Etude de PyBoolNet et de NuSMV-a

I. Algorithme de Tarjan et composantes fortement connexes :

Pour trouver les attracteurs, la bibliothèque PyBoolNet utilise la fonction **compute_attractors_tarjan**, cette fonction fait appelle à la fonction **strongly_connected_components** de la bibliothèque networkx en passant par la fonction **digraph2condensationgraph**.

Ainsi, à la fin de l'exécution, on récupère les différents attracteurs du réseau : les **steadystates** et les **cyclic**. Les premiers représentent les attracteurs « simples » tandis que les seconds sont les attracteurs cycliques.

Pour obtenir les composantes fortement connexes, on utilise une version non-récursive de l'**algorithme de Nuutila**, qui est une amélioration de l'algorithme de Tarjan.

Algorithme de Tarjan :

```
fonction tarjan(graphe G)
  num := 0
  P := pile vide
  partition := ensemble vide

  fonction parcours(sommet v)
    v.num := num
    v.numAccessible := num
    num := num + 1
    P.push(v), v.dansP := oui

    // Parcours récursif
    pour chaque w successeur de v
      si w.num n'est pas défini
        parcours(w)
        v.numAccessible := min(v.numAccessible, w.numAccessible)
      sinon si w.dansP = oui
        v.numAccessible := min(v.numAccessible, w.num)

    si v.numAccessible = v.num
      // v est une racine, on calcule la composante fortement connexe associée
      C := ensemble vide
      répéter
        w := P.pop(), w.dansP := non
        ajouter w à C
      tant que w différent de v
      ajouter C à partition
  fin de fonction

  pour chaque sommet v de G
    si v.num n'est pas défini
      parcours(v)

  renvoyer partition
fin de fonction
```

Algorithme de Nuutila :

```
1.  procedure COMP_TC(v);
2.  begin
3.      root(v) := v; C(v) := Nil;
4.      PUSH(v, nstack);
5.      hsaved(v) := HEIGHT(cstack);
6.      for each vertex w such that (v, w) ∈ E do begin
7.          if w is not already visited then COMP_TC(w);
8.          if C(w) = Nil then root(v) := MIN(root(v), root(w))
9.          else if (v, w) is not a forward edge then
10.             PUSH(C(w), cstack);
11.     end;
12.     if root(v) = v then begin
13.         create a new component C;
14.         if TOP(nstack) = v then Succ(C) := ∅
15.         else Succ(C) := {C};
16.         while HEIGHT(cstack) ≠ hsaved(v) do begin
17.             X := POP(cstack);
18.             if X ∉ Succ(C) then Succ(C) := Succ(C) ∪ {X} ∪ Succ(X);
19.         end;
20.         repeat
21.             w := POP(nstack);
22.             C(w) := C;
23.             insert w into component C;
24.         until w = v
25.     end
26. end;
27. begin/* Main program */
28.     nstack := ∅; cstack := ∅;
29.     for each vertex v ∈ V do
30.         if v is not already visited then COMP_TC(v)
31. end.
```

Différence entre l'algorithme de Trajan et celui de Nuutila :

La principale différence entre l'algorithme de Tarjan et celui modifié par Nuutila réside dans **l'amélioration de la fermeture transitive** (*transitive closure* en anglais).
La détection des composantes fortement connexes utilise l'algorithme de recherche en profondeur (**DFS**). Cependant, au lieu de construire partiellement les ensembles de successeurs des composantes puis de les combiner ou de les construire après avoir détecter complétement la composante, ces derniers sont créés pendant la recherche. Cela **évite des opérations** inutiles et notamment de scanner le graphe plusieurs fois.

L'algorithme de fermeture transitive utilisé dans cette modification génère un unique ensemble de successeur pour chaque composante pendant la recherche en profondeur.
Pour ce faire l'algorithme de Nuutila utilise une **pile auxiliaire** qui lui permet de collecter les composantes adjacentes qui seront nécessaires plus tard pour la construction de l'ensemble. Ainsi le graphe n'est **scanné qu'une seule fois**.

La trame principale de la détection des composantes fortement connexes est cependant la même que celle de Tarjan.

La pile auxiliaire (citée précédemment) utilisée dans l'algorithme est nommé **cstack**. Outre le fait d'éviter de scanner 2 fois les arrêtes partants des sommets de la composante parcourue, elle permet aussi de **stocker les composantes de manière consécutive** dans la pile et ainsi en cas de problème de mémoire, le parcours de la pile nécessite moins d'opérations de pagination que l'accès à la liste d'adjacence contenant les sommets des composants. (Cf. l'article original en pièce jointe).

