

## Table of contents

<b>Document de Révision : Cryptographie Quantique et Post-Quantique</b>	<b>3</b>
Introduction générale . . . . .	3
Contexte de la cryptographie quantique . . . . .	3
Ordinateur classique vs Ordinateur quantique . . . . .	3
Ordinateurs classiques . . . . .	3
Ordinateurs quantiques . . . . .	4
Différence principale . . . . .	4
Défis de l'informatique quantique . . . . .	4
Défi 1 : Effondrement (Collapsing) . . . . .	4
Défi 2 : Sensibilité environnementale . . . . .	5
Défi 3 : Portes logiques . . . . .	5
Défi 4 : Translation d'algorithmes . . . . .	5
Dangers pour la cryptographie actuelle . . . . .	5
Algorithmes asymétriques actuels . . . . .	5
Menace quantique : Algorithme de Shor . . . . .	6
Impact sur AES . . . . .	6
Nécessité de solutions post-quantiques . . . . .	6
Notations mathématiques . . . . .	7
Ensembles de base . . . . .	7
Normes et “petits” polynômes . . . . .	7
Learning Without Errors (LWE) . . . . .	8
Configuration du problème . . . . .	8
Problème LWE (sans erreurs) . . . . .	8
Learning With Errors (LWE) . . . . .	8
Ajout d'erreurs aléatoires . . . . .	8
Problème LWE (avec erreurs) . . . . .	8
Module Learning With Errors (MLWE) . . . . .	9
Problème MLWE . . . . .	9
Decision Module Learning With Errors (D-MLWE) . . . . .	9
Problème D-MLWE . . . . .	9
Propriétés de D-MLWE . . . . .	9
Comparaison MLWE vs D-MLWE . . . . .	10
Réseaux euclidiens (Lattices) . . . . .	10
Définition d'un réseau . . . . .	10
Problèmes classiques sur les réseaux . . . . .	10
Complexité des problèmes de réseaux . . . . .	11
Lien avec MLWE et D-MLWE . . . . .	11
CRYSTALS-Kyber : Vue d'ensemble . . . . .	11
Qu'est-ce que Kyber-KEM ? . . . . .	11
Composantes de Kyber . . . . .	12

Kyber-PKE (Public Key Encryption) . . . . .	12
Espace de texte clair . . . . .	12
Propriété importante . . . . .	13
Schéma général . . . . .	13
Kyber-KEM : Mécanisme complet . . . . .	13
Fonctions de hachage utilisées . . . . .	13
Structure de Kyber-KEM . . . . .	14
Propriétés de sécurité . . . . .	14
Paramètres de Kyber . . . . .	15
Fonctions de hachage . . . . .	15
Tailles de paramètres . . . . .	15
Sécurité de Kyber-KEM . . . . .	15
Base de la sécurité . . . . .	15
Propriétés des réseaux . . . . .	16
Attaques d'implémentation . . . . .	16
Considérations pratiques . . . . .	16
Crypto-agilité (Crypto-agility) . . . . .	17
Définition . . . . .	17
Objectifs d'un système crypto-agile . . . . .	17
Importance pour la transition post-quantique . . . . .	17
Recommandations NIST . . . . .	17
Approche hybride . . . . .	17
Conclusion sur la crypto-agilité . . . . .	18
Exemple jouet de Kyber-KEM . . . . .	18
Avertissement . . . . .	18
Étape 0 : Anneau jouet et représentation . . . . .	18
Étape 1 : Génération de clés (Récepteur) . . . . .	19
Étape 2 : Encapsulation de clé (Émetteur) - Partie 1 . . . . .	19
Étape 2 : Encapsulation de clé (Émetteur) - Partie 2 . . . . .	19
Étape 3 : Décapsulation de clé (Récepteur) . . . . .	19
Relation avec le vrai Kyber-KEM . . . . .	20
Flux complet de Kyber-KEM . . . . .	22
Vue d'ensemble du protocole . . . . .	22
Garanties de sécurité . . . . .	23
Avantages et limitations de Kyber . . . . .	23
Avantages . . . . .	23
Limitations et défis . . . . .	23
Comparaison avec d'autres approches post-quantiques . . . . .	24
Familles de cryptographie post-quantique . . . . .	24
Pourquoi Kyber ? . . . . .	25
Concepts mathématiques à maîtriser . . . . .	25
Algèbre . . . . .	25
Théorie des réseaux . . . . .	25

Cryptographie . . . . .	26
Problèmes de difficulté . . . . .	26
Questions d'examen types . . . . .	26
Questions conceptuelles . . . . .	26
Questions techniques . . . . .	27
Questions pratiques . . . . .	27
Recommandations pratiques . . . . .	28
Pour la transition post-quantique . . . . .	28
Pour l'implémentation de Kyber . . . . .	28
Conclusion générale . . . . .	29
Résumé des points clés . . . . .	29
Perspectives futures . . . . .	29
Glossaire des termes importants . . . . .	30

## **Document de Révision : Cryptographie Quantique et Post-Quantique**

---

### **Introduction générale**

#### **Contexte de la cryptographie quantique**

Ce cours aborde les **défis posés par l'informatique quantique** à la cryptographie actuelle et les **solutions post-quantiques** développées pour y faire face, en particulier l'algorithme **CRYSTALS-Kyber**.

