Introduction à la cryptographie

L'époque artisanale

Yann Rotella, d'apres le cours de Christina Boura

yann.rotella@uvsq.fr

Quelques informations pratiques

- Les TDs se feront sans ordinateur.
- **Contrôle continu :**
  - 2 notes de CC (A priori le 4 mars et le 29 avril)

Contenu du cours

- Chiffrements historiques (César, Vigenère, ...), machine ENIGMA (2 semaines)
- Cryptographie symétrique (4 semaines)
  - Chiffrements à flot
  - Chiffrements par bloc
- Cryptographie asymétrique (5 semaines)
  - Protocole d'échange de clés Diffie-Hellman
  - Chiffrements RSA, Elgamal
  - Tests de primalité
  - Signatures numériques
- Certificats numériques, `openssl` (1 semaine)

Agenda du jour

Stéganographie et cryptographie

Chiffrements historiques

L'analyse des fréquences

Le chiffre de Vigenère

La stéganographie

Définition : La stéganographie est l'art de cacher un message dans un autre message (art de la dissimulation).

Exemples :

- L'encre invisible

- Écrire le message sur la tête d'un esclave

- Les micropoints

La lettre de George Sand à Alfred de Musset

Je suis très émue de vous dire que j'ai bien compris l'autre soir que vous aviez toujours une envie folle de me faire danser. Je garde le souvenir de votre baiser et je voudrais bien que ce soit là une preuve que je puisse être aimée par vous. Je suis prête à vous montrer mon affection toute désintéressée et sans calcul, et si vous voulez me voir aussi vous dévoiler sans artifice mon âme toute nue, venez me faire une visite. Nous causerons en amis, franchement. Je vous prouverai que je suis la femme sincère, capable de vous offrir l'affection la plus profonde comme la plus étroite en amitié, en un mot la meilleure preuve dont vous puissiez rêver, puisque votre âme est libre. Pensez que la solitude où j'habite est bien longue, bien dure et souvent difficile. Ainsi en y songeant j'ai l'âme grosse. Accourrez donc vite et venez me la faire oublier par l'amour où je veux me mettre.

La lettre de George Sand à Alfred de Musset

Je suis très émue de vous dire que j'ai
bien compris l'autre soir que vous aviez
toujours une envie folle de me faire
danser. Je garde le souvenir de votre
baiser et je voudrais bien que ce soit
là une preuve que je puisse être aimée
par vous. Je suis prête à vous montrer mon
affection toute désintéressée et sans cal-
cul, et si vous voulez me voir aussi
vous dévoiler sans artifice mon âme
toute nue, venez me faire une visite.
Nous causerons en amis, franchement.
Je vous prouverai que je suis la femme
sincère, capable de vous offrir l'affection
la plus profonde comme la plus étroite
en amitié, en un mot la meilleure preuve
dont vous puissiez rêver, puisque votre
âme est libre. Pensez que la solitude où j'ha-
bite est bien longue, bien dure et souvent
difficile. Ainsi en y songeant j'ai l'âme
grosse. Accourrez donc vite et venez me la
faire oublier par l'amour où je veux me
mettre.

Le problème de la stéganographie

Problème fondamental :

Si le message est découvert, le contenu de la communication secrète est révélé.

Développement en parallèle de la stéganographie d'un autre art, appelé "*l'art du secret*" :

la cryptographie.

La cryptographie

> "*La cryptographie est la pratique et étude des techniques pour assurer des communications sûres en présence d'adversaires.*"

Ron Rivest

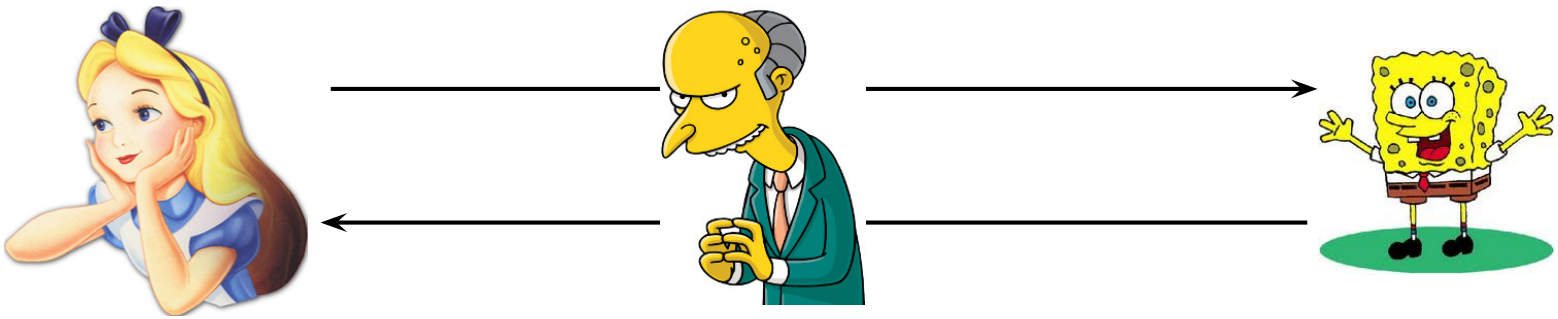
Assurer plusieurs services de sécurité :

- Confidentialité : personne ne doit pouvoir lire le message.
- Authenticité : personne ne doit pouvoir contrefaire l'origine du message.
- Intégrité : personne ne doit pouvoir modifier le message.

Confidentialité

Protéger le contenu des informations sauvegardées ou transmises sur un réseau.

