IFT3912 - Développement et maintenance de logiciels

Tests automatisés

Bruno Dufour
dufour@iro.umontreal.ca

Doublures

Doublures de tests

- Objets synthétiques qui permettent l'exécution de tests
  - **Dummy objects**: passés mais jamais utilisés
  - **Fake objects**: possèdent une implémentation qui est impropre à un environnement de production (ex: base de données en mémoire)
  - **Stub objects**: fournissent des réponses préprogrammées pour des cas précis
    - Peuvent maintenir un état interne simplifié
  - **Spy objects** : permettent d'observer les appels à un objet qu'ils remplacent
  - **Mock objects**: renferment une spécification des appels qui devront être reçus

Exemple – Stub


```
public interface MailService {
    public void send (Message msg);
}

public class MailServiceStub implements MailService {
    private List<Message> messages = new ArrayList<Message>();

    public void send(Message msg) {
        messages.add(msg);
    }

    public int numberSent() {
        return messages.size();
    }
}
```

Exemple – Stub


```
class OrderStateTester {
    @Test
    public void testOrderSendsMailIfUnfilled() {
        Order order = new Order("Time Out", 51);
        MailServiceStub mailer = new MailServiceStub();
        order.setMailer(mailer);
        order.fill(warehouse);

        assertEquals(1, mailer.numberSent());
    }
```


Exemple - Spy


```
public void testRemoveFlightLogging_recordingTestStub() {
    Flight expectedFlight = createAnUnregFlight();
    FlightManagementFacade facade = new FlightManagementFacadeImpl();

    AuditLogSpy logSpy = new AuditLogSpy();
    facade.setAuditLog(logSpy);

    facade.removeFlight(expectedFlight.getFlightNumber());

    assertFalse(facade.flightExists(expectedFlight.getFlightNumber()));

    assertEquals(1, logSpy.getNumberOfCalls());
    assertEquals(Helper.REMOVE_FLIGHT_ACTION_CODE,
        logSpy.getActionCode());
    assertEquals(helper.getTodaysDateWithoutTime(),
        logSpy.getDate());
    assertEquals(Helper.TEST_USER_NAME, logSpy.getUser());
    assertEquals(expectedFlight.getFlightNumber(),
        logSpy.getDetail());
}
```


Exemple - Spy


```
public class AuditLogSpy implements AuditLog {
    // Fields into which we record actual usage information
    private Date date;
    private String user;
    private String actionCode;
    private Object detail;
    private int numberOfCalls = 0;

   // Recording implementation of real AuditLog interface
   public void logMessage(Date date,
                          String user,
                          String actionCode,
                          Object detail) {
      this.date = date;
      this.user = user;
      this.actionCode = actionCode;
      this.detail = detail;
      numberOfCalls++;
   }

   ...
}
```


Mockito

- Mockito est un outil de *mocking* populaire
  - Plusieurs alternatives (ex: EasyMock, jMock, etc.)
- Permet de :
  - créer des objets synthétiques (*mocks*) à partir d'une classe ou interface
    - L'objet synthétique est compatible avec l'objet qu'il remplace / l'interface qu'il implémente, mais son comportement peut être redéfini
  - Spécifier et (re)définir le comportement de certaines méthodes de l'objet synthétique (*stubbing*)
  - Spécifier et vérifier le comportement attendu lorsque l'objet est utilisé par un test

Exemple - Mock objects


```
public class Order {
   public Order(String product, int quantity) { …  }
   public void fill(Warehouse warehouse) { … }
   public boolean isFilled() { … }
}

public interface Warehouse {
   public void add(String product, int amount);
   public boolean hasInventory(String product, int amount);
   public int getInventory(String product);
   public void remove(String product, int quantity);
}

public class WarehouseImpl implements Warehouse { … }
```

Nous allons tester la classe Order, qui dépend de la classe Warehouse

Exemple – Test classique


```
public class OrderStateTester {
   private static String TIMEOUT = "Time Out";
   private static String GO = "Go!";

   private Warehouse warehouse = new WarehouseImpl();

   @Before
   public void setUp() throws Exception {
      warehouse.add(TIMEOUT, 50);
      warehouse.add(GO, 25);
   }

   @Test
   public void testOrderIsFilledIfEnoughInWarehouse() {
      Order order = new Order(TIMEOUT, 50);
      order.fill(warehouse);
      assertTrue(order.isFilled());
      assertEquals(0, warehouse.getInventory(TIMEOUT));
   }
}
```


