

Introduction à la vérification de programmes

Polytech Paris-Saclay, PEIP 2, Informatique Option S3

Thibaut Benjamin, Henri Saubrabay, Philippe Volte-Vieira

5 Janvier 2026

Cours 3

Récapitulatif

Dans les cours précédents, nous avons vu :

- ▶ La méthode du variant pour prouver la terminaison des boucles.
- ▶ Les contrats de fonctions comprenant
 - Les pré-conditions : ce qu'il faut vérifier à chaque appel de fonction
 - Les variants : pour prouver la terminaison des fonctions récursives
 - Les post-conditions : ce qui est vrai à la sortie de la fonction.

Séance du jour

- ▶ Les invariants de boucle : pour prouver ce que fait une boucle.
- ▶ Une preuve d'un algorithme de tri

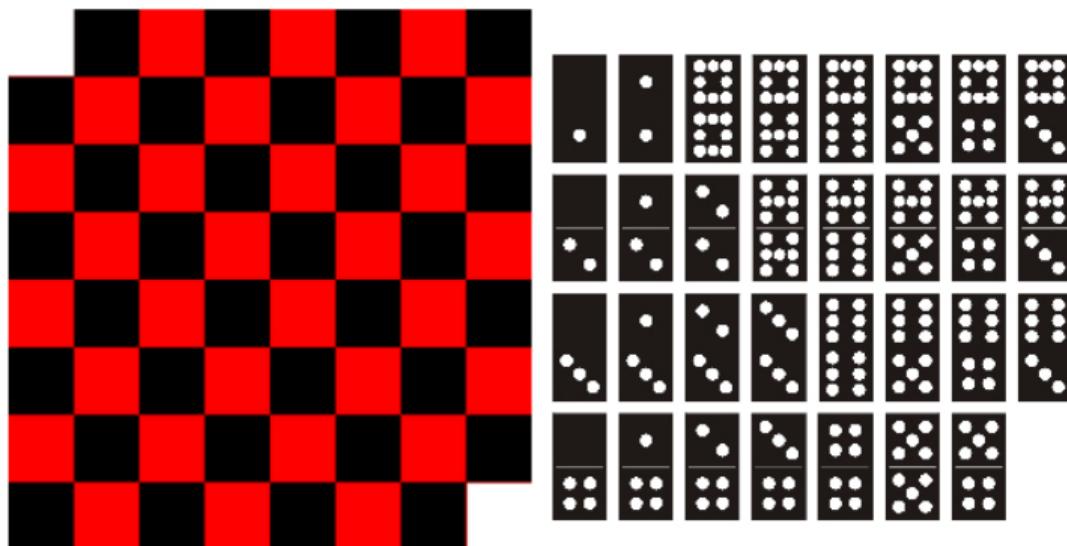
Les invariants de boucle

Les invariants de boucle

Introduction aux invariants

Un exemple informel

On considère un échiquier dans lequel on a enlevé deux coins opposés. On souhaite recouvrir cet échiquier complètement avec des dominos, qui doivent recouvrir deux cases, sans se chevaucher. Est-ce que c'est possible ?



Solution : Un invariant

- ▶ Chaque un domino on recouvre une case rouge et une case noire.
Notons N_k le nombre de case noires non recouvertes à l'étape k et R_k le nombre de cases rouges non recouvertes à l'étape k .
- ▶ On a donc $N_{k+1} - R_{k+1} = N_k - R_k$: La quantité $N - R$ est un *invariant* : elle garde la même valeur tout le long de la procédure.
- ▶ On démarre avec aucune case recouverte : $N_0 - R_0 = 2$. On ne peut jamais recouvrir toutes les cases, car cela impliquerait d'atteindre un état avec $N_k - R_k = 0 \neq 2$.

Analyse de la méthode de l'invariant

- ▶ On a remarqué que chaque nouvelle étape de notre programme satisfait une condition.
- ▶ Cela nous a permis de trouver un invariant.
- ▶ Grâce à cet invariant, on a pu transmettre de l'information du début à la fin du programme, pour prouver l'impossibilité de la question.

Les invariants en informatique

- ▶ En informatique, on va utiliser des invariants lorsque l'on a des boucles.
- ▶ Un invariant est une proposition qui satisfait deux critères :
 - Elle est vraie au moment de la première entrée dans la boucle.
 - Si elle est vraie au début d'une itération, elle est aussi vraie au début de la suivante.
- ▶ Cela implique que la propriété est vraie à chaque entrée dans la boucle. C'est une technique de raisonnement par récurrence.

Les invariants de boucle

Premiers exemples : invariants pour prouver les variants

Les invariants en Why3

- ▶ En Why3, on peut déclarer un invariant associé à une boucle à l'aide du mot-clé `//@invariant`
- ▶ Il est souvent nécessaire pour Why3 d'avoir un invariant afin de prouver les variants.

Un premier exemple, l'addition naïve

```
int additionBete (int a, int b){  
    // @requires b>0;  
    while (b != 0){  
        // @variant b;  
        // @invariant b>=0;  
        a = a + 1;  
        b = b - 1;  
    }  
    return a;  
}
```

Démo en Why3

Variant et invariant

- ▶ Pourquoi l'invariant est-il nécessaire pour prouver le variant dans cet exemple ?
- ▶ Comment aurait-on pu modifier le programme pour prouver le variant sans avoir besoin d'un invariant ?
- ▶ Dans les exercices suivants on reprend les exemples de variants vus dans les cours précédents et on ajoute les invariants nécessaires pour les prouver.

