

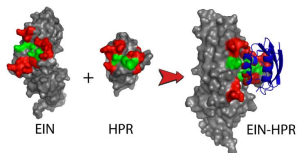
# Modélisation moléculaire par homologie

Dirk Stratmann (dirk.stratmann@upmc.fr)  
`www.imPMC.upmc.fr/~stratmann`

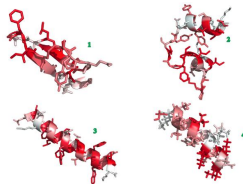
IMPMC, Sorbonne Université (Paris VI)

octobre 2022

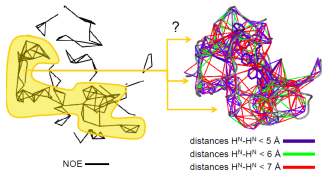
Etude des structures 3D des protéines par analyse et simulation numérique:



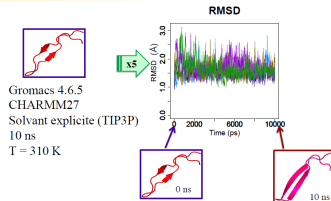
Interactions protéine-protéine, docking



Fragments protéiques, peptides



Algorithmes des graphes



Dynamique moléculaire

Langages utilisés: C++ et python

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Alignement de séquences
- 3 Modélisation par homologie
- 4 Programmes / Serveurs
- 5 Bibliography

- 1 Introduction
  - Introduction

# Introduction

## Liens utiles

- Le PDF du cours sera déposé sur:

`www.imPMC.upmc.fr/~stratmann/cours/homology_modeling/index.html`

Autres liens sur `http://www.imPMC.upmc.fr/~stratmann:`

- Cours+TP "Structure et repliement des protéines":

`www.imPMC.upmc.fr/~stratmann/cours/proteinStructure/index.html`

- Cours+TP "Protein-protein docking":

`www.imPMC.upmc.fr/~stratmann/cours/docking/index.html`

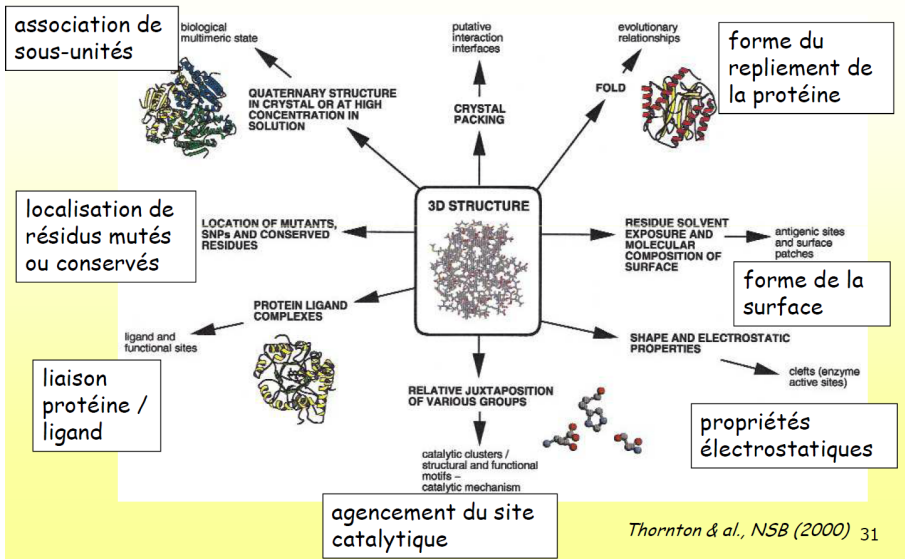
- Linux en tant que machine virtuelle:

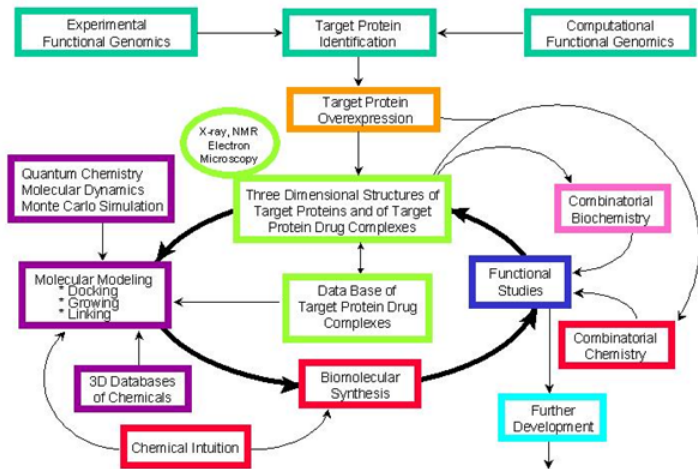
`www.imPMC.upmc.fr/~stratmann/LP329/virtualBox.html`

- Mathematica:

`www.imPMC.upmc.fr/~stratmann/mathematica/index.html`

# La structure 3D donne des informations sur la fonction biologique d'une protéine

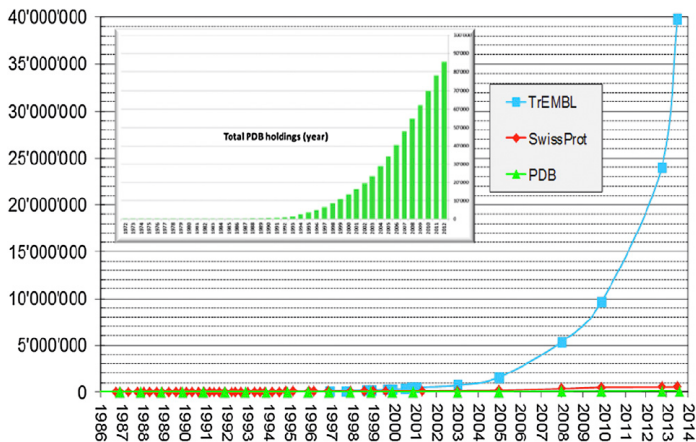




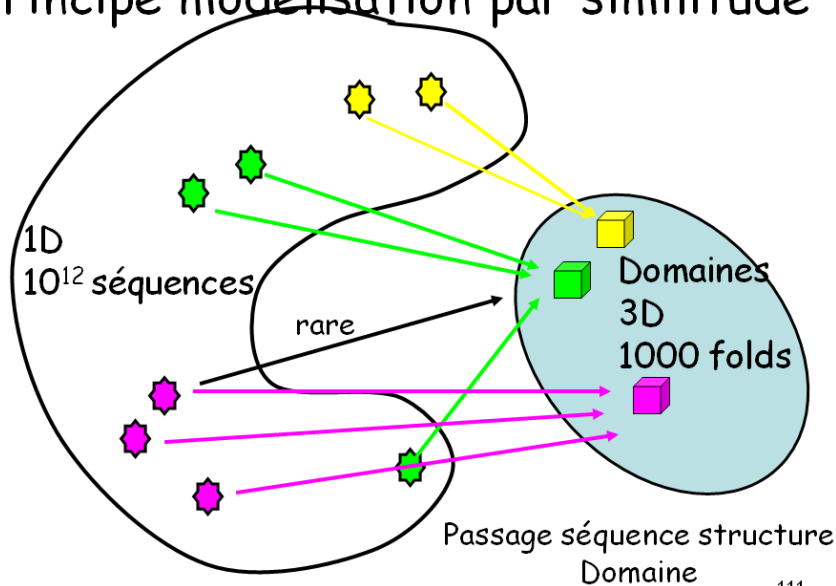
## PROTEIN STRUCTURE BASED DRUG DESIGN CYCLE



