

José Ouin

Ingénieur INSA Toulouse

Ancien élève de l'ENS Cachan

Professeur Agrégé de Génie civil

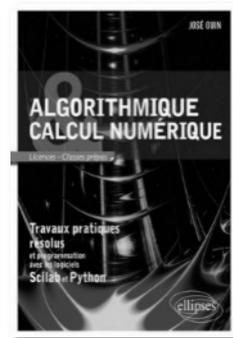
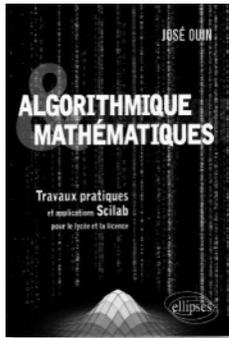
Professeur Agrégé de Mathématiques

ENIGMA

Histoire, fonctionnement et
programmation en Python
et en VBA pour Excel



Du même auteur aux Editions Ellipses et sur Amazon



ISBN : 978-2-9593648-5-3

© José OUIN – 2024 – <https://www.joseouin.fr>

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite" (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, sans autorisation de l'auteur ou du Centre français du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins 75006 Paris), constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal

Avant-propos

Je dédie ce livre à tous les passionnés de programmation et de cryptanalyse, ceux qui, comme moi, trouvent dans ces disciplines un mélange fascinant de logique, de créativité et de mystère. C'est avec une immense passion que j'ai entrepris l'écriture de ce projet, qui m'a replongé dans l'atmosphère captivante du film « *The Imitation Game* », retraçant l'histoire d'Alan Turing et des efforts déployés à Bletchley Park pour casser les codes de la machine Enigma. Ce film, comme beaucoup d'entre vous l'ont sans doute ressenti, m'a rappelé à quel point la cryptanalyse est une aventure intellectuelle hors du commun.

Ce livre est né de mon désir de partager cette fascination pour l'Enigma, une machine à la fois ingénieuse et complexe, dont le fonctionnement électromécanique a défié les plus grands esprits de l'époque. Mon souhait est qu'à travers ces pages, vous puissiez, vous aussi, plonger dans les mécanismes internes de cette machine légendaire, et apprendre à chiffrer et déchiffrer des messages à l'aide du script Python et du classeur Excel utilisant VBA que j'ai créés pour simuler son fonctionnement.

Que vous soyez débutant ou expert en cryptanalyse et en programmation, j'espère que ce livre vous offrira une exploration enrichissante et stimulante de l'Enigma et de ses secrets. C'est une invitation à voyager dans le temps, tout en plongeant dans l'univers passionnant du code et du déchiffrement.

Bonne lecture et bonne exploration !

José Ouin



- Un avis positif ?

Merci de prendre le temps de laisser votre évaluation (☆☆☆☆☆) sur la page Amazon de ce livre. Vos avis aident les autres lecteurs à mieux comprendre l'ouvrage.

- Un avis négatif, une question, une suggestion ou une remarque ?

N'hésitez pas à m'envoyer un message via le formulaire de contact de mon site Internet. Lien : <https://joseouin.fr/bandeaucontact>

Table des matières

1- Introduction générale.....	9
1-1. Présentation de l'intérêt du chiffrement et de la sécurité des communications.....	9
1-1.1 Un besoin qui traverse les âges.....	9
1-1.2 La cryptographie comme rempart face aux menaces.....	9
1-1.3 Enigma : un cas d'école.....	10
1-1.4 L'importance croissante de la sécurité dans un monde numérique	10
1-2. Pourquoi l'étude d'Enigma reste pertinente aujourd'hui ?	11
1-2.1 Un trésor historique	11
1-2.2 Une étude pédagogique essentielle.....	11
1-2.3 Un modèle pour les systèmes de sécurité actuels.....	12
1-2.4 Un pont entre le passé et l'avenir	12
2- Exemples de cryptographie classique et quantique	13
2-1. Le code de César.....	13
2-1.1 Exemple de script Python du chiffrement de César	13
2-2. Cryptographie quantique :	15
2-2.1 L'intrication quantique :	15
3- Rappels historiques sur la naissance de la machine Enigma.....	16
3-1. Origines de la cryptographie avant Enigma : une vue d'ensemble des méthodes de chiffrement avant la création de la machine	16
3-1.1 Les débuts de la cryptographie : les méthodes classiques.....	16
3-1.2 Les cryptogrammes avancés de la Renaissance et au-delà.....	17
3-1.3 L'ère industrielle et la montée de la cryptographie mécanique	17
3-1.4 Le contexte de l'invention de l'Enigma.....	18
3-2. Le rôle d'Arthur Scherbius et l'invention de la machine Enigma.....	19
3-2.1 Qui était Arthur Scherbius ?.....	19
3-2.2 L'invention de la machine Enigma	19
3-2.3 Les composants de la machine Enigma	20
3-2.4 Un visionnaire en avance sur son temps	24
3-2.5 L'impact de l'invention de Scherbius.....	24
3-2.6 L'héritage de Scherbius	25
3-3. Les différentes versions de la machine Enigma (commerciale et militaire).....	25
3-3.1 La version commerciale	25
3-3.2 Les versions militaires.....	26
3-3.3 Les versions adaptées à d'autres pays.....	26