Une fois qu'on a obtenu le graphe des composantes fortement connexes grâce à l'algorithme de Nuutila et qu'on l'a transformé en **condensation graph** (à l'aide de la méthode de networkx), on regarde **chaque nœud** du graphe, s'il n'a **pas de successeur** on en déduit que c'est un attracteur. On regarde alors s'il est **seul** ou s'il est **composé de plusieurs nœuds**, afin de le classer (**cyclic** ou **steadystates**).

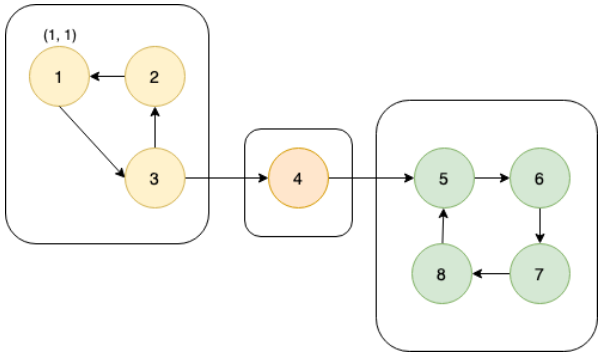
Implémentation de l'algorithme de Nuutila dans networkx :

Tout d'abord, il est important de préciser que les **deux algorithmes** (version récursive et non-récursive) ont été implémentés dans networkx. Cependant, nous **n'étudierons que la version non-récursive** car c'est celle choisie par les développeurs de PyBoolNet.

4 tableaux sont utilisés dans cet algorithme :

- **preorder :** il s'agit d'un **dictionnaire qui stocke les numéros des nœuds** en clé et leur position (avec l'algorithme de parcours en profondeur : DFS) en valeur
- **lowlink :** il s'agit d'un **dictionnaire qui stocke** en clé le **numéro du nœud dont les successeurs sont déjà dans le preorder**. **Sa valeur initiale sera la position actuelle donnée par le preorder**. Puis sa valeur sera mise à jour afin de garder en mémoire la composante fortement connexe dans laquelle il se situe. (Commence par 1)
- **scc_queue :** il s'agit d'une **pile qui stocke les éléments ne formant pas encore une composante** fortement connexe (la source n'est pas encore trouvée). A la fin de l'algorithme cette pile est vide.
- **scc_found :** il s'agit d'une **pile qui stocke tous les éléments faisant partie d'une composante** fortement connexe. Elle est mise à jour en piochant dans les éléments de scc_queue lorsque le nœud source est trouvé.

Ci-dessous, un exemple du fonctionnement de l'algorithme sur ce graphe :



Vidéo exemple de l'algorithme de Nuutila non récursif.

II. Utilisation de NuSMV dans PyBoolNet :

Les appels vers NuSMV se font dans la classe **ModelChecking** de PyboolNet. En effet, on peut trouver des références à NuSMV dans la classe Commitment mais il ne s'agit que d'appels vers des méthodes de la classe ModelChecking (counter_mc compte les appels/exécutions faites vers ses méthodes).