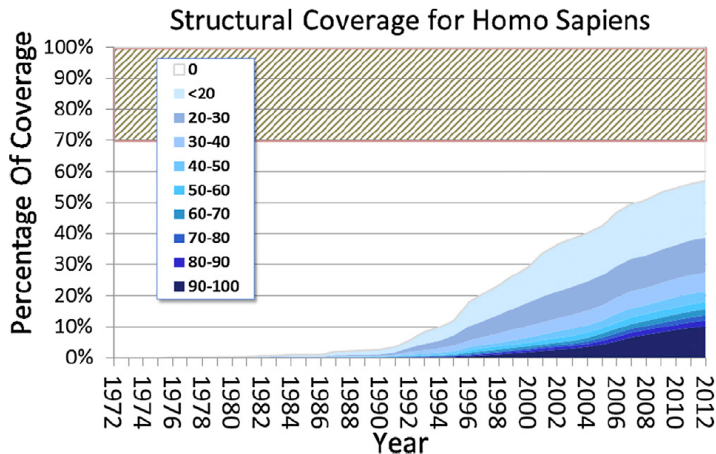
# Protein structure gap



# Principe modélisation par similitude



## Structural coverage

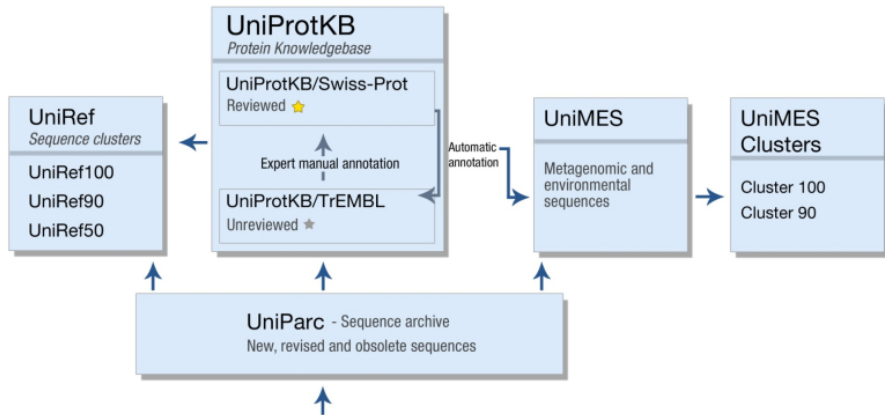


- 2 Alignement de séquences
  - Alignement de séquences - Introduction
  - Alignement en pratique
  - Alignement multiple

# Alignement de séquences - Introduction

## UniProt / SwissProt (manual annotation)

<http://www.uniprot.org/>

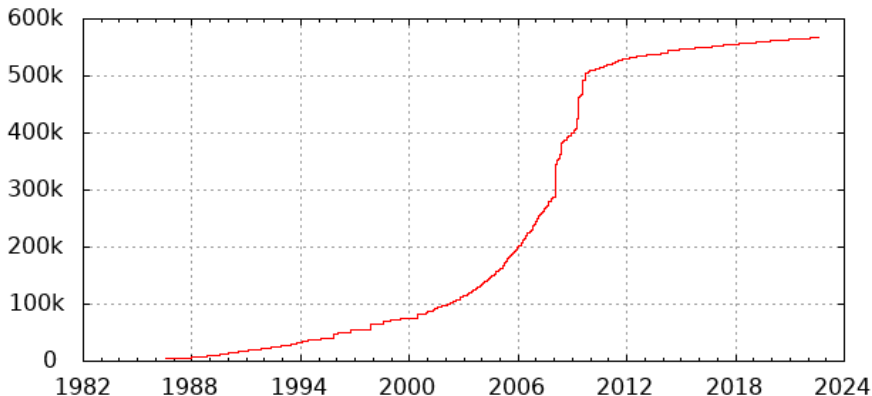


EMBL/GenBank/DBJ (Metagenomics), Ensembl, VEGA, RefSeq, PDB, MODs, other sequence resources

## UniProt / SwissProt (manual annotation)

<http://www.uniprot.org/>

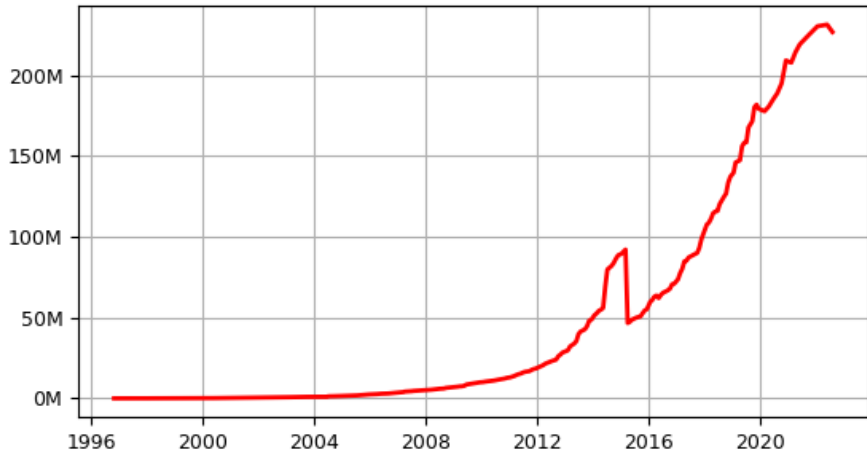
Number of entries in UniProtKB/Swiss-Prot



# UniProt / TrEMBL (automatic annotation)

<http://www.uniprot.org/>

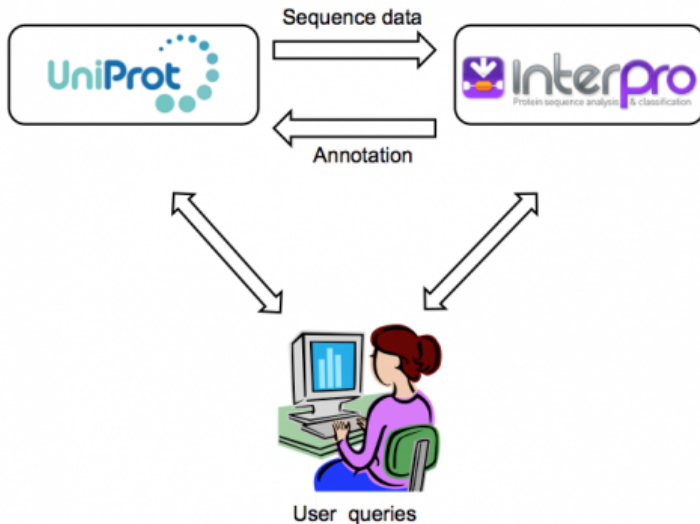
Number of entries in UniProtKB/TrEMBL





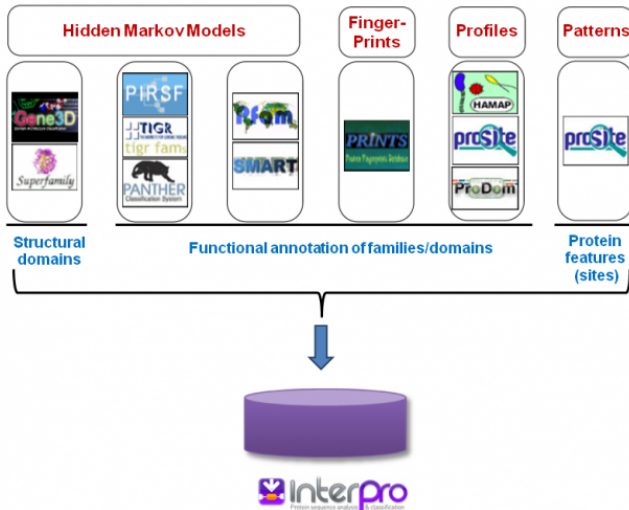
# UniProt / TrEMBL (automatic annotation)

Done with InterPro: <http://www.ebi.ac.uk/interpro/>



# InterPro

<http://www.ebi.ac.uk/interpro/>



## InterProScan

<http://www.ebi.ac.uk/Tools/pfa/iprscan5/>

EMBL-EBI [Services](#) [Research](#) [Training](#) [Industry](#) [About us](#)

# InterProScan 5

[Input form](#) [Web services](#) [Help & Documentation](#) [Share](#) [Feedback](#)

[Tools](#) > [Protein Functional Analysis](#) > InterProScan 5

## InterProScan 5 Sequence Search

This form allows you to scan your sequence for matches against the InterPro collection of protein signature databases.

**STEP 1 - Enter your input sequence**

Enter or paste a **PROTEIN** sequence in any [supported](#) format:

Or, [upload](#) a file: [Parcourir...](#) Aucun fichier sélectionné.

