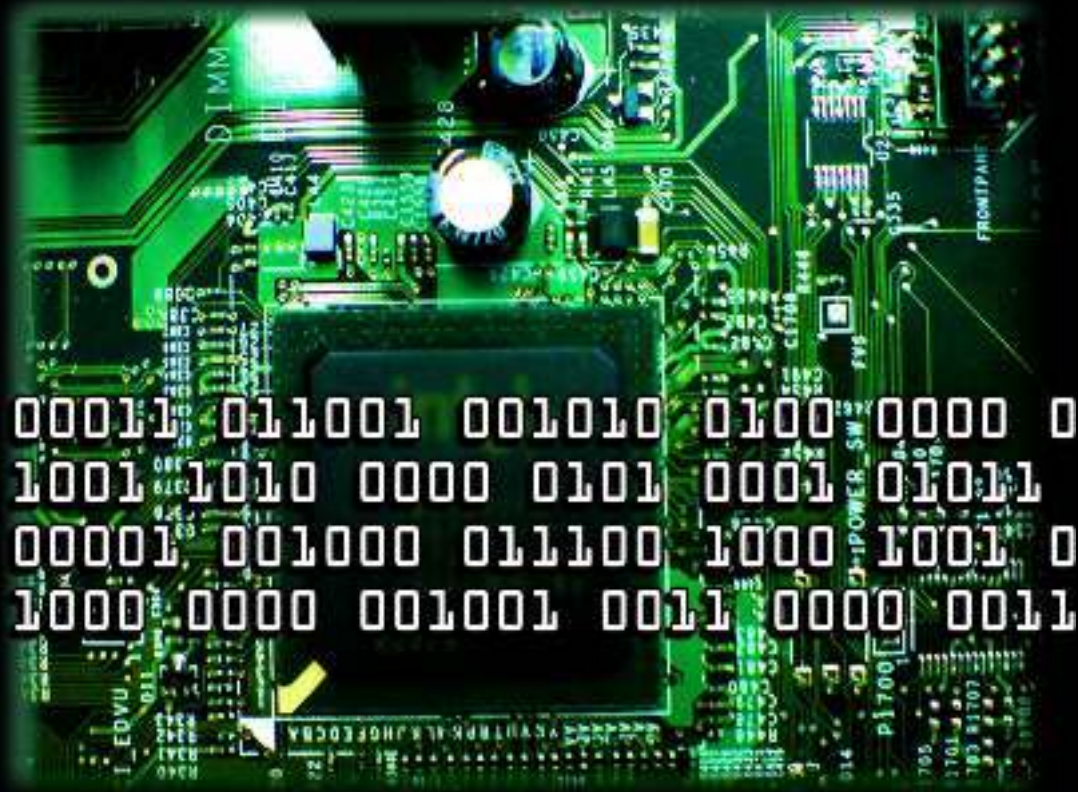


Protocoles de liaison des données



Détection et correction d'erreur



Le premier objet du logiciel impliqué dans le traitement de données issues d'échanges numériques consiste à rendre fiable les données échangées.

Bit de parité

Convenir du nombre de bit avant le bit de parité et de la parité souhaitée (paire/impaire). Par exemple 8 + pair.



Autre exemple : code ASCII (7 bits + 1 parité).

Code à Redondance Cyclique

Les valeurs transmises sont vues comme des polynômes manipulés avec une arithmétique modulo 2 :

$$\begin{array}{r} 101101 = x^5 + x^3 + x^2 + x^0 \\ + 1011 = x^3 + x + x^0 \\ \hline 100110 = x^5 + x^2 + x \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 101101 = x^5 + x^3 + x^2 + x^0 \\ - 1011 = x^3 - x - x^0 \\ \hline 100110 = x^5 + x^2 + x \end{array}$$

Code à Redondance Cyclique

Les deux interlocuteurs (l'émetteur et le récepteur du signal) conviennent d'un « *polynôme générateur* » $G(x)$ de degré « d »

La séquence binaire transmise, M' , est construite à partir du message binaire M concaténé avec un CRC de « d » bits construit de tel sorte que :

$$\text{reste} (M'(x) / G(x)) = 0$$

Exemple de polynômes générateur G largement utilisés :

$$\text{CRC-12} = x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x^1 + 1$$

$$\text{CRC-16} = x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$$

$$\text{CRC-CCITT} = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$$

Code à Redondance Cyclique

Comment construire M' ?

Avec $M = 1101011011$

et un polynome générateur : $G(x) = x^4 + x + 1$ (de degrés 4)

$M'' = 1101011011 0000$ ←

$R = \text{reste} (M'' / G(x))$

$M' = M'' + R$

Donc... $\text{reste} (M' / G(x)) = 0$ CQFD...

Code à Redondance Cyclique

Comment calculer le reste de M'' par $G(x)$?

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	0	0	1	1										0	1	0	0	1	1	↓									0	1	0	0	1		↓									0	0	0	0			↓									0	0	0				↓									0	0					↓									0						↓									0						↓									0						↓									0															0															0															0															0															0															<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5" style="border-top: 1px solid white;"></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	1	1						1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																
0	1	0	0	1	1	↓																																																																																																																																																																																																																																														
	0	1	0	0	1		↓																																																																																																																																																																																																																																													
		0	0	0	0			↓																																																																																																																																																																																																																																												
			0	0	0				↓																																																																																																																																																																																																																																											
				0	0					↓																																																																																																																																																																																																																																										
					0						↓																																																																																																																																																																																																																																									
						0						↓																																																																																																																																																																																																																																								
							0						↓																																																																																																																																																																																																																																							
								0																																																																																																																																																																																																																																												
									0																																																																																																																																																																																																																																											
										0																																																																																																																																																																																																																																										
											0																																																																																																																																																																																																																																									
												0																																																																																																																																																																																																																																								
													0																																																																																																																																																																																																																																							
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																
1	1	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																												

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	0	0	1	1											0	1	0	0	1	1	↓										0	1	0	0	1		↓										0	0	0	0			↓										0	0	0				↓										0	0					↓										0						↓										0						↓										0						↓										0						↓										0																0																0																0																0																0																<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5" style="border-top: 1px solid white;"></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	1	1						1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
0	1	0	0	1	1	↓																																																																																																																																																																																																																																																																													
	0	1	0	0	1		↓																																																																																																																																																																																																																																																																												
		0	0	0	0			↓																																																																																																																																																																																																																																																																											
			0	0	0				↓																																																																																																																																																																																																																																																																										
				0	0					↓																																																																																																																																																																																																																																																																									
					0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																								
						0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																							
							0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																						
								0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																					
									0																																																																																																																																																																																																																																																																										
										0																																																																																																																																																																																																																																																																									
											0																																																																																																																																																																																																																																																																								
												0																																																																																																																																																																																																																																																																							
													0																																																																																																																																																																																																																																																																						
														0																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	1	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																											