#### **Problématique centrale :**

L'avènement des ordinateurs quantiques menace de briser la sécurité des systèmes cryptographiques actuels, nécessitant une transition vers des algorithmes **résistants aux attaques quantiques**.

---

### **Ordinateur classique vs Ordinateur quantique**

#### **Ordinateurs classiques**

##### **Unité de base d'information : Bit**

- Valeurs possibles : **0 ou 1**

- Nombre **fini** d'états
- États distingués par des états **électriques/magnétiques** dans le matériel
- Opérations effectuées via des **portes logiques**

## Ordinateurs quantiques

### Unité fondamentale d'information : Qubit

Un **qubit** est un petit système quantique avec des propriétés spéciales

#### Propriété 1 : Superposition

- Peut exister dans un **nombre infini d'états** (superposition de ses états de base)
- Lors de la **mesure** → le qubit **s'effondre** (décohérence)

#### Propriété 2 : Intrication (Entanglement)

Système de  $n$  qubits :  $n$  qubits intriqués avec  $2^n$  états de base

#### Implications fondamentales :

- Le nombre d'états de base croît **exponentiellement** :  $2^n$
- Opère sur **tous les états de base simultanément** → “**parallélisme naturel**”

## Différence principale

**Point clé** : La différence principale entre informatique classique et quantique réside dans la **représentation de l'information**

#### Informatique quantique :

- S'inspire du **comportement des particules quantiques**
  - Nécessite un **ordinateur quantique** réel (pas de simulation classique efficace)
- 

## Défis de l'informatique quantique

### Défi 1 : Effondrement (Collapsing)

**Problème** : Le qubit perd sa propriété de **superposition** lors de la mesure

**Conséquence** : Les mesures doivent être soigneusement planifiées dans les algorithmes

## **Défi 2 : Sensibilité environnementale**

**Problème :** Grande **sensibilité** du système quantique à son environnement

**Conséquence :** Nécessite une **infrastructure** très particulière (températures extrêmes, isolation)

## **Défi 3 : Portes logiques**

**Distinction importante :**

- **Portes quantiques logiques** (théoriques)
- **Portes quantiques physiques** (implémentation réelle)

**Impact :** Influence sur les **performances** des circuits quantiques

## **Défi 4 : Translation d'algorithmes**

**Exemple :** AES (Advanced Encryption Standard)

La translation directe n'est **pas faisable**

**Solution unique :** Développer des **algorithmes appropriés** → nouveau paradigme

**Conclusion :** Beaucoup de questions non résolues dans le domaine

---

## **Dangers pour la cryptographie actuelle**

### **Algorithmes asymétriques actuels**

Sécurité basée sur des problèmes mathématiques difficiles pour ordinateurs classiques :

- **Factorisation** des grands nombres (RSA)
- **Logarithmes discrets**
- **Problème de Diffie-Hellman**

## **Menace quantique : Algorithme de Shor**

**Problème majeur :** Ces problèmes sont résolus en **temps polynomial** par l'**algorithme de Shor** sur un ordinateur quantique

**Systèmes affectés :**

- Chiffrement/déchiffrement
- Signatures numériques
- Authentification
- Établissement de clés (key establishment)

**Protocoles menacés :**

- **HTTPS**
- **TLS**
- Et beaucoup d'autres

**“Apocalypse quantique” :** L’Internet tel que nous le connaissons aujourd’hui n’existerait plus

## **Impact sur AES**

**AES vs Algorithme de Grover :**

L’algorithme de Grover menace AES mais de manière moins dramatique

**Solution :** Doubler la taille des clés suffit pour maintenir la sécurité

## **Nécessité de solutions post-quantiques**

**Conclusion :** Besoin de **solutions post-quantiques** basées sur des problèmes mathématiques plus difficiles

---

## Notations mathématiques

### Ensembles de base

#### 1. Entiers modulo q :

$$\mathbb{Z}_q = \{0, 1, 2, \dots, q - 1\}$$

L'ensemble des entiers modulo  $q$

#### 2. Polynômes à coefficients dans $\mathbb{Z}_q$ :

Pour  $q$  premier :  $\mathbb{Z}_q[X]$  est l'ensemble des polynômes avec coefficients dans  $\mathbb{Z}_q$