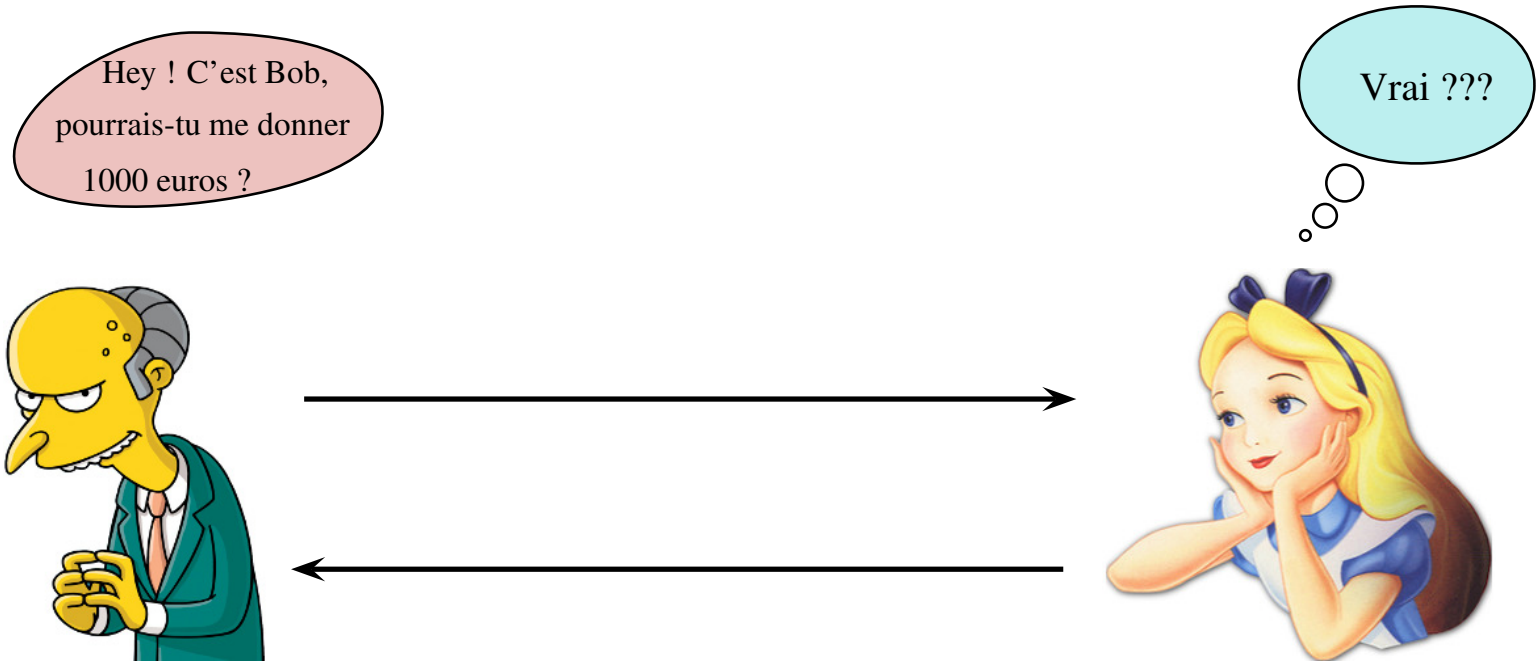
Échanger des messages en présence d'un espion.



Stocker des messages de façon sécurisée.

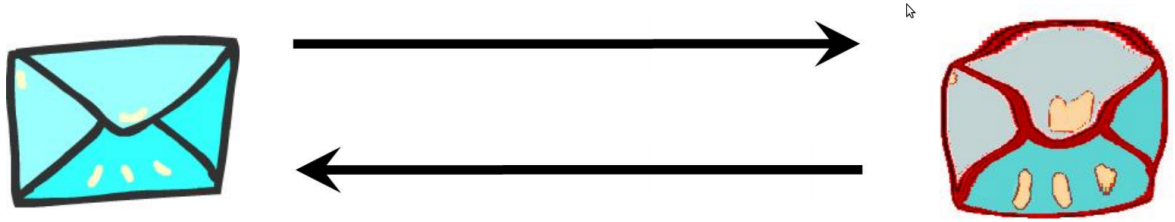
Authenticité

S'assurer de la provenance d'un message et de l'authenticité de son émetteur.

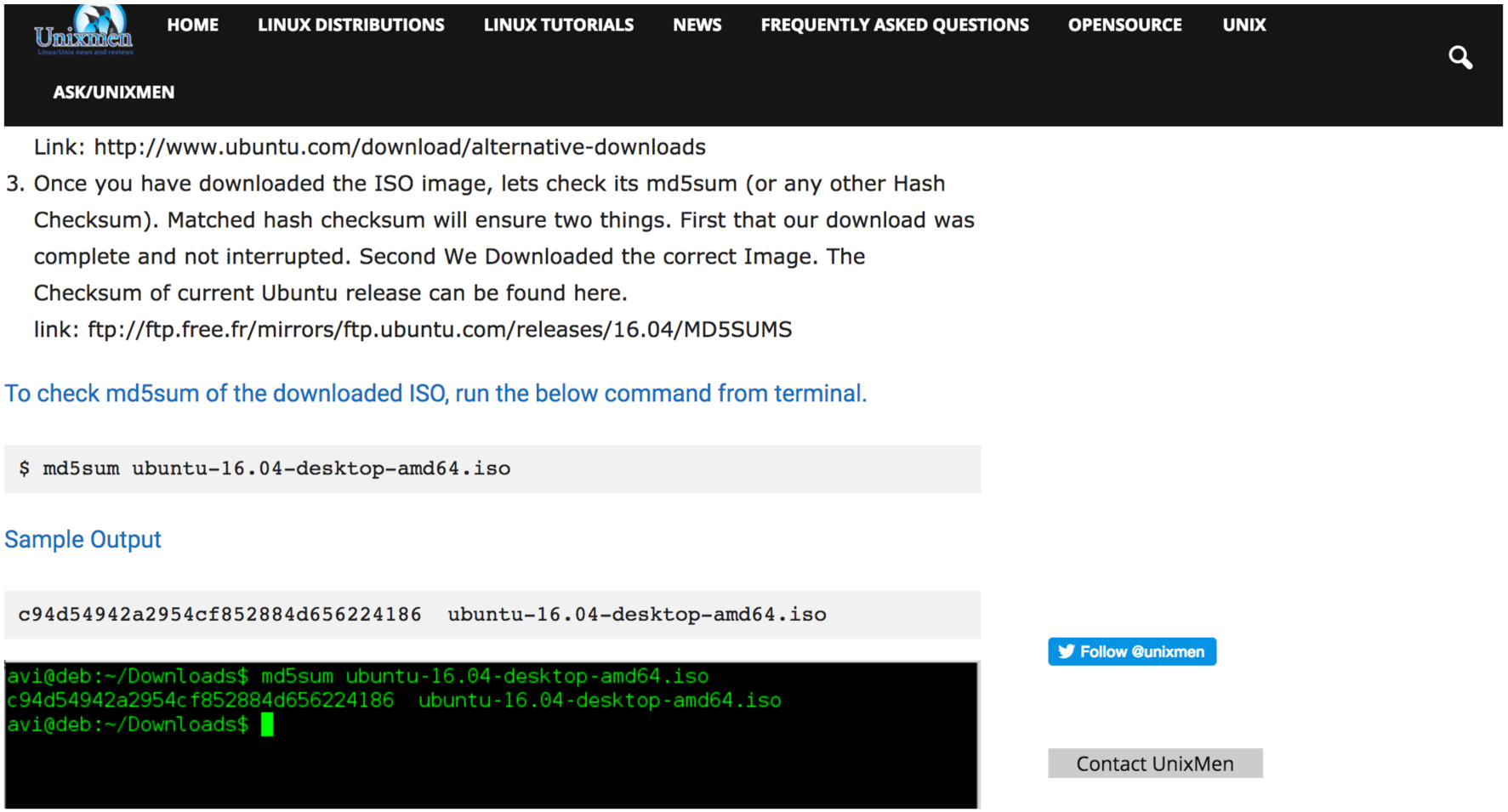


Intégrité

S'assurer de la non-modification d'un message, accidentelle ou intentionnelle.