**STEP 2 - Select the applications to run**

Select All Clear All

<input checked="" type="checkbox"/> BlastProDom	<input checked="" type="checkbox"/> FPrintScan	<input checked="" type="checkbox"/> HMMPiR	<input checked="" type="checkbox"/> HMMPfam	<input checked="" type="checkbox"/> HMMSmart
<input checked="" type="checkbox"/> HMMTigr	<input checked="" type="checkbox"/> ProfileScan	<input checked="" type="checkbox"/> HAMAP	<input checked="" type="checkbox"/> PatternScan	<input checked="" type="checkbox"/> SuperFamily
<input checked="" type="checkbox"/> SignalPHMM	<input checked="" type="checkbox"/> TMHMM	<input checked="" type="checkbox"/> HMMPanther	<input checked="" type="checkbox"/> Gene3D	<input checked="" type="checkbox"/> Phobius

## Introduction alignment de séquences

Why Do We Want To Compare Sequences

```
wheat  --DPNKPKRAMTSFVFFMSEFRSEFKQKHSKLSIVEMVKAAGER
      | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
?????  KKDSNAPKRAMTSFMFFSSDFRS----KHSDL-SIVEMSKAAGAA
```

EXTRAPOLATE

Homology?

??????

SwissProt

The screenshot shows a typical SwissProt entry with fields such as 'Protein Name of SWISS-PROT: Z0822', 'Accession', 'Entry name', 'Entry version', 'Entry type', 'Entry date', 'Entry status', 'Entry history', 'Entry description', 'Entry keywords', 'Entry cross-references', 'Entry references', 'Entry comments', and 'Entry history'.

Cédric Notredame (05/10/2013)

# Introduction alignement de séquences

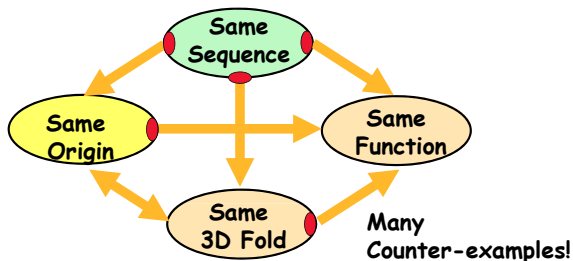
**Why Does It Make Sense To Align Sequences ?**

- Evolution is our Real Tool.
- Nature is LAZY and Keeps re-using Stuff.
- Evolution is mostly DIVERGEANT

**Same Sequence  $\Leftrightarrow$  Same Ancestor**

# Introduction alignement de séquences

Why Does It Make Sense To Align Sequences ?



Cédric Notredame (05/10/2013)

## Définitions

- *Identité*: Proportion de paires de résidus identiques entre 2 séquences. Dépend de l'alignement. Unité: %id
- *Similitude*: Proportion de paires de résidus similaires entre 2 séquences. Une matrice de substitution permet de décrire qui est similaire à qui (score > 0). Unité: %similarity
- *Homologie*: Deux séquences *similaires* peuvent être homologues si elles ont un ancêtre commun. Deux séquences avec peu de similarité peuvent aussi être homologues. Unité: Oui ou Non !

IL N'Y A PAS DE POURCENTAGE D'HOMOLOGIE : les séquences sont homologues ou elles ne le sont pas.

- Des séquences homologues ont souvent mais pas toujours la même fonction...
- ... Elles ne sont pas forcément non plus très similaires : la structure est conservée plus que la séquence

## Difficulté pour détecter l'homologie

(a)

```

HBA_HUMAN  GSAQVKGHGKVKVADALTNVAHVDDMPNALSALSDLHAHKL
            G+ +VK+HGKKV  A+++++AH+D++ ++++++LS+LH  KL
HBB_HUMAN  GNPVKVAHGKKVLGAFSDGLAHLNLDNLKGTFFATLSELHCDKL

```

(b)

```

HBA_HUMAN  GSAQVKGHGKVKVADALTNVAHV---D--DMPNALSALSDLHAHKL
            ++ +++++H+ KV  + +A  ++                +L+ L+++H+ K
LGB2_LUPLU NNPELQAHAGKVFVKLVYEAAIQVTVGVVVTDATLKNLGSVHVSKG

```

(c)

```

HBA_HUMAN  GSAQVKGHGKVKVADALTNVAHVDDMPNALSALSD---LHAHKL
            GS+ + G +   +D L  ++ H+ D+  A +AL D   ++AH+
F11G11.2  GSGYLVGDSLTFVDLL--VAQHTADLLAANAALLDEFPQFKAHQE

```

(a) ok

(b) protéine homologue

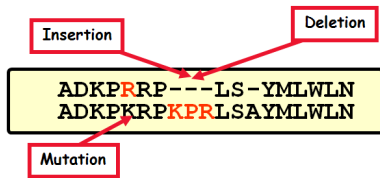
(c) protéine non-homologue, mais même identité de séquence que (b)



# Principes pour l'alignement des séquences

- Trouver des évidences que deux séquences ont divergées à partir d'un ancêtre commun => séquences homologues.
- Divergence: Processus de mutation et sélection
- Trois types de mutation:

- 1 substitution
- 2 insertion
- 3 délétion

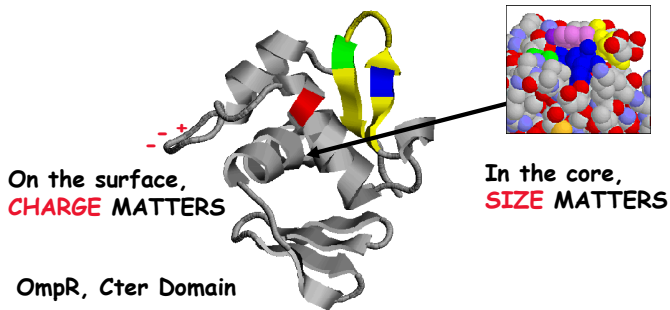


- Insertion/Délétion => *gaps* / trous
- Sélection naturelle favorise certaines mutations
- Score d'alignement = somme de termes pour chaque pair de résidus alignés + somme de termes pour chaque gap
- => Score additive => mutations à différents sites sont considérés comme indépendant

# Mutations dépendent de la structure 3D

How Do Sequences Evolve ?

In a structure, each Amino Acid plays a Special Role



Cédric Notredame (05/10/2013)

## Mutations dépendent de la structure 3D

Le repliement d'une chaîne d'a.a. donne à chaque a.a. un environnement chimique qui dépend de la structure 3D du repliement.

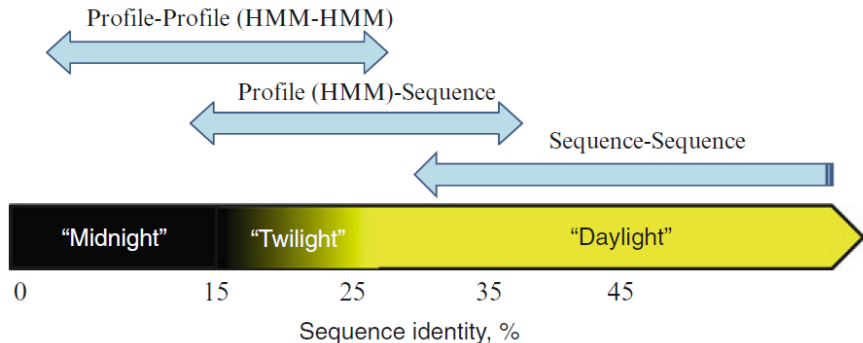
Pour les protéines solubles:

- Surface => interface avec l'eau => a.a. polaires ou chargés
- Coeur => a.a. hydrophobes
- Sites actives ou de liaison => plus sensibles à la mutation

Betts and Russel, Bioinformatics for Geneticists, chapter 14

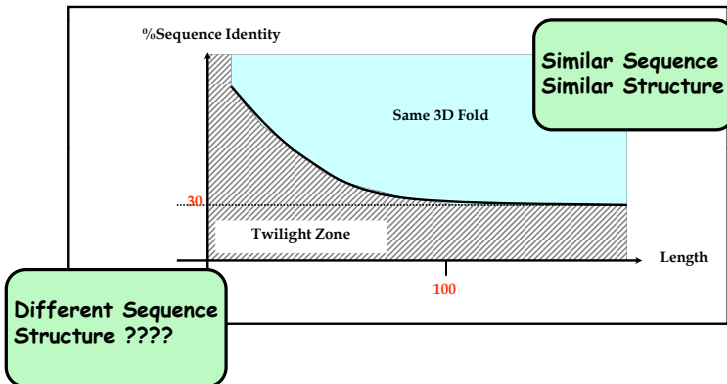
# Alignement en pratique

## Identité de séquence



Venclovas, "Homology Modeling", ch. 3, Methods in Mol. Biol.(2012)

## How Can We Compare Sequences ? *The Twilight Zone*



Cédric Notredame (05/10/2013)

# Alignement d'une paire de séquences

- Trois ingrédients:
  - ① séquences d'acides aminés de deux protéines
  - ② matrice avec des scores de substitution des résidus
  - ③ algorithme d'alignement
- Applicable à la "daylight" zone.
- Programmes: BLAST, FASTA
- La base des autres méthodes d'alignement (séquence-profil, profil-profil).
- Plus trop utilisé aujourd'hui dans la modélisation par homologie vu la supériorité des autres méthodes d'alignement.