Note importante : Le degré n'est pas borné

#### 3. Anneau de polynômes (Polynomial ring) :

Pour un entier positif  $n$  :

$$R_q = \mathbb{Z}_q[X]/(X^n + 1)$$

C'est l'anneau des polynômes modulo  $(X^n + 1)$

#### 4. Module :

Pour un entier positif  $k$  :

$$R_q^k$$

Un module de rang  $k$  sur  $R_q$

### Normes et “petits” polynômes

#### 5. Norme infinie :

On peut définir la notion de “taille” ou **norme infinie** sur tous ces ensembles

#### 6. “Petits” polynômes :

Polynômes avec des coefficients de petite magnitude (proches de 0)

Ces polynômes jouent un rôle crucial dans la sécurité de Kyber

## **Learning Without Errors (LWE)**

### **Configuration du problème**

**Situation :**

Alice possède un **vecteur secret**  $s$  (d'entiers)

**Information publique :**

Ensemble d'équations avec **coefficients entiers** auxquelles  $s$  est solution

### **Problème LWE (sans erreurs)**

**Objectif :** Trouver  $s$  à partir de ces équations

**Méthode :** Utiliser l'**élimination de Gauss**

**Conclusion :** Facile à résoudre → Ne fournit **aucune sécurité**

---

## **Learning With Errors (LWE)**

### **Ajout d'erreurs aléatoires**

**Pour rendre le problème plus difficile :**

Ajouter une **erreur aléatoire** (proche de zéro) au **membre de droite** des équations

### **Problème LWE (avec erreurs)**

**Objectif :** Trouver  $s$  à partir des équations **avec erreurs ajoutées**

**Difficulté :**

Un système **surdéterminé** d'équations rempli d'erreurs n'a presque certainement **pas de solution** (au sens traditionnel)

**Conclusion :** Maintenant  $s$  est vraiment un **secret**

**Note pratique :** Généralement, les opérations sont effectuées **modulo un grand nombre**

---

## Module Learning With Errors (MLWE)

### Problème MLWE

Caractéristiques :

- Extension de LWE aux **modules** sur les anneaux de polynômes
- Travaille avec  $R_q^k$  au lieu de vecteurs d'entiers

Propriété fondamentale :

Aucun algorithme efficace n'est connu pour résoudre MLWE

Type de problème :

MLWE est un **problème de recherche** (search problem) : trouver  $s$

---

## Decision Module Learning With Errors (D-MLWE)

### Problème D-MLWE

Mêmes paramètres que MLWE mais :

Une instance de D-MLWE est donnée par une paire  $(A, t)$

Question à résoudre :

Déterminer si  $(A, t)$  est :

- Une instance **valide** de MLWE (où  $t$  dépend d'un secret  $s$ )
- Ou simplement une paire **aléatoire**

### Propriétés de D-MLWE

Difficulté :

Si D-MLWE est difficile  $\rightarrow (A, t)$  ne donne **aucune information** sur  $s$

Aucun algorithme efficace connu pour D-MLWE

Type de problème :

D-MLWE est un **problème de décision** (decision problem)

## Comparaison MLWE vs D-MLWE

Aspect	MLWE	D-MLWE
Type	Problème de recherche	Problème de décision
Objectif	Trouver $s$	Distinguer instance valide d'aleatoire
Utilisation	Construction de clés	Preuves de sécurité

## Réseaux euclidiens (Lattices)

### Définition d'un réseau

**Réseau (Lattice) :**

Ensemble de toutes les **combinaisons linéaires entières** de  $n$  vecteurs **linéairement indépendants** dans  $\mathbb{R}^n$  (la base)

**Notation mathématique :**

Si  $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$  est la base, le réseau est :

$$\mathcal{L} = \left\{ \sum_{i=1}^n z_i b_i \mid z_i \in \mathbb{Z} \right\}$$

### Problèmes classiques sur les réseaux

**Closest Vector Problem (CVP) :**

Étant donné un point  $x$  dans  $\mathbb{R}^n$ , trouver le vecteur du réseau **le plus proche** de  $x$

**Shortest Vector Problem (SVP) :**

Trouver un vecteur **non nul** dans le réseau avec **norme euclidienne minimale**

SVP est un **cas particulier** de CVP pour  $x = 0$

## **Complexité des problèmes de réseaux**

**Propriétés importantes :**

- La plupart des problèmes de réseaux sont **NP-difficiles**
- Ils sont **difficiles en moyenne** (average-case hard)

**Différence avec d'autres problèmes NP :**

Beaucoup de problèmes NP sont faciles “en moyenne” mais difficiles seulement dans le pire cas.  
Les problèmes de réseaux sont difficiles **même en moyenne**.

