



Cours de Traitement de Signal et Communication Numérique

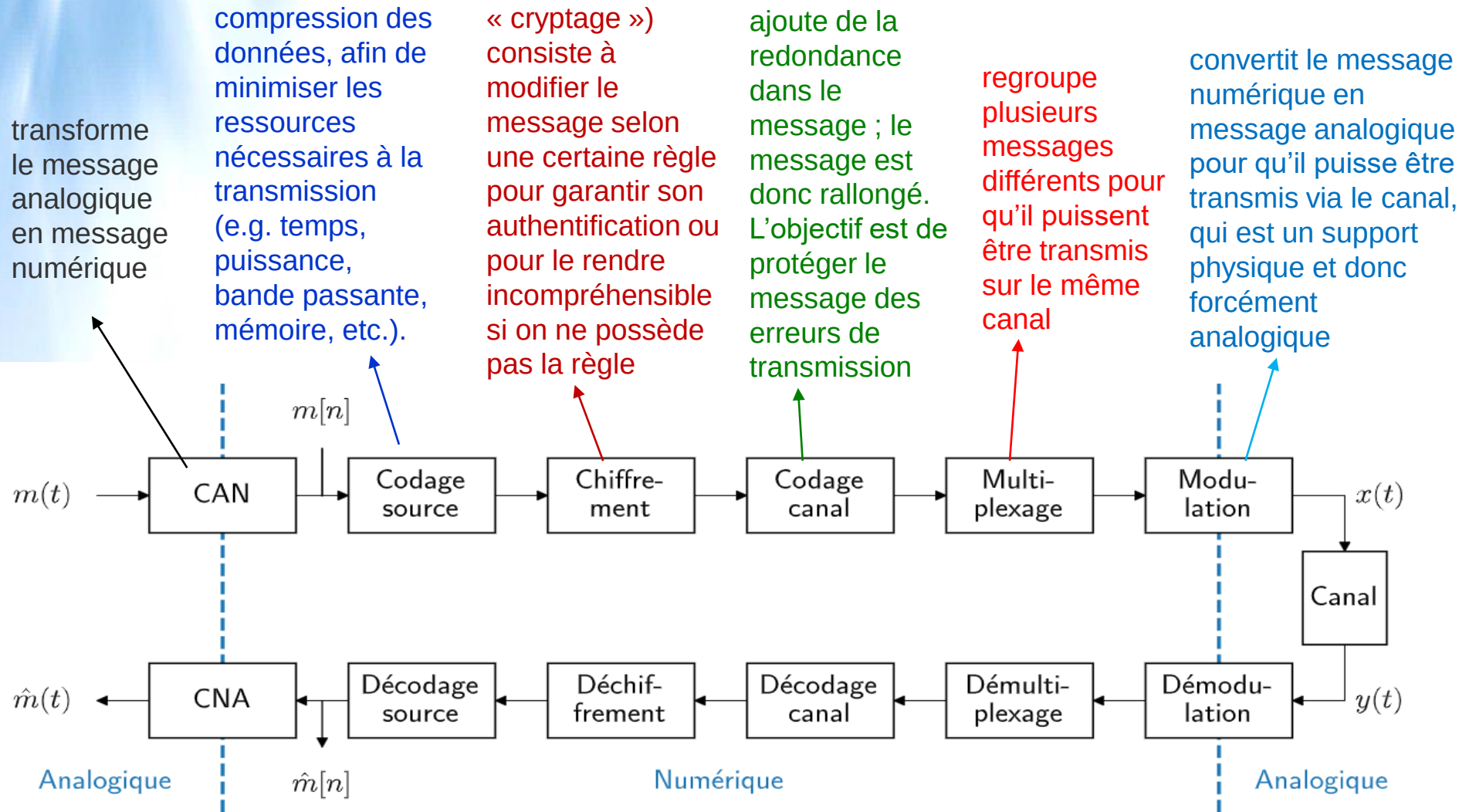
CH5: Communication Numérique

Par:

Hassan EL FADIL

elfadil.h@gmail.com

1. Chaîne de communication



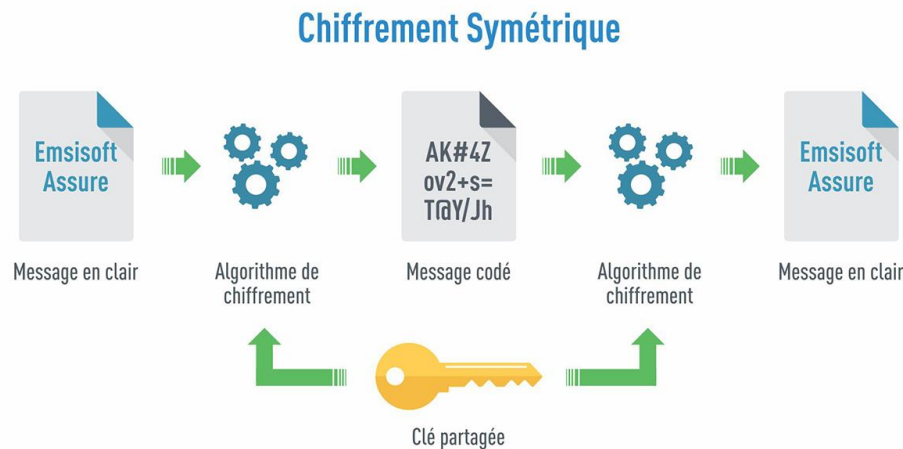
2. Chiffrement:

- La **cryptographie** modifie le message pour le protéger et ainsi garantir :
 - sa confidentialité (personne ne peut lire le message sans la clé) ;
 - son authenticité (vérifier l'identité de l'émetteur) ;
 - son intégrité (vérifier que le message n'a pas été modifié).
- La modification est définie à l'aide d'une ou plusieurs **clé**



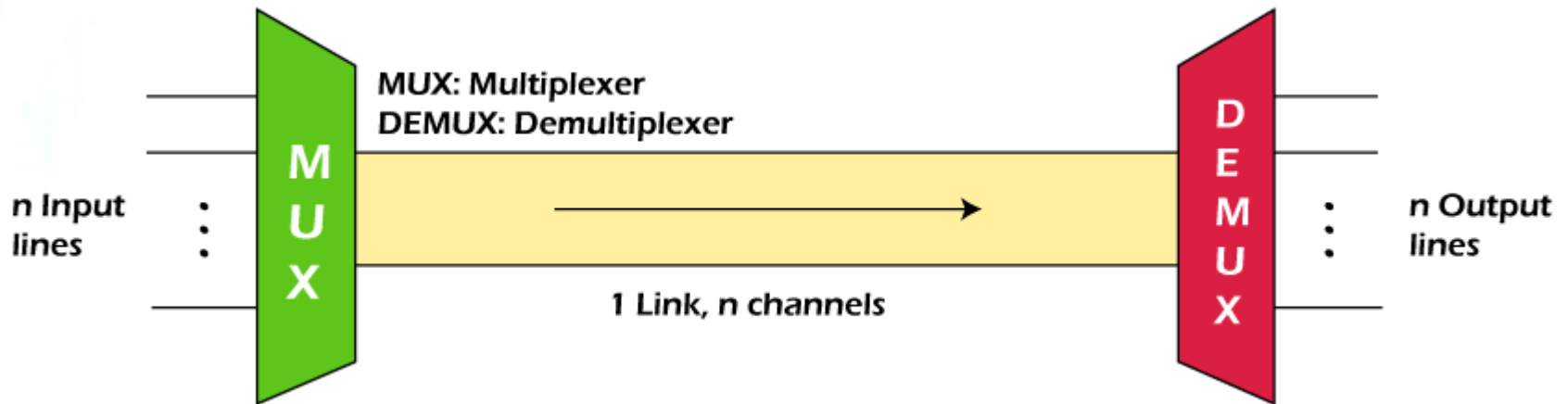
2. Chiffrement:

- **Algorithmes de chiffrement symétrique:** l'algorithme AES (Advanced Encryption Standard) est utilisé dans certaines communications WiFi
- **Algorithmes de chiffrement asymétrique :** L'algorithme RSA (Rivest-Shamir-Adleman) est un algorithme de chiffrement asymétrique utilisé pour le commerce électronique, les signatures électroniques, etc.



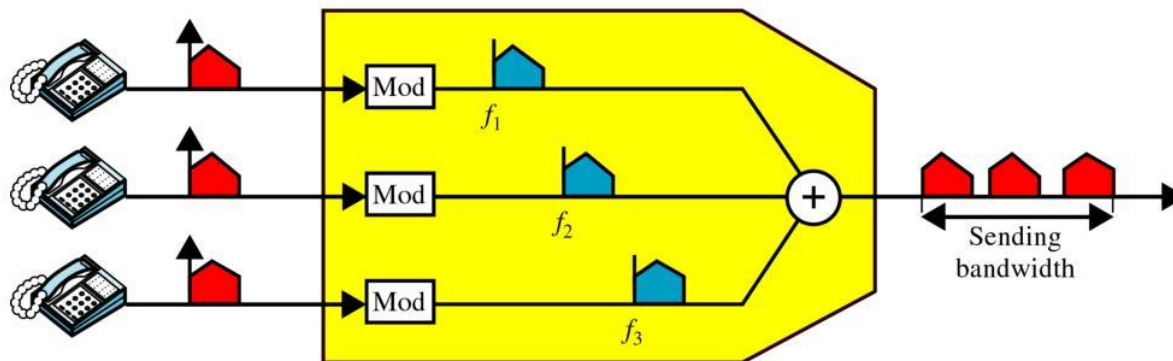
3. Multiplexage

- Le multiplexage consiste à partager les ressources entre plusieurs messages issus de différents émetteurs et récepteurs.



