

Qualité algorithmique

3 — Optimisation de la consommation mémoire

Anthony Labarre

Université Gustave Eiffel



Plan d'aujourd'hui

- 1 Les générateurs
- 2 Coroutines
- 3 Chaînes “internées”
- 4 Structures de données plus économes en mémoire
 - Les tableaux
 - Les tableaux binaires
 - Les tries
- 5 Épilogue

Les générateurs

- Un **itérable** est un objet capable de renvoyer ses éléments un à un ;

(source : <https://docs.python.org/3/glossary.html>)

Terminologie

- Un **itérable** est un objet capable de renvoyer ses éléments un à un ;
- Un **itérateur** est un objet représentant un flux de données ; il permet d'itérer sur un itérable ;

(source : <https://docs.python.org/3/glossary.html>)

Terminologie

- Un **itérable** est un objet capable de renvoyer ses éléments un à un ;
- Un **itérateur** est un objet représentant un flux de données ; il permet d'itérer sur un itérable ;
 - `iter(it)` renvoie un itérateur sur `it`, qu'on fait avancer à l'aide de `next()` ;

(source : <https://docs.python.org/3/glossary.html>)

Terminologie

- Un **itérable** est un objet capable de renvoyer ses éléments un à un ;
- Un **itérateur** est un objet représentant un flux de données ; il permet d'itérer sur un itérable ;
 - `iter(it)` renvoie un itérateur sur `it`, qu'on fait avancer à l'aide de `next()` ;
 - `for` le fait automatiquement ;

(source : <https://docs.python.org/3/glossary.html>)

Terminologie

- Un **itérable** est un objet capable de renvoyer ses éléments un à un ;
- Un **itérateur** est un objet représentant un flux de données ; il permet d'itérer sur un itérable ;
 - `iter(it)` renvoie un itérateur sur `it`, qu'on fait avancer à l'aide de `next()` ;
 - `for` le fait automatiquement ;
- Un **générateur** est une fonction renvoyant un itérateur à l'aide de `yield` ;

(source : <https://docs.python.org/3/glossary.html>)

Évaluation fainéante

- Les générateurs (et certains itérateurs) implémentent une **évaluation fainéante** : chaque élément n'est créé qu'au moment où on en a besoin ;

Évaluation fainéante

- Les générateurs (et certains itérateurs) implémentent une **évaluation fainéante** : chaque élément n'est créé qu'au moment où on en a besoin ;

Exemple (évaluation directe vs. fainéante)

```
>>> for x in [elem for elem in liste if elem % 2]: # évaluation directe
...
>>> for x in filter(lambda elem: elem % 2, liste): # évaluation fainéante
...
```

Évaluation fainéante

- Les générateurs (et certains itérateurs) implémentent une **évaluation fainéante** : chaque élément n'est créé qu'au moment où on en a besoin ;

Exemple (évaluation directe vs. fainéante)

```
>>> for x in [elem for elem in liste if elem % 2]: # évaluation directe
...
>>> for x in filter(lambda elem: elem % 2, liste): # évaluation fainéante
...
```

- Intérêts :

Évaluation fainéante

- Les générateurs (et certains itérateurs) implémentent une **évaluation fainéante** : chaque élément n'est créé qu'au moment où on en a besoin ;

Exemple (évaluation directe vs. fainéante)

```
>>> for x in [elem for elem in liste if elem % 2]: # évaluation directe
...
>>> for x in filter(lambda elem: elem % 2, liste): # évaluation fainéante
...
```

- Intérêts :
 - 1 la consommation en espace mémoire est donc bien moins importante que l'alternative (créer un itérable contenant tous les éléments) ;

Évaluation fainéante

- Les générateurs (et certains itérateurs) implémentent une **évaluation fainéante** : chaque élément n'est créé qu'au moment où on en a besoin ;

Exemple (évaluation directe vs. fainéante)

```
>>> for x in [elem for elem in liste if elem % 2]: # évaluation directe
...
>>> for x in filter(lambda elem: elem % 2, liste): # évaluation fainéante
...
```

- Intérêts :
 - 1 la consommation en espace mémoire est donc bien moins importante que l'alternative (créer un itérable contenant tous les éléments) ;
 - 2 on réduit par la même occasion les calculs, puisqu'on évite les coûts liés à l'évaluation directe ;

Écrire ses propres générateurs

Il est très facile d'écrire un générateur : on fait exactement comme pour les fonctions ... mais on remplace **return** par **yield**.

Écrire ses propres générateurs

Il est très facile d'écrire un générateur : on fait exactement comme pour les fonctions ... mais on remplace **return** par **yield**.

Exemple

```
def test():
    yield "Bonjour"
    yield "aux"
    yield "étudiants."

if __name__ == "__main__":
    for valeur in test():
        print(valeur)
```

[Visualisation sur PythonTutor]

Écrire ses propres générateurs

- **yield** agit comme **return**, mais “se souvient” d'où on en était dans la génération ;
- Cela permet donc d'itérer sur les valeurs renvoyées par **yield** au fur et à mesure de leur création, au lieu de devoir renvoyer un itérable les contenant toutes ;

Écrire ses propres générateurs

- **yield** agit comme **return**, mais “se souvient” d'où on en était dans la génération ;
- Cela permet donc d'itérer sur les valeurs renvoyées par **yield** au fur et à mesure de leur création, au lieu de devoir renvoyer un itérable les contenant toutes ;

Exemple (générateur de Fibonacci)

La fonction suivante génère les n premiers nombres de Fibonacci :

```
def fibo_gen(n): # utilisation: for x in fibo_gen(n): ...
    """Génère les n premiers nombres de Fibonacci."""
    a, b = 0, 1
    for i in range(n):
        yield a
        a, b = b, a + b
```

Générateurs infinis

On peut pousser les choses encore plus loin et avoir des générateurs infinis !