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	0	0	1	1											0	1	0	0	1	1	↓										0	1	0	0	1		↓										0	0	0	0			↓										0	0	0				↓										0	0					↓										0						↓										0						↓										0						↓										0						↓										0																0																0																0																0																0																<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5" style="border-top: 1px solid white;"></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	1	1						1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
0	1	0	0	1	1	↓																																																																																																																																																																																																																																																																													
	0	1	0	0	1		↓																																																																																																																																																																																																																																																																												
		0	0	0	0			↓																																																																																																																																																																																																																																																																											
			0	0	0				↓																																																																																																																																																																																																																																																																										
				0	0					↓																																																																																																																																																																																																																																																																									
					0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																								
						0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																							
							0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																						
								0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																					
									0																																																																																																																																																																																																																																																																										
										0																																																																																																																																																																																																																																																																									
											0																																																																																																																																																																																																																																																																								
												0																																																																																																																																																																																																																																																																							
													0																																																																																																																																																																																																																																																																						
														0																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	1	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																											

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	0	0	1	1											0	1	0	0	1	1	↓										0	1	0	0	1		↓										0	0	0	0			↓										0	0	0				↓										0	0					↓										0						↓										0						↓										0						↓										0						↓										0																0																0																0																0																0																<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5" style="border-top: 1px solid white;"></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	1	1						1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
0	1	0	0	1	1	↓																																																																																																																																																																																																																																																																													
	0	1	0	0	1		↓																																																																																																																																																																																																																																																																												
		0	0	0	0			↓																																																																																																																																																																																																																																																																											
			0	0	0				↓																																																																																																																																																																																																																																																																										
				0	0					↓																																																																																																																																																																																																																																																																									
					0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																								
						0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																							
							0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																						
								0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																					
									0																																																																																																																																																																																																																																																																										
										0																																																																																																																																																																																																																																																																									
											0																																																																																																																																																																																																																																																																								
												0																																																																																																																																																																																																																																																																							
													0																																																																																																																																																																																																																																																																						
														0																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	1	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																											

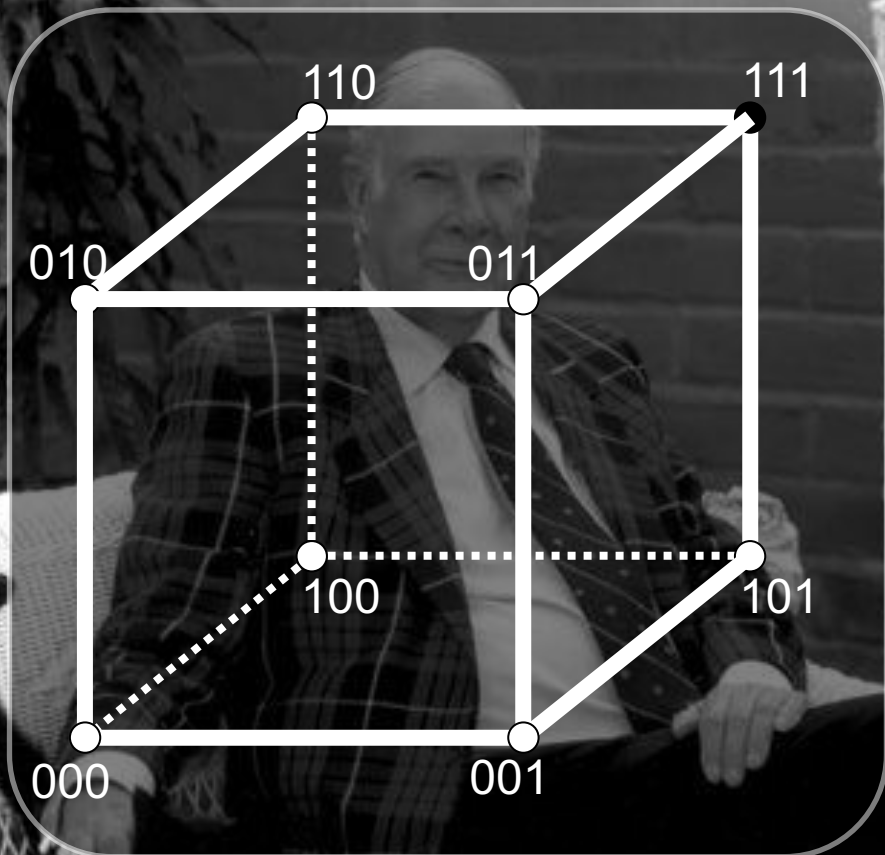
<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	0	0	1	1											0	1	0	0	1	1	↓										0	1	0	0	1		↓										0	0	0	0			↓										0	0	0				↓										0	0					↓										0						↓										0						↓										0						↓										0						↓										0																0																0																0																0																0																<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5" style="border-top: 1px solid white;"></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	1	1						1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
0	1	0	0	1	1	↓																																																																																																																																																																																																																																																																													
	0	1	0	0	1		↓																																																																																																																																																																																																																																																																												
		0	0	0	0			↓																																																																																																																																																																																																																																																																											
			0	0	0				↓																																																																																																																																																																																																																																																																										
				0	0					↓																																																																																																																																																																																																																																																																									
					0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																								
						0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																							
							0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																						
								0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																					
									0																																																																																																																																																																																																																																																																										
										0																																																																																																																																																																																																																																																																									
											0																																																																																																																																																																																																																																																																								
												0																																																																																																																																																																																																																																																																							
													0																																																																																																																																																																																																																																																																						
														0																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	1	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																											

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	0	0	1	1											0	1	0	0	1	1	↓										0	1	0	0	1		↓										0	0	0	0			↓										0	0	0				↓										0	0					↓										0						↓										0						↓										0						↓										0						↓										0																0																0																0																0																0																<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5" style="border-top: 1px solid white;"></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	1	1						1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
0	1	0	0	1	1	↓																																																																																																																																																																																																																																																																													
	0	1	0	0	1		↓																																																																																																																																																																																																																																																																												
		0	0	0	0			↓																																																																																																																																																																																																																																																																											
			0	0	0				↓																																																																																																																																																																																																																																																																										
				0	0					↓																																																																																																																																																																																																																																																																									
					0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																								
						0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																							
							0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																						
								0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																					
									0																																																																																																																																																																																																																																																																										
										0																																																																																																																																																																																																																																																																									
											0																																																																																																																																																																																																																																																																								
												0																																																																																																																																																																																																																																																																							
													0																																																																																																																																																																																																																																																																						
														0																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	1	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																											

