

# Implémentations pour un usage industriel

intro

## 1.1 Identification des besoins et spécificités

On a pu voir grâce aux chapitres précédents que la conception et l'implémentation d'un système sécurisé est un problème difficile. Une première étape est de concevoir des primitives et protocoles mathématiquement sécurisés. Une seconde étape est de s'assurer que leurs implémentations sont effectivement sécurisées, d'abord d'un point de vue mathématique contre des attaques logiques (aspect fonctionnel : le code implémente correctement les bons concepts cryptographiques), mais aussi contre des attaques très bas niveau, les attaques temporelles.

Avec l'objectif de concevoir un système sûr, il nous faut donc identifier toutes les tâches à réaliser pour arriver à bout de ce projet. En plus de ce travail de planification, l'identification et l'intégration d'outils déjà implémentés nous permettra de d'avancer plus rapidement vers cet objectif.

### Point de départ

En reprenant ces deux étapes, on va identifier quels sont nos leviers et nos possibilités pour un développeur pour avancer dans la conception de notre graal.

La première étape de conception de primitives cryptologiques et de protocole n'est pas du ressort du développeur. Elle appartient aux cryptologues et aux chercheurs en sécurité mathématique. Ce sont eux qui conçoivent et maintiennent des bibliothèques cryptographiques, des boîtes à outils qui proposent les briques de sécurité nécessaires aux systèmes sécurisés.

Plusieurs bibliothèques existent [AHa98 ; Por16 ; Pol+20] et remplissent différents objectifs : rétro-compatibilité, politique temps constant, *etc.* Notre choix est à réaliser en fonction des spécificités du produit que l'on cherche à déployer.

La seconde étape est à distinguer en deux parties. Cette opération de vérification de la sécurité de l'implémentation peut-être réalisée sur le produit fini et sur les bibliothèques employées par le produit. Comme introduit, cette étape a pour objectif la vérification formelle du code du programme et la vérification matérielle au niveau assembleur.

Utiliser la bibliothèque **Hacl\*** [Pol+20 ; Zin+17] permet d'avancer la première étape et la première partie de la seconde étape. Cette bibliothèque a été conçue formellement et vient avec les preuves mathématiques de la sécurité de son implémentation. Comme présenté en ??, cette bibliothèque est programmée en F\*. Le projet permet une exploitation en C et en assembleur [Zin+17].

En revanche, la seconde étape de la seconde partie nous demande une vérification au niveau de l'assembleur. Si certaine partie de cette librairie sont codées en assembleur, la majorité du projet reste du F\* traduit vers C. Il faut réaliser une analyse. Dans le cadre de cette étude, l'outil d'analyse binaire retenu pour réaliser cette tâche est **Binsec**. Cette outil est implémenté en Ocaml et est maintenu par une équipe de chercheurs ingénieurs géographiquement proche de l'équipe PROSECCO Inria. Cet avantage permet des échanges plus directs et donc une facilité quand à la mise en place du projet.

L'objectif est donc d'analyser Hacl\* dans son entièreté. Avec cette analyse complète, si elle est correcte, alors les deux étapes de réalisation d'un système sûr seront réalisées. Cela signifie que la première librairie cryptographique formellement sûre et résistante aux attaques temporelles sera conçus.

## Objectifs à réaliser

Sans reprendre les explications du fonctionnement de Binsec, voir "[ref vers fonctionnement de Binsec](#)", l'analyse se réalise sur un fichier binaire à l'aide d'un carnet d'instructions à préciser. Avec ce point de départ, on peut commencer à construire notre carnet de spécifications.

**Fichier binaire.** Il faut donc des fichiers binaires à fournir à Binsec. Or comme chacun le sait, plus un binaire est imposant, plus son analyse est difficile. Et comme Binsec emploie l'analyse symbolique, explorer un binaire imposant a un coût de mémoire quadratique sur le parcours des instructions du binaire. L'idéal est donc d'analyser plein de petits fichiers binaires.

**Analyse complète.** Chaque fonction de Hacl\* doit être analysée. En poursuivant la condition précédente, on peut essayer de concevoir un binaire par fonction analysé. On distribue ainsi l'analyse et on parcourt ainsi toute les fonctions présentent dans la librairie.