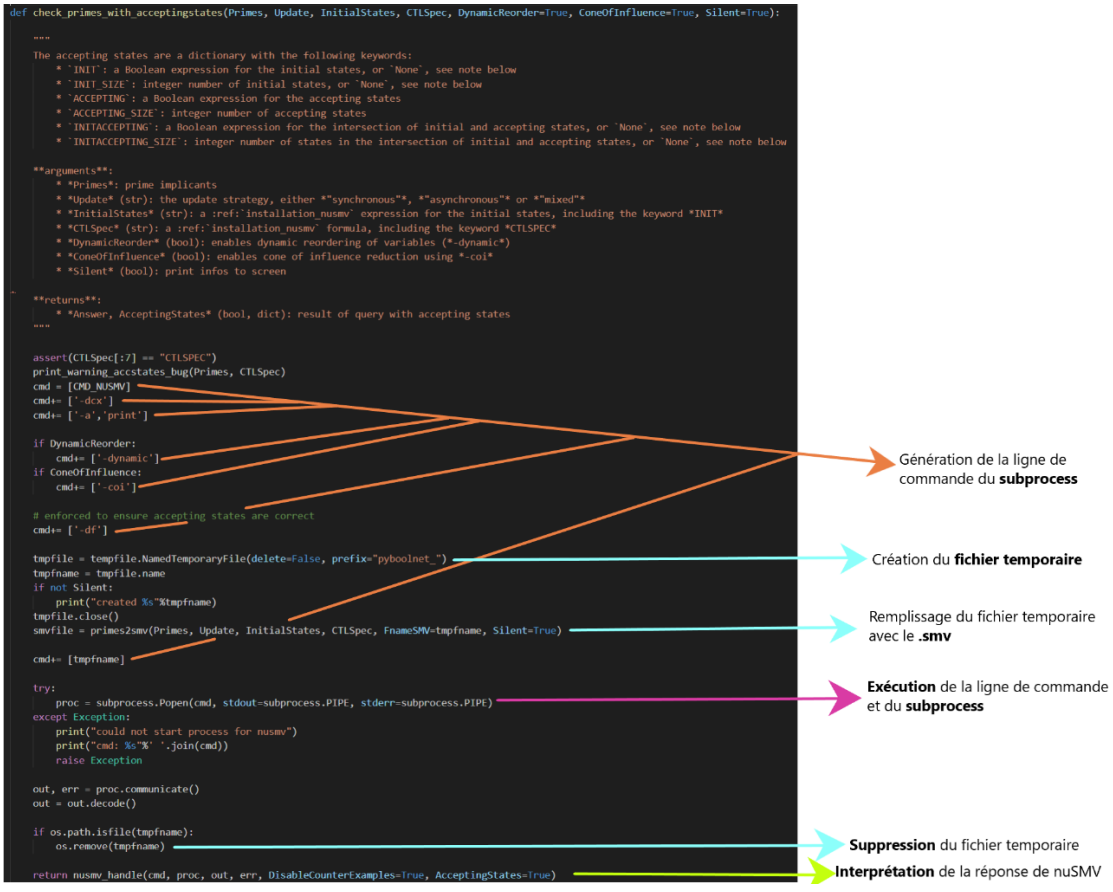
Prenons l'exemple de la méthode **check_primes_with_acceptingstates** citée dans l'article du créateur de PyBoolNet car c'est celle-ci qui nous intéresse pour la suite de nos recherches.

On y apprend que NuSMV est exécuté via un sous-processus (**subprocess**) dont la ligne de commande est générée en fonction des paramètres de la méthode.

On peut également voir qu'un **fichier temporaire** (accessible via /tmp sous UNIX) **est créé**. D'abord vide, il sera ensuite rempli à l'aide de la méthode **primes2smv** dont le but est de convertir le réseau booléen (transformé sous forme de primes) en format SMV.

Ensuite, le **processus exécute la ligne de commande** sur le fichier créé.

[**Attention :** Le fichier SMV n'est pas directement récupérable car il est supprimé après avoir été analysé par NuSMV et il n'y a pas de paramètres pour empêcher sa suppression.]



Pour finir, la méthode **nusmv_handle** est appelée lors du retour de la méthode afin d'**interpréter la réponse NuSMV**.

```python
def nusmv_handle(Command, Process, Output, Error, DisableCounterExamples, AcceptingStates):
    """
    **arguments**:
        * *Command* (list): list of commands that was used to call subprocess.Popen.
        It is only used for creating an error message if the process does not finish correctly.
        * *Process* (subprocess.Popen): the object returned by subprocess.Popen
        * *Output* (Popen.communicate): the object returned by Popen.communicate
        * *DisableCounterExamples* (bool): whether a counterexample should be returned if the query is false
        * *AcceptingStates* (bool): whether information about the accepting states should be returned

    **returns**:
        * *Answer* (bool): whether NuSMV returns "is true"
        * *CounterExample* (list): a counterexample if NuSMV returns "is false" and DisableCounterExamples==False.
        * *AcceptingStates* (dict): information about the accepting states, if *DisableAcceptingStates==False*.
    """

    if Process.returncode == 0:
        if Output.count('specification')>1:
            print('SMV file contains more than one CTL or LTL specification.')
            raise Exception

        if 'is false' in Output:
            answer = False
        elif 'is true' in Output:
            answer = True
        else:
            print(Output)
            print(Error)
            print('NuSMV output does not respond with "is false" or "is true".')
            raise Exception

    else:
        print(Output)
        print(Error)
        print('NuSMV did not respond with return code 0')
        print('command: %s'%' '.join(Command))
        raise Exception

    if DisableCounterExamples and not AcceptingStates:
        return answer

    result = [answer]

    if not DisableCounterExamples:
        counterex = output2counterexample(NuSMVOutput=Output)
        result.append(counterex)

    if AcceptingStates:
        accepting = output2acceptingstates(NuSMVOutput=Output)
        result.append(accepting)

    return tuple(result)
```

"Parser" de réponse nuSMV

La méthode **output2acceptingstates** permet de « parser » la réponse de NuSMV et de **renvoyer le résultat sous la forme voulue** par les développeurs de PyBoolNet.