<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>↓</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	1	0	0	1	1											0	1	0	0	1	1	↓										0	1	0	0	1		↓										0	0	0	0			↓										0	0	0				↓										0	0					↓										0						↓										0						↓										0						↓										0						↓										0																0																0																0																0																0																<table style="border-collapse: collapse;"> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td colspan="5" style="border-top: 1px solid white;"></td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	1	0	0	1	1						1	1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
0	1	0	0	1	1	↓																																																																																																																																																																																																																																																																													
	0	1	0	0	1		↓																																																																																																																																																																																																																																																																												
		0	0	0	0			↓																																																																																																																																																																																																																																																																											
			0	0	0				↓																																																																																																																																																																																																																																																																										
				0	0					↓																																																																																																																																																																																																																																																																									
					0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																								
						0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																							
							0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																						
								0						↓																																																																																																																																																																																																																																																																					
									0																																																																																																																																																																																																																																																																										
										0																																																																																																																																																																																																																																																																									
											0																																																																																																																																																																																																																																																																								
												0																																																																																																																																																																																																																																																																							
													0																																																																																																																																																																																																																																																																						
														0																																																																																																																																																																																																																																																																					
1	0	0	1	1																																																																																																																																																																																																																																																																															
1	1	0	0	0	1	0	1	0																																																																																																																																																																																																																																																																											

1 1 1 0

Code de Hamming



Distance de hamming :

$$d_H(000,010) = d_H(000,001) = \dots = 1$$

$$d_H(000,110) = d_H(110,101) = \dots = 2$$

$$d_H(000,111) = d_H(100,011) = \dots = 3$$

Le code (0 = 000, 1 = 111) est :

- **2_detecteur** car il détecte jusqu'à 2 erreurs dans le symbole transmis ;
- **1_correcteur** car il permet de corriger une erreur par symbole

Un code de hamming est **t_detecteur** si :

$$d_{Hmin}(\text{Symboles}) > t$$

Un code de hamming est **t_correcteur** si :

$$d_{Hmin}(\text{Symboles}) \geq 2t+1$$

Un exemple :

Code de Hamming 1_correcteur pour 4 symboles

Valeur	Code	Erreurs possibles				
00	00000	00001	00010	00100	01000	10000
01	00111	00110	00101	00011	01111	10111
10	11100	11101	11110	11000	10100	01100
11	11011	11010	11001	11111	10011	01011

Soit S un alphabet de 4 symboles avec $S = \{ 00000, 00111, 11100, 11011 \}$

$$\text{Min}_{(x,y) \in S^2, x \neq y} d_H(x,y) = 3$$

$$(x,y) \in S^2, x \neq y$$

⇒ Code 2_detecteur et 1_correcteur.

Corriger 00101 : $d_H(00101, 00000) = 2$ donc 00101 n'est pas le premier symbole.

$d_H(00101, 00111) = 1$ donc 00101 est le second symbole

(avec 1 erreur)

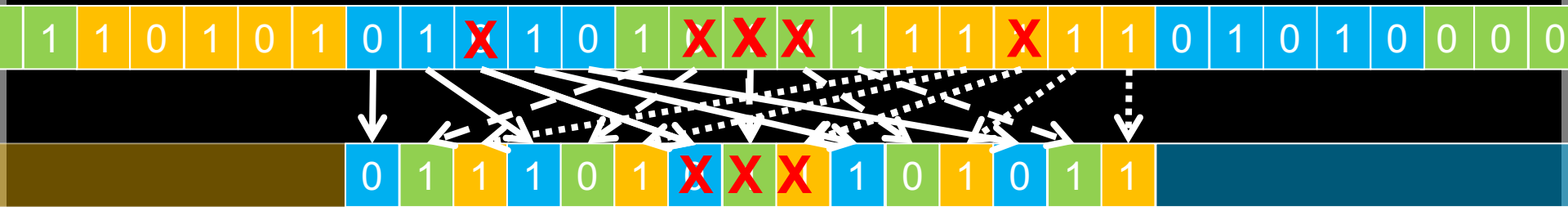
S nous permet de coder 4 valeurs binaires différentes soit 2 bits :

Codes correcteurs

- Reed-Solomon codes [1960] (A)DSL (CDs to Blu-ray, QR-codes,...)
 - Turbo codes [1991-1993] 3G / 4G
 - LDPC codes (low-density parity-check)
 - ...
- ⇒ *Forward Error Correction (FEC)*

Principe d'entrelacement (Interleaving)

⇒ *Exemple : chaque bloc coloré est un mot d'un code correcteur*



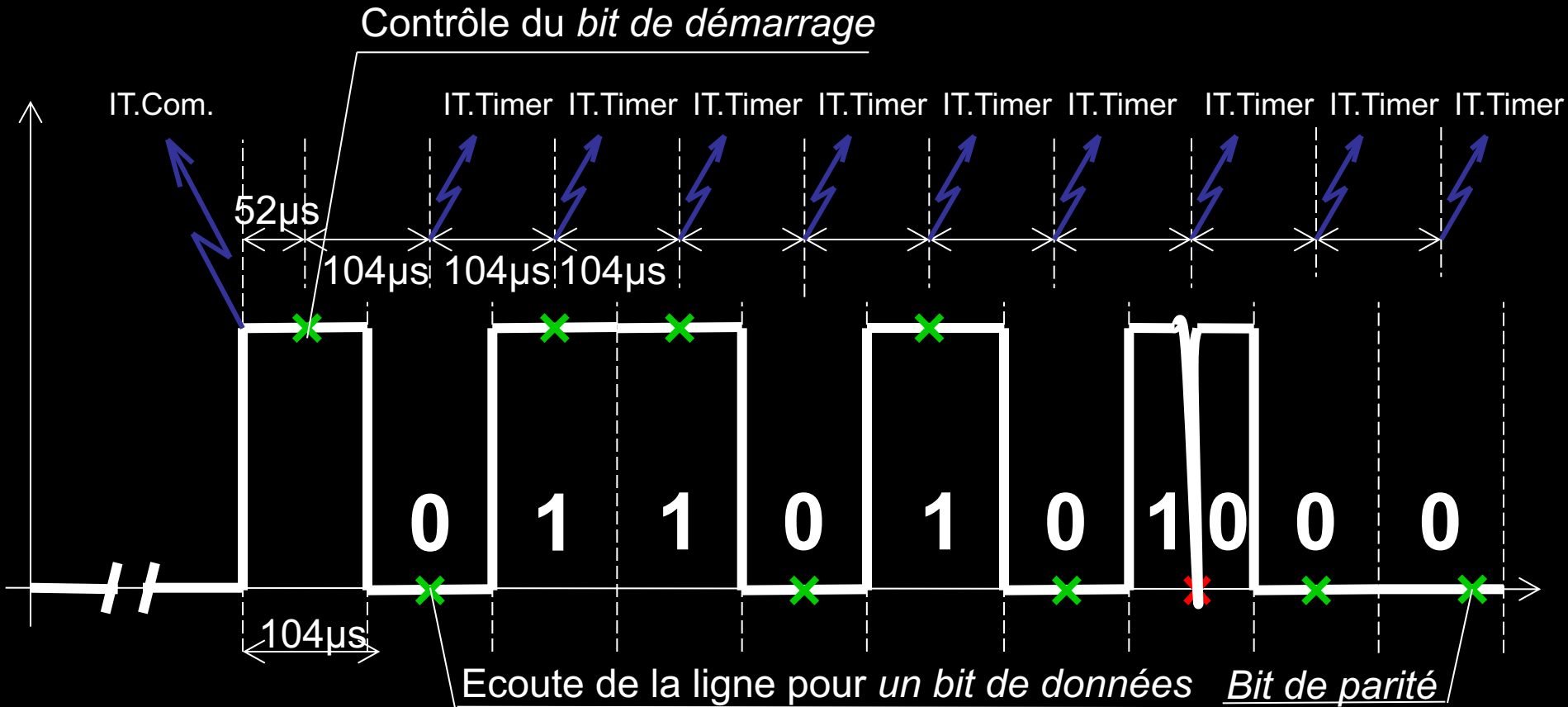
⇒ *3 erreurs dans un bloc vs 1 erreur dans 3 blocs :
Lequel est le plus facile à corriger ?*

