

Probabilités et Simulation

Générateurs de loi uniforme et de lois discrètes

Jean-Marc Vincent ¹

¹Laboratoire d'Informatique de Grenoble
Polytech Grenoble

Septembre 2016

Plan

- 1 **Introduction**
- 2 Lois uniformes
- 3 Ensemble fini
- 4 Synthèse

Histoires de dés

Pièces, dés, roues,...

Mécanisme physique :

Suite d'observations : $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots$ à valeur dans $\{1, 2, \dots, K\}$

Modèle probabiliste :

La séquence d'observations est modélisée par une suite de

- variables aléatoires,
- indépendantes,
- identiquement distribuées,
- de loi uniforme sur l'ensemble $\{1, 2, \dots, K\}$ notée $\{X_n\}_{n \in \mathbb{N}}$

Notations et propriétés

Pour tout n et pour toute séquence $\{x_1, \dots, x_n\}$ de $\{1, 2, \dots, K\}^n$

$$\begin{aligned}
 \mathbb{P}(X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n) &= \mathbb{P}(X_1 = x_1) \cdots \mathbb{P}(X_n = x_n) \text{ indépendance;} \\
 &= \mathbb{P}(X = x_1) \cdots \mathbb{P}(X = x_n) \text{ même loi;} \\
 &= \frac{1}{K} \cdots \frac{1}{K} = \frac{1}{K^n} \text{ loi uniforme.}
 \end{aligned}$$

Plan

- 1 Introduction
- 2 Lois uniformes**
- 3 Ensemble fini
- 4 Synthèse

Histoires de dés (suite)

Pièce \mapsto Dé-8

À partir d'une pièce de monnaie écrire un générateur aléatoire d'un dé à 8 faces:

Histoires de dés (suite)

Pièce \mapsto Dé-8

À partir d'une pièce de monnaie écrire un générateur aléatoire d'un dé à 8 faces:

Dé-8()

Données: Une fonction "Pièce()" générateur aléatoire de $\{0, 1\}$

Résultat: Une séquence i.i.d. de loi uniforme sur $\{1, \dots, 8\}$

$A_0 = \text{Pièce}()$

$A_1 = \text{Pièce}()$

$A_2 = \text{Pièce}()$

$S = A_0 + 2 * A_1 + 4 * A_2 + 1$

return S

Histoires de dés : Preuve de l'algorithme

Spécification :

une séquence d'appels à la fonction **Dé-8()** est modélisée par une séquence de variables aléatoires i.i.d. de loi uniforme sur $\{1, \dots, 8\}$.

Histoires de dés : Preuve de l'algorithme

Spécification :

une séquence d'appels à la fonction **Dé-8()** est modélisée par une séquence de variables aléatoires i.i.d. de loi uniforme sur $\{1, \dots, 8\}$.

Hypothèse :

$P_0, P_1, \dots, P_n, \dots$ séquence des appels à **Pièce()** iid de loi uniforme sur $\{0, 1\}$

Histoires de dés : Preuve de l'algorithme

Spécification :

une séquence d'appels à la fonction **Dé-8()** est modélisée par une séquence de variables aléatoires i.i.d. de loi uniforme sur $\{1, \dots, 8\}$.

Hypothèse :

$P_0, P_1, \dots, P_n, \dots$ séquence des appels à **Pièce()** iid de loi uniforme sur $\{0, 1\}$

Preuve :

On note $S_0, S_1, \dots, S_n, \dots$ la séquence de variables aléatoires modélisant les résultats obtenus par appels successifs de **Dé-8()**.

Soit $n \in \mathbb{N}$ et $(x_0, x_1, \dots, x_n) \in \{1, \dots, 8\}^n$. Il faut montrer que

$$\mathbb{P}(S_0 = x_0, \dots, S_n = x_n) = \frac{1}{8^{n+1}} \quad \text{cqfd.}$$

Histoires de dés : Preuve de l'algorithme (suite)

On a

$$\mathbb{P}(S_0 = x_0, \dots, S_n = x_n)$$

$$= \mathbb{P}(S_0 = x_0) \cdots \mathbb{P}(S_n = x_n)$$

car S_k ne dépend que de $P_{3k}, P_{3k+1}, P_{3k+2}$ et que les P_i sont indépendants ;
les S_0, \dots, S_n, \dots sont donc indépendants ;

$$= \mathbb{P}(S_0 = x_0) \cdots \mathbb{P}(S_n = x_n) \text{ car } (P_{3k}, P_{3k+1}, P_{3k+2}) \text{ ont même loi.}$$

Histoires de dés : Preuve de l'algorithme (suite)

On a

$$\mathbb{P}(S_0 = x_0, \dots, S_n = x_n)$$

$$= \mathbb{P}(S_0 = x_0) \cdots \mathbb{P}(S_n = x_n)$$

car S_k ne dépend que de $P_{3k}, P_{3k+1}, P_{3k+2}$ et que les P_i sont indépendants ;
les S_0, \dots, S_n, \dots sont donc indépendants ;

$$= \mathbb{P}(S_0 = x_0) \cdots \mathbb{P}(S_n = x_n) \text{ car } (P_{3k}, P_{3k+1}, P_{3k+2}) \text{ ont même loi.}$$

Or pour i dans $\{1, \dots, 8\}$, $i - 1$ s'écrit de manière unique en binaire
 $i - 1 =_2 a_2 a_1 a_0$.