Exemple (générateur de Fibonacci infini)

```
def fibo_infini():  
    """Génère tous les nombres de Fibonacci."""  
    a, b = 0, 1  
    while True:  
        yield a  
        a, b = b, a + b
```

```
if __name__ == "__main__":  
    for nombre in fibo_infini():  
        print(nombre)  
        # prévoir de quoi s'arrêter !
```

Générateurs en compréhension

- Rappelez-vous des compréhensions (de listes, ensembles, dictionnaires) ;

Générateurs en compréhension

- Rappelez-vous des compréhensions (de listes, ensembles, dictionnaires) ;
- On peut également définir des générateurs en compréhension, en utilisant simplement des parenthèses ;

Générateurs en compréhension

- Rappelez-vous des compréhensions (de listes, ensembles, dictionnaires) ;
- On peut également définir des générateurs en compréhension, en utilisant simplement des parenthèses ;
- Dans un appel de fonction requérant un itérable, on peut même s'en passer ;

Générateurs en compréhension

- Rappelez-vous des compréhensions (de listes, ensembles, dictionnaires) ;
- On peut également définir des générateurs en compréhension, en utilisant simplement des parenthèses ;
- Dans un appel de fonction requérant un itérable, on peut même s'en passer ;

Exemple

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: %memit
peak memory: 47.73 MiB, increment: 0.22 MiB
In [3]: %memit sum([i for i in range(2 ** 20)])
peak memory: 86.29 MiB, increment: 38.57 MiB
In [4]: %memit sum(i for i in range(2 ** 20))
peak memory: 56.12 MiB, increment: 0.00 MiB
In [5]: %timeit sum([i for i in range(2 ** 20)])
24.6 ms ± 133 µs per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 10 loops each)
In [6]: %timeit sum(i for i in range(2 ** 20))
20.1 ms ± 549 µs per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 10 loops each)
```

Utilisation

- Les générateurs sont très simples à écrire, mais attention à leur utilisation ;

Utilisation

- Les générateurs sont très simples à écrire, mais attention à leur utilisation ;
- Comme les fichiers, on ne peut les parcourir qu'une seule fois !

Utilisation

- Les générateurs sont très simples à écrire, mais attention à leur utilisation ;
- Comme les fichiers, on ne peut les parcourir qu'une seule fois !

Exemple

```
>>> intervalle = (2 ** i for i in range(5))
>>> for x in intervalle:
...     print(x, end=" ")
...
1 2 4 8 16
>>> for x in intervalle:
...     print(x, end=" ")
...
# rien
```

- Les générateurs sont très simples à écrire, mais attention à leur utilisation ;
- Comme les fichiers, on ne peut les parcourir qu'une seule fois !

Exemple

```
>>> intervalle = (2 ** i for i in range(5))
>>> for x in intervalle:
...     print(x, end=" ")
...
1 2 4 8 16
>>> for x in intervalle:
...     print(x, end=" ")
...
# rien
```

- Solution : réinitialiser le générateur (il faut répéter l'affectation) ;

- Les générateurs sont très simples à écrire, mais attention à leur utilisation ;
- Comme les fichiers, on ne peut les parcourir qu'une seule fois !

Exemple

```
>>> intervalle = (2 ** i for i in range(5))
>>> for x in intervalle:
...     print(x, end=" ")
...
1 2 4 8 16
>>> for x in intervalle:
...     print(x, end=" ")
...
# rien
```

- Solution : réinitialiser le générateur (il faut répéter l'affectation) ;
- Remarque : certains itérateurs comme `range` n'ont pas ce problème ;

- L'initialisation d'une variable à l'aide d'un générateur ne déclenche rien !

Utilisation

- L'initialisation d'une variable à l'aide d'un générateur ne déclenche rien !
- On n'obtient les valeurs qu'en appelant `next (objet)` ;

- L'initialisation d'une variable à l'aide d'un générateur ne déclenche rien !
- On n'obtient les valeurs qu'en appelant `next (objet) ;`

Exemple

```
>>> from fibogen import fibo_gen
>>> nombres = fibo_gen(10)
>>> next(nombres)
0
>>> next(nombres)
1
>>> for n in nombres:
...     print(n)
...
1
2
3
5
8
13
21
34
```

Combinaison de générateurs

L'évaluation fainéante montre toute sa puissance lorsque l'on combine les générateurs ou les itérateurs.

Combinaison de générateurs

L'évaluation fainéante montre toute sa puissance lorsque l'on combine les générateurs ou les itérateurs.

Exemple

Affichons toutes les nombres pairs de la forme k^k pour $k \in \mathbb{N}$:

```
>>> from itertools import filterfalse, starmap
>>> list(filterfalse(lambda x: x % 2, starmap(pow, zip(range(10), range(10)))))
[4, 256, 46656, 16777216]
```


Combinaison de générateurs

L'évaluation fainéante montre toute sa puissance lorsque l'on combine les générateurs ou les itérateurs.

Exemple

Affichons toutes les nombres pairs de la forme k^k pour $k \in \mathbb{N}$:

```
>>> from itertools import filterfalse, starmap
>>> list(filterfalse(lambda x: x % 2, starmap(pow, zip(range(10), range(10)))))
[4, 256, 46656, 16777216]
```

Là encore, chaque nombre du résultat est évalué au fur et à mesure qu'on combine les générateurs (par exemple : `starmap` ne doit pas attendre que `zip` ait tout produit).

Quelques itérateurs utiles (intégrés)

- `enumerate(it)` : renvoie les éléments de `it` numérotés ;

Quelques itérateurs utiles (intégrés)

- `enumerate(it)` : renvoie les éléments de `it` numérotés ;
- `filter(f, it)` : renvoie les éléments de `it` pour lesquels `f(x) == True` ;

Quelques itérateurs utiles (intégrés)

- `enumerate(it)` : renvoie les éléments de `it` numérotés ;
- `filter(f, it)` : renvoie les éléments de `it` pour lesquels `f(x) == True` ;
- `map(f, it)` : renvoie les images des éléments de `it` par `f` ;

Quelques itérateurs utiles (intégrés)

- `enumerate(it)` : renvoie les éléments de `it` numérotés ;
- `filter(f, it)` : renvoie les éléments de `it` pour lesquels `f(x) == True` ;
- `map(f, it)` : renvoie les images des éléments de `it` par `f` ;
- `zip(A, B)` : renvoie $(a_0, b_0), (a_1, b_1), \dots$ (nécessite $|A| = |B|$) ;



Quelques itérateurs utiles (intégrés)

- `enumerate(it)` : renvoie les éléments de `it` numérotés ;
- `filter(f, it)` : renvoie les éléments de `it` pour lesquels `f(x) == True` ;
- `map(f, it)` : renvoie les images des éléments de `it` par `f` ;
- `zip(A, B)` : renvoie $(a_0, b_0), (a_1, b_1), \dots$ (nécessite $|A| = |B|$) ;

- ... et beaucoup d'autres dans le module standard `itertools` ;

Quelques itérateurs utiles (intégrés)

- `enumerate(it)` : renvoie les éléments de `it` numérotés ;
- `filter(f, it)` : renvoie les éléments de `it` pour lesquels `f(x) == True` ;
- `map(f, it)` : renvoie les images des éléments de `it` par `f` ;
- `zip(A, B)` : renvoie $(a_0, b_0), (a_1, b_1), \dots$ (nécessite $|A| = |B|$) ;

- ... et beaucoup d'autres dans le module standard `itertools` ;
- ... et encore plus dans le module `more-itertools`
( `python3-more-itertools`,  `more_itertools`)

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F
- `compress('ABCDEF', [1, 0, 1, 0, 1, 1])` → A C E F

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F
- `compress('ABCDEFGH', [1, 0, 1, 0, 1, 1])` → A C E F
- `dropwhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 6 4 1

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F
- `compress('ABCDEFGH', [1, 0, 1, 0, 1, 1])` → A C E F
- `dropwhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 6 4 1
- `islice('ABCDEFGH', 2, None)` → C D E F G

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F
- `compress('ABCDEFGH', [1, 0, 1, 0, 1, 1])` → A C E F
- `dropwhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 6 4 1
- `islice('ABCDEFGH', 2, None)` → C D E F G
- `pairwise('ABCDEFGH')` → AB BC CD DE EF FG

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F
- `compress('ABCDEFGH', [1, 0, 1, 0, 1, 1])` → A C E F
- `dropwhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 6 4 1
- `islice('ABCDEFGH', 2, None)` → C D E F G
- `pairwise('ABCDEFGH')` → AB BC CD DE EF FG
- `starmap(pow, [(2, 5), (3, 2), (10, 3)])` → 32 9 1000

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F
- `compress('ABCDEFGH', [1, 0, 1, 0, 1, 1])` → A C E F
- `dropwhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 6 4 1
- `islice('ABCDEFGH', 2, None)` → C D E F G
- `pairwise('ABCDEFGH')` → AB BC CD DE EF FG
- `starmap(pow, [(2, 5), (3, 2), (10, 3)])` → 32 9 1000
- `takewhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 1 4

Quelques itérateurs utiles (`itertools`)

- `accumulate([1,2,3,4,5])` → 1 3 6 10 15
- `batched('ABCDEFGH', n=3)` → ABC DEF G
- `chain('ABC', 'DEF')` → A B C D E F
- `chain.from_iterable(['ABC', 'DEF'])` → A B C D E F
- `compress('ABCDEFGH', [1, 0, 1, 0, 1, 1])` → A C E F
- `dropwhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 6 4 1
- `islice('ABCDEFGH', 2, None)` → C D E F G
- `pairwise('ABCDEFGH')` → AB BC CD DE EF FG
- `starmap(pow, [(2, 5), (3, 2), (10, 3)])` → 32 9 1000
- `takewhile(lambda x: x<=5, [1, 4, 6, 4, 1])` → 1 4
- `zip_longest('ABCD', 'xy', fillvalue='-')` → Ax By C- D-

Coroutines

- Les **coroutines** sont des fonctions procédant du même esprit que les générateurs ;

Coroutines

- Les **coroutines** sont des fonctions procédant du même esprit que les générateurs ;
- La différence est que :

Coroutines

- Les **coroutines** sont des fonctions procédant du même esprit que les générateurs ;
- La différence est que :
 - les générateurs produisent des éléments un à un ;

- Les **coroutines** sont des fonctions procédant du même esprit que les générateurs ;
- La différence est que :
 - les générateurs produisent des éléments un à un ;
 - les coroutines consomment des éléments un à un ;

- Les **coroutines** sont des fonctions procédant du même esprit que les générateurs ;
- La différence est que :
 - les générateurs produisent des éléments un à un ;
 - les coroutines consomment des éléments un à un ;
- Si les données à lire sont trop volumineuses, il peut être utile de pouvoir les communiquer par petits morceaux à une coroutine plutôt qu'en un seul bloc à une fonction traditionnelle ;

Définition d'une coroutine

- On définit les coroutines comme des fonctions classiques ;

Définition d'une coroutine

- On définit les coroutines comme des fonctions classiques ;
- Elles utilisent également le mot-clé `yield`...

Définition d'une coroutine

- On définit les coroutines comme des fonctions classiques ;
- Elles utilisent également le mot-clé `yield` ...
- ... mais cette fois-ci, pour **affecter** des valeurs au lieu de les renvoyer ;

Définition d'une coroutine

- On définit les coroutines comme des fonctions classiques ;
- Elles utilisent également le mot-clé **yield**...
- ... mais cette fois-ci, pour **affecter** des valeurs au lieu de les renvoyer ;

Exemple

La coroutine suivante réceptionne des nombres, et met à jour leur somme, qu'elle affiche.

```
def total():
    somme = 0
    while True:
        somme += (yield)
        print("La nouvelle somme vaut", somme)
```

Utilisation d'une coroutine

Pour utiliser une coroutine f , il faut :

- 1 l'initialiser (affectation classique via un appel) ;

Utilisation d'une coroutine

Pour utiliser une coroutine `f`, il faut :

- 1 l'initialiser (affectation classique via un appel) ;
- 2 la démarrer (appel à `next ()`) ;

Utilisation d'une coroutine

Pour utiliser une coroutine `f`, il faut :

- 1 l'initialiser (affectation classique via un appel) ;
- 2 la démarrer (appel à `next ()`) ;
- 3 lui envoyer les données (`send (donnees)`) ;

Utilisation d'une coroutine

Pour utiliser une coroutine `f`, il faut :

- 1 l'initialiser (affectation classique via un appel) ;
- 2 la démarrer (appel à `next()`) ;
- 3 lui envoyer les données (`send(donnees)`) ;
- 4 la fermer quand on a fini (`close()`) ;

Utilisation d'une coroutine

Pour utiliser une coroutine `f`, il faut :

- 1 l'initialiser (affectation classique via un appel) ;
- 2 la démarrer (appel à `next()`) ;
- 3 lui envoyer les données (`send(donnees)`) ;
- 4 la fermer quand on a fini (`close()`) ;

Exemple

```
>>> def total():
...     somme = 0
...     while True:
...         somme += (yield)
...         print("La nouvelle somme vaut", somme)
...
>>> calculatrice = total()    # initialisation
>>> next(calculatrice)       # démarrage
>>> calculatrice.send(1)     # envoi de données -> exécution du code
La nouvelle somme vaut 1
>>> calculatrice.send(2)     # envoi de données -> exécution du code
La nouvelle somme vaut 3
>>> calculatrice.send(3)     # envoi de données -> exécution du code
La nouvelle somme vaut 6
>>> calculatrice.close()     # on a fini -> on ferme
```

[Visualisation sur PythonTutor]

Coroutines génératrices

On peut utiliser **yield** pour recevoir ET renvoyer des données... mais il faut être prudent.

Exemple