3-3.4	Autres versions et variantes	27
4-	L'armée allemande et l'utilisation d'Enigma	30
4-1.	L'adoption de la machine Enigma par les différentes branches de la Wehrmacht.....	30
4-1.1	L'adoption par l'Heer (armée de terre).....	30
4-1.2	L'adoption par la Luftwaffe (armée de l'air).....	31
4-1.3	L'adoption par la Kriegsmarine (marine de guerre)	31
4-1.4	Pourquoi l'armée allemande a adopté Enigma ?	32
4-2.	L'organisation des communications cryptées au sein de l'armée allemande ..	33
4-2.1	Procédures d'utilisation de la machine Enigma	33
4-2.2	Transmission et réception des messages.....	34
4-2.3	Hierarchie et centralisation des communications.....	35
4-2.4	Sécurité et gestion des carnets de clés	35
4-2.5	Problèmes et failles dans l'organisation des communications.....	36
4-3.	Failles humaines dans l'utilisation d'Enigma (erreurs de configuration, répétition de messages, etc.)	37
4-3.1	Erreurs de configuration des machines	37
4-3.2	Répétition de messages ou de configurations	38
4-3.3	Indicateurs faibles ou prévisibles	39
4-3.4	Utilisation non standardisée des protocoles	39
4-3.5	Failles dans les messages de routine	40
4-3.6	Capture de matériel et carnets de clés	40
4-4.	L'impact des modifications apportées par l'armée (nouveaux rotors, changements de procédure)	41
4-4.1	L'introduction de nouveaux rotors.....	41
4-4.2	Changements dans les procédures de chiffrement	42
4-4.3	L'impact de ces modifications sur la cryptanalyse alliée.....	42
4-4.4	Limites des modifications et erreurs humaines.....	43
5-	Principe de fonctionnement de la machine Enigma.....	44
5-1.	Description détaillée des composants : rotors, réflecteurs, tableau de connexions.....	44
5-1.1	Les rotors (ou rotors de chiffrement).....	44
5-1.2	Les anneaux des rotors (Ringstellung)	47
5-1.3	Les encoches des rotors.....	48
5-1.4	Effet du réglage de l'anneau sur l'avancement des rotors	51
5-1.5	Le réflecteur.....	52
5-1.6	Vue éclatée d'un rotor et de ses composants.....	53

5-1.7	Le tableau de connexions (plugboard).....	54
5-1.8	Interaction entre les composants	55
5-2.	Explication mathématique du fonctionnement d'Enigma (permutations et cycles)	56
5-2.1	Les permutations dans Enigma	56
5-2.2	Cycles et propriétés des permutations.....	57
5-2.3	Chiffrement dynamique et effet combiné	58
5-2.4	Nombre total de permutations.....	58
5-3.	Visualisation graphique du chiffrement d'une lettre.....	63
5-3.1	Description des connexions des différents rotors	63
5-3.2	Exemple N°1 : sans connexion au tableau de connexions.....	64
5-3.3	Exemple N°2 : avec connexion au tableau de connexions.....	65
5-3.4	Exemple N°3 : avec double avancée (double stepping).....	66
5-4.	Analyse des forces et des faiblesses du système Enigma.....	67
5-4.1	Forces du système Enigma :	67
5-4.2	Faiblesses du système Enigma	68
6-	Développement d'un simulateur Enigma en langage Python	71
6-1.	Description générale de la programmation de la machine Enigma	71
6-1.1	Composants fondamentaux de la machine Enigma.....	71
6-1.2	Structuration du programme en Python	71
6-2.	Script Python du simulateur de la machine Enigma	74
6-3.	Description des différentes fonctions de ce script Python	79
6-4.	Exemple d'utilisation de ce simulateur Enigma	82
7-	Développement d'un simulateur Enigma en langage VBA pour Excel	83
7-1.	Description générale de la programmation de la machine Enigma	83
7-2.	Macros VBA du simulateur de la machine Enigma	84
7-3.	Description des fonctions et procédures des macros en langage VBA.....	96
7-4.	Exemple d'utilisation de ce simulateur Enigma	101
8-	Exemples de messages chiffrés avec Enigma.....	102
8-1.	Définition des clés journalières et de message	102
8-1.1	Clé journalière.....	102
8-1.2	Clé de message.....	104

8-2.	Mode opératoire pour chiffrer et déchiffrer un message avec Enigma	104
8-2.1	Chiffrement par l'opérateur	104
8-2.2	Déchiffrement par le récepteur	105
8-3.	Pourquoi ce mode opératoire est-il particulièrement efficace ?.....	106
8-3.1	Clé de message non transmise directement.....	106
8-3.2	Calcul intermédiaire	106
8-3.3	Complexité accrue pour un attaquant.....	106
8-3.4	Renouvellement de la clé de message pour chaque transmission ...	106
8-4.	Message chiffré de Karl Dönitz	107
8-5.	Messages authentiques	108
8-5.1	Déchiffrement de la première partie du message	109
8-5.2	Déchiffrement de la deuxième partie du message.....	111
9-	Carnet de clés.....	113
10-	Outils et méthodes pour casser les codes Enigma	126
10-1.	Introduction aux techniques de cryptanalyse utilisées par les Alliés	126
10-1.1	Le travail pionnier des cryptanalystes polonais	126
10-1.2	Exploitation des faiblesses structurelles d'Enigma	127
10-1.3	La méthode « Banburismus »	127
10-1.4	Le « crib » ou repérage de mots prévisibles	127
10-1.5	La méthode du « rodding ».....	127
10-1.6	Utilisation de machines électromécaniques : la bombe de Turing	128
10-2.	La bombe de Turing : explication du fonctionnement et de la logique derrière cet outil de cryptanalyse	129
10-2.1	Origine et concept de la bombe.....	129
10-2.2	Problème à résoudre : casser Enigma.....	129
10-2.3	Principe de fonctionnement : « cribs » et répétitions	129
10-2.4	Structure et fonctionnement de la bombe	129
10-2.5	La logique derrière la bombe	130
10-2.6	Améliorations apportées par Gordon Welchman : le circuit diagonal	131
10-2.7	Impact et utilité de la bombe	131
11-	Les simulateurs de la machine Enigma.....	132
11-1.	py-Enigma	132
11-1.1	Procédure d'installation de la bibliothèque py-Enigma :	132
11-1.2	Exemple de script Python	133
11-1.3	Description du script	134

11-2. Simulateur Enigma pour Excel	135
11-2.1 Caractéristiques principales.....	135
11-2.2 Capture d'écran	136
11-3. Simulateur Cryptii.....	137
11-4. Enigma Simulator.....	138
11-5. Enigma Emulator.....	139
11-6. Enigma Machine Emulator	140
11-7. dCode – Machine Enigma	141
12- Déchiffrer Enigma : Exercices pratiques	142
12-1. Introduction aux exercices pratiques de déchiffrement	142
12-2. La table de clés journalières : outil essentiel pour déchiffrer les messages	
.....	143
12-3. Message : « Il changeait la vie »	144
12-3.1 Enoncé de l'exercice.....	144
12-3.2 Solution de l'exercice	145
12-4. Message : « Puisque tu pars ».....	146
12-4.1 Enoncé de l'exercice.....	146
12-4.2 Solution de l'exercice	147
12-5. Message : « 06 Juin 1944 »	148
12-5.1 Enoncé de l'exercice.....	148
12-5.2 Solution de l'exercice	149
12-6. Message à un officier sur le front	151
12-6.1 Enoncé de l'exercice.....	151
12-6.2 Solution de l'exercice	152
13- Les liens utiles.....	154
14- Téléchargement des ressources de cet ouvrage.....	155

1- Introduction générale

1-1. Présentation de l'intérêt du chiffrement et de la sécurité des communications.