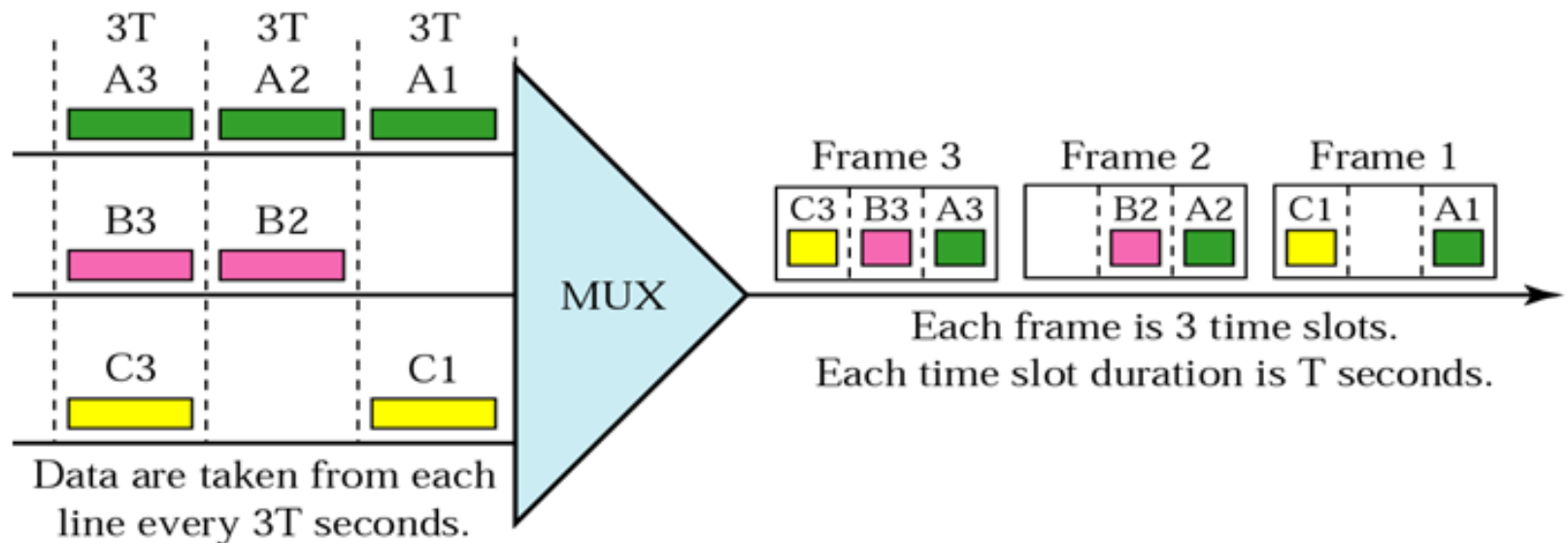
3. Multiplexage

- Exemples de multiplexage de signal :
 - Multiplexage en fréquence (**FDMA** : *frequency division multiple access*) : chaque émetteur utilise une bande de fréquence propre ;



3. Multiplexage

- Exemples de multiplexage de signal :
 - multiplexage en temps (**TDMA** : *time division multiple access*) : le temps est divisé en plusieurs créneaux, chacun étant affecté à un émetteur. Ainsi, les émetteurs envoient leur message les uns après les autres ;



4. Canal de transmission

● Paires torsadées:

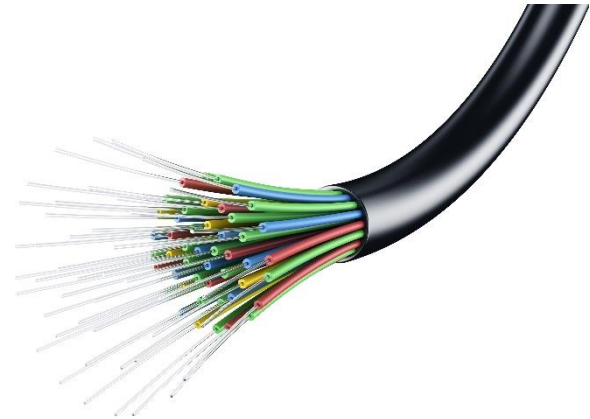
- **1000BASE-T**, aussi appelée **Gigabit Ethernet**, est une évolution de l'**Ethernet** classique.
- Elle autorise des débits de 1 000Mb/s sur 4 paires de fils de cuivre de **catégorie 5** ou supérieure (utilisation de connecteurs **RJ45**),
- longueur maximale de 100m.



● Fibre optique:

- Débit de transmission jusqu'à 10 **pétabit/s** sur une dizaine de kilometers.
- 1 **pétabit/s** = 1 000 terabits/s = 1 million de gigabits/s).

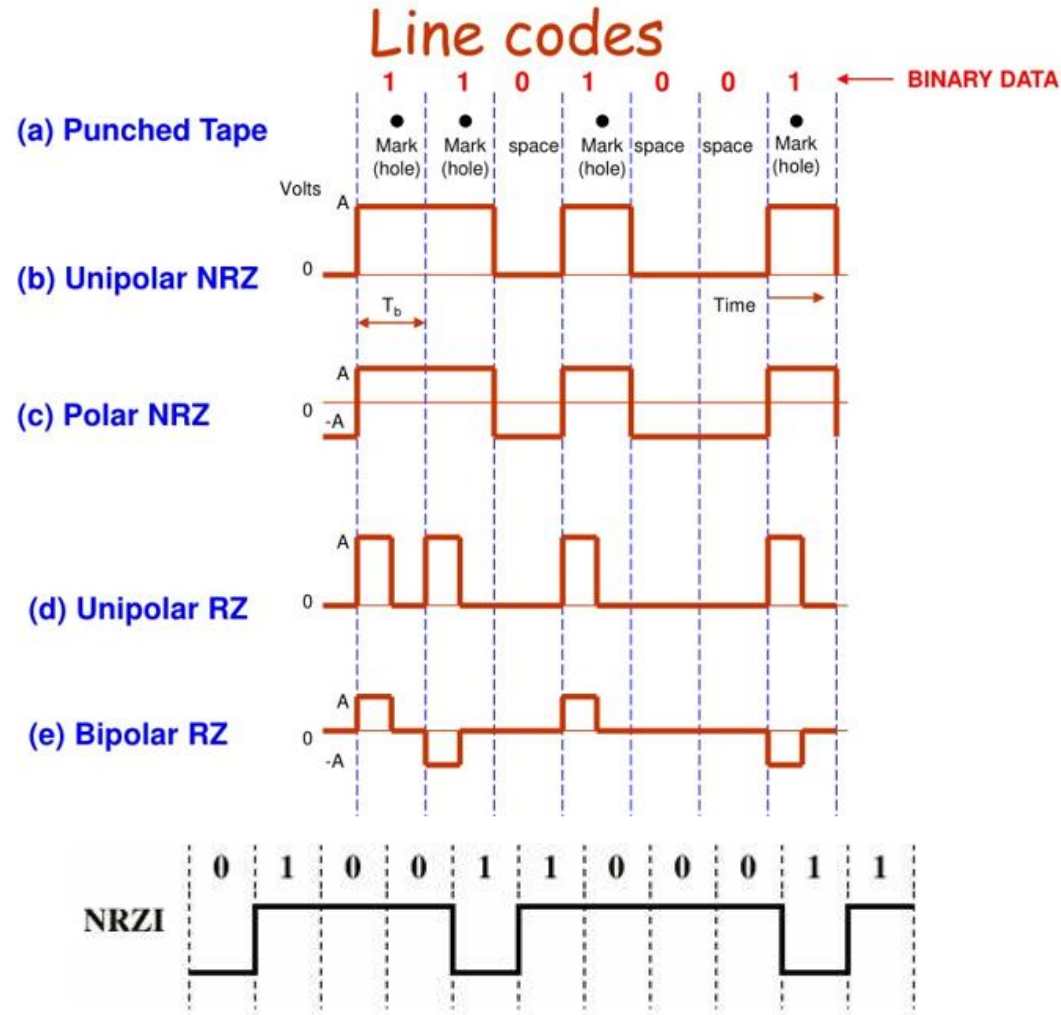
- **Canal électromagnétique**: il s'agit de l'air libre: **ondes HERTZIENNES**. Exemple: Wifi 802.11n: le débit théorique maximum est de **600 Mbps**.



5. Modulation en bande de base

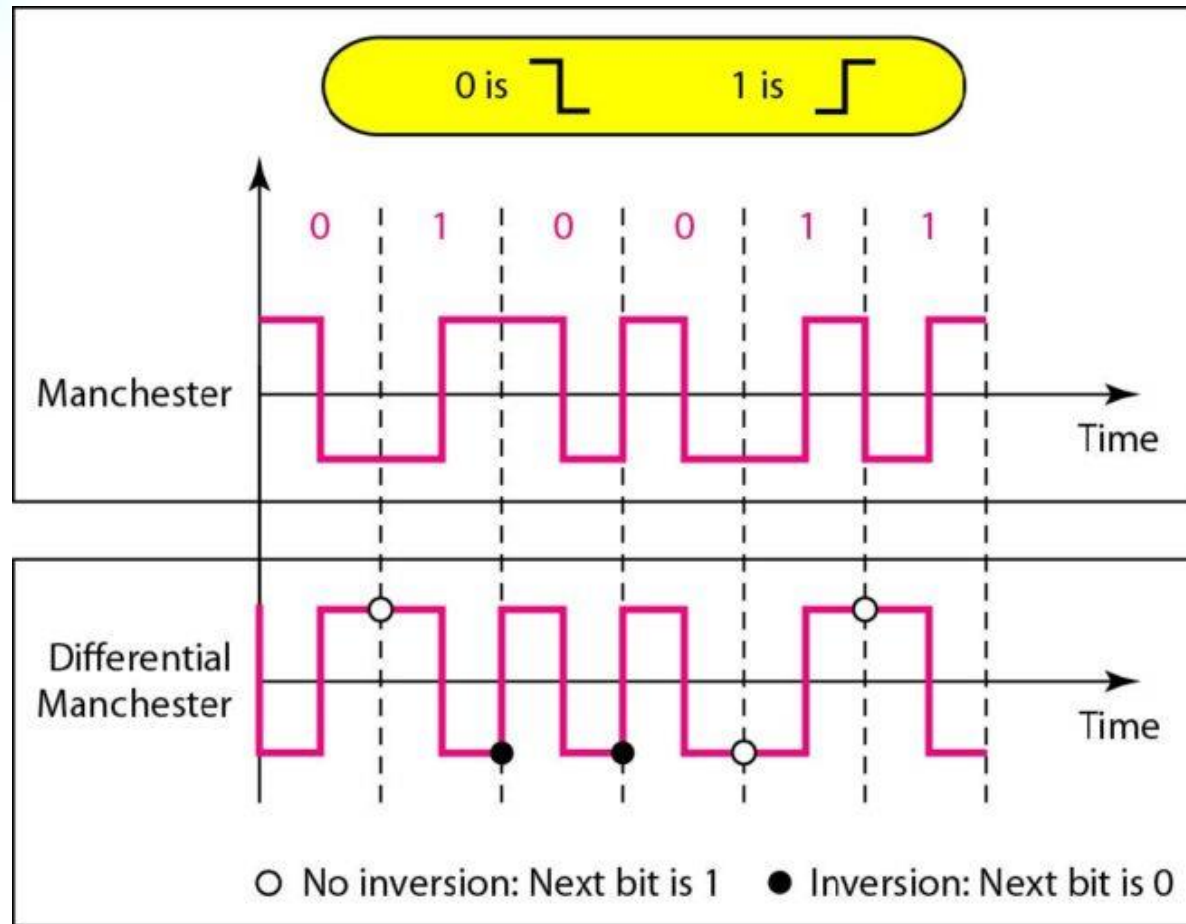
Plusieurs codes existent:

- **RZ**: Return to Zero
- **NRZ**: Non Return to Zero
- **NRZI**: NRZ Inverted
- **Code Manchester**
- **PAM**: Pulse-amplitude modulation: PAM3, PAM4, PAM5, ...