Exemple - Mock objects


```
public class OrderInteractionTester {
   …
   @Test public void testFillingRemovesInventoryIfInStock() {
      // setup
      Order order = new Order(TIMEOUT, 50);
      Warehouse warehouseMock = mock(Warehouse.class);

      // stubs
      when(warehouseMock.hasInventory(TIMEOUT, 50)).thenReturn(true);

      // exercise
      order.fill(warehouseMock);

      // verify
      InOrder inOrder = inOrder(warehouseMock);
      inOrder.verify(warehouseMock).hasInventory(TIMEOUT, 50);
      inOrder.verify(warehouseMock).remove(TIMEOUT, 50);

      assertTrue(order.isFilled());
   }
}
```


Exemple – Test classique


```
public class OrderStateTester {
   …

   @Test
   public void testOrderDoesNotRemoveIfNotEnough() {
      Order order = new Order(TIMEOUT, 51);
      order.fill(warehouse);
      assertFalse(order.isFilled());
      assertEquals(50, warehouse.getInventory(TIMEOUT));
   }
}
```

Exemple - Mock objects


```
public class OrderInteractionTester {
   …
   @Test public void testFillingDoesNotRemoveIfNotEnoughInStock() {
      Order order = new Order(TIMEOUT, 51);
      Warehouse warehouseMock = mock(Warehouse.class);

      // stubs
      when(warehouseMock.hasInventory(TIMEOUT, 51)).thenReturn(false);

      // exercise
      order.fill(warehouseMock);

      // verify
      verify(warehouseMock).hasInventory(TIMEOUT, 51);
      verify(warehouseMock, never()).remove(anyString(), anyInt());
      assertFalse(order.isFilled());
   }
}
```


Mocking - Évaluation

- Avantages
  - Permet de tester une classe en isolation facilement
    - Tous les objets nécessaires sont remplacés par des objets synthétiques
  - Permet d'identifier la cause d'un bogue plus facilement
    - Les tests classiques exécutent une plus grande portion du code
  - Permet d'éviter d'ajouter des méthodes à une classe spécifiquement pour les tests

Mocking - Évaluation

- Inconvénients
  - Met l'emphase sur les détails d'implémentation très rapidement au cours du développement
  - Les tests sont très dépendants de l'implémentation, et peuvent être brisés plus facilement par des modifications apportées au code

Injection de dépendances

- Permet de découpler le SST de ses dépendances de façon à pouvoir plus facilement les remplacer par des doublures lors des tests
- Stratégies
  - Injection par paramètre
  - Injection par constructeur
  - Injection par accesseur (*setter*)

Exemple - Sans injection


```
public void testDisplayCurrentTime_AtMidnight() {
    TimeDisplay sut = new TimeDisplay();

    String result = sut.getCurrentTimeAsHtml();

    String expectedTimeString = "<b>Midnight</b>";
    assertEquals(expectedTimeString, result);
}

public String getCurrentTimeAsHtml() {
    Calendar currentTime;
    try {
        currentTime = new DefaultTimeProvider().getTime();
    } catch (Exception e) {
        return "Time not available";
    }
    ...
}
```


Exemple - Injection par paramètre


```
public void testDisplayCurrentTime_AtMidnight() {
    TimeProvider tpStub = new MidnightTimeProvider();
    TimeDisplay sut = new TimeDisplay();

    String result = sut.getCurrentTimeAsHtml(tpStub);

    String expectedTimeString = "<b>Midnight</b>";
    assertEquals("Midnight", expectedTimeString, result);
}

public String getCurrentTimeAsHtml(TimeProvider timeProvider) {
    Calendar currentTime;
    try {
        currentTime = timeProvider.getTime();
    } catch (Exception e) {
        return "Time not available";
    }
    ...
}
```


Exemple - Injection par constructeur


```
public void testDisplayCurrentTime_AtMidnight() {
    TimeProvider tpStub = new MidnightTimeProvider();
    TimeDisplay sut = new TimeDisplay(tpStub);

    String result = sut.getCurrentTimeAsHtml();

    String expectedTimeString = "<b>Midnight</b>";
    assertEquals("Midnight", expectedTimeString, result);
}

public class TimeDisplay {
   private TimeProvider timeProvider;

   public TimeDisplay() {
      timeProvider = new DefaultTimeProvider();
   }
   public TimeDisplay(TimeProvider timeProvider) {
      this.timeProvider = timeProvider;
   }
   ...
```