Vérifier l'intégrité d'un logiciel



Agenda du jour

Stéganographie et cryptographie

Chiffrements historiques

L'analyse des fréquences

Le chiffre de Vigenère

Chiffrements par transposition

Définition :

Un chiffrement par transposition est un mécanisme qui consiste à **changer l'ordre des lettres** du message.

Message clair

MESSAGE

Message chiffré

SEESMGA

La scytale

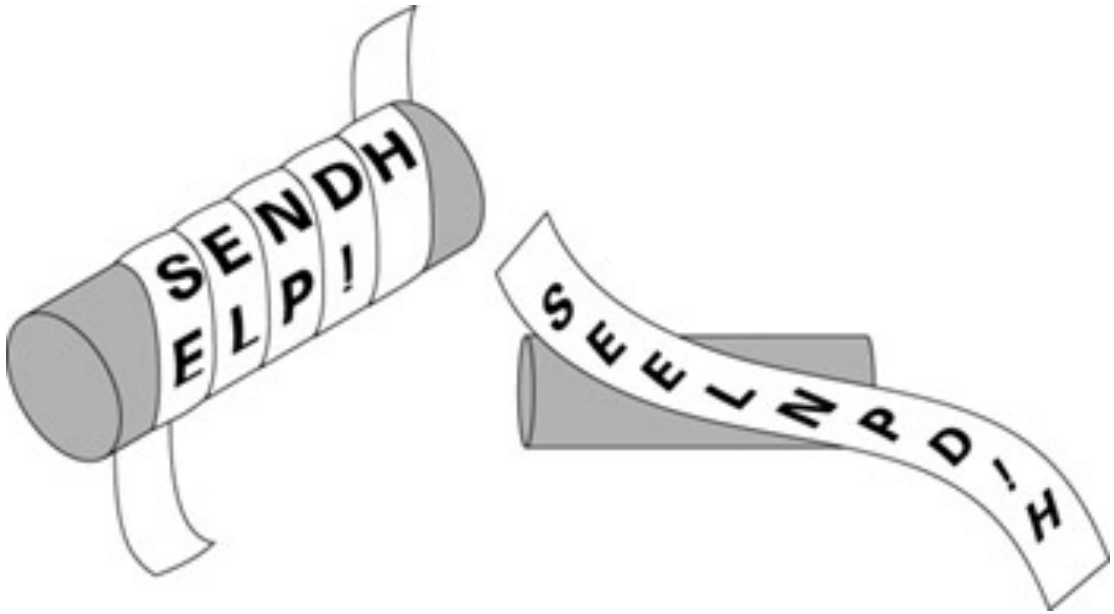
Sparte **400 avant J.-C.**

Chiffrer :

- Enrouler la ceinture sur la scytale.
- Écrire le message en plaçant une lettre sur chaque circonvolution.

Déchiffrer :

Posséder d'un bâton d'un diamètre identique.


SENDH
ELP!
SEELNPD!H

Sécurité d'un chiffrement par transposition

Nombre de façons de permuter n lettres : $n!$

Exemple : Mot "CLE"

CLE CEL LEC LCE ELC ECL

$3! = 6$ façons de transposer les lettres.

Sécurité d'un chiffrement par transposition

Nombre de façons de permuter n lettres : $n!$

Exemple : Mot "CLE"

CLE CEL LEC LCE ELC ECL

$3! = 6$ façons de transposer les lettres.

Pour un mot de 20 lettres :

$$20! = 2432902008176640000 \approx 2^{61}.$$

Une transposition au hasard des lettres semble offrir un très haut niveau de sécurité.

Recherche exhaustive

Temps estimé pour retrouver une clé de k bits : 2^{k-1} opérations.

k (bits)	Complexité en temps (operations)	Sécurité
40	2^{40}	facile à casser
64	2^{64}	possible à casser
80	2^{80}	pas encore possible
128	2^{128}	sécurité forte
256	2^{256}	sécurité très très forte

Table de [Knudsen, Robshaw, "*The Block Cipher Companion*", 2011.]

- La vie de l'univers est inférieure à 2^{80} microsecondes !
- Le nombre de protons dans l'univers est $\approx 2^{265}$.

Mais il y a un inconvénient ...

En pratique :

L'ordonnancement des lettres doit suivre un **système rigoureux** sur lequel l'expéditeur et le récepteur se sont préalablement entendus.

Exemple : Le chiffre Rail Fence

Message = "CRYPTOGRAPHIE"

C Y T G A H E
R P O R P I

Chiffré = "CYTGAHERPORPI"

Transpositions rectangulaires

Message :

"Cela semble toujours impossible, jusqu'à ce qu'on le fasse."

Mot clé : "CRYPTO"

C	R	Y	P	T	O

Transpositions rectangulaires

Message :

"Cela semble toujours impossible, jusqu'à ce qu'on le fasse."

Mot clé : "CRYPTO"

C	R	Y	P	T	O
1	4	6	3	5	2
C	E	L	A	S	E
M	B	L	E	T	O
U	J	O	U	R	S
I	M	P	O	S	S
I	B	L	E	J	U
S	Q	U	A	C	E
Q	U	O	N	L	E
F	A	S	S	E	

Transpositions rectangulaires

Message :

"Cela semble toujours impossible, jusqu'à ce qu'on le fasse."

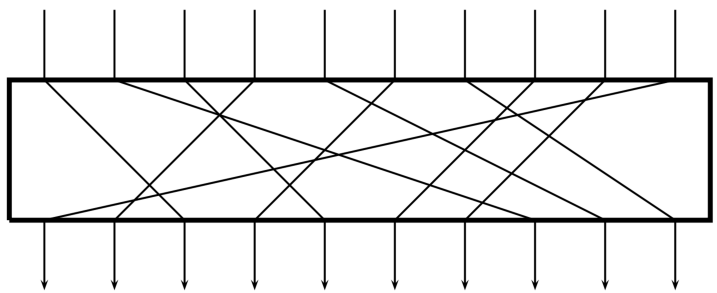
Mot clé : "CRYPTO"