## **Lien avec MLWE et D-MLWE**

**Reformulation :**

MLWE et D-MLWE peuvent être **reformulés comme problèmes de réseaux**

**Difficulté moyenne :**

La difficulté moyenne est **au moins celle** de la difficulté quantique du pire cas de certains problèmes de réseaux

**Intérêt pratique :**

Ceci est très intéressant pour **évaluer la difficulté** de MLWE et D-MLWE car :

- Les problèmes de réseaux sont bien étudiés
- Leur difficulté est bien comprise
- Même avec un ordinateur quantique, ils restent difficiles

---

## **CRYSTALS-Kyber : Vue d'ensemble**

**Qu'est-ce que Kyber-KEM ?**

Kyber-KEM est un **KEM** (Key Encapsulation Mechanism) **IND-CCA2-secure**

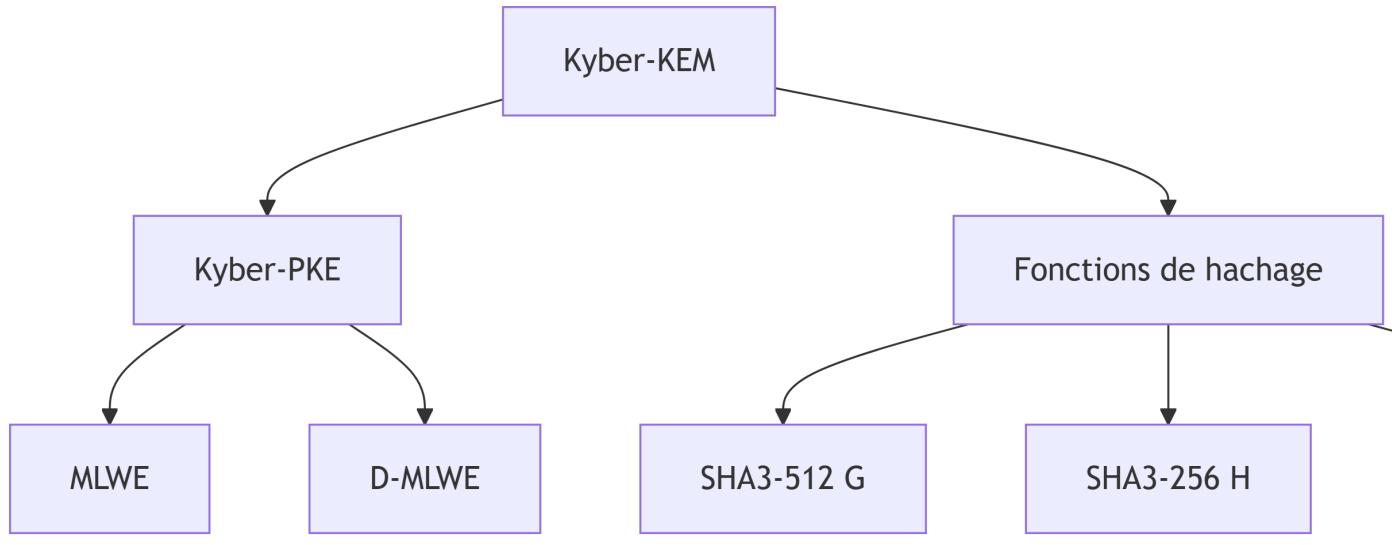
**Caractéristiques principales :**

- **Système cryptographique asymétrique**
- Sécurité basée sur la difficulté des problèmes **MLWE** et **D-MLWE**
- Travaille avec :
  - Anneau de polynômes  $R_q$

- Module  $R_q^k$
- Polynômes “petits”
- Cryptosystème **basé sur les réseaux** (lattice-based)

### Composantes de Kyber

Structure en couches :



### Kyber-PKE (Public Key Encryption)

**Espace de texte clair**

**Plaintext space :**

$$\{0, 1\}^n \subset R_q$$

Les messages sont des **polynômes** dans  $R_q$  représentant des bits

## **Propriété importante**

**Le déchiffrement peut échouer** (avec une **petite probabilité**)

**Raison :** Les erreurs ajoutées peuvent parfois être trop grandes

**Gestion pratique :**

Cette probabilité d'échec est rendue **négligeable** par le choix approprié des paramètres

## **Schéma général**

**Kyber-PKE** est le cœur cryptographique utilisé par Kyber-KEM

Il fournit les opérations de base :

- **Génération de clés** (KeyGen)
  - **Chiffrement** (Encrypt)
  - **Déchiffrement** (Decrypt)
- 

## **Kyber-KEM : Mécanisme complet**

### **Fonctions de hachage utilisées**

Trois fonctions de hachage cryptographiques :

- **G** : SHA3-512
- **H** : SHA3-256
- **J** : SHAKE256

Ces fonctions assurent différentes propriétés de sécurité et permettent de dériver des clés