Exemple - Injection par accesseur


```
public void testDisplayCurrentTime_AtMidnight() {
    TimeDisplay sut = new TimeDisplay();
    sut.setTimeProvider(new MidnightTimeProvider());

    String result = sut.getCurrentTimeAsHtml();

    String expectedTimeString = "<b>Midnight</b>";
    assertEquals("Midnight", expectedTimeString, result);
}

public class TimeDisplay {
   private TimeProvider timeProvider;

   public TimeDisplay() {
      timeProvider = new DefaultTimeProvider();
   }
   public void setTimeProvider(TimeProvider provider) {
      this.timeProvider = provider;
   }
   ...
```

Dependency Injection - Guice


```
public class RealBillingService implements BillingService {
  private final CreditCardProcessor processor;
  private final TransactionLog transactionLog;

  @Inject
  RealBillingService(CreditCardProcessor processor,
      TransactionLog transactionLog) {
    this.processor = processor;
    this.transactionLog = transactionLog;
  }
}

public class BillingModule extends AbstractModule {
  protected void configure() {
    bind(TransactionLog.class).to(DatabaseTransactionLog.class);
    bind(CreditCardProcessor.class).to(VisaCreditCardProcessor.class);
  }
}
```

Dépendances abstraites (interfaces)

Guice appelera ce constructeur

un objet de type concret VisaCreditCardProcessor sera utilisé comme implémentation de l'interface CreditCardProcessor

Dependency Injection - Guice


```
  public static void main(String[] args) {
   Injector injector = Guice.createInjector(new BillingModule());
   RealBillingService billingService =
           injector.getInstance(RealBillingService.class);
   ...
}
```

Crée une instance de `VisaCreditCardProcessor`, tel que défini par `BillingModule` (= factory)

Définir les cas de tests

Types de tests

- Tests fonctionnels
  - Aussi appelés « boîte noire » (*black box tests*)
  - Identifient les fautes en se basant uniquement sur les entrées et les sorties
  - Ne tiennent pas compte du comportement interne du programme
    - Ex: chemin exécuté pour le calcul, cas spéciaux
- Tests structurels
  - Aussi appelés « boîte blanche » (*white box tests*) ou « boîte de verre » (*glass box tests*)
  - Exploitent la connaissance de la structure du code

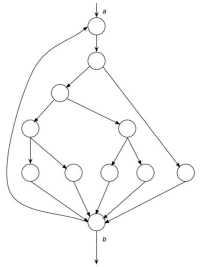
Tests exhaustifs

- Est-il possible de tester un programme **complèment**?
  - c'est-à-dire, trouver toutes les erreurs présentes
- Tests fonctionnels :
  - Pour tester le programme complètement, il faudrait tester toutes les entrées possibles
  - Une infinité de cas en général

Tests exhaustifs

- Tests structurels
  - Programme de ~ 50-100 lignes
  - 1 boucles (1-20 itérations), 4 conditions imbriquées à l'intérieur de la boucle

```
do
   if (…) then
       if (…) then
          if (…) then
          else …
       else …
          if (…) then
          else …
   else …
while (i < 20)
```



~ 10^{14} chemins d'exécution possibles ($5^1 + 5^2 + \ldots + 5^{20}$)
3174 ans pour tester à raison d'un chemin par milliseconde!

Tests exhaustifs

- En général, tester un programme de façon exhaustive est impossible
- Il faut choisir un sous-ensemble des tests qui maximise la probabilité de détecter les erreurs
- Approche couramment utilisée : déterminer un ensemble de tests fonctionnels qui seront complémentés de tests structurels

