Parcours :

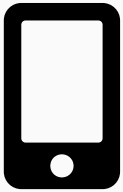
- 2013 - 2017 ; Licence et Master à l'ENS Cachan
- Sep. 2017 - Sep. 2020 ; Thèse au LSV et LORIA avec Hubert Comon et Steve Kremer
- Nov. 2020 - 2022 ; Postdoc au CISPA (Allemagne) avec Cas Cremers

Méthodes formelles en sécurité

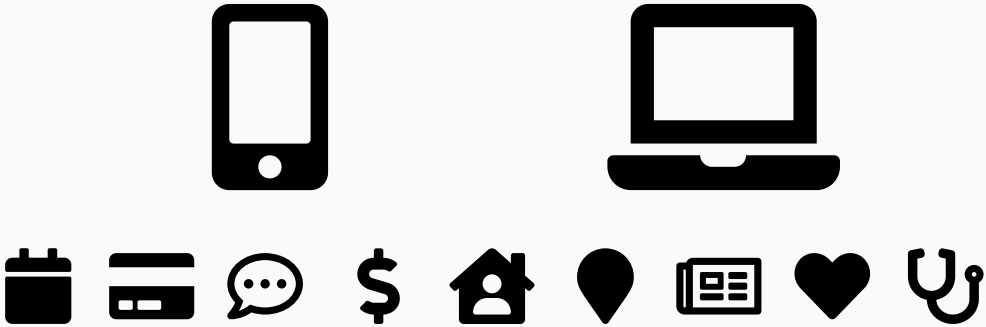
Charlie Jacomme

16 Mars 2022

La révolution technologique



La révolution technologique



Le droit à la vie privée

Le droit à la vie privée est vital pour certaines personnes :

- Les journalistes dans des endroits dangereux.
- Les homosexuels dans des pays où c'est un crime. (encore 69 dans le monde...).
- Les Ouïghours traqués via leurs téléphones en Chine.

Même si on n'a rien à cacher, c'est important de le cacher.

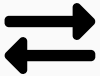
La sécurité de nos données et le droit à la vie privée sont essentiels !

L'un des problèmes scientifiques

Comment fournir des garanties formelles, i.e., des preuves de sécurité ?

La première difficulté

Protocoles



SSH
TLS
GPG
...

La première difficulté

Matériel	OS	Implémentations	Primitives	Protocoles	Utilisateurs
					
					
		C++ Java Python ...	RSA AES ...	SSH TLS GPG ...	

La première difficulté

Matériel | OS | Implémentations | Primitives | Protocoles | Utilisateurs





C++
Java
Python
...

RSA
AES
...

SSH
TLS
GPG
...

La première difficulté

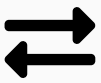
Matériel | OS | Implémentations | Primitives | Protocoles | Utilisateurs





C++
Java
Python
...

RSA
AES
...



SSH
TLS
GPG
...

L'objectif

Depuis les années 80

Obtenir des garanties formelles sur la sécurité du protocole en supposant les autres niveaux sécurisés.

$\hookrightarrow$ une preuve mathématique dans un modèle [Goldwasser,Micali,Dolev,Yao]

Preuve de protocole

En supposant que RSA est sécurisé, prouver dans un modèle qu'aucun attaquant ne peut casser la sécurité du protocole SSH.

Deuxième difficulté - La modélisation

Modèles d'attaquant

Deuxième difficulté - La modélisation

Modèles d'attaquant

Modèles de calcul

- Machine de Turing vs règles d'inférence
- Hypothèses sur les primitives (RSA)

Deuxième difficulté - La modélisation

Modèles d'attaquant

Modèles de calcul

- Machine de Turing vs règles d'inférence
- Hypothèses sur les primitives (RSA)

Modèles de compromissions

- Virus, Keylogger
- Phishing
- Clé long-terme ou éphémère

Deuxième difficulté - La modélisation

Modèles d'attaquant

Modèles de calcul

- Machine de Turing vs règles d'inférence
- Hypothèses sur les primitives (RSA)

Modèles de compromissions

- Virus, Keylogger
- Phishing
- Clé long-terme ou éphémère

Modèles du protocole

- Comportements optionnels
- Granularité des appels de fonctions

Deuxième difficulté - La modélisation

Modèles d'attaquant

Modèles de calcul

- Machine de Turing vs règles d'inférence
- Hypothèses sur les primitives (RSA)

Modèles de compromissions

- Virus, Keylogger
- Phishing
- Clé long-terme ou éphémère

Propriétés de sécurité

- Secret (robuste)
- Authentification
- Vie privée

Modèles du protocole

- Comportements optionnels
- Granularité des appels de fonctions

L'objectif

Des garanties fortes

Obtenir des preuves de sécurité dans des modèles aussi réalistes que possible.