## **Structure de Kyber-KEM**

**Opérations principales :**

**1. KeyGen (Génération de clés) :**

Génère une paire de clés publique/privée

**2. Encapsulation :**

- Entrée : Clé publique
- Sortie :
  - Texte chiffré (ciphertext)
  - Clé partagée (shared secret)

**3. Decapsulation :**

- Entrée : Clé privée + texte chiffré
- Sortie : Clé partagée

## **Propriétés de sécurité**

**Plaintext awareness IND-CCA**

La **conscience du texte clair** (plaintext awareness) implique la sécurité **IND-CCA** (Indistinguishability under Chosen Ciphertext Attack)

**La décapsulation peut échouer** même si honnête (petite probabilité)

**Gestion :**

Les paramètres sont choisis pour rendre cette probabilité **négligeable**

---

---

Fonction	Algorithme	Usage
----------	------------	-------

---

## Paramètres de Kyber

### Fonctions de hachage

Récapitulatif des fonctions :

---

Fonction	Algorithme	Usage
<b>G</b>	SHA3-512	Dérivation de clés longues
<b>H</b>	SHA3-256	Hachage standard
<b>J</b>	SHAKE256	Fonction XOF (extensible)

---

### Tailles de paramètres

Kyber propose plusieurs niveaux de sécurité :

Les paramètres varient selon le niveau souhaité, notamment :

- $k$  : rang du module (typiquement 2, 3 ou 4)
- $n$  : degré des polynômes
- $q$  : modulo pour les coefficients

**Compromis :** Plus  $k$  est grand, plus la sécurité est élevée mais plus les clés et calculs sont grands

---

## Sécurité de Kyber-KEM

### Base de la sécurité

Sécurité IND-CCA sous l'hypothèse :

D-MLWE est **intraitable** (computationally hard)

### Choix des distributions :

Les distributions d'erreurs sont choisies pour être “**aussi difficiles que**” certains problèmes de réseaux

## **Propriétés des réseaux**

Réseaux euclidiens sont :

- **NP-difficiles**
- **Difficiles en moyenne** (average-case hard)

Ceci fournit une **base solide** pour la sécurité à long terme

## **Attaques d'implémentation**

Préoccupations pratiques :

**Attaques par canaux auxiliaires (side-channel attacks) :**

- Analyse de la consommation électrique
- Analyse temporelle
- Analyse électromagnétique

**Attaques par injection de fautes (fault attacks) :**

- Perturbation délibérée du calcul
- Observation du comportement erroné

**Défis :**

- Difficile à prévoir toutes les attaques
- Nouvelles techniques d'attaque en développement
- **Soyez prudent** car les algorithmes sont nouveaux

## **Considérations pratiques**

Points importants :

1. La sécurité théorique est bien fondée
  2. L'implémentation pratique nécessite des **contre-mesures**
  3. Évaluation continue de la sécurité nécessaire
-

## Crypto-agilité (Crypto-agility)

### Définition

**Crypto-agilité :**

Capacité de basculer entre différentes primitives cryptographiques facilement

### Objectifs d'un système crypto-agile

Permettre :

- **Adaptations rapides** de nouveaux algorithmes sans perturber l'infrastructure
- Sécurité en cas de primitives **cassées/vulnérables**
- Transition en douceur vers de nouvelles solutions

### Importance pour la transition post-quantique

Pourquoi est-ce crucial ?

Se préparer à l'avènement d'un ordinateur quantique consistera en une **migration massive** (probablement la **plus grande de l'histoire**)

### Recommandations NIST

Conseil du NIST :

**Ne pas abandonner** les algorithmes classiques

Pourquoi ?

1. **Transition plus douce** + optimisations actuelles conservées
2. **Nouvelles mathématiques** : sécurité empirique, pas encore complètement testée
3. **Incertitude temporelle** : on ne sait pas quand un ordinateur quantique sera réalisé

### Approche hybride

Solution recommandée :

**Combiner** algorithmes classiques et post-quantiques :

- Sécurité garantie si **au moins un** des deux est sûr
- Transition progressive possible
- Flexibilité selon les applications

## **Conclusion sur la crypto-agilité**

**Considérer des systèmes crypto-agiles est très important** pour :

- Permettre une **transition en douceur** vers le post-quantique
  - Concevoir des systèmes **flexibles** proposant :
    - Différentes primitives
    - Différents niveaux de sécurité
    - Adaptation selon l'application
- 

## **Exemple jouet de Kyber-KEM**

### **Avertissement**

**Important :**

Les paramètres sont **minuscules** et pour **illustration uniquement**

Ils ne sont **PAS cryptographiquement sûrs**

**Objectif :** Comprendre les calculs derrière Kyber-KEM sans se perdre dans les grands nombres

### **Étape 0 : Anneau jouet et représentation**

**Définition de l'anneau jouet :**

Petit anneau de polynômes avec paramètres réduits pour faciliter les calculs à la main

