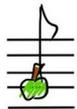
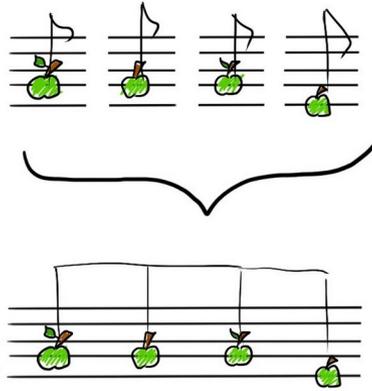


MORFOS : un logiciel d'analyse musicale pour l'obtention de la forme musicale en temps-réel

Joséphine Calandra
Séminaire du SCRIME 2024
20 juin 2024







notes

Three musical staves, each containing four notes. The first staff has four green apple notes with stems and beams. The second staff has four yellow orange notes with stems and beams. The third staff has four red cherry notes with stems and beams. A large bracket is drawn under each staff, grouping the four notes together.

motifs

Three musical staves, each containing four notes. The first staff has four green apple notes with stems and beams. The second staff has four yellow orange notes with stems and beams. The third staff has four red cherry notes with stems and beams. A long horizontal line is drawn above the notes in each staff, spanning the width of the four notes, representing a motif.

notes

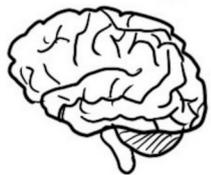
Handwritten musical notation on three staves. The first staff contains 12 notes: four green apples on a treble clef staff and four yellow lemons on a bass clef staff. The second staff contains four red apples on a bass clef staff. Brackets are drawn below each of the three staves, grouping the notes into three distinct sections.

motifs

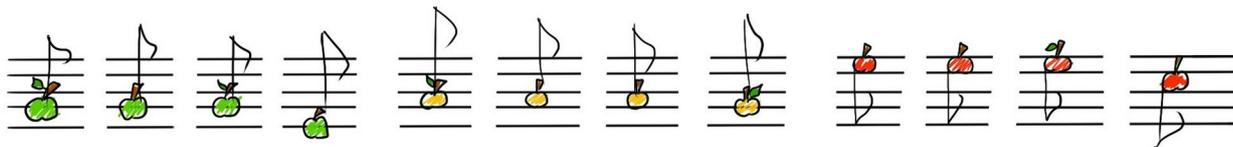
Handwritten musical notation on three staves. The first staff contains four green apples on a treble clef staff. The second staff contains four yellow lemons on a bass clef staff. The third staff contains four red apples on a bass clef staff. A large bracket is drawn below all three staves, grouping them together as motifs.

phrase

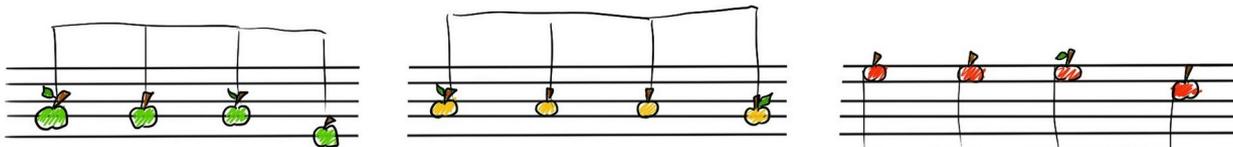
Handwritten musical notation on a single staff. The first four notes are green apples on a treble clef staff. The next four notes are yellow lemons on a bass clef staff. The final four notes are red apples on a bass clef staff. A large bracket is drawn below the entire staff, grouping all the notes together as a phrase.



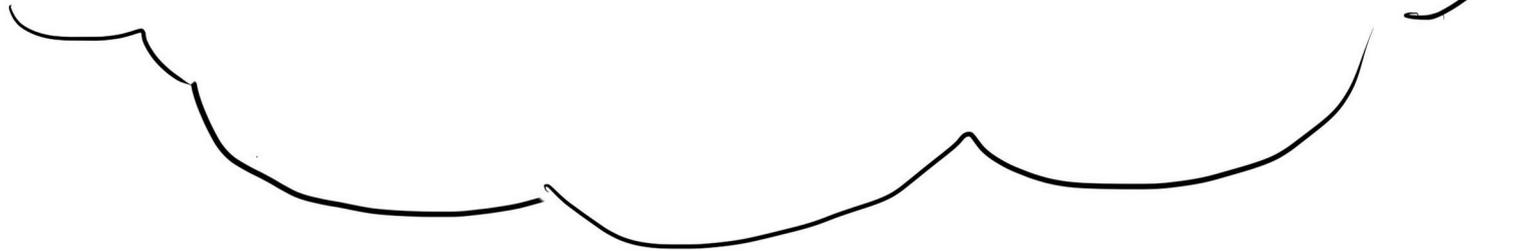
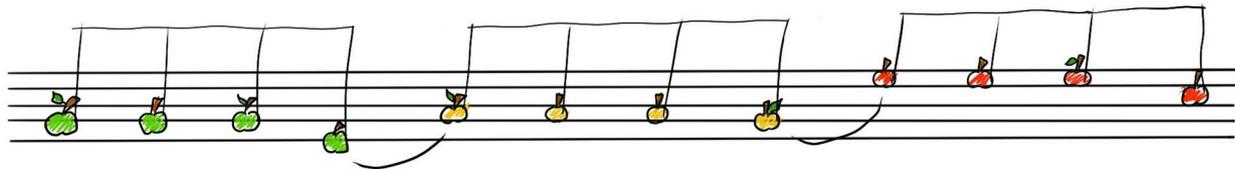
notes



motifs

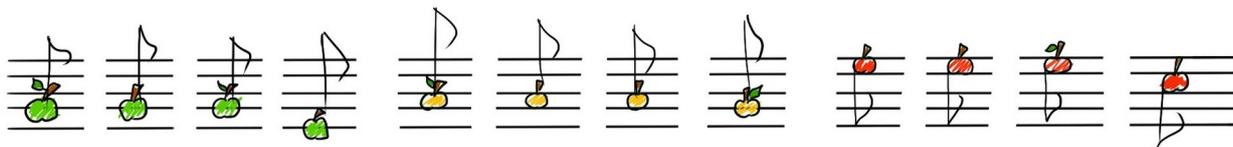


phrase

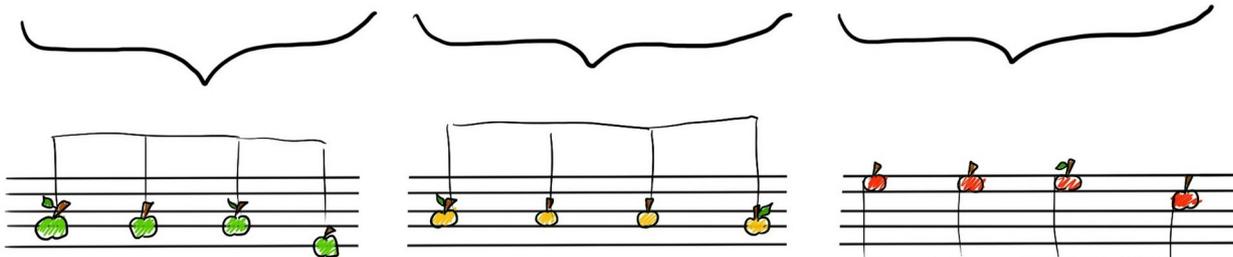


Implémentation

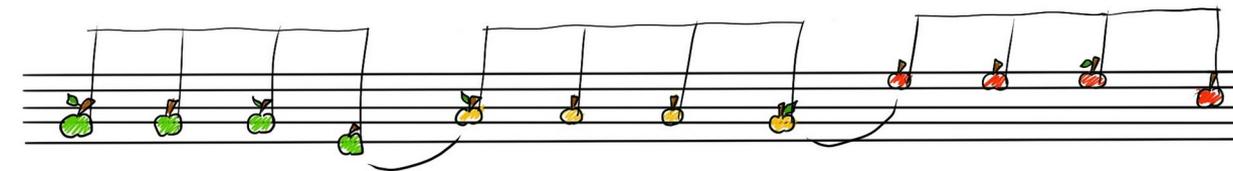
notes



motifs



phrase



Classification

notes

A musical staff with 12 notes. The first two notes are green and have a yellow box with a red question mark above them. The next two notes are also green. The following four notes are yellow. The last four notes are red. Brackets underneath group the notes into three sections: the first four (green), the next four (yellow), and the last four (red).

motifs

Two musical staves. The first staff has four green notes, with a yellow box and a red question mark above the first three. The second staff has four yellow notes, with a yellow box and a red question mark above the first three. A third staff below has four red notes. A large bracket underneath groups all these motifs together.

phrase

A single musical staff with 12 notes. The first four are green, the next four are yellow, and the last four are red. Brackets underneath group the notes into three sections of four notes each, corresponding to the color groups.



