Projet de Protocoles Internet

Juliusz Chroboczek

7 novembre 2021

1. Introduction

Le but de ce projet et de développer un protocole de système de fichiers distribué : chaque pair exporte une arborescence de fichiers (qui peut changer à tout moment), et l'exporte à tous les autres pairs.

Le protocole et un protocole hybride :

- un serveur REST central sert de point de rendez-vous pour tous les pairs ;
- le transfert des données se fait par un protocole pair-à-pair basé sur UDP.

Chaque pair est identifié par un nom, qui est une chaîne ASCII arbitraire (par exemple un nom de domaine). On suppose les noms de pairs uniques : si deux pairs ont le même nom, le serveur acceptera les données du dernier à lui avoir parlé.

Il y a trois endroits où le protocole utilise des techniques cryptographiques :

1. la communication avec le serveur central se fait en HTTP protégé par TLS ;
2. les données stockées dans le système de fichiers sont stockées sous forme d'un arbre de Merkle utilisant des *hashes* SHA-256 ;
3. les messages échangés par les pairs sont optionnellement protégés par des signatures cryptographiques.

Les deux premiers points sont faciles à implémenter, et sont donc obligatoires pour faire le projet. Le dernier point recquiert un peu de connaissances cryptographiques, et est donc optionnel (paragraphe 7).

Le projet est conçu pour être facile à faire en Go, Java et Python. Il est probablement faisable en d'autres langages, consultez-moi.

2. Structures de données

Chaque pair exporte une arborescence de fichiers structurée comme un *arbre de Merkle*[1] : chaque nœud est identifié par un *hash* cryptographique qui couvre sont contenu ainsi que les *hashes* de tous ses fils. Le *hash* de la racine change donc à chaque fois qu'un nœud de l'arbre change.

Il existe trois types de nœuds dans l'arborescence :

1. `https://en.wikipedia.org/wiki/Merkle_tree`

- les nœuds *chunk*, qui sont simplement des suites d'octets ; les fichiers de moins d'un kilo-octet sont représentés par des nœuds *chunk* ;
- les nœuds *big file*, qui ont de 2 à 32 fils, dont chacun est lui-même soit un *big file* soit un *chunk*, représentent les fichiers ayant une taille de 1024 octets ou plus ;
- les nœuds *directory*, qui ont de 0 à 16 fils, représentent les répertoires.

La représentation de ces nœuds sous forme de suites d'octets est donnée au paragraphe 5.2.

3. Déroulement du protocole

Le protocole consiste de deux parties : un protocole REST client-serveur, basé sur HTTPS, et un protocole pair-à-pair basé sur UDP. Le serveur implémente un pair, dont le nom est égal à son nom de hôte (par exemple, le pair correspondant au serveur tournant sur `https://jch.irif.fr:8082` s'appelle « `jch.irif.fr` »).

Découverte de pairs La découverte des pairs se fait à travers l'API REST, qui permet d'obtenir la liste de tous les pairs du réseau, et, pour chaque pair, ses adresses et (optionnellement) sa clé cryptographique.

Enregistrement auprès du serveur Pour que les autres pairs puissent le découvrir, un pair doit s'enregistrer auprès du serveur. Pour cela, il découvre la ou les adresses du serveur puis, depuis chacune de ses adresses IP, il envoie un message *Hello* à l'une des adresses du serveur. Le serveur répond par un message *HelloReply*, ce qui permet d'implémenter l'enregistrement de manière fiable (le pair peut reémettre *Hello* tant qu'il ne reçoit pas de *HelloReply*).

Après avoir reçu le *Hello* du pair, le serveur va confirmer que le pair reçoit bien les messages du serveur. Pour cela, il envoie un message *PublicKey* au pair, qui répond par un *PublicKeyReply*. Le serveur n'annoncera l'adresse IP du pair sur l'interface REST que lorsqu'il aura reçu un *PublicKeyReply* avec la bonne *Id*.