$$\mathbb{P}(S_0 = i) = \mathbb{P}(P_0 = a_0, P_1 = a_1, P_2 = a_2)$$

$$= \mathbb{P}(P_0 = a_0) \mathbb{P}(P_1 = a_1) \mathbb{P}(P_2 = a_2) \text{ les appels à Piece() sont indépendants}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2} = \frac{1}{8} \text{ car même loi uniforme sur } \{0, 1\}.$$

d'où

$$\mathbb{P}(S_0 = x_0, \dots, S_n = x_n) = \frac{1}{8^{n+1}} \quad \text{cqfd.}$$

Histoires de dés (suite)

Pièce \mapsto **Dé- 2^k**

À partir d'une pièce de monnaie écrire un générateur aléatoire d'un dé à 2^k faces:

Histoires de dés (suite)

Pièce \mapsto Dé- 2^k

À partir d'une pièce de monnaie écrire un générateur aléatoire d'un dé à 2^k faces:

Dé(k)

Données: Une fonction "Pièce()" générateur aléatoire de $\{0, 1\}$

Résultat: Une séquence i.i.d. de loi uniforme sur $\{1, \dots, 2^k\}$

$S=0$

for $i = 1$ **to** k

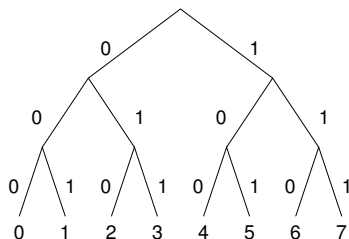
$S = \text{Pièce}() + 2.S$ // cf Schéma de Hörner

$S = S + 1$

return S

Preuve: Identique au **Dé-8**, unicité de la décomposition binaire d'un entier de $\{0, \dots, 2^k - 1\}$ par un vecteur de k bits.

Représentation binaire :



$5 =_2 101$, $2 =_2 010$, $42 =_2 101010 \dots$

Histoires de dés (suite)

Pièce \mapsto Dé-6

À partir d'une pièce de monnaie écrire un générateur aléatoire d'un dé à 6 faces:

Histoires de dés (suite)

Pièce \mapsto Dé-6

À partir d'une pièce de monnaie écrire un générateur aléatoire d'un dé à 6 faces:

Dé-6()

Données: Une fonction **Dé-8()** générateur aléatoire de $\{1, \dots, 8\}$

Résultat: Une séquence i.i.d. de loi uniforme sur $\{1, \dots, 6\}$

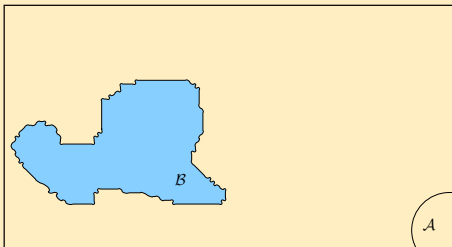
```
repeat
|  X = Dé-8()
until X ≤ 6
return X
```

Preuve: voir plus tard

Méthode basée sur le rejet

Principe

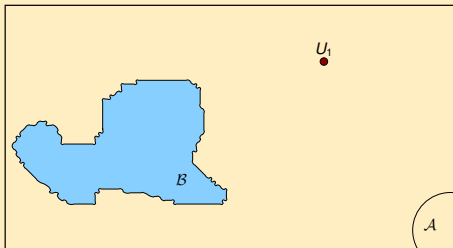
Générer uniformément sur \mathcal{A} accepter si le point est dans \mathcal{B} .



Méthode basée sur le rejet

Principe

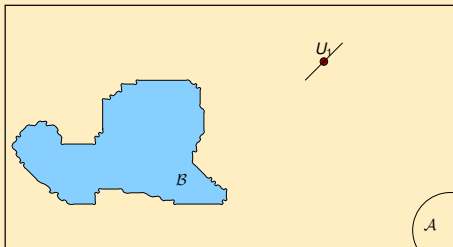
Générer uniformément sur \mathcal{A} accepter si le point est dans \mathcal{B} .



Méthode basée sur le rejet

Principe

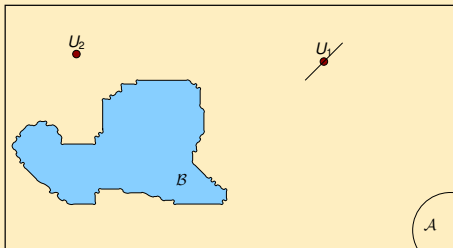
Générer uniformément sur \mathcal{A} accepter si le point est dans \mathcal{B} .



Méthode basée sur le rejet

Principe

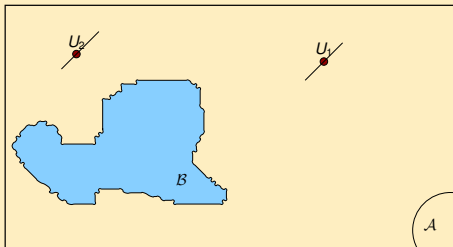
Générer uniformément sur \mathcal{A} accepter si le point est dans \mathcal{B} .



Méthode basée sur le rejet

Principe

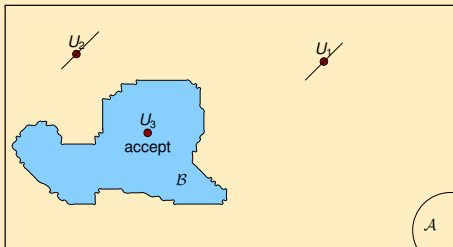
Générer uniformément sur \mathcal{A} accepter si le point est dans \mathcal{B} .