$\hookrightarrow$ La complexité des preuves est vite trop élevée.

L'objectif

Des garanties fortes

Obtenir des preuves de sécurité dans des modèles aussi réalistes que possible.

$\hookrightarrow$ La complexité des preuves est vite trop élevée.

Cryptographie assistée par ordinateur (depuis les années 2000)

Des programmes nous aident à faire, vérifier ou automatiser les preuves.

(Proverif, Tamarin, Deepsec, EasyCrypt, CryptoVerif, Squirrel...)

Contributions principales

Autour des protocoles

- Une analyse détaillée via Proverif des protocoles d'authentification multi-facteurs.
  [Kremer, **Jacomme** - **CSF'18** *(A)*, **ACM TOPS** *(A)*]
- Un résultat de composition pour couper les preuves en des morceaux modulaires.
  [Comon, **Jacomme**, Scerri - **CCS'20** *(A*)*]
- Squirrel, un assistant de preuve pour la sécurité de protocoles.
  [Baelde, Delaune, **Jacomme**, Koutsos, Moreau - **S&P'21** *(A*)*]
- Extension de Squirrel à des attaquants quantiques.
  [Cremers, Fontaine, **Jacomme** - **S&P'22** *(A*)*] Nouvelle publication du postdoc

Contributions principales

Autour de la preuve de programme et des primitives

- Décision de la connaissance de l'attaquant sur les groupes finis.

  [Barthe, Fan, Gancher, Grégoire, **Jacomme**, Shi - **CCS'18** *(A*)*]

- Algorithmes de décision pour l'égalité de distributions et de propriétés de non-interférence pour les primitives.

  [Barthe, Grégoire, **Jacomme**, Kremer, Strub - **CSF'19** *(A)*]

- Complexité et décidabilité de l'équivalence de programmes probabilistes sur des corps finis.

  [Barthe, **Jacomme**, Kremer - **LICS'20** *(A*)*, **ACM TOCL** *(A)*]

À un plus haut niveau

Développements théoriques

- Travaux théoriques à l'intersection de plusieurs domaines.

  Sécurité Symbolique, Sécurité Calculatoire, Complexité, Décidabilité, Probabilités, Géométrie algébrique, Logique, Preuve de programme, Calcul Quantique

Mise en pratique

- Utilisation et/ou amélioration de plusieurs outils du domaine.

  Tamarin, Proverif, DeepSec, Sapic, EasyCrypt, MaskVerif, AutoGnP

- Le développement logiciel de Squirrel[1] ($\sim$ 30 000 lignes de code)
- Plusieurs études de cas (preuves de sécurité et détection de failles) :
  - Analyse de 6 000 scénarios de protocoles d'authentification multi-facteurs ;
  - preuve en Squirrel de SSH et de protocoles d'échange de clés post-quantiques.

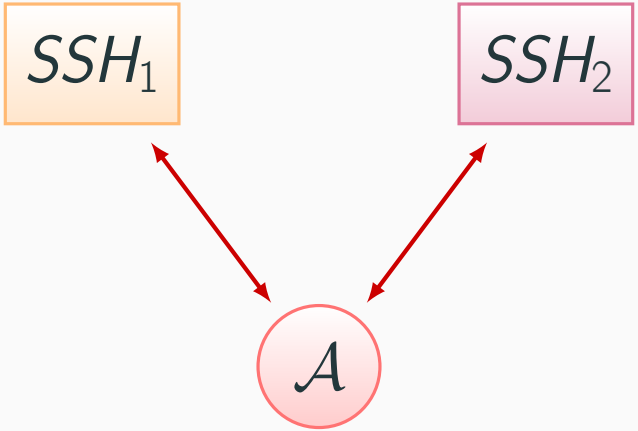
[1] squirrel-prover.github.io

Composition

La composition

Composition de deux protocoles

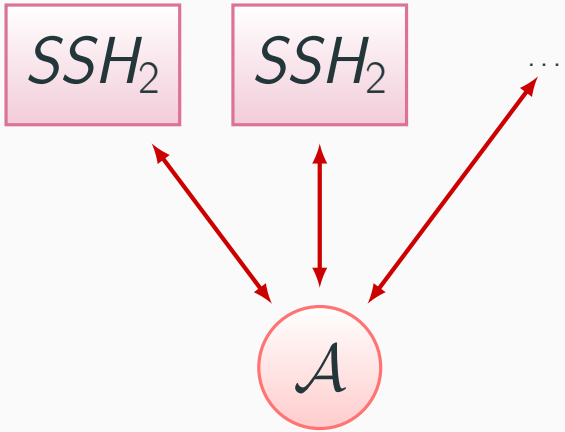
Si on a une preuve de sécurité pour SSH_1 contre un attaquant $\mathcal{A}$ et une preuve de sécurité pour SSH_2 contre $\mathcal{A}$, a-t-on une preuve des deux en même temps ?