# Matrice de substitution dans BLAST

Choix de la matrice de substitution:

- Balance entre sensibilité et sélectivité
- *Sensibilité*: identifie des homologues lointaines, mais augmente les faux-positives
- *Sélectivité*: réduit les faux-positives, mais augmente le risque de rater des vrais homologues
- matrices BLOSUM: grand index (BLOSUM 80) = sélective, petit index (BLOSUM 45) = sensible



## Variantes de BLAST

- CS-BLAST (context-specific)
  - score de substitution dépend des résidus voisins
  - prometteur pour les séquences "singleton" (séquences sans homologue détectable), car méthodes séquence-profil ou profil-profil ne marchent pas ici.
- PSI-BLAST (Position-specific iterated)
- PHI-BLAST (Pattern Hit Initiated BLAST): "performs the search but limits alignments to those that match a pattern in the query."
- DELTA-BLAST (Domain Enhanced Lookup Time Accelerated BLAST): "constructs a PSSM using the results of a Conserved Domain Database search and searches a sequence database."

## PSI-BLAST (Position-specific iterated)

- 1 alignement multiple des meilleurs résultats d'une recherche initiale avec BLAST
- 2 à partir de cet alignement multiple: construction d'une matrice de score de substitution qui dépend de la position (position-specific scoring matrix (PSSM)).
- 3 nouvelle recherche avec BLAST et la matrice PSSM
- 4 répétition de l'étape 1) à 3) pour inclure des séquences de plus en plus éloigné.

# Alignement séquence - profil ou HMM

- Informations extraites d'un alignement multiple et converties dans un modèle statistique compréhensive du groupe de séquences alignées.
  - ① zones conservés ou variables
  - ② zones avec insertions ou délétions
- Applicable à la "twilight" (15%-30% identité de séquence) et même "midnight" (<15%) zone.
- Programmes: PSI-BLAST, CSI-BLAST, HMMER
- Non traitée: effets qui dépendent de plusieurs positions (corrélations d'ordre supérieur), car chaque position dans la séquence est traitée indépendamment.

# HMMER

- HMMs: Hidden Markov Models
- Comme les profils de séquence, mais le choix des scores est guidé par une théorie probabiliste.
- En plus HMMs contiennent des probabilités pour les insertions et délétions à chaque position du profil.
- Exemple: Le noyau structural d'une protéine est plus affecté par des insertions ou délétions que une boucle à la surface.

# Alignement profil - profil ou HMM-HMM

- Comparaison de deux profils ou deux HMMs
- Question différente:
  - *Avant*: Est-ce que la séquence appartient à une famille et si oui, laquelle?
  - *Ici*: Est-ce que deux familles ont un lien évolutif?
- Permet de détecter des homologies malgré un faible taux d'identité de séquence ("midnight" zone)
- Plus juste en général que les méthodes d'alignement séquence-profil
- Programmes: HHsearch, PRC, PROCAIN

## Méthodes pour détecter la homologie

Method	Type	Address
BLAST	Sequence–Sequence	<a href="http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/">http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/</a>
FASTA/Ssearch	Sequence–Sequence	<a href="http://fasta.bioch.virginia.edu/">http://fasta.bioch.virginia.edu/</a> <a href="http://www.ebi.ac.uk/Tools/sss/fasta/">http://www.ebi.ac.uk/Tools/sss/fasta/</a>
CS-BLAST	Sequence (profile)–Sequence	<a href="http://toolkit.lmb.uni-muenchen.de/cs_blast/">http://toolkit.lmb.uni-muenchen.de/cs_blast/</a>
PSI-BLAST	Profile–Sequence	<a href="http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/">http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/</a>
CSI-BLAST	Profile–Sequence	<a href="http://toolkit.lmb.uni-muenchen.de/cs_blast/">http://toolkit.lmb.uni-muenchen.de/cs_blast/</a>
HMMER	HMM–Sequence	<a href="http://hmmer.org/">http://hmmer.org/</a>
SAM	HMM–Sequence	<a href="http://compbio.soc.ucsc.edu/HMM-apps/">http://compbio.soc.ucsc.edu/HMM-apps/</a>
COMPASS	Profile–Profile	<a href="http://prodata.swmed.edu/compass/">http://prodata.swmed.edu/compass/</a>
PROCAIN	Profile–Profile + additional sequence features + SS <sup>a</sup>	<a href="http://prodata.swmed.edu/procain/">http://prodata.swmed.edu/procain/</a>
COMA	Profile–Profile	<a href="http://www.ibt.lt/bioinformatics/coma/">http://www.ibt.lt/bioinformatics/coma/</a>
HHsearch	HMM–HMM + SS <sup>a</sup>	<a href="http://toolkit.lmb.uni-muenchen.de/hhpred/">http://toolkit.lmb.uni-muenchen.de/hhpred/</a>
PRC	HMM–HMM	<a href="http://supfam.org/PRC">http://supfam.org/PRC</a> <a href="http://www.ibi.vu.nl/programs/prcwww/">http://www.ibi.vu.nl/programs/prcwww/</a>

<sup>a</sup>Secondary structure

# MMseqs2

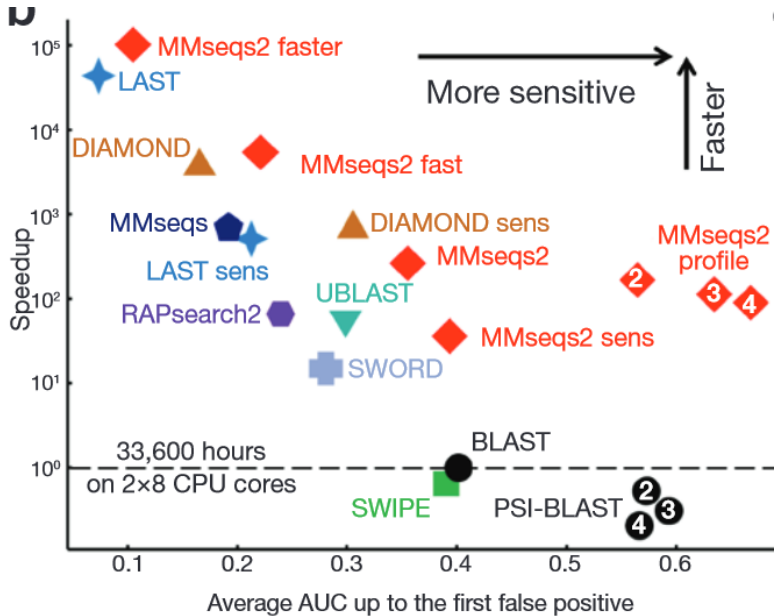
- Coût du séquençage a diminué de 4 ordres de grandeurs depuis 2007
- Essort des projets de métagénomique
- Nouveau goulot d'étranglement: la traitement informatique de ces données en volume de Terabytes
- Une méthode récente beaucoup plus rapide que BLAST et PSI-BLAST et plus sensible en même temps: MMseqs2
- Des valeurs "E-value" plus justes, moins de faux positifs
- Utilisée dans colabfold (=AlphaFold plus rapide)

Martin Steinegger and Johannes Söding (Nov. 2017). en. In: *Nature Biotechnology* 35.11