Méthode basée sur le rejet

Principe

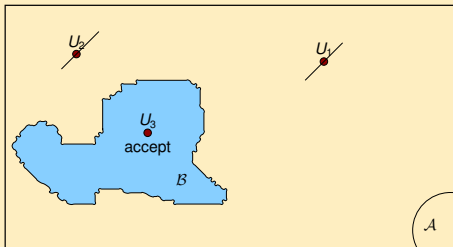
Générer uniformément sur \mathcal{A} accepter si le point est dans \mathcal{B} .



Méthode basée sur le rejet

Principe

Générer uniformément sur \mathcal{A} accepter si le point est dans \mathcal{B} .



Algorithme

Génère-unif(\mathcal{B})

Données:

Générateur uniforme sur \mathcal{A}

Résultat:

Générateur uniforme sur \mathcal{B}

repeat

| $X = \text{Génère-unif}(\mathcal{A})$

until $X \in \mathcal{B}$

return X

Méthode basée sur le rejet : preuve

Génère-unif(\mathcal{B})

Données:

Générateur uniforme sur \mathcal{A}

Résultat:

Générateur uniforme sur \mathcal{B}

$N = 0$

repeat

$X = \text{Génère-unif}(\mathcal{A})$

$N = N + 1$

until $X \in \mathcal{B}$

return X, N

Preuve

Tirages **Génère-unif**(\mathcal{A}): $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$

$$\begin{aligned} & \mathbb{P}(X \in \mathcal{C}, N = k) \\ &= \mathbb{P}(X_1 \notin \mathcal{B}, \dots, X_{k-1} \notin \mathcal{B}, X_k \in \mathcal{C}) \\ &= \mathbb{P}(X_1 \notin \mathcal{B}) \cdots \mathbb{P}(X_{k-1} \notin \mathcal{B}) \mathbb{P}(X_k \in \mathcal{C}) \\ &= \left(1 - \frac{|\mathcal{B}|}{|\mathcal{A}|}\right)^{k-1} \frac{|\mathcal{C}|}{|\mathcal{A}|} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X \in \mathcal{C}) &= \sum_{k=1}^{+\infty} \mathbb{P}(X \in \mathcal{C}, N = k) \\ &= \sum_{k=1}^{+\infty} \left(1 - \frac{|\mathcal{B}|}{|\mathcal{A}|}\right)^{k-1} \frac{|\mathcal{C}|}{|\mathcal{A}|} = \frac{|\mathcal{C}|}{|\mathcal{B}|} \end{aligned}$$

Donc la loi est **uniforme** sur \mathcal{B}

Méthode basée sur le rejet : complexité

Génère-unif(\mathcal{B})

Données:

Générateur uniforme sur \mathcal{A}

Résultat:

Générateur uniforme sur \mathcal{B}

$N = 0$

repeat

$X = \text{Génère-unif}(\mathcal{A})$

$N = N + 1$

until $X \in \mathcal{B}$

return X, N

Complexité

N Nombre d'itérations

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(N = k) &= \mathbb{P}(X \in \mathcal{B}, N = k) \\ &= \left(1 - \frac{|\mathcal{B}|}{|\mathcal{A}|}\right)^{k-1} \frac{|\mathcal{B}|}{|\mathcal{A}|} \end{aligned}$$

Loi géométrique de paramètre $p_a = \frac{|\mathcal{B}|}{|\mathcal{A}|}$.

Nombre moyen d'itérations

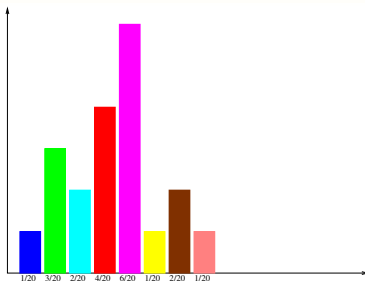
$$\begin{aligned} \mathbb{E} N &= \sum_{k=1}^{+\infty} k(1 - p_a)^{k-1} p_a \\ &= \frac{1}{(1 - (1 - p_a))^2} p_a = \frac{1}{p_a}. \end{aligned}$$

$$\text{Var } N = \frac{1 - p_a}{p_a^2}$$

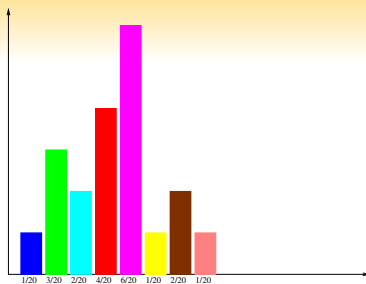
Plan

- 1 Introduction
- 2 Lois uniformes
- 3 Ensemble fini**
- 4 Synthèse

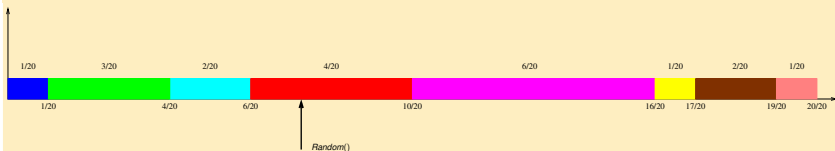
Loi sur un ensemble fini



Loi sur un ensemble fini

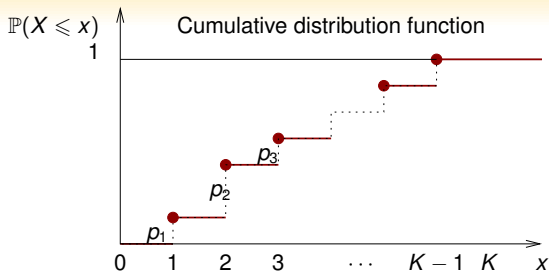


Histogramme : représentation "à plat"



Coût (nombre moyen de comparaisons) : $\hat{C}(P) = \sum_{k=1}^K k \cdot p_k = 4.35$