**Analyse correcte.** Si on se rappelle comment fonctionne les optimisations (voir le tableau ??) il faut faire attention avec certaines optimisations qui simplifient le code par soustraction d'opérations. Le fichier ne doit pas seulement contenir un appel de fonction, il faut une légère mise contexte.

---

```

1  #include <stdlib.h>
2
3  #include "Hacl_AEAD_Chacha20Poly1305_Simd128.h"
4
5  #define BUF_SIZE 16384
6  #define KEY_SIZE 32
7  #define NONCE_SIZE 12
8  #define AAD_SIZE 12
9  #define TAG_SIZE 16
10
11 uint8_t plain[BUF_SIZE];
12 uint8_t cipher[BUF_SIZE];
13 uint8_t aead_key[KEY_SIZE];
14 uint8_t aead_nonce[NONCE_SIZE];
15 uint8_t aead_aad[AAD_SIZE];
16 uint8_t tag[TAG_SIZE];
17
18 int main (int argc, char *argv[])
19 {
20   Hacl_AEAD_Chacha20Poly1305_Simd128_encrypt
21     (cipher, tag, plain, BUF_SIZE, aead_aad, AAD_SIZE, aead_key, aead_nonce);
22   exit(0);
23 }
```

---

Code 1 – Code d'analyse de la fonction `Hacl_AEAD_Chacha20Poly1305_Simd128_encrypt`, testé lors de la prise main de Binsec et Hacl\*

De même, comme nos fichiers analysés font appel à la librairie extérieur Hacl\*, l'emploi de l'option `-static` est nécessaire pour prévenir la mise place de lien vers la librairie par-

tagée dans le fichier binaire. Cette option ne nuit pas à la qualité de l'analyse, elle permet en revanche d'avoir tous les éléments sous la main lorsque l'on déassemble un fichier binaire. Retirer cette option lors de la compilation, c'est se rajouter des lourdeurs et rallonger la temps requis pour la vérification manuelle d'un fichier.

**Couverture de compilateur.** Les travaux de SCHNEIDER et al. [Sch+24] ont clairement mis en évidence que le choix du compilateur est à considérer. Il faut donc identifier quel compilateur nous permet d'avoir des fichiers binaires les plus sécurisés. On peut aussi identifier quels optimisations produisent la rupture de sécurité dans le binaire en étudiant plus en avant le comportement de ceux-ci.

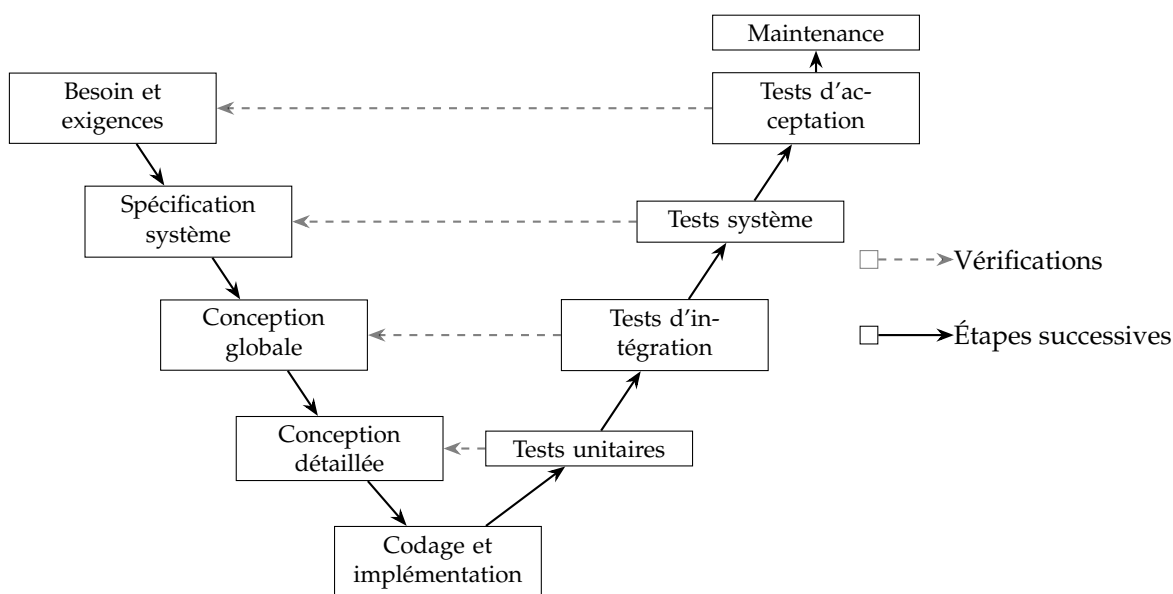
**Couverture d'architectures.** x86\_64 et ARM sont les architectures matérielles les plus répandues dans le monde. Étendre l'analyse vers différentes plateformes et observer les différences qui émergent nous permettraient d'avancer dans la direction de la conception d'une librairie cryptographique universelle. On aussi étendre l'analyse vers d'autres architectures comme PowerPC ou RiscV.