Test fonctionnels

Test fonctionnels

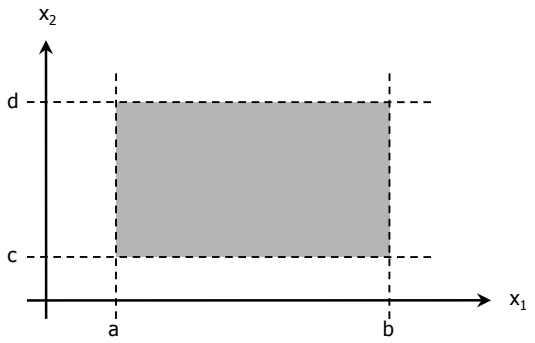
- L'identification de tests fonctionnels repose sur l'identification de valeurs à utiliser dans le domaine des entrées du programme
- Le SST peut être vu comme une fonction

$$F : D \rightarrow I$$

  - Les entrées de F possèdent souvent des contraintes (possiblement implicites) :

$$a \leq x_1 \leq b \, , \, c \leq x_2 \leq d$$

Domaine d'une fonction à 2 variables



Tests par valeurs de marges

- Pour chaque variable d'entrée, choisir 5 valeurs :
  - Minimum
  - Juste au dessus du minimum
  - Nominale
  - Just en dessous du maximum
  - Maximum

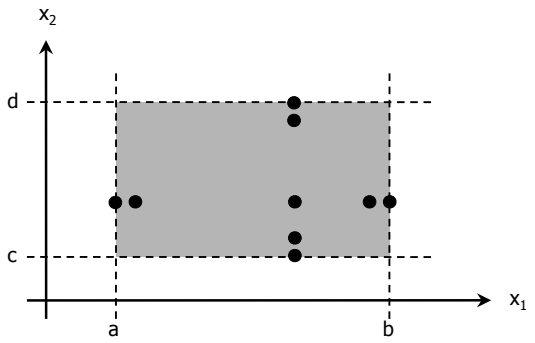
Hypothèse de faute unique

- En pratique, une défaillance est rarement causée par par plus d'une faute
- Sous cette hypothèse, les tests sont générés en gardant toutes les variables sauf une à leur valeur nominale, et en laissant cette variable prendre toutes ses valeurs extrêmes
  - En général, $4n + 1$ tests pour n variables

Valeurs de marges - 2 variables

- $<x_{1nom}, x_{2min}>$
- $<x_{1nom}, x_{2min+}>$
- $<x_{1nom}, x_{2nom}>$
- $<x_{1nom}, x_{2max-}>$
- $<x_{1nom}, x_{2max}>$
- $<x_{1min}, x_{2nom}>$
- $<x_{1min+}, x_{2nom}>$
- $<x_{1nom}, x_{2nom}>$
- $<x_{1max-}, x_{2nom}>$
- $<x_{1max}, x_{2nom}>$

Valeurs de marges



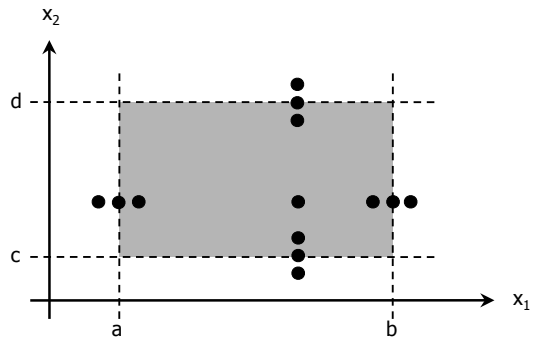
Limites

- Présume que les variables sont indépendantes
  - Par exemple, pour un programme qui manipule des dates (3 variables - j,m,a):
    - Les erreurs reliées au début du mois et de fin de mois seront probablement détectées
    - Les tests ne seront pas adéquats pour les cas intéressants du mois de février ou des années bissextiles, pour lesquelles les différentes variables interagissent
- Souvent utile pour les quantités physiques
  - Marges utiles pour une température ou une altitude
  - Marges peu utiles pour un NIP ou # de téléphone

Variation - Robustesse

- Ajoute des valeurs légèrement à l'extérieur des intervalles
  - Un peu en dessous du minimum (min-)
  - Un peu au dessus du maximum (max+)
- Permet de tester le traitement des exceptions

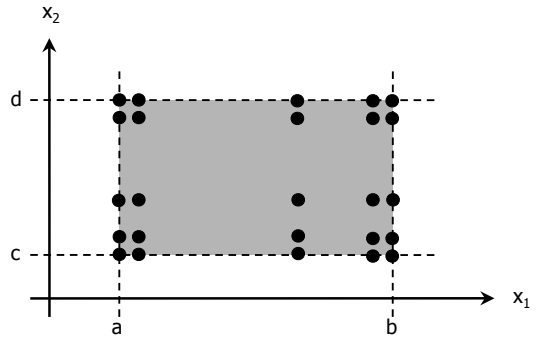
Variation - Robustesse



Variation - Pire cas

- Rejette l'hypothèse de la faute unique
  - Permet de détecter les erreurs dues à plusieurs fautes simultanées
- Utilise le produit cartésien des valeurs de chacune des variables
  - En général, 5^n tests plutôt que $4n + 1$