Du matériel aux couches basses du logiciel

Selon les types de niveau de perfectionnement du processus de connexions physiques, le matériel pourra :

- donner la valeur instantanée de la ligne ;
- donner le dernier octet décodé ;
- stocker les octets reçus et non encore lus dans un tampon ;
- ou directement écrire les valeurs reçues en mémoire centrale (DMA).

Échantillonnage d'un code de base

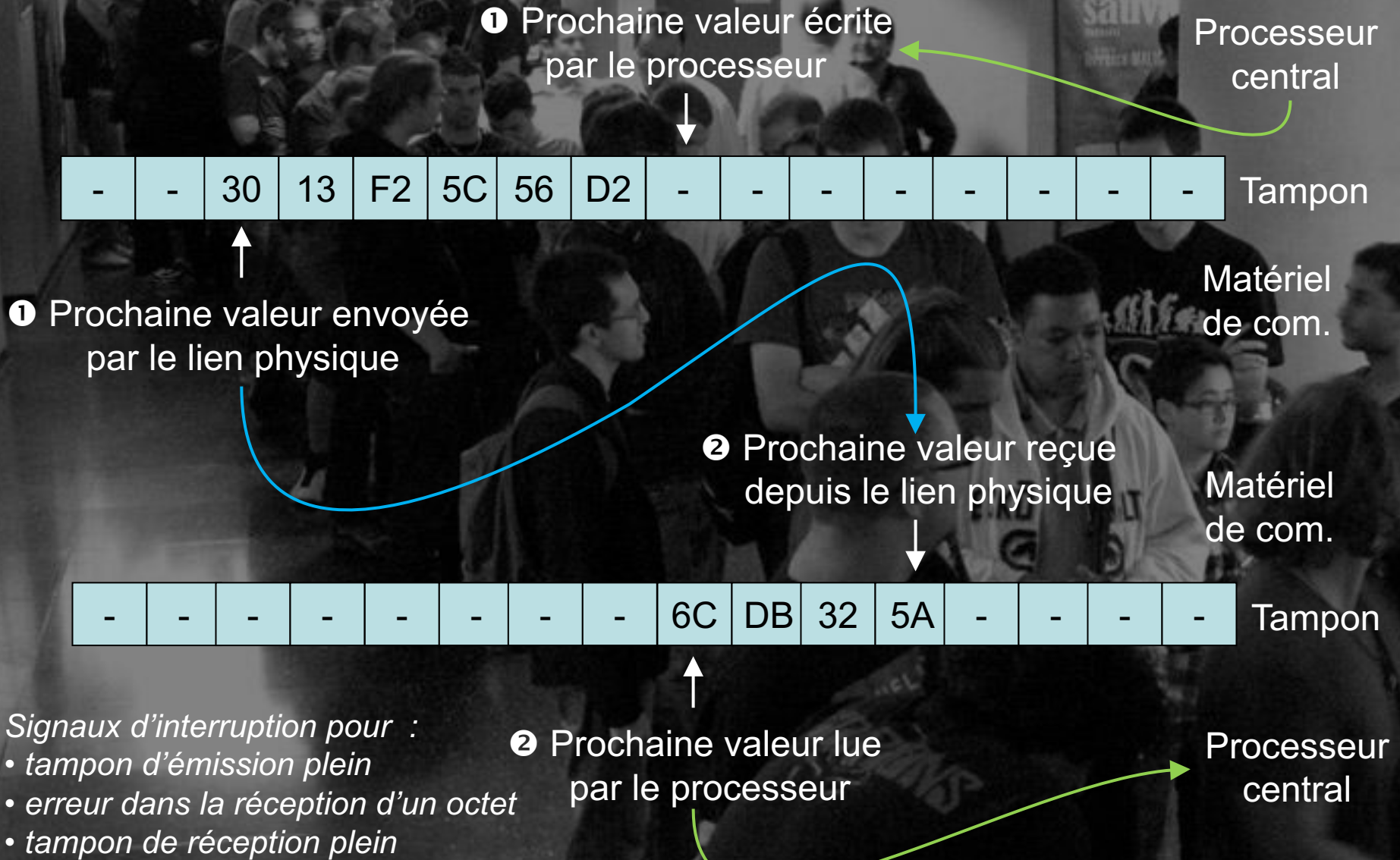


Codage tout ou rien à 9600 Bauds :
+ bit de parité
+ *Start bit* (transmission asynchrone)

Registre de (dé)sérialisation (UART)



Tampon de com. en FIFO



Protocoles de liaison

The background of the slide is a dark blue gradient. On the left side, there is a close-up, slightly blurred image of a computer keyboard. On the right side, there is a glowing blue globe of the Earth, showing the continents. The overall aesthetic is technical and digital.