Le serveur enverra ensuite au pair un message *GetRoot* pour obtenir la valeur de sa racine. Si le pair n'exporte pas d'arborescence, il répond avec le *hash* de la chaîne vide ; s'il exporte une arborescence, il répond avec le *hash* de sa racine.

Pour maintenir l'enregistrement, le pair doit continuer à envoyer des messages *Hello* au serveur toutes les 30 secondes environ. Si le serveur n'a reçu aucun message du pair pendant 180 secondes, il supprime toutes les données à propos du pair.

Transfert de données Pour télécharger l'arborescence d'un pair q, un pair p commence par découvrir les adresses de q ainsi que la valeur de son *hash* racine en consultant l'API REST. Une fois le *hash* racine obtenu, il envoie des messages *GetDatum* à q ; chacun de ces messages permet de télécharger un des nœuds de l'arborescence de q. Le pair p recalcule systématiquement les *hashes* des données qu'il reçoit, ce qui empêche un attaquant d'injecter des donnée incorrectes. De proche en proche, le pair p obtient la partie de l'arborescence qui l'intéresse.

Il se peut que l'arborescence de q change pendant que p la télécharge ; p s'en rend compte lorsqu'il reçoit un message *NoDatum* indiquant qu'une donnée n'existe plus. Dans ce cas, il peut soit abandonner (et afficher un message d'erreur à l'utilisateur), soit demander au serveur la nouvelle

valeur de la racine et recommencer. Si les deux pairs implémentent la vérification des signatures cryptographiques, *p* peut aussi demander la nouvelle valeur du *hash* racine directement à *q*.

Comme une donnée est identifiée par son *hash*, le protocole garantit qu'elle ne change jamais sans changer d'identifiant. Le récepteur peut donc cacher indéfiniment les données qu'il reçoit.

Protection cryptographique Les *hashes* contenus dans l'arbre de Merkle protègent le contenu des nœuds : un attaquant ne peut pas injecter une donnée incorrecte, car cela invaliderait les *hashes* de l'arbre. Le point faible est le *hash* racine : si un attaquant arrive à injecter un *hash* racine incorrect, il peut injecter des données arbitraires.

Le transfert des *hashes* racine dans le sens client vers pair se fait à travers l'API REST, qui est protégée par TLS. Ce n'est pas le cas du transfert dans le sens pair vers serveur, qui se fait en UDP.

Le protocole permet optionnellement de protéger ces transferts par une signature cryptographique. Cette extension est décrite au paragraphe 7.

4. Description du protocole client-serveur

Le serveur implémente un protocole de type REST qui sert notamment à localiser les autres pairs. Vous devrez implémenter le côté client de ce protocole, mais pas le côté serveur.

4.1. Liste de pairs

Pour obtenir la liste des pairs connus du serveur, un client fait une requête `GET` à l'URL `/peers/`. Le serveur répond 200 avec le corps contenant une liste de noms de pairs, un par ligne.

4.2. Addresses de pairs

Pour localiser un pair nommé *p*, un client fait une requête `GET` à l'URL `/peers/`*p*`/addresses`. Le serveur répond :

- 200 si le pair est connu, et alors le corps contient une liste d'adresses de socket UDP, une par ligne ;
- 404 si le pair *p* n'est pas connu.

4.3. Recherche de clés

Pour trouver la clé publique d'un pair *p*, un client fait une requête `GET` à l'URL `/peers/`*p*`/key`. Le serveur répond :

- 200 si le pair est connu et a annoncé une clé publique, et alors le corps contient la clé (une suite de 64 octets) ;
- 204 si le pair est connu, mais n'a pas annoncé de clé publique ;
- 404 si le pair n'est pas connu.