**Automatisation.** Faire cette analyse sur un fichier binaire, comme le code 1, avec trois axes de complexité (complétude, de la couverture d'architectures et des compilateurs) n'est pas envisageable à la main. Il faut absolument que cette analyse soit automatisée.

## 1.2 Initialisation et tests variés

Dans le cadre de la programmation sécuritaire, où sont développés les systèmes avec pour objectif de un accident par siècle (métros automatiques, trains, avions...), les projets sont conçus selon le principe du cycle en V. Au contraire de la méthode Agile où on avance vers les problèmes en les résolvant au fur et à mesure, avec ce principe le développement est beaucoup plus long mais permet d'esquiver les problèmes qui, dans son contexte d'usage, peuvent entraîner des décès.

FIGURE 1.1 – Cycle en V



Appliquer cette méthode à l'entièreté de ce projet n'est pas envisageable à cause du coût temporel qui est très élevé. On va se concentrer sur la réalisation d'une preuve de concept et se concentrer sur la partie automatisation. La conception du produit sera minimale et le développement des couvertures sera soumis à un futur travail.

### Identification des besoins et exigences

On a déjà conçu notre carnet d'exigence, en revanche on ne connaît pas le comportement des outils que l'on souhaite employer. La première opération est de s'approprier le

fonctionnement des outils que l'on s'apprête à employer. Le code 1 est un exemple de test réalisé dans cette phase du projet.

Binsec est un outil uniquement utilisable au travers d'un terminal. Il s'invoque avec son alias, le binaire à analyser et les options de l'analyse qui sera effectué :

```
$ binsec -sse -sse-script $(BINSEC_SCRIPT) -checkct $(BINARY)
```

#### Code 2 – Commande Binsec basique

L'option `-sse` permet d'activer l'analyse par exécution symbolique, `-sse-script` associer à un fichier (ici `BINSEC_SCRIPT`) permet d'instruire notre analyse, préciser des stubs<sup>1</sup> et des initialisations, enfin `-checkct` active la vérification des propriétés temps constant au sein du fichier binaire indiqué par `BINARY`. Binsec renvoie dans le terminal le résultat de son analyse : `[secure, unknown, insecure]`. Le second est invoqué lorsque l'analyse est incomplète.

Cette phase «Test et Identification des exigences» permet de confronter plusieurs fonctions de Hacl\* et de se familiariser avec le langage d'instruction qu'admet l'option `-sse-script`. Un tutoriel complet est accessible pour comprendre le fonctionnement l'outil Binsec depuis sa page officielle<sup>2</sup>.