La cryptographie, ou l'art de rendre un message illisible à quiconque ne possède pas la clé pour le déchiffrer, est aussi ancienne que la communication elle-même. Des anciens codes de César aux systèmes numériques complexes d'aujourd'hui, le besoin de protéger les informations est une constante. Dans le contexte actuel, où les données personnelles, financières et même les communications gouvernementales sont transmises électroniquement, l'importance du chiffrement est plus critique que jamais.

1-1.1 Un besoin qui traverse les âges

Dans les sociétés anciennes, le chiffrement servait à protéger les informations militaires et diplomatiques. L'histoire regorge d'exemples où des messages cryptés ont changé le cours des événements : des émissaires de l'Empire romain aux réseaux d'espionnage de la Renaissance. À chaque époque, la confidentialité des informations pouvait déterminer l'issue d'une guerre, la chute d'un empire ou la survie d'une civilisation.

À l'ère moderne, ce besoin s'est intensifié avec l'essor des télécommunications, des ordinateurs et d'Internet. Les communications ne sont plus simplement locales, elles sont globales et instantanées. Le volume de données échangées quotidiennement est colossal, et ces informations sont de nature très variée : des transactions bancaires, des informations médicales, des dossiers militaires, des communications privées ou encore des documents commerciaux confidentiels. Toute fuite ou interception peut avoir des conséquences désastreuses.

1-1.2 La cryptographie comme rempart face aux menaces

Le chiffrement est ainsi devenu un outil essentiel pour assurer la sécurité des informations. Il permet non seulement de garantir la confidentialité, mais aussi l'intégrité des données (assurant qu'elles n'ont pas été altérées) et l'authentification (confirmant l'identité des parties impliquées dans la communication). De plus, dans un contexte où les cyberattaques se multiplient, la cryptographie est l'une des dernières lignes de défense contre les tentatives d'espionnage, de sabotage et de vol de données.

La protection des communications n'est plus seulement l'apanage des États ou des grandes entreprises. Aujourd'hui, chaque individu et chaque organisation est concerné par la sécurité des informations. Que ce soit pour envoyer un email, effectuer un achat en ligne ou échanger des messages confidentiels, la cryptographie joue un rôle central dans notre quotidien numérique.

3-2. Le rôle d'Arthur Scherbius et l'invention de la machine Enigma

L'histoire de la cryptographie a été marquée par des inventeurs et des visionnaires qui ont su repousser les limites de la technologie de leur époque pour garantir la sécurité des communications. Arthur Scherbius est l'un de ces pionniers, et son invention, la machine Enigma, est devenue un symbole d'ingéniosité technique et de complexité cryptographique. La machine Enigma, bien qu'elle ait été rendue célèbre par son utilisation durant la Seconde Guerre mondiale, est à l'origine une invention conçue pour des usages civils et commerciaux.

3-2.1 Qui était Arthur Scherbius ?



Arthur Scherbius

Arthur Scherbius est né en octobre 1878 à Francfort-sur-le-Main, en Allemagne. Ingénieur en électricité de formation, il a étudié à l'Institut polytechnique de Hanovre et à l'Université technique de Munich, obtenant un doctorat en ingénierie. Après avoir travaillé dans divers secteurs, dont l'électrotechnique, il est devenu inventeur et entrepreneur.

Scherbius était fasciné par l'idée de protéger les communications à une époque où les télécommunications prenaient une importance stratégique croissante, tant dans les milieux commerciaux que militaires. À cette époque, les systèmes de chiffrement étaient souvent manuels et relativement faciles à casser avec les méthodes traditionnelles de cryptanalyse. Scherbius a vu l'opportunité de combiner des technologies émergentes comme l'électromécanique avec la cryptographie pour créer une machine capable de rendre les communications presque inviolables.