Deux approches différentes selon :

- Communication point à point :
 - Envoyer et attendre ,
 - Fenêtre de réception ;
- Communication en mode diffusion :
 - ALOHA ,
 - Ethernet (ISO 802.3).
 - Wifi (ISO 802.11)

Protocoles du modèle point à point

- Type « envoyer et attendre » -

Côté émetteur

```
while(true)
{
  sendData(sdt);
  rdt = receiveData();
  if(rdt==ACK)
    sdt = getNextData();
  // else if NACK
  // envoyer sdt a
  // nouveau.
}
```

émetteur

Data 1

ACK

Data 2

NACK

Data 2bis

ACK

récepteur

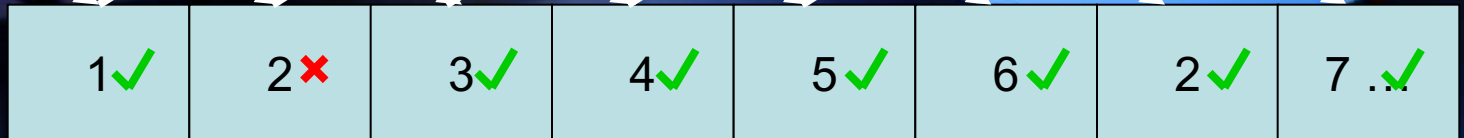
Côté Récepteur

```
while(true)
{
  rdt = receiveData();
  if(check(rdt)==OK)
  {
    sendData(ACK);
    putNextData(rdt);
  }
  else
    sendData(NACK);
}
```