4.4. Recherche de racines

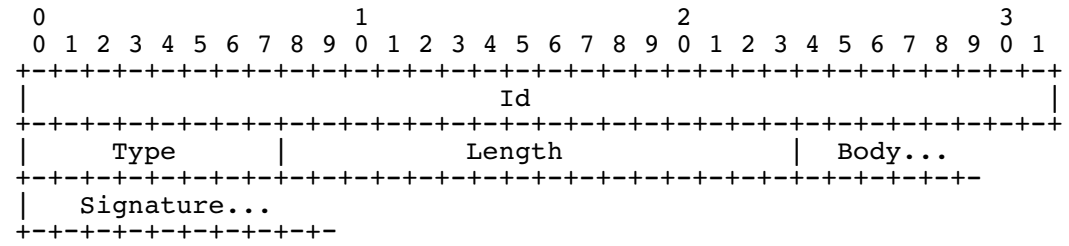
Pour demander au serveur le dernier *hash* connu de la racine de l'arborescence du pair *p*, un client fait une requête à l'URL `/peers/`*p*`/root`. Le serveur répond :

- 200 si le pair est connu et a annoncé une racine, et alors le corps contient le *hash* racine (une suite de 32 octets) ;
- 204 si le pair est connu, mais n'a pas annoncé de racine ;
- 404 si le pair n'est pas connu.

5. Protocole pair-à-pair

Le serveur et tous les pairs implémentent un protocole pair-à-pair basé sur UDP. Comme UDP est non-fiable, il faudra répéter les requêtes lorsqu'on ne reçoit pas de réponse au bout d'un certain temps.

Tous les messages ont le format suivant :



Le champ *Type* indique le type du message ; les valeurs 0 à 127 indiquent des requêtes, les valeurs 128 à 255 indiquent des réponses ou des messages non-solicités. Le champ *Id* a le comportement suivant :

- dans une requête, il a une valeur arbitraire (choisie par l'émetteur) différente de 0 ;
- dans une réponse, il a la même valeur que dans la requête à laquelle le message répond ;
- dans un mesage non-solicité, il vaut 0.

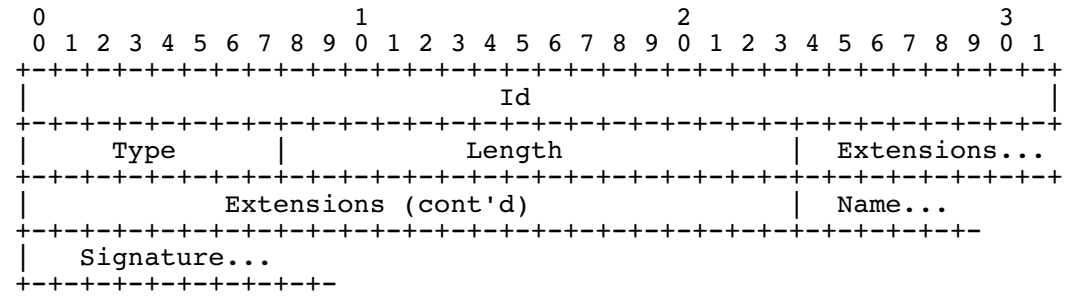
Le champ *Length* indique la longeur en octets du champ *Body*.

Le corps peut optionnellement être suivi d'une signature cryptographique (paragraphe 7). Un pair qui n'implémente pas les signatures cryptographiques doit ignorer les données se trouvant après le corps (après l'octet 7 + *Length* du datagramme).

5.1. Format des messages

5.1.1. *Hello* et *HelloReply*

Les relations entre pairs sont maintenues par des messages de type *Hello* = 0 et *HelloReply* = *128* qui ont la structure suivante :



Le champ *Extensions*, de longueur 4, indique les extensions supportées par ce pair ; si votre pair ne supporte aucune extension, il enverra ce champ égal à 0 et l'ignorera lors de la réception. Le champ *Name* indique le nom du pair qui émet le message.

Il est *Obligatoire* de répondre à tout message *Hello* par un message *HelloReply* ayant le même *Id*. Il est autorisé d'envoyer un message *Hello* ou un message *HelloReply* non-solicité ($Id = 0$) à tout moment.