Inverse de la fonction de répartition



Principe

Diviser $[0, 1[$ en intervalles de longueur p_k

Trouver l'intervalle contenant *Random*

Retourner l'index de l'intervalle

Coût de calcul : $\mathcal{O}(\mathbb{E}X)$ itérations

Coût mémoire : $\mathcal{O}(K)$

Inverse de la fonction de répartition: algorithme

Algorithme

Inverse($P[]$)

Données: Un tableau de probabilités $P[] = \{p_1, \dots, p_K\}$

Résultat: Un entier k généré avec la probabilité p_k

$u = \text{Random}()$

$k = 0$

$S = 0$

while $u > S$

$k = k + 1$
 $S = S + P[k]$

return k

Optimisation

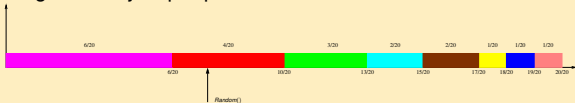
Méthodes d'optimisation

- pré-calcul de la fonction de répartition dans une table
- ranger les objets par probabilité décroissante

Optimisation

Méthodes d'optimisation

- pré-calcul de la fonction de répartition dans une table
- ranger les objets par probabilité décroissante

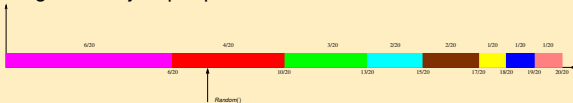


- utiliser une recherche dichotomique
- utiliser un arbre binaire de recherche (optimalité = Huffman coding tree)

Optimisation

Méthodes d'optimisation

- pré-calcul de la fonction de répartition dans une table
- ranger les objets par probabilité décroissante

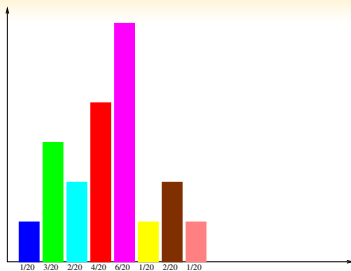


- utiliser une recherche dichotomique
- utiliser un arbre binaire de recherche (optimalité = Huffman coding tree)

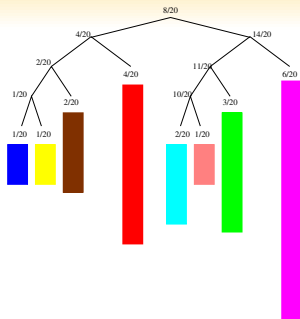
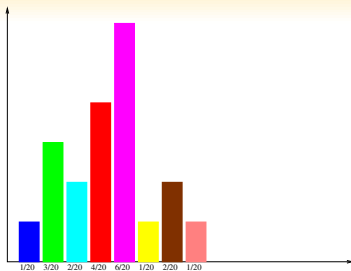
Commentaires

- Dépend de l'usage du générateur (répétitions)
- pré-calcul en $\mathcal{O}(K)$ (peut être grand)

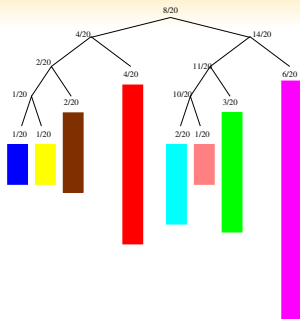
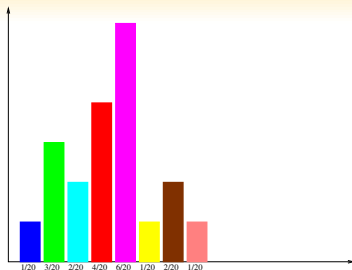
Optimalité



Optimalité



Optimalité

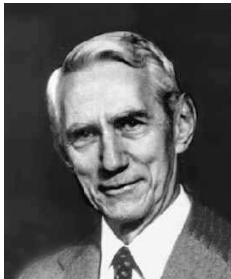


Nombre de comparaisons

Structure d'arbre binaire de recherche

$$\mathbb{E}N = \sum_{k=1}^K p_k \cdot l_k = 3,75, \text{ Entropie} = \sum_{k=1}^K p_k (-\log_2 p_k) = 3.70$$

Claude Shannon (1916-2001)



Claude Elwood Shannon (30 avril 1916 à Gaylord, Michigan - 24 février 2001), ingénieur électrique, est l'un des pères, si ce n'est le père fondateur, de la théorie de l'information. Son nom est attaché à un célèbre "schéma de Shannon" très utilisé en sciences humaines, qu'il a constamment désavoué.

Il étudia le génie électrique et les mathématiques à l'Université du Michigan en 1932. Il utilisa notamment l'algèbre booléenne pour sa maîtrise soutenue en 1938 au MIT. Il y expliqua comment construire des machines à relais en utilisant l'algèbre de Boole pour décrire l'état des relais (1 : fermé, 0 : ouvert).

Shannon travailla 20 ans au MIT, de 1958 à 1978. Parallèlement à ses activités académiques, il travailla aussi aux laboratoires Bell de 1941 à 1972.

Claude Shannon était connu non seulement pour ses travaux dans les télécommunications, mais aussi pour l'étendue et l'originalité de ses hobbies, comme la jonglerie, la pratique du monocycle et l'invention de machines farfelues : une souris mécanique sachant trouver son chemin dans un labyrinthe, un robot jongleur, un joueur d'échecs (roi tour contre roi)...

Souffrant de la maladie d'Alzheimer dans les dernières années de sa vie, Claude Shannon est mort à 84 ans le 24 février 2001.