Segmentation

notes

A musical staff with 12 notes. The first four notes are green apples, the next four are yellow lemons, and the last four are red cherries. Three brackets are drawn below the staff, each spanning a group of four notes and containing a yellow question mark. The first bracket covers the four green apples, the second covers the four yellow lemons, and the third covers the four red cherries.

motifs

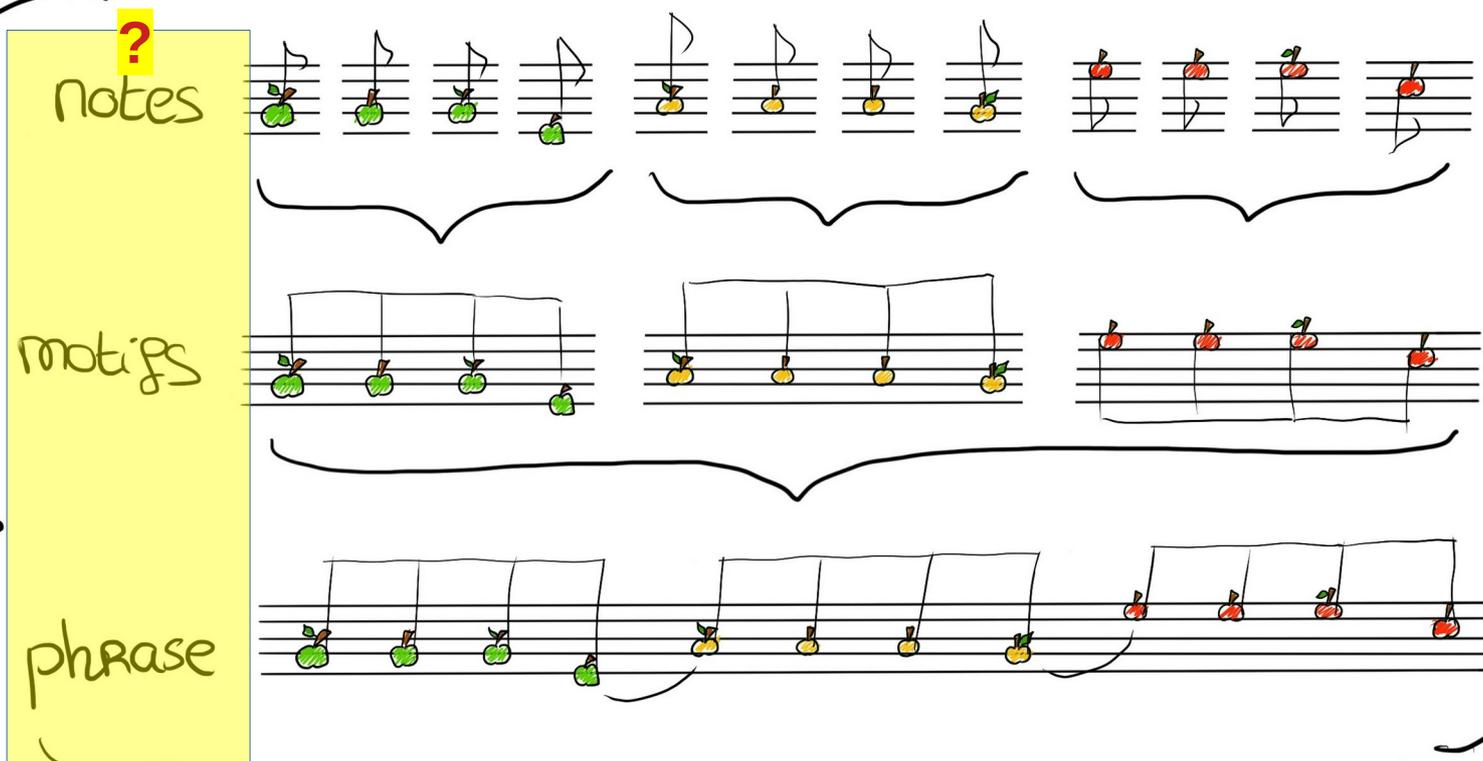
Three musical staves. The first staff contains the four green apple notes. The second staff contains the four yellow lemon notes. The third staff contains the four red cherry notes. A single large bracket is drawn below all three staves, spanning the entire sequence and containing a yellow question mark.

phrase

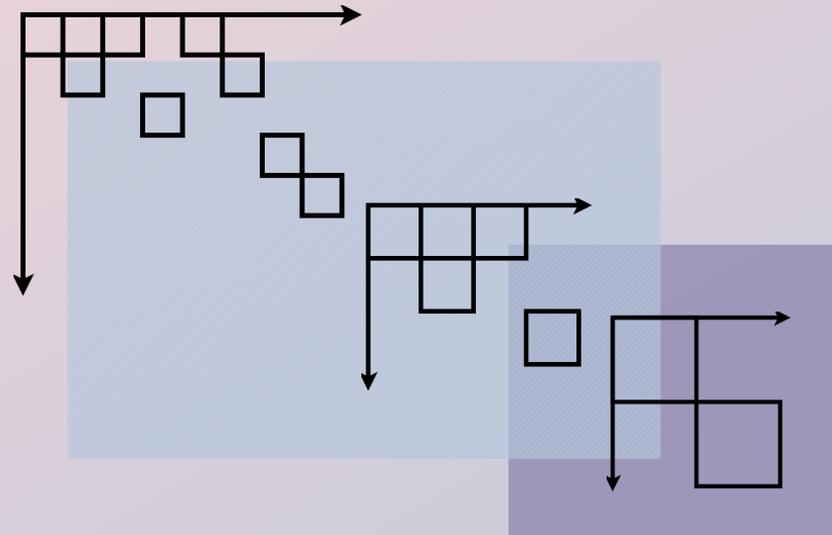
A single musical staff containing all 12 notes from the previous sections in sequence: four green apples, four yellow lemons, and four red cherries. A single large bracket is drawn below the entire staff, spanning all 12 notes.



Hiérarchisation



DEFINITIONS



Analyse musicale

Forme et Sémiologie

« *La musique, c'est ce qu'on écoute avec l'intention
d'écouter de la musique* »

- L. Berio

Analyse musicale

Forme et Sémiologie

« L'organisation musicale s'effectue en fonction d'une hiérarchie dépendante de l'importance des événements musicaux »
- H. Schenker

Définition du Diagramme Formel

Un **Diagramme Formel** est la représentation des *matériaux* d'une œuvre en fonction du *temps*.

Matériau : classe d'éléments musicaux substituables.

Objet : occurrences de ces matériaux dans une œuvre donnée.

Diagramme Formel

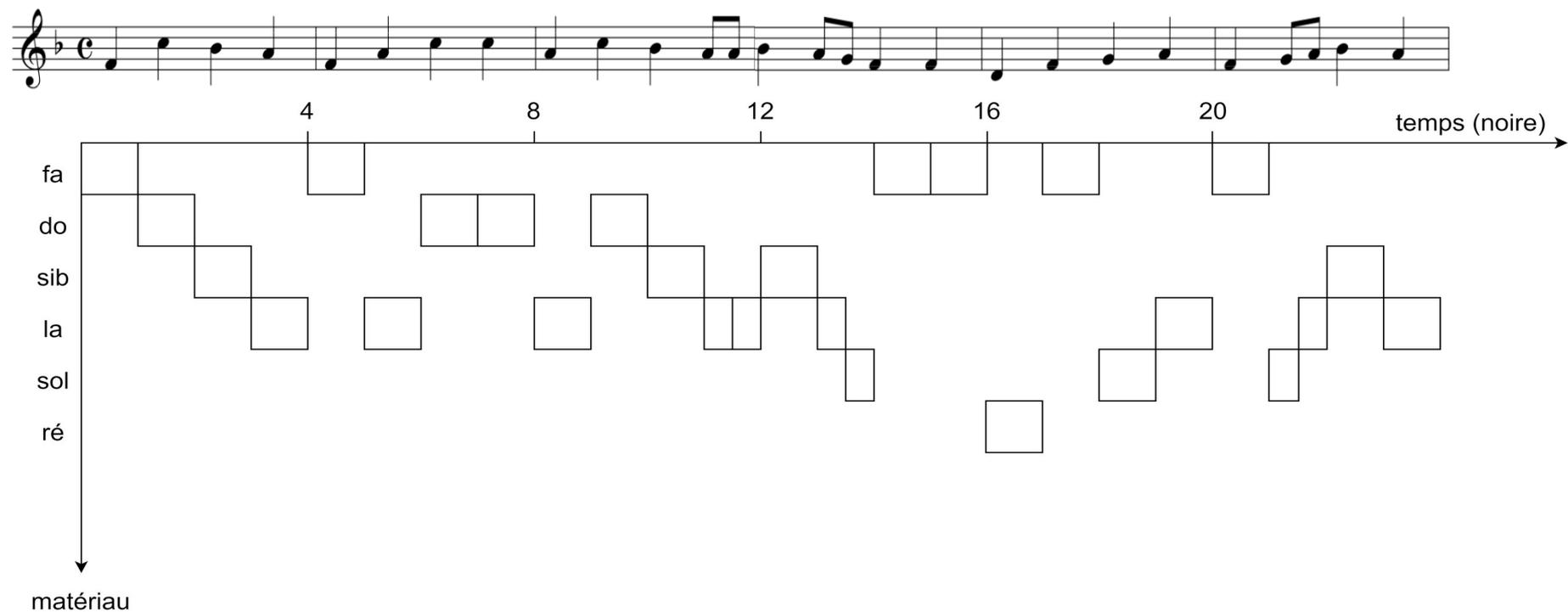


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel

pour chaque fragment entendu :

comparaison avec les fragments précédents ;

s'il est différent :

 inscription en mémoire « matériau » ;

dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel

pour chaque fragment entendu :

comparaison avec les fragments précédents ;

s'il est différent :

 inscription en mémoire « matériau » ;

dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

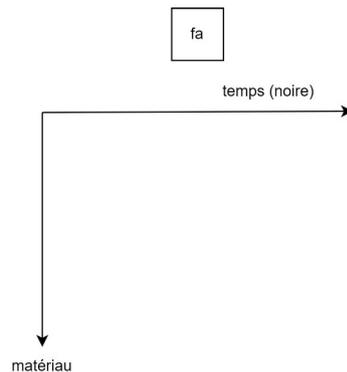


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel

pour chaque fragment entendu :

comparaison avec les fragments précédents ;

s'il est différent :

 inscription en mémoire « matériau » ;

dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

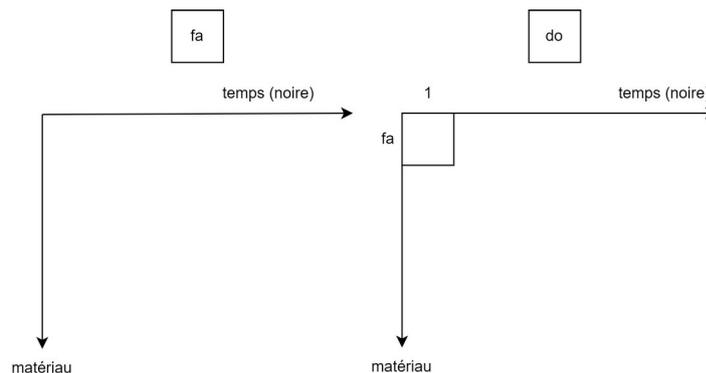


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel
pour chaque fragment entendu :
comparaison avec les fragments précédents ;
s'il est différent :
 inscription en mémoire « matériau » ;
dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

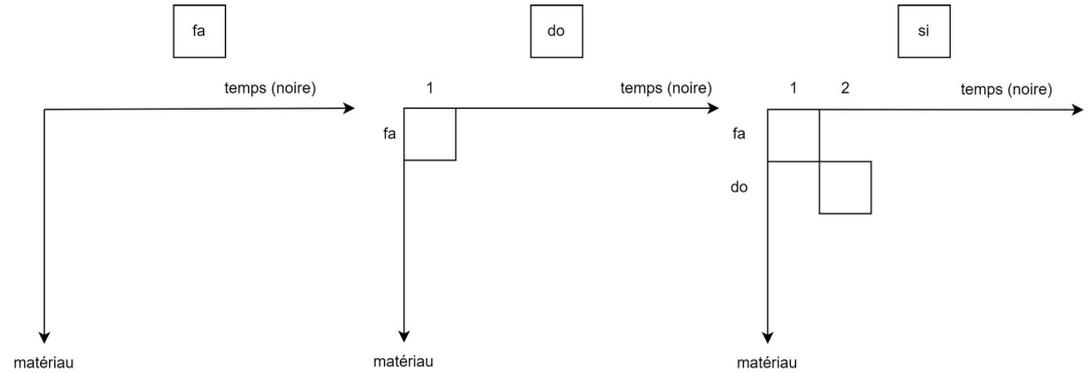


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel
pour chaque fragment entendu :
comparaison avec les fragments précédents ;
s'il est différent :
 inscription en mémoire « matériau » ;
dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

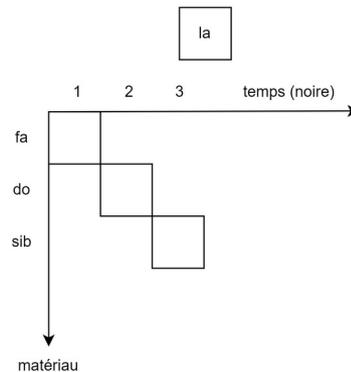
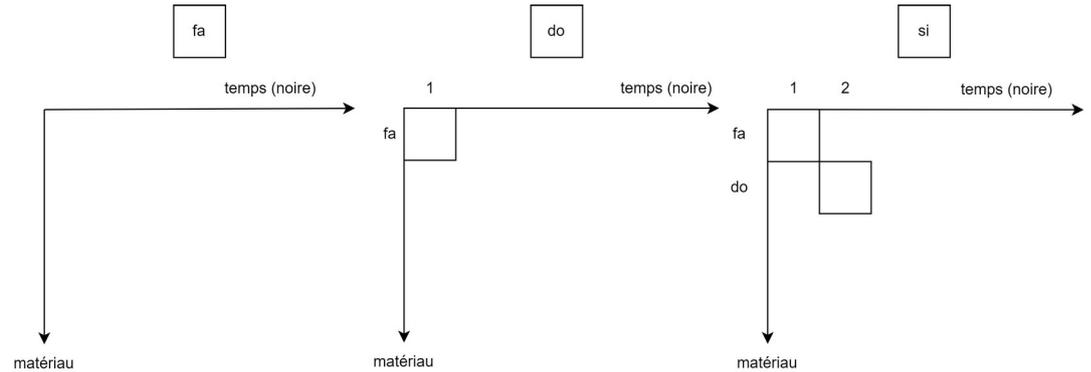
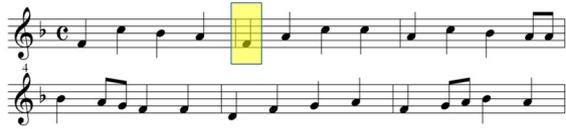


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel
pour chaque fragment entendu :
comparaison avec les fragments précédents ;
s'il est différent :
 inscription en mémoire « matériau » ;
dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

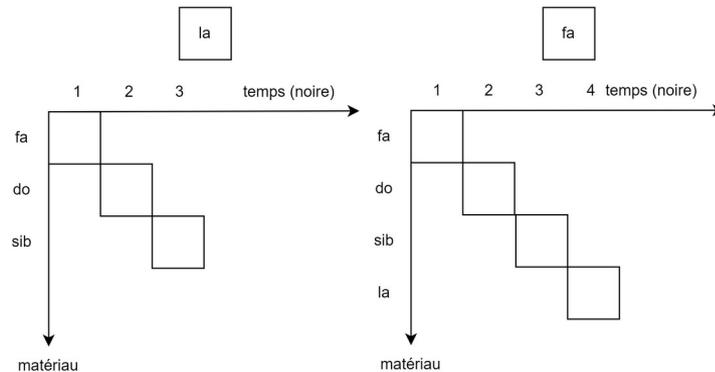
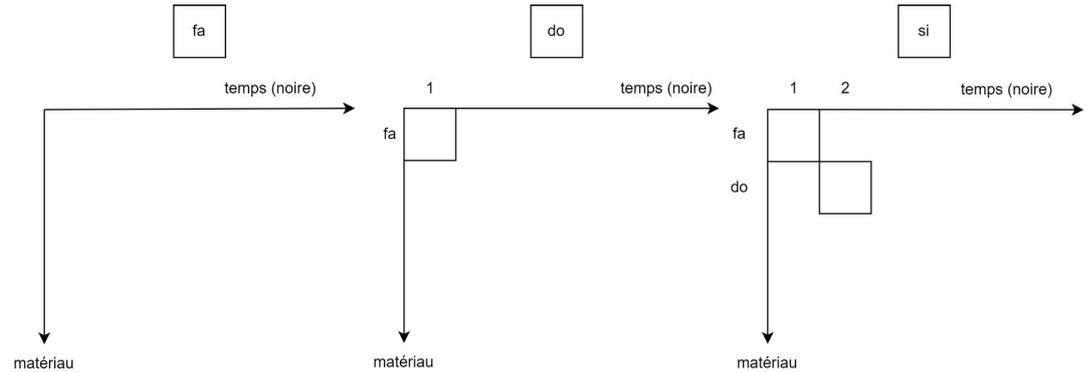
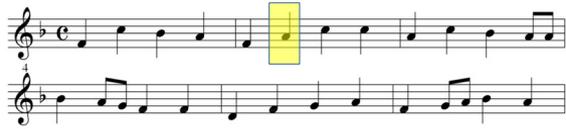


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel
 pour chaque fragment entendu :
 comparaison avec les fragments précédents ;
 s'il est différent :
 inscription en mémoire « matériau » ;
 dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