C	R	Y	P	T	O
1	4	6	3	5	2
C	E	L	A	S	E
M	B	L	E	T	O
U	J	O	U	R	S
I	M	P	O	S	S
I	B	L	E	J	U
S	Q	U	A	C	E
Q	U	O	N	L	E
F	A	S	S	E	

Texte chiffré : CMUIISQF EOSSUEE AEUOEANS EBJMBQUA STRSJCLE LLOPLUOS

Conclusion : Chiffrements par transposition

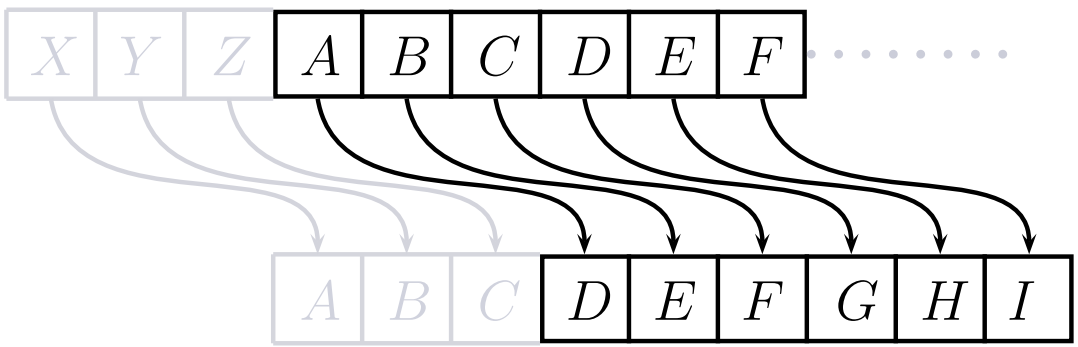
- L'algorithme utilisé est souvent facile à deviner (ainsi que la clé de la transposition).
- Les chiffrements par transposition font partie des chiffrements modernes (ex. chiffrements par bloc).



Le chiffre de César

Jules César (100 - 44 avant J.-C.)

- César utilisait un chiffre pour protéger ces communications.
- $A \to D$, $B \to E$, $C \to F$, ...



Le chiffre de César – Chiffrement et déchiffrement

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

Le chiffre de César – Chiffrement et déchiffrement

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

1. Chiffrement

ATTAQUONS CE SOIR

Le chiffre de César – Chiffrement et déchiffrement

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

1. Chiffrement

ATTAQUONSCESOIR

Le chiffre de César – Chiffrement et déchiffrement

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

1. Chiffrement

A T T A Q U O N S C E S O I R

D W W D T X R Q V F H V R L U

Le chiffre de César – Chiffrement et déchiffrement

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

1. Chiffrement

A T T A Q U O N S C E S O I R

D W W D T X R Q V F H F R L U

2. Déchiffrement

D O H D M D F W D H V W

Le chiffre de César – Chiffrement et déchiffrement

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

1. Chiffrement

A T T A Q U O N S C E S O I R

D W W D T X R Q V F H F R L U

2. Déchiffrement

D O H D M D F W D H V W

A L E A J A C T A E S T

Le chiffre de César – Chiffrement et déchiffrement

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

1. Chiffrement

A T T A Q U O N S C E S O I R
D W W D T X R Q V F H F R L U

2. Déchiffrement

D O H D M D G W D H V W
A L E A J A C T A E S T

"Les dés sont jetés".

Chiffrement par décalage

Décalage de l'alphabet par un entier $k \in \{1, 2, \ldots, 25\}$.

- $k = 3$ (Chiffre de César)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C

- $k = 1$

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A

Sécurité du chiffrement par décalage

Est-ce que ce chiffrement est sûr ?

Nombre de clés possibles : 26

- Aujourd'hui : Sécurité inexistante.
- Époque de César : Probablement sûr (analphabétisme, plusieurs langues étrangères, ...)
- Toujours utilisé pour des "secrets anodins".

Les chiffrements par substitution

Substitution : Remplacer chaque lettre de l'alphabet clair par une autre lettre, chiffre ou symbole.

Substitution monoalphabétique : Le même alphabet est conservé tout au long du chiffrement.

La clé secrète est la permutation entre les alphabets.

Quelques Exemples :

- Chiffre par décalage (César)
- Carré de Polybe
- Chiffre des Templiers
- Chiffre de PigPen

Le carré de Polybe

Polybe, historien grec ($\approx$ 200 - 125 av. J.-C.)

	1	2	3	4	5
1	A	B	C	D	E
2	F	G	H	I,J	K
3	L	M	N	O	P
4	Q	R	S	T	U
5	V	W	X	Y	Z

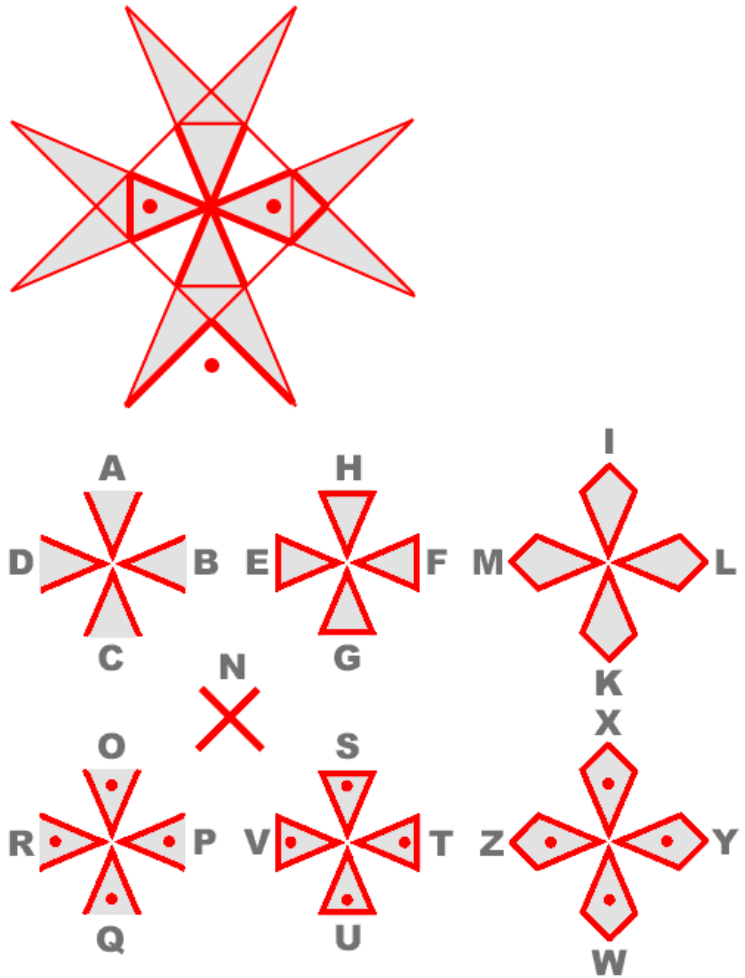
Texte clair : “CARRE DE POLYBE”
Texte chiffré : “13 11 42 42 15 14 15 35 34 31 54 12 15”

Le chiffre des Templiers

- Ordre du Temple : ordre religieux et militaire du Moyen Âge.
- Chiffre basé sur la *croix de huit béatitudes*.