```
>>> def total():
...     somme = 0
...     while True:
...         somme += (yield)
...         yield somme
...
>>> calculatrice = total()      # initialisation
>>> next(calculatrice)         # démarrage
>>> calculatrice.send(1)       # envoi de données -> exécution du code
1
>>> calculatrice.send(2)       # envoi de données -> exécution du code
# rien ... ???
>>> calculatrice.send(3)       # envoi de données -> exécution du code
4 # euh ...
```

[Visualisation sur PythonTutor]

Explications et solution

- Lorsqu'un `yield` s'exécute, il :

Explications et solution

- Lorsqu'un **yield** s'exécute, il :
 - 1 renvoie une valeur (ou **None**) ;

Explications et solution

- Lorsqu'un **yield** s'exécute, il :
 - 1 renvoie une valeur (ou **None**) ;
 - 2 interrompt la fonction jusqu'à ce qu'on y revienne ;

Explications et solution

- Lorsqu'un **yield** s'exécute, il :
 - ① renvoie une valeur (ou **None**) ;
 - ② interrompt la fonction jusqu'à ce qu'on y revienne ;
- `send(x)` fournit `x` au dernier **yield** atteint, puis reprend l'exécution de la fonction jusqu'au **yield** suivant ;

Explications et solution

- Lorsqu'un **yield** s'exécute, il :
 - ① renvoie une valeur (ou **None**) ;
 - ② interrompt la fonction jusqu'à ce qu'on y revienne ;
- `send(x)` fournit `x` au dernier **yield** atteint, puis reprend l'exécution de la fonction jusqu'au **yield** suivant ;
- Dans notre cas, on récupère le **None** implicite du (**yield**) ;

Explications et solution

- Lorsqu'un **yield** s'exécute, il :
 - ① renvoie une valeur (ou **None**) ;
 - ② interrompt la fonction jusqu'à ce qu'on y revienne ;
- `send(x)` fournit `x` au dernier **yield** atteint, puis reprend l'exécution de la fonction jusqu'au **yield** suivant ;
- Dans notre cas, on récupère le **None** implicite du (**yield**) ;
- Solution : appeler `next()` avant **chaque** `send(donnees)` .

Explications et solution

- Lorsqu'un **yield** s'exécute, il :
 - 1 renvoie une valeur (ou **None**) ;
 - 2 interrompt la fonction jusqu'à ce qu'on y revienne ;
- `send(x)` fournit `x` au dernier **yield** atteint, puis reprend l'exécution de la fonction jusqu'au **yield** suivant ;
- Dans notre cas, on récupère le **None** implicite du (**yield**) ;
- Solution : appeler `next()` avant **chaque** `send(donnees)`.

Exemple

```
>>> def total():
...     somme = 0
...     while True:
...         somme += (yield)
...         yield somme
...
>>> calculatrice = total()      # initialisation
>>> next(calculatrice)         # démarrage
>>> calculatrice.send(1)       # envoi de données -> exécution du code
1
>>> next(calculatrice)         # avancement
>>> calculatrice.send(2)       # envoi de données -> exécution du code
3
>>> next(calculatrice)         # avancement
>>> calculatrice.send(3)       # envoi de données -> exécution du code
6
```

Décorations pour plus d'ergonomie

- L'utilisation de ces coroutines se complique ;
- Pour plus d'ergonomie, on peut définir des décorateurs qui se chargent automatiquement de rajouter ce qu'on risque d'oublier, à savoir :
 - le `next ()` initial ;
 - éventuellement, les `next ()` précédant chaque `send ()` ;
 - le `close ()` final ;

Chaînes “internées”

Internement d'objets

Python optimise gentiment la mémoire à notre place, sans qu'on le lui demande :

Python optimise gentiment la mémoire à notre place, sans qu'on le lui demande :

Exemple

Examinons la consommation en mémoire d'une liste contenant 10^6 zéros :

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: %memit ma_liste = [0] * int(1e6)
peak memory: 88.42 MiB, increment: 7.63 MiB
In [3]: set(map(id, ma_liste))
Out[3]: {10861160}
```

Python optimise gentiment la mémoire à notre place, sans qu'on le lui demande :

Exemple

Examinons la consommation en mémoire d'une liste contenant 10^6 zéros :

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: %memit ma_liste = [0] * int(1e6)
peak memory: 88.42 MiB, increment: 7.63 MiB
In [3]: set(map(id, ma_liste))
Out[3]: {10861160}
```

- La liste consomme de l'espace à cause de ses nombreuses références à 0 ;
- Mais comme le montre la troisième ligne, toutes ces références pointent vers le même objet en mémoire !
- Ce procédé s'appelle l'**internement** ;

Internement automatique ou manuel ?

L'exemple précédent laisse entendre que l'internement est automatique. Est-ce vrai ?

Exemple

```
>>> premiere = "Voici une chaîne"
>>> deuxieme = "Voici une chaîne"
>>> premiere == deuxieme
True
>>> premiere is deuxieme
False
>>> id(premiere), id(deuxieme)
(140349938451824, 140349938453168)
```

Si nécessaire, on peut interner soi-même les chaînes que Python “rate”, à l’aide de la fonction `sys.intern(chaine)`.

Exemple