Il est important de souligner qu'il existe aussi une méthode **check_smv_with_acceptingstates** qui permet directement de travailler sur un fichier SMV fourni en paramètre de la fonction et qui se comportera comme la méthode **check_primes_with_acceptingstates.**

Limite de PyBoolNet :

How well does PyBoolNet scale with large networks?

"Depends on what you want to do with it and what "large" is. You can compute steady states for networks with 600 components easily, unless the update functions are particularly evil. You can do model checking for 50 components easily. You can draw interaction graphs or state transition graphs for 3000 nodes easily."

Hklarner (https://github.com/hklarner/PyBoolNet/issues/9)

III. Etude de nuSMV-a :

Nous avons testé nuSMV-a sur l'**exemple 4.2** (Sémaphore) disponible dans la disponible dans le tutoriel de nuSMV.

```
MODULE main

  VAR
    semaphore : boolean;
    proc1 : process user(semaphore);
    proc2 : process user(semaphore);

  ASSIGN
    init(semaphore) := FALSE;

  SPEC AG ! (proc1.state = critical & proc2.state = critical)
  SPEC AG (proc1.state = entering -> AF proc1.state = critical)

MODULE user(semaphore)
  VAR
    state : {idle, entering, critical, exiting};

  ASSIGN
    init(state) := idle;
    next(state) :=
      case
        state = idle : {idle, entering};
        state = entering & !semaphore : critical;
        state = critical : {critical, exiting};
        state = exiting : idle;
        TRUE : state;
      esac;
    next(semaphore) :=
      case
        state = entering : TRUE;
        state = exiting : FALSE;
        TRUE : semaphore;
      esac;
FAIRNESS
  running
```

Or, contrairement à nuSMV, nuSMV-a ne peut **pas prendre en charge plusieurs SPEC** en un seul fichier.

```
>>> print(PyBoolNet.ModelChecking.check_smv_with_acceptingstates("semaphore.smv"
))
SMV file contains more than one CTL or LTL specification.
Traceback (most recent call last):
  File "<stdin>", line 1, in <module>
  File "/usr/local/lib/python3.6/dist-packages/PyBoolNet/ModelChecking.py", line
 385, in check_smv_with_acceptingstates
    return nusmv_handle(cmd, proc, out, err, DisableCounterExamples=True, Accept
ingStates=True)
  File "/usr/local/lib/python3.6/dist-packages/PyBoolNet/ModelChecking.py", line
 722, in nusmv_handle
    raise Exception
Exception
```

Nous avons donc **divisé** cet exemple en deux fichiers différents. La **première assertion est censée être vraie**, la **seconde est censée être fausse**.

```
MODULE main

  VAR
    semaphore : boolean;
    proc1 : process user(semaphore);
    proc2 : process user(semaphore);

  ASSIGN
    init(semaphore) := FALSE;

  SPEC AG ! (proc1.state = critical & proc2.state = critical)


MODULE user(semaphore)
  VAR
    state : {idle, entering, critical, exiting};

  ASSIGN
    init(state) := idle;
    next(state) :=
      case
        state = idle : {idle, entering};
        state = entering & !semaphore : critical;
        state = critical : {critical, exiting};
        state = exiting : idle;
        TRUE : state;
      esac;
    next(semaphore) :=
      case
        state = entering : TRUE;
        state = exiting : FALSE;
        TRUE : semaphore;
      esac;
FAIRNESS
  running
```

```
MODULE main

  VAR
    semaphore : boolean;
    proc1 : process user(semaphore);
    proc2 : process user(semaphore);

  ASSIGN
    init(semaphore) := FALSE;

  SPEC AG (proc1.state = entering -> AF proc1.state = critical)


MODULE user(semaphore)
  VAR
    state : {idle, entering, critical, exiting};

  ASSIGN
    init(state) := idle;
    next(state) :=
      case
        state = idle : {idle, entering};
        state = entering & !semaphore : critical;
        state = critical : {critical, exiting};
        state = exiting : idle;
        TRUE : state;
      esac;
    next(semaphore) :=
      case
        state = entering : TRUE;
        state = exiting : FALSE;
        TRUE : semaphore;
      esac;
FAIRNESS
  running
```

Dans un premier temps, nous avons testé les deux CTL avec la méthode **check_smv_with_acceptingstates**.