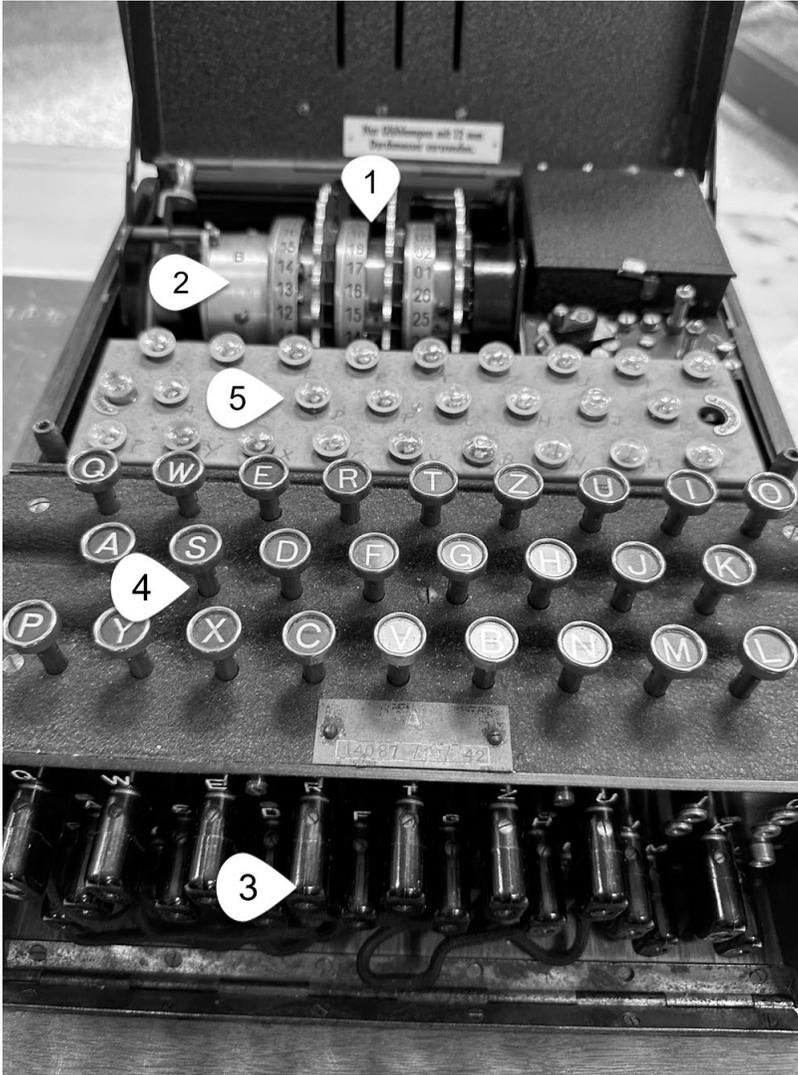
3-2.2 L'invention de la machine Enigma

En 1918, alors que la Première Guerre mondiale venait de se terminer, Scherbius déposa un brevet pour une machine de chiffrement qu'il appela "Enigma". Le brevet fut accepté en 1918 et la machine fut commercialisée dès 1923. Initialement, l'objectif de Scherbius était de vendre sa machine aux entreprises et aux gouvernements pour protéger leurs communications confidentielles.

L'invention d'Arthur Scherbius repose sur un principe fondamental de permutation des lettres, rendu complexe par l'ajout de composants mécaniques rotatifs. L'idée clé de la machine Enigma était de passer de systèmes de chiffrement statiques à un système dynamique où les lettres étaient substituées de manière différente à chaque frappe, augmentant ainsi de façon exponentielle le nombre de combinaisons possibles.

3-2.3 Les composants de la machine Enigma

La machine Enigma, capot ouvert : on peut voir clairement les rotors et le réflecteur, éléments clés du mécanisme de chiffrement. Les lampes du tableau lumineux, qui s'allument pour indiquer les lettres chiffrées, sont également visibles. Ces composants essentiels permettent à la machine de transformer chaque frappe sur le clavier en une lettre chiffrée, grâce au système complexe des rotors et du réflecteur.



Machine Enigma – Modèle 1942

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Enigma_\(machine\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Enigma_(machine))



Cette photographie illustre l'importance de la machine Enigma dans les communications cryptées de l'armée allemande pendant la Seconde Guerre mondiale. Elle montre comment les opérateurs travaillaient en équipe pour envoyer et recevoir des messages sécurisés sur le terrain. L'attention portée à l'utilisation correcte de la machine reflète l'importance cruciale de ces opérations pour garantir la sécurité des informations militaires.



Source

<https://www.nationalmuseum.af.mil/>



Photographie : Le général allemand Heinz Guderian dans un véhicule de poste de commandement. On aperçoit une machine Enigma en cours d'utilisation. Cette image illustre l'importance de la cryptographie pour les communications militaires sur le front, avec la machine Enigma servant à sécuriser les messages stratégiques de l'armée allemande pendant la Seconde Guerre mondiale.



© [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
https://en.wikipedia.org/wiki/Heinz_Guderian

Cette représentation sous forme de tableau permet de mieux visualiser comment chaque position du rotor transforme une lettre en une autre selon un schéma fixe.

alphabet = "ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ"
 rotor_III = "BDFHJLCPRTXVZNYEIWGAKMUSQO"

	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
ROTOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
III	B	D	F	H	J	L	C	P	R	T	X	V	Z	N	Y	E	I	W	G	A	K	M	U	S	Q	O

Quelques exemples de contacts entre plusieurs rotors :

- Rotors I, II et III sur la position [01, 01,01] ou [A, A, A]
 La sortie « J » du Rotor III est en contact avec l'entrée N°10 du rotor II (qui est connectée avec la sortie « B ») et la sortie « L » du rotor II est en contact avec l'entrée N°12 du rotor I (qui est connectée avec la sortie « T »).

	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 1 ROTOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
I	E	K	M	F	L	G	D	Q	V	Z	N	T	O	W	Y	H	X	U	S	P	A	I	B	R	C	J

	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 1 ROTOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
II	A	J	D	K	S	I	R	U	X	B	L	H	W	T	M	C	Q	G	Z	N	P	Y	F	V	O	E

	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 1 ROTOR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
III	B	D	F	H	J	L	C	P	R	T	X	V	Z	N	Y	E	I	W	G	A	K	M	U	S	Q	O

- Rotors I, II et III sur la position [03, 06,10] ou [C, F, J]
 La sortie « J » du Rotor III est en contact avec l'entrée N°1 du rotor II (qui est connectée avec la sortie « I ») et la sortie « L » du rotor II est en contact avec l'entrée N°7 du rotor I (qui est connectée avec la sortie « V »).

	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
C 3 ROTOR	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	1	2
I	M	F	L	G	D	Q	V	Z	N	T	O	W	Y	H	X	U	S	P	A	I	B	R	C	J	E	K

	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
F 6 ROTOR	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	1	2	3	4	5
II	I	R	U	X	B	L	H	W	T	M	C	Q	G	Z	N	P	Y	F	V	O	E	A	J	D	K	S

	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
J 10 ROTOR	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	1	2	3	4	5	6	7	8	9
III	T	X	V	Z	N	Y	E	I	W	G	A	K	M	U	S	Q	O	B	D	F	H	J	L	C	P	R

Remarque :

Les couples « Q-R », « E-F » et « V-W », respectivement pour les rotors I, II et III, indiquent la position des encoches pour chaque rotor. Par exemple, lorsque le rotor III affichera la position « V », il entraînera le rotor II lors de la prochaine frappe de touche sur le clavier d'Enigma (en passant de « V » à « W »).

- **Fonction du réflecteur**

Une fois que le signal a traversé tous les rotors, il arrive au réflecteur. Celui-ci renvoie le signal à travers les rotors dans la direction opposée, en le dirigeant vers une autre lettre de l'alphabet. Cela signifie que le courant fait un aller-retour à travers les rotors, ce qui double la complexité du chiffrement. Par exemple, si la lettre « A » est entrée, elle pourrait être codée en « C » après le passage à travers les rotors, puis être reflétée en une autre lettre, comme « D », après le retour à travers les rotors.