---

```

1  starting from core with
2      argv<64> := rsi
3      arg1<64> := @[argv + 8, 8]
4      size<64> := nondet                # 0 < strlen(argv[1]) < 128
5      assume 0 < size < 128
6      all_printables<1> := true
7      @[arg1, 128] := 0
8      for i<64> in 0 to size - 1 do
9          @[arg1 + i] := nondet as password
10         all_printables := all_printables && " " <= password <= "~"
11     end
12     assume all_printables
13 end
14
15 replace <puts>, <printf> by
16 return
17 end
18
19 reach <puts> such that @[rdi, 14] = "Good password!"
20 then print ascii stream password
21
22 cut at <puts> if @[rdi, 17] = "Invalid password!"
23
24 halt at <printf>

```

---

#### Code 3 – Instructions permettant de trouver le mot d'un passe d'un binaire exercice

Ce code présenté ici est un exemple d'usage de Binsec et permet de réaliser une attaque sur un binaire issu d'une plateforme d'apprentissage à la sécurité logiciel<sup>3</sup>. L'exercice consistant à retrouver le mot de passe caché d'un binaire. Dans le cadre de notre exercice d'analyse de la politique temps constant, le script 4 est plus simple.

1. Terme anglais du lexique de la rétro-ingénierie ; module logiciel simulant la présence d'un autre.

2. <https://binsec.github.io/>

3. <https://crackmes.one/>

Ce script a été conçu avec pour objectif de vérifier les résultats apportés par [Sch+24] concernant une fuite présente sur la fonction «*FStar\_UInt64\_eq\_mask*» et d'étendre l'analyse vers d'autres architectures. Dans une première démarche d'automatisation, ce code a été généré automatiquement par un script shell. On voit ici que l'analyse ne parcourt pas l'entièreté du binaire, seulement 8 sections sont chargés (sur 24). L'analyse commence à l'appel de la fonction `main` et se termine à la ligne 8 avec une adresse de fin. Cette adresse de fin est produite par le script shell pour attraper la fin de la fonction `main`.

---

```

1 load sections .plt, .text, .rodata, .data, .got, .got.plt, .bss from file
2
3 secret global r, cin, y, x
4
5 starting from <main>
6
7 with concrete stack pointer
8 halt at 0x00000000000000464
9 explore all
10

```

---

Code 4 – Instructions permettant d'analyser le code ?? compilé vers RiscV-32

Ce modèle, qui nous servira de base pour la suite du développement, a permis une analyse rapide entre différents compilateurs et différentes architectures.

### Application et observation entre architectures et compilateurs

FIGURE 1.2 – Tableau de résultats d'analyse Binsec pour architecture ARMv7 et ARMv8

opt\fonction analysée	cmovznz4				
Clang+LLVM	14.0.6	15.0.6	16.0.4	17.0.6	18.1.8
-O0	✓	✓	✓	✓	✓
-O1	✓	✓	✓	✓	✓
-O2	✓	✓	✓	✓	✓
-O3	✓	✓	✓	✓	✓
-Os	✓	✓	✓	✓	✓
-Oz	✓	✓	✓	✓	✓

✓ : binaire secure

On comprend, à la lecture du tableau 1.2, que la politique temps constant est considérée respectée par Binsec sur les versions testé ainsi que pour les différentes options de compilation. Ce résultat est encourageant pour la suite du projet.

FIGURE 1.3 – Tableau de résultats d'analyse Binsec pour architecture Risc-V

opt\fonction analysée	cmovznz4 - 64 bits		cmovznz4 - 32 bits	
Compilateur et architecture	gcc 15.1.0	clang 19.1.7	gcc 15.1.0	clang 19.1.7
-O0	~	×	~	×
-O1	✓	×	✓	×
-O2	✓	×	✓	×
-O3	✓	×	✓	×
-Os	✓	×	✓	×
-Oz	✓	×	✓	×

✓ : binaire secure ; ~ : binaire unknown ; × : binaire insecure

Les résultats dans le tableau 1.3 est indéniable : la version 19.1.7 de clang rend le code source perméable à des attaques temporelles.

#### Identification de défaut

Pour construire le tableau 1.3, plusieurs alertes se sont levées et on permis de mettre en évidence un bug présent dans Binsec. Cette erreur dans l'analyse symbolique provoquait l'arrêt de l'exploration par explosion de l'usage de la mémoire. Les registres `ld` (*load*) et `sd` (*store*) étaient mal gérés. En particulier l'opérande `ld`, simulé par un tableau, n'était jamais vidé. Cette découverte a amené un correctif et une amélioration de Binsec. De part l'envergure de ce projet, il est possible que d'autres erreurs dû à Binsec soient découvertes. L'exploration de nombreuses et nouvelles ISA<sup>a</sup>, surtout avec Risc-V qui est encore en développement et perfectionnement, permet de renforcer cet outil plus efficacement et rapidement que par la construction de tests manuels.