5. Modulation en bande de base

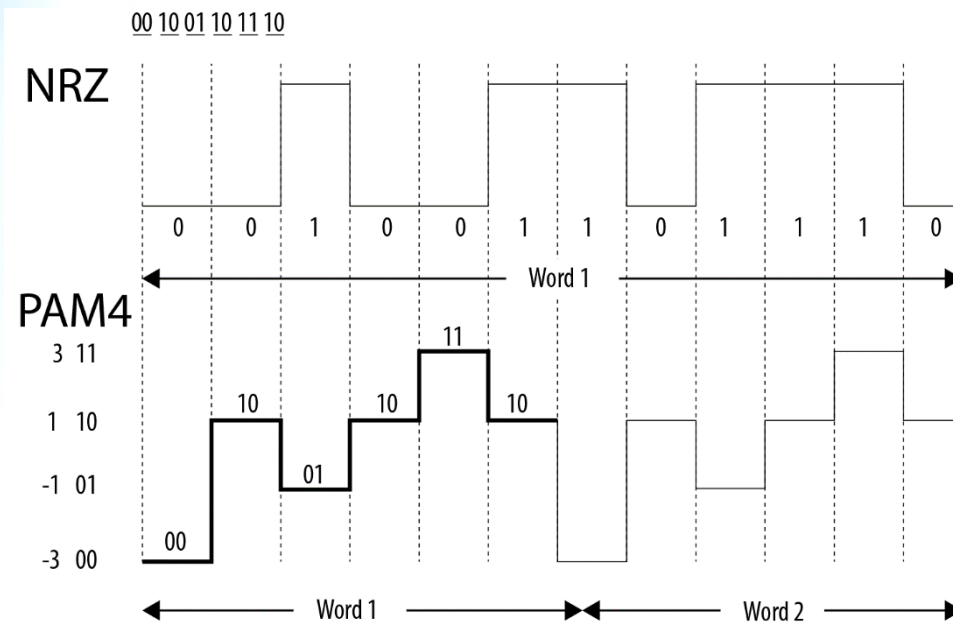
Code Manchester:



5. Modulation en bande de base

Code PAM: Pulse-amplitude modulation

- Codage en amplitude.
- Exemple: PAM4: 4 niveaux: -3, -1, +1, +3

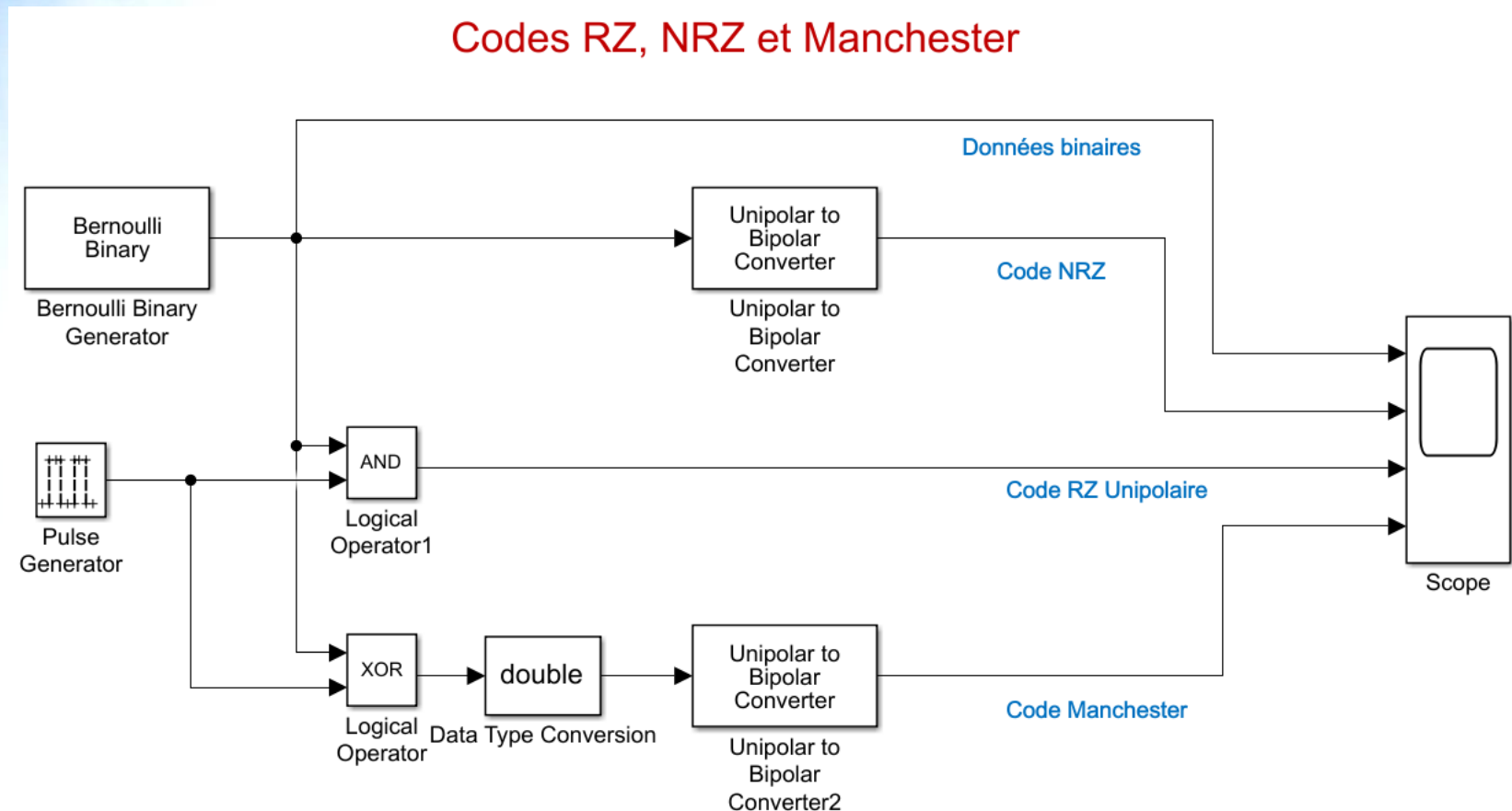


Débit_PAM4= 2xDébit_NRZ

Quelques Exemples d'utilisation des codes

Code	Utilisation
NRZ	Souvent utilisé entre l'ordinateur et ses périphériques, par exemple par la liaison série RS-232.
NRZI	Bus USB classique
Manchester	Ethernet 10BASE-T
PAM4	USB4 80Gbps, 100BASE-T, 1000BASE-T

1 Créer un nouveau model Simulink et réaliser le schéma suivant:



Application 1 à l'aide de Matlab/Simulink: Codes NRZ, RZ et Manchester

- 2 Régler les blocs comme suit :
- **Bernoulli Binary Generator:**
Sample time = **1e-3** ($T_s=1\text{ms}$)
 - **Unipolar to Bipolar Convolver** : M-ary number = **2**
 - **Générateur de Pulse:** Pulse type = Sample Based, Période = 2, Pulse width = 1, Sample time = **5e-4**
 - **Logical operator**
(Simulink>Logic and Bit Operations): Operator = **AND** ou **XOR**
 - **Data Type Conversion**
(Simulink>Signal Attributes): Output Data type = **double**.

Block Parameters: Bernoulli Binary Generator

Bernoulli Binary Generator

Generate random Bernoulli distributed binary numbers

[Source code](#)

Parameters

Probability of zero: 0.5

Source of initial seed: Auto

Sample time: 1e-3

Samples per frame: 1

Output data type: double

Simulate using: Interpreted execution

OK

Block Parameters: Pulse Generator

Time-based is recommended for use with a variable sample time. Sample-based is recommended for use with a fixed sample time. Use a discrete portion of a model using a variable step size.

Parameters

Pulse type: Sample based

Time (t): Use simulation time

Amplitude: 1

Period (number of samples): 2

Pulse width (number of samples): 1

Phase delay (number of samples): 0

Sample time: 5e-4

☒ Interpret vector parameters as 1-D

Block Parameters: Unipolar to Bipolar Converter

Unipolar to Bipolar Converter (mask) (link)

Convert a unipolar signal in the range [0, M-1], where M is a number, into a bipolar signal.

Parameters

M-ary number: 2

Polarity: Positive

Output data type: Inherit via internal rule

Block Parameters: Logical Operator

Logical Operator

Logical operators. For a single input, operators are applied across the inputs. For multiple inputs, operators are applied across the inputs.

Main Data Type

Operator: XOR

Number of input ports: 2

Icon shape: rectangular

Block Parameters: Data Type Conversion

Data Type Conversion

Convert the input to the data type and scaling of the output.

The conversion has two possible goals. One goal is to have the values of the input and the output be equal. The other goal is to have the stored integer values of the input and the output be equal. On quantization errors can prevent the goal from being fully achieved.