[Wikipedia](#)

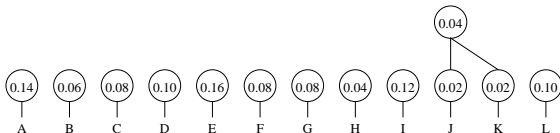
Algorithme de Huffman (1951)

A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10



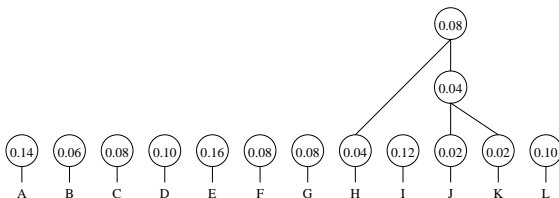
Algorithme de Huffman (1951)

A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10



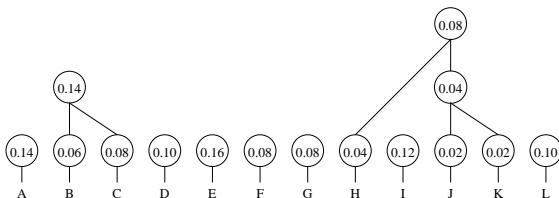
Algorithme de Huffman (1951)

A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10



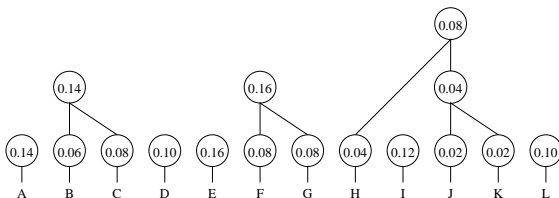
Algorithme de Huffman (1951)

A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

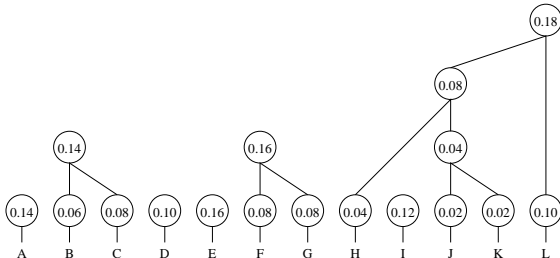


Algorithme de Huffman (1951)

A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

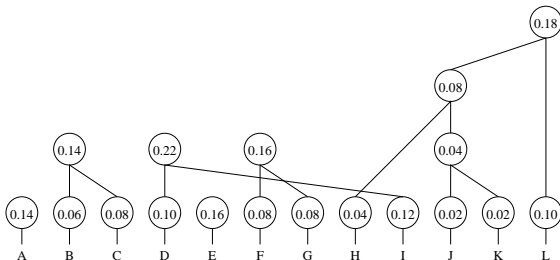


Algorithme de Huffman (1951)



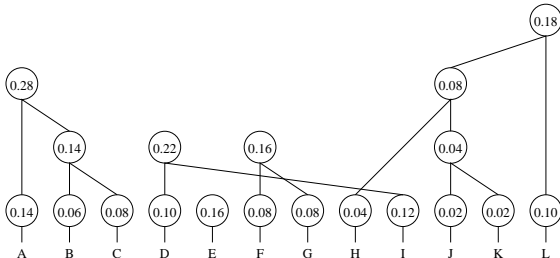
A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

Algorithme de Huffman (1951)



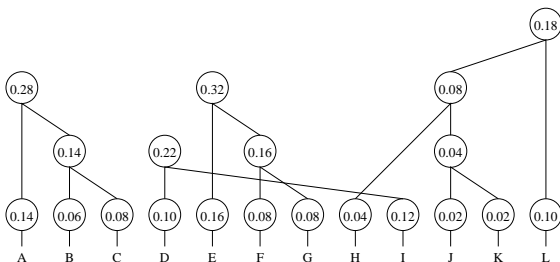
A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

Algorithme de Huffman (1951)



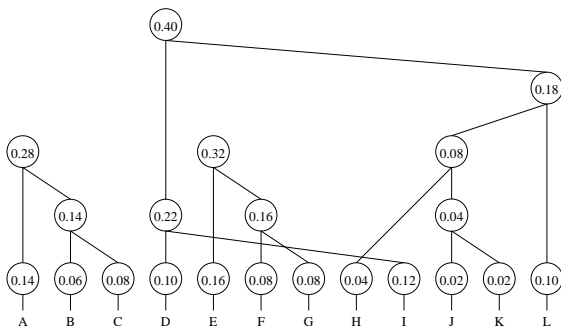
A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

Algorithme de Huffman (1951)



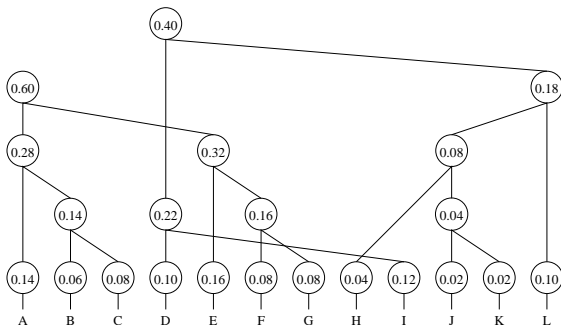
A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

Algorithme de Huffman (1951)