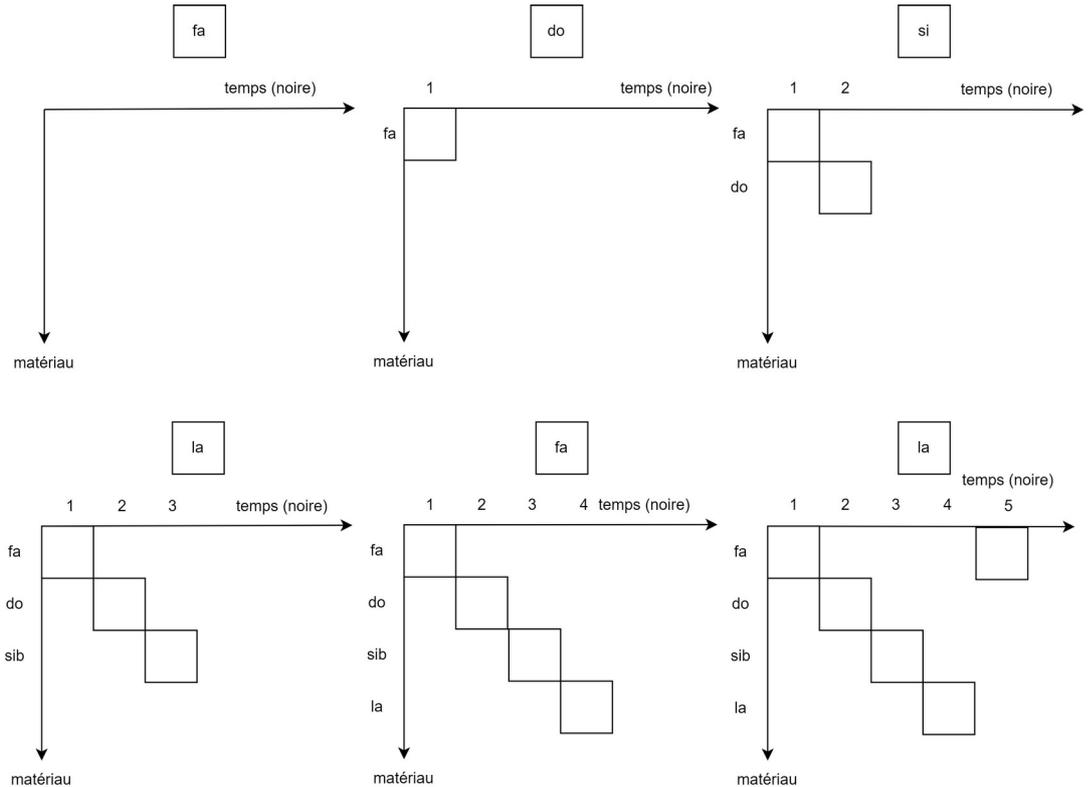


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel
 pour chaque fragment entendu :
 comparaison avec les fragments précédents ;
 s'il est différent :
 inscription en mémoire « matériau » ;
 dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

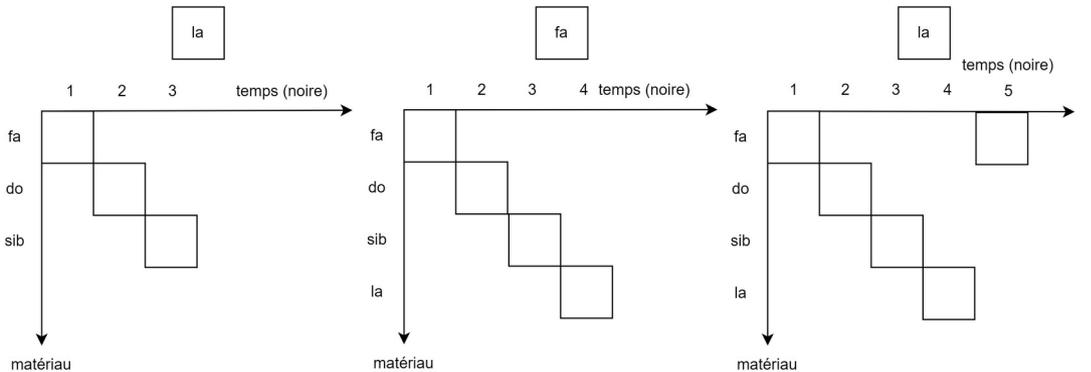
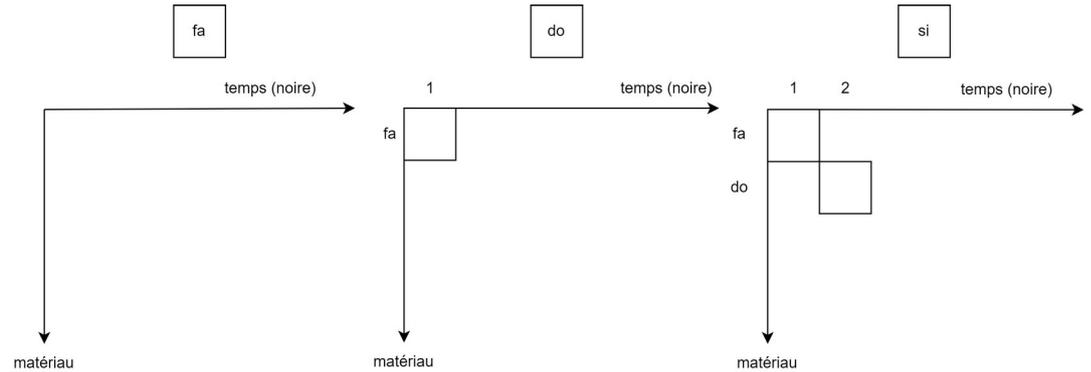
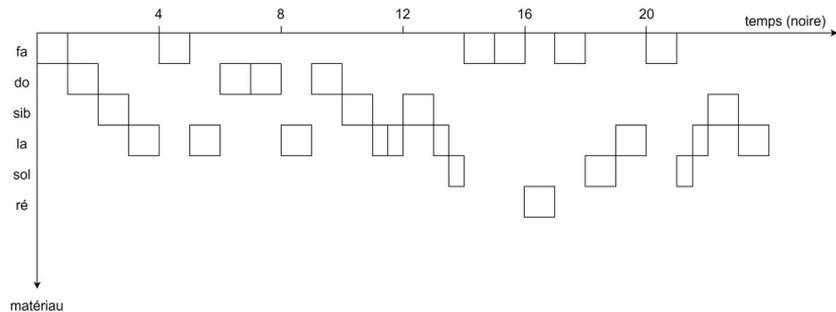
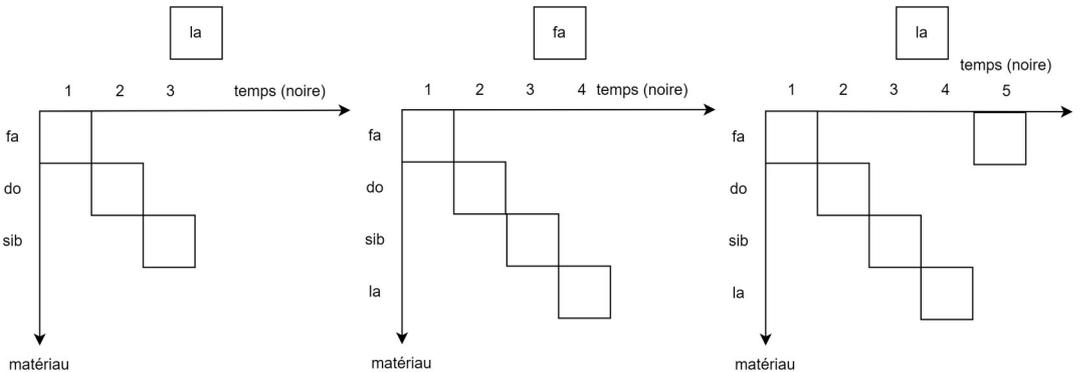
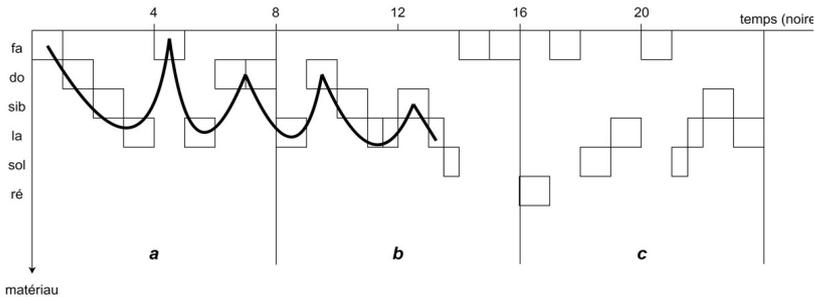
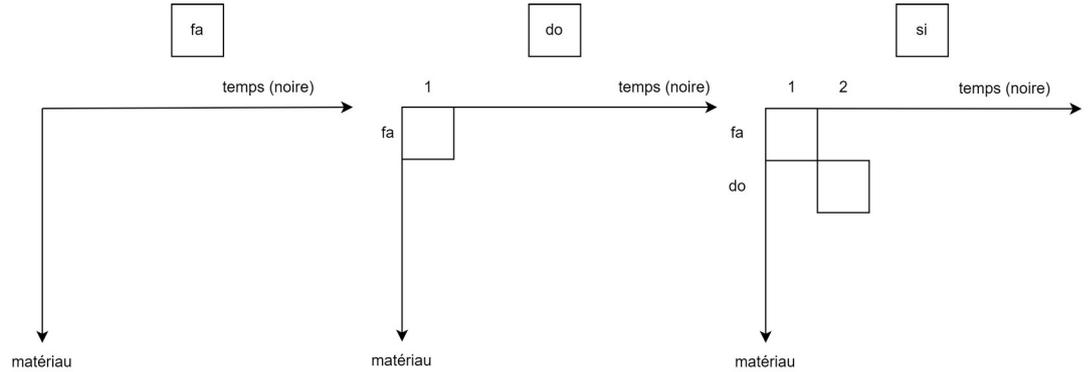


Diagramme Formel - Geisslerlied



Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel
 pour chaque fragment entendu :
 comparaison avec les fragments précédents ;
 s'il est différent :
 inscription en mémoire « matériau » ;
 dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;



Algorithme Cognitif

Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel

pour chaque fragment entendu :

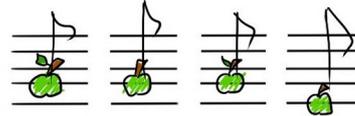
comparaison avec les fragments précédents ;

s'il est différent :

 inscription en mémoire « matériau » ;

 dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

**étude de la
classification**



Algorithme Cognitif

Algorithm 1 Calcul d'un diagramme formel

pour chaque fragment entendu :