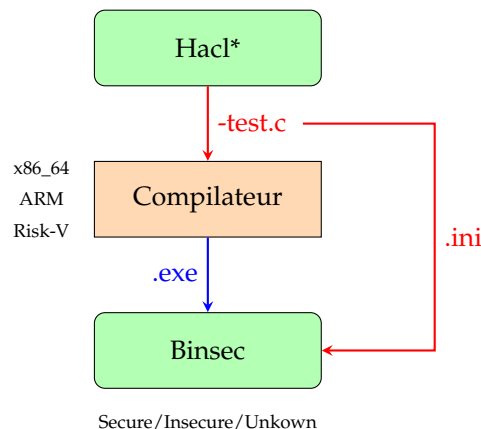
<sup>a</sup>. Ancronyme anglais pour Architecture de Jeu d'Instruction, désigne l'ensemble des instructions assembleur associées à une architecture.

En explorant plus en avant le code binaire, on découvre que ces erreurs sont dus à l'opérande `beqz`<sup>4</sup>. L'ISA de Risc-V n'a pas à sa disposition un opérande comme `cmov` en X86\_64 ou ARM. Donc l'application d'optimisation de compilation force l'usage de cette opérande qui n'est pas en temps constant. L'optimisation qui réalise ce changement se nomme «*Inst-CombinePass*».

On a pu observer ici une manifestation indéniable des précédents résultats proposés par d'autres travaux de recherche. Une solution serait de modifier l'ISA pour permettre cette opération d'être en temps constant. Celle qui a été retenue c'est d'employer un `pragma`, ici `# pragma clang optimise <off/on>`. Cette instruction donnée dans le code source indique au compilateur de désactiver ses optimisations pour le code contenu entre les deux balises `off`, `on`. Cette solution entraîne des pertes de performance et des ralentissements quand au temps de compilation et à l'usage des ressources, il vaut mieux l'utiliser avec parcimonie que désactiver toutes les optimisations de compilations.

Nous avons notre besoin, nous avons nos exigences, nous avons fait des tests pour comprendre le processus que l'on va devoir automatiser. Ces idées peuvent être illustrées par la figure 1.4 : depuis Hacl\*, on extrait une fonction que l'on veut tester en un fichier de test en C, on identifie les paramètres secrets et on conçoit le script pour Binsec, on compile notre fichier C à notre guise, on lance l'analyse Binsec.

FIGURE 1.4 – Flot de travail de l'outil d'analyse à concevoir



#### Transition

4. Effectue un branchement si la valeur du registre consulté est zéro. Cette opérande est propre à Risc-V.

# Érysichthon à jamais affamé

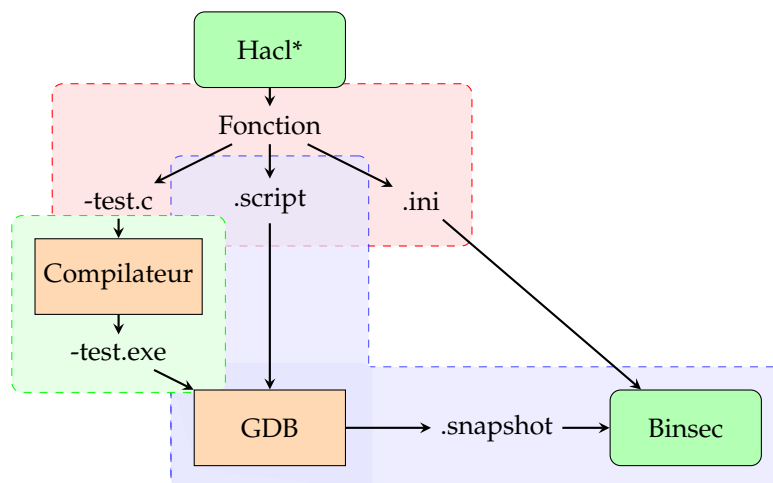
intro

## 2.1 Planification et préparations

Nous avons nos spécificités technique et nous savons qu'elle forme notre outil doit avoir. Nous pouvons commencer par synthétiser les opérations nécessaires.