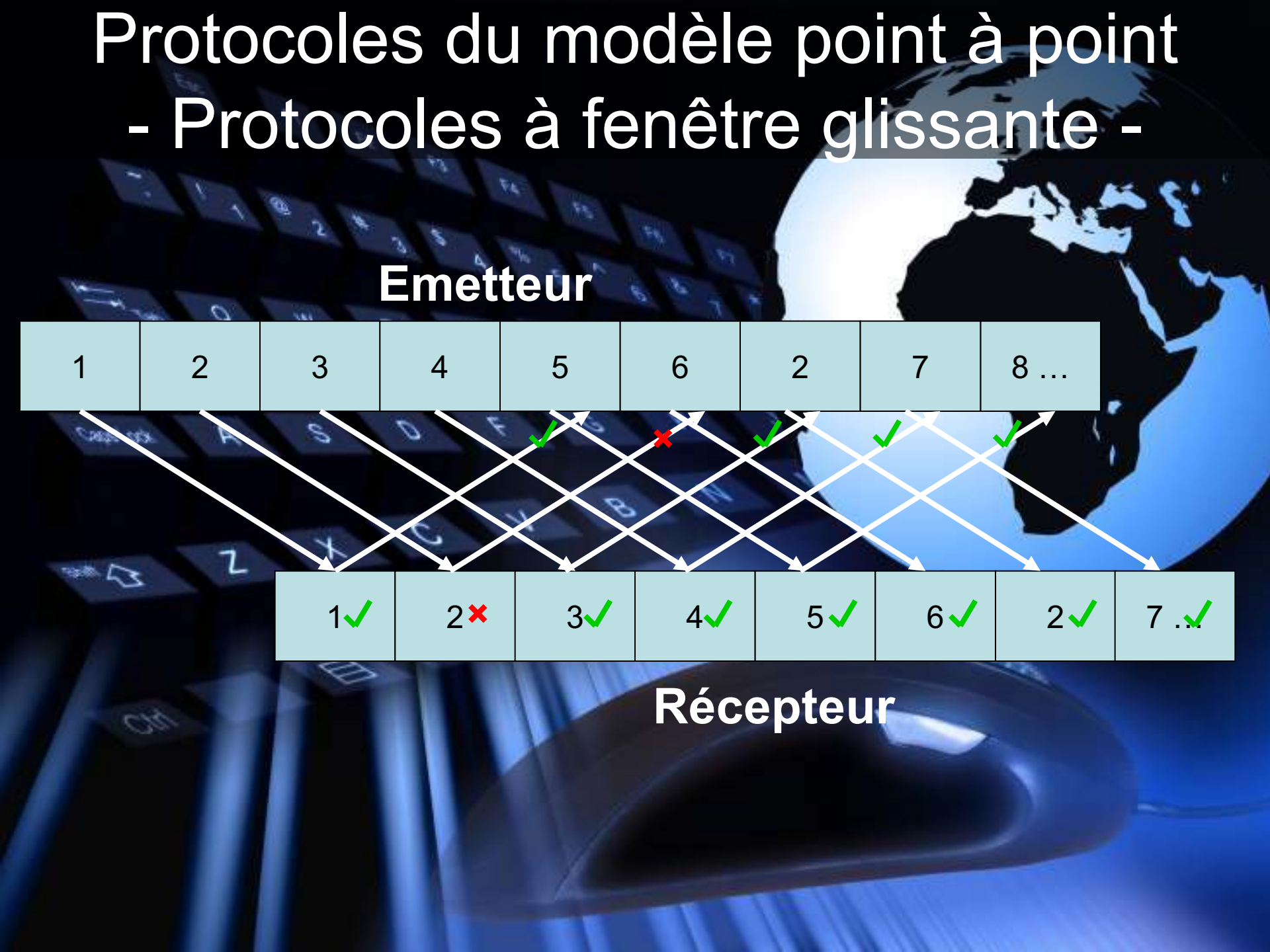

Protocoles du modèle point à point

- Protocoles à fenêtre glissante -

Emetteur

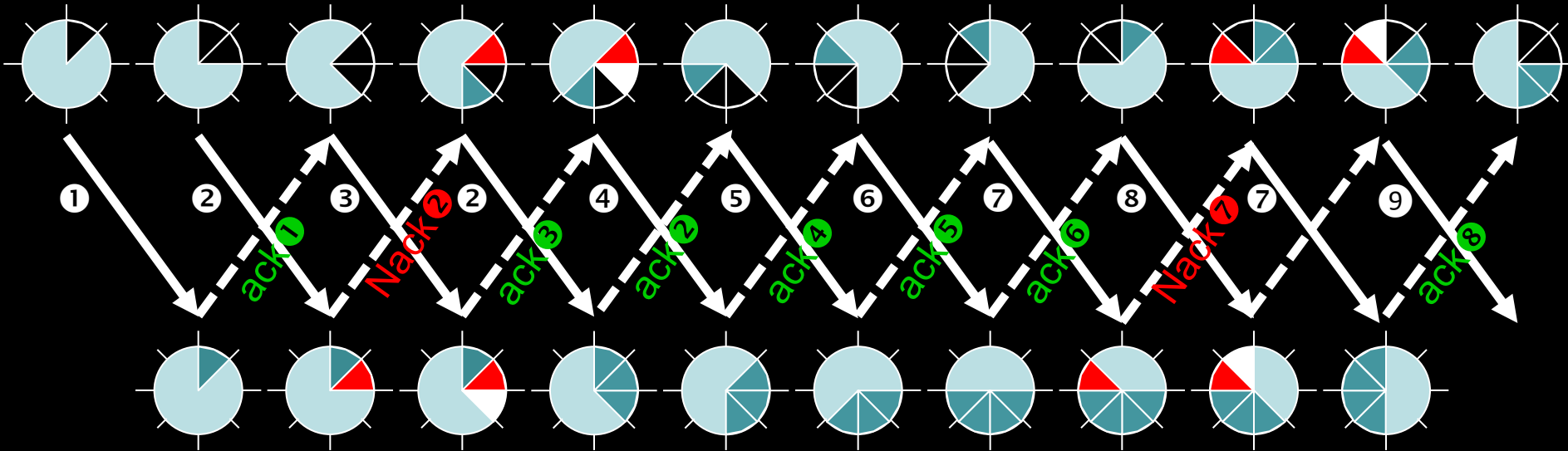


Récepteur



Protocoles du modèle point à point

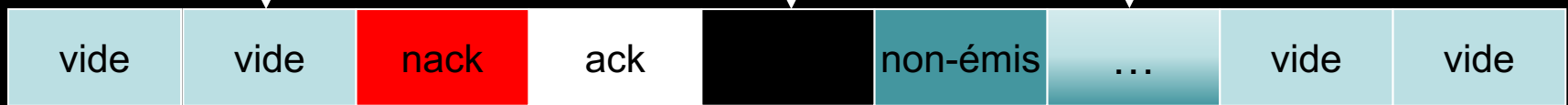
- Protocoles de fenêtre glissante



Index du dernier
paquet acquitté

Dernier paquet
émis

Index écriture



Taille maximale du tampon d'émission (/ réception)

Protocole SIP

Paquet (IP)
de donner à
transmettre.



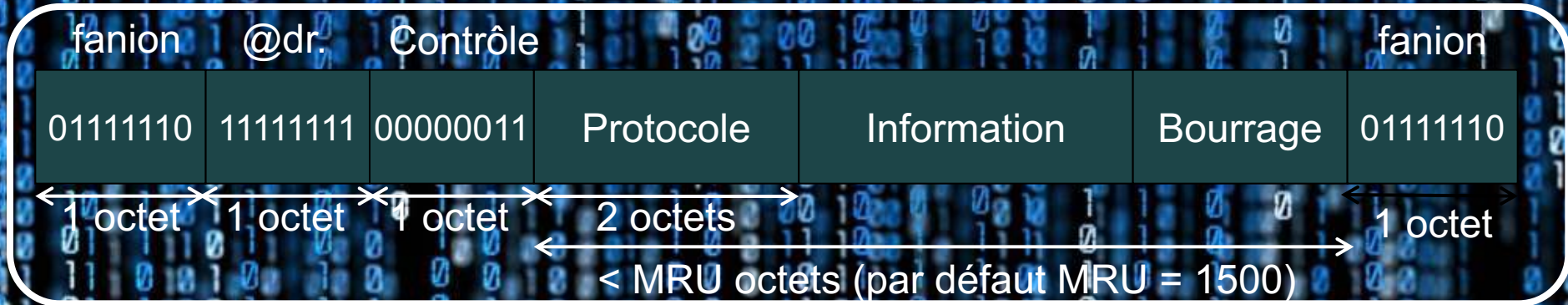
Paquet (SIP)
vraiment
transmis.



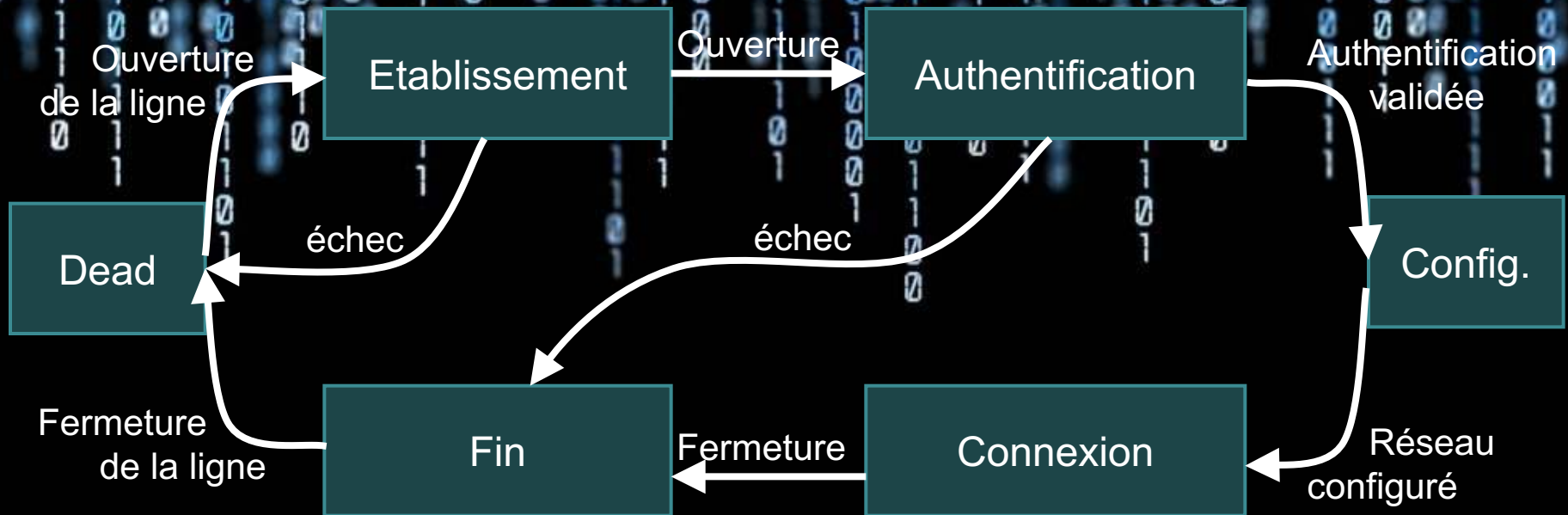
Exemple de Message SIP.