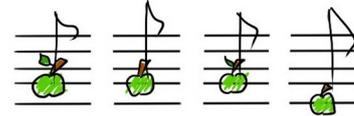
comparaison avec les fragments précédents ;

s'il est différent :

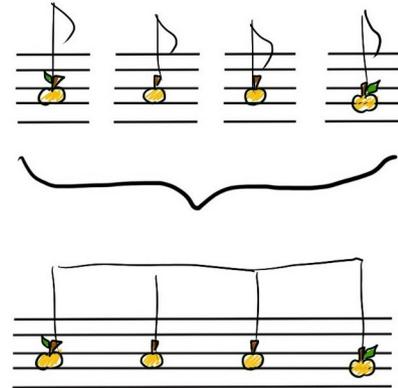
 inscription en mémoire « matériau » ;

 dans tous les cas: inscription en mémoire « forme » ;

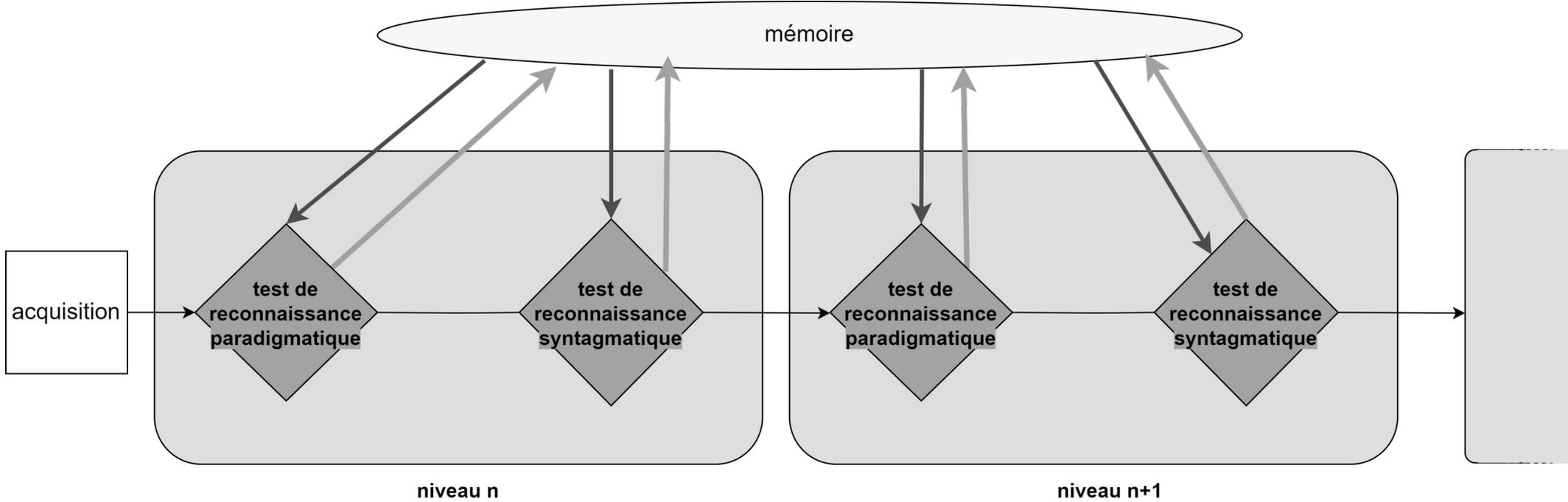
étude de la
classification



étude de la
segmentation ?



Algorithme Cognitif



Algorithme Cognitif – Mozart K.545

8180) **RONDO.**
Allegretto.

W. A. M. 545.

This system contains the first 12 measures of the piece. It features a treble and bass clef with a 3/4 time signature. The music is marked *Allegretto*. The first measure is marked *mf*. The system includes dynamic markings *mf* and *legato*. The notes are labeled with letters: 'a' in measure 1, 'b' in measure 2, 'c' in measure 3, 'd' in measure 4, 'e' in measure 5, 'f' in measure 6, 'g' in measure 7, 'a' in measure 8, 'b' in measure 9, 'c' in measure 10, 'd' in measure 11, and 'e' in measure 12.

8181) 9

W. A. M. 545.

This system contains measures 13-24. It continues the treble and bass clef with a 3/4 time signature. The music is marked *Allegretto*. The first measure is marked *mf*. The system includes dynamic markings *mf*, *legato*, *pp*, *ppp*, and *pppp*. The notes are labeled with letters: 'm' in measure 13, 'n' in measure 14, 'o' in measure 15, 'p' in measure 16, 'q' in measure 17, 'r' in measure 18, 's' in measure 19, 't' in measure 20, 'u' in measure 21, 'v' in measure 22, 'w' in measure 23, and 'x' in measure 24.

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

The image displays two systems of musical notation for Mozart's Minuet in G major, K. 545. The left system is labeled 'RONDO' and 'Mozart' and contains measures 1 through 16. The right system is labeled '(18)19' and contains measures 17 through 32. The score is written for piano and includes various annotations such as 'piano', 'cresc.', 'rit.', and 'f'. A blue box highlights the first few measures of the first system. The score is attributed to W. A. M. 545.

Niveau 1 (a)

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

Niveau 1 (ab)

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

(180) **RONDO.**
Mozart

W. A. M. 545.

(190)

W. A. M. 545.

Niveau 1 (ab)(a')

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

MINUETTO
G-DUR
K. 545

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

W. A. M. 545.

19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

W. A. M. 545.

Niveau 1 (ab)(a')
Niveau 2 (a)

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

(180) **RONDO.**
Allegretto.



W. A. M. 545.

(181)



W. A. M. 545.

Niveau 1 (ab)(a'c)(a)

Niveau 2 (a b)

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

Niveau 1 (ab)(a'c)(ab)(a')

Niveau 2 (a b)(a

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

Niveau 1 (ab)(a'c)(ab)(a')

Niveau 2 (a b)(a

Niveau 3 A

Algorithme Cognitif – Mozart K.545

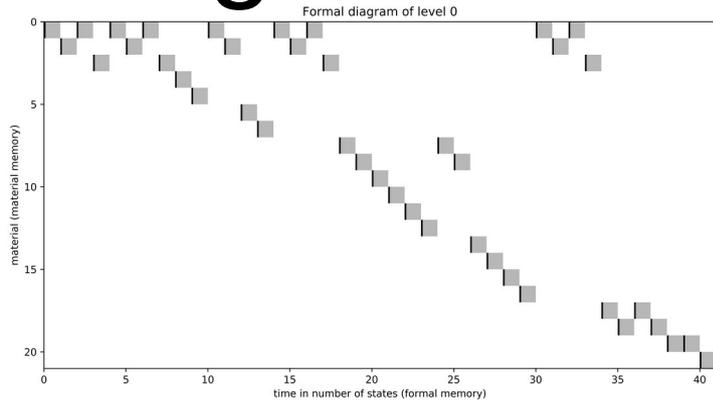
- Niveau 1 (ab)(a'c)(ab)(a'c)(de)(a"b')(fg)(ab)(a'c)(hi)(jk)(lm)(h'i')(no)(pq) (ab)(a'c)(rs)(rs')(ttu)
- Niveau 2 (a b)(a b)(c a' d)(a b)(e f g)(e' h i)(a b)(k k l)
- Niveau 3 A (A B) (A C D) (A E)
- Niveau 4 (A) (B) (C)
- Niveau 5 (A)

Diagramme Formel Multi-échelle

Un **Diagramme Formel Multi-échelle** est l'*organisation hiérarchisée* et assemblée des *diagrammes formels* d'*une analyse* donnée

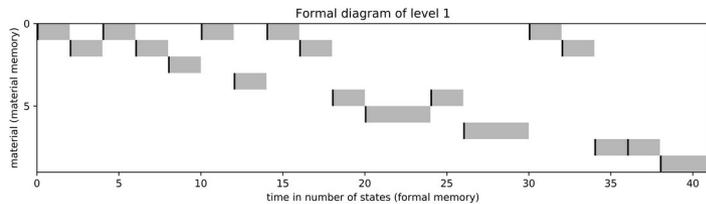
Niveau de hiérarchie : défini par l'échelle temporelle des éléments qui le constituent (note, motif, phrase...)

