

Vérification des propriétés de sûreté d'un protocole de loterie Bitcoin

Guillaume Stunault
Etudiant
Telecom Nancy

Lucas Vignali
Etudiant
Telecom Nancy

Résumé—Les Smart Contracts sont des programmes qui exécutent de façon automatique les termes d'un contrat, et sans besoin d'une tierce-personne de confiance pour vérifier leur bon déroulement. [1] Ils sont de plus en plus utilisés avec l'essor de la blockchain et des cryptomonnaies. Ainsi leur sécurité et leur exactitude sont cruciales pour garantir l'équité entre les différentes parties. [8], [9] Nous nous sommes donc intéressés à un protocole de loterie Bitcoin [11] afin de vérifier plusieurs de ces propriétés cryptographiques avec Tamarin [5].

I. INTRODUCTION

Pour notre projet de PIDR nous avons comme sujet : **Vérification des « smart contracts » sur la blockchain**. Ce sujet nous a été proposé par M. Jannik DREIER, membre du LORIA et de l'équipe PESTO, accompagné de M. Steve Kremer.

Suite à l'essor des applications liées à la blockchain et principalement celle du Bitcoin, des règles de sécurité comme les "Smart Contracts" doivent être mises en oeuvre pour la sûreté de ces protocoles. Pour une loterie, il faut s'assurer qu'aucun participant ayant signé le contrat ne se retrouve sans paiement car l'exécution du contrat est automatique.

Le but de ce PIDR a donc été de modéliser un système de smart contract. Pour cela nous avons utilisé un logiciel créé par l'équipe PESTO du LORIA : **Tamarin** [5]. Sur ce logiciel nous avons modélisé un protocole de loterie et vérifié certaines **propriétés de sûreté** (qu'une exécution incorrecte est impossible).

II. ÉTAT DE L'ART

A. La Blockchain

La blockchain est une technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée, et fonctionnant sans organe central de contrôle.

Une blockchain constitue une base de données qui contient l'historique de tous les échanges effectués entre ses utilisateurs depuis sa création. Ces échanges sont enregistrés sous forme de blocs, qui mis bout à bout forment une chaîne, d'où le terme blockchain.

Cette base de données est sécurisée et distribuée : elle est partagée par ses différents utilisateurs, sans intermédiaire, ce qui permet à chacun de vérifier la validité de la chaîne. [7]



FIGURE 1. Représentation d'une blockchain [7]

L'intérêt de la blockchain réside dans l'aspect décentralisé de la base de données qui est stockée sur les différents serveurs des utilisateurs et fonctionne sans intermédiaire ce qui limite les frais d'infrastructure. Cette base de données que beaucoup comparent à un grand livre comptable – public et partagé – contient un historique infalsifiable des transactions qui est mis à jour en temps réel par les utilisateurs. Les utilisateurs valident chaque transaction et vérifient la cohérence de celle-ci grâce au registre.

Pourquoi infalsifiable ?

Distribuée, et non centralisée, la base de données est aussi doublement sécurisée. D'abord par un système de cryptographie dite "asymétrique". Cela signifie simplement qu'il faut deux clés différentes (une privée, une publique) pour soumettre une transaction dans la blockchain.

Ensuite, chaque bloc est validé par les noeuds du réseau appelés les "mineurs". Les "mineurs" chargés de vérifier la validité des transactions bloc par bloc sont des particuliers, rémunérés pour mettre à disposition la puissance de calcul de leurs processeurs en résolvant des fonctions de hachage cryptographique.

Dans la blockchain du Bitcoin, cette technique s'appelle le "Proof-of-Work" (preuve de travail). [2]

Ainsi pour manipuler la blockchain, il faudrait pouvoir falsifier plus de la moitié des noeuds du système, ce qui correspond à pirater des milliers d'utilisateurs au même moment. Techniquement, il s'agit d'une prouesse impossible.

que registre : elle assure ainsi une meilleure traçabilité des produits et des actifs.