Nous allons donc concevoir des protocoles pour identifier les étapes nécessaires pour que Binsec analyse entièrement un fichier et nous renvoie un parmi [secure, unknown, insecure]. Le protocole x86\_64 est particulier. Depuis la version 0.5.0 de Binsec il est possible de fournir un «cliché mémoire»<sup>1</sup> pour accélérer l'analyse. On va se servir de cet avantage pour l'intégrer notre graphe d'exécution. La machine sur laquelle le projet sera développé est sur une architecture x86\_64, cela nous permet d'utiliser l'outil GDB pour la génération de cliché mémoire.

FIGURE 2.1 – Protocole pour analyser des fichiers compiler en x86\_64

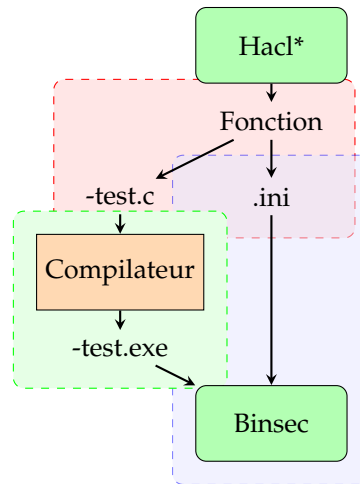


Ce graphe présente la chaîne d'étape à avoir pour obtenir une analyse Binsec depuis une fonction que l'on cible. Plusieurs zones sont distinguées. La zone verte correspond à l'étape de compilation, la zone bleue à l'étape de préparation de l'analyse et la zone rouge à la synthèse des fichiers de tests et d'instruction pour l'analyse. Ce choix de couleur est adapté à la difficulté attendu de chaque étape. L'opération de compilation consiste en une commande. L'opération de préparation d'analyse consiste aussi en deux commandes : un appel à GDB avec le binaire puis un appel à Binsec avec le cliché mémoire et les instruction d'analyse.

1. Plus couramment 'Core dump', terme technique anglais désignant une copie de la mémoire vive et des registres d'un programme. Ce fichier sert à être analysé, généralement par un débogueur.

Avec ce graphe réalisé, on peut le modifier pour préparer la voie à d'autres architectures. Dans un format plus générique voici comment se présente notre protocole d'analyse :

FIGURE 2.2 – Protocole générique d'analyse



Dans ce contexte, une question se pose : est-ce que la conception des script pour Binsec (*.ini*) est automatisable ou est-ce qu'il faudra utiliser des émulateurs pour générer des clichés mémoire et revenir dans le cas de la figure 2.1 ?

Cette question est importante parce que lorsqu'on analyse un fichier ARM par exemple, si le fichier source contient des appels à des fonctions systèmes, les `IFUNC`, celles-ci sont exécutées en fonction de l'architecture qui exécute le programme. Or Binsec n'a pas ces informations, il faut les fournir à la main. Voici le script nécessaire pour une vérification de la fonction «`Hacl_AEAD_Chacha20Poly1305_Simd128_encrypt`» compilé vers ARMv8.

```

load sections .plt, .text, .rodata, .data, .got, .got.plt, .bss from file

secret global input1, aad1

@[0x00000048f008,8] := <__memcpy_generic>
@[0x00000048f018,8] := <__memset_generic>
@[0x00000048f030,8] := <__memcpy_thunderx2>

lr<64> := 0xdeadbeef as return_address

starting from <main>
with concrete stack pointer

halt at return_address
halt at <_IO_puts>
explore all

```

Code 5 – Script d'instruction pour analyser un binaire compilé vers ARM

Les lignes 5 à 7 sont présente pour indiquer les branchement à effectuer par Binsec lorsque qu'il rencontre ces adresses. Cette opération automatiquement exécutée lors de l'initialisation de l'exécution doit ici être précisée avec les fonction présente dans le binaire. Automatiser ces affectations peut être difficile et nécessiter quelques outils d'analyse supplémentaires pour attraper les adresses qui ont besoin d'être réaffecté et leur attribuer les fonctions les plus adaptées.