Texte clair : CRYPTOGRAPHIE

Texte chiffré : ∧>◁<◁∨△>∨<▽◇▷



Le point faible de la substitution monoalphabetique

Nombre de permutations pour un alphabet de 26 lettres : $26!$

$26! \approx 2^{88}$

Les chiffrements par substitution monoalphabétique ont été employés jusqu'au 16ième siècle !

Cryptanalysés par l'analyse de la fréquence des lettres.

Agenda du jour

Stéganographie et cryptographie

Chiffrements historiques

L'analyse des fréquences

Le chiffre de Vigenère

L'analyse des fréquences

- Méthode de cryptanalyse développée par les Arabes au 9^e siècle.
- Exposée dans le "Manuscrit sur le déchiffrement des messages cryptographiques" de Al Kindi.

Dans chaque langue, certaines lettres ou combinaisons de lettres apparaissent avec une certaine fréquence.

- Examiner la fréquence des lettres employées dans un message chiffré.

Fréquence des lettres en Français

Lettre	Fréquence	Lettre	Fréquence
A	9.42%	N	7.15%
B	1.02%	O	5.14%
C	2.64%	P	2.86%
D	3.39%	Q	1.06%
E	15.87%	R	6.46%
F	0.95%	S	7.90%
G	1.04%	T	7.26%
H	0.77%	U	6.24%
I	8.41%	V	2.15%
J	0.89%	W	0.04%
K	0.05%	X	0.30%
L	5.34%	Y	0.24%
M	3.24%	Z	0.32%

Quelques exceptions

"De Zanzibar à la Zambie et au Zaïre, des zones d'ozone font courir les zèbres en zigzags zinzins !"

Plus un texte est long, plus il a de chances de suivre les fréquences moyennes.

Une **exception** notable : "*La Disparition*" de Georges Perec, 1969.

Un texte chiffré

BAELXEJ JCKJ ZA JANBH HSXGXWXL
XMXPJ LCEEA XK GCP JGCPH DPOH.
FKXEL AOOA AKJ JAGNPEA OSPHJCPGA
LA NXGKD OA HXMAJPAG, AOOA HA OAMX,
YXPHX OA HCO LAMXEJ OA HCKMAGXPE
AJ OKP LPJ : "IGXEL GCP, LABKPH
NPOOA AJ KEA EKPJH RA JXP GXZCEJA
OAH GAZPJH LA O'XEZPAE JANBH AJ OAH
OAIAELAH LAH GCPH BXHHAH BKPH-RA
NA BAGNAJJGA LA HCOOPZPJAG KEA
DXMAKG LA MCJGA NXRAHJA ?"
ABPOCIKA-ZCEJAH LAH NPOOA
AJ KEA EKPJH

["*Histoire des codes secrets*", Simon Singh]

Analyse des fréquences du texte chiffré

Lettre	**Occur.**	**Fréquence**	**Lettre**	**Occur.**	**Fréquence**
A	61	19.5%	N	9	2.9%
B	8	2.4%	O	23	7.3%
C	14	4.5%	P	26	8.3%
D	3	1.0%	Q	0	0%
E	19	6.1%	R	3	1.0%
F	1	0.3%	S	2	0.6%
G	18	5.7%	T	0	0%
H	28	8.9%	U	0	0%
I	3	1.0%	V	0	0%
J	28	8.9%	W	1	0.3%
K	16	5.1%	X	20	6.4%
L	15	4.8%	Y	3	1.0%
M	7	2.2%	Z	6	1.9%

Analyse des fréquences du texte chiffré

Lettre	Occur.	Fréquence	Lettre	Occur.	Fréquence
A	61	19.5%	N	9	2.9%
B	8	2.4%	O	23	7.3%
C	14	4.5%	P	26	8.3%
D	3	1.0%	Q	0	0%
E	19	6.1%	R	3	1.0%
F	1	0.3%	S	2	0.6%
G	18	5.7%	T	0	0%
H	28	8.9%	U	0	0%
I	3	1.0%	V	0	0%
J	28	8.9%	W	1	0.3%
K	16	5.1%	X	20	6.4%
L	15	4.8%	Y	3	1.0%
M	7	2.2%	Z	6	1.9%

A $\leftrightarrow$ e

BAELXEJ JCKJ ZA JANBH HSXGXWXL
XMXPJ LCEEA XK GCP JGCPH DPOH.
FKXEL AOOA AKJ JAGNPEA OSPHJCPGA
LA NXGKD OA HXMAJPAG, AOOA HA OAMX,
YXPHX OA HCO LAMXEJ OA HCKMAGXPE
AJ OKP LPJ : "IGXEL GCP, LABKPH
NPOOA AJ KEA EKPJH RA JXP GXZCEJA
OAH GAZPJH LA O'XEZPAE JANBH AJ OAH
OAIAELAH LAH GCPH BXHHAH BKPH-RA
NA BAGNAJJGA LA HCOOPZPJAG KEA
DXMAKG LA MCJGA NXRAHJA ?"
ABPOCIKA-ZCEJAH LAH NPOOA
AJ KEA EKPJH

A $\leftrightarrow$ e

BeELXEJ JCKJ Ze JeNBH HSXGXWXL
XMXPJ LCEEe XK GCP JGCPH DPOH.
FKXEL eOOe eKJ JeGNPEe OSPHJCPGe
Le NXGKD Oe HXMeJPeG, eOOe He OeMX,
YXPHX Oe HCO LeMXEJ Oe HCKMeGXPE
eJ OKP LPJ : "IGXEL GCP, LeBKPH
NPOOe eJ KEe EKPJH Re JXP GXZCEJe
OeH GeZPJH Le O'XEZPeE JeNBH eJ OeH
OeIeELeH LeH GCPH BXHHeH BKPH-Re
Ne BeGNeJJGe Le HCOOPZPJeG KEe
DXMeKG Le MCJGe NXReHJe ?"
eBPOCIKe-ZCEJeH LeH NPOOe
eJ KEe EKPJH

Quelques observations

- 'A' se trouve 13 fois à côté du 'O' (OA, AOOA, OAH, ...)

```
OA, AOOA, OAH
- e, e - - e, - e -
```

Quelques observations

- 'A' se trouve 13 fois à côté du 'O' (OA, AOOA, OAH, ...)

```
OA, AOOA, OAH
le, elle, le -
```

Quelques observations

- 'A' se trouve 13 fois à côté du 'O' (OA, AOOA, OAH, ...)
- 'H' se trouve plusieurs fois en fin de mot.