- Les smart contracts : il s'agit de programmes autonomes qui exécutent automatiquement les conditions et termes d'un contrat, sans nécessiter d'intervention humaine une fois démarrés.

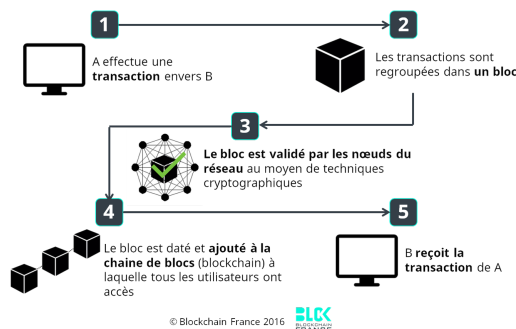


FIGURE 2. Fonctionnement de la blockchain [7]

Le potentiel de la blockchain [7]

Bien que souvent associé au Bitcoin et autres cryptomonnaies, le caractère décentralisé de la blockchain, couplé avec sa sécurité et sa transparence, promet des applications bien plus larges :

- Les applications pour le transfert d'actifs (utilisation monétaire, mais pas uniquement : titres, votes, actions, obligations...)
- Les applications de la blockchain en tant

B. Le Bitcoin

Le Bitcoin est une monnaie virtuelle mais aussi un système de paiement pair à pair. C'est la première monnaie électronique décentralisée. Ce type de monnaie possède différents avantages :

- Échange de particulier à particulier ce qui implique des frais inférieurs aux banques
- Utilisable dans tous les pays
- Les comptes ne peuvent pas être gelés
- Pas de condition

Les bitcoins peuvent être générés par toute personne possédant un ordinateur et faisant tourner un logiciel appelé "mineur de bitcoin". Cette création de bitcoin requiert de travailler sur chaque bloc de transaction. Ceci est ajusté par le réseau pour que la création des bitcoins soit prédictible et limitée. Enfin les bitcoins sont stockés dans des porte-monnaie électroniques. Chaque transaction est vérifiée puis stockée sur le réseau.

C. Les smart contracts

Les **smarts contracts** sont des programmes autonomes qui une fois lancés exécutent automatiquement des conditions définies préalablement et inscrites sur la blockchain. Par exemple c'est ce qu'il se passe lorsque l'on se souscrit à une assurance et que en cas de problème on est remboursé sans avoir à faire quelque chose. L'avantage de ce type de contract repose sur le fait qu'ils sont dans la blockchain, et donc qu'il ne sont pas modifiables. Dans le cas où ils ne seraient pas dans la blockchain, alors ils seraient modifiables.

D. Notions cryptographiques nécessaires à la compréhension du protocole

1) *Cryptographie asymétrique*: Le principe de chiffrement asymétrique (appelé aussi chiffrement à clés publiques) est apparu en 1976, avec la publication d'un ouvrage sur la cryptographie par Whitfield Diffie et Martin Hellman. [3], [4]

Dans un cryptosystème asymétrique (ou cryptosystème à clés publiques), les clés existent par paires (le terme de bi-clés est généralement employé) :

- Une clé publique pour le chiffrement
- Une clé secrète pour le déchiffrement

Ainsi, dans un système de chiffrement à clé publique, les utilisateurs choisissent une clé aléatoire qu'ils sont seuls à connaître (il s'agit de la clé privée). A partir de cette clé, ils déduisent chacun automatiquement une clé publique. Les utilisateurs peuvent s'échanger cette clé publique au travers d'un canal non sécurisé.