Diagramme Formel Multi-échelle

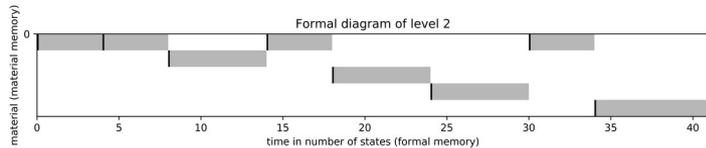


Équivalence avec les chaînes de caractères :

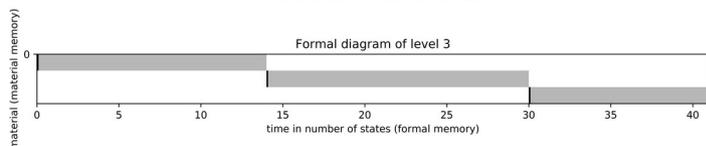
↔ abacabacdeabfgabachijklmhinopqabacrsrsttu



↔ ababcdabefgehiabkkl

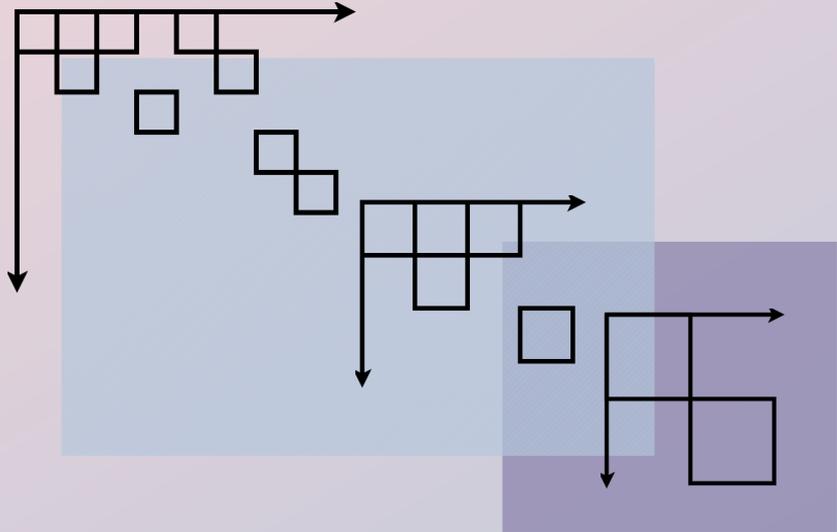


↔ AABACDAE



↔ ABC

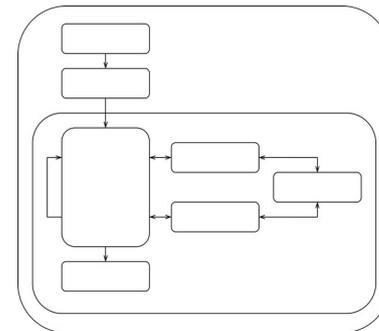
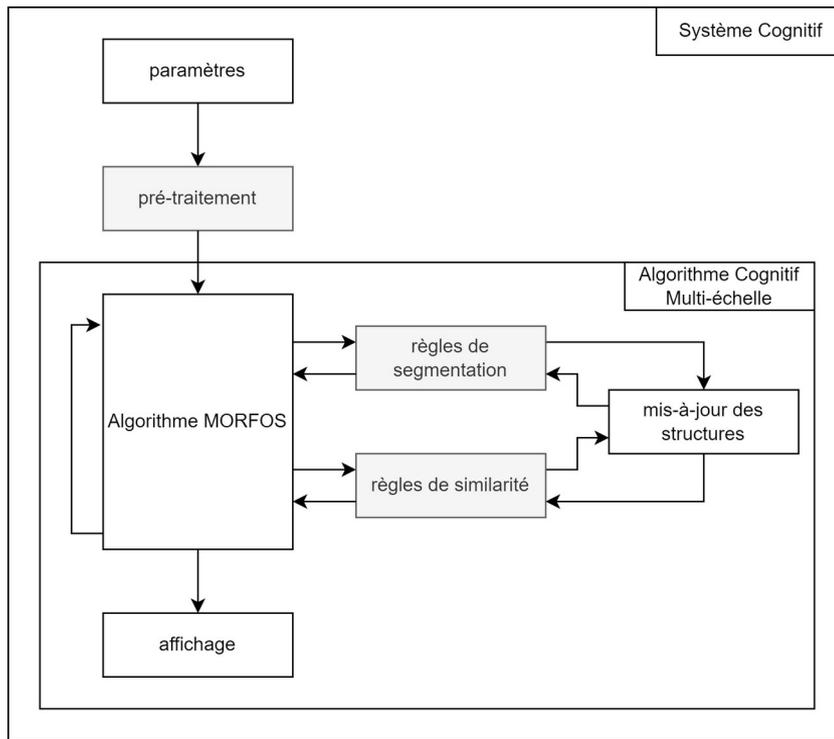
ARCHITECTURE ET FORMALISATION



MORFOS

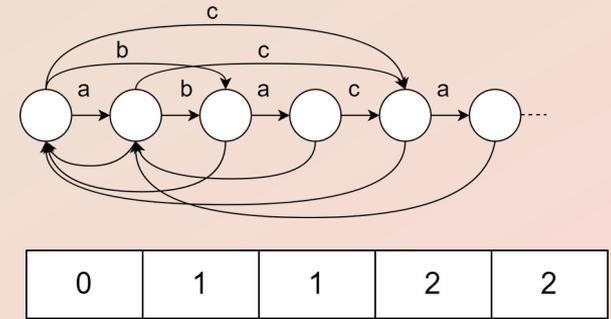
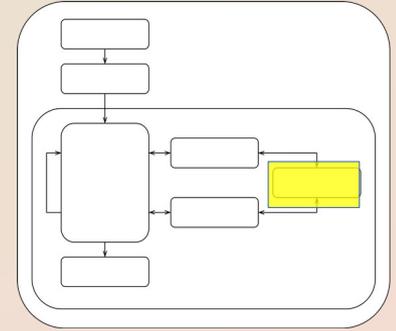
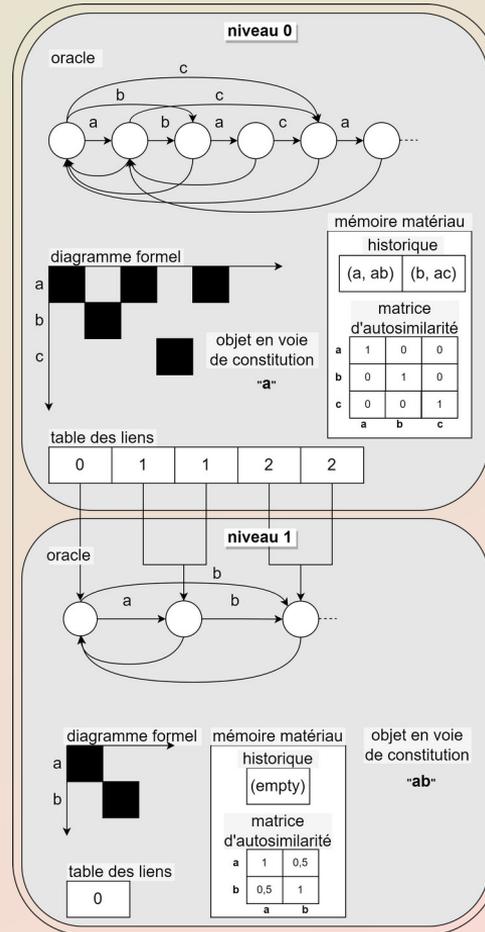
(Multiscale Oracle Representations For Organized Sounds)

Architecture

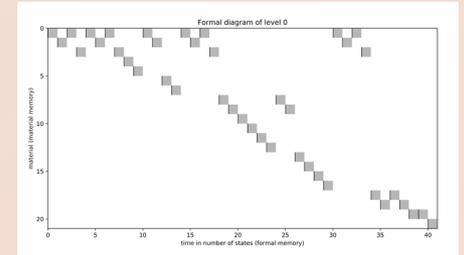
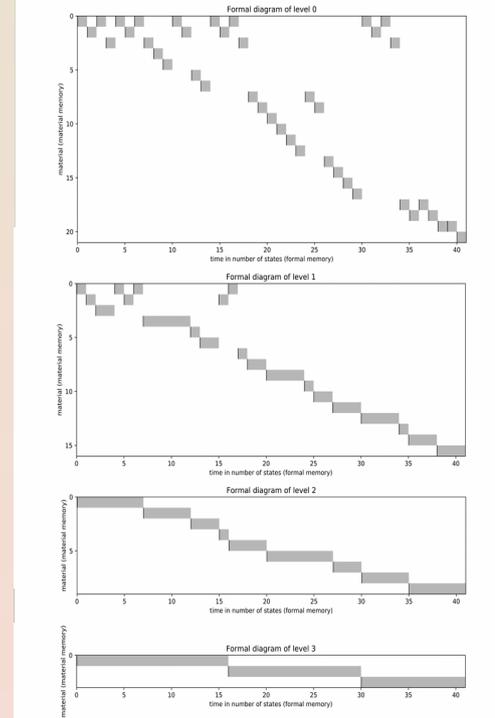
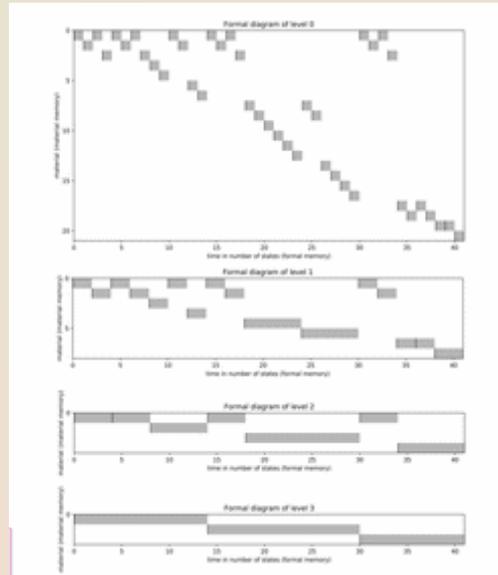
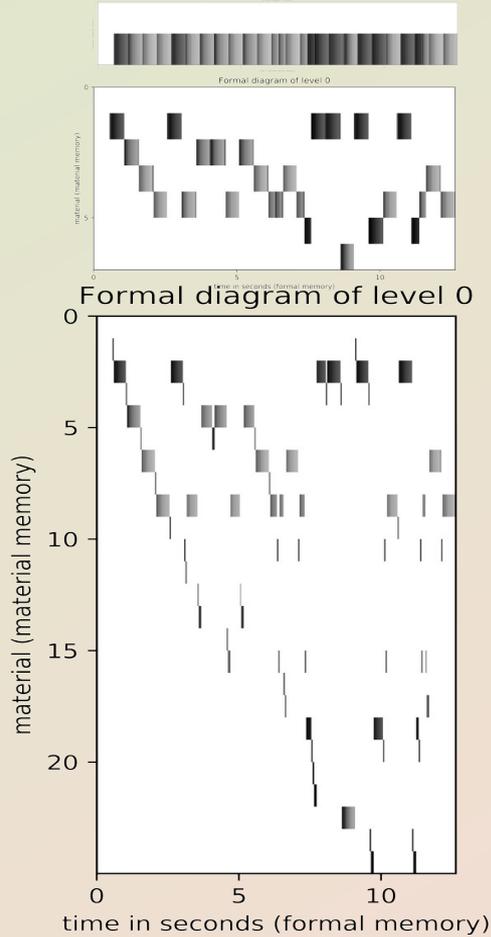
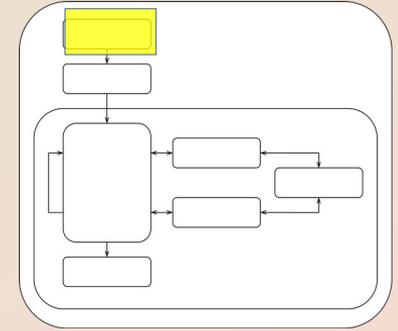