**Exemple :**

- $n$  très petit (par ex.  $n = 4$ )
- $q$  petit (par ex.  $q = 17$ )
- $R_q = \mathbb{Z}_q[X]/(X^n + 1)$

## Étape 1 : Génération de clés (Récepteur)

Le récepteur génère :

- **Clé secrète** : vecteur/polynôme secret  $s$  avec petits coefficients
- **Clé publique** : paire  $(A, t)$  où :
  - $A$  est une matrice/vecteur aléatoire publique
  - $t = As + e$  où  $e$  est une petite erreur

La sécurité repose sur la difficulté de retrouver  $s$  à partir de  $(A, t)$

## Étape 2 : Encapsulation de clé (Émetteur) - Partie 1

L'émetteur :

1. Choisit un message aléatoire  $m$  (qui deviendra la clé partagée)
2. Choisit un vecteur aléatoire court  $r$  et des erreurs  $e_1, e_2$

## Étape 2 : Encapsulation de clé (Émetteur) - Partie 2

L'émetteur calcule :

- $u = A^T r + e_1$  : première partie du chiffré
- $v = t^T r + e_2 + \text{encode}(m)$  : seconde partie du chiffré

Sortie :

- **Ciphertext** :  $(u, v)$
- **Clé partagée** : dérivée de  $m$  via fonction de hachage

## Étape 3 : Décapsulation de clé (Récepteur)

Le récepteur :

1. Calcule  $v - s^T u$
2. Remarque que :

$$v - s^T u = t^T r + e_2 + \text{encode}(m) - s^T (A^T r + e_1)$$

$$= (As + e)^T r + e_2 + \text{encode}(m) - s^T A^T r - s^T e_1$$

$$= \text{encode}(m) + (\text{petites erreurs})$$

3. **Décode** pour retrouver  $m$  (si les erreurs sont assez petites)
4. Dérive la **clé partagée** de  $m$