Parameters

Output minimum: Output maximum:

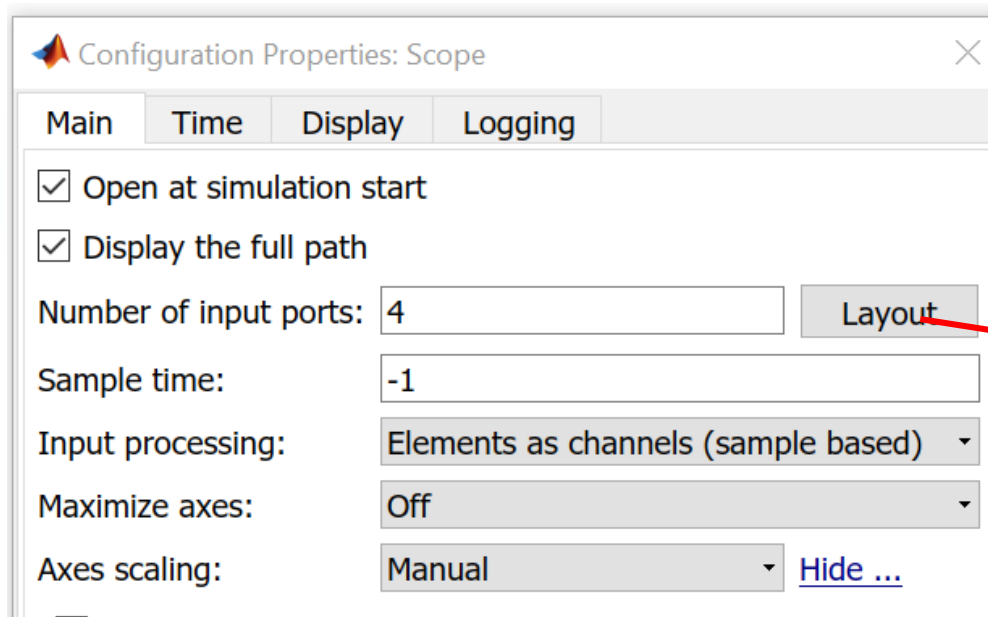
Output data type: double

☐ Lock output data type setting against changes by the fixed-point tool

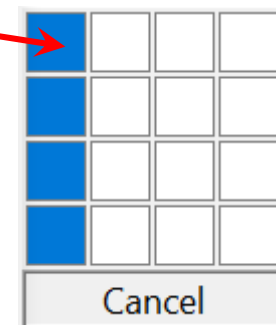
Input and output to have equal: Real World Value (RWV)

Integer rounding mode: Floor

3 Paramétrer le scope pour 4 entrées



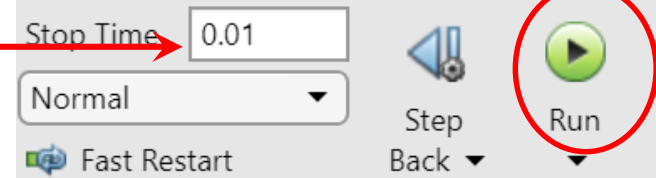
Layout:
sélectionner 4
verticales



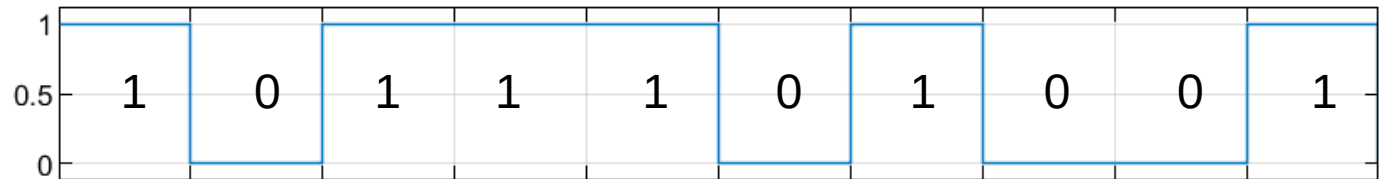
Application 1 à l'aide de Matlab/Simulink: Codes NRZ, RZ et Manchester

4

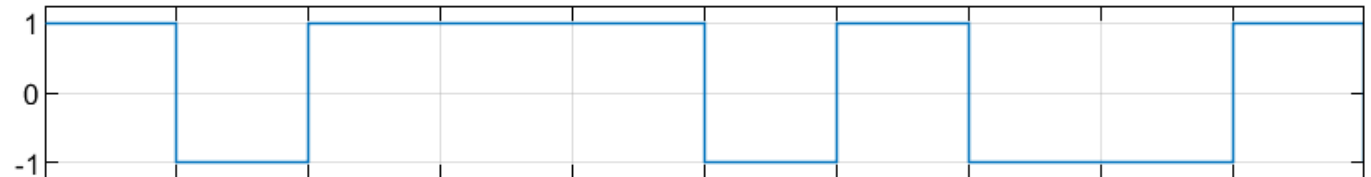
Simuler le montage dans **0.01**
et afficher les signaux (**Run**).



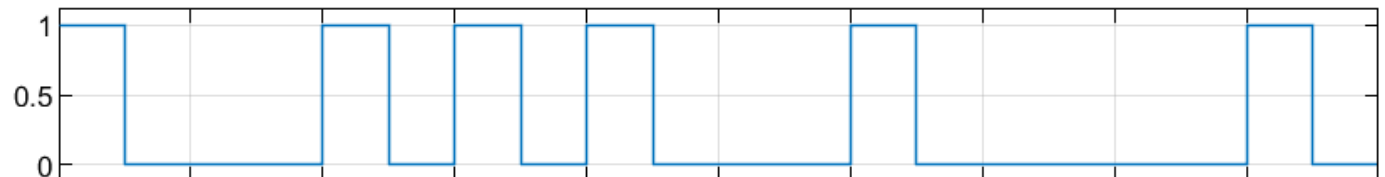
Données binaires



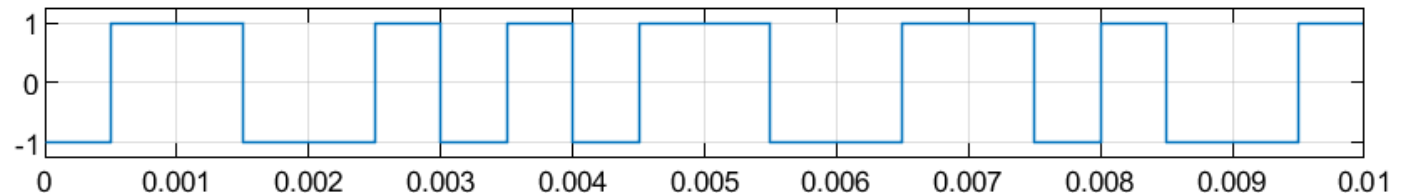
NRZ



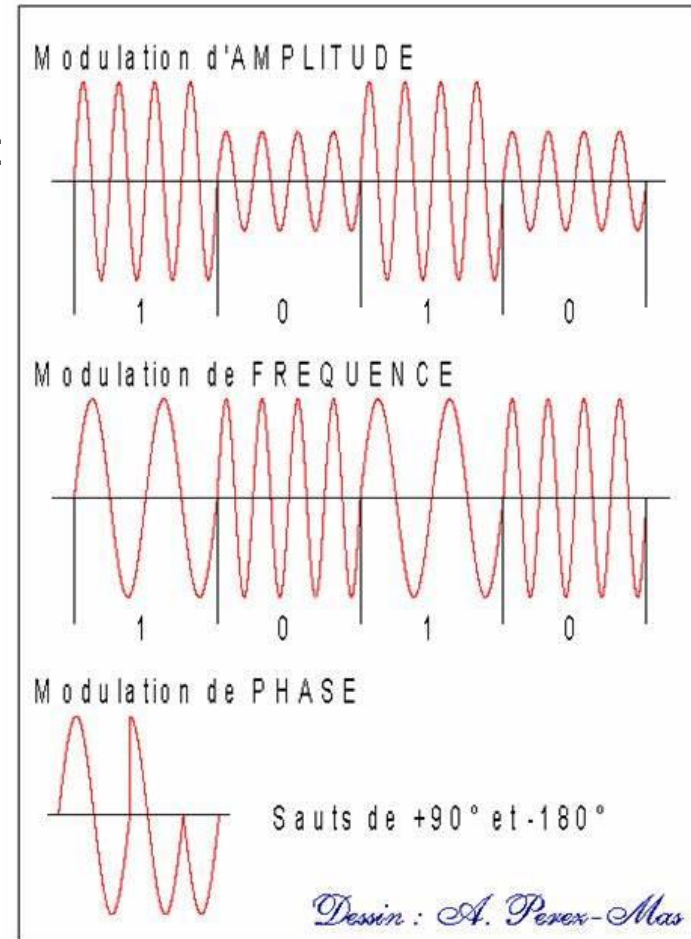
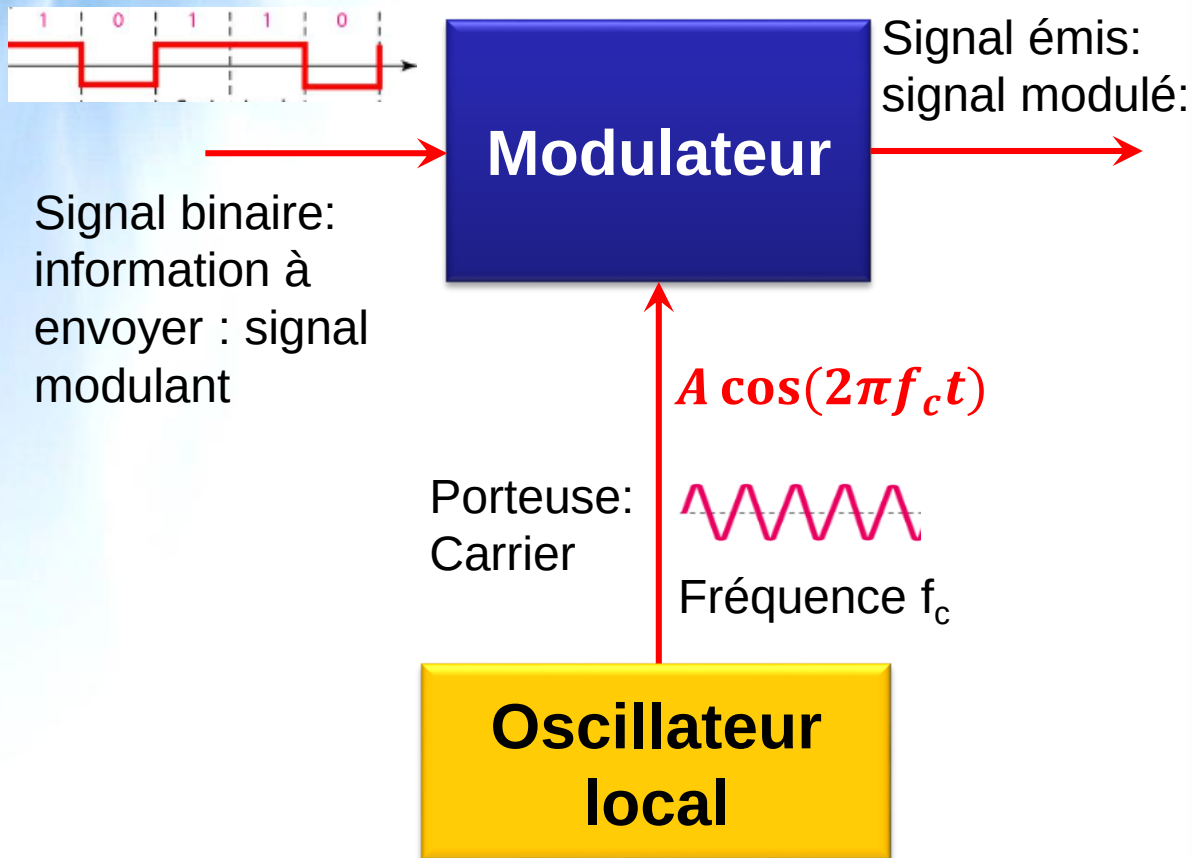
RZ