### Nommer un outil

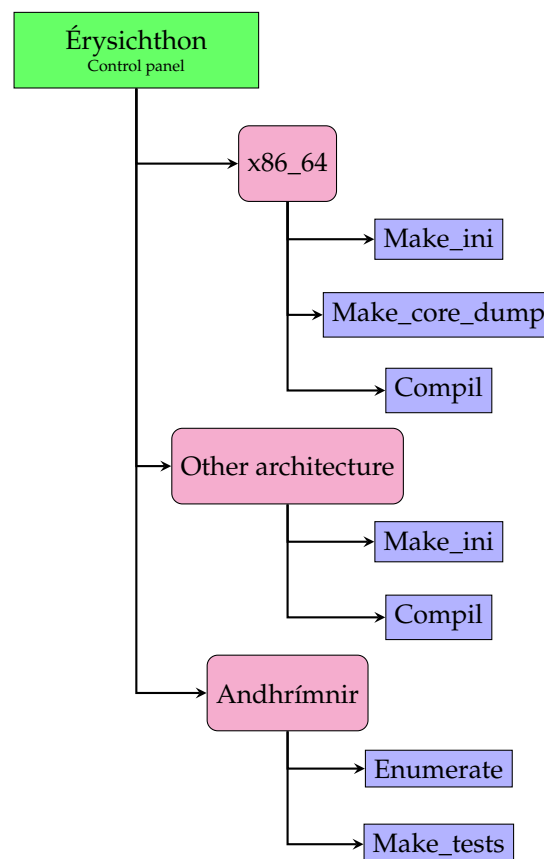
Rapidement il a fallu trouver un nom pour ce projet, l'appeler par "Notre outil..." devenait lourd et redondant entre les réunion hebdomadaire. En revanche trouver LE nom adéquat n'est pas une chose aisée, il peut être dû à une blague, une référence ou plus simplement liés au sens du projet. Dans notre cas, on aime la mythologie et le travail réalisé peut se résumer à "faut donner à manger à Binsec".

Érysichthon est une personnage de la mythologie grecque condamné à être affamé au point de se dévorer lui-même pour avoir détruit l'idole d'un dieu. Ce nom me plaît et sera retenu pour la suite du projet.

### Conception d'Érysichthon

On a des protocoles. On a des expériences sur des fonctions de Hacl\*. On a un nom. Il faut maintenant passer à l'échelle et concevoir un outil complet qui intéragit et exécute nos instructions. L'outil sera en somme une combinaison de script python, shell et de Makefile. Il faut donc les organiser et adapter leurs interactions pour arriver au bout de nos peines.

FIGURE 2.3 – Structure des modules d'Érysichthon



### Andhrímnir

Ce module de Érysichthon est particulier. Premièrement c'est le seul qui est aussi son nom. Ce module consiste à produire les fichiers qui seront compilés puis analysés par Binsec. Ce module est nommé d'après le cuisinier de la mythologie nordique, car comme lui, il prépare sempiternellement des mets pour son maître.

Ce module est nommé car il constitue un projet dans le projet, sa seule conception pris plus de la moitié du temps de développement total. C'est un outil qui, à partir d'un projet en C, est capable de générer automatiquement des tests qui compilent et peuvent ensuite être proposés à des outils d'analyse binaire. Ce module est agrégé à Érysichthon mais peut être porté vers d'autres projets. À la différence des logiciels qui produisent des tests

unitaires ( uniquement sur des projet Java, Haskell ou C# et souvent associé à des offres payantes), on a ici une couverture complète des fonctions portés par le projet C.

Ce module, comme son grand frère, fonctionne et est abouti, par contre il nécessite quelques opérations manuelles et peut être amélioré pour pouvoir supporter d'autre projet C. Actuellement il possède quelques optimisation associées à Hacl\* pour accélérer la réalisation de la preuve de concept.

## 2.2 Conception et usages

On va commencer par le petit frère, Andhrímnir.