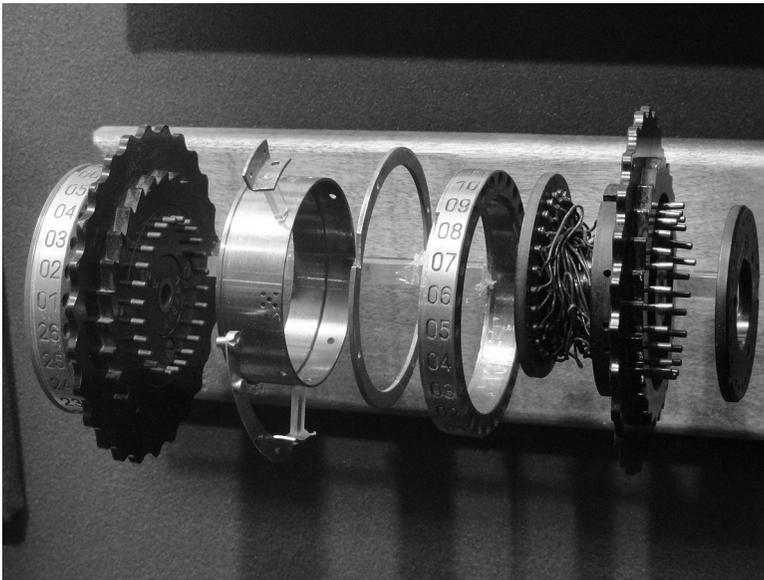
- **Caractéristiques du réflecteur**

Le réflecteur présente une faiblesse importante dans le système de chiffrement d'Enigma, car il empêche une lettre d'être codée en elle-même. C'est-à-dire qu'une lettre comme « A » ne peut jamais être codée comme « A », ce qui fut un des points faibles exploités par les cryptanalystes alliés lors de leurs tentatives de déchiffrement des messages Enigma.

- **Types de réflecteurs**

Le réflecteur B était le plus courant et largement utilisé dans la plupart des machines Enigma militaires. Le réflecteur C a été introduit plus tard et était principalement utilisé pour des communications navales spécifiques, offrant des configurations supplémentaires pour accroître la sécurité.

5-1.6 Vue éclatée d'un rotor et de ses composants



© creative commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

5-3.2 Exemple N°1 : sans connexion au tableau de connexions

On se place dans le cas où les anneaux ne créent pas de décalages (position [1,1,1]). La feuille Excel ci-dessous permet de dessiner à la main le parcours dans les différents rotors.

Au départ les rotors sont réglés sur la position [9,9,9] (ou [I,I,I]). Lorsque l'on frappe sur la lettre « V », le rotor III avance d'un cran et le chiffrement de la lettre « V » s'effectuera avec la position [9,9,10] (ou [I,I,J]). On obtient la lettre « S ».

Description du cheminement du courant dans la machine Enigma :

- 1/ Tableau de connexions (plugboard) : pas de transformation de la lettre « V »
- 2/ Rotor III : un contact s'effectue avec la lettre « J »
- 3/ Rotor II : contact avec la lettre « X »
- 4/ Rotor I : contact avec la lettre « R »
- 5/ Le passage par le Réflecteur B transforme « J » en « X »
- 6/ Rotor I : contact avec la lettre « F »
- 7/ Rotor II : contact avec la lettre « D »
- 8/ Rotor III : contact avec la lettre « D »
- 9/ Tableau de connexions : pas de transformation de la lettre « S »
- 10/ Tableau lumineux : le contact électrique s'effectue avec la lettre « S »

Réflecteur-B		Y	R	U	H	Q	S	L	D	P	X	N	G	O	K	M	I	E	B	F	Z	C	W	V	J	A	T	
		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	
I 9	ROTOR	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	
	II	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	1	2	3	4	5	6	7	8	
		I	V	Z	N	T	O	W	Y	H	X	U	S	P	A	I	B	R	C	J	E	K	M	F	L	G	D	Q
I 9	ROTOR	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	
	II	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	1	2	3	4	5	6	7	8	
		I	X	B	L	H	W	T	M	C	Q	G	Z	N	P	Y	F	V	O	E	A	J	D	K	S	I	R	U
J 10	ROTOR	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	
	III	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		I	X	V	Z	N	Y	E	I	W	G	A	K	M	U	S	Q	O	B	D	F	H	J	L	C	P	R	
TABLEAU DE CONNEXION P-G; O-T		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	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	
TABLEAU LUMINEUX		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	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	
CLAVIER DE LA MACHINE		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	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	
<table border="1"> <tr><td>I</td><td>II</td><td>III</td></tr> <tr><td>9</td><td>9</td><td>9</td></tr> <tr><td>I</td><td>I</td><td>I</td></tr> <tr><td>9</td><td>9</td><td>10</td></tr> <tr><td>I</td><td>I</td><td>J</td></tr> </table>	I	II	III	9	9	9	I	I	I	9	9	10	I	I	J	On frappe sur : V												
	I	II	III																									
	9	9	9																									
	I	I	I																									
9	9	10																										
I	I	J																										
Le circuit allume : S																												

Ces tables indiquaient les positions de départ des rotors, les réglages du plugboard (tableau de connexions) et, parfois, d'autres paramètres nécessaires pour assurer le chiffrement. Ce procédé constituait un manque de sécurité car les réglages, identiques pour tous les messages de la journée, fournissaient aux cryptanalystes des indices constants à exploiter. En étudiant plusieurs messages chiffrés avec la même configuration initiale, les cryptanalystes pouvaient ainsi déceler des schémas récurrents et affaiblir progressivement le chiffrement.

- **Problème de sécurité dû au double chiffrement des clés de message**

⇒ **Clés journalières**

Chaque opérateur recevait une table qui lui indiquait les paramètres spécifiques à utiliser chaque jour. Cependant, avant d'envoyer un message, un opérateur devait choisir arbitrairement une clé de message pour le chiffrement, correspondant à une position initiale spécifique des rotors. Le choix de cette clé de message était chiffré et indiqué en début de message, ce qui introduisait une vulnérabilité.

Extrait d'un carnet de clés journalières (carnet factice) pour le mois de janvier 1940

GEHEIM!