5.1.2. *PublicKey* et *PublicKeyReply*

Les clés publiques sont communiquées à l'aide des messages $PublicKey = 1$ et $PublicKeyReply = 129$. Si l'émetteur n'implémente pas les signatures cryptographiques, ces messages ont un corps vide ($Length = 0$). Si l'émetteur implémente les signautures cryptographiques, ces messages contiennent la clé publique de l'émetteur ($Length = 64$).

Il est *Obligatoire* de répondre à tout message *PublicKey* par un message *PublicKeyReply* ayant le même *Id*, même si l'on n'implémente pas les signatures cryptographiques. Il est autorisé d'envoyer un message *PublicKey* ou un message *PublicKeyReply* non-solicité ($Id = 0$) à tout moment.

5.1.3. Transfert de racines

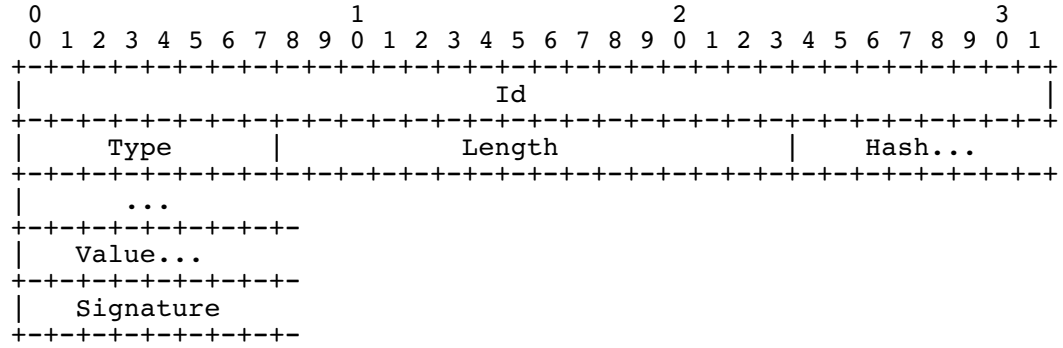
Les valeurs des *hashes* racine sont communiquées à l'aide des messages $Root = 2$ et $RootReply = 130$. Le corps de ces messages contient le *hash* racine de l'émetteur. Si l'émetteur n'exporte pas de données, il annonce le *hash* de la chaîne vide,

```
e3b0c44298fc1c149afbf4c8996fb92427ae41e4649b934ca495991b7852b855
```

5.1.4. Transfert de données

Chaque pair maintient des données, dont chacune et identifiée par son *hash* SHA-256. Un pair peut demander à un pair la valeur d'une donnée en envoyant un message de type $GetDatum = 3$ dont le corps contient un *hash* ($Length = 32$). Le pair répond avec l'un des messages suivants :

– si le pair a la donnée, il répond par un message $Datum = 131$ ayant le format suivant :



Le champ *Hash* contient le *hash* du champ *Value* ; il a une longueur de 32 octets. Le champ *Value* contient la valeur elle-même, et a une longueur de *Length* − 32 octets.

– si le pair n'a pas la donnée, il répond par un message *NoDatum* = 132 contenant le *hash* demandé (*Length* = 32).

Il est *obligatoire* de répondre à tous les messages *GetDatum*, même si l'on n'implémente pas le transfert de données ou si la donnée demandée n'existe pas. Il est *obligatoire* de vérifier la valeur du *hash* avant de se servir des données contenues dans un message *Datum*.

5.1.5. Messages *NatTraversalRequest* et *NatTraversal*

Les messages *NatTraversalRequest* = 133 et *NatTraversal* = 134 servent à la traversée de NAT (paragraphe 9.3). Le corps de ces requêtes contient des adresses de *socket* UDP (*Length* = 18). Les adresses IPv4 sont codées en format *IPv6-mapped*.

Il est *Obligatoire* de répondre par un message *Error* aux messages *NatTraversal* si l'on n'implémente pas la traversée de NAT.

5.1.6. Message *Error*

Le message *Error* = 254 sert à communiquer les erreurs, et peut servir aussi bien comme réponse que comme message asynchrone. Son corps est une chaîne de caractères lisible par un être humain.