La composition

D'une seule session à un nombre non borné

Si on a une preuve de sécurité pour une session de SSH_2, a-t-on une preuve pour plusieurs en même temps ?



Un problème ouvert

Limitations de l'état de l'art

Un sujet très étudié depuis plus de 20 ans, mais même les papiers récents ont toujours des limitations :

- Ne s'applique qu'à des cas de compositions restreints et précis ;

  Blanchet, CSF'18

- Ne s'utilise que très difficilement avec les outils ;

  Camenisch et al., ASIACRYPT'19

- Ne gère pas les protocoles avec passage d'état ou partage de secrets long terme, et donc pas la composition d'une session avec un nombre non borné.

  Brzuska et al., ASIACRYPT'18

Notre Contribution

Une technique générale de composition

- Un résultat générique de composition supportant le passage d'état, le partage de secrets long terme, et la réplication non bornée.
- Technique utilisable dans de nombreux outils existants.
  (e.g., Tamarin, ProVerif, DeepSec, Squirrel, CryptVerif, EasyCrypt)
- Preuve de SSH en Squirrel.

Oracle simulation: a technique for protocol composition with long term shared secrets.
H. Comon, C. ***Jacomme*** *and G. Scerri - CCS'20*

L'idée principale

Simulation par oracle

On donne à l'attaquant un accès partiel à la clé secrète via un oracle qui:

- est assez fort pour permettre de simuler SSH_1 ;
- mais est assez faible pour que SSH_2 soit toujours sécurisé.

Dans ce cas précis

Tous les messages de SSH_x contiennent un tag "*version x*".
$\hookrightarrow$ On peut prouver la sécurité de SSH_2 pour un attaquant $\mathcal{A}^{\mathcal{O}}$, où $\mathcal{O}$ permet d'utiliser la clé secrète pour tout message ne contenant pas "*version 2*".

Idée principale

Théorème (informel)

Si $\mathcal{O}$ permet de simuler $\mathcal{Q}$, alors :

$$\forall \mathcal{A}.\ \mathcal{P} \parallel \mathcal{A}^{\mathcal{O}} \models \phi$$
$$\Rightarrow$$
$$\forall \mathcal{A}.\ \mathcal{P} \parallel \mathcal{Q} \parallel \mathcal{A} \models \phi$$

De plusieurs sessions à une seule

Un problème plus profond

Deux copies de SSH_2 ont exactement le même comportement et utilisent le même code.

Ce qui nous sauve

Chaque copie de SSH_2 doit tirer de l'aléa frais au moment de son exécution.

Renversement conceptuel

- Traiter tous les aléa frais comme des secrets long terme tirés magiquement au début de l'univers plutôt qu'au moment de l'exécution du protocole ;
- Donner un oracle à l'attaquant lui permettant d'utiliser la clé secrète pour tout message qui ne dépend pas de l'aléa frais.

Et après ?

Mon objectif

Garanties formelles

Fournir des garanties formelles aussi précises que possible sur tous les protocoles déployés à grande échelle.

$\hookrightarrow$ demande encore de nombreux développements théoriques et pratiques

Court terme

Preuves d'échanges de clés

Squirrel et le résultat de composition permettent déjà d'aller plus loin que les autres outils, mais on a uniquement regardé des propriétés simples pour le moment.

Fondations pour les preuves de protocoles d'échange de clés en Squirrel

- Définir en Squirrel des propriétés complexes de secret robuste, simplifiées avec la composition.
- Lier formellement les preuves en Squirrel avec les techniques de preuve classiques pour ces protocoles (BR, CK,eCK,...).
- Valider par des études de cas (Signal, KEMTLS,...).

À moyen terme

Faire des analyses multi-niveaux

Pour faire une analyse approfondie d'un protocole, il est nécessaire de combiner les avantages de plusieurs outils, ce qui est peu fait aujourd'hui.