Lorsqu'un utilisateur désire envoyer un message à un autre utilisateur, il lui suffit de chiffrer le message à envoyer au moyen de la clé publique du destinataire. Ce dernier sera en mesure de déchiffrer le message à l'aide de sa clé privée (qu'il est le seul à connaître). [3]

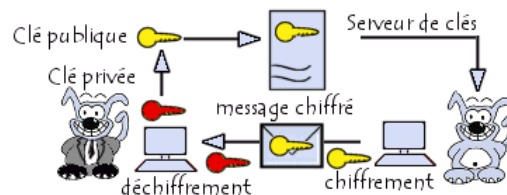


FIGURE 3. Envoi de messages par chiffrement asymétrique [3]

Ce chiffrement permet de s'assurer de **l'authenticité de l'expéditeur**. [13]

2) Les fonctions de hachage cryptographique:

Une fonction de hachage cryptographique est une fonction qui, à une donnée de taille arbitraire, associe une image de taille fixe.

Une propriété essentielle est qu'elle est pratiquement impossible à inverser, c'est-à-dire que si l'image d'une donnée par la fonction se calcule très efficacement, le calcul inverse d'une donnée d'entrée ayant pour image une certaine valeur se révèle impossible sur le plan pratique. Pour cette raison, on dit d'une telle fonction qu'elle est à sens unique. [12], [14].

Les fonctions de hachage sont utilisées pour garantir **l'intégrité** d'une donnée. Si un message est corrompu, son haché ne sera plus le même. [6]

Une fonction de hachage transforme un message de taille arbitraire en message de taille fixe. Il

y a donc un problème : comme il y a plus de messages possibles que de hachés possibles, plusieurs messages peuvent donc avoir le même haché. Cela s'appelle une collision. [10], [12] Pour une fonction de hachage F , on demande qu'elle soit :

- résistante au calcul de préimage (étant donné y difficile de trouver $x = F(x)$)
- résistante au calcul de seconde préimage (étant donné x , difficile de trouver x' , tel que $F(x) = F(x')$)
- résistante aux collisions (difficile de trouver x et x' , tel que $F(x) = F(x')$)

Il est aujourd'hui très difficile de trouver des collisions sur les fonctions de hachage actuelles (SHA2-SHA3).

Les fonctions de hachage que nous utilisons dans Tamarin sont résistantes aux 3 propriétés ci-dessus.

3) *Signature*: La signature d'un document utilise à la fois la cryptographie asymétrique et les fonctions de hachage. C'est en effet par l'association de ces deux techniques que nous pouvons obtenir les 5 caractéristiques d'une signature (authentique, infalsifiable, non réutilisable, inaltérable, irrévocable). [6]

Si Alice souhaite signer un document et l'envoyer à Bob : Tout d'abord, elle génère l'**empreinte** du document au moyen d'une fonction de hachage. Puis, elle crypte cette empreinte avec sa clé privée.

Elle obtient ainsi la signature de son document. Elle envoie donc ces deux éléments à Bob

Pour vérifier la validité du document, Bob doit tout d'abord déchiffrer la signature en utilisant la clé publique d'Alice. Si cela ne fonctionne pas, c'est que le document n'a pas été envoyé par Alice.

Ensuite, Bob génère l'empreinte du document qu'il a reçu, en utilisant la même fonction de hachage qu'Alice (On supposera qu'ils suivent un protocole établi au préalable).

Puis, il compare l'empreinte générée et celle issue de la signature.

Si les deux empreintes sont identiques, la signature est validée. Nous sommes donc sûr que : C'est Alice qui a envoyé le document, Le document n'a pas été modifié depuis qu'Alice l'a signé. [6]

La signature numérique garantit l'**identité** du signataire, l'**intégrité** du document et la **non répudiation** du document signé par le signataire.