5.2. Format des données

Du point de vue du protocole, les données transférées dans les messages *Datum* n'ont pas de structure, ce sont simplement des suites d'octets. Cependant, les données que nous transférons ont un format bien défini.

Le premier octet de la donnée indique le type de la donnée, et peut valoir :

– *Chunk* = 0 indique un bloc d'au plus 1024 octets de données. L'octet de type est immédiatement suivi des données. Les fichiers de taille inférieure à 1024 sont codées par une seule donnée de type *Chunk*.

– *Tree* = 1 indique que la donnée représente un nœud interne d'un arbre dont les feuilles sont des *Chunk*. L'octet de type est suivi d'une suite d'au plus 32 *hashes* de 32 octets chacun ;

- *Directory* = 2 indique que la donnée représente un répertoire. L'octet de type est immédiatement suivi d'une suite d'au plus 16 entrées de répertoire de longueur 64 dont chacune a la structure suivante :
  - *Name*, 32 octets, indique le nom du fichier, complété par des octets de valeur 0 ;
  - *Hash*, 32 octets, indique le *hash* du fichier référencé par cette entrée ;
- les types 3 à 255 sont réservés pour des extensions futures (le type 3 est réservé pour une extension future permettant de coder les répertoires ayant plus de 16 entrées).

6. Mécanisme d'extension

Le protocole est extensible. Chaque extension au protocole a un numéro n, compris entre 0 et 31, et définit les messages numéro $64 + n$ et $192 + n$.

Le champ *Extensions* des messages *Hello* et *HelloReply* indique l'ensemble des extensions implémentées par le pair qui l'émet. Si les deux pairs implémentent une extension, ils peuvent s'échanger les messages définis par l'extension. Les requ

Pour définir une extension, vous devez envoyer un mail à la liste du projet indiquant le numéro d'extension que vous vous réservez.

7. Signatures cryptographiques

Cette partie est optionnelle.

Le protocole peut optionnellement protéger les messages qu'il envoie par des signatures générées selon l'algorithme ECDSA sur la courble elliptique P-256 avec la fonction de hachage SHA-256. Il y a trois concepts à connaître :

- une clé privée permet de générer des signatures ; les clés privées n'apparaissent pas dans le protocole ;
- une clé publique permet de vérifier les signatures ; les clés publiques sont représentées dans le protocole comme des chaînes de 64 octets (32 octets pour x, 32 octets pour y) ;
- une signature est une chaîne de 32 octets.

Les signatures sont calculées sur le message entier mais sans la signature, c'est-à-dire sur les octets 0 à $6 + \mathit{Length}$. Pour simplifier le protocole, les signatures ne prennent en compte ni un *pseudo-header* ni un *nonce*, ce qui rend le protocole vulnérable aux attaques par rejeu.

Comme l'intégrité des données transférées est garantie par les arbres de Merkle, il n'est pas nécessaire de signer tous les messages. Un pair qui implémente les signatures cryptographiques peut signer tous les messages qu'il envoie, ou alors il peut choisir de ne signer que les messages qui ne sont pas autrement protégés : pour un pair qui implémente les signatures cryptographiques, il est *obligatoire* de signer les messages suivants :

- les messages *Hello* et *HelloReply* (la signature empêche un autre pair de se faire passer pour un pair existant) ;
- les messages *PublicKey* et *PublicKeyReply* (la signature constitue une preuve de la possession de la clé privée [2]) ;

2. En fait, ce n'est pas entièrement vrai, car le protocole est vulnérable au rejeu.

– les messages *Root* et *RootReply* (la racine est le point d'ancrage des arbres de Merkle).

Des détails d'implémentation sont donnés à l'annexe A.

8. Sujet minimal

Au minimum, votre pair devra :

– découvrir les adresses des pairs enregistrés auprès du serveur ;
– étant donné un nom de pair *p* et un *hash h*, télécharger la donnée identifiée par *h* et stockée dans le pair *p* ;
– parcourir une arborescence distante, par exemple pour afficher un fichier identifié par un chemin.