Manchester



6. Modulation sur porteuse



6. Modulation sur porteuse

Principales utilisations des différentes modulations

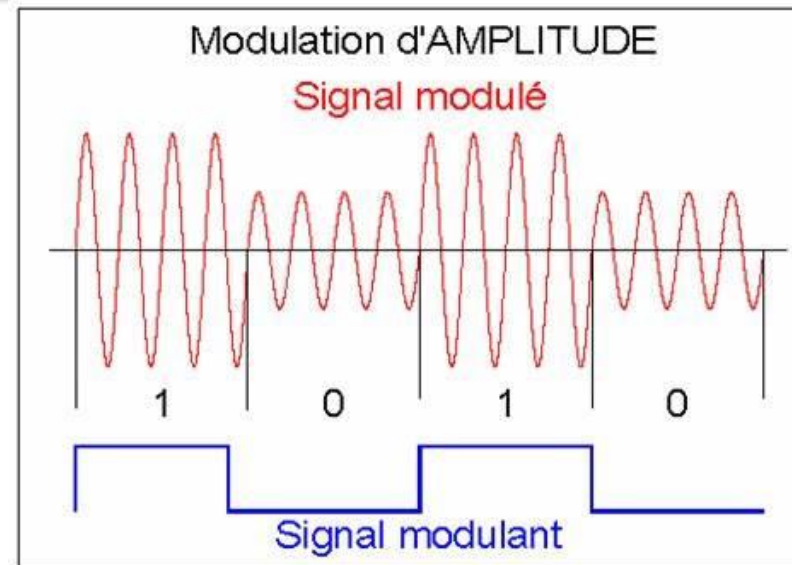
Modulation	Utilisation clé
ASK	RFID (Radio Frequency Identification) , télécommandes infrarouges, faible débit
FSK	Bluetooth, modems bas débit
PSK	GPS (Global Positioning System), Wi-Fi (802.11b) (Wireless Fidelity), communications satellites
QAM	Wi-Fi, TV numérique, 4G/5G, modems DSL (Digital Subscriber Line)
OFDM	Wi-Fi, 4G/5G, TV numérique terrestre, CPL (Courants Porteurs en Ligne)

6. Modulation sur porteuse

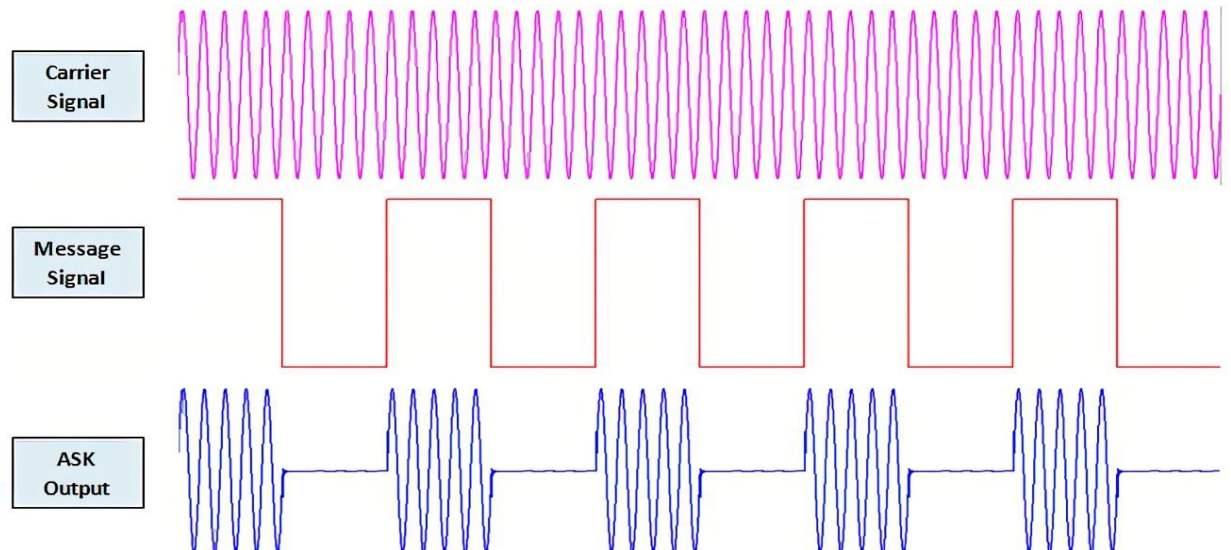
Modulation ASK:

- Modulation à déplacement d'amplitude:
ASK: Amplitude Shift Keying
- Signal modulé s'écrit comme suit:

$$s(t) = \begin{cases} A_1 \cos(2\pi f_c t) & \text{pour bit} = 1 \\ A_0 \cos(2\pi f_c t) & \text{pour bit} = 0 \end{cases}$$



- Cas simple: $A_0=0$:

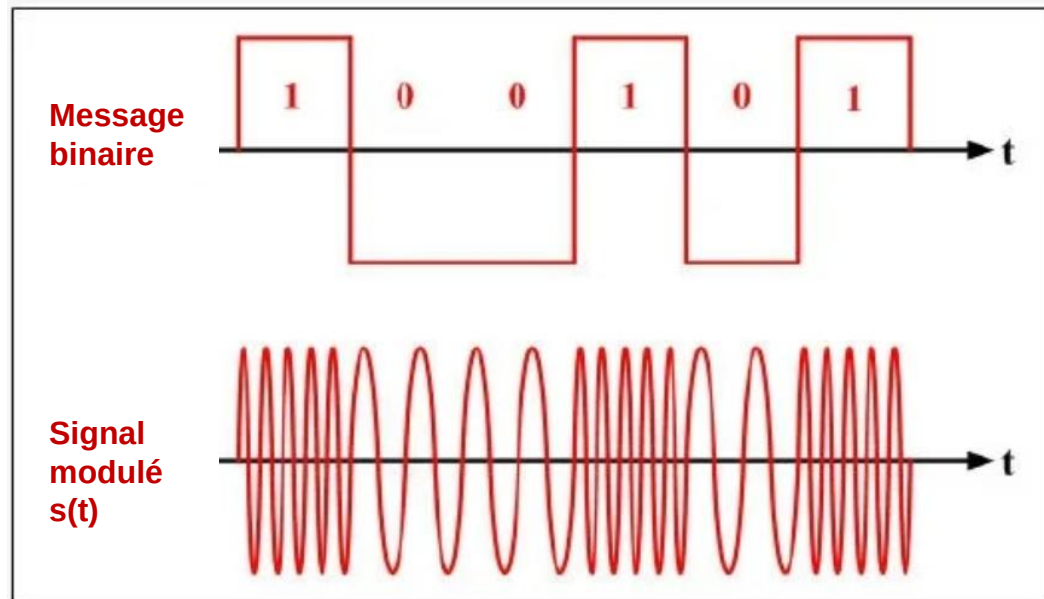
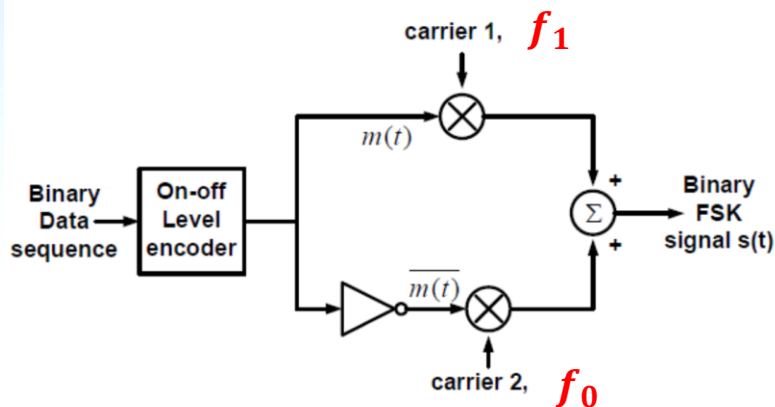


6. Modulation sur porteuse

Modulation FSK:

- Modulation à déplacement de fréquence: FSK: frequency Shift Keying
- Dans le cas d'une FSK binaire (BFSK, le signal modulé s'écrit comme suit:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_1 t) & \text{pour bit} = 1 \\ A \cos(2\pi f_0 t) & \text{pour bit} = 0 \end{cases}$$