Dans Tamarin, il existe plusieurs fonctions qui utilisent la signature :

- `sign` : Cette fonction permet de signer un message à partir d'une clé secrète
- `verifySign` : Cette fonction permet de vérifier l'identité du signataire du message à partir de sa clé publique
- `revealingSign` : Cette fonction permet de retirer la signature d'un message à partir de la clé secrète du signataire

E. Tamarin

Tamarin est un logiciel collaboratif pour l'analyse symbolic et l'analyse de protocoles de sécurités. Ce logiciel permet donc de modéliser des protocoles pour vérifier leur exécution. L'écriture de protocole dans ce logiciel se décompose en plusieurs étapes. Tout d'abord on peut utiliser des fonctions déjà existantes par l'intermédiaire de built-in fonctions 4. Ces built-in permettent par exemple d'intégrer des fonctions de hashage.

```
builtins: hashing, asymmetric-encryption
```

FIGURE 4. Built-In

Ensuite il faut créer les règles. Les règles opèrent sur l'état du système exprimé sous la forme d'un multienemble de **faits**. Les faits sont en fait des prédicats contenant les informations d'états. Une fois toutes les règles, décrivant le fonctionnement du protocole, écrites on peut passer à l'écriture des propriétés.

En effet, il faut ensuite écrire les propriétés

permettant de vérifier la bonne exécution du protocole. Pour cela il faut trouver et écrire des règles de sécurité principalement. Par exemple nous avons écrit une règle vérifiant que la somme de Bitcoin en jeu dans notre protocole est constante, il n'y a pas d'argent ajouté ou perdu au cours d'une partie. Ces propriétés s'écrivent sous forme de lemme. Par exemple pour la propriété décrite ci-dessous, il faut regarder sur chaque trace du protocole si la somme des porte-monnaies des joueurs est bien égale à la totalité des gains mis en jeu au départ. Nous avons au final 5 lemmes détaillés dans la partie V.

exists-trace

" Ex J i. Win(J) @ i "

1) *Création d'une règle:* Pour créer une règle il faut tout d'abord lui donner un nom, elle se déclare tout simplement par : **rule Nom_Règle**. Ensuite, une règle contient 3 parties :

- Les entrées
- Les sorties
- Les "actions facts"

Les entrées correspondent tout simplement aux conditions d'entrée. Si on a cette entrée alors on applique la règle. La sortie détermine ce qui ressort de la règle. Enfin il y a les "actions facts", ils ressemblent aux faits mais contrairement à eux ils n'apparaissent que sur la trace. Ce sont les "actions facts" qui permettent de vérifier les lemmes.

Finalement une règle s'écrit sous la forme :

rule Nom_Règle :

[Entrées]

-[Action facts]->

[Sorties]

2) *Création d'un lemme:* Comme nous l'avons dit ci-dessus, pour vérifier les propriétés du protocole il faut créer des lemmes. Tout d'abord il faut déclarer les lemmes comme les règles : **rule Nom_Lemme**.

Ensuite un lemme est là pour vérifier est présente ou non durant l'exécution du protocole. Pour cela il faut parcourir les traces lors de l'exécution. Par exemple on peut regarder si à la fin on a bien un gagnant par le lemme suivant :

lemme Nom_Lemme :

III. LE PROTOCOLE DE LOTERIE

Nous allons analyser ce protocole de smart contract qui implémente une loterie Bitcoin. [11]

Ce protocole garantit :

- chaque joueur honnête aura (en moyenne) un gain non négatif, même dans la présence d'adversaires qui jouent contre
- Si tous les joueurs sont honnêtes, le protocole simule une loterie ordinaire : 1 joueur remporte les mises des autres joueurs

Le protocole utilise un arbre de tournoi : chaque manche le gagnant remporte la mise de l'adversaire

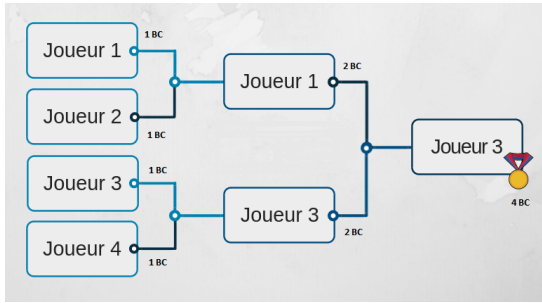


FIGURE 5. Protocole pour 4 joueurs avec mise de départ : 1 Bitcoin

Initialisation :