Il est *obligatoire* de vérifier les *hashes* des données reçues. Il est *obligatoire* de respecter le protocole décrit dans ce document : les programmes qui n'interopèrent pas avec mon pair ne seront pas acceptés.

Points en plus si votre pair se comporte bien en présence de pertes de paquets ou de problèmes réseau (en reémettant les paquets, en essayant toutes les adresses du pair distant et en retenant lesquelles ont fonctionné récemment). Points en plus si votre pair est capable d'exporter une arborescence de fichiers. Points en plus si votre pair implémente le protocole de sécurité décrit ci-dessous. Points en plus s'il implémente des extensions au sujet tout en restant compatible.

9. Extensions

Outre l'authentification (paragraphe 7), toutes les extensions seront les bienvenues à condition qu'elles restent compatibles avec le protocole de base. Quelques idées.

9.1. Mises à jour et notifications asynchrones

Une solution simple au projet ne permet pas de mettre à jour les fichiers : au lancement, votre pair exporte une arborescence qui ne peut pas changer. Une solution plus intéressante permet de modifier un fichier à l'exécution, ou d'ajouter un fichier. Dans ce cas, il faudra recalculer tous les *hashes* de la branche qui va du fichier modifier jusqu'à la racine.

Lors d'une telle modification, il faut notifier le serveur du changement de la valeur de la racine. Vous remarquerez que le message *RootReply* constitue un acquittement du message *Root* correspondant, ce qui permet de transférer la racine de manière fiable.

9.2. Caches

Une donnée est identifiée par son *hash*, qui change forcément si la donnée change. De ce fait, il est facile d'implémenter un cache qui évite de contacter un pair distant pour chaque requête de donnée.

Si vous implémentez un cache de données, assurez-vous qu'il ne croît pas sans borne.

9.3. Traversée de NAT

La plupart des pairs seront derrière des NAT. Pour pouvoir communiquer avec eux, il faudra s'arranger pour percer des trous dans les NAT.

Pour communiquer avec le pair *q*, un pair *p* commence par contacter *p* directement, par exemple en envoyant un message *Hello* à chacune de ses adresses IP. Si aucune de ces adresses n'a répondu, *p* peut tenter de percer des trous dans les NAT.

Pour chaque adresse *a* de *q*, *p* envoie au serveur un message *NatTraversalRequest* contenant *a*. Le serveur envoie à *q* un message *NatTraversal* contenant l'adresse de *p*. Si *q* n'implémente pas la traversée de NAT, il répond par un message de type *Error*. Si *q* implémente la traversée de NAT, il réagit en envoyant un message de type *Hello* à l'adresse indiquée dans le message *NatTraversal* depuis l'adresse sur laquelle il a reçu ce dernier.

Après avoir envoyé le message *NatTraversalRequest* au serveur, *p* attend une seconde environ puis envoie un message *Hello* directement à l'adresse qu'il a spécifiée dans le *NatTraversalRequest*. Les deux messages *Hello* se croisent, et, si tout se passe bien, établissent un *mapping* dans tous les NAT traversés.

9.4. *Pipelining* et contrôle de congestion

Un pair simple n'a jamais plus d'une requête en vol, ce qui rend le transfert de fichiers assez lent. Cependant, si votre pair est capable de maintenir plusieurs requêtes en vol, il faudra qu'il implémente un algorithme de contrôle de congestion.

Je vous propose l'algorithme suivant, qui est classique est simple à implémenter. Le pair maintient une variable entière, la *taille de la fenêtre*, qui est le nombre maximal de requêtes en vol autorisées. À chaque fois qu'une réponse est reçue, la fenêtre augmente de 1 ; à chaque fois qu'une requête est reémise, la fenêtre est divisée par 2.

9.5. Répertoires de plus de 16 entrées

Le protocole limite la taille des répertoires à 16 entrées. Il serait utile de définir une extension qui permet de transférer des répertoires plus gros (le type de donnée 3 est réservé pour cela).