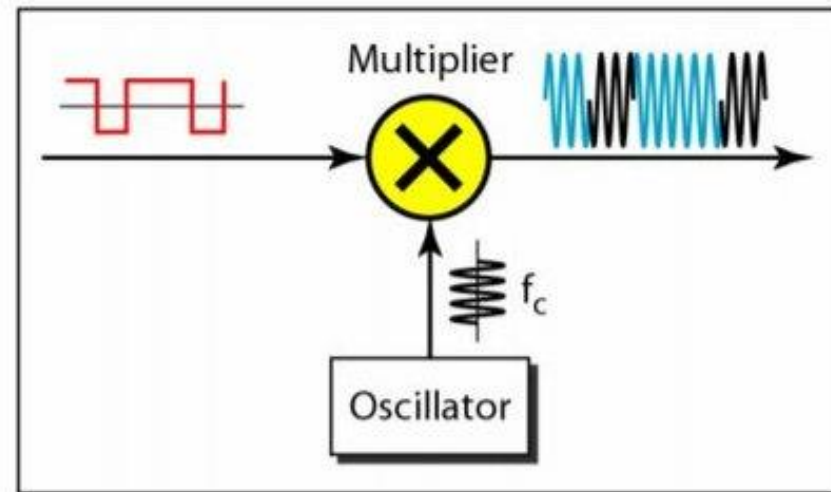
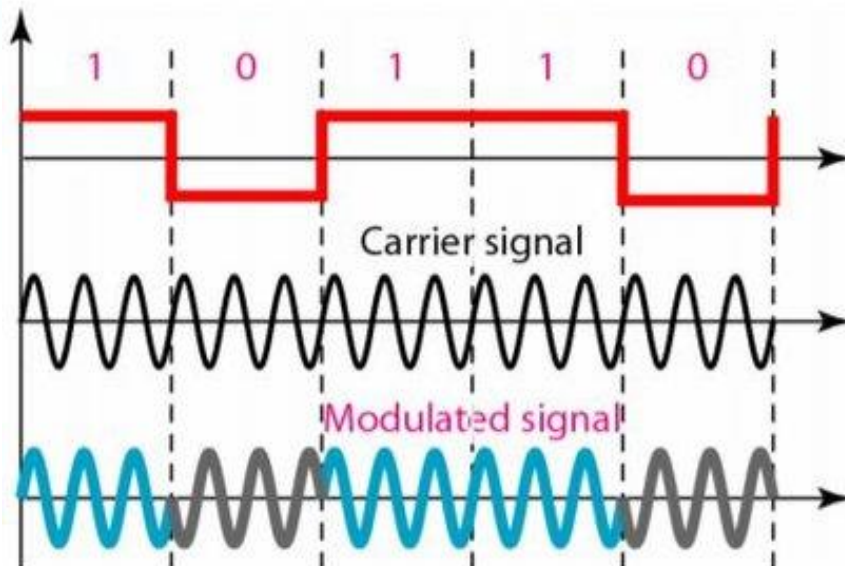


6. Modulation sur porteuse

Modulation PSK:

- Modulation à déplacement de phase: PSK: Phase Shift Keying
- Dans le cas d'une PSK binaire (BPSK, le signal modulé s'écrit comme suit:

$$s(t) = \begin{cases} A \cos(2\pi f_c t) & \text{pour bit} = 1 \\ A \cos(2\pi f_c t + \pi) & \text{pour bit} = 0 \end{cases}$$



6. Modulation sur porteuse

Modulation QAM:

- Modulation d'amplitude en quadrature (en anglais, **Quadrature Amplitude Modulation : QAM**)
- C'est une forme de modulation d'une porteuse par modification de l'amplitude de la porteuse elle-même et d'une onde en quadrature (une onde déphasée de 90° avec la porteuse) selon l'information transportée par deux signaux d'entrée.
- Le signal modulé s'écrit comme suit:

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) + Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

- **$I(t)$ et $Q(t)$** sont les signaux modulateurs.
- Méthode très utilisée en télévision numérique, radio numérique, communications par satellite, téléphonie mobile, modems, ...

6. Modulation sur porteuse

Notion de constellation:

Un **diagramme de constellation** est la représentation d'un signal modulé par une modulation numérique

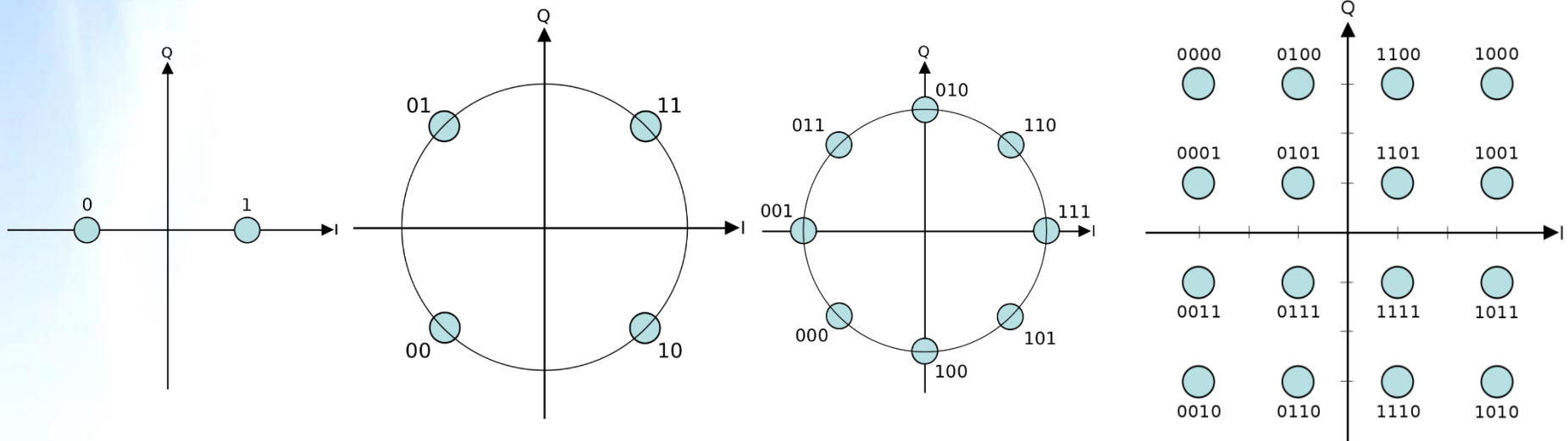


Diagramme de constellation pour BPSK.

Diagramme de constellation pour QPSK (4-PSK)

Un diagramme de constellation de 8-PSK.

Un diagramme de constellation de 16-QAM

7. Communication Mobile

Les normes principales de téléphonie mobile:

Génération	Acronyme	Intitulé	Date	Débit	Caractéristiques
1G	Radiocom 2000 NMT	Radiocom 2000 Nordic Mobile Telephone	1980	2.4 kbps	transmission sans fil analogique de la voix
2G	GSM CDMA	Global System for Mobile Communication Code Division Multiple Access	1990	64 kbps	transmission numérique et a permis les <u>SMS</u> (<i>Short Message Service</i>): Voix et Text
3G	CDMA 2000 1x EV UMTS, WC DMA	Code division multiple access 2000 1X Evolution Universal Mobile Telecommunications System	2000	384 kbps	a permis le développement du Web mobile : internet
4G	LTE WiMAX	Long Term Evolution Worldwide Interoperability for Microwave Access	2010	1Gbps	Voix sur 4G (VoLTE : Voice over LTE): internet haut débit (vidéo)
5G	NR NGAP	New Radio Next Generation Application Protocol	2020	10 Gbps	Permet l'Internet des objets (IoT): n'importe quoi, n'importe où, n'importe quand, illimité



8. OFDM: Orthogonal frequency-division multiplexing

- Multiplexage par division orthogonale de fréquence (**OFDM**); appelé aussi modulation par décalage orthogonal de fréquence (OFSK)
- Technique de modulation consistant à répartir le signal sur un grand nombre de sous-porteuses orthogonales modulées individuellement à bas débit.
- **Elle permet:**
 - *Hautes performances en matière de débit de données*
 - *Utilisation efficace du spectre*
 - *robuste face aux variations sélectives en fréquence du canal de communication*

Utilisation:

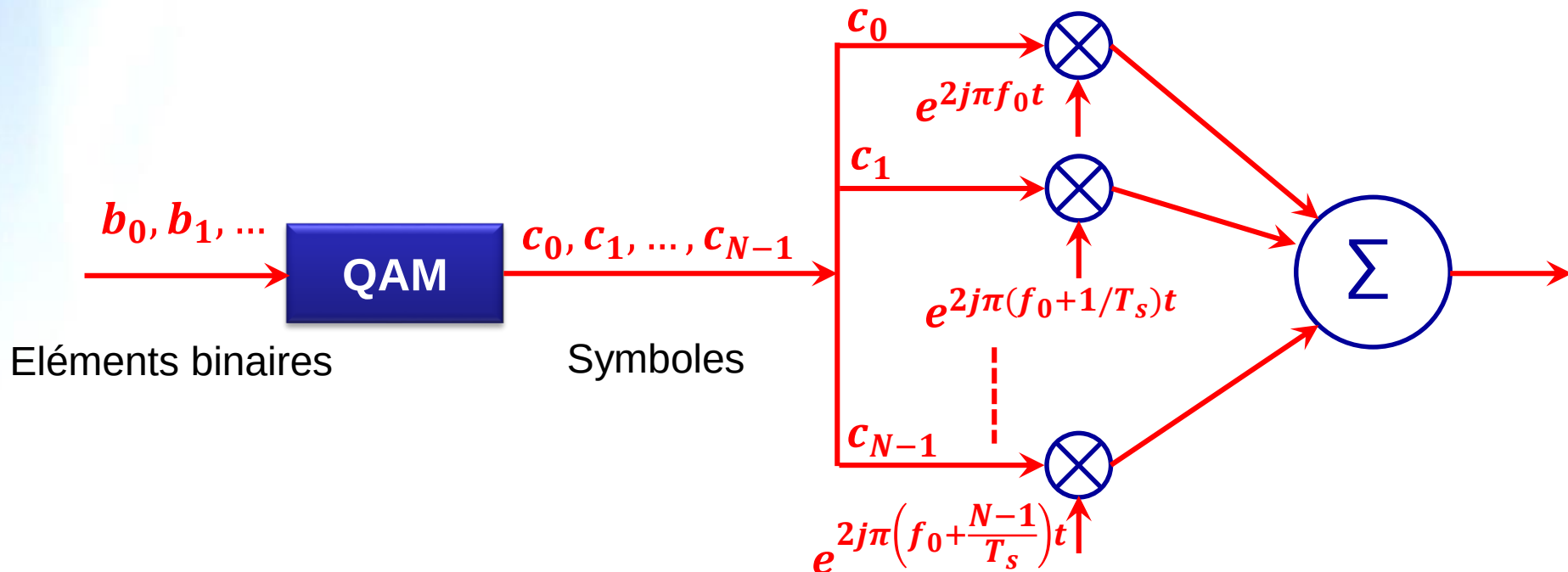
L'OFDM est utilisé pour

- La **télévision numérique** de Terre en mode fixe (DVB-T) ou portable (DVB-H),
- La **radio numérique** (DAB, DRM),
- Les réseaux sans fil qui s'appuient sur les normes 802.11a, 802.11g (**WiFi**) et 802.16 (**WiMax**),
- La **4G LTE** et la **5G**

8. OFDM

Principe de fonctionnement de l'OFDM:

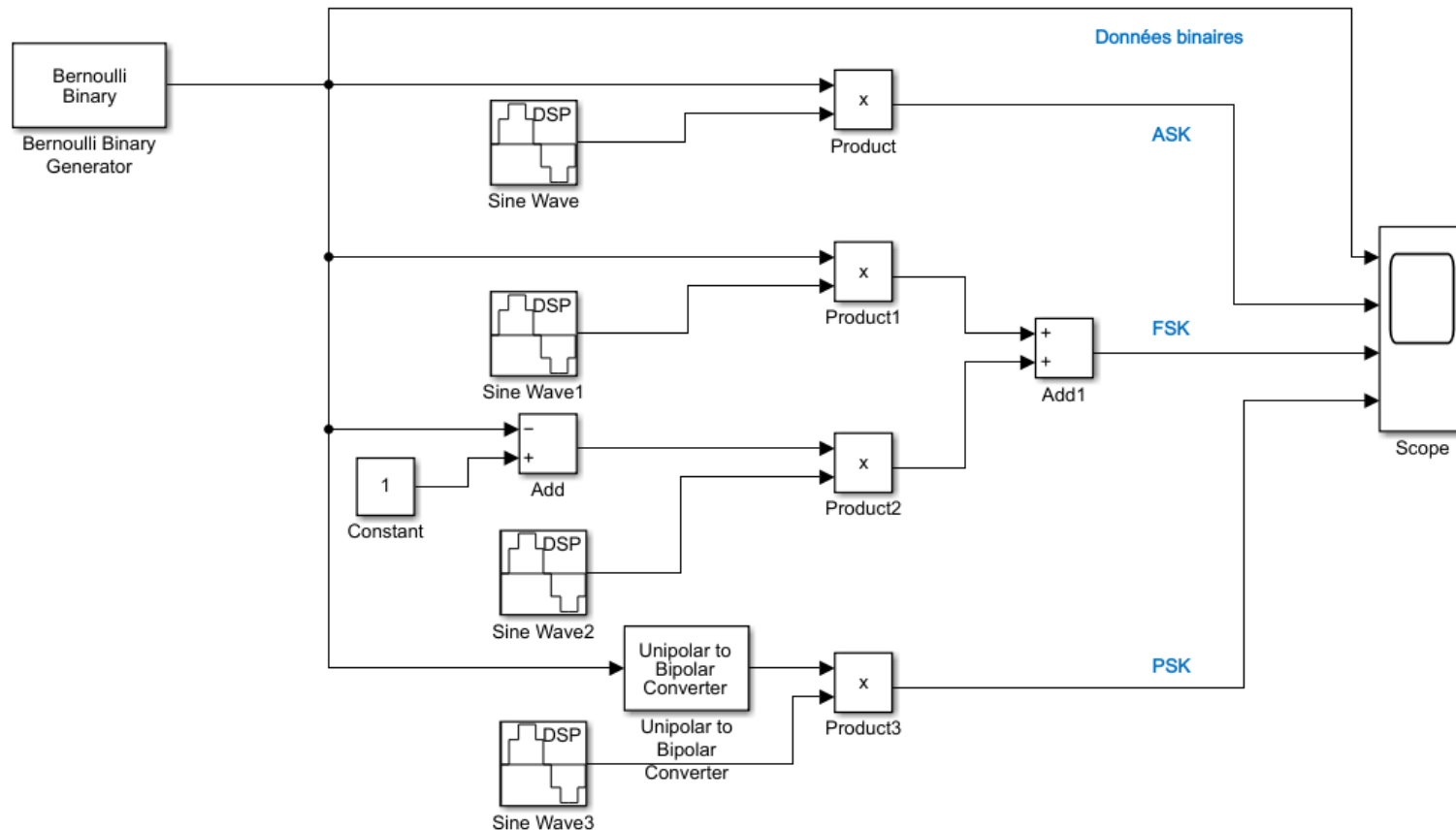
- Les éléments binaires b_i sont converties en N symboles c_k en utilisant une modulation (PSK ou QAM)
- Chacun des N symboles $c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$, module une porteuse de fréquence f_k .



Application 2 à l'aide de Matlab/Simulink: Modulations ASK, FSK et PSK

1 Créer un nouveau model Simulink et réaliser le schéma suivant:

Modulations ASK, PSK, FSK



Application 2 à l'aide de Matlab/Simulink: Modulations ASK, FSK et PSK

- 2 Régler les blocs comme suit :
- **Bernoulli Binary Generator:**
Sample time = **1** ($T_s=1s$)
 - **Unipolar to Bipolar**
Convector : M-ary number = **2**
 - **Sin Wave, 2, 3:** Frequency (Hz) = **1**, Sample time = **1/1000**
 - **Sin Wave 1:** Frequency (Hz) = **4**, Sample time = **1/1000**
 - **Data Type Conversion**
(Simulink>Signal Attributes):
Output Data type = **double**.
 - **Add et Add1:** Simulink/math
Operations/Add. Pour “add”,
changer “List of signs” par “-+”

Block Parameters: Bernoulli Binary Generator

Bernoulli Binary Generator
Generate random Bernoulli distributed binary numbers
[Source code](#)

Parameters

Probability of zero: 0.5

Source of initial seed: Auto

Sample time: 1

Samples per frame: 1

Output data type: double

Simulate using: Interpreted execution

Block Parameters: Sine Wave

Sine Wave (mask) (link)
Output samples of a sinusoid. To generate more than one simultaneously, enter a vector of values for the Amplitude Phase offset parameters.

Main Data Types

Amplitude: 1

Frequency (Hz): 2

Phase offset (rad): 0

Sample mode: Discrete

Output complexity: Real

Computation method: Trigonometric fcn

Sample time: 1/1000

Samples per frame: 1

Resetting states when re-enabled: Restart at time zero

Block Parameters: Unipolar to Bipolar Converter

Unipolar to Bipolar Converter (mask) (link)
Convert a unipolar signal in the range [0, M-1], where M is the number of levels, into a bipolar signal.

Parameters

M-ary number: 2

Polarity: Positive

Output data type: Inherit via internal rule

Block Parameters: Add

Sum
Add or subtract inputs. Specify one of the following:
a) character vector containing + or - for each input port, | for spacer between ports (e.g. ++|-|++)
b) scalar, >= 1, specifies the number of input ports to be summed. When there is only one input port, add or subtract elements over all dimensions or one specified dimension

Main Signal Attributes

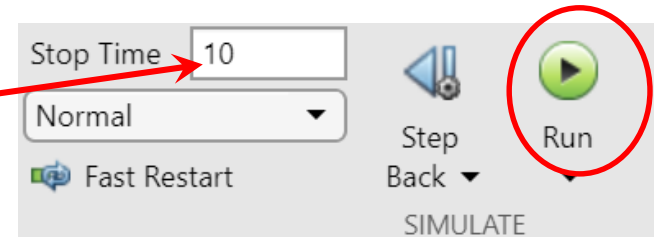
Icon shape: rectangular

List of signs: -+

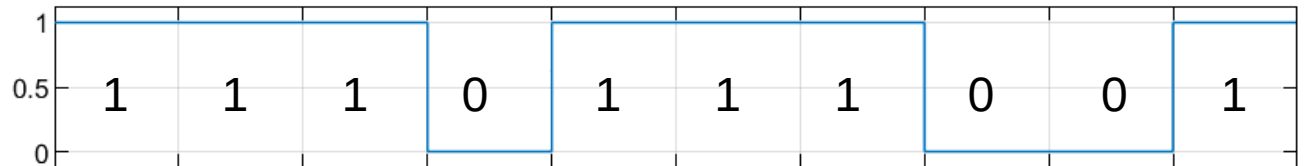
Application 2 à l'aide de Matlab/Simulink: Modulations ASK, FSK et PSK

3 Paramétrer le scope pour 4 entrées

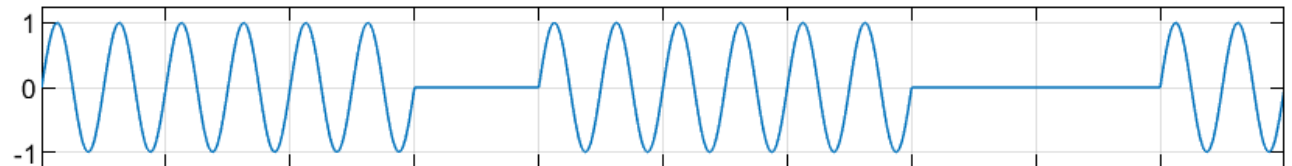
4 Simuler le montage pour **10s**
et afficher les signaux (**Run**).