### **Relation avec le vrai Kyber-KEM**

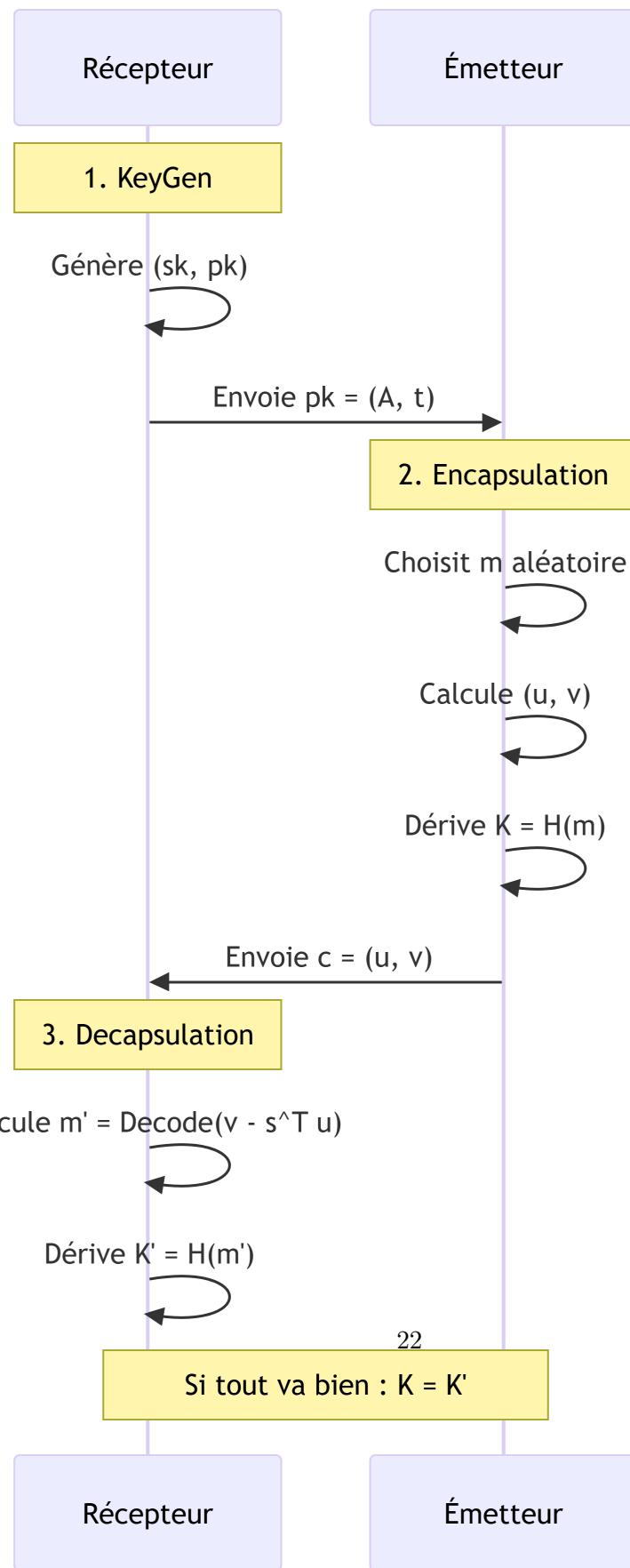
**Dans le vrai Kyber :**

- Les polynômes vivent dans un anneau **beaucoup plus grand**
  - Il y a des **vecteurs de polynômes** (module de rang  $k = 2, 3$  ou  $4$ )
  - Des **termes de bruit** petits sont ajoutés
  - La structure globale suit le **même schéma** :
    - Clé publique de style **module-LWE** :  $(A, t)$
    - Étape d'**encapsulation** utilisant un court  $r$
    - Étape de **décapsulation** qui annule le terme principal et récupère le message (modulo petit bruit)
-



## Flux complet de Kyber-KEM

### Vue d'ensemble du protocole



## **Garanties de sécurité**

**Si D-MLWE est difficile :**

1. Un adversaire ne peut pas distinguer  $(A, t)$  d' aléatoire
2. Un adversaire ne peut pas retrouver  $s$  de  $(A, t)$
3. Un adversaire ne peut pas retrouver  $m$  de  $(u, v)$  sans  $s$
4. La clé partagée  $K$  est indistinguable d'une clé aléatoire

**Résultat :** Sécurité **IND-CCA2** (la plus forte notion de sécurité pour KEM)

---

## **Avantages et limitations de Kyber**

### **Avantages**

**Sécurité post-quantique :**

Résistant aux attaques d'ordinateurs quantiques

**Performances :**

- Clés relativement petites
- Calculs efficaces
- Peut être implémenté sur matériel limité

**Fondements mathématiques solides :**

Basé sur problèmes de réseaux bien étudiés

**Standardisation :**

Sélectionné par le NIST pour standardisation

### **Limitations et défis**

**Tailles de clés :**

Plus grandes que RSA/ECC classiques (mais acceptables)

**Nouveauté :**

- Moins de temps pour analyse cryptanalytique
- Implémentations peuvent avoir des vulnérabilités

### **Attaques d'implémentation :**

Nécessite des contre-mesures spécifiques

### **Probabilité d'échec :**

Très faible mais non nulle (contrairement aux schémas classiques)

---

## **Comparaison avec d'autres approches post-quantiques**

### **Familles de cryptographie post-quantique**

#### **1. Basés sur les réseaux (Lattice-based) :**

- **Kyber** (KEM)
- Dilithium (signatures)
- **Avantages** : Efficaces, bien étudiés
- **Kyber appartient à cette famille**

#### **2. Basés sur les codes (Code-based) :**

- Classic McEliece
- **Avantages** : Très mature
- **Inconvénients** : Très grandes clés

#### **3. Basés sur les hash (Hash-based) :**

- SPHINCS+
- **Avantages** : Sécurité minimale bien comprise
- **Inconvénients** : Signatures volumineuses

#### **4. Basés sur les isogénies (Isogeny-based) :**

- SIKE (cassé en 2022)
- **Inconvénients** : Moins mature, vulnérabilités découvertes

## **Pourquoi Kyber ?**

**Kyber a été choisi par le NIST pour :**

- Bon équilibre **performance/sécurité**
  - Flexibilité (plusieurs niveaux de sécurité)
  - Implémentations efficaces possibles
  - Fondements mathématiques robustes
- 

## **Concepts mathématiques à maîtriser**

### **Algèbre**

**Structures algébriques :**

- Anneaux de polynômes
- Modules
- Opérations modulo

**Polynômes :**

- Addition, multiplication de polynômes
- Réduction modulo  $X^n + 1$
- Coefficients modulo  $q$

### **Théorie des réseaux**

**Concepts fondamentaux :**

- Base d'un réseau
- Combinaisons linéaires entières
- SVP et CVP
- Difficulté NP et average-case

## **Cryptographie**

**Primitives :**

- KEM (Key Encapsulation Mechanism)
- PKE (Public Key Encryption)
- Sécurité IND-CCA2

**Fonctions de hachage :**

- SHA3-256, SHA3-512
- SHAKE256 (XOF)

## **Problèmes de difficulté**

**LWE et variantes :**

- Learning With Errors
  - Module-LWE
  - Decision-MLWE
  - Lien avec les réseaux
- 

## **Questions d'examen types**

### **Questions conceptuelles**

**Ordinateurs quantiques :**

- Différence entre bit et qubit
- Qu'est-ce que la superposition ?
- Qu'est-ce que l'intrication ?
- Quels sont les défis de l'informatique quantique ?