- chaque joueur génère N paires de clés, $O(N^2)$ signatures (N signatures pour N paires de clé * N transactions Win, Timeout... pour chaque joueur) et $\log(N)$ secrets qu'il hash ensuite pour tous les matchs qu'il va jouer.
- on vérifie que les hashes ne sont pas réutilisés
- ensuite il pose la mise en signant une transaction Init
- si un joueur ne pose pas la mise, les autres récupèrent leur mise
- Init est ajouté à la blockchain
- La transaction doit s'effectuer dans un temps donné, assez long pour qu'il permette la transaction. Ce temps est calculé pour permettre la génération des clés

- Init est ensuite séparée en N mises de départ : Win(p,p) ajoutées à la blockchain

Execution :

- C'est la phase de match, soient π_k le match actuel, p_1 et p_2 les joueurs qui s'affrontent
- Au départ, on ajoute à la blockchain, les transactions Win(π_{k-1} , p_1) et Win(π_{k-1} , p_2) si ça n'a pas déjà été fait
- p_1 commence, on ajoute Turn1(π_k , p_1 , p_2) à la blockchain : p_1 doit donc révéler son secret à temps en l'ajoutant, comme in-script dans Turn2(π_k , p_1 , p_2)
- Ainsi, p_2 peut vérifier que le hash de p_1 correspond au hash envoyé au départ
- p_2 connaît son propre secret et exécute la fonction aléatoire $w = \text{winner}(\pi_k, p_1, p_2, Sk_1, Sk_2)$
- p_2 ajoute finalement à la blockchain la transaction Win(w , π_k) avec pour in-script son secret Sk_2 .
- Chaque joueur doit chacun son tour révéler sa clé dans un temps imparti sinon il perd.

Mise :

A tous les tours, chaque joueur mise 1 bitcoin. Pour éviter la fraude et qu'un joueur quitte la partie en plein milieu avec l'argent qu'il a récolté, chaque joueur pose au début une somme de bitcoins égale au nombre de parties possibles par un joueur. Ainsi à chaque partie gagnée un bitcoin est retiré de cette somme, et si le joueur quitte la partie en plein milieu cette est reversée à chaque joueur affronté précédemment ce qui fait que le joueur en question ne gagne pas d'argent. Dans le cas où il perd une manche cette mise lui est rendu.

IV. PROTOCOLE RÉALISÉ

Nous avons simplifié le protocole au maximum pour tester ses diverses propriétés de sécurité. Nous prenons désormais uniquement **2 joueurs** A et B, et une seule manche de match. La mise vaut pour le moment : **1 bitcoin**
Nous définissons en brut la somme que contient les porte-monnaie des 2 joueurs (**3 bitcoins**).

De plus, pour modéliser la blockchain, nous considérons **les traces** de Tamarin. En effet, la blockchain rend les transactions enregistrées consultables à chaque moment tout comme les traces de Tamarin.

Tamarin peut donc être considéré comme une **blockchain**.

- A et B génèrent chacun une clé publique et une clé secrète
- A partir de cette clé secrète, le protocole assigne un porte-monnaie avec 3 bitcoins à chaque joueur
- Chacun des 2 joueurs génère ensuite un secret pour le match, et envoie son hash signé sur le réseau.
- La blockchain retire 1 Bitcoin du porte-monnaie de A et B pour créer une mise
- La blockchain crée un contrat où A et B posent leurs mises. Lorsque les 2 mises sont posées, le match peut commencer.
- La blockchain crée un contrat où A doit révéler son secret. Elle vérifie que le hash du secret envoyé correspond au hash envoyé avant le match
- Idem pour B
- Lorsque la blockchain possède les 2 hashes, elle peut déterminer aléatoirement un gagnant entre A et B.
- La blockchain ajoute les 2 Bitcoins au porte-monnaie du gagnant.

Normalement, la blockchain est censée déterminer un gagnant avec une fonction sur la parité des secrets (processus qui est défini aléatoire et non truquable).