9.6. Clés de session

Le protocole cryptographique de la partie 7 effectue une opération sur les courbes elliptiques pour chaque message signé. Il serait plus efficace d'utiliser un algorithme de signature symétrique (par exemple HMAC) avec une clé de session.

Pour cela, on pourra par exemple définir une extension au protocole qui effectue un échange Diffie-Hellman authentifié ; la clé ainsi négociée pourra servir de clé de session spécifique à une paire de pairs.

9.7. Chiffrage

Le protocole envoie toutes les données en clair. Il serait souhaitable de les chiffrer afin de garantir la confidentialité des échanges.

Ce n'est a priori pas très facile. Il faudra tout d'abord implémenter un algorithnme d'échange de clés, comme ci-dessus ; et il faudra ensuite définir un algorithme de chiffrage pour tous les messages.

9.8. Interface utilisateur

Il existe de nombreux choix possibles pour l'interface utilisateur, et je n'ai pas de préférences particulières. On peut par exemple imaginer :

- un client en ligne de commande, qui permet d'affichier ou de télécharger les fichiers distants ;
- un client graphique ;
- une interface *web* où les pages sont générées par le serveur ;
- une interface REST avec une interface utilisateur implémentée dans le navigateur.

Ne passez cependant pas trop de temps sur l'interface utilisateur — c'est un projet de réseau, pas un projet d'interfaces.

10. Modalités de rendu

Vous me soumettres une archive `.tar.gz` contenant :

- un programme implémentant la partie du sujet que vous aurez traitée ;
- un rapport de quelques pages au format PDF qui m'indique les choix d'implémentation que vous aurez faits, les algorithmes que vous aurez utilisés, les extensions au sujet que vous voudriez que je remarque.

L'archive devra s'appeler *nom1-nom2*.tar.gz, et s'extraire dans un sous-répertoire *nom1-nom2* du répertoire courant. Par exemple, si vous vous appelez *Arlo Guthrie* et *Janis Joplin*, votre archive devra porter le nom `guthrie-joplin.tar.gz` et son extraction devra créer un répertoire `guthrie-joplin` contenant tous les fichiers que vous me soumettrez.

A. Annexe : implémentation des primitives cryptographiques

Une clé publique ECDSA est une paire d'entiers (x, y). Une signature est une paire d'entiers (r, s). Dans ce projet, nous représentons ces paires d'entiers par des chaînes de 64 octets, où les premiers 32 représentent le premier entier et les derniers 32 le deuxième.

Dans cette partie, je donne une implémentation des constructions nécessaires à l'implémentation de l'extension décrite au paragraphe 7 en Python, Go et Java.

A.1. Python

Pour générer une clé privée :

```
import ecdsa
import hashlib
```

```
privateKey = ecdsa.SigningKey.generate(
    curve=ecdsa.SECP256k1, hashfunc=hashlib.sha256,
)
```

Pour obtenir la clé publique associée :

```
publicKey = privateKey.get_verifying_key()
```

Pour formater la clé publique comme une chaîne de 64 octets :

```
publicKey.to_string()
```

Pour *parser* une clé publique représentée comme une chaîne de 64 octets :

```
publicKey = ecdsa.VerifyingKey.from_string(
    body, curve=ecdsa.SECP256k1, hashfunc=hashlib.sha256,
)
```

Pour calculer la signature d'un message :

```
signature = privateKey.sign(data)
```

Pour vérifier un message :

```
ok = publicKey.verify(signature, data)
```

A.2. Go

Pour générer une clé privée :

```
import (
    "crypto/ecdsa"
    "crypto/elliptic"
    "crypto/rand"
)

privateKey, err := GenerateKey(elliptic.P256(), rand.Reader)
```

Pour obtenir la clé publique associée :

```
publicKey = privateKey.Public()
```

Pour formater la clé publique comme une chaîne de 64 octets :

```
formatted := make([]byte, 64)
publicKey.X.FillBytes(formatted[:32])
publicKey.Y.FillBytes(formatted[32:])
```