O A, A O O A, O A H
l e, e l l e, l e s

O $\leftrightarrow$ l
H $\leftrightarrow$ s

Quelques observations

- 'A' se trouve 13 fois à côté du 'O' (OA, AOOA, OAH, ...)
- 'H' se trouve plusieurs fois en fin de mot.

O A, A O O A, O A H
l e, e l l e, l e s

O $\leftrightarrow$ l
H $\leftrightarrow$ s

- La lettre 'J' apparaît 12 fois à côté du A (AJ 4 fois).
- AJ $\leftrightarrow$ 'en' ou 'et' ?

Quelques observations

- 'A' se trouve 13 fois à côté du 'O' (OA, AOOA, OAH, ...)
- 'H' se trouve plusieurs fois en fin de mot.

O A, A O O A, O A H
l e, e l l e, l e s

O $\leftrightarrow$ l
H $\leftrightarrow$ s

- La lettre 'J' apparaît 12 fois à côté du A (AJ 4 fois).
- AJ $\leftrightarrow$ 'en' ou 'et' ?

J $\leftrightarrow$ t

BeELXEJ JCKJ Ze JeNBH HSXGXWXL
XMXPJ LCEEe XK GCP JGCPH DPOH.
FKXEL eOOe eKJ JeGNPEe OSPHJCPGe
Le NXGKD Oe HXMeJPeG, eOOe He OeMX,
YXPHX Oe HCO LeMXEJ Oe HCKMeGXPE
eJ OKP LPJ : "IGXEL GCP, LeBKPH
NPOOe eJ KEe EKPJH Re JXP GXZCEJe
OeH GeZPJH Le O'XEZPeE JeNBH eJ OeH
OeIeELeH LeH GCPH BXHHeH BKPH-Re
Ne BeGNeJJGe Le HCOOPZPJeG KEe
DXMeKG Le MCJGe NXReHJe ?"
eBPOCIKe-ZCEJeH LeH NPOOe
eJ KEe EKPJH

BeELXEt tCKt Ze teNBs sSXGXWXL
XMXPt LCEEe XK GCP tGCPs DPls.
FKXEL elle eKt teGNPEe lSPstCPGe
Le NXGKD le sXMetPeG, elle se leMX,
YXPsX le sCl LeMXEt le sCKMeGXPE
et lKP LPt : "IGXEL GCP, LeBKPs
NPlle et KEe EKPts Re tXP GXZCEte
les GeZPts Le l'XEZPeE teNBs et les
leIeELes Les GCPs BXsses BKPs-Re
Ne BeGNettGe Le sCllPZPteG KEe
DXMeKG Le MCtGe NXReste ?"
eBPlCIKe-ZCEtes Les NPlle
et KEe EKPts

Encore quelques observations

- 'C' voyelle ? (tCKt, sCl)
- C $\leftrightarrow$ o ? (toKt, sol)
- K $\leftrightarrow$ u ? (tout, eKt $\leftrightarrow$ eut)

BeELXEt tCKt Ze teNBs sSXGXWXL
XMXPt LCEEe XK GCP tGCPs DPls.
FKXEL elle eKt teGNPEe lSPstCPGe
Le NXGKD le sXMetPeG, elle se leMX,
YXPsX le sCl LeMXEt le sCKMeGXPE
et lKP LPt : "IGXEL GCP, LeBKPs
NPlle et KEe EKPts Re tXP GXZCEte
les GeZPts Le l'XEZPeE teNBs et les
leIeELes Les GCPs BXsses BKPs-Re
Ne BeGNettGe Le sCllPZPteG KEe
DXMeKG Le MCtGe NXReste ?"
eBPlCIKe-ZCEtes Les NPlle
et KEe EKPts

BeELXEt tout Ze teNBs sSXGXWXL
XMXPt LoEEe Xu GoP tGoPs DPls.
FuXEL elle eut teGNPEe lSPstoPGe
Le NXGuD le sXMetPeG, elle se leMX,
YXPsX le sol LeMXEt le souMeGXPE
et luP LPt : "IGXEL GoP, LeBuPs
NPlle et uEe EuPts Re tXP GXZoEte
les GeZPts Le l'XEZPeE teNBs et les
leIeELes Les GoPs BXsses BuPs-Re
Ne BeGNettGe Le sollPZPteG uEe
DXMeuG Le MotGe NXReste ?"
eBPloIue-ZoEtes Les NPlle
et uEe EuPts

pendant tout ce temps sharazad
avait donne au roi trois fils.
quand elle eut termine lhistoire
de maruf le savetier, elle se leva,
baisa le sol devant le souverain
et lui dit : "grand roi, depuis
mille et une nuits je tai raconte
les recits de l'ancien temps et les
legendes des rois passes puis-je
me permettre de solliciter une
faveur de votre majeste ?"
epilogue-contes des mille
et une nuits

Agenda du jour

Stéganographie et cryptographie

Chiffrements historiques

L'analyse des fréquences

Le chiffre de Vigenère

Après la substitution monoalphabétique ?

Conclusion : Le chiffrement par substitution monoalphabétique est très fragile.

Comment resister à l'analyse des fréquences ?

Quelques alternatives peu efficaces :

- Mal orthographier le message clair (ex. *"Sessi ha kom eifai dêfassé lé fhrekans"*
- Remplacer chaque mot par un autre mot ou symbole.

Exemple :

assassinez $=$ D roi $=$ Ω cette nuit $=$ 13

Message : assassinez le roi cette nuit
Chiffré : DΩ13

Des solutions plus sérieuses

- Substitution homophonique (1500-1750).
  (Remplacer une lettre par un nombre de symboles proportionnel à la fréquence d'apparition de la lettre.)

  Exemple : Remplacer 'E' par 15 symboles différentes.

E	13	$\spadesuit \hbar \downarrow \psi \upsilon \epsilon \eta \diamond \pi j c \wedge \kappa$
A	9	$\theta \tau \oslash \smile \lambda * a \Upsilon \emptyset$
I	8	$v \gamma \ddagger \sim \div + u \oplus$
R	8	$s n \zeta \Gamma \chi \dagger d \triangleleft$
S	7	$k w \Omega \uparrow \copyright \bullet \diamondsuit$
N	7	$\rightarrow < z i y \times \infty$
T	7	$\triangleright \sigma l m \odot \frown \nu$
O	6	$\nabla \circ = \clubsuit p \rho$
L	5	$\ominus \Lambda \otimes b \Theta$
U	4	$> g f o$
C	4	$\mid \forall \aleph e$
M	3	$\Xi r h$
D	2	$\partial \wp$
P	2	$\perp \xi$
H	2	$\heartsuit x$
G	2	$\mu \alpha$
B	2	$\beta \phi$
Y	1	q
V	1	$\asymp$
Z	1	$\leftarrow$
W	1	ω
J	1	δ
X	1	$\triangle$
Q	1	$\bowtie$
F	1	$\exists$
K	1	t

- Chiffrements par substitution polyalphabétique (ex. Vigenère).