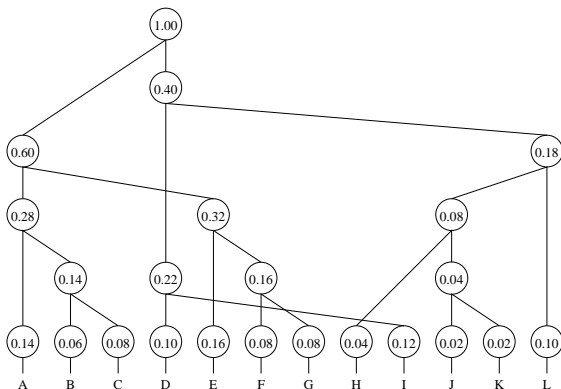
A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

Algorithme de Huffman (1951)



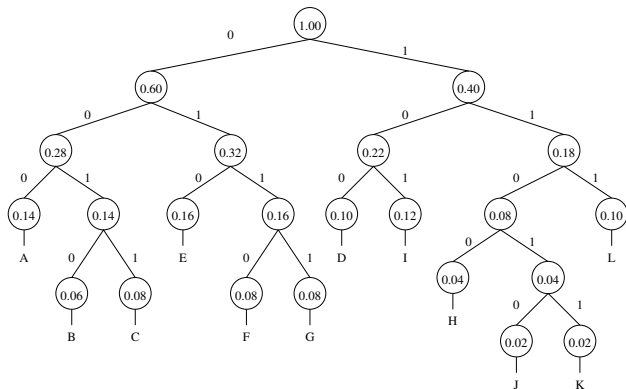
A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

Algorithme de Huffman (1951)



A	0.14
B	0.06
C	0.08
D	0.10
E	0.16
F	0.08
G	0.08
H	0.04
I	0.12
J	0.02
K	0.02
L	0.10

Algorithme de Huffman (1951)



A	0.14	000
B	0.06	0010
C	0.08	0011
D	0.10	100
E	0.16	010
F	0.08	0110
G	0.08	0111
H	0.04	1100
I	0.12	101
J	0.02	11010
K	0.02	11011
L	0.10	111

Codage optimal : L-moy = 3.42, Entropie = 3.38

Profondeur = $-\log_2(\text{probabilité})$

Généralisation Lempel-Ziv,...

Algorithme de Huffman (1951): Implantation

Arbre-Huffman(P[])

Données: Un tableau de probabilité $P = \{p_1, \dots, p_K\}$

Résultat: Un arbre binaire de Huffman transformé en arbre binaire de recherche

F: file à priorité

for $k = 1$ **to** K

```

| z=nouveau_noeud()
| z.gauche=Nil z.droit=Nil
| z.poids=P[k] Insérer(F,z)

```

while **Taille(F)** $\neq 1$

```

| z=nouveau_noeud()
| z.gauche=Extraire(F) z.droit=Extraire(F)
| z.poids=z.gauche.poids+z.droit.poids Insérer(F,z)

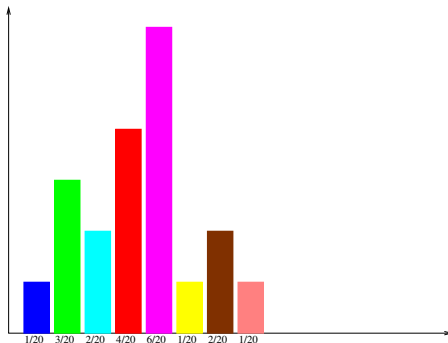
```

z=Extraire(F)

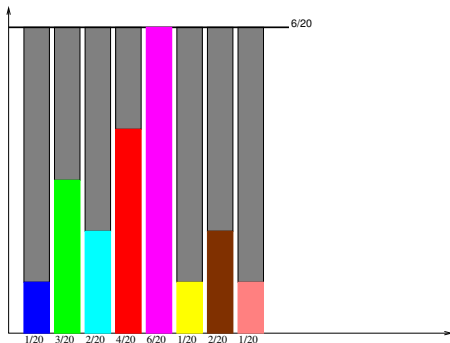
Mettre_à_jour_étiquettes(z)

// parcours infixé

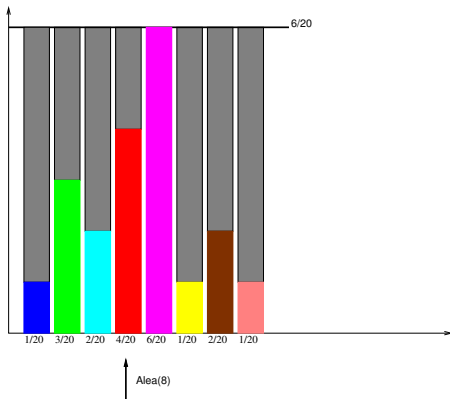
Méthode basée sur le rejet



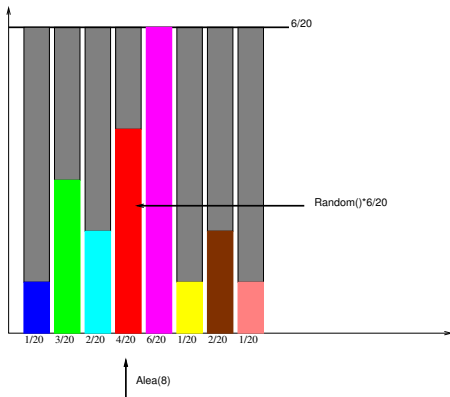
Méthode basée sur le rejet



Méthode basée sur le rejet



Méthode basée sur le rejet



Méthode basée sur le rejet (suite)

Génère($P[]$)