```
>>> from sys import intern
>>> premiere = intern("Voici une chaîne")
>>> deuxieme = intern("Voici une chaîne")
>>> type(premiere), type(deuxieme)
(<class 'str'>, <class 'str'>)
>>> premiere == deuxieme
True
>>> premiere is deuxieme
True
>>> id(premiere), id(deuxieme)
(140453447583088, 140453447583088)
```

Outre la consommation en mémoire réduite, on a également des comparaisons en $O(1)$ (on compare les pointeurs au lieu des contenus).

Structures de données plus économes en mémoire

- Python propose de nombreuses structures de données utiles par défaut ;

Structures de données

- Python propose de nombreuses structures de données utiles par défaut ;
- Dans cette partie, on va examiner des alternatives plus économes en mémoire ;

Structures de données

- Python propose de nombreuses structures de données utiles par défaut ;
- Dans cette partie, on va examiner des alternatives plus économes en mémoire ;
- Elles seront parfois aussi (ou plus) efficaces que les structures que vous connaissez déjà ;

Structures de données

- Python propose de nombreuses structures de données utiles par défaut ;
- Dans cette partie, on va examiner des alternatives plus économes en mémoire ;
- Elles seront parfois aussi (ou plus) efficaces que les structures que vous connaissez déjà ;
- Le compromis résidera alors dans :

Structures de données

- Python propose de nombreuses structures de données utiles par défaut ;
- Dans cette partie, on va examiner des alternatives plus économes en mémoire ;
- Elles seront parfois aussi (ou plus) efficaces que les structures que vous connaissez déjà ;
- Le compromis résidera alors dans :
 - ① les contraintes d'utilisation ;

- Python propose de nombreuses structures de données utiles par défaut ;
- Dans cette partie, on va examiner des alternatives plus économes en mémoire ;
- Elles seront parfois aussi (ou plus) efficaces que les structures que vous connaissez déjà ;
- Le compromis résidera alors dans :
 - ① les contraintes d'utilisation ;
 - ② la manière de les utiliser ;

On verra des alternatives aux types suivants :

- `list`, `tuple` → tableaux (array de divers types) ;

On verra des alternatives aux types suivants :

- `list`, `tuple` → tableaux (array de divers types);
- `set` de naturels → tableaux binaires (bitarray);

On verra des alternatives aux types suivants :

- `list`, `tuple` → tableaux (array de divers types);
- `set` de naturels → tableaux binaires (bitarray);
- `set` de chaînes → Trie;

Les tableaux

Le type `array`

- Le type `array` ressemble aux tableaux dynamiques du C(++) ;

Le type `array`

- Le type `array` ressemble aux tableaux dynamiques du C(++) ;
- Il existe en fait (au moins) trois types d'`array` en Python, que nous comparerons brièvement :

Le type `array`

- Le type `array` ressemble aux tableaux dynamiques du C(++);
- Il existe en fait (au moins) trois types d'`array` en Python, que nous comparerons brièvement :
 - celui du module standard `array`; (= `array.array`)

- Le type `array` ressemble aux tableaux dynamiques du C(++);
- Il existe en fait (au moins) trois types d'`array` en Python, que nous comparerons brièvement :
 - celui du module standard `array`; (= `array.array`)
 - celui du module `numpy`; (= `numpy.array`)

- Le type `array` ressemble aux tableaux dynamiques du C(++);
- Il existe en fait (au moins) trois types d'`array` en Python, que nous comparerons brièvement :
 - celui du module standard `array`; (= `array.array`)
 - celui du module `numpy`; (= `numpy.array`)
 - ceux du module `cyarray`;

Le type `array.array`

- Le type `array.array` peut s'utiliser comme une liste, mais est plus contraignant :

Le type `array.array`

- Le type `array.array` peut s'utiliser comme une liste, mais est plus contraignant :
 - ① il ne peut contenir que des nombres ou des caractères (donc des chaînes de longueur 1) ;

- Le type `array.array` peut s'utiliser comme une liste, mais est plus contraignant :
 - 1 il ne peut contenir que des nombres ou des caractères (donc des chaînes de longueur 1) ;
 - 2 on ne peut pas y mélanger les types ;

- Le type `array.array` peut s'utiliser comme une liste, mais est plus contraignant :
 - 1 il ne peut contenir que des nombres ou des caractères (donc des chaînes de longueur 1) ;
 - 2 on ne peut pas y mélanger les types ;
 - 3 la taille des éléments est limitée et doit être précisée à l'initialisation ;

- Le type `array.array` peut s'utiliser comme une liste, mais est plus contraignant :
 - ❶ il ne peut contenir que des nombres ou des caractères (donc des chaînes de longueur 1) ;
 - ❷ on ne peut pas y mélanger les types ;
 - ❸ la taille des éléments est limitée et doit être précisée à l'initialisation ;
- Déclaration :

```
x = array.array(type_elems, iterable);
```

Exemple

Essayons de créer une liste de 100 millions d'entiers, puis un `array.array` contenant les mêmes valeurs :

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: %memit
peak memory: 72.80 MiB, increment: 0.31 MiB
In [3]: %memit list(range(100000000))
peak memory: 3741.38 MiB, increment: 3668.51 MiB
In [4]: from array import array
In [5]: %memit array("Q", range(100000000))
peak memory: 819.01 MiB, increment: 744.77 MiB
```

Contraintes de `array.array`

Les types utilisables dans un `array.array` sont :

Code d'indication du type	Type C	Type Python	Taille minimum en octets
'b'	<code>signed char</code>	<code>int</code>	1
'B'	<code>unsigned char</code>	<code>int</code>	1
'u'	<code>wchar_t</code>	Caractère Unicode	2
'h'	<code>signed short</code>	<code>int</code>	2
'H'	<code>unsigned short</code>	<code>int</code>	2
'i'	<code>signed int</code>	<code>int</code>	2
'I'	<code>unsigned int</code>	<code>int</code>	2
'l'	<code>signed long</code>	<code>int</code>	4
'L'	<code>unsigned long</code>	<code>int</code>	4
'q'	<code>signed long long</code>	<code>int</code>	8
'Q'	<code>unsigned long long</code>	<code>int</code>	8
'f'	<code>float</code>	<code>float</code>	4
'd'	<code>double</code>	<code>float</code>	8

Le type de l'`array x` est stocké dans `x.typecode`.

(source : `array`)





Pour optimiser la consommation en mémoire, choisissez le plus petit type permettant de représenter vos données.

Exemple

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: from array import array
In [3]: %memit array("Q", range(2 ** 26)) # c'est pas mal
peak memory: 551.01 MiB, increment: 478.30 MiB
In [4]: %memit array("I", range(2 ** 26)) # mais on peut faire mieux
peak memory: 327.56 MiB, increment: 254.58 MiB
In [5]: %memit array("H", range(2 ** 26)) # ou se planter en étant radin
...
OverflowError: unsigned short is greater than maximum
```

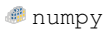
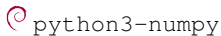

Le type `numpy.array`

 `python3-numpy`

 `numpy`


- `numpy` propose également son type `array` ;


Le type `numpy.array`



- `numpy` propose également son type `array` ;
- Il est moins économe en mémoire que celui du module `array`, mais est parfois plus compact que les listes ;

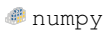
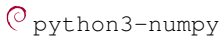
Le type `numpy.array`

 `python3-numpy`

 `numpy`

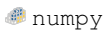
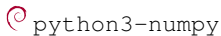
- `numpy` propose également son type `array` ;
- Il est moins économe en mémoire que celui du module `array`, mais est parfois plus compact que les listes ;
- On peut mélanger les types, mais ce n'est pas recommandé pour des raisons d'efficacité ;

Le type `numpy.array`



- `numpy` propose également son type `array` ;
- Il est moins économe en mémoire que celui du module `array`, mais est parfois plus compact que les listes ;
- On peut mélanger les types, mais ce n'est pas recommandé pour des raisons d'efficacité ;
- On peut utiliser n'importe quel nombre de dimensions ;

Le type `numpy.array`



- `numpy` propose également son type `array` ;
- Il est moins économe en mémoire que celui du module `array`, mais est parfois plus compact que les listes ;
- On peut mélanger les types, mais ce n'est pas recommandé pour des raisons d'efficacité ;
- On peut utiliser n'importe quel nombre de dimensions ;
- Déclaration :

```
x = numpy.array(iterable) ;
```

Comparons les consommations en mémoire pour la création d'un itérable (`list`, `array.array`, `numpy.array`) des 10^8 premiers naturels :

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: %memit
peak memory: 72.79 MiB, increment: 0.31 MiB
In [3]: %memit ma_liste = list(range(100000000))
peak memory: 3899.41 MiB, increment: 3826.61 MiB
In [4]: from array import array
In [5]: %memit array("Q", ma_liste)
peak memory: 4641.52 MiB, increment: 741.88 MiB
In [6]: import numpy
In [7]: %memit numpy.array(ma_liste)
peak memory: 4646.00 MiB, increment: 733.91 MiB
```

Remarques sur `numpy`

- Si le but est surtout d'économiser de la mémoire, `numpy.array` ne sera pas nécessairement meilleur que `array.array` (à tester quand même !);

Les performances sur un `array.array` sont du même ordre.