Chiffre de Vigenère

Blaise de Vigenère (1523-1596) :
diplomate, cryptographe et astrologue français.

- **1586** : Présente un chiffrement polyalphabétique qui porte depuis son nom.
- Paternité de ce système contesté (Giovan Batista Belaso avait proposé un système similaire en 1564).
- Battista Alberti avait proposé autour de 1460 un chiffre basé sur l'emploi de deux alphabets différents.

Le chiffre d'Alberti

alphabet clair a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z
alphabet chiffré 1 F Z B V K I X A Y M E P L S D H J O R G N Q C U T W
alphabet chiffré 2 G O X B F W T M Q I L A P Z J D E S V Y C R K U H N

Message : hello

Chiffré : AFPAD

Le carré de Vigenère

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
A	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
B	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A
C	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B
D	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C
E	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D
F	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E
G	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F
H	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G
I	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H
J	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I
K	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
L	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
M	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
N	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
O	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
P	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Q	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
R	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
S	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
T	T	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
U	U	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
V	V	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
W	W	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
X	X	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
Y	Y	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
Z	Z	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y

Chiffrement

- Clé de chiffrement : **Quels alphabets** seront utilisés et dans quel ordre.

Exemple. Mot-clé : CRYPTO

A T T A Q U E E N N E M I D E M A I N
C R Y P T O C R Y P T O C R Y P T O C
C K R P J I G V L C X A K U C B T W P

Chiffrement

- Clé de chiffrement : **Quels alphabets** seront utilisés et dans quel ordre.

Exemple. Mot-clé : CRYPTO

A T T A Q U E E N N E M I D E M A I N
C R Y P T O C R Y P T O C R Y P T O C
C K R P J I G V L C X A K U C B T W P

Avantage

- Une même lettre du texte clair sera chiffrée de plusieurs façons différentes. $\rightarrow$ l'analyse de fréquences échouera

Cryptanalyse du chiffre de Vigenère

- Charles Babbage (1792-1871)
- Friedrich Wilhelm Kasiski (1805-1881)

Deux étapes :

- Determiner la longueur de la clé.
- Effectuer une analyse de fréquences à chaque alphabet.

Un exemple

K I L O K I L O K I L O K I L O K I L O K I L O K
t h e r u s s e t h e j a s m i n t h e c h i n e
D P P F E A D S D P P X K A X W X B S S M P T B O

- Les mêmes séquences de lettres sont chiffrées avec la même partie de la clé !

Un exemple complet

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

Un exemple complet

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

Un exemple complet

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

Un exemple complet

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

Séquence répétée	Espace de répétition	Longueurs de clé possibles								
		2	3	4	5	6	7-9	10	11-14	15
UMQI	30	✓	✓		✓	✓		✓		✓
OIGR	25				✓					
JIGRY	30	✓	✓		✓	✓		✓		✓

Séquence répétée	Espace de répétition	Longueurs de clé possibles								
		2	3	4	5	6	7-9	10	11-14	15
UMQI	30	✓	✓		✓	✓		✓		✓
OIGR	25				✓					
JIGRY	30	✓	✓		✓	✓		✓		✓

