Blockchain

Sylvain Conchon

Laboratoire Méthodes Formelles

Université Paris-Saclay, CNRS, ENS Paris-Saclay

sylvain.conchon@universite-paris-saclay.fr

RÉSEAUX P2P

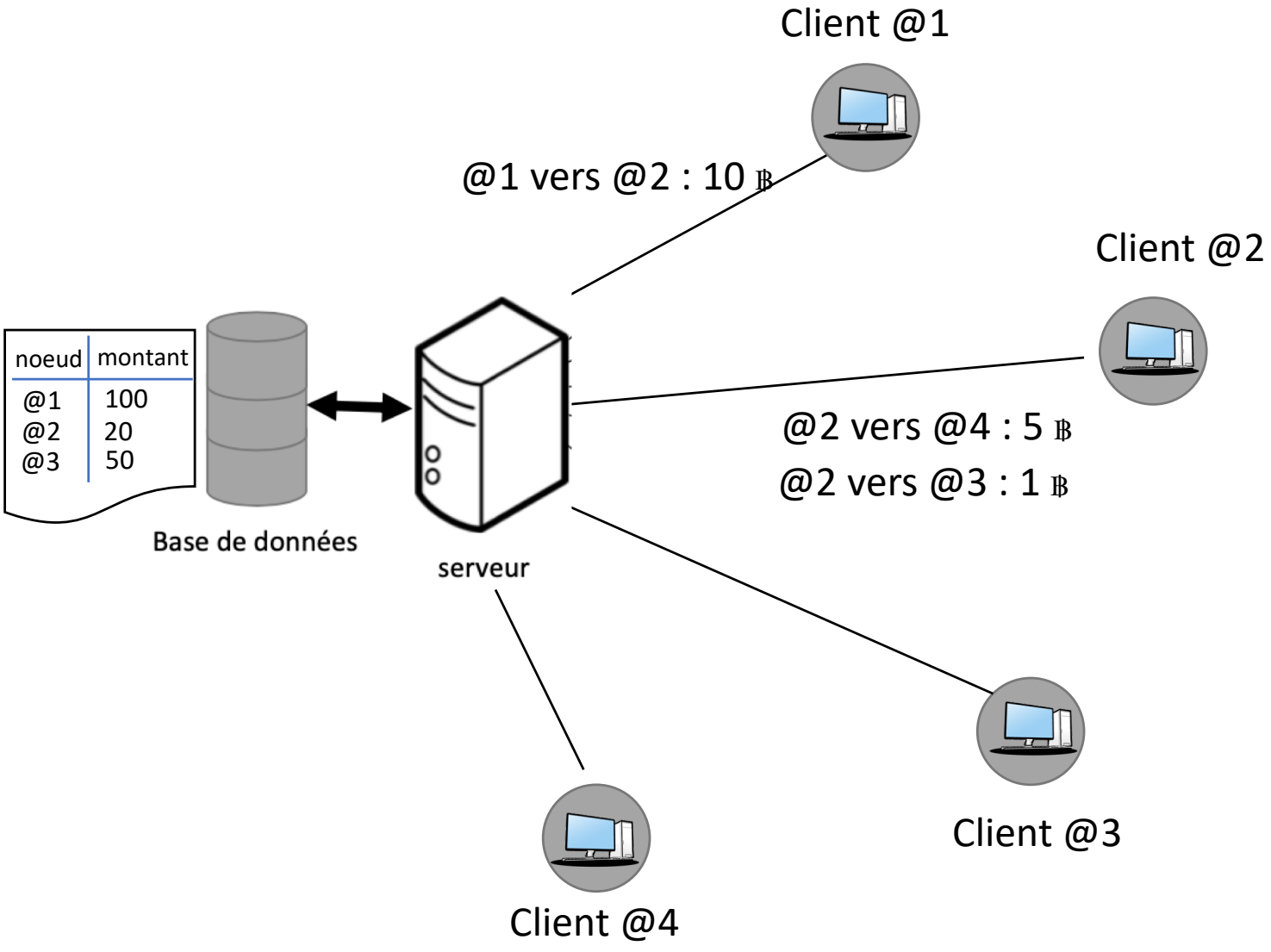
Réseaux P2P

Un réseau Pair-à-Pair (Peer-to-Peer en anglais) est constitué d'un ensemble d'ordinateurs qui s'organisent entre eux pour s'échanger de l'information (fichiers, etc.)

Contrairement à une architecture centralisée du type client/serveur, avec un serveur et des clients qui s'y connectent, les ordinateurs d'un réseau P2P jouent à la fois les rôles de client et de serveur.

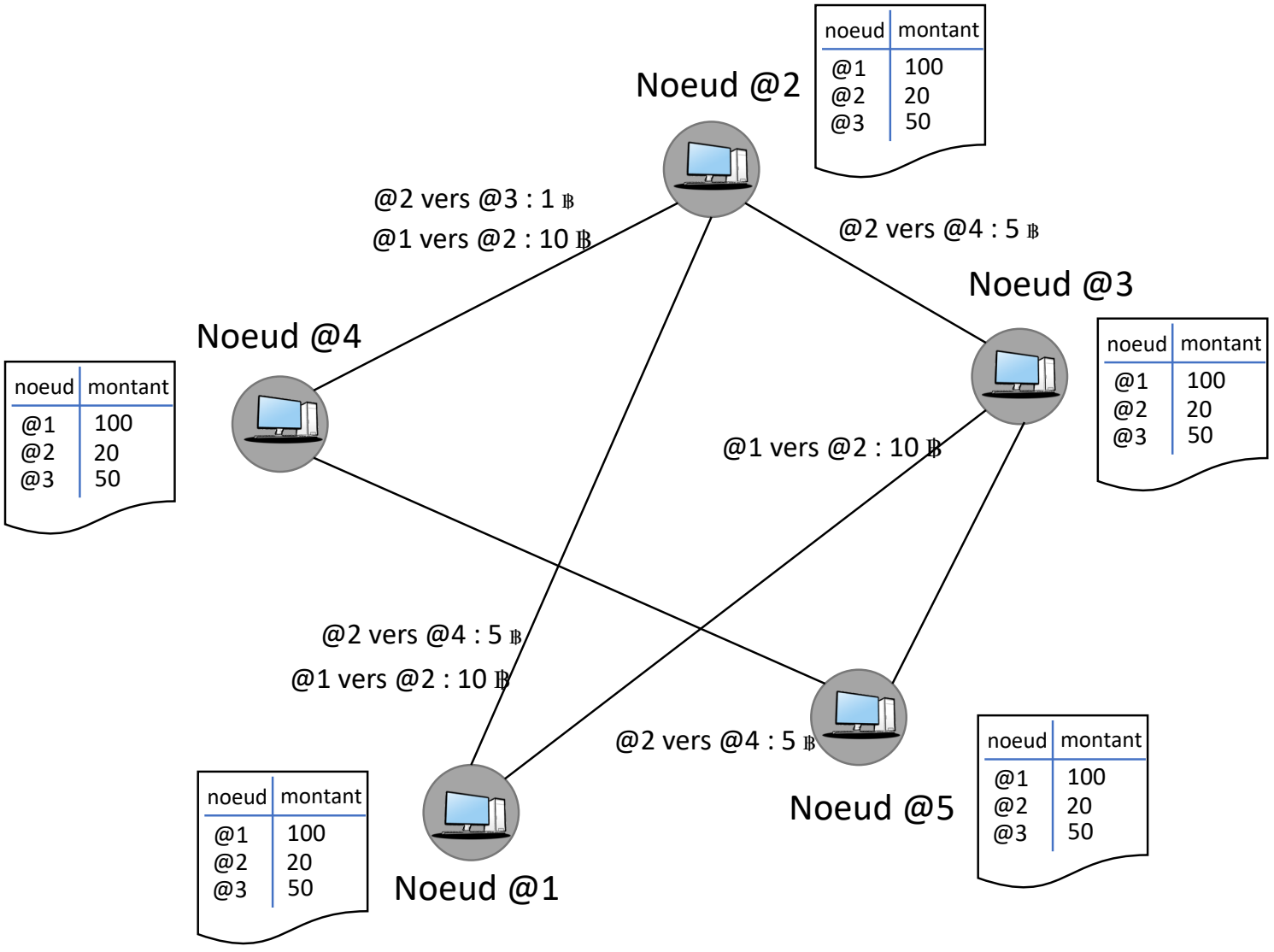
Exemples de réseaux P2P : KazaA, BitTorrent, eDonkey, eMule

Architecture Client-Serveur



Architecture Pair-à-Pair

La distinction entre client et serveur disparaît : il n'y a plus que des noeuds qui communiquent directement les uns avec les autres



Avantages des réseaux P2P (vs. Client/Serveur)

Les avantages des réseaux P2P (en comparaison des réseaux Client/Serveur) :

Avantages des réseaux P2P (vs. Client/Serveur)

Les avantages des réseaux P2P (en comparaison des réseaux Client/Serveur) :

- Aucune hiérarchie centrale (réseau maillé) : chaque nœud doit recevoir, envoyer et relayer les données.

Avantages des réseaux P2P (vs. Client/Serveur)

Les avantages des réseaux P2P (en comparaison des réseaux Client/Serveur) :

- Aucune hiérarchie centrale (réseau maillé) : chaque nœud doit recevoir, envoyer et relayer les données.
- Réduction des coûts, simplicité d'utilisation, rapidité d'installation.

Avantages des réseaux P2P (vs. Client/Serveur)

Les avantages des réseaux P2P (en comparaison des réseaux Client/Serveur) :

- Aucune hiérarchie centrale (réseau maillé) : chaque nœud doit recevoir, envoyer et relayer les données.
- Réduction des coûts, simplicité d'utilisation, rapidité d'installation.
- Résistant aux pannes : si des machines tombent en panne, le réseau continue de fonctionner (redondance).

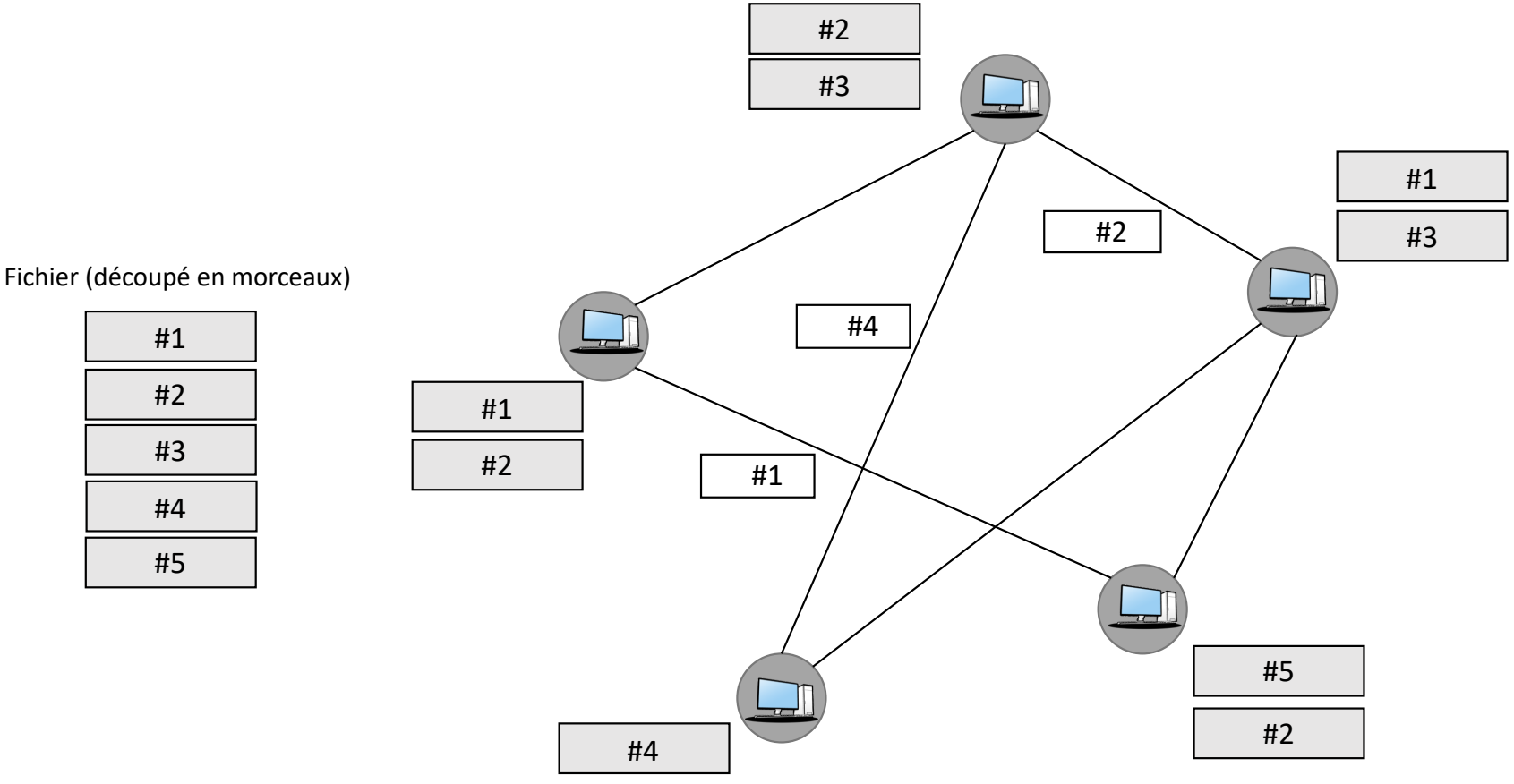
Avantages des réseaux P2P (vs. Client/Serveur)

Les avantages des réseaux P2P (en comparaison des réseaux Client/Serveur) :

- Aucune hiérarchie centrale (réseau maillé) : chaque nœud doit recevoir, envoyer et relayer les données.
- Réduction des coûts, simplicité d'utilisation, rapidité d'installation.
- Résistant aux pannes : si des machines tombent en panne, le réseau continue de fonctionner (redondance).
- Augmentation des performances : plus il y a de machines, plus le réseau est performant

Exemple de réseau P2P : le partage de fichiers

Une des utilisations des réseaux P2P est le partage de fichiers (téléchargement de films ou musiques).



Les fichiers sont découpés en morceaux et les morceaux sont envoyés/récupérés dans un ordre quelconque par les machines.

Inconvénients des réseaux P2P

Les réseaux P2P souffrent principalement de problèmes liés à la sécurité :

Inconvénients des réseaux P2P

Les réseaux P2P souffrent principalement de problèmes liés à la sécurité :

- Intégrité de l'information

Inconvénients des réseaux P2P

Les réseaux P2P souffrent principalement de problèmes liés à la sécurité :

- Intégrité de l'information
- Confidentialité, protection des données

Inconvénients des réseaux P2P

Les réseaux P2P souffrent principalement de problèmes liés à la sécurité :

- Intégrité de l'information
- Confidentialité, protection des données
- Authentification des échanges

Inconvénients des réseaux P2P

Les réseaux P2P souffrent principalement de problèmes liés à la sécurité :

- Intégrité de l'information
- Confidentialité, protection des données
- Authentification des échanges
- Etc.

Algorithmique P2P

- Découverte des autres pairs, gestion des déconnections, pannes, etc.
- Localisation des données sur le réseau
- Routage des messages
- Récupération sur faute, panne

Cela nécessite de mettre en place de protocoles spécifiques entre les pairs.

Voir par exemple :

G. Feltin, G. Doyen, O. Festor. Les protocoles peer-to-peer, leur utilisation et leur détection.
`https://hal.inria.fr/inria-00099498/document`

Exercice 1 : Maillage

On souhaite commencer la couche P2P d'une blockchain. La première étape est de réaliser le maillage du réseau.

On va donc implémenter une (petite) partie d'un *miner*.

Quand un *miner* (A) est démarré depuis un terminal, on indique l'adresse et numéro de port d'un autre *miner* (B) (sauf pour le premier miner à être lancé).

Le miner (A) doit alors se connecter à (B) pour lui indiquer sa présence. En retour, (B) lui envoie la liste M des autres miners qu'il connait, et (B) envoie également les informations de (A) à tous les *miners* de M.

Exercice 2 : Broadcast

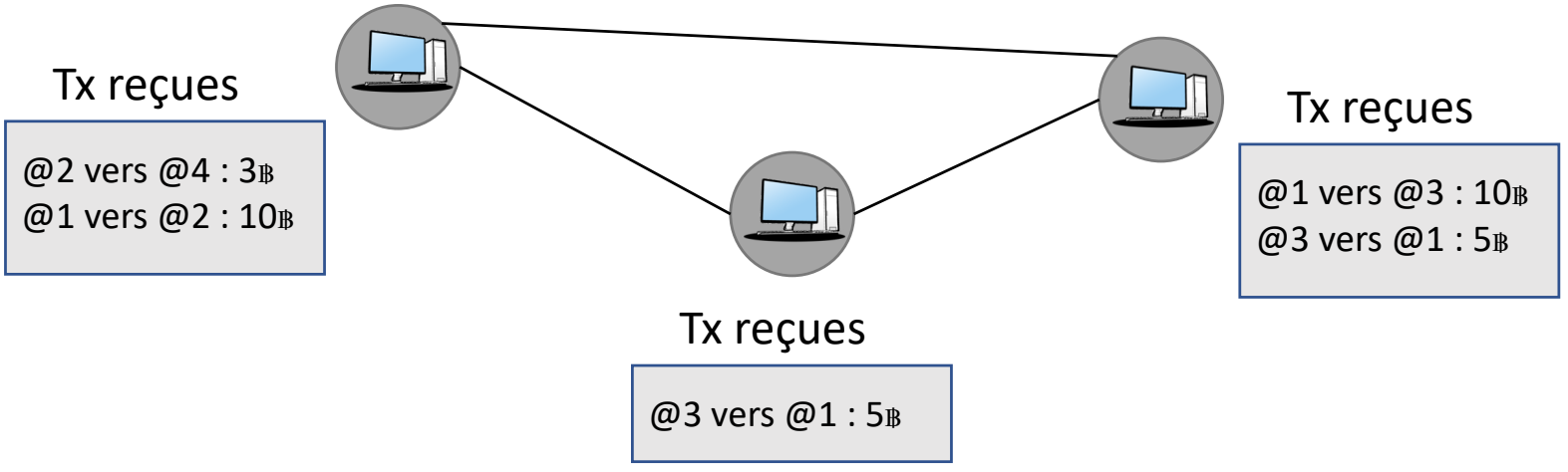
En plus d'accepter les connexions des autres *miners*, un *miner* doit aussi accepter les messages envoyés par un *wallet*.

Lorsqu'il reçoit un message M d'un *waller*, le *miner* doit le transmettre à tous les autres *miners* qu'il connaît (broadcast).

CONSENSUS DISTRIBUÉ

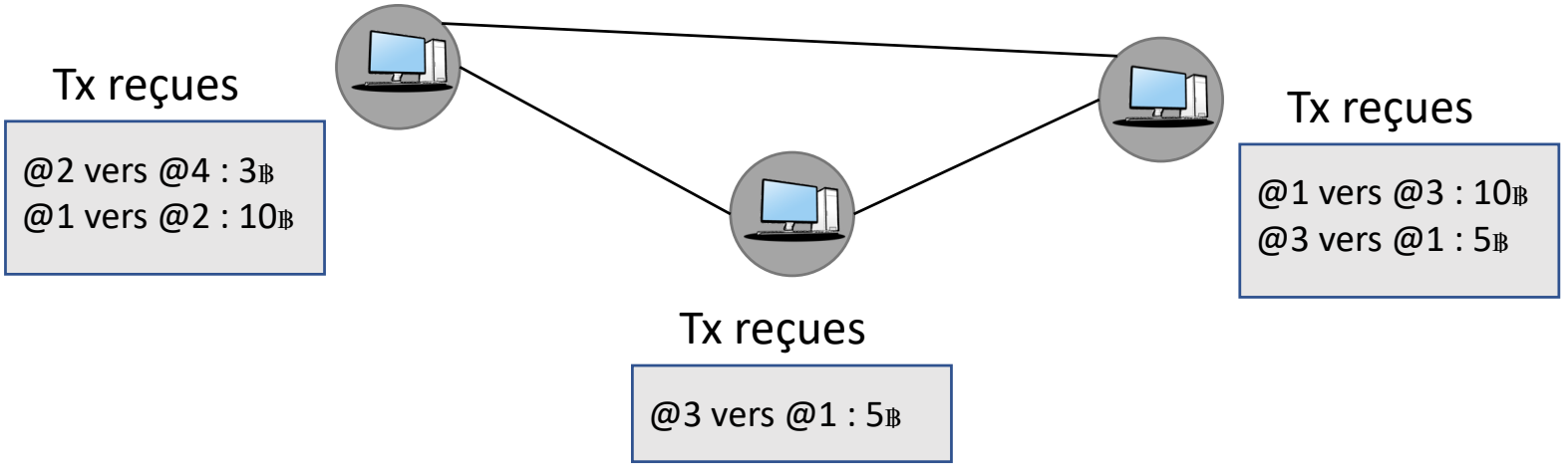
Cohérence dans un réseau P2P

Un réseau P2P ne peut garantir que les nœuds reçoivent les transactions en même temps et dans le même ordre



Cohérence dans un réseau P2P

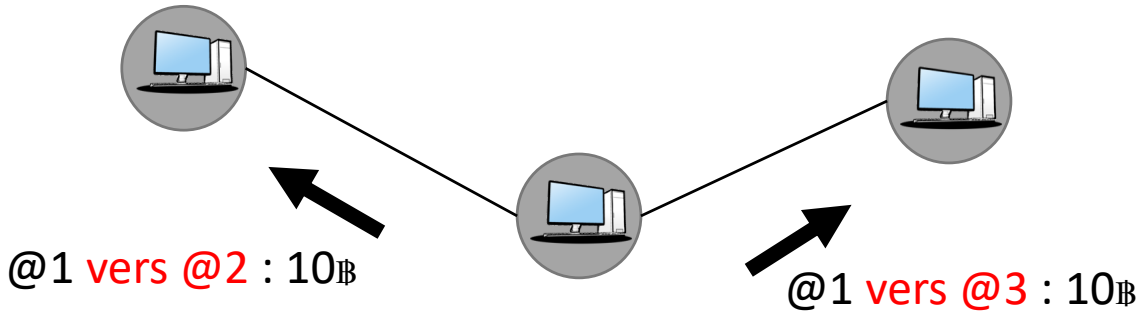
Un réseau P2P ne peut garantir que les nœuds reçoivent les transactions en même temps et dans le même ordre



Comment faire dans ce cas pour que tous les nœuds aient la même version (vision) du livre de comptes ?

Le problème de la double dépense

Dans le cas de la Blockchain, l'incohérence du réseau P2P peut permettre à un client de dépenser plus qu'il ne possède.



clients	฿
@1	10
⋮	

Par exemple, il peut émettre (au moins) deux transactions différentes pour dépenser l'intégralité de son compte et les envoyer à des nœuds différents du réseau.

Consensus distribué

Pour éviter le problème de la double dépense, et plus généralement pour que tous les nœuds d'un réseau aient la même vision du registre, il faut mettre en place un consensus distribué.

La blockchain met en œuvre un protocole de consensus afin que tous les nœuds du réseau s'accordent sur la liste des transactions à valider (i.e. à mettre) dans le prochain bloc de la chaîne.

Le problème du consensus distribué

Soit un réseau constitué de N clients. Chaque client i choisit (au plus) une valeur v_i (au moins un client choisit une valeur).

Le problème du consensus distribué consiste à faire exécuter par les clients un même protocole, de sorte qu'ils communiquent entre eux en s'échangeant des messages et qu'à la fin du protocole ils s'accordent sur une même valeur v (qui doit être l'une des valeurs v_i).

Pannes

Le protocole de consensus doit fonctionner même si certains clients tombent en panne de manière

- permanente : défaillance des machines ou des liens de communication
- temporaire : des messages peuvent être perdus, les clients peuvent être beaucoup trop lents à communiquer, etc.
- byzantine : les clients ne respectent pas les règles du protocole (volontairement ou non).

$\Rightarrow$ Les clients qui ne sont pas en panne doivent obligatoirement terminer.

Résultat d'impossibilité

Théorème FLP [1985, Fischer - Lynch - Patterson]

Dans un système asynchrone (où les messages peuvent être dupliqués, perdus, retardés), le problème du consensus est indécidable dès qu'il peut se produire au moins une panne permanente.

M. J Fischer, N. A. Lynch, M. S. Paterson. Impossibility of distributed consensus with one faulty process.
`https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA132503.pdf`

Paxos

En 1989, Leslie Lamport a proposé Paxos, un protocole de consensus pour un réseau asynchrone tolérant aux pannes non-byzantines.

Propriété garantie :

Si moins de la moitié des clients tombent en panne et si le protocole termine, alors tous les processus qui ne sont pas tombés en panne ont la même valeur.

L. Lamport. The Part-Time Parliament.

`http://lamport.azurewebsites.net/pubs/lamport-paxos.pdf`

Byzantin Fault Tolerant

Les protocoles Byzantin Fault Tolerant (BFT) prennent en compte des fautes Byzantines, c'est-à-dire des clients malicieux qui, en plus de tomber en panne, peuvent tenter d'usurper des identités, d'envoyer de faux messages, etc.

Dans le cas d'un réseau synchrone (contrainte de temps de transmission sur les messages) avec N machines, le problème du consensus a une solution (il est sûr et les machines non Byzantines terminent) s'il y a strictement moins de $N/3$ Byzantins.

L. Lamport, R. Shostak, M. Pease. The Byzantine Generals Problem.
`https://lamport.azurewebsites.net/pubs/byz.pdf`

Practical BFT

Algorithme BFT amélioré qui fonctionne pour des réseaux asynchrones.

Utilise des primitives cryptographiques pour signer les messages ou calculer des empreintes numériques.

M. Castro, B. Liskov. Practical Byzantine Fault Tolerance.

`http://cs.brown.edu/courses/cs296-2/papers/bft-nfs.pdf`

PBFT et Blockchains

Un algorithme de consensus dans une blockchain doit également faire face à l'ouverture du réseau :

- Un nombre quelconque de clients qui peuvent s'ajouter ou partir du réseau.

PBFT et Blockchains

Un algorithme de consensus dans une blockchain doit également faire face à l'ouverture du réseau :

- Un nombre quelconque de clients qui peuvent s'ajouter ou partir du réseau.

Comment garantir que le nombre de Byzantins est toujours strictement inférieur au tiers des clients honnêtes ?

PBFT et Blockchains

Un algorithme de consensus dans une blockchain doit également faire face à l'ouverture du réseau :

- Un nombre quelconque de clients qui peuvent s'ajouter ou partir du réseau.

Comment garantir que le nombre de Byzantins est toujours strictement inférieur au tiers des clients honnêtes ?

On ne peut pas, il faut juste faire en sorte que casser ce protocole soit très coûteux et que cela en vaille donc vraiment la peine.

Les protocoles de consensus Blockchain

- Proof of Work (voir un peu plus tard pour les détails)
- Proof of Stake
- Delegated Proof of Stake
- ...

Primitives cryptographiques

L'algorithme de consensus d'une Blockchain, mais également l'intégrité de la chaîne de blocs, reposent principalement sur l'utilisation de deux primitives cryptographiques :

- SHA-2 : famille d'algorithmes de hachage sécurisés (ex. SHA-256 ou SHA-512)
- DSA : algorithme de signature numérique

SHA-256

Il s'agit d'une fonction de hachage `sha256` qui transforme des messages `m` (ou valeurs) de longueur finie (mais quelconque) en des messages condensés `r` de longueur fixe.

SHA-256

Il s'agit d'une fonction de hachage `sha256` qui transforme des messages `m` (ou valeurs) de longueur finie (mais quelconque) en des messages condensés `r` de longueur fixe.

- `sha256(m)` doit être calculé très rapidement

SHA-256

Il s'agit d'une fonction de hachage `sha256` qui transforme des messages `m` (ou valeurs) de longueur finie (mais quelconque) en des messages condensés `r` de longueur fixe.

- `sha256(m)` doit être calculé très rapidement
- `sha256` est à sens unique, c'est-à-dire qu'il est très difficile de calculer `m` à partir de `r`

SHA-256

Il s'agit d'une fonction de hachage `sha256` qui transforme des messages `m` (ou valeurs) de longueur finie (mais quelconque) en des messages condensés `r` de longueur fixe.

- `sha256(m)` doit être calculé très rapidement
- `sha256` est à sens unique, c'est-à-dire qu'il est très difficile de calculer `m` à partir de `r`
- le risque de collisions, c'est-à-dire de messages différents `m1` et `m2` tels que `sha256(m1) = sha256(m2)`, doit être extrêmement faible

SHA-256

Il s'agit d'une fonction de hachage `sha256` qui transforme des messages `m` (ou valeurs) de longueur finie (mais quelconque) en des messages condensés `r` de longueur fixe.

- `sha256(m)` doit être calculé très rapidement
- `sha256` est à sens unique, c'est-à-dire qu'il est très difficile de calculer `m` à partir de `r`
- le risque de collisions, c'est-à-dire de messages différents `m1` et `m2` tels que `sha256(m1) = sha256(m2)`, doit être extrêmement faible
- l'image `r` d'un message `m` doit être très différente de l'image `r'` d'une perturbation très minime de `m`.

SHA-256

Il s'agit d'une fonction de hachage `sha256` qui transforme des messages `m` (ou valeurs) de longueur finie (mais quelconque) en des messages condensés `r` de longueur fixe.

- `sha256(m)` doit être calculé très rapidement
- `sha256` est à sens unique, c'est-à-dire qu'il est très difficile de calculer `m` à partir de `r`
- le risque de collisions, c'est-à-dire de messages différents `m1` et `m2` tels que `sha256(m1) = sha256(m2)`, doit être extrêmement faible
- l'image `r` d'un message `m` doit être très différente de l'image `r'` d'une perturbation très minime de `m`.

SHA-256 produit un haché de 256 bits avec un niveau de sécurité d'une collision pour 2^{128} opérations.

SHA-256

Il s'agit d'une fonction de hachage `sha256` qui transforme des messages `m` (ou valeurs) de longueur finie (mais quelconque) en des messages condensés `r` de longueur fixe.

- `sha256(m)` doit être calculé très rapidement
- `sha256` est à sens unique, c'est-à-dire qu'il est très difficile de calculer `m` à partir de `r`
- le risque de collisions, c'est-à-dire de messages différents `m1` et `m2` tels que `sha256(m1) = sha256(m2)`, doit être extrêmement faible
- l'image `r` d'un message `m` doit être très différente de l'image `r'` d'une perturbation très minime de `m`.

SHA-256 produit un haché de 256 bits avec un niveau de sécurité d'une collision pour 2^{128} opérations.

C'est une version améliorée de SHA-1 (et MD5) qui résiste (pour le moment) aux attaques permettant de créer des collisions sans utiliser un algorithme par force brute (attaque des anniversaires).

DSA

Digital Signature Algorithm (DSA) est un algorithme de signature numérique basé sur la cryptographie asymétrique qui utilise une paire `(pub, priv)` de clé publique et clé privée.

La clé publique peut être donnée à tout le monde, mais la clé privée doit être gardée secrète.

Il s'agit d'une sorte de fonction de hachage qui hache un message `m` en utilisant la clé privée et qui permet de retrouver le message de départ en utilisant la clé publique (ou inversement).

La fonction de hachage `sign(n, priv)` calcule la signature d'un message `m` selon la clé privée `priv`.

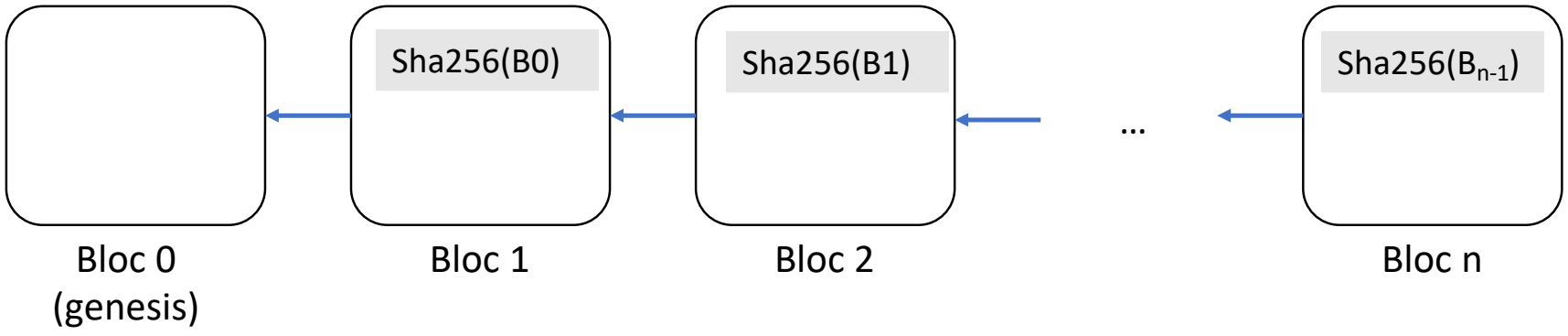
La fonction de hachage inverse `priv(s, pub)` permet de retrouver le message `m` à partir de la signature `s` et de la clé publique `pub`.

```
verify(sign(m, priv), pub) = m
```

Chaîne de blocs sécurisée (1/2)

On utilise la fonction de hachage SHA-256 pour garantir l'intégrité de la chaîne de blocs.

Pour cela, un bloc n contient toujours l'empreinte numérique du bloc $n-1$.



De cette manière, il est impossible d'ajouter ou supprimer un bloc sans que cela ne se voit.

Chaîne de blocs sécurisée (1/2)

Est-ce que l'ajout d'une empreinte numérique suffit à sécuriser la chaîne de blocs ?

Chaîne de blocs sécurisée (1/2)

Est-ce que l'ajout d'une empreinte numérique suffit à sécuriser la chaîne de blocs ?

Une manière de modifier ou supprimer un bloc i est de recalculer l'empreinte numérique dans tous les blocs $k > i$.

Chaîne de blocs sécurisée (1/2)

Est-ce que l'ajout d'une empreinte numérique suffit à sécuriser la chaîne de blocs ?

Une manière de modifier ou supprimer un bloc i est de recalculer l'empreinte numérique dans tous les blocs $k > i$.

Comment peut-on empêcher ce calcul ?

Preuve de travail

Pour résoudre ce problème, certaines blockchains comme Bitcoin imposent une forme particulière à l'empreinte d'un bloc, par exemple qu'elle commence par n chiffres 0, où n est un entier choisi en fonction de la difficulté voulue pour calculer les empreintes :

$$\texttt{sha256(b)} = \underbrace{000...000}_{n} xxxx$$

Preuve de travail

Pour résoudre ce problème, certaines blockchains comme Bitcoin imposent une forme particulière à l'empreinte d'un bloc, par exemple qu'elle commence par n chiffres 0, où n est un entier choisi en fonction de la difficulté voulue pour calculer les empreintes :

$$\texttt{sha256(b)} = \underbrace{000...000}_{n} xxxx$$

Pour résoudre ce problème, seul un nombre entier (appelé nonce) peut être ajouté au bloc.

Il n'existe pas de méthode connue autre que la force brute pour résoudre ce problème. Il faut donc dépenser beaucoup d'énergie (donc d'argent) si on souhaite tricher.

Cette technique de sécurisation de la blockchain est appelée preuve de travail (Proof-of-Work, POW)

Consensus par preuve de travail (1/3)

L'ajout d'un bloc (donc des transactions) dans une blockchain imposant la preuve de travail nécessite que des machines se chargent d'effectuer le (lourd) calcul de l'empreinte du bloc.

Ces machines sont appelées des mineurs.

Consensus par preuve de travail (1/3)

L'ajout d'un bloc (donc des transactions) dans une blockchain imposant la preuve de travail nécessite que des machines se chargent d'effectuer le (lourd) calcul de l'empreinte du bloc.

Ces machines sont appelées des mineurs.

Si plusieurs machines décident de participer à ce calcul, la première qui trouve l'empreinte gagne.

Elle propage alors le bloc qu'elle vient de miner à toutes les autres machines (mineur ou autres), qui peuvent alors vérifier (facilement) qu'elle a en effet trouver la bonne empreinte.

Toutes les machines peuvent alors ajouter ce bloc à leur copie de la blockchain.

Consensus par preuve de travail (2/3)

Malgré la preuve de travail, il est possible que deux machines (ou plus) réussissent à miner un bloc au “même moment”.

Comment choisir quel bloc ajouter à la blockchain ?

Consensus par preuve de travail (2/3)

Malgré la preuve de travail, il est possible que deux machines (ou plus) réussissent à miner un bloc au “même moment”.

Comment choisir quel bloc ajouter à la blockchain ?

Solution :

Supposons qu’une machine ait une copie de la blokchain avec n blocs et qu’elle reçoive un bloc dont l’indice est k.

Consensus par preuve de travail (2/3)

Malgré la preuve de travail, il est possible que deux machines (ou plus) réussissent à miner un bloc au “même moment”.

Comment choisir quel bloc ajouter à la blockchain ?

Solution :

Supposons qu’une machine ait une copie de la blokchain avec n blocs et qu’elle reçoive un bloc dont l’indice est k.

- Si $k = n + 1$, alors elle ajoute ce bloc à sa (copie de la) blockchain, s’il est valide et que les transactions qu’il contient le sont également.

Consensus par preuve de travail (2/3)

Malgré la preuve de travail, il est possible que deux machines (ou plus) réussissent à miner un bloc au “même moment”.

Comment choisir quel bloc ajouter à la blockchain ?

Solution :

Supposons qu’une machine ait une copie de la blokchain avec n blocs et qu’elle reçoive un bloc dont l’indice est k.

- Si $k = n + 1$, alors elle ajoute ce bloc à sa (copie de la) blockchain, s’il est valide et que les transactions qu’il contient le sont également.
- Si $k \leq n$, alors elle l’ignore

Consensus par preuve de travail (2/3)

Malgré la preuve de travail, il est possible que deux machines (ou plus) réussissent à miner un bloc au “même moment”.

Comment choisir quel bloc ajouter à la blockchain ?

Solution :

Supposons qu’une machine ait une copie de la blokchain avec n blocs et qu’elle reçoive un bloc dont l’indice est k.

- Si $k = n + 1$, alors elle ajoute ce bloc à sa (copie de la) blockchain, s’il est valide et que les transactions qu’il contient le sont également.
- Si $k \leq n$, alors elle l’ignore
- Si $k \geq n$, alors elle demande à la machine ayant miné ce bloc sa copie de la blockchain afin de remplacer la sienne.

De cette manière, chaque machine cherche toujours à avoir la plus grande blockchain, car elle représente une preuve d’un travail plus importante, donc un plus grande ”richesse”.

Consensus par preuve de travail (3/3)

Quel intérêt une machine d'une blockchain a-t-elle à miner des blocs, puisque cela coûte très cher ?

Consensus par preuve de travail (3/3)

Quel intérêt une machine d'une blockchain a-t-elle à miner des blocs, puisque cela coûte très cher ?

Réponse : Miner rapporte de l'argent.

Exercice 3 : Proof-of-work

Étendre vos miners afin qu'ils regroupent les transactions envoyées par les wallets (et propagées par les autres miners) dans des blocs.

La construction de ces blocs devra utilisée l'algorithme de Proof-of-work (en fixant une difficulté).

Lorsqu'un miner finalise un bloc, il le communique au reste du réseau.