Pour modéliser cela sur Tamarin, nous avons créé 2 règles identiques de victoire : une avec A, une avec B. Tamarin choisit alors aléatoirement de manière disjointe une de ces 2 règles.

On identifie chaque joueur de façon unique dans les traces du protocole par sa **clé secrète**. Cela permet de s'assurer que le joueur qui joue et qui peut remporter la mise, est l'un des joueurs qui a déposé l'argent. Voilà les règles que nous avons créées dans Tamarin :

- CreerPK : Cette règle permet à chaque joueur de créer une clé publique et une clé secrète.
- CreerSecret : Cette règle permet à un joueur de créer un secret, et de l'envoyer signé sur le réseau.
- LArgent : Cette règle retire à chaque joueur la mise. Le joueur signe ensuite sa mise, et l'envoie sur le réseau.
- Init : Lorsque le protocole a reçu toutes les signatures (ici uniquement 2), il crée une règle MatchA entre ces 2 joueurs.
- MatchA : Cela signifie que c'est au tour de A de révéler son secret. La blockchain vérifie que le secret que A révèle est bien celui qu'il a signé et envoyé sur le réseau. Ensuite, une règle MatchAB est créée.
- MatchAB : C'est au tour de B de révéler son secret. La blockchain effectue la même vérification que pour A. Ensuite, la blockchain crée aléatoirement, une règle WinnerA ou WinnerB.
- WinnerA/WinnerB : Le joueur récupère dans son porte-monnaie la mise en jeu.

Ainsi, contrairement au protocole original [11] qui prend en compte le temps passé. C'est à dire, que si un joueur ne joue pas ou reste bloqué trop longtemps dans une règle, alors il est considéré **perdant**. Notre protocole sur Tamarin peut rester bloquer indéfiniment dans une règle si le joueur refuse de jouer.

En effet, gérer le temps dans Tamarin était quelque chose de vraiment difficile.

V. PROPRIÉTÉS À PROUVER

Nous avons décidé, pour vérifier le bon fonctionnement du protocole d'implémenter des propriétés simples. Nous avons donc modéliser 3 propriétés :

- Il existe une exécution normale du protocole
- A la fin, le porte-monnaie de l'un contient 4 bitcoins, et celui du perdant 2 bitcoins
- Il y a un seul gagnant à la fin, qui peut être le joueur A ou le joueur B

Ces propriétés étaient en partie formulée dans la documentation du protocole. Chaque preuve de ses propriétés se décrit sous forme de lemme. Par exemple pour vérifier que le joueur A ou le joueur B peut gagner il faut regarder si il existe une version de l'exécution (trace) du protocole où à la fin on a WinnerA ou WinnerB, les fonctions définissant le gagnant.

Pour montrer que le choix de Tamarin est bien aléatoire. On veut prouver qu'il existe bien au moins une trace où A gagne, et une où B gagne :

```
#i : WinnerA[Win( ~n ).
  Monnaie( <~n, ('0'+1'+1')>, <~n.1, '0'>, ('0'+1'+1') ).
  Restrict( ('0'+1'+1') )]
```

FIGURE 6. Trace où A remporte le match

```
#i : WinnerB[Win( ~n.1 ).
  Monnaie( <~n, '0'>, <~n.1, ('0'+1'+1')>, '0', ('0'+1'+1') ).
  Restrict( ('0'+1'+1') )]
```

FIGURE 7. Trace où B remporte le match

A possède la clé secrète n , B possède la clé secrète $n.1$.

On remarque bien que les 2 règles WinnerA et WinnerB sont utilisées.

Et que c'est bien A qui gagne le match dans WinnerA et B qui gagne dans WinnerB.

Nous avons également choisi de prouver des propriétés qui s'appliquent pour toutes les traces de l'exécution.

Un seul gagnant

On cherche à montrer que 2 joueurs ne peuvent pas gagner en même temps.