Remarques sur `numpy`

- Si le but est surtout d'économiser de la mémoire, `numpy.array` ne sera pas nécessairement meilleur que `array.array` (à tester quand même !);
- Les fonctions de `numpy` sont plus performantes que celles de Python ... à condition de ne pas faire de "mélanges";

Les performances sur un `array.array` sont du même ordre.

Remarques sur `numpy`

- Si le but est surtout d'économiser de la mémoire, `numpy.array` ne sera pas nécessairement meilleur que `array.array` (à tester quand même !);
- Les fonctions de `numpy` sont plus performantes que celles de Python ... à condition de ne pas faire de "mélanges";

Exemple (`sum` et `list` vs. `numpy.sum` et `numpy.array`)

```
In [1]: import numpy
In [2]: ma_liste = list(range(2 ** 26))
In [3]: mon_array = numpy.array(ma_liste)
In [4]: %timeit sum(ma_liste)
198 ms ± 557 µs per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 1 loop each)
In [5]: %timeit numpy.sum(ma_liste)
1.74 s ± 28.4 ms per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 1 loop each)
In [6]: %timeit sum(mon_array)
2.38 s ± 61.8 ms per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 1 loop each)
In [7]: %timeit numpy.sum(mon_array)
26.4 ms ± 81.3 µs per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 10 loops each)
```

Les performances sur un `array.array` sont du même ordre.

On peut encore gagner un peu de place avec `cyarray`, si on n'a besoin ni de slices ni d'autre chose que des nombres :

Exemple (test de `cyarray`)

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: from cyarray.api import IntArray
In [3]: %memit ma_liste = list(range(100000000))
peak memory: 3900.59 MiB, increment: 3823.05 MiB
In [4]: %%memit
...: mon_cyarray = IntArray(len(ma_liste))
...: for i in range(len(ma_liste)): mon_cyarray[i] = ma_liste[i]
...:
...:
peak memory: 4294.75 MiB, increment: 381.48 MiB
```

Les types dépendent de la taille des éléments (cf. `array`).

(voir [la documentation de cyarray](#) pour plus d'infos)

Les tableaux binaires

- Les **tableaux binaires** sont une implémentation efficace des énumérations (cf. cours de BUT 1) ;
- La position i est à **True** si i est présent, **False** sinon ;
- Plusieurs packages implémentent cette structure en Python ;

Les objets `bitarray` permettent très facilement de représenter un ensemble de naturels.

Exemple

```
In [1]: %load_ext memory_profiler
In [2]: from random import randrange
In [3]: %memit ensemble = {i for i in range(10000000) if randrange(0, 2)}
peak memory: 391.66 MiB, increment: 291.62 MiB
In [4]: from bitarray import bitarray
In [5]: %%memit
...: tableau = bitarray('0') * (max(ensemble) + 1)
...: for elem in ensemble: tableau[elem] = 1
...:
...:
peak memory: 364.04 MiB, increment: 0.00 MiB
In [6]: sorted(ensemble)[:10]
Out[6]: [0, 3, 5, 6, 11, 13, 16, 20, 21, 24]
In [7]: tableau[:10]
Out[7]: bitarray('1001011000')
```

numpy propose aussi ce genre de structure, mais en moins ergonomique (voir `packbits` et `unpackbits`).

Les tries

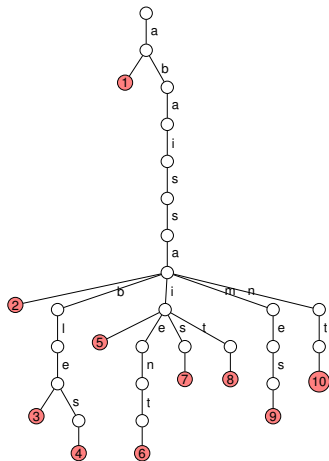
Exemple de trie


Les **tries** encodent de manière compacte un ensemble de chaînes, en fusionnant les préfixes communs.


Exemple de trie

Les **tries** encodent de manière compacte un ensemble de chaînes, en fusionnant les préfixes communs.

1	a
2	abaissa
3	abaissable
4	abaissables
5	abaissai
6	abaissaient
7	abaissais
8	abaissait
9	abaissames
10	abaissant
11	...



 `python3-datrie`

 `datrie`

Ensemble de chaînes

```
def init_set(chemin):  
    resultat = set()  
    with open(chemin, "r") as f:  
        for ligne in f:  
            resultat.add(ligne.strip())  
  
    return resultat
```

Ensemble de chaînes

```
def init_set(chemin):  
    resultat = set()  
    with open(chemin, "r") as f:  
        for ligne in f:  
            resultat.add(ligne.strip())  
  
    return resultat
```

```
>>> mes_mots = init_set(...)  
>>> "bonjour" in mes_mots  
True  
>>> "azoinoza" in mes_mots  
False
```

Ensemble de chaînes

```
def init_set(chemin):  
    resultat = set()  
    with open(chemin, "r") as f:  
        for ligne in f:  
            resultat.add(ligne.strip())  
  
    return resultat
```

```
>>> mes_mots = init_set(...)  
>>> "bonjour" in mes_mots  
True  
>>> "azoinoza" in mes_mots  
False
```

```
In [4]: %memit s = init_set("mots.txt")  
peak memory: 139.33 MiB,  
increment: 37.68 MiB
```

Ensemble de chaînes

```
def init_set(chemin):  
    resultat = set()  
    with open(chemin, "r") as f:  
        for ligne in f:  
            resultat.add(ligne.strip())  
  
    return resultat
```

```
>>> mes_mots = init_set(...)  
>>> "bonjour" in mes_mots  
True  
>>> "azoinoza" in mes_mots  
False
```

```
In [4]: %memit s = init_set("mots.txt")  
peak memory: 139.33 MiB,  
increment: 37.68 MiB
```

Trie

```
def init_trie(chemin):  
    t = datrie.Trie(string.ascii_lowercase)  
    with open(chemin, "r") as f:  
        for ligne in f:  
            t[ligne.strip()] = True  
  
    return t
```

Ensemble de chaînes

```
def init_set(chemin):  
    resultat = set()  
    with open(chemin, "r") as f:  
        for ligne in f:  
            resultat.add(ligne.strip())  
  
    return resultat
```

```
>>> mes_mots = init_set(...)  
>>> "bonjour" in mes_mots  
True  
>>> "azoinoza" in mes_mots  
False
```

```
In [4]: %memit s = init_set("mots.txt")  
peak memory: 139.33 MiB,  
increment: 37.68 MiB
```

Trie