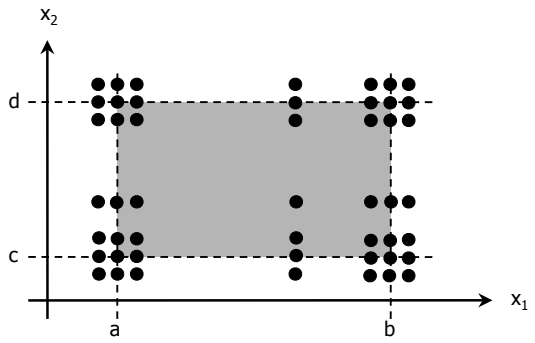
Variation - Pire cas



Variation - Pire cas robuste

- Ajoute la robustesse à l'analyse des pires cas
  - 2 valeurs ajoutées pour chaque variable
  - En général, 7^n tests plutôt que 5^n ou $4n + 1$

Variation - Pire cas robuste



Variation : valeurs spéciales

- En pratique, les tests des pires cas produisent une grande quantité de tests dont l'efficacité à identifier des bogues est relativement faible
- Alternative : utiliser les connaissances du domaine pour déterminer des cas à tester
  - p.ex.: 28 février, 29 février, années bissextiles

Tests par partionnement

- Les valeurs de marges produisent souvent des tests
  - redondants
  - incomplets
- Alternative : partionner les entrées en **classes d'équivalences**
  - sous-ensembles disjoints dont l'union est l'ensemble complet
  - générer un test par classe d'équivalence
- Implications
  - Complétude (union est l'ensemble complet)
  - Non-redondance (ensembles disjoints)

Sélection des classes d'équivalence

- Les tests qui appartiennent à la même classe d'équivalence devraient identifier les mêmes erreurs
  - Lorsque les classes d'équivalence, la redondance entre les tests peut être grandement réduite
- Comment identifier les classes d'équivalence appropriées pour chaque variable ?
  - Dépend du domaine

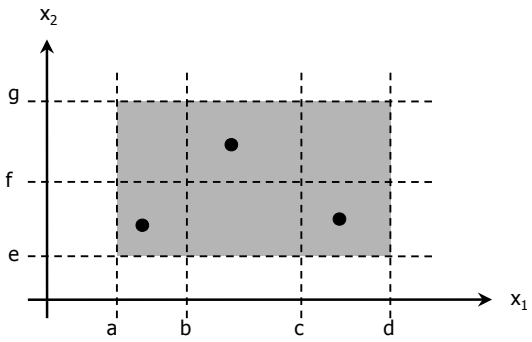
Exemples de classes d'équivalences

- Plage de valeurs (ex: 1..100)
- Nombre de valeurs
  - ex: au moins 3 valeurs spécifiées
- Ensemble de valeurs prédéfinies
  - ex: « auto », « maison », « bateau »
- « Doit être »
  - ex: le 1er caractère doit être une lettre

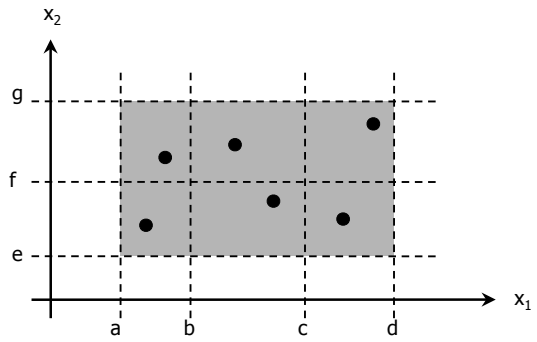
Génération de tests

- Générer des tests à partir de classes d'équivalence peut utiliser deux stratégies:
  - **Équivalence faible** : chaque test utilise une valeur de chacune des classes d'équivalences valides
    - Utilise l'hypothèse de faute unique
    - Nombre de tests égal au nombre maximal de partitions pour toutes les variables
  - **Équivalence forte** : un test par combinaison de classes d'équivalences valides pour toutes les variables
    - Rejette l'hypothèse de faute unique
    - Nombre de tests égal au produit du nombre de partitions pour toutes les variables