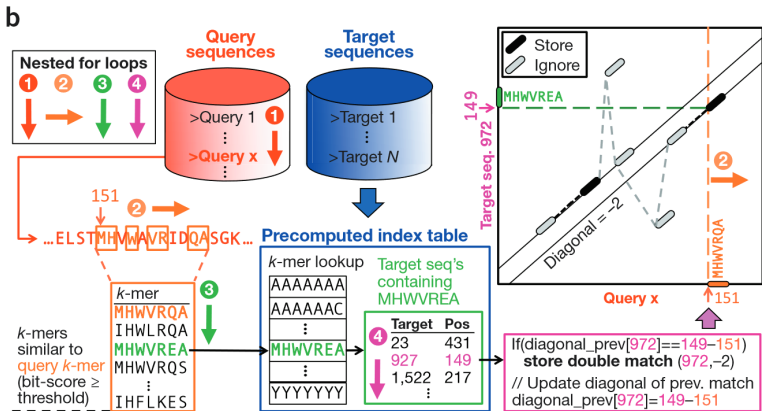
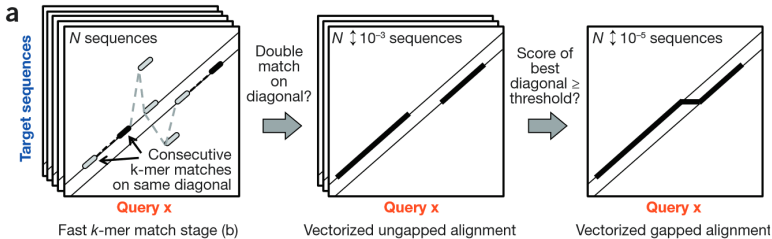
Milot Mirdita, Martin Steinegger, and Johannes Söding (Aug. 2019). In: *Bioinformatics* 35.16

M Mirdita et al. (Sept. 2021). In: *Bioinformatics* 37.18

Milot Mirdita, Konstantin Schütze, et al. (June 2022). en. In: *Nature Methods* 19.6







# Alignement multiple

## 2: Alignment correction

- Functional residues → conserved
- Use multiple sequence alignments
- Deletions → shift gaps

```
CPISRTAAS-FRCW
CPISRTG-SMFRCW
CPISRTA--TFRCW
CPISRTAASHFRCW
CPISRTGASIFRCW
CPISRTA---FRCW
```

Multiple sequence alignment

```
CPISRTGASIFRCW  CPISRTGASIFRCW
CPISRTA---FRCW  CPISRT---AFRCW
```

Correct alignment

← Sequence with known structure

← Your sequence

# Introduction

- Les méthodes d'alignement multiple (multiple sequence alignment (MSA)) ne sont pas fait pour détecter des séquences homologues
- Elles permettent d'aligner un jeu de séquences homologues identifié au préalable avec les méthodes d'alignement simple
- Grand nombre d'applications en biologie, dont:
  - ① Reconstruction phylogénétique
  - ② Construction des profils (= matrices de substitution dépendantes de la position)
  - ③ Modélisation par homologie: Si la cible et le template sont dans le jeu de séquences à aligner, on peut obtenir leur alignement depuis l'alignement multiple
  - ④ Contraintes de distances par co-évolution: ex. AlphaFold


## How Can I Use A Multiple Sequence Alignment?

```

chite  ---ADKPKRPLSAYMLWLNSARESİKRENPDFK-VTEVAKKGGELWRGLKD
wheat  --DPNPKRAPSAFFVFMGEFREFEFKQKNPKNKSVAAVGKAAGERWKSLSLSE
trybr   KKDSNAPKRAMTSFMFFSSDFRS----KHSMLS-IVEMSKAAGAANKELGP
unknown -----KPKRPRSAYNIYVSESFQ-----EAKDDS-AQGKCLKLVNEAWKNLSP
          ***. ::: .: .. . : . . * . *: *
    
```

```

chite  AATAKQNYIRALQEYERNGG-
wheat  ANKCLKGEYNKAIAAYNKGESA
trybr   AEKDKERYKREM-----
unknown AKDDRIRYDNEMKSWEEQMAE
          * : .* . :
    
```


 Less Than 30 % id  
**BUT**  
 Conserved where it **MATTERS**

### Extrapolation Beyond The Twilight Zone

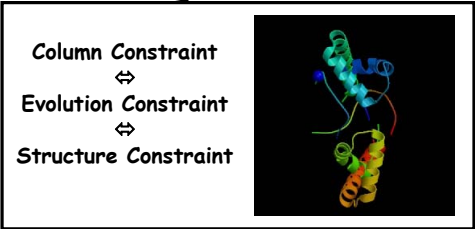


# How Can I Use A Multiple Sequence Alignment?

```
chite  ---ADKPKRPLSAYMLWLNSARESIKRENPDFK-VTEVAKKGELWRGLKD
wheat  --DPNKPKRAPSAFFVFMGEERREIFKQKNPKNKSVAAVGKAAGERWKSLSLE
trybr  KKDSNAPKRAMTSFMFFSSDERS----KHS DLS-IVEMSKAAGA AWKELGP
mouse  ----KPKRPRSAYNIYVSESFQ----EAKDDS-AQGK LKLVNEAWKNLSP
      ***. ::: .: . . . : . . * . *: *

chite  AATAKQNYIRALQEYERNGG-
wheat  ANKLGGEYNKAI AAYNKGESA
trybr  AEKDKERYKREM-----
mouse  AKDDRIRYDNEMKSWEEQMAE
      * . * . .
```

- Extrapolation
- Motifs/Patterns
- Profiles
- Phylogeny
- Struc. Prediction**

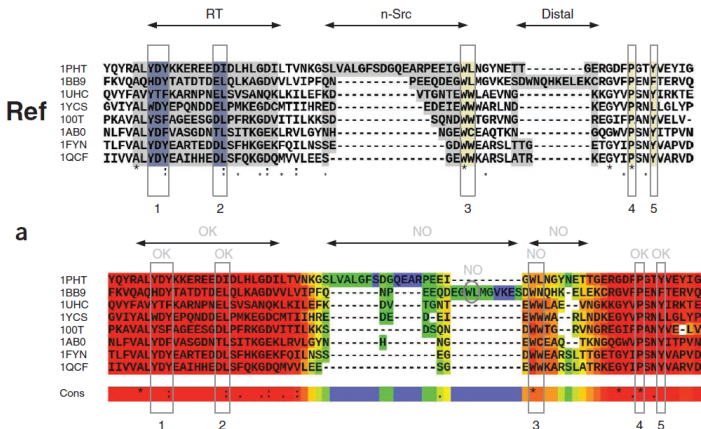


## Reading Your Alignment

- \* A star indicates an entirely conserved column.
- A semi column indicates columns where all the residues have roughly the same size and the same hydrophathy.
- A period indicates columns where the size OR the hydrophathy has been preserved in the course of evolution.

## MSA - difficile

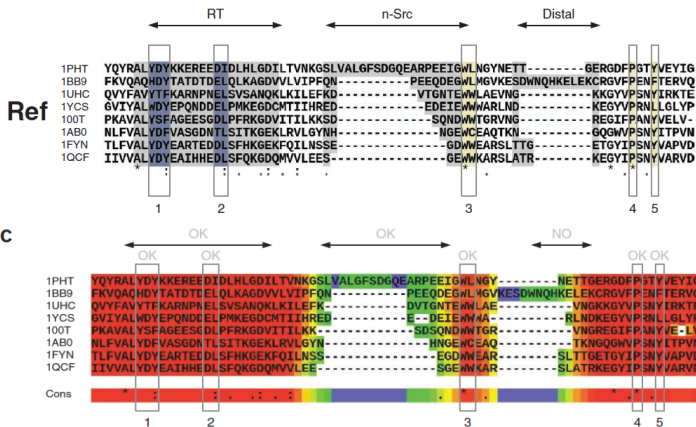
Exemple: domaines SH3, Ref: manuel, a: T-Coffee