TRITON

JANUAR 1940

Tag	Walzenlage	Ringstellung	Steckerverbindungen	Kenngruppen
31	III IV V	08 02 09	AI BR FP HU JK LW MS NQ OT VX	NJN BYN DLK QHN
30	V IV III	25 04 09	AR BG CD EP IY JO KU MN QZ VX	ZBI QDN DWV QRX
29	I II IV	13 14 26	AT EO FY GV HM IU KQ NW PR SZ	SKC ADB QCW DUV
28	III II IV	18 25 25	AD BZ EF GO HJ IY LX PW QU ST	CBW VKI PCL YCB
27	III II I	09 09 04	BM CE DS FU GX IJ KQ LV QR TY	QLQ MIK DFO NPP
26	II I V	16 19 12	AL BS CD EU GK JO MR NV PQ WY	EMA NGH VPR EOF
25	IV I III	15 03 14	AB EP GJ HI KY LU NS OZ QT VW	ZAY TRG YDM BXF
24	V II III	12 19 06	AW BH CD EU GM IO LS NR PX TV	OVQ JYI JTK NMP
23	III IV I	14 25 12	AP CL EM FW GS IN JR KO TU XY	KIY FJP WGT TPA
22	II V IV	14 19 21	AR BT CK DX FO GN HQ JY MZ UW	NGN CGU WLJ ENG
21	I III IV	03 23 16	AY EV FZ GX IO JN KL MP QU SW	UNT SMB MDV MBX
20	II IV III	05 24 26	AM BJ CT GQ HO IX KV LP NW YZ	XAY VEJ QBX DPS
19	IV II III	12 02 11	BT CX EF HJ IY KW LR MS NQ UV	WZR IBY ONF NUD
18	III II I	16 01 11	AU BV CN DM EZ FY GP IQ JW SX	SLE ZQS TLW HGL
17	IV I V	10 21 06	AI BY CS DQ EK GT HN MX OV UW	AXC DGO KNJ PIZ
16	IV V III	17 21 19	AD BK CU EL FX IP MZ NV OS RW	UQB SXA YYS JXL
15	II III V	05 23 03	BD CQ EZ FL HU IM KZ NS OW XY	OKU EVB MDC DCI
14	IV II III	24 25 13	AZ BF CX DM GT IV JS NU QR WY	JWQ FUH HPW RSV
13	IV III II	19 12 19	AR BF CL DM EY IW OV PU QZ ST	DXL OUN HJU KZM
12	V IV III	07 22 22	AB CJ EY GQ HV IN KO MT RU SX	BUC EAL VFJ GAE
11	I II III	18 22 25	AY BR CG DT EH IJ KM LX NZ QS	CLI AFK PBW NGJ
10	IV I III	07 25 25	AB EY FR GI HO JP KU LW MS QT	VUC ESX LHB AXW
09	V IV II	17 10 15	BL CQ EZ FH GI KN MP OV RX UW	VPY EEX NLV UNQ
08	I IV III	05 13 24	AO BQ CD EJ FG IZ MR NY PT UW	PCL GRQ WNI FQO
07	IV I II	10 09 08	BZ CV DW FN GK IT JS MU OX QR	MKH BHZ VTJ LUM
06	IV V III	07 22 21	AD BN CR EI FK GT HM JO SZ YV	YUX LFT AID PXQ
05	III II IV	18 16 08	BX CT EW FH GY JZ KO LR MU NS	DBL JAY RLX EMQ
04	III II I	20 01 06	AC BQ DT EP FY HI LS MR NU VX	SWW BMB BDF BRX
03	IV I V	14 17 20	AO CF DQ EZ HR IX KL PY SV TU	OPT VNO GLS FBV
02	III II I	10 21 15	AN CR DT EP FH IJ KY OS QU WX	YZQ VJH BUC QRC
01	I IV V	10 22 11	BM CO DY EG FK HU LP NZ QR TV	LUY JFJ BVV YJJ

6- Développement d'un simulateur Enigma en langage Python

6-1. Description générale de la programmation de la machine Enigma

Pour introduire la programmation des principes de base de la machine Enigma en Python, il est essentiel de bien comprendre les composants et leur fonctionnement, puis de les traduire en éléments programmables.

6-1.1 Composants fondamentaux de la machine Enigma

La machine Enigma repose sur plusieurs éléments clés qui seront modélisés dans le programme :

- Clavier : Permet de saisir une lettre à chiffrer.
- Rotors : Les rotors transforment chaque lettre de manière à ce que le signal électrique soit redirigé selon un chemin spécifique. Chaque rotor a une configuration différente, et tourne après chaque lettre saisie.
- Réflecteur : Réfléchit le signal renvoyé par les rotors, redirigeant le flux électrique dans le sens inverse.
- Tableau de connexions (plugboard) : Permet de permuter certaines lettres avant et après leur passage dans les rotors.
- Position initiale des rotors : La position initiale des rotors change la configuration des lettres en entrée.
- Position initiale des anneaux : les anneaux déterminent comment les lettres sur les rotors sont alignées avec les contacts internes des rotors. Cette position influence comment les signaux électriques traversent les rotors.

6-1.2 Structuration du programme en Python

L'objectif est de simuler chaque composant en tant que module ou fonction pour reproduire le processus de chiffrement.

- **Création des rotors**

Les rotors peuvent être représentés par des listes ou des dictionnaires Python où chaque lettre est mappée à une autre selon une permutation spécifique. Par exemple :