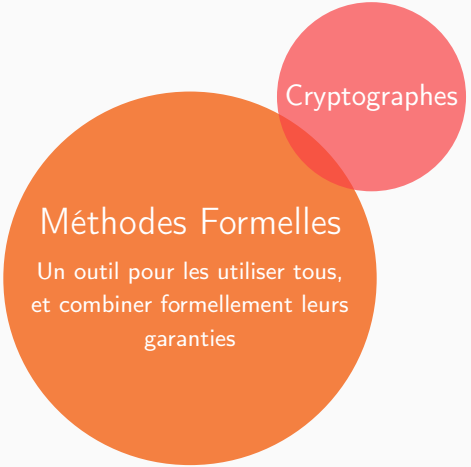
Inter-opérabilité

Une plateforme qui permet de combiner automatiquement et formellement les garanties de plusieurs outils :

- D'abord pour Proverif et Tamarin, pour combiner leurs forces respectives ;
- puis intégrer Squirrel, CryptoVerif, . . . ;
- Et faire des études de cas de manière exhaustive, à plusieurs niveaux de détail et avec plusieurs outils.

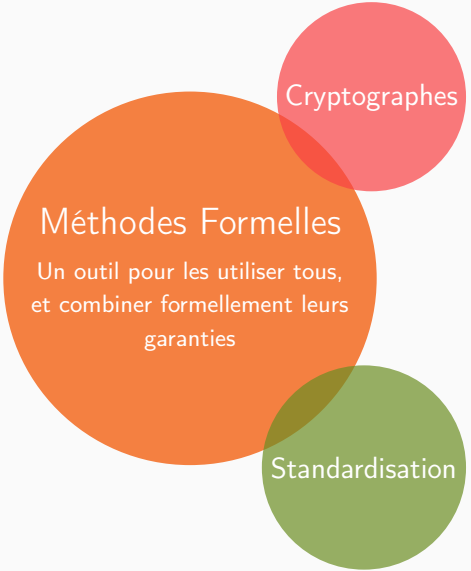
Sur le long terme

Sur le long terme



- Utiliser les outils dès le design des nouveaux protocoles.

Sur le long terme



- Utiliser les outils dès le design des nouveaux protocoles.

- Vérifier les standards existants ;
- Participer au développement des nouveaux standards.

Sur le long terme

- Utiliser les outils dès le design des nouveaux protocoles.

- Rendre accessibles à des ingénieurs certaines de nos techniques.

- Vérifier les standards existants ;
- Participer au développement des nouveaux standards.

Sur le long terme

- Diverses opportunités via l'intégration dans un laboratoire

- Utiliser les outils dès le design des nouveaux protocoles.

- Rendre accessibles à des ingénieurs certaines de nos techniques.

- Vérifier les standards existants ;
- Participer au développement des nouveaux standards.

Intégration et long terme

IRISA - Rennes

- Insertion naturelle avec collaborations existantes (D. Baelde et S. Delaune)
- \+ Implication dans les standards (Mohamed Sabt).
- \+ Preuves de sécurité de systèmes de base de données (Tristan Allard).

LIMOS - Clermont

- Insertion naturelle avec Pascal Lafourcade sur les protocoles.
- \+ Preuves de sécurité de systèmes industriels (également Pascal Lafourcade).

VERIMAG - Grenoble

Ouverture thématique vers la preuve de programme :

- modèles d'attaquant au niveau du code pour l'injection de fautes ou les processeurs sécurisés (Cristian Ene, David Moniaux, Marie-Laure Potet).

Questions ?

Parcours

- 2013 - 2017 ; Licence et Master à l'ENS Cachan.
- Sep. 2017 - Sep. 2020 ; Thèse au LSV et LORIA avec Hubert Comon et Steve Kremer.
- Nov. 2020 - 2022 ; Postdoc au CISPA (Allemagne) avec Cas Cremers.

Résumé du CV académique et nouveautés

- Prix de thèse du GdR sécurité et accessit Gilles Kahn
- Conférences = 4 A*, 2 A, 1 New ; Journaux = 2 A
  + 1 nouvelle publication à S&P'22 (A*) + 1 shepherding à USENIX'22 (A*).
- Collaborations à Rennes, Paris, Nancy, Nice, Bochum, New-York et Saarbrucken.
- Comité de Programme de INDOCRYPT'21 (*B*) et de CSF'22 (*A, principale de la communauté méthodes formelles*)
- Implication dans la standardisation à l'IETF d'un protocole. (`https://datatracker.ietf.org/doc/agenda-113-lake/`)

Nouvelles publications depuis la soumission du dossier

S&P'22

Extension de Squirrel à des attaquants quantiques.

A Logic and an Interactive Prover for the Computational Post-Quantum Security of Protocols. Cremers, Fontaine, **Jacomme** - **S&P'22** *(A*)*

USENIX'22 - sheperding

Une plateforme pour utiliser Proverif et Tamarin en combinaison.

SAPIC+: protocol verifiers of the world, unite! Cheval, **Jacomme**, Kremer, Künnemann - **USENIX'22** *(A*)*