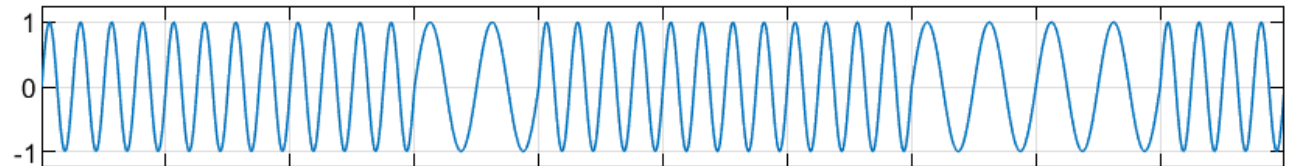
Données binaires



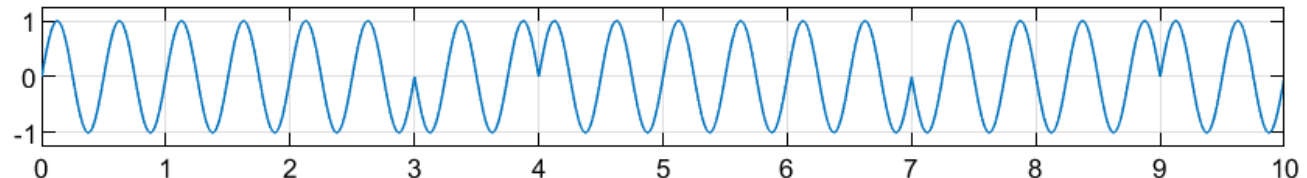
ASK



FSK

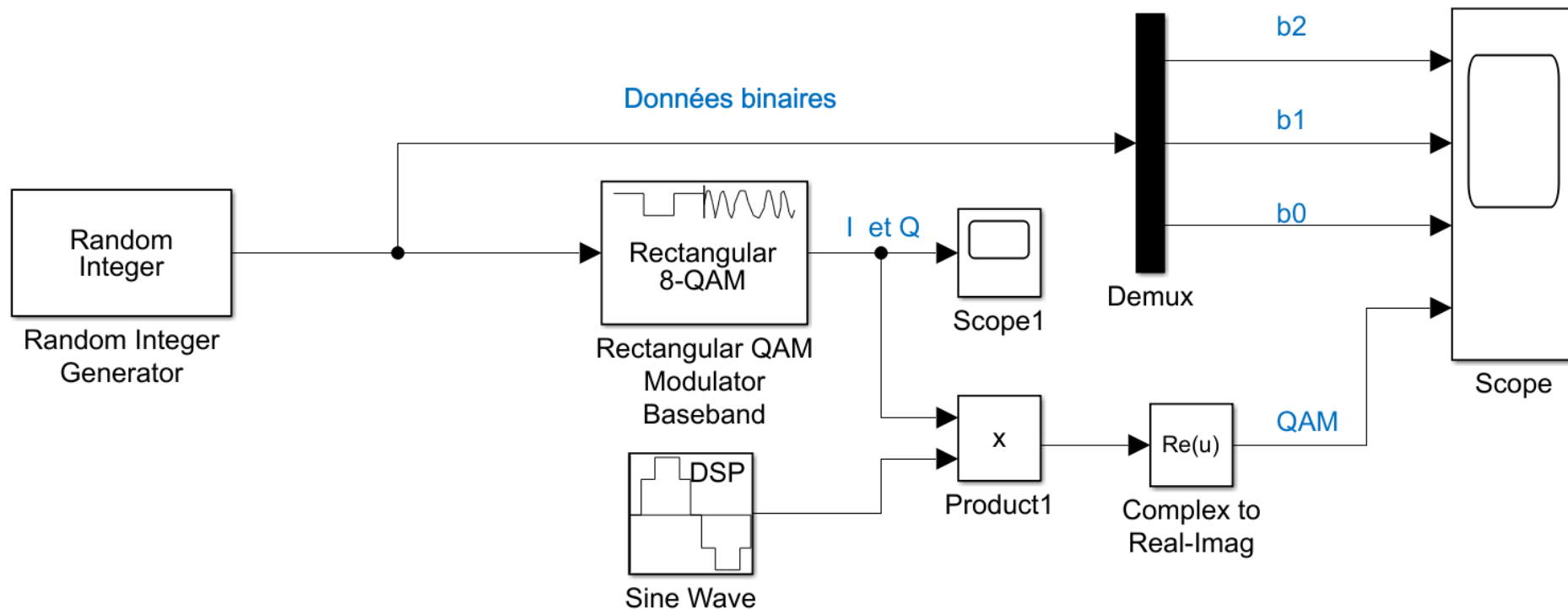


PSK



- 1 Créer un nouveau model Simulink et réaliser le schéma suivant:

Modulation QAM



2 Régler les blocs comme suit :

- **Random Integer Generator** :
Set size = **2**; Sample time = **0.5**
($T_s=0.5s$); Sample per Frame = **3**
- **Sin Wave**: Frequency (Hz) = **1**,
Output complexity = **Complex**,
Sample time = **1/100**
- **Complex to Real-Imag** : Out put
= **Real**

Block Parameters: Random Integer Generator

Random Integer Generator

Generate random uniformly distributed integers in the range $[0, M-1]$, where M is the set size.

[Source code](#)

Parameters

Set size:	2
Source of initial seed:	Auto
Sample time:	0.5
Samples per frame:	3
Output data type:	double

Simulate using: Interpreted execution

Block Parameters: Sine Wave

Sine Wave (mask) (link)

Output samples of a sinusoid. To generate more than one sinusoid simultaneously, enter a vector of values for the Amplitude, Frequency, and Phase offset parameters.

Main Data Types

Amplitude:	1
Frequency (Hz):	1
Phase offset (rad):	0
Sample mode:	Discrete
Output complexity:	Complex
Computation method:	Trigonometric fcn
Sample time:	1/100
Samples per frame:	1
Resetting states when re-enabled:	Restart at time zero

Block Parameters: Complex to Real-Imag

Complex to Real-Imag

Output the real and/or imaginary components of a complex signal.

Parameters

Output:	Real
---------	------

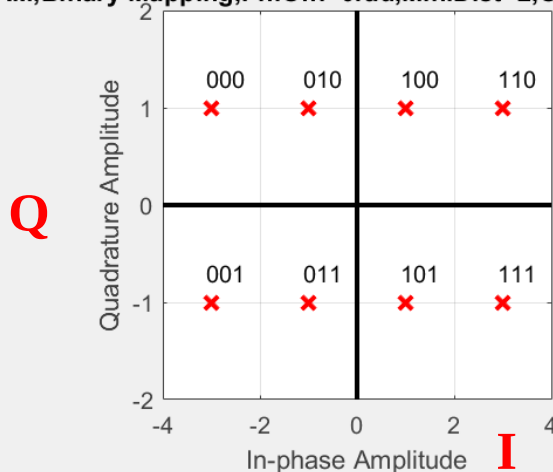
?

OK

Application 3 à l'aide de Matlab/Simulink: Modulation QAM

- **Rectangular QAM Modulator Baseband** : M_ary Number = **4** ;
Input type= **Bit** ; Constellation
ordering= **Binary**
- Cliquer sur « **View
Constellation** » pour afficher la
constellation

8-QAM, Binary Mapping, Ph. Off.=0rad, Min. Dist=2, Output DT=double



Block Parameters: Rectangular QAM Modulator Baseband

Rectangular QAM Modulator Baseband (mask) (link)

Modulate the input signal using the rectangular quadrature amplitude modulation method.

This block accepts a scalar or column vector input signal.

The input signal can be either bits or integers. When you set the 'Input type' parameter to 'Bit', the input width must be an integer multiple of the number of bits per symbol.

Main Data Types

Parameters

M-ary number: 8

Input type: Bit

Constellation ordering: Binary

Normalization method: Min. distance between symbols

Minimum distance: 2

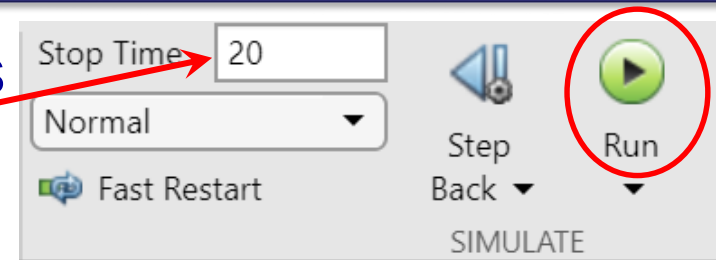
Phase offset (rad): 0

View Constellation

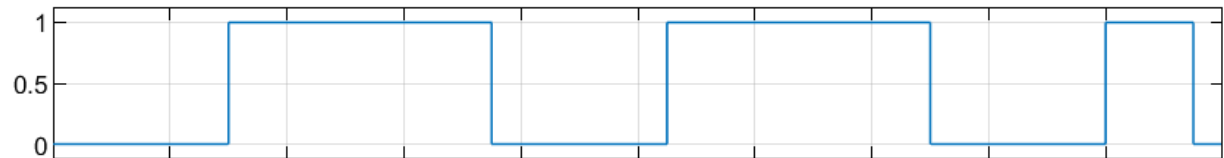
Application 3 à l'aide de Matlab/Simulink: Modulation QAM

3 Paramétrer le scope pour 4 entrées

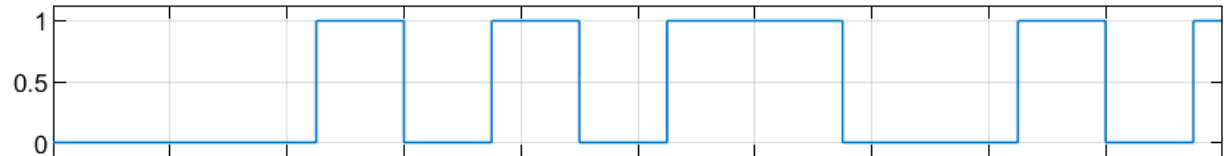
4 Simuler le montage pour **20s** et afficher les signaux (**Run**).



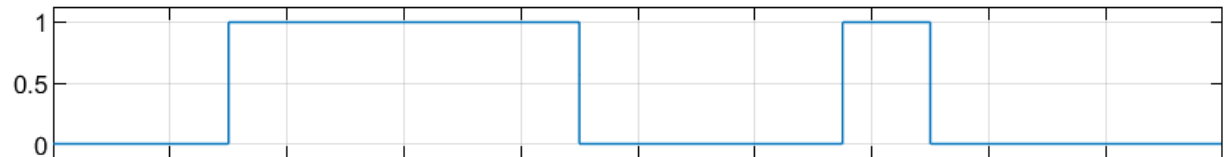
Données binaires
b2



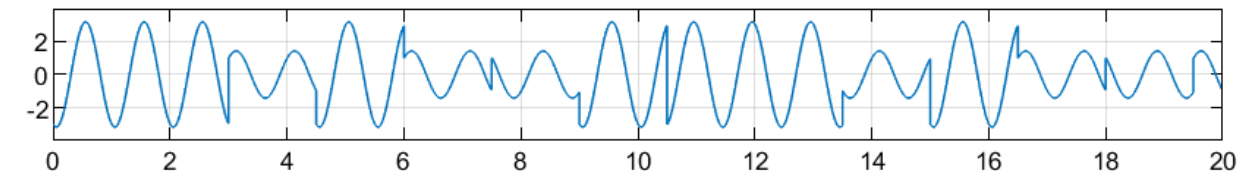
b1

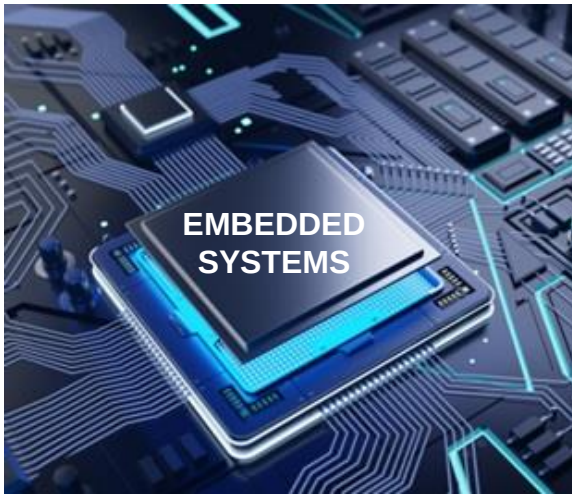


b0



Signal modulé QAM





FIN !
Questions ?