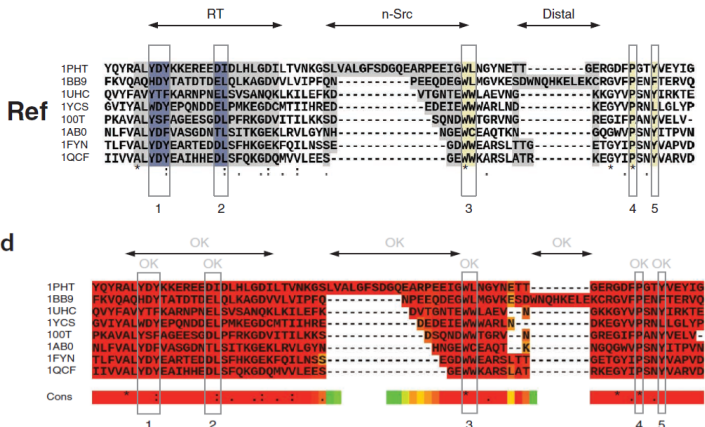
# MSA - mieux avec *homology extension*

Exemple: domaines SH3, Ref: manuel, d: PSI-Coffee



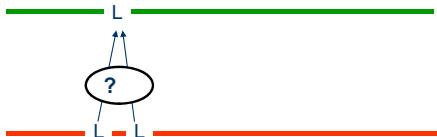
# MSA - plus simple avec structures 3D

Exemple: domaines SH3, Ref: manuel, d: Expresso

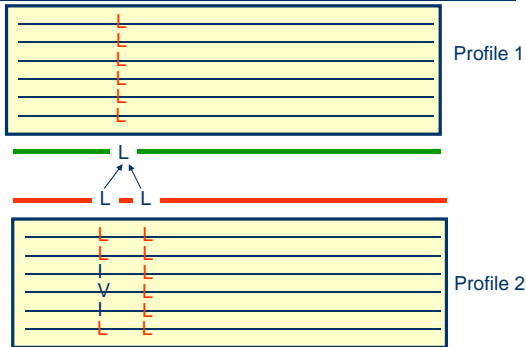


# What is Homology Extension ?

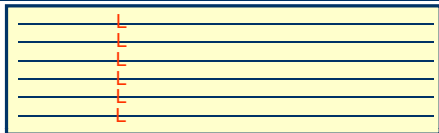
-Simple scoring schemes result in alignment ambiguities



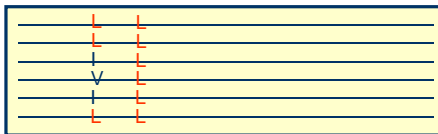
# What is Homology Extension ?



# What is Homology Extension ?



Profile 1



Profile 2

## Algorithmes / Programmes

- 1 *Alignement progressive*: ClustalW (ancien, mais toujours populaire)
- 2 *Affinement itérative*: MAFFT, MUSCLE
- 3 *Information de cohérence / consistency information*: T-coffee, ProbCons  
Plus juste mais aussi plus lente que l'algorithme (2)
- 4 *Combinaison de différentes méthodes*: M-coffee
- 5 *Avec alignement de structures 3D*: PROMALS3D, 3DCoffee/Espresso
- 6 *Edition manuelle*: JalView

## What is the Best MSA method ?

- More than 50 MSA methods
- Some methods are fast and inaccurate
  - Mafft, muscle, kalign
- Some methods are slow and accurate
  - T-Coffee, ProbCons
- Some Methods are slow and inaccurate...
  - ClustalW

Method	Method	Template	Score	Comment
ClustalW-2	Progressive	NO	<b>22.74</b>	
PRANK	Gap	NO	<b>26.18</b>	Science2008
MAFFT	Iterative	NO	<b>26.18</b>	
Muscle	Iterative	NO	<b>31.37</b>	
ProbCons	Consistency	NO	<b>40.80</b>	
ProbCons	MonoPhasic	NO	<b>37.53</b>	
T-Coffee	Consistency	NO	<b>42.30</b>	
M-Coffe4	Consistency	NO	<b>43.60</b>	
<b>PSI-Coffee</b>	<b>Consistency</b>	<b>Profile</b>	<b>53.71</b>	
<b>PROMAL</b>	<b>Consistency</b>	<b>Profile</b>	<b>55.08</b>	
<b>PROMAL-3D</b>	<b>Consistency</b>	<b>PDB</b>	<b>57.60</b>	
<b>3D-Coffee</b>	<b>Consistency</b>	<b>PDB</b>	<b>61.00</b>	<b>Espresso</b>

**Score:** fraction of correct columns when compared with a structure based reference (BB11 of BaliBase).



## Comparaisons plus récentes des méthodes MSA

Comparaisons très détaillées:

Mathilde Carpentier and Jacques Chomilier (Oct. 2019). In: *Bioinformatics* 35.20

Chapitre d'un livre récent sur MSA:

Tandy Warnow (2021). en. In: *Multiple Sequence Alignment: Methods and Protocols*. Methods in Molecular Biology

AlphaFold2 utilise FAMSA:

Sebastian Deorowicz, Agnieszka Debudaj-Grabysz, and Adam Gudyś (Sept. 2016). en. In: *Scientific Reports* 6.1

Vice-versa, AlphaFold2 aide pour améliorer les MSA:

Athanasios Baltzis et al. (Sept. 2022). In: *Bioinformatics*

### 3 Modélisation par homologie

- Modélisation / Prédiction d'une structure 3D de protéine
- Modélisation par homologie - Introduction
- Sélection du template
- Alignement cible - template
- Construction du modèle
- Affinement du modèle
- Évaluation du modèle

# Modélisation / Prédiction d'une structure 3D de protéine

# Modélisation par homologie - Introduction

## Définition

- Génération d'un modèle 3D à partir d'un alignement de séquences de structure 3D connue
- Modéliser, c'est prédire !
- Noms en anglais: Homology modeling, Comparative modeling, Template-based modeling (TBM)
- template = support 3D ou patron
- Protéines / Domaines homologues:  
Protéines / Domaines avec lien(s) évolutif

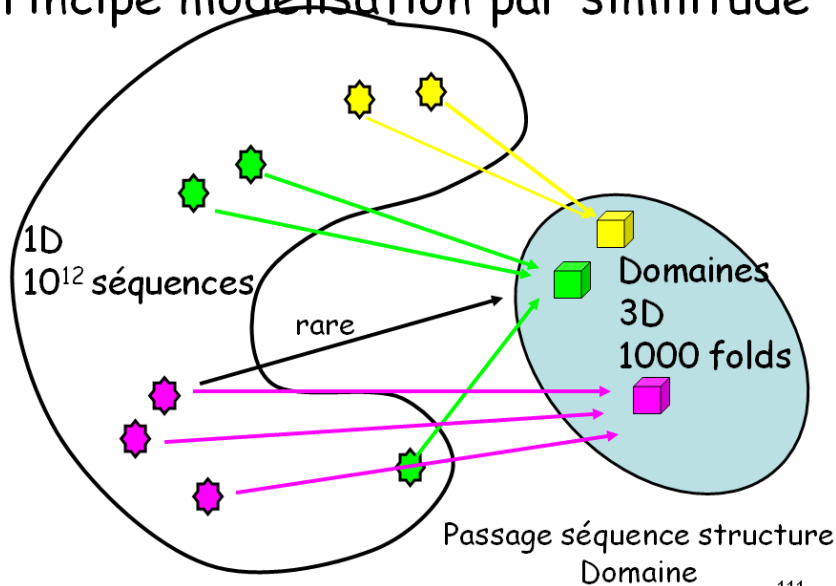
## Méthode

Observation empirique:

- Domaines de protéines avec lien(s) évolutif ont la tendance d'avoir une structure 3D similaire.
- Structure 3D est mieux conservée que la séquence ou la fonction.
- Il y a des exceptions, mais cette règle reste vrai pour la majorité absolue des cas.

Parmi les méthodes de prédiction de structure, la modélisation par homologie est la plus précise, donc la plus utilisée.