Oracle Multi-échelle

- stocke les matériaux et objets
- liens entre différents niveaux
 - hiérarchie
- mémoire de l'algorithme
 - accès optimisés
 - phénomènes d'attention



Agenda

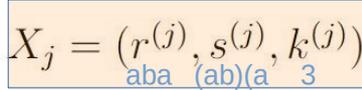


- Seuils
- Règles de similarité
- **Règles de segmentation**
- Calcul de (pré)traitement

Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel** de niveau j $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$



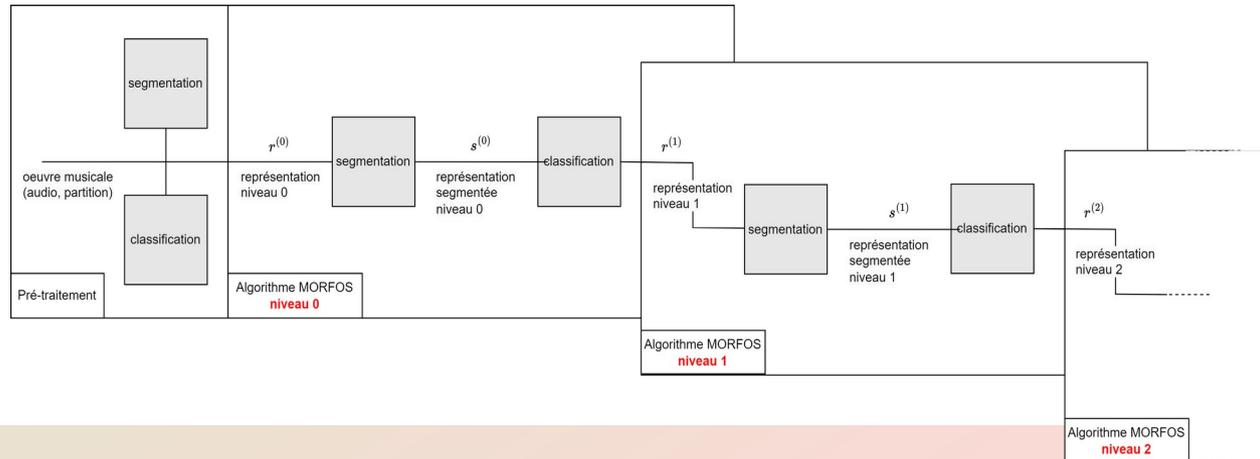
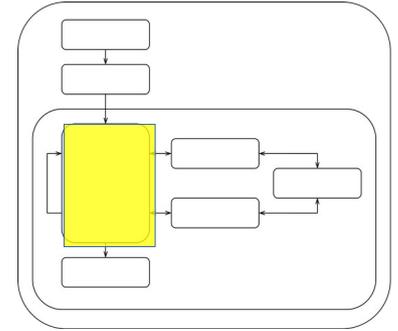
On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0 \cdot X_1 \dots X_n$$

Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

4 opérations permettent de changer l'état de R :

- la création d'un nouveau niveau
- l'acquisition
- la segmentation de *niveau n*
- la classification de *niveau n*



Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel** de niveau j $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

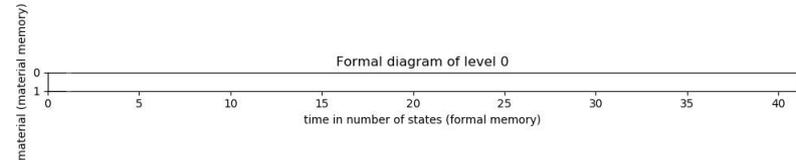
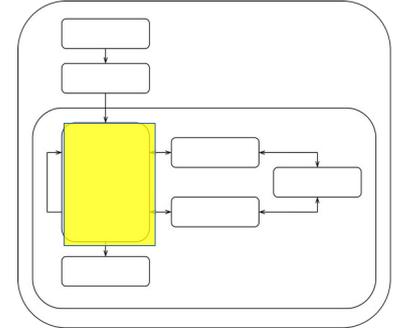
On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0 \cdot X_1 \dots X_n$$

Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

4 opérations permettent de changer l'état de R:

$$\epsilon \xrightarrow{cnn} (\epsilon, \epsilon, 0)$$



Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel de niveau j** $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0.X_1...X_n$$

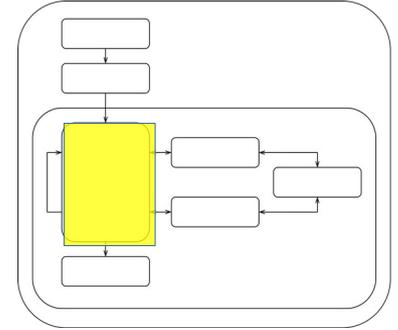
Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

4 opérations permettent de changer l'état de R:

- la création d'un nouveau niveau cnn

$$X_n = (\epsilon, \epsilon, 0)$$

$$X_0.X_1...X_{n-1} \xrightarrow{cnn} X_0.X_1...X_{n-1}.(\epsilon, \epsilon, 0)$$



Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel** de niveau j $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

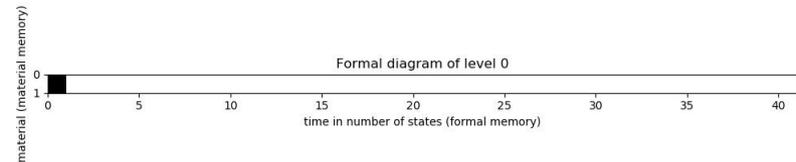
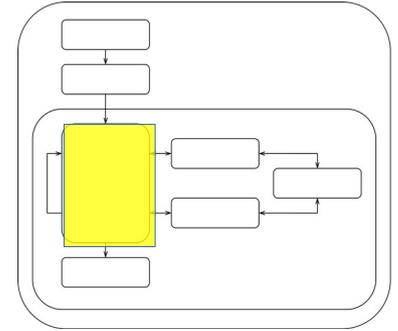
$$R = X_0 \cdot X_1 \dots X_n$$

Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

4 opérations permettent de changer l'état de R:

$$\epsilon \xrightarrow{cnn} (\epsilon, \epsilon, 0)$$

$$\xrightarrow[a]{atr} (a, \epsilon, 0)$$



Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel de niveau j** $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

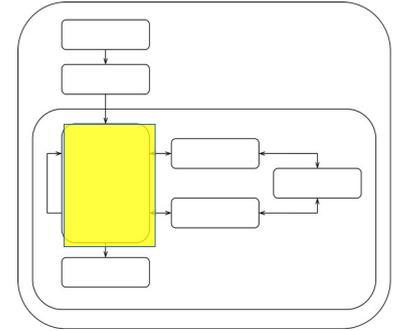
On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0.X_1...X_n$$

Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

4 opérations permettent de changer l'état de R:

- la création d'un nouveau niveau *cnn*
- l'acquisition *atr*



$$X_0.X_1...X_n = (r^{(0)}, s^{(0)}, k^{(0)}) . X_1...X_n \xrightarrow[x]{atr} (r^{(0)}.x, s^{(0)}, k^{(0)}) . X_1...X_n$$

Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel** de niveau j $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0.X_1\dots X_n$$

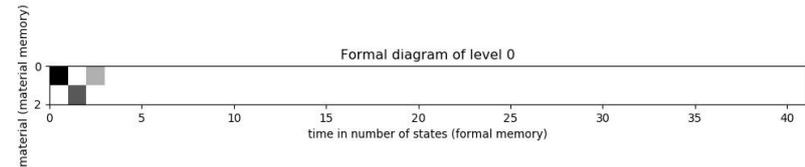
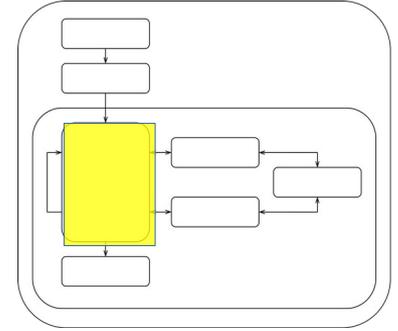
Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