Partionnement - Équivalence faible



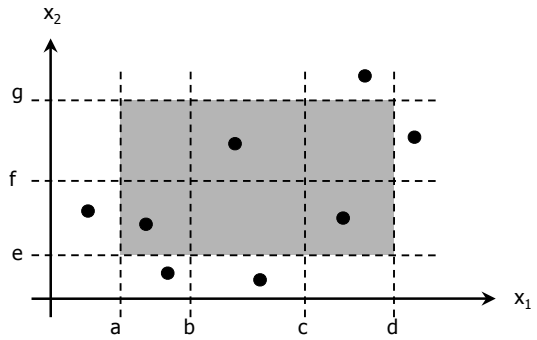
Partionnement - Équivalence forte



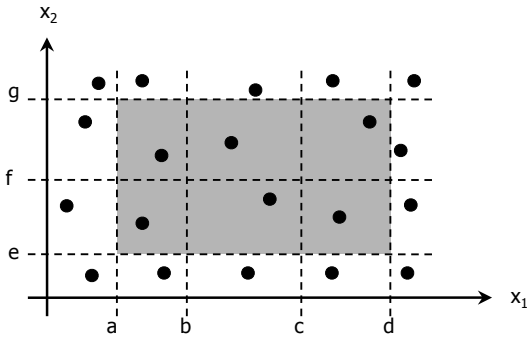
Robustesse

- Le concept de robustesse peut être combiné au partionnement en classes d'équivalence
  - Les tests utilisent aussi les classes d'équivalences invalides
- Équivalence faible & robuste :
  - Pour les entrées invalides, des valeurs valides sauf une valeur qui sera invalide
- Équivalence forte & robuste :
  - Inclure les classes d'équivalence invalides dans le produit cartésien des valeurs possibles

Partionnement - Équival. faible robuste



Partionnement - Équiv. forte robuste



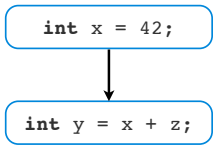
Test structurels

Graphe de flot de contrôle

- Un graphe de programme est un graphe dirigé où
  - les noeuds représentent les instructions
  - les arcs représentent le flot de contrôle possible entre les instructions
    - arc $s_i \rightarrow s_j$ implique que s_j peut s'exécuter directement à la suite de s_i

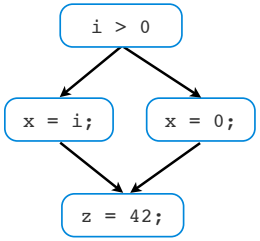
Graphe de flot de contrôle


```
int x = 42;
int y = x + z;
```



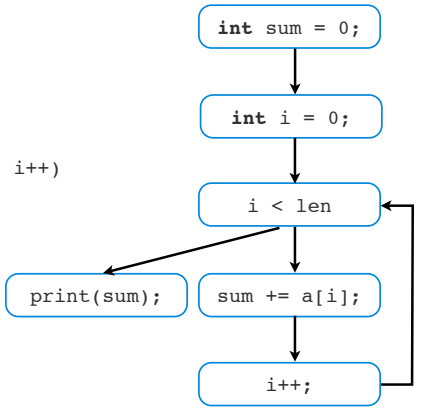
Graphe de flot de contrôle


```
if (i > 0) {
    x = i;
} else {
    x = 0;
}
z = 42;
```



Graphe de flot de contrôle


```
int sum = 0;
for (int i = 0; i < len; i++)
{
    sum += a[i];
}
print(sum);
```