Pour *parser* une clé publique représentée comme une chaîne de 64 octets :

```
import "math/big"

var x, y big.Int
x.SetBytes(data[:32])
y.SetBytes(data[32:])
publicKey := ecdsa.PublicKey{
    Curve: elliptic.P256(),
    X: &x,
    Y: &y,
}
```

Pour calculer la signature d'un message :

```
import (
    "crypto/sha256"
    "crypto/rand"
)

hashed := sha256.Sum256(data)
r, s, err := ecdsa.Sign(rand.Reader, privateKey, hashed[:])
signature := make([]byte, 64)
r.FillBytes(signature[:32])
s.FillBytes(signature[32:])
```

Pour vérifier un message :

```
var r, s big.Int
r.SetBytes(signature[:32])
s.SetBytes(signature[32:])
hashed := sha256.Sum256(data)
ok = ecdsa.Verify(publicKey, hashed[:], &r, &s)
```

A.3. Java

Cette partie n'a pas été testée par l'auteur, qui n'a jamais fait de cryptographie en Java.

```
import java.math.BigInteger;
import java.security.KeyPair;
import java.security.KeyPairGenerator;
import java.security.PrivateKey;
import java.security.PublicKey;
import java.security.SecureRandom;
import java.security.Signature;
```

Pour générer une clé privée :

```
ECGenParameterSpec ecSpec = new ECGenParameterSpec("secp256k1");
KeyPairGenerator g = KeyPairGenerator.getInstance("EC");
g.initialize(ecSpec, new SecureRandom());
KeyPair keypair = g.generateKeyPair();
PrivateKey privateKey = keypair.getPrivate();
```

Pour obtenir la clé publique associée :

```
PublicKey publicKey = keypair.getPublic();
```

Pour formater la clé publique comme une chaîne de 64 octets :

```
BigInteger x = publicKey.getW().getAffineX();
BigInteger y = publicKey.getW().getAffineY();
byte[] xbytes = x.toByteArray();
byte[] ybytes = x.toByteArray();
byte[] publicBytes = new byte[64];
System.arraycopy(xbytes, 0, publicBytes,
                 32 - xbytes.length, xbytes.length);
System.arraycopy(ybytes, 0, publicBytes,
                 64 - ybytes.length, ybytes.length);
```

Pour *parser* une clé publique représentée comme une chaîne de 64 octets :

```
KeyFactory kf = KeyFactory.getInstance("EC");
byte[] xbytes = Arrays.copyOfRange(publicBytes, 0, 32);
byte[] ybytes = Arrays.copyOfRange(publicBytes, 32, 64);
BigInteger x = BigInteger(xbytes);
BigInteger y = BigInteger(ybytes);
ECPublicKeySpec keyspec =
    new ECPublicKeySpec(new ECPoint(x, y), ecSpec);
publicKey = kf.generatePublic(keyspec);
```

Pour calculer la signature d'un message :

```
Signature ecdsaSign =
    Signature.getInstance("SHA256withECDSA");
ecdsaSign.initSign(privateKey);
ecdsaSign.update(data);
byte[] signature = ecdsaSign.sign();
```

Pour vérifier un message :

```
Signature ecdsaVerify =
    Signature.getInstance("SHA256withECDSA");
KeyFactory kf = KeyFactory.getInstance("EC");
ecdsaVerify.initVerify(publicKey);
ecdsaVerify.update(message);
boolean result =
    ecdsaVerify.verify(Base64.getDecoder().decode(signature));
```

A.4. Autres langages

Les constructions ci-dessus sont sans doute possibles à effectuer dans n'importe quel langage qui dispose d'une bonne bibliothèque ECDSA. La seule difficulté consiste à formater les clés publiques et les signatures dans le bon format : il faut représenter les paires d'entiers par des chaînes de 64 octets, comme décrit ci-dessus.