Données: Un tableau de probabilités $P[] = \{p_1, \dots, p_K\}$

Résultat: Un entier k généré avec la probabilité p_k

$N = 0$

repeat

$k = \text{Partie entière}(\text{Random}() * K + 1)$

$u = \text{Random}() * p_{\max}$

$N = N + 1$

until $u \leq P[k]$

return k, N

Preuve

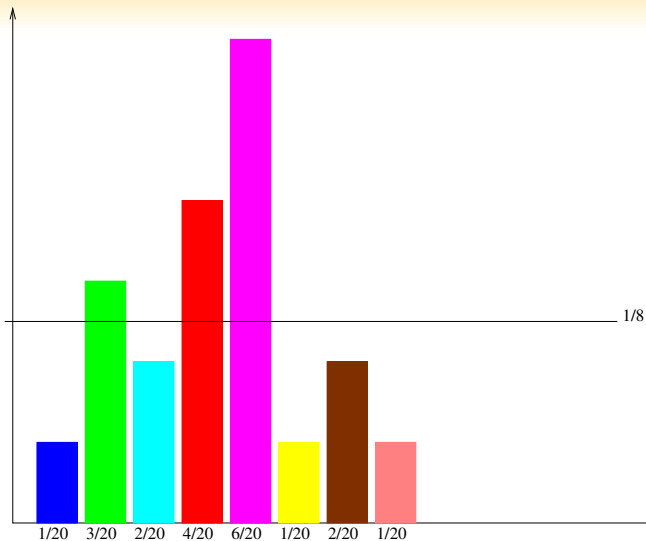
Même preuve que pour la loi uniforme

Complexité

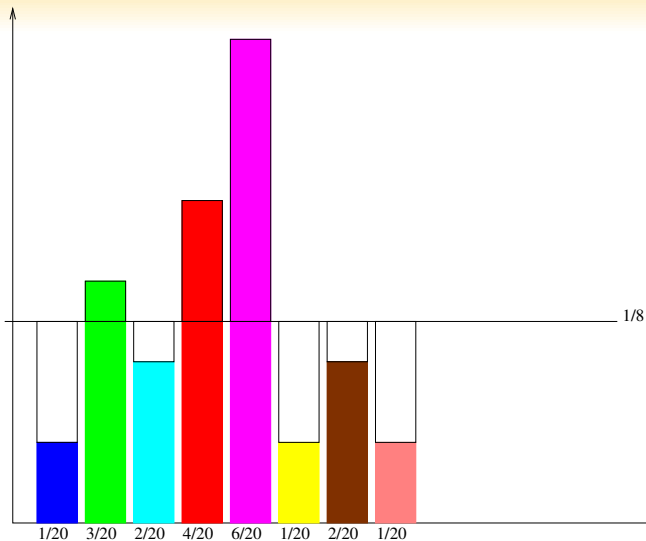
Coût moyen en nombre d'itérations :