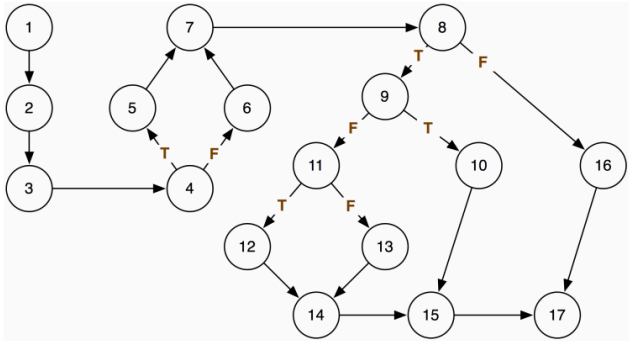


Exemple - Triangles


```
1 output ("Enter 3 integers")
2 input (a, b, c)
3 output("Side a b c: ", a, b, c)
4 if (a < b + c) and (b < a+c) and (c < a+b)
5 then isTriangle ← true
6 else isTriangle ← false
7 fi

8 if isTriangle
9 then if (a = b) and (b = c)
10     then output ("equilateral")
11     else if (a ≠ b ) and ( a ≠ c ) and ( b ≠ c)
12          then output ("scalene")
13          else output("isosceles")
14          fi
15     fi
16 else output ("not a triangle")
17 fi
```


Triangles - Graphe de flot de contrôle



Chemins d'exécution

- Chaque exécution valide d'un programme correspond à un chemin valide dans son graphe de flot de contrôle
  - Débute à l'entrée
  - Se termine à la sortie

Des chemins aux tests

- Un test peut être généré à partir d'un chemin d'exécution qu'on désire emprunter
  - L'ensemble des conditions évaluées détermine des **contraintes** pour chacune des variables
  - Ces contraintes peuvent être résolues (souvent automatiquement) afin de déterminer un ensemble de valeurs

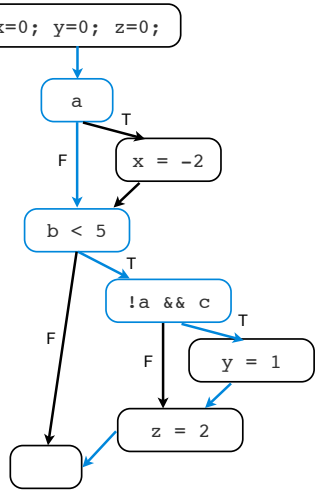
Des chemins aux tests


```
function f(a, b, c) {
    var x=0, y=0, z=0;

    if (a)
        x = -2;

    if (b < 5)
        if (!a && c)
            y = 1;
        z = 2;
}
```

b < 5 && !a && c, p. ex.
a = 0, b = 0, c = 1



Couverture

- La **couverture** est une mesure d'exhaustivité des tests effectués
  - Idéalement, la couverture devrait être exprimée en fonction de tous les chemins d'exécution possibles
  - En pratique, des approximations sont utilisées
- Un ensemble de tests devraient toujours viser la couverture complète d'un programme
  - En pratique, il peut être impossible de couvrir tout le programme d'après une certaine approximation
  - Maximiser la couverture maximise augmente la probabilité de détecter les erreurs

Couverture des instructions

- Nécessite que chaque instruction du programme soit exécutée au moins une fois
- Un critère de couverture assez faible :

```
public int foo(int x, int y) {
    if (x != 0 && y != 0)
        y=x+1;
    return y;
}
```

  - Si un test appelle `foo(1,1)`, toutes les instructions sont exécutées, mais le cas où y est retourné sans modification n'est pas testé.
  - La condition (`x!=0`) peut être erronée sans que les tests ne le démontrent.

Couverture des décisions / branches

- Nécessite que chaque décision prenne chaque valeur possible au moins un fois (en général vrai ou faux)
  - Les conditions incluent les boucles (while, for, do-while, etc.), les instructions conditionnelles (if-else, switch)
  - Implique la couverture des instructions

```
public int foo(int x, int y) {
    if (x != 0 && y != 0)
        y=x+1;
    return y;
}
```

  - Il faudrait écrire au moins 2 tests, par exemple :
    - `foo(0,1), foo(1,1)`

Couverture des conditions

- Nécessite que chaque condition qui fait partie d'une décision prenne chaque valeur possible au moins un fois (en général vrai ou faux)

```
public int foo(int x, int y) {
    if (x != 0 && y != 0)
        y=x+1;
    return y;
}
```

- Il faudrait écrire au moins 2 tests, par exemple :
  - `foo(0,0), foo(1,1)`

Couverture des conditions

- La couverture de conditions n'implique pas la couverture de branches :

```
public int foo(int x, int y) {
    if (x != 0 && y != 0)
        y = x+1;
    return y;
}
```

- Considérez les tests suivants :
  - `foo(0,1), foo(1,0)`
- Chaque condition prend les deux valeurs possibles, mais l'instruction `y = x+1` n'est jamais exécutée

Couverture des branches/conditions

- Chaque décision **et** chaque condition d'une décision doivent prendre toutes les valeurs possibles
  - Combinaisons des deux approches précédentes
- Certaines valeurs peuvent en masquer d'autres

```
public int foo(int x, int y, int z) {
    if (x != 0 && (y != 0 || z < 0))
        y=x+1;
    return y;
}
```

- Le test `foo(0,1,1)` aurait pu exposer le fait que la condition `z<0` est erronée, mais comme la condition `x!=0` masque le reste de l'expression, l'erreur n'est pas détectée.