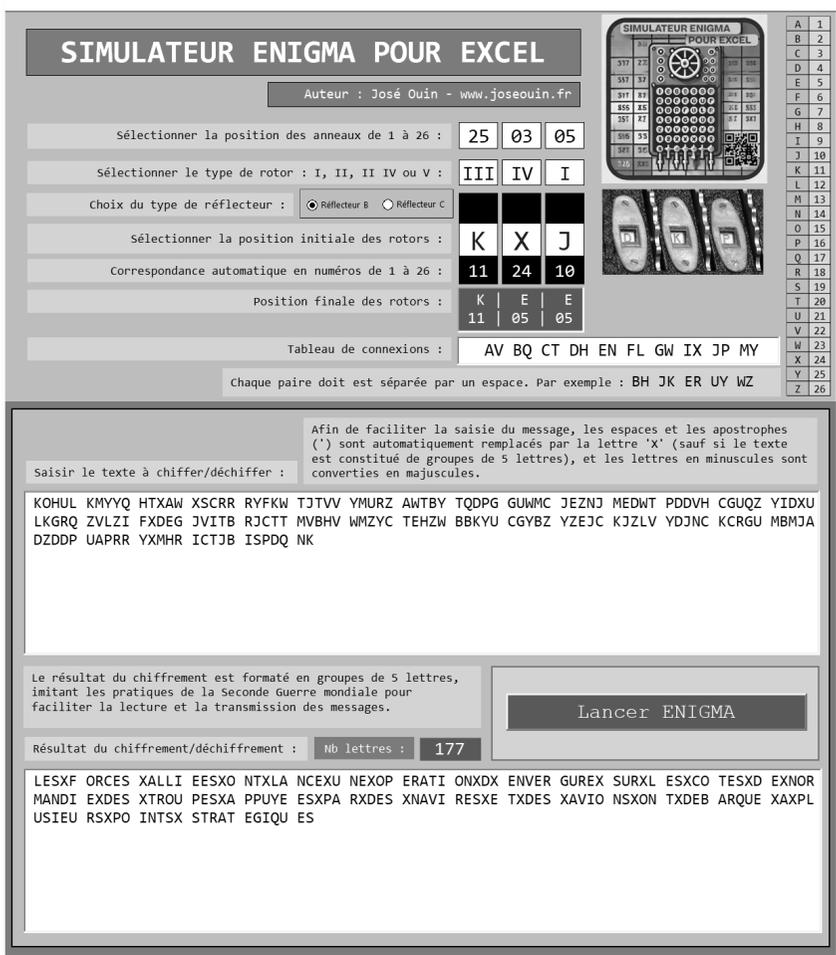
```
rotor_I = "EKMFLGDQVZNTOWYHXUSPAIBRCJ"  
rotor_II = "AJDKSIRUXBLHWTMCQGZNPYFVOE"  
rotor_III = "BDFHJLCPRTXVZNYEIWGAKMUSQO"  
rotor_IV = "ESOVZPJAYQUIRHXLNFTGKDCMWB"  
rotor_V = "VZBRGITYUPSDNHLXAWMJQOFECK"
```

7- Développement d'un simulateur Enigma en langage VBA pour Excel

7-1. Description générale de la programmation de la machine Enigma

La description générale de la programmation de la machine Enigma en langage VBA pour Excel est la même que celle du chapitre précédent sur le développement avec le langage Python.

Capture d'écran du simulateur Enigma pour Excel :



10- Outils et méthodes pour casser les codes Enigma

10-1. Introduction aux techniques de cryptanalyse utilisées par les Alliés

Les Alliés, et plus particulièrement les cryptanalystes polonais, britanniques et américains, ont développé plusieurs techniques novatrices pour casser les codes chiffrés par la machine Enigma, en s'appuyant sur des méthodes combinant analyse mathématique, ingénierie et exploitation des erreurs humaines. Voici les principales techniques qu'ils ont utilisées :

10-1.1 Le travail pionnier des cryptanalystes polonais



Marian Rejewski



Jerzy Różycki



Henryk Zygalski

 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Avant même la Seconde Guerre mondiale, les cryptanalystes polonais avaient déjà fait des percées importantes dans le déchiffrement d'Enigma. Trois cryptanalystes polonais, Marian Rejewski, Jerzy Różycki et Henryk Zygalski, ont joué un rôle crucial :

- **1/ Reconstitution des rotors :**

Marian Rejewski a réussi à recréer le fonctionnement des rotors de la machine Enigma en utilisant des mathématiques pures et des messages interceptés.

- **2/ Utilisation de la "grille cyclique" :**

Cette méthode a permis d'identifier les répétitions dans les configurations des rotors et d'en déduire leur disposition.

En 1939, avant l'invasion de la Pologne, les cryptanalystes polonais ont partagé leurs découvertes avec les Britanniques et les Français, ce qui a donné une base cruciale aux travaux ultérieurs.

12- Déchiffrer Enigma : Exercices pratiques



<https://www.nationalmuseum.af.mil/Upcoming/Photos/igsearch/enigma/>

12-1. Introduction aux exercices pratiques de déchiffrement

Dans ce chapitre, vous trouverez une série de messages chiffrés avec la machine Enigma que vous êtes invités à déchiffrer vous-même.

Pour réaliser ces déchiffrements, vous pouvez utiliser l'une des deux méthodes suivantes :

- **Le script Python ou le classeur Excel fourni dans ce livre**

Ce script Python et le classeur Excel simulent fidèlement la machine Enigma avec ses différents rotors, réflecteurs et configurations de tableau de connexions (plugboard). Vous pourrez les utiliser pour reproduire les étapes de déchiffrement et obtenir ainsi les messages en clair.

- **Un simulateur Enigma**

Comme présenté dans un chapitre précédent, il existe plusieurs simulateurs d'Enigma accessibles en ligne ou en tant que logiciels. Ces outils offrent une interface intuitive pour configurer les rotors, ajuster les anneaux, et manipuler le tableau de connexions. Ils constituent une alternative pratique au script Python et sont tout aussi efficaces pour les exercices proposés ici.

12-2. La table de clés journalières : outil essentiel pour déchiffrer les messages

La table de clés journalières est un élément fondamental utilisé par les opérateurs de la machine Enigma pour configurer chaque jour les paramètres de chiffrement et de déchiffrement. Cette table contient l'ensemble des réglages à appliquer pour les rotors, positions des anneaux, et le tableau de connexions (plugboard), et elle était partagée entre les opérateurs pour garantir que tous les messages envoyés et reçus le même jour puissent être chiffrés et déchiffrés correctement.

Chaque jour, les opérateurs sélectionnaient une nouvelle configuration basée sur cette table, garantissant que les communications resteraient sécurisées et cohérentes. Vous utiliserez donc cette table pour configurer vos outils (le script Python, le classeur Excel ou le simulateur Enigma) et ainsi déchiffrer tous les messages des exercices pratiques de ce chapitre.

Voici la table de clés journalières à utiliser pour tous les exercices (mois d'octobre 2024)

GEHEIM!