Exercice : Enumération des nombres triangulaires

Donner un variant et un invariant permettant de prouver le variant

```
void nombresTriangulaires(int n) {  
    int tr = 0, i = 1;  
    while (tr < n) {  
        tr = tr + i;  
        i++;  
        printf("%d ", i);  
    }  
}
```

Démo en Why3

Exercice : PGCD version itérative

Donner un variant, avec des préconditions et un invariant permettant de prouver le variant

```
int pgcd (int a, int b){  
    while(a != b){  
        if (a > b) { a = a - b; }  
        else{ b = b - a; }  
    }  
    return a;  
}
```

Démo en Why3

Rappel : PGCD récursif

```
int pgcd (int a, int b){  
    // @requires a > 0;  
    // @requires b > 0;  
    // @variant a + b;  
    if (a == b){ return a; }  
    else if (a > b){ return pgcd(b, a-b); }  
    else { return pgcd (a, b-a); }  
}
```

Comparer la réponse à l'exercice précédent avec cette spécification.

Les invariants de boucle

Utilisation des variants pour prouver les post-conditions

Principe général

- ▶ La méthode de l'invariant ne permet pas seulement de prouver des variants, elle donne un moyen général de caractériser ce qu'il se passe lors d'une boucle.

- ▶ On peut utiliser un invariant pour aider à prouver les post-conditions des fonctions.

Usage des labels

- ▶ **Attention** : En Why3 un invariant est nécessairement une condition booléenne : ça ne peut pas être un entier comme dans l'exemple de l'introduction.
- ▶ Pour construire ces booléens, on utilise souvent des « labels » grâce au mot clé `//@label`
- ▶ Si on a défini un label `L`, on peut écrire `at(e, L)` pour faire référence à la valeur qu'avait l'expression `e` au point de programme marqué du label `L`.

Exercice : Spécification complète de l'addition naïve

On reprend le code du début. Ajouter une postcondition qui spécifie le résultat que renvoie cette fonction, et un invariant permettant de prouver cette post-condition.

```
int additionBete (int a, int b){  
    // @requires b>0;  
    while (b != 0){  
        // @variant b;  
        // @invariant b>=0;  
        a = a + 1;  
        b = b - 1;  
    }  
    return a;  
}
```

Exercice : Somme des éléments d'un tableau

Sujet sur Why3

On suppose une fonction logique de somme partielles d'un tableau :

1. Définir une fonction logique `somme(int a[])` qui renvoie la somme des éléments du tableau `a`.
2. Spécifier le programme donné, à l'aide de ces fonctions.

Exercice : Indice du maximum d'un tableau

Donner et prouver le contrat de la fonction suivante, permettant de calculer l'indice du maximum d'un tableau non vide.

```
int indiceMax (int tab[], int n){  
    int indiceMax = 0;  
    for (int i = 0; i < n; i++){  
        if (tab[i] > tab[indiceMax]){  
            indiceMax = i;  
        }  
    }  
    return indiceMax;  
}
```

Démo sur Why3

Exercice : nombres triangulaires

Sujet sur Why3

1. Définir une fonction logique `triangulaire(int n)` qui renvoie la valeur du $n^{\text{ème}}$ nombre triangulaire.
2. A l'aide de cette fonction spécifier complètement le programme donné.
Attention : Why3 ne sera pas capable de prouver l'invariant de boucle, même si ce dernier est correct.

Exercice : plus petit nombre triangulaire plus grand qu'une borne

Sujet sur Why3

1. Définir une fonction logique `triangulaire(int n)` qui renvoie la valeur du $n^{\text{ème}}$ nombre triangulaire.
2. Spécifier le programme donné pour prouver que le résultat est un nombre triangulaire plus grand que n .
3. Affiner la spécification pour certifier que le résultat est le plus petit nombre triangulaire plus grand que n .

Les invariants de boucle

Preuve d'un algorithme de tri itératif

Objectif

- ▶ La dernière fois, on avait montré que la version récursive du tri par insertion renvoie toujours un tableau trié (sans prouver la fonction d'insertion).
- ▶ Aujourd'hui, on va faire la même chose pour la version itérative du tri par insertion.

Prédicats utilisés

- ▶ Définir un prédicat **trieJusque(int a[], int n)** qui dit que le tableau **a** est trié jusqu'à l'indice **n** exclus.

- ▶ Définir un prédicat **trie(int a[])** qui dit que le tableau **a** est trié.

Fonction d'insertion

Rappeler les spécifications de la fonction d'insertion, garantissant qu'elle trie le tableau

```
void insertion (int tab[], int n){  
    // CODE DE LA FONCTION  
}
```

Tri par insertion

Donner les spécifications (contrat, variant et invariant) pour la fonction de tri par insertion itérative suivante, garantissant que le tableau obtenu à la fin est trié.

```
void triInsertion(int tab[], int n){  
    for(int i = 1; i <= n; i++){  
        insertion(tab,i);  
    }  
}
```

Démo en Why3