**Menaces :**

- Pourquoi les ordinateurs quantiques menacent-ils la cryptographie actuelle ?
- Qu'est-ce que l'algorithme de Shor ?
- Quels systèmes sont affectés ?

**Solutions post-quantiques :**

- Qu'est-ce que la cryptographie post-quantique ?
- Pourquoi les réseaux sont-ils intéressants ?
- Qu'est-ce que CRYSTALS-Kyber ?

## **Questions techniques**

### **LWE et MLWE :**

- Différence entre LWE et Learning Without Errors
- Qu'est-ce que MLWE ?
- Différence entre MLWE (search) et D-MLWE (decision)

### **Réseaux :**

- Définir un réseau euclidien
- Qu'est-ce que SVP et CVP ?
- Pourquoi sont-ils NP-difficiles ?

### **Kyber :**

- Structure de Kyber-KEM
- Rôle de Kyber-PKE
- Fonctions de hachage utilisées

## **Questions pratiques**

### **Sécurité :**

- Sur quoi repose la sécurité de Kyber ?
- Qu'est-ce que IND-CCA2 ?
- Quelles sont les attaques d'implémentation possibles ?

### **Crypto-agilité :**

- Pourquoi est-elle importante ?
- Recommandations du NIST
- Approche hybride classique/post-quantique

### **Exemple jouet :**

- Expliquer les étapes de KeyGen, Encapsulation, Decapsulation
- Pourquoi le déchiffrement peut-il échouer ?
- Comment récupère-t-on le message ?

## **Recommandations pratiques**

### **Pour la transition post-quantique**

#### **1. Inventaire :**

Identifier tous les systèmes utilisant la cryptographie asymétrique

#### **2. Priorisation :**

Prioriser les systèmes critiques pour la migration

#### **3. Crypto-agilité :**

Concevoir les systèmes pour permettre le changement d'algorithmes

#### **4. Approche hybride :**

Combiner algorithmes classiques et post-quantiques pendant la transition

#### **5. Tests :**

Tester les implémentations contre les attaques d'implémentation

### **Pour l'implémentation de Kyber**

#### **Sécurité :**

- Implémenter des **contre-mesures** contre les canaux auxiliaires
- Utiliser des **générateurs aléatoires cryptographiques** de qualité
- Valider tous les **paramètres** en entrée

#### **Performance :**

- Optimiser les opérations sur polynômes
- Utiliser des implémentations vectorisées si possible
- Considérer l'utilisation de matériel dédié

#### **Conformité :**

- Suivre les **spécifications NIST**
  - Utiliser des implémentations **certifiées** si possible
  - Rester à jour avec les recommandations
-

## **Conclusion générale**

### **Résumé des points clés**

#### **Menace quantique :**

Les ordinateurs quantiques menacent la cryptographie actuelle basée sur factorisation et logarithmes discrets

#### **Solution : Kyber-KEM :**

- Mécanisme d'encapsulation de clés **post-quantique**
- Basé sur la difficulté de **MLWE** et **D-MLWE**
- Fondé sur les **problèmes de réseaux** (NP-difficiles et average-case hard)
- Sécurité **IND-CCA2** prouvée

#### **Transition :**

- Nécessite une **crypto-agilité**
- Approche **hybride** recommandée
- Plus grande **migration cryptographique** de l'histoire

### **Perspectives futures**

#### **Défis à venir :**

- Optimisation des implémentations
- Analyse cryptanalytique continue
- Standardisation complète
- Déploiement à grande échelle

#### **Opportunités :**

- Nouvelles primitives cryptographiques
  - Meilleure compréhension des mathématiques sous-jacentes
  - Infrastructure plus robuste et agile
-

## **Glossaire des termes importants**

- AES** : Advanced Encryption Standard - chiffrement symétrique
- Average-case hard** : Difficile en moyenne, pas seulement dans le pire cas
- Ciphertext** : Texte chiffré
- CVP** : Closest Vector Problem
- D-MLWE** : Decision Module Learning With Errors
- Decoherence** : Effondrement de la superposition quantique
- Entanglement** : Intrication quantique
- IND-CCA2** : Indistinguishability under Adaptive Chosen Ciphertext Attack
- KEM** : Key Encapsulation Mechanism
- Lattice** : Réseau euclidien
- LWE** : Learning With Errors
- MLWE** : Module Learning With Errors
- NP-hard** : Non-deterministic Polynomial-time hard
- PKE** : Public Key Encryption
- Plaintext awareness** : Conscience du texte clair
- Qubit** : Quantum bit - unité quantique d'information
- Superposition** : État quantique combinant plusieurs états de base
- SVP** : Shortest Vector Problem