Octet de masquage

Protocole PPP



Automate de base pour une connexion PPP



Protocole PPP

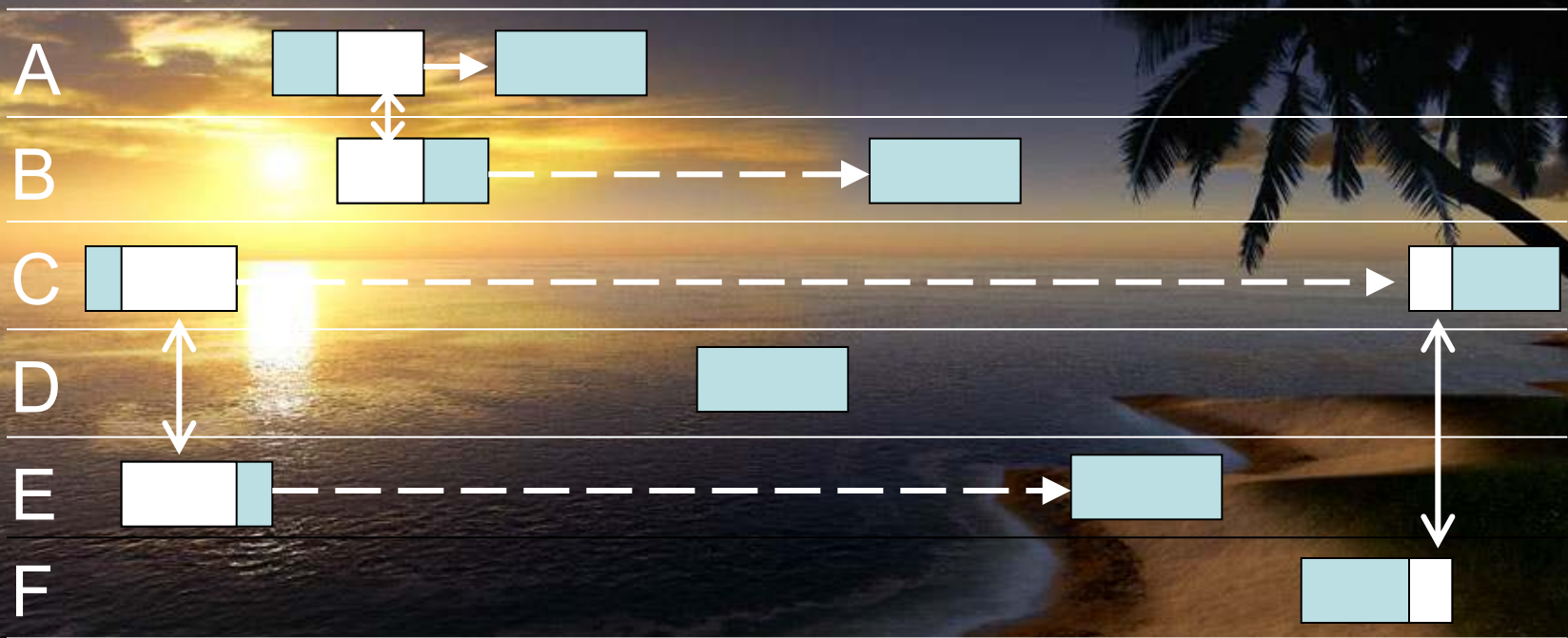
- établissement - RFC 1661 -

Nom	direction	Description
Requête de configuration	I → R	Propose une configuration spécifique des paquets transportés.
A2R (Ack) positif de configuration	I ← R	Accusé de réception positif pour une demande de configuration des paquets.
A2R (Ack) négatif de configuration	I ← R	Accusé de réception négatif pour une demande de configuration des paquets.
Configuration rejetée	I ← R	Une demande de négociation sur une option non négociable a été formulée.
Requête de terminaison	I → R	Demande de fermeture de la ligne.
A2R (Ack) de terminaison	I ← R	Demande de fermeture acceptée.
Code rejeté	I ← R	Identifiant de requête inconnue.
Protocole rejeté	I ← R	Requête de protocole inconnu.
Requête d'écho	I → R	Demande d'écho (pour test)
Réponse d'écho	I ← R	Retour d'écho...
Requête à jeter	I → R	Requête à ne pas traiter. (pour test).

Protocoles du modèle en diffusion

- ALOHA -

Les stations A, B, C, D, E et F sont connectées via un support physique commun.



Émettre et, en cas de collision, attendre une durée aléatoire avant de ré-émettre.

Protocoles du modèle en diffusion

- p-persistent CSMA / CD -

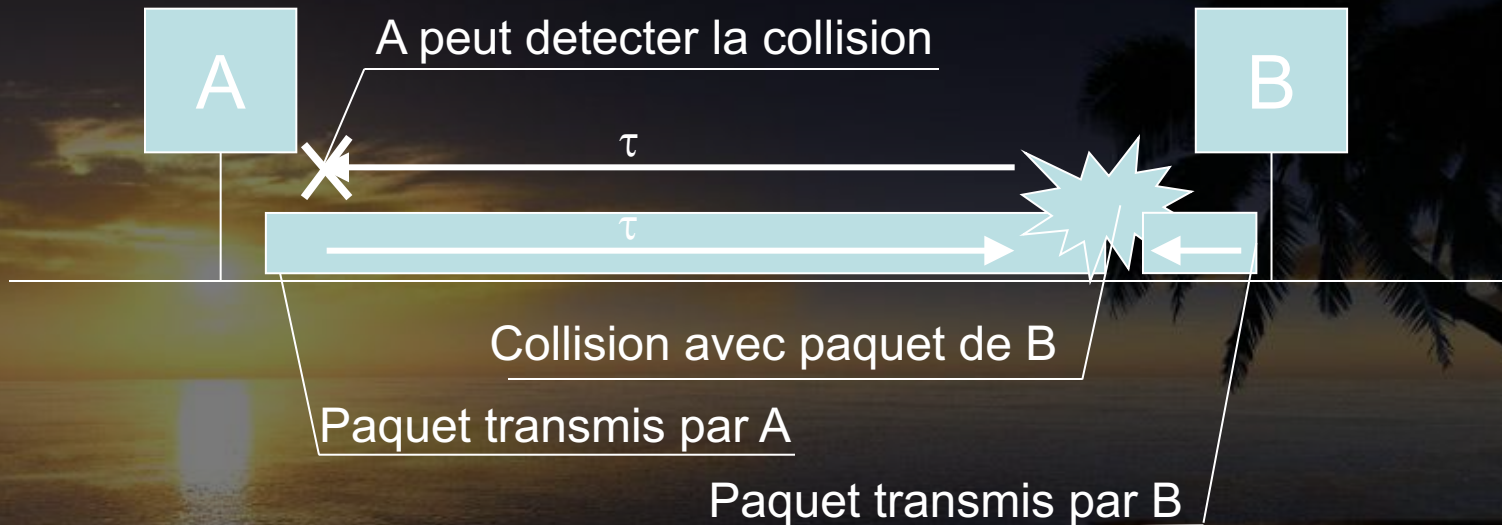
Dans ce cas les émetteurs potentiels ne parlent que pendant des Slots de temps si personne ne parle déjà. Et avec une probabilité p ($p=0,10$ par exemple).



utilisation d'un codage de base type Manchester pour pouvoir détecter les collisions (en bande de base $0+0=0...$).