```
def init_trie(chemin):  
    t = datrie.Trie(string.ascii_lowercase)  
    with open(chemin, "r") as f:  
        for ligne in f:  
            t[ligne.strip()] = True  
  
    return t
```

```
>>> mes_mots = init_trie(...)  
>>> "bonjour" in mes_mots  
True  
>>> "bonjo" in mes_mots  
False
```

Ensemble de chaînes

```
def init_set(chemin):
    resultat = set()
    with open(chemin, "r") as f:
        for ligne in f:
            resultat.add(ligne.strip())

    return resultat
```

```
>>> mes_mots = init_set(...)
>>> "bonjour" in mes_mots
True
>>> "azoinoza" in mes_mots
False
```

```
In [4]: %memit s = init_set("mots.txt")
peak memory: 139.33 MiB,
increment: 37.68 MiB
```

Trie


```
def init_trie(chemin):
    t = datrie.Trie(string.ascii_lowercase)
    with open(chemin, "r") as f:
        for ligne in f:
            t[ligne.strip()] = True


    return t
```

```
>>> mes_mots = init_trie(...)
>>> "bonjour" in mes_mots
True
>>> "bonjo" in mes_mots
False
```

```
In [4]: %memit t = init_trie("mots.txt")
peak memory: 89.12 MiB,
increment: 19.63 MiB
```

Utilisation de `datrie.Trie`

 python3-datrie

 datrie

Ensemble de chaînes

```
def init_set(chemin):
    resultat = set()
    with open(chemin, "r") as f:
        for ligne in f:
            resultat.add(ligne.strip())

    return resultat
```

```
>>> mes_mots = init_set(...)
>>> "bonjour" in mes_mots
True
>>> "azoinoza" in mes_mots
False
```

```
In [4]: %memit s = init_set("mots.txt")
peak memory: 139.33 MiB,
increment: 37.68 MiB
```

Trie

```
def init_trie(chemin):
    t = datrie.Trie(string.ascii_lowercase)
    with open(chemin, "r") as f:
        for ligne in f:
            t[ligne.strip()] = True

    return t
```

```
>>> mes_mots = init_trie(...)
>>> "bonjour" in mes_mots
True
>>> "bonjo" in mes_mots
False
```

```
In [4]: %memit t = init_trie("mots.txt")
peak memory: 89.12 MiB,
increment: 19.63 MiB
```

Les performances sont un peu moins bonnes :