# Principe modélisation par similitude



# Homology modeling in short...

Prediction of structure based upon a highly similar structure



# Homology modeling in short...

Prediction of structure based upon a highly similar structure

NSDSECPLSHDG



Unknown structure

# Homology modeling in short...

Prediction of structure based upon a highly similar structure

NSDSECPLSHDG



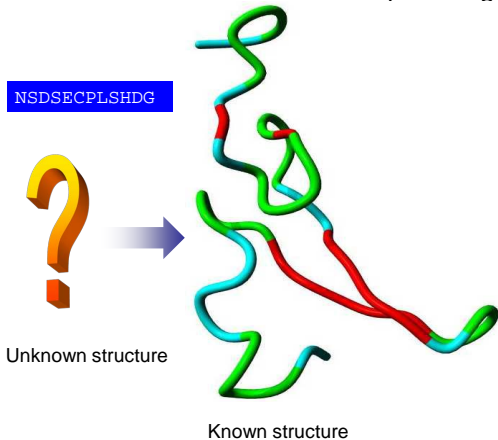
NSDSECPLSHDG  
| | | |  
NSYPGCPSSYDG

Alignment of model  
and template  
sequence

Unknown structure

# Homology modeling in short...

Prediction of structure based upon a highly similar structure



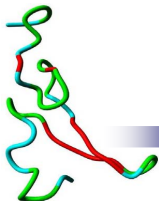
# Homology modeling in short...

Prediction of structure based upon a highly similar structure

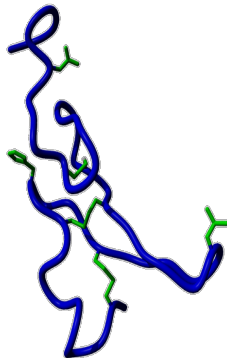
NSDSECPLSHDG



Unknown structure



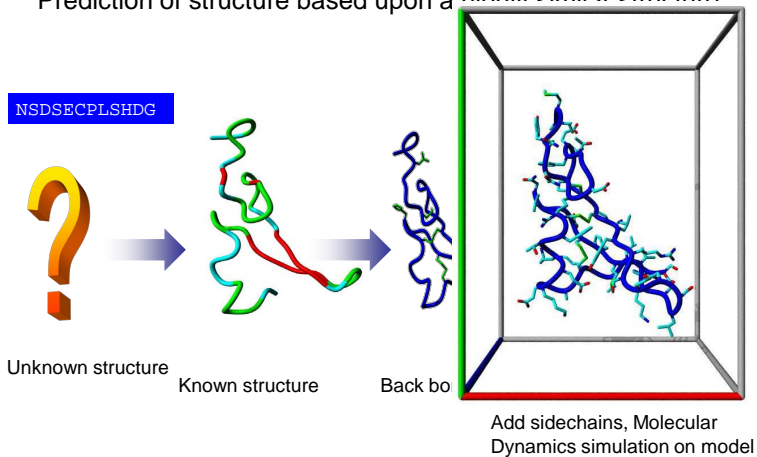
Known structure



Copy backbone and conserved residues

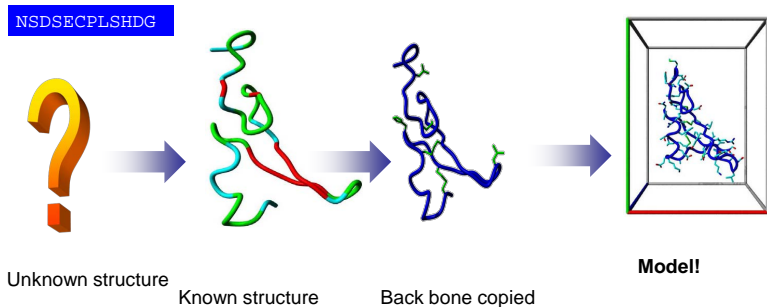
# Homology modeling in short...

Prediction of structure based upon a highly similar structure



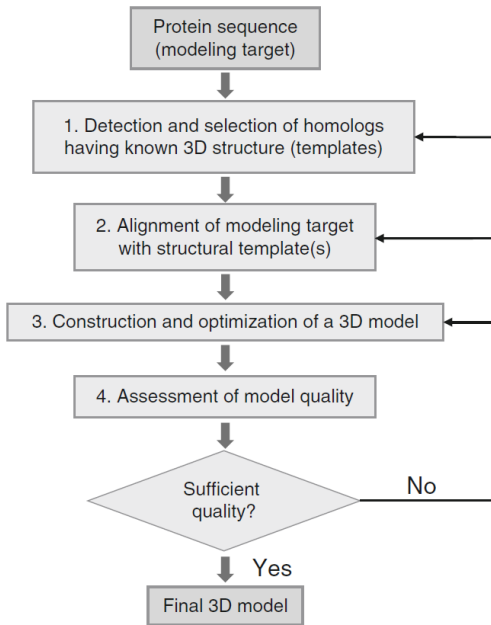
# Homology modeling in short...

Prediction of structure based upon a highly similar structure



## 4 grandes étapes

- 1 Sélection support (template)
- 2 Alignement cible-template
- 3 Construction du modèle
- 4 Évaluation du modèle





## 8 petites étapes au final

- 1 Sélection support (template) et alignement cible-template initial
- 2 Correction de l'alignement cible-template
- 3 Construction du modèle: squelette (backbone)
- 4 Construction du modèle: boucles (loops)
- 5 Construction du modèle: chaînes latérales (sidechains)
- 6 Construction du modèle: optimisation du modèle
- 7 Évaluation du modèle
- 8 Itération (=reprise) des étapes précédentes

A large, thick green arrow curves from the top left towards the bottom right, pointing downwards. In the background, there is a 3D molecular model of a protein structure, rendered in cyan, blue, and red. The text "The 8 steps of Homology modeling" is centered over the protein structure.

# The 8 steps of Homology modeling

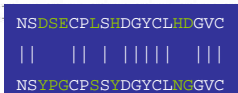
# 1: Template recognition and initial alignment

- BLAST your sequence against PDB
- Best hit → normally template

Alignment	QSeq	SQuery	Length	Score	Ident%	Positives	GC
1 F	PDB:1NOL_A	mslSpnCh length:824 Epidermal Growth Factor Receptor	624	2728	100	100	0.0
2 F	PDB:1MOK_B	mslSpnCh length:501 Epidermal Growth Factor Receptor	501	2728	100	100	0.0
3 F	PDB:1MOK_A	mslSpnCh length:501 Epidermal Growth Factor Receptor	501	2728	100	100	0.0
4 F	PDB:1IVO_B	mslSpnCh length:622 Epidermal Growth Factor Receptor	622	2728	100	100	0.0



- Initial alignment →



## 2: Alignment correction

- Functional residues → conserved
- Use multiple sequence alignments
- Deletions → shift gaps

```
CPISTRTAAS-FRCW
CPISTRTG-SMFRCW
CPISTRTA--TFRCW
CPISTRTAASHFRCW
CPISTRTGASIFRCW
CPISTRTA---FRCW
```

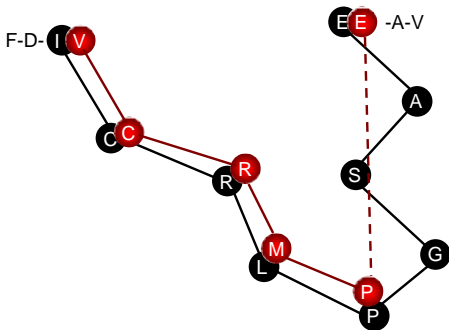
Multiple sequence alignment

```
CPISTRTGASIFRCW  CPISTRTGASIFRCW
CPISTRTA---FRCW  CPISTR---AFRCW
```