Pour cela, nous avons ajouté un fait $\text{Win}(\text{sk})$ qui contient la clé secrète du gagnant dans chacune des règles WinnerA/WinnerB.

Propriété 1: $\text{All skA skB i j. Win}(\text{skA})@i \text{ Win}(\text{skB})@j \text{ not}(\text{skA}=\text{skB}) \implies \text{F}$

Cela signifie que si on se limite à une exécution du protocole : c'est impossible d'avoir 2 clés secrètes skA , skB différentes, et 2 faits $\text{Win}(\text{skA})$ au moment i , $\text{Win}(\text{skB})$ au moment j .

```
lemma un_seul_gagnant:
  all-traces
  "∀ skA skB #i #j.
    (((Win( skA ) @ #i) ∧ (Win( skB ) @ #j)) ∧
    (¬(skA = skB))) =
    (⊥)"
  simplify
  solve( Win( skA ) @ #i )
```

FIGURE 8. Somme des porte-monnaie à l'initialisation

Répartition correcte de l'argent sur chaque trace

Pour vérifier que la somme d'argent en jeu est juste pendant toute l'exécution du contrat, nous avons ajouté un fait Monnaie qui contient le porte-monnaie du joueur A, le porte-monnaie du joueur B, la somme mise en jeu et le total : $\text{Monnaie}(\langle \text{skA}, \text{xA} \rangle, \langle \text{skB}, \text{xB} \rangle, e, t)$ avec skA , skB les clés secrètes de A et B, xA , xB les porte-monnaie de A et B.

Ce fait est situé dans chaque trace où l'argent en jeu est modifiée (à l'initialisation, lorsque les mises sont données, et lorsque le gagnant récupère la somme). On vérifie pour chacune des traces si on garde la relation : $\text{xA} + \text{xB} + e = t$.

Nous initialisons l'argent de départ lors de la création des clés secrètes. Nous avons donc choisi de rendre la règle CreerPk **unique**. Ainsi, chaque joueur ne possédera qu'un seul porte-monnaie et une clé unique pendant toute la durée de la loterie.

Le protocole que nous avons écrit ne limite pas la loterie à une exécution : un joueur qui gagne peut rejouer s'il le veut.

Nous avons donc défini l'argent de départ des 2 joueurs à 1 bitcoin pour se limiter à une seule exécution.

```
#vr.3 : Creer_pk[Once( ,
  Monnaie( <~n, ('0'+1')>, <~n.1, ('0'+1')>, '0', ('0'+1'+1') ) ]
```

FIGURE 9. Somme des porte-monnaie à l'initialisation

Sur cette exécution, A remporte la loterie.

T3('0', ~n, ~n.1, ~n.2, ~n.3, ('1'+1'))	Monnaie(<sign(~n, ~n), '0'>, <sign(~n.1, ~n.1), '0'>, ('0'+1'+1'), ('0'+1'+1'))
#i : WinnerA[Win(~n), Monnaie(<~n, ('0'+1'+1')>, <~n.1, '0'>, '0', ('0'+1'+1')), Restrict(('0'+1'+1'))]	
Monnaie(<~n, ('0'+1'+1')>, <~n.1, '0'>, '0', ('0'+1'+1'))	

FIGURE 10. Somme des porte-monnaie après la victoire de A

On remarque que A possède désormais 2 bitcoins, B en possède 0, il n'y a plus d'argent en jeu et la somme d'argent totale est correcte ($2 + 0 = 2$).

La propriété est prouvée automatiquement par Tamarin pour chaque trace.

```
lemma repartition:
  all-traces
  "∀ skA xA skB xB e t #i.
    (Monnaie( <skA, xA>, <skB, xB>, e, t ) @
  #i) ⇒
    (( '0'+ '0'+t ) = (e+xA+xB))"
  simplify
  solve( Monnaie( <skA, xA>, <skB, xB>, e, t ) @ #i
  )
```

FIGURE 11. Répartition correcte de l'argent sur chaque trace

VI. CONCLUSION

Finalement, nous avons réussi à modéliser une exécution du protocole en y intégrant des propriétés simples à modéliser. Ce projet était une véritable découverte du monde de la recherche et nous a permis d'apprendre de nouvelles compétences dans celui-ci. C'était un projet très intéressant sur un sujet d'actualité et nous a permis d'en apprendre plus sur le monde

de la blockchain et des cryptomonnaies.