On obtient alors,

- Pour la première CTL :

```
Test sur le fichier : semaphoreCTL1.smv

(True, {'INIT': '!(semaphore | (proc1.state.1 | (proc1.state.0 | (proc2.state.1
| (proc2.state.0))))))', 'INIT_SIZE': 1, 'ACCEPTING': '!(semaphore & (proc1.state
.0 & (proc2.state.0)) | !semaphore & (proc1.state.0 | (proc2.state.0)))', 'ACCEP
TING_SIZE': 16, 'INITACCEPTING': '!(semaphore | (proc1.state.1 | (proc1.state.0
| (proc2.state.1 | (proc2.state.0))))))', 'INITACCEPTING_SIZE': 1})
```

- Pour la seconde CTL :

```
Test sur le fichier : semaphoreCTL2.smv

(False, {'INIT': '!(semaphore | (proc1.state.1 | (proc1.state.0 | (proc2.state.1
 | (proc2.state.0))))))', 'INIT_SIZE': 1, 'ACCEPTING': 'FALSE', 'ACCEPTING_SIZE':
 0, 'INITACCEPTING': 'FALSE', 'INITACCEPTING_SIZE': 0})
```

Puis, nous avons écrit un **programme python pour exécuter nuSMV-a** sur ces deux exemples. Nous avons utilisé **check_svm_with_acceptingstates** sur le premier fichier puisque la CTL est vraie, et qu'ainsi il y a des *acceptingstates*. Et utiliser la fonction **check_svm_with_counterexample** pour la CTL fausse, puisqu'elle devrait avoir des contres exemples. Cette méthode est censée nous renvoyer un contre-exemple pour **prouver que la CTL est fausse**.

```python
import PyBoolNet.ModelChecking as pm

def check_smv(FnameSMV):

    print("Test sur le fichier :", FnameSMV, "\n")
    if (pm.check_smv(FnameSMV)):
        return pm.check_smv_with_acceptingstates(FnameSMV)

    return pm.check_smv_with_counterexample(FnameSMV)

print(check_smv("semaphoreCTL1.smv"))
print(check_smv("semaphoreCTL2.smv"))
```

Pourtant, la fonction **check_svm_with_counterexample** renvoie une erreur, puisqu'apparemment une partie de la réponse de nuSMV est **None**, ce qui n'est pas gérer par le *parser* de PyBoolNet.

```
Test sur le fichier : semaphoreCTL1.smv

(True, {'INIT': '!(semaphore | (proc1.state.1 | (proc1.state.0 | (proc2.state.1
| (proc2.state.0))))))', 'INIT_SIZE': 1, 'ACCEPTING': '!(semaphore & (proc1.state
.0 & (proc2.state.0)) | !semaphore & (proc1.state.0 | (proc2.state.0)))', 'ACCEP
TING_SIZE': 16, 'INITACCEPTING': '!(semaphore | (proc1.state.1 | (proc1.state.0
| (proc2.state.1 | (proc2.state.0))))))', 'INITACCEPTING_SIZE': 1})
Test sur le fichier : semaphoreCTL2.smv

Traceback (most recent call last):
  File "off_test_lol.py", line 12, in <module>
    print(check_smv("semaphoreCTL2.smv"))
  File "off_test_lol.py", line 9, in check_smv
    return pm.check_smv_with_counterexample(FnameSMV)
  File "/usr/local/lib/python3.6/dist-packages/PyBoolNet/ModelChecking.py", line
 336, in check_smv_with_counterexample
    return nusmv_handle(cmd, proc, out, err, DisableCounterExamples=False, Accep
tingStates=False)
  File "/usr/local/lib/python3.6/dist-packages/PyBoolNet/ModelChecking.py", line
 747, in nusmv_handle
    counterex = output2counterexample(NuSMVOutput=Output)
  File "/usr/local/lib/python3.6/dist-packages/PyBoolNet/ModelChecking.py", line
 600, in output2counterexample
    assert(value in ['TRUE','FALSE'])
AssertionError
```