4 opérations permettent de changer l'état de R:

$$\epsilon \xrightarrow{cnn} (\epsilon, \epsilon, 0)$$

$$\xrightarrow[a]{atr} (a, \epsilon, 0) \xrightarrow[b]{atr} (ab, \epsilon, 0) \xrightarrow[a]{atr} (aba, \epsilon, 0)$$

$$\xrightarrow{str(0)} (aba, (ab), 3)$$



Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel de niveau j** $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

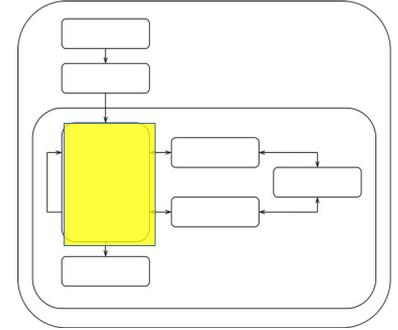
On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0.X_1...X_n$$

Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

4 opérations permettent de changer l'état de R:

- la création d'un nouveau niveau cnn
- l'acquisition atr
- la segmentation de niveau n $str(n)$



$$X_0... (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)}) ... X_n \xrightarrow{str^{(j)}} X_0... (r^{(j)}, s^{(j)}, ([r^{(j)}]_{k,l-1}), l) ... X_n$$

Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel de niveau j** $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0.X_1\dots X_n$$

Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

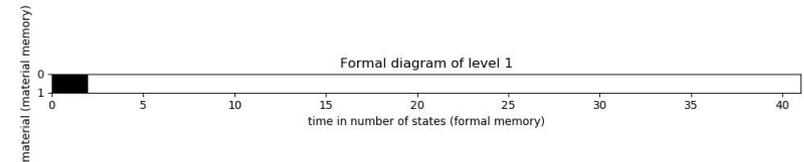
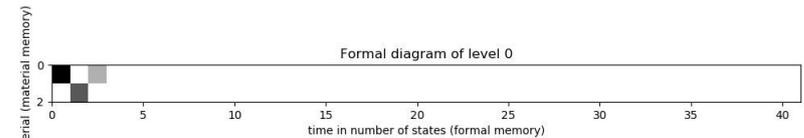
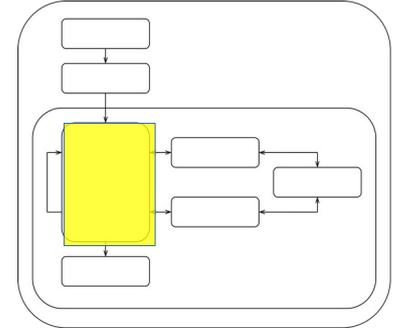
4 opérations permettent de changer l'état de R:

$$\epsilon \xrightarrow{cnn} (\epsilon, \epsilon, 0)$$

$$\xrightarrow[a]{atr} (a, \epsilon, 0) \xrightarrow[b]{atr} (ab, \epsilon, 0) \xrightarrow[a]{atr} (aba, \epsilon, 0)$$

$$\xrightarrow{str(0)} (aba, (ab), 3) \xrightarrow{cnn} (aba, (ab), 3).(\epsilon, \epsilon, 0)$$

$$\xrightarrow{cls(0)} (aba, (ab), 3).(A, \epsilon, 0)$$



Formalisation temps-réel

Hiérarchisation

Soit le **diagramme formel** de niveau j $X_j = (r^{(j)}, s^{(j)}, k^{(j)})$

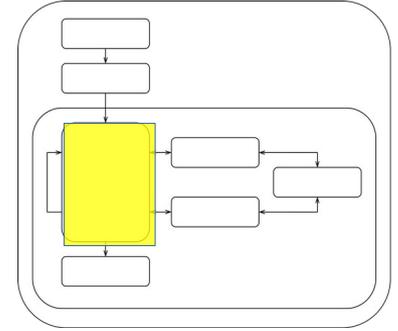
On pose R le diagramme formel multi-échelle tel que

$$R = X_0.X_1...X_n$$

Initialement, on présente le mot vide $R = \epsilon$

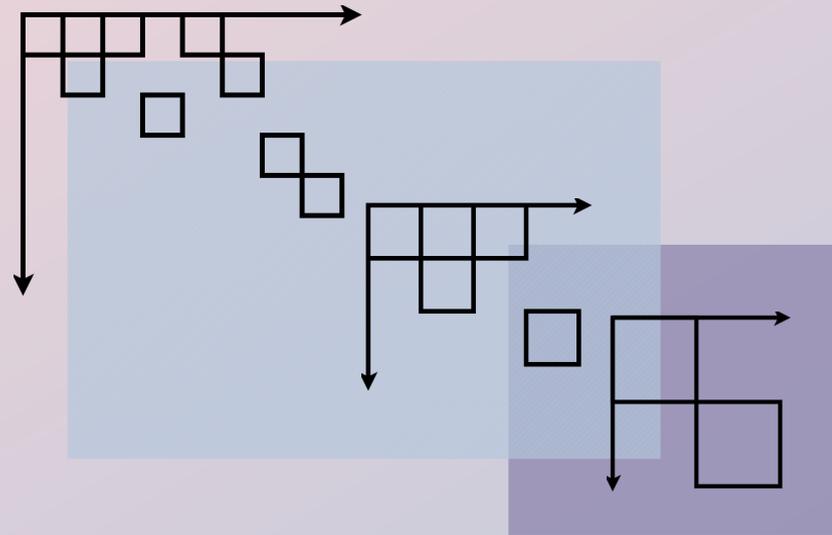
4 opérations permettent de changer l'état de R:

- la création d'un nouveau niveau cnn
- l'acquisition atr
- la segmentation de niveau n $str(n)$
- la classification de niveau n $ctr(n)$



$$X_0... (r^{(j)}, s^{(j)}.w, k^{(j)}) . (r^{(j+1)}, s^{(j+1)}, k^{(j+1)}) ... X_n$$
$$\xrightarrow{ctr^{(j)}} X_0... (r^{(j)}, s^{(j)}.w, k^{(j)}) . (r^{(j+1)}.ctr(w), k^{(j+1)}) ... X_n$$

EXAMPLE

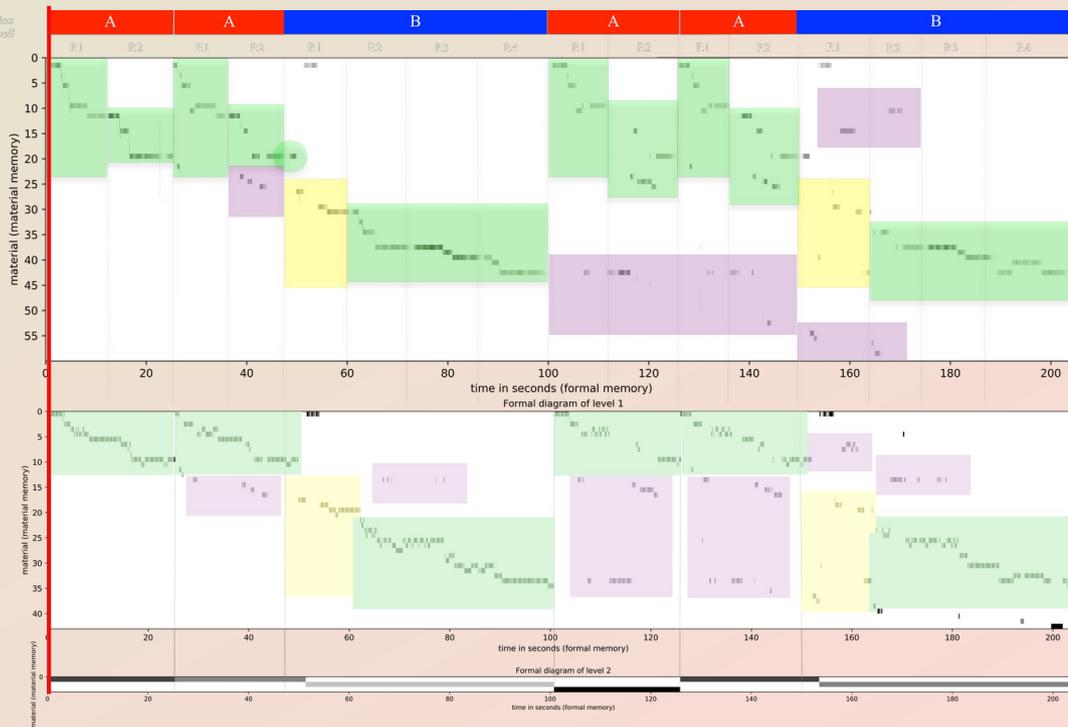


J-S. Bach

Choral *O Haunt voll Blunt Wunden*

A								A							
A		A		B				A		A		B			
a	b	a	b	c	d	e	f	a	b	a	b	c	d	e	f

Bach: *Missa*-Partita
 Choral: *O Haunt voll Blunt Wunden*
 Klaus Rösner



Je vous remercie pour votre écoute