JOSEOUIN

OCTOBER 2024

Tag	Walzenlage			Ringstellung	Steckerverbindungen												Kenngruppen		
31	IV	V	III	13 07 12	AP	BG	CQ	DX	EO	FR	HJ	IZ	LY	MN	MSL	PPC	LLV	HLZ	
30	V	IV	II	17 26 14	BY	CU	DH	ES	FV	GK	IW	JR	MP	QZ	WKX	NZS	IJG	KUO	
29	I	III	II	24 18 24	AV	BR	DY	FG	HP	IL	JO	KZ	MQ	ST	WAZ	NQF	BNU	GPG	
28	I	IV	V	24 13 13	AU	CM	EV	FX	JP	LR	NS	OZ	QT	WY	ZNX	QXE	TWH	EWP	
27	V	III	IV	07 10 04	CF	DS	ET	GV	HW	IL	JY	NU	OQ	RZ	CPX	OBM	INW	QNH	
26	V	III	IV	17 02 19	AH	BJ	CY	DK	EO	FX	GI	MU	PR	SZ	JIC	SIN	OMU	WLL	
25	I	IV	III	18 13 11	BF	CE	DR	GL	IJ	MO	NU	PX	TZ	VY	FXH	AAO	MPC	XRG	
24	IV	II	I	10 07 19	CO	DW	GU	HS	JL	KT	NZ	PV	QX	RY	IZO	SQV	WTZ	UKB	
23	III	I	V	05 09 14	BG	CO	DN	EH	FL	IV	KW	PU	RX	YZ	OTY	VDZ	RVT	KYW	
22	III	II	IV	14 18 20	AB	CM	DT	EO	FH	GL	JR	KP	NY	SZ	RCI	YXU	GHV	OWA	
21	II	V	IV	05 08 12	AK	BN	CT	DP	EZ	HL	MQ	RW	SY	UV	SWC	TFO	REY	XLU	
20	III	IV	V	04 19 21	BU	DF	EK	GV	HQ	IZ	JO	NR	PW	TY	WCL	HKP	DXT	GLO	
19	I	II	III	21 07 22	CW	DJ	EY	FG	HK	IO	LU	MV	NX	TZ	GQK	QAO	ZBK	UQI	
18	I	II	III	16 08 26	AL	BW	CQ	EN	FU	GT	JX	KZ	RV	SY	MZV	TGX	VJW	PJL	
17	V	II	I	05 02 09	AF	BD	EU	GI	HY	JS	MR	NQ	PX	WZ	SAQ	RKR	RSH	LJY	
16	V	II	IV	23 25 22	AJ	BF	DH	EZ	GM	OY	PV	QT	RX	SW	ILI	LTC	VDO	JCA	
15	IV	I	III	26 07 05	AD	BC	EX	FI	GL	HP	JN	KR	QV	SW	OAI	TAJ	GKD	IUT	
14	III	II	I	21 15 08	BE	DY	FJ	GK	HT	LO	MN	PR	QX	UV	SEK	WEN	JER	XVZ	
13	I	III	IV	23 20 09	CW	EY	FM	HQ	IL	JZ	NS	OV	PX	TU	BUA	ZNM	YMQ	UHY	
12	V	III	IV	12 12 17	CM	DK	EG	FP	HZ	IU	JN	LS	QW	VY	MWH	SBF	OJA	XUU	
11	IV	I	II	16 16 04	BM	CU	DZ	FI	GH	JW	KO	QV	RY	SX	FRP	LDO	DOY	AKZ	
10	I	V	IV	18 25 13	AG	BR	CX	DI	ES	FL	HK	NY	QU	VZ	MLZ	SDH	BRB	KMM	
09	IV	I	II	25 15 21	CN	DZ	ER	FJ	GI	HU	KS	LP	MT	XY	ZXG	PHE	FRO	EAG	
08	I	II	III	14 08 08	AZ	BU	EY	FK	GM	IJ	NW	OR	PQ	TX	OAJ	ENZ	CJI	UDB	
07	V	II	I	10 22 09	BN	CR	DW	FL	GO	IZ	JQ	KU	MV	ST	QZN	YQF	KWP	MMI	
06	III	V	I	25 03 05	AV	BQ	CT	DH	EN	FL	GW	IX	JP	MY	VJL	LFG	EIN	WXL	
05	II	I	IV	25 17 24	AJ	BI	CS	DU	FN	KO	LM	PQ	TY	VW	ROX	HSB	HBW	CMK	
04	I	V	III	13 17 03	AT	BH	ES	GX	IY	JN	MZ	OP	QW	RV	YLO	PUB	RUA	IOP	
03	IV	III	II	12 03 09	AE	BY	CO	DH	GI	JP	LU	NQ	RZ	TW	EDD	RRS	JDC	DGM	
02	III	IV	II	04 13 17	BN	CW	DH	EL	FP	GI	JQ	KM	SY	ZV	YYT	APH	YVF	TAP	
01	V	I	IV	07 06 11	AR	BU	CS	DH	EV	FX	GO	IY	LN	MZ	KFS	ZAP	AZM	WJQ	

14- Téléchargement des ressources de cet ouvrage

L'archive « zip » disponible en téléchargement contient le classeur Excel simulant la machine Enigma ainsi que le programme Python de simulation de cet ouvrage.

Pour télécharger les ressources de cet ouvrage, merci de suivre les différentes étapes suivantes :

- Rendez-vous sur le site www.joseouin.fr ;
- Dans le menu, cliquez sur l'onglet « Publications », puis sélectionnez cet ouvrage pour ouvrir la page dédiée.
- Suivez les instructions de téléchargement affichées sur cette page dédiée.



Important : pour finaliser le téléchargement, vous devrez saisir l'un des codes de téléchargement indiqués dans le tableau de la page suivante.

Ressources complémentaires sur YouTube :

Des ressources complémentaires sont disponibles sur ma chaîne YouTube « Mathématiques Magiques », dans la playlist intitulée « Enigma ».

Playlist « Enigma » sur la chaîne Mathématiques Magiques

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLqWU5M-XIbA9tHAM0d6evdYnHcHiGWWTx>



Lien : <https://www.youtube.com/c/MathematiquesMagiques>

156 . Enigma : Histoire, fonctionnement et programmation en Python et en VBA pour Excel

Cet ouvrage a été achevé en novembre 2024

Dépôt légal : novembre 2024

Déposé auprès de la BnF (Bibliothèque Nationale de France)