Pour la suite nous avons plusieurs possibilités. Nous avons modélisé des propriétés simples pour nous permettre de vérifier le bon déroulement du protocole. Cependant il y a plusieurs modification que l'on pourrait faire. Tout d'abord, nous avons modélisé le protocole avec seulement 2 joueurs, le but étant de le modéliser pour N joueurs. Dans ce protocole nous avons aussi défini deux règles WinnerA et WinnerB définissant le gagnant, A ou B. Ces règles ne correspondent pas exactement à celle explicitées dans le protocole de départ. En effet dans la documentation du protocole il est expliqué que le gagnant est défini à partir de la parité des secrets. Ce type de règle étant difficilement implémentable en Tamarin, nous avons décidé de réaliser une règle plus simple qui choisi A ou B comme gagnant.

Nous aurions pu également nous intéresser à vérifier des propriétés de *liveness* (la propriété sera vraie après une certaine étape de l'exécution) [15]. Par exemple, garantir qu'un joueur qui quitte la partie ne peut récupérer son argent qu'avant le premier tour, sinon il perd son argent.

VII. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Mr Steve Kremer et Mr Jannik Dreier pour nous avoir proposé ce sujet.

RÉFÉRENCES

- [1] Ethereum : « smart contract », où le contrat auto-exécutant. <https://www.ethereum-france.com/smart-contract-ou-le-contrat-auto-executant/>.
- [2] 7x7 : Comprendre la technologie blockchain. <https://www.7x7.press/7-questions-pour-enfin-comprendre-la-technologie-blockchain>.
- [3] COMMENTCAMARCHE.NET : Les systèmes à clé publique. <https://www.commentcamarche.com/contents/201-les-systemes-a-cle-publiques>.
- [4] CRYPTAGE : Chiffrement à clé publique. <http://www.cryptage.org/cle-publique.html>.
- [5] Jannik Dreier Simon Meier Ralf Sasse Benedikt Schmidt DAVID BASIN, Cas Cremers : Tamarin prover.
- [6] IGM Université de MARNE LA VALLÉE : La signature numérique. <http://www-igm.univ-mlv.fr/dr/XPOSE2006/depail/fonctionnement.html>.
- [7] Blockchain FRANCE : Découvrir la blockchain. <https://blockchainfrance.net/decouvrir-la-blockchain/c-est-quoi-la-blockchain/>.
- [8] Blockchain FRANCE : Smart contracts - définition et applications. <https://blockchainfrance.net/2016/01/28/applications-smart-contracts/>.
- [9] Deloitte FRANCE : A quoi servent les smart contracts. <https://equationdelaconfiance.fr/decryptage/mais-quoi-servent-les-smart-contracts>.
- [10] E. Thomé JANNIK DREIER : Fonctions de hachage. Cours Telecom Nancy.
- [11] Roberto Zunino MASSIMO BARTOLETTI : Constant-deposit multiparty lotteries on bitcoin. <https://eprint.iacr.org/2016/955.pdf>.
- [12] RYX : Les fonctions de hachage cryptographique. <https://zestedesavoir.com/tutoriels/1895/les-fonctions-de-hachage-cryptographiques/>.
- [13] WIKIPEDIA : Cryptographie asymétrique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Cryptographie_asymétrique.
- [14] WIKIPEDIA : Fonction de hachage cryptographique. https://fr.wikipedia.org/wiki/Fonction_de_hachage_cryptographique.
- [15] WIKIPEDIA : Vivacité (informatique). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Vivacité_\(informatique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Vivacité_(informatique)).