Mot-clé de 5 lettres : $L_1 L_2 L_3 L_4 L_5$

- chiffre polyalphabétique composé de 5 chiffres monoalphabétiques

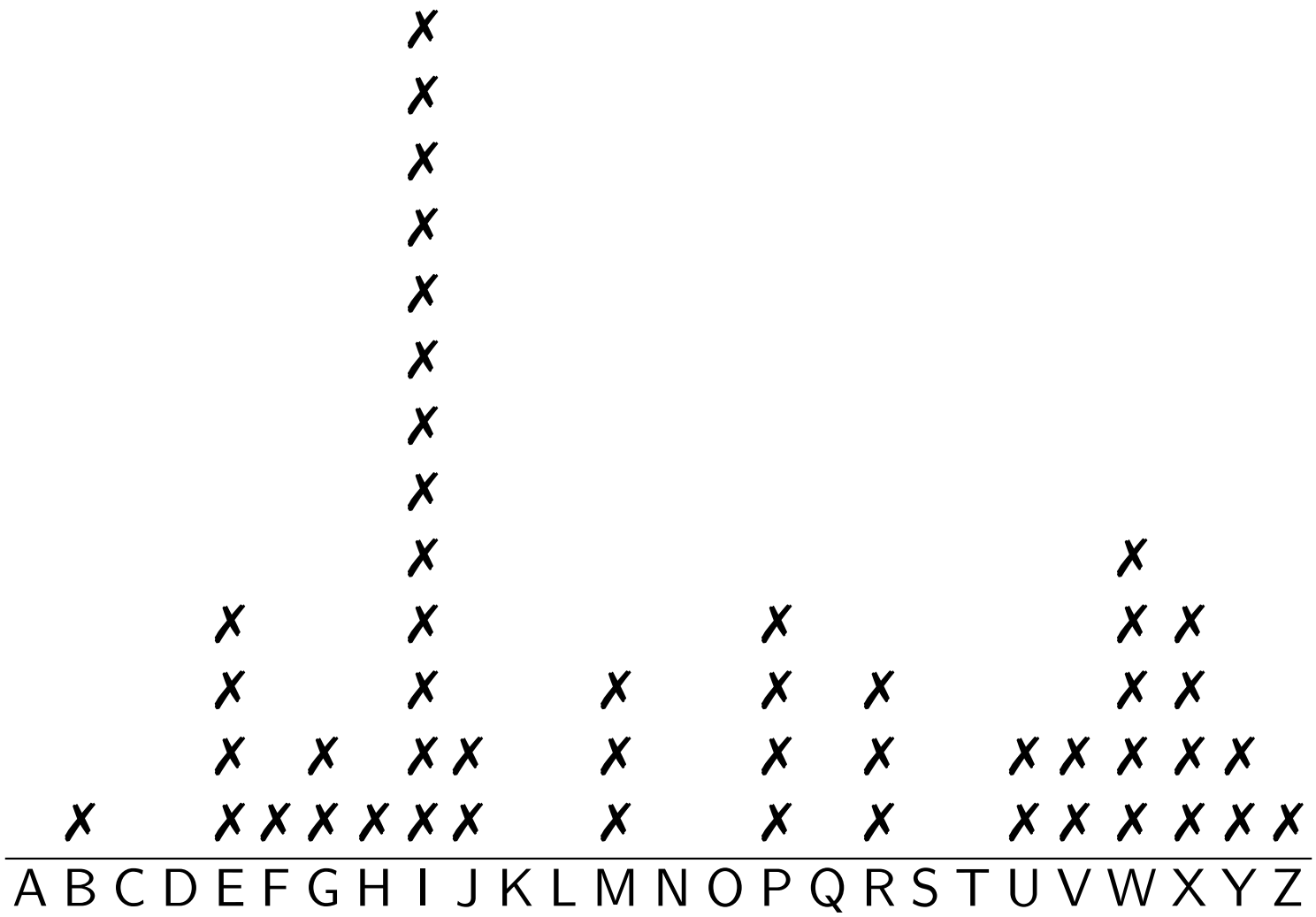
Alphabet L_1

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

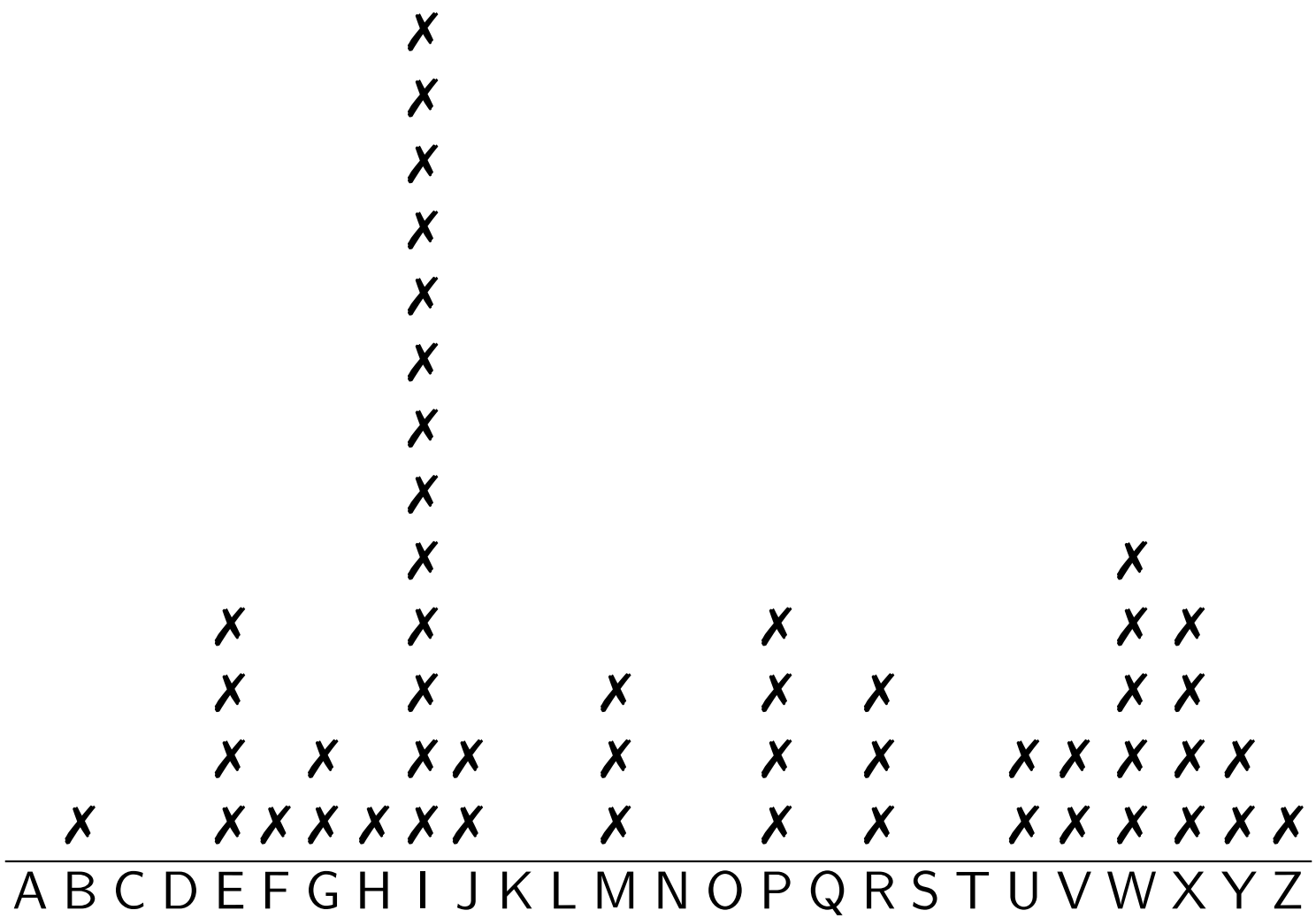
Alphabet L_1

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

Fréquences selon l'alphabet L_1



Fréquences selon l'alphabet L_1



- I $\leftrightarrow$ e
- $L_1 =$ e

Alphabet L_2

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

Alphabet L_2

XAUNMEESYIEDTLLFGSNBWQ
UFXPQTYORUTYIINUMQIEUL
SMFAFXGUTYBXXAGBHMIFII
MUMQIDEKRIFRIRZQUHIENO
OOIGRMLYETYOVQRYSIXEOK
IYPYOIGRFBWPIYRBQURJIY
EMJIGRYKXYACPPQSPBVESI
RZQRUFREDYJIGRYKXBLOPJ
ARNPUGEFBWMILXMZSMZYXP
NBPUMYZMEEFBUGENLRDEPB
JXONQEZTMBWOEFIIPAHPPQ
BFLGDEMFWFAHQ

Le principe de Kerckhoffs (1883)

En 1883 August Kerckhoffs énonce 6 principes de conception pour des chiffrements à usage militaire. Le deuxième principe dit :

La sécurité d'un cryptosystème ne doit reposer que sur le secret de la clé.

Reformulé par Claude Shannon comme

"L'adversaire connaît le système."

i.e., "*On doit concevoir des systèmes en supposant que l'ennemi trouvera les moyens de se familiariser immédiatement avec.*"

Bibliographie

- "*L'histoire des codes secrets*", Simon Singh.
- "*Handbook of Applied Cryptography*", Alfred J. Menezes, Paul C. van Oorschot, Scott A. Vanstone (livre gratuit en version électronique) `http://cacr.uwaterloo.ca/hac/`
- "*Cryptographie : théorie et pratique*", D. Stinson (en ligne) `http://www.icst.pku.edu.cn/course/Cryptography/CryptographyTheoryandpractice(3ed).pdf`
- "*Introduction to Modern Cryptography*", J. Katz and Y. Lindell.
- "*Understanding Cryptography*", C. Paar and J. Pelzl.