Au mieux : 37% de succès, 37% de slots vides, 26% de collisions.

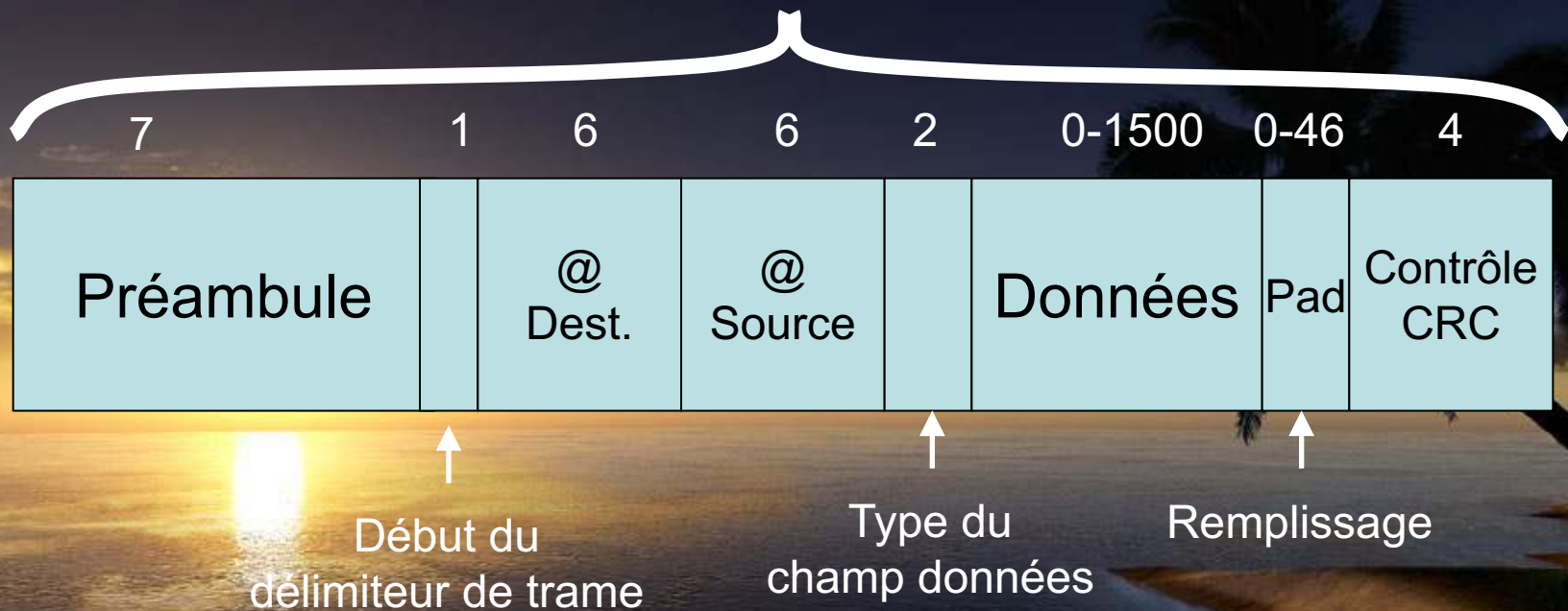
Trame Ethernet



La distance max entre deux stations ethernet est de 2500m.
à 200 000 km/s = $12,5\mu\text{s} + 3,5\mu\text{s}$ par repeteur et 4 repeteurs pour 2500 m.
 $\tau \approx 26\mu\text{s}$ et donc $2 \times \tau \approx 52\mu\text{s}$ pour l' A/R.
Transmission à 10Mbit/s : 1 bit = $0,1 \mu\text{s}$.
Donc la longueur minimale d'un message est de 520bits (~ 64 octets)

Trame Ethernet

Nombre d'octets



Format d'une trame IEEE 802.3

Avec :

- octet de préambule : 10101010
- octet délimiteur de trame : 10101011
- @source : identifiant unique intégré à la carte sur 6 octets.
- @dest. : 6 octets intégrés à la carte réseau (broadcast : ff:ff:ff:ff:ff:ff)
- type du champ : 0x0800 : IPv4, 0x86DD : IPv6, 0x0806 : ARP, ... [ieee-802-numbers]

Wifi : CSMA / CA



- CSMA : *Carrier Sense Multiple Access with*
- CD : *Collision Detection (BUS Ethernet)*
 - CA : *Collision Avoidance (Wifi)*

Problème de la *station cachée* ...

Mécanisme « CA » activable dans ce cas : *Request to Send/Clear to Send (RTS/CTS) + ACK*

résolution partielle : « RTS court » mais pas nul ...

Adresses physiques :

unicast, broadcast, multicast.

Les cartes réseaux de type Ethernet disposent d'un code identifiant (théoriquement) unique à chaque carte. Cet identifiant est codé sur 6 octets.

Une trame peut avoir pour destinataire le code identifiant d'une autre carte. Il s'agit d'un message ***unicast*** (un vers un).

Une trame peut avoir pour destinataires toutes les machines présentes sur le lien physique. Il s'agit d'un message ***broadcast*** (un vers tous).

Une trame peut avoir pour destinataire une adresse virtuelle qui concerne un groupe de récepteur sur le lien physique. Il s'agit d'un message ***multicast*** (un vers plusieurs).

Ethernet et ARP

Rechercher la présence d'une machine associée à une adresse globale (@ IP) sur un réseau local.



```
@ dest. :          FF FF FF FF FF FF
@ source :         08 00 20 02 45 9E
Trame ARP :        08 06
Type de matériel : (ethernet) 00 01
Type de couche réseau : (IP) 08 00
Taille de l' @ matérielle :    06
Taille de l' adresse globale : 04
Opération : (requête ARP) 01 ou 02 (réponse ARP)
@ physique émetteur : 08 00 20 02 45 9E
@ globale émetteur :  81 68 FE 05
@ physique cible :    00 00 00 00 00 00
@ globale cible :    81 68 FE 04
```

Ethernet et ARP