Couverture de conditions multiples

- Toutes les combinaisons de conditions dans toutes les décision doivent être couvertes au moins une fois :
  - Implique toutes les approches précédentes

```
public int foo(int x, int y) {
    if (x != 0 && y != 0)
        y = x+1;
    return y;
}
```

- Il faudrait écrire au moins 4 tests, par exemple :
  - `foo(0,0), foo(1,0), foo(0,1), foo(1,1)`

Boucles

- Les boucles sont souvent la source de fautes, il faut donc bien les tester
  - Tester la condition d'entrée de la boucle
  - Utiliser des valeurs de marges pour la variable d'induction
  - Tester les boucles imbriquées de l'intérieur vers l'extérieur

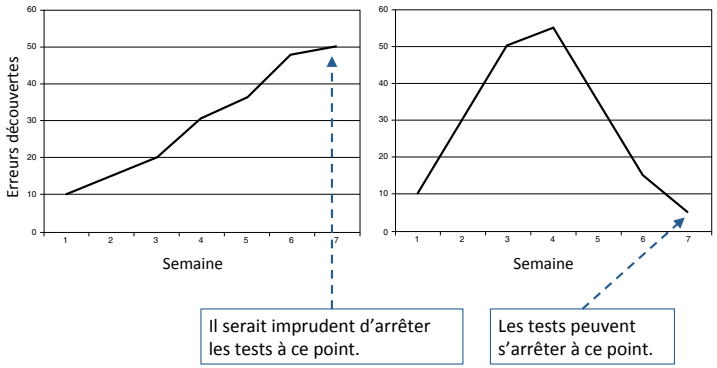
Critères d'arrêt

Quand arrêter de tester?

- Arrêter lorsque le temps réservé aux tests est écoulé
  - Ce critère peut être satisfait même si aucun test n'est effectué!
- Arrêter lorsque les tests ne révèlent plus d'erreurs
  - Aussi indépendant de la qualité des tests
- Arrêter lorsqu'une méthodologie a été suivie pour la création des tests et que les tests ne révèlent plus d'erreurs
  - Assure un certain niveau de qualité des tests
  - Ne convient pas aux tests pour lesquels une méthodologie n'est pas disponible (ex: tests de système)
  - Est subjectif et difficile à appliquer en pratique

Quand arrêter de tester?

- Arrêter lorsque la fréquence de découverte de nouvelles erreurs est en baisse



Quand arrêter de tester?

- Arrêter lorsqu'un nombre d'erreurs ont été trouvées
  - Ex: le programme sera testé jusqu'à ce que 90% des erreurs ait été trouvées, ou 3 mois, selon le dernier critère atteint
  - Nécessite un estimé du nombre d'erreurs dans le système
  - Quoi faire si l'estimé surestime le nombre d'erreurs?
    - Il se peut que le critère voulu ne soit jamais atteint
    - Il est difficile de déterminer si les erreurs n'existent pas dans le code, ou si les tests ne les ont simplement pas encore découverts
    - Une agence de test externe (indépendante) peut aider à faire un choix éclairé

Estimation du nombre d'erreurs

- Par comparaison avec des projets antérieurs
- Par étude des premières phases de tests
  - Un modèle statistique peut prédire le nombre d'erreurs en fonction de données initiales du projet
- Par utilisation de moyennes empiriques
  - Ex: 4 à 8 erreurs en moyenne par 100 lignes de code
- Par introduction d'erreurs simulées
  - Des erreurs sont introduites dans le programme, et les tests sont effectués pour savoir combien de ces erreurs sont identifiées
- Par comparaison de deux équipes indépendantes
  - Deux équipes indépendantes tentent d'identifier les erreurs en parallèle
  - Les erreurs identifiées par les deux équipes sont utilisées pour estimer le nombre total d'erreurs