← Sequence with known structure  
← Your sequence

Correct alignment

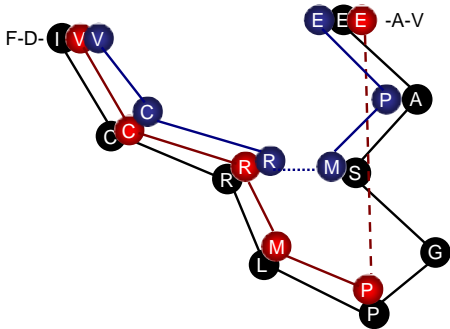
## 2: Alignment correction



Known structure FDICRLPGSAEAV

Model FNVCRMP---EAI

## 2: Alignment correction



Known structure FDICRLPGSAAV

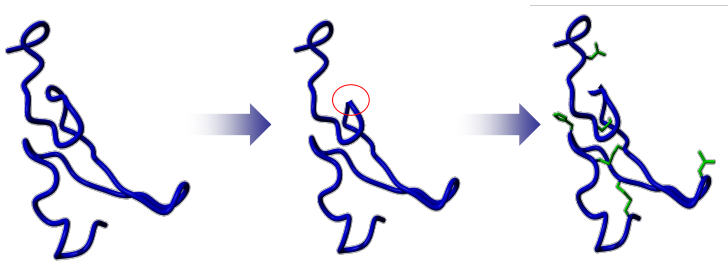
Model FNVCRMP---EAI

Model FNVCR---MPEAI

← Correct alignment

# 3: Backbone generation

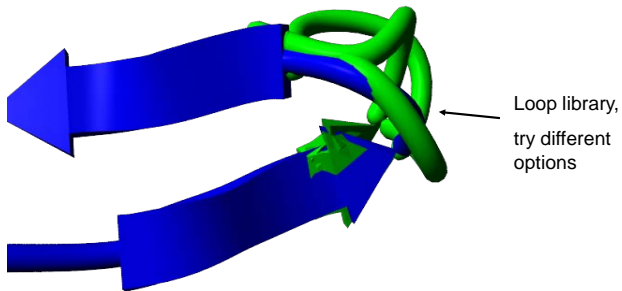
- Making the model....
- Copy backbone of template to model
- Make deletions as discussed
- (Keep conserved residues)



# 4: Loop modeling

Known structure **GVCMYIEA---LDKYACNC**

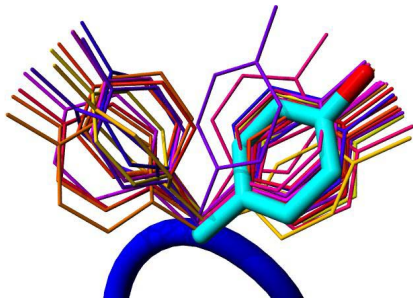
Your sequence **GECFMVKDLSNPSRYLCKC**





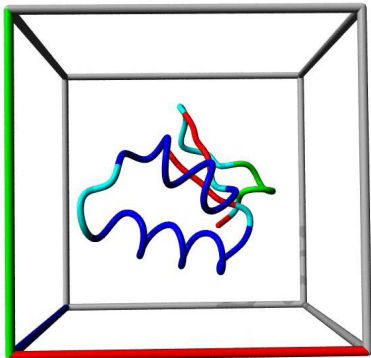
## 5: Side-chain modeling

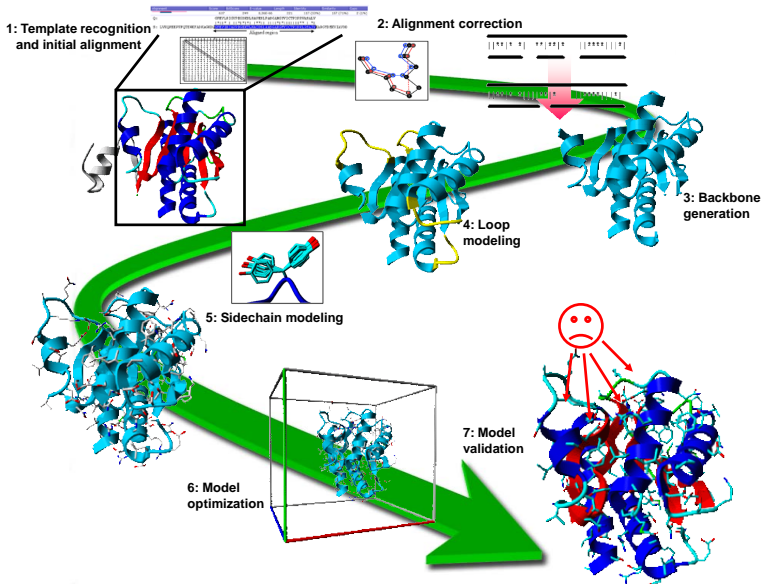
- Several options
- Libraries of preferred rotamers based upon backbone conformation

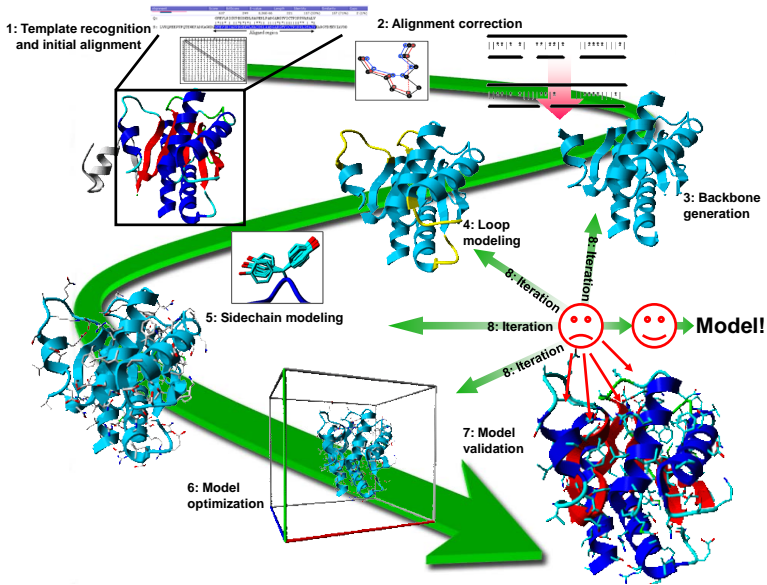


## 6: Model optimization

- Molecular dynamics simulation
- Remove big errors
- Structure moves to lowest energy conformation







## CMBI courses

<http://swift.cmbi.ru.nl/teach/B1SEM/>

**LAY-OUT**

- Introduction**
  - [The course](#)
  - [Dependencies](#)
  - [Goals](#)
  - [Logistics](#)
  - [Intro practicals](#)
  - [Molecular graphics](#)
- Homology Modelling**
  - [Intro](#)
  - [Video](#)
  - [Practical](#)
  - [Article](#)
- Validation**
  - [Intro](#)
  - [Video](#)
  - [Practical](#)
  - [Article](#)
- Force Field**
  - [Intro](#)
  - [Seminar](#)
  - [Practical 1](#)
  - [Practical 2](#)
- Drug Design**
  - [Intro](#)
  - [Seminar](#)
  - [Practical](#)
- Energy calculations**
- Miscellaneous**
  - [HELP](#)
  - [Exercise files](#)
  - [Seminars](#)
  - [Wiki](#)

**Bioinformatics Seminars**

## Homology Modelling: Intro

After the Homology Modelling section you will:

- Be able to perform homology modelling using web-based servers;
- Understand the theoretical problems associated with Homology Modelling;

[The homology modelling seminar](#);  
[The homology modelling article](#);

Homology Modelling is a technique to predict the structure of a protein from its sequence using the coordinates of a homologous protein with known structure.

We will explain homology modelling as an 8-step process. That is just a choice. Other people use three steps, very many steps, or even no steps at all.

It is nowadays sometimes also possible to predict the structure of a protein without the use of a homolog with known structure. This field is not yet developed far enough yet to teach about it because what we would teach today might be called old-stuff tomorrow.

Please be aware that about every step in Homology Modelling includes Force Field computations. We will mention a few of them, but later during the course -after the Force Field seminar- the Homology Modelling seminar will be quickly repeated with the inclusion of many of these Force fields.

Article:

[http://swift.cmbi.ru.nl/teach/B1SEM/HTML/hanka\\_modelling.pdf](http://swift.cmbi.ru.nl/teach/B1SEM/HTML/hanka_modelling.pdf)

## Conditions

- 1 Existence d'un template
- 2 Identité de séquence cible  $\leftrightarrow$  template  $> XX \%$
- 3 Alignement correct entre séquence cible et structure 3D du template

# Sélection du template

## Introduction

- La sélection du template et l'alignement cible - template sont les deux étapes clés de la modélisation par homologie, car un mauvais choix du template ou un mauvais alignement ne peut pas plus être corrigé par la suite.
- Les deux étapes vont de pair
- Des méthodes, comme HHpred/HHsearch, qui sont spécialisée dans ces deux étapes n'ont pas besoin d'une construction de modèle sophistiquée pour être parmi les premiers dans CASP



## Outils d'annotation

template = support 3D ou patron

Annotation (séquence, structure, fonction):

- InterProScan: Identification domaines, motifs, familles
- PsiPred: Prédiction structure secