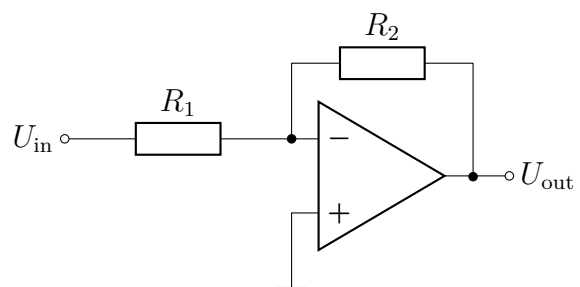
Frequency shift keying

$$B_{FSK} = 1, 2 \cdot \Delta_f + Bd$$

Amplificateurs-opérationnels

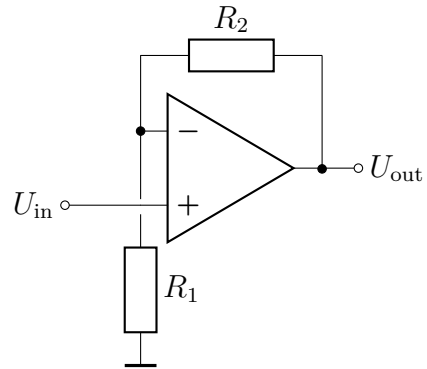
Montage inverseur

$$\text{Gain} = -\frac{R_2}{R_1}$$
$$U_{\text{out}} = -U_{\text{in}} \cdot \frac{R_2}{R_1}$$



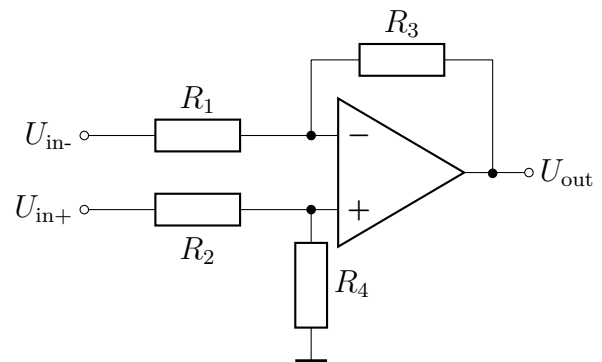
Montage non-inverseur

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$
$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$



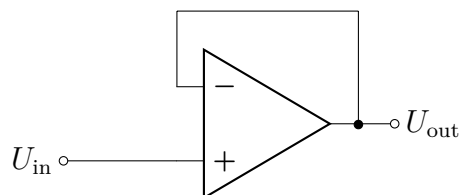
Montage différentiel

$$\text{Gain} = \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$$
$$U_{\text{out}} = (U_{\text{in}+} - U_{\text{in}-}) \cdot \frac{R_3}{R_1}$$



Étage tampon ou suiveur

Circuit électronique destiné à isoler deux parties d'un circuit.



Ligne de transmission

Longueurs

$$Vf = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{v}{c} \Leftrightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \cdot c = Vf \cdot c$$

$$L_{\text{physique}} = L_{\text{électrique}} \cdot Vf$$

Rapport d'onde stationnaire ROS

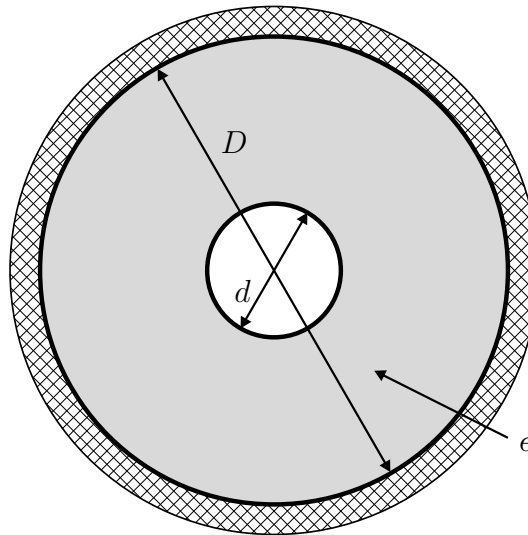
$$ROS = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} = \frac{Z_0}{R} \text{ ou } \frac{R}{Z_0}$$

$$ROS = \frac{\sqrt{P_D} + \sqrt{P_R}}{\sqrt{P_D} - \sqrt{P_R}} \quad \begin{array}{l} P_D : \text{Puissance directe} \\ P_R : \text{Puissance réfléchie} \end{array}$$

Q match

$$Z_{Q \text{ match}} = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$$

Impédance d'un câble coaxial



Capacité répartie

$$C = 24,14 \cdot \frac{\epsilon}{\log\left(\frac{D}{d}\right)} \left[\frac{\text{pF}}{\text{m}} \right]$$

Inductance répartie

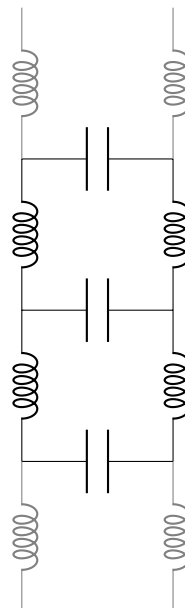
$$L = 0,46 \cdot \log\left(\frac{D}{d}\right) \left[\frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \right]$$

Impédance caractéristique

$$Z_c = 1000 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Inductance répartie L en μH

Capacité répartie C en pF



Antennes

Puissance rayonnée

$$\text{PIRE (dBm)} = \text{PAR (dBm)} + 2,15\text{dB}$$

PIRE : Puissance isotrope rayonnée équivalente, EIRP en anglais

PAR : Puissance apparente rayonnée, ERP en anglais

Intensité de rayonnement

$$\Phi = \frac{\text{PIRE}}{4\pi r^2} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

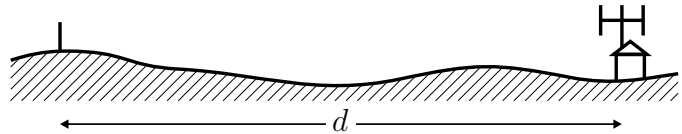
Propagation

$$\text{Période} \quad T = \frac{1}{f} \text{ [s]}$$

$$\text{Longueur d'onde} \quad \lambda = \frac{c}{f} \text{ [m]}$$

Champ électrique

$$E = \frac{\sqrt{\text{PIRE} \cdot 30}}{d} = \frac{\sqrt{\text{PAR} \cdot 49}}{d} \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$



Bruit

Facteur de bruit

$$F = \frac{SNR_{\text{in}}}{SNR_{\text{out}}}$$

Noise figure

$$NF = 10 \cdot \log(F) = 10 \cdot \log\left(\frac{SNR_{\text{in}}}{SNR_{\text{out}}}\right)$$

$$NF \text{ (dB)} = SNR_{\text{in}} \text{ (dB)} - SNR_{\text{out}} \text{ (dB)}$$

$$SINAD = 20 \cdot \log\left(\frac{\text{signal} + \text{bruit} + \text{distortion}}{\text{bruit} + \text{distortion}}\right)$$

Techniques numériques

Éléments logiques ⁴

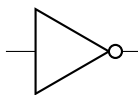
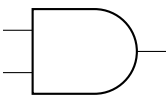
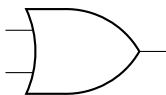
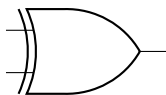
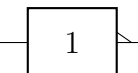
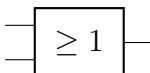
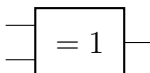
Une *proposition* est un énoncé qui satisfait aux deux principes suivants :

1. Une proposition ne peut être que vraie (1) ou fausse (0) (principe du tiers exclu).
2. Une proposition ne peut être en même temps vraie et fausse (principe de non-contradiction).

Opérateurs

Tautologie	Dénomination française	Mathématique	Informatique
Négation	non p	$\bar{p}$	N-
Conjonction	p et q	$p \wedge q$	AND
Disjonction	p ou q	$p \vee q$	OR
Disjonction exclusive	p ou (excusif) q	$p \oplus q$	XOR

Symboles

Fonction NOT	Fonction AND	Fonction OR	Fonction XOR ⁵
			
			

4. Cette section du formulaire est en partie tirée du Formulaire et table publié par la **Commission Romande de Mathématique (CRM)**, éditions G d'encre, ISBN 978-2-940621-05-7.

5. Les symboles représentés sur la première ligne se basent sur la norme ANSI/IEEE 91-1984 et son supplément 91a-1991. Les symboles rectangulaires de la seconde ligne se basent sur la norme CEI 60617-12.

Tables de vérité

p	q	$\bar{p}$	$p \wedge q$	$p \vee q$	$p \oplus q$
0	0	1	0	0	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	0	1	1
1	1	0	1	1	0

Élément binaire

Nombre de combinaisons k bits

$$n = 2^k$$

n : nombre de combinaisons totales
 k : nombre de bits

Poids d'un bit

Poids = 2^{num} , Numérotation depuis zéro

Le *bit de poids fort*, dans une représentation binaire donnée, est le bit ayant le plus grand poids ; en général le premier bit de la séquence.

Échantillonnage

Fréquence de Nyquist

Fréquence limite de repliement du spectre (Aliasing), pour une fréquence d'échantillonnage f_e du signal.

$$f_{\text{limite}} = \frac{f_e}{2} \Rightarrow 2 \cdot f_{\text{signal}} < f_e$$

Chaîne de traitement numérique



Cédric Willemin
Chemin des Alouettes 6
CH-2515 Prêles

cedric@willemin.li
www.willemin.li/cedric