```
In [10]: %timeit for mot in s: x = (mot in s)
21.7 ms ± 62.9 µs per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 10 loops each)
In [11]: %timeit for mot in s: x = (mot in t)
120 ms ± 3.79 ms per loop (mean ± std. dev. of 7 runs, 10 loops each)
```

Épilogue



Vérifiez toujours que vos optimisations en sont ... **et que le code reste correct !**

- Écrivez des tests unitaires pour votre code de départ ...



Vérifiez toujours que vos optimisations en sont ... **et que le code reste correct !**

- Écrivez des tests unitaires pour votre code de départ ...
- ... que vous réutiliserez à chaque modification !



Vérifiez toujours que vos optimisations en sont ... **et que le code reste correct !**

- Écrivez des tests unitaires pour votre code de départ ...
- ... que vous réutiliserez à chaque modification !
- Utilisez les outils adéquats pour ce faire (par exemple `unittest` — oubliez `doctest`);

Problèmes d'espace disque

- On a optimisé les performances et la consommation mémoire ;

Problèmes d'espace disque

- On a optimisé les performances et la consommation mémoire ;
- On pourrait aussi s'intéresser à l'espace disque ;

Problèmes d'espace disque

- On a optimisé les performances et la consommation mémoire ;
- On pourrait aussi s'intéresser à l'espace disque ;
- Si vous manquez d'espace disque, vous pouvez compresser vos fichiers . . .

Problèmes d'espace disque

- On a optimisé les performances et la consommation mémoire ;
- On pourrait aussi s'intéresser à l'espace disque ;
- Si vous manquez d'espace disque, vous pouvez compresser vos fichiers ...
- ... et les manipuler directement dans votre programme ;

Problèmes d'espace disque

- On a optimisé les performances et la consommation mémoire ;
- On pourrait aussi s'intéresser à l'espace disque ;
- Si vous manquez d'espace disque, vous pouvez compresser vos fichiers ...
- ... et les manipuler directement dans votre programme ;
- Plusieurs modules standards permettent de gérer les formats les plus fréquents :
 - `bz2`
 - `gzip`
 - `lzma`
 - `tarfile`
 - `zipfile`
 - `zlib`

Exploitation des cartes graphiques (GPUs)

- Nous nous sommes limités aux processeurs classiques (CPU) et à leurs cœurs pour les calculs ;

Exploitation des cartes graphiques (GPUs)

- Nous nous sommes limités aux processeurs classiques (CPU) et à leurs cœurs pour les calculs ;
- Les cartes graphiques (GPU) contiennent également des processeurs ;

Exploitation des cartes graphiques (GPUs)



- Nous nous sommes limités aux processeurs classiques (CPU) et à leurs cœurs pour les calculs ;
- Les cartes graphiques (GPU) contiennent également des processeurs ;
- On pourrait donc s'intéresser à utiliser en parallèle non seulement les cœurs du CPU, mais également ceux du GPU ;

- Les CPUs actuels contiennent au mieux plusieurs dizaines de cœurs ([Intel en propose 24](#));

GPUs : Parallélisme extrême

- Les CPUs actuels contiennent au mieux plusieurs dizaines de cœurs ([Intel en propose 24](#));
- Sur les GPUs, on les compte par centaines... voire par milliers ([Nvidia GeForce RTX 4090: 16 384](#));

GPUs : Parallélisme extrême

- Les CPUs actuels contiennent au mieux plusieurs dizaines de cœurs ([Intel en propose 24](#));
- Sur les GPUs, on les compte par centaines... voire par milliers ([Nvidia GeForce RTX 4090: 16 384](#));
- `multiprocessing` ne suffit plus, on a besoin de modules spécialisés; par exemple :
 - `pycuda` (© `python3-pycuda`,  `pycuda`);
 - `pytorch` (© `python3-torch`,  `pytorch`);

GPUs : Parallélisme extrême

- Les CPUs actuels contiennent au mieux plusieurs dizaines de cœurs ([Intel en propose 24](#));
- Sur les GPUs, on les compte par centaines... voire par milliers ([Nvidia GeForce RTX 4090: 16 384](#));
- `multiprocessing` ne suffit plus, on a besoin de modules spécialisés ; par exemple :
 - `pycuda` (© `python3-pycuda`, 🌐 `pycuda`);
 - `pytorch` (© `python3-torch`, 🌐 `pytorch`);
- Voir Gorelick et Ozsvald, pages 189–197 ;

Certains algorithmes et structures de données plus performantes vues dans d'autres cours d'algorithmique sont disponibles en Python :

- `collections.deque` : insertions et suppressions en $O(1)$ en tête et en fin ;

Certains algorithmes et structures de données plus performantes vues dans d'autres cours d'algorithmique sont disponibles en Python :

- `collections.deque` : insertions et suppressions en $O(1)$ en tête et en fin ;
- `heapq` : files à priorité (extraction du minimum en $O(\log n)$) ;

Certains algorithmes et structures de données plus performantes vues dans d'autres cours d'algorithmique sont disponibles en Python :

- `collections.deque` : insertions et suppressions en $O(1)$ en tête et en fin ;
- `heapq` : files à priorité (extraction du minimum en $O(\log n)$) ;
- `bisect` : maintien de listes triées ;

- L'**introspection** est la capacité d'un programme à examiner son propre état ;

Introspection

- L'**introspection** est la capacité d'un programme à examiner son propre état ;
- Elle est possible en Python à l'aide des modules standards `inspect` et `traceback` ;

Introspection

- L'**introspection** est la capacité d'un programme à examiner son propre état ;
- Elle est possible en Python à l'aide des modules standards `inspect` et `traceback` ;
- Elle nous ouvre pas mal de portes :

Introspection

- L'**introspection** est la capacité d'un programme à examiner son propre état ;
- Elle est possible en Python à l'aide des modules standards `inspect` et `traceback` ;
- Elle nous ouvre pas mal de portes :
 - détecter si une fonction est récursive ;

- L'**introspection** est la capacité d'un programme à examiner son propre état ;
- Elle est possible en Python à l'aide des modules standards `inspect` et `traceback` ;
- Elle nous ouvre pas mal de portes :
 - détecter si une fonction est récursive ;
 - examiner le code d'une fonction pour repérer les types qui y sont utilisés ;

- L'**introspection** est la capacité d'un programme à examiner son propre état ;
- Elle est possible en Python à l'aide des modules standards `inspect` et `traceback` ;
- Elle nous ouvre pas mal de portes :
 - détecter si une fonction est récursive ;
 - examiner le code d'une fonction pour repérer les types qui y sont utilisés ;
 - ...

Introspection

- L'**introspection** est la capacité d'un programme à examiner son propre état ;
- Elle est possible en Python à l'aide des modules standards `inspect` et `traceback` ;
- Elle nous ouvre pas mal de portes :
 - détecter si une fonction est récursive ;
 - examiner le code d'une fonction pour repérer les types qui y sont utilisés ;
 - ...
- ... que l'on peut exploiter à l'aide de décorateurs ;

Introspection : exemples

`inspect` permet (entre autres) d'obtenir :

- le code source d'un objet fonction (non intégrée)
`getsource(f)`, `getsourcelines(f)`

Introspection : exemples

`inspect` permet (entre autres) d'obtenir :

- le code source d'un objet fonction (non intégrée)
`getsource(f)`, `getsourcelines(f)`
- les noms et valeurs des paramètres d'un appel
`getcallargs(f, *args, **kwargs)`

Introspection : exemples

`inspect` permet (entre autres) d'obtenir :

- le code source d'un objet fonction (non intégrée)
`getsource(f)`, `getsourcelines(f)`
- les noms et valeurs des paramètres d'un appel
`getcallargs(f, *args, **kwargs)`
- le contenu d'un module
`getmembers(module_importé)`

Introspection : exemples

`inspect` permet (entre autres) d'obtenir :

- le code source d'un objet fonction (non intégrée)

`getsource(f)`, `getsourcelines(f)`

- les noms et valeurs des paramètres d'un appel

`getcallargs(f, *args, **kwargs)`

- le contenu d'un module

`getmembers(module_importé)`

- le type précis d'un objet (fonction, générateur, ...)

`isfunction(obj)`, `isgenerator(obj)`, ...

Introspection : exemples

`inspect` permet (entre autres) d'obtenir :

- le code source d'un objet fonction (non intégrée)
`getsource(f)`, `getsourcelines(f)`
- les noms et valeurs des paramètres d'un appel
`getcallargs(f, *args, **kwargs)`
- le contenu d'un module
`getmembers(module_importé)`
- le type précis d'un objet (fonction, générateur, ...)
`isfunction(obj)`, `isgenerator(obj)`, ...
- les contextes des appels de fonction, voire toute la pile
`currentframe()`, `stack()`

Introspection : exemples

`inspect` permet (entre autres) d'obtenir :

- le code source d'un objet fonction (non intégrée)
`getsource(f)`, `getsourcelines(f)`
- les noms et valeurs des paramètres d'un appel
`getcallargs(f, *args, **kwargs)`
- le contenu d'un module
`getmembers(module_importé)`
- le type précis d'un objet (fonction, générateur, ...)
`isfunction(obj)`, `isgenerator(obj)`, ...
- les contextes des appels de fonction, voire toute la pile
`currentframe()`, `stack()`

Introspection : exemples

`inspect` permet (entre autres) d'obtenir :

- le code source d'un objet fonction (non intégrée)
`getsource(f)`, `getsourcelines(f)`
- les noms et valeurs des paramètres d'un appel
`getcallargs(f, *args, **kwargs)`
- le contenu d'un module
`getmembers(module_importé)`
- le type précis d'un objet (fonction, générateur, ...)
`isfunction(obj)`, `isgenerator(obj)`, ...
- les contextes des appels de fonction, voire toute la pile
`currentframe()`, `stack()`

`traceback` permet (entre autres) :

- d'intercepter les exceptions tout en récupérant le message d'erreur
`format_exc()`

Quelques idées de décorateurs utiles basés sur `inspect` :

- suggérer automatiquement l'utilisation de :

Quelques idées de décorateurs utiles basés sur `inspect` :

- suggérer automatiquement l'utilisation de :
 - `lru_cache` pour les fonctions récursives ;

Quelques idées de décorateurs utiles basés sur `inspect` :

- suggérer automatiquement l'utilisation de :
 - `lru_cache` pour les fonctions récursives ;
 - “meilleures” structures de données ;

Quelques idées de décorateurs utiles basés sur `inspect` :

- suggérer automatiquement l'utilisation de :
 - `lru_cache` pour les fonctions récursives ;
 - “meilleures” structures de données ;
 - ...

Quelques idées de décorateurs utiles basés sur `inspect` :

- suggérer automatiquement l'utilisation de :
 - `lru_cache` pour les fonctions récursives ;
 - “meilleures” structures de données ;
 - ...
- empêcher l'exécution du code selon certaines conditions sur des paramètres ;

Quelques idées de décorateurs utiles basés sur `inspect` :

- suggérer automatiquement l'utilisation de :
 - `lru_cache` pour les fonctions récursives ;
 - “meilleures” structures de données ;
 - ...
- empêcher l'exécution du code selon certaines conditions sur des paramètres ;
- réécrire du code à la volée ;

⋮