$$p_a = \frac{1}{K \cdot p_{\max}} \text{ et } \mathbb{E}N = K p_{\max}$$

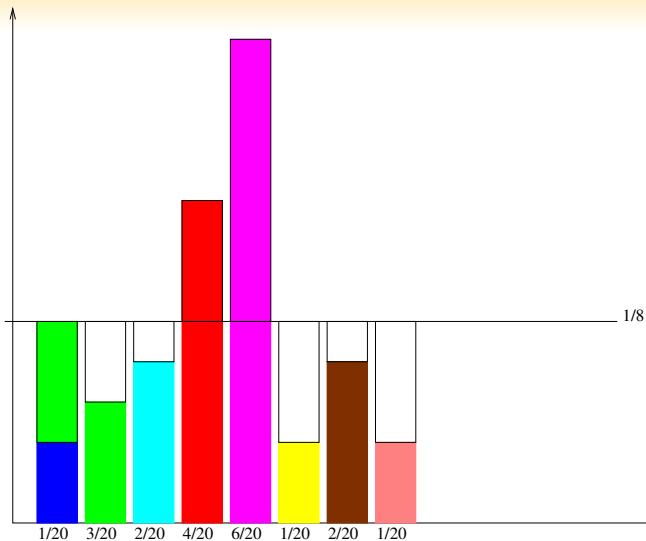
Méthode d'aliasing



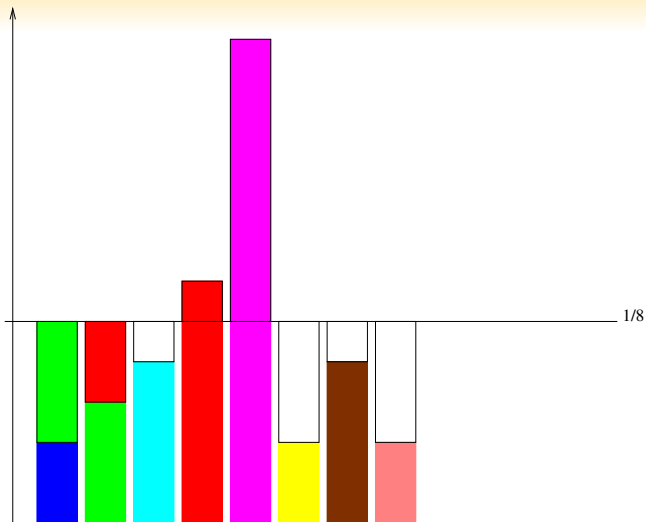
Méthode d'aliasing



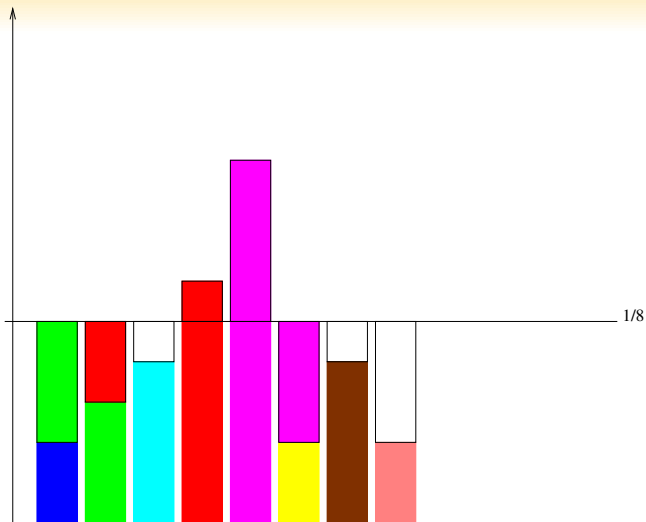
Méthode d'aliasing



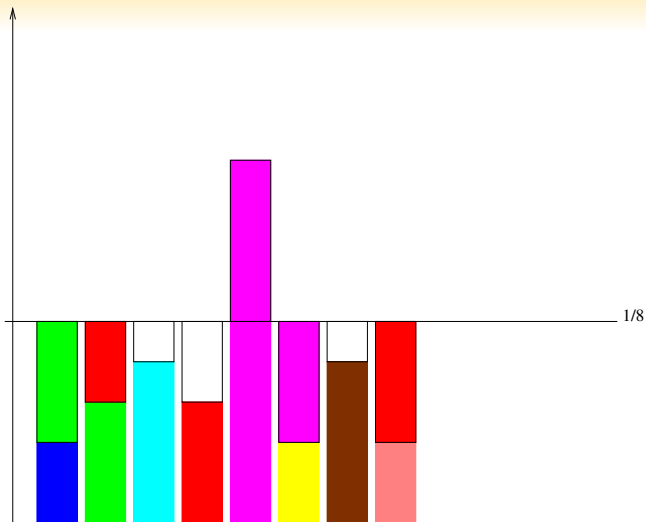
Méthode d'aliasing



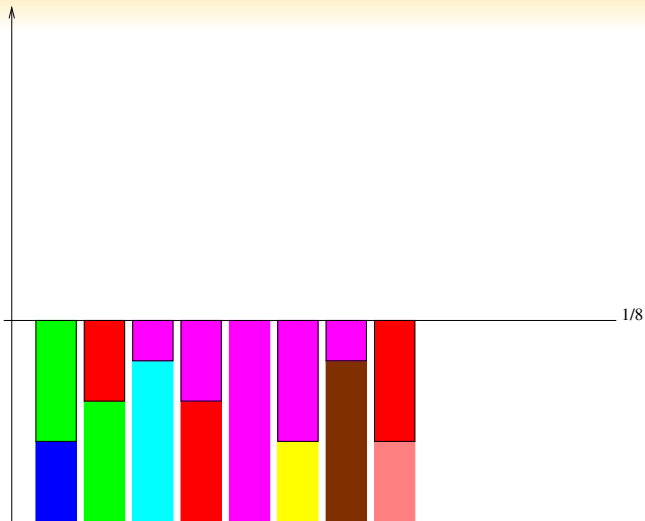
Méthode d'aliasing



Méthode d'aliasing



Méthode d'aliasing



Méthode d'aliasing : construction des tables

Table_Alias($P[]$)

Données: Un tableau de probabilité $P = [p_1, \dots, p_K]$

Résultat: Un tableau de seuils $S = [s_1, \dots, s_K]$
et d'alias $A = [a_1, \dots, a_K]$

$L = \emptyset$ $U = \emptyset$

for $k = 1$ **to** K

switch $P[k]$ **do**

case $< \frac{1}{K}$ $L = L \cup \{k\}$

case $> \frac{1}{K}$ $U = U \cup \{k\}$

while $L \neq \emptyset$

$i = \text{Extract}(L)$ $k = \text{Extract}(U)$

$S[i] = P[i]$ $A[i] = k$

$P[k] = P[k] - (\frac{1}{K} - P[i])$

switch $P[k]$ **do**

case $< \frac{1}{K}$ $L = L \cup \{k\}$

case $> \frac{1}{K}$ $U = U \cup \{k\}$

Méthode d'aliasing : génération

Génère($S[], A[]$)

Données: Un tableau de seuils $S = [s_1, \dots, s_K]$
et d'alias $A = [a_1, \dots, a_K]$

Résultat: Un indice k généré selon la probabilité $P = [p_1, \dots, p_K]$

```
k = Alea(K) // générateur uniforme d'entiers de 1 à K
if Random()1/K < S[k]
  | return k
else
  | return A[k]
```

Complexité

Temps de calcul :

- $\mathcal{O}(K)$ pour le pré-calcul des tables d'alias
- $\mathcal{O}(1)$ pour la génération

Mémoire :

- seuils $\mathcal{O}(K)$ (même coût que le vecteur P)
- alias $\mathcal{O}(K)$ (tableau d'index)

Plan

- 1 Introduction
- 2 Lois uniformes
- 3 Ensemble fini
- 4 Synthèse**

Synthèse

Méthodes de base

- Inverse de la fonction de répartition (avec optimisation)
forme "close" de l'inverse de la fonction de répartition
- Méthode à base de rejet
Loi proche de l'uniforme, p_k faciles à calculer
- Méthode d'aliasing
pré-calcul (coût amorti), surcoût mémoire
- Méthodes de composition
dépend de la structure des valeurs de probabilité
- et d'autres encore...

Remarques

- temps d'exécution dépend de l'architecture de la machine
- algorithme dépend souvent du problème sous-jacent à simuler (exemple Chevalier de Méré)
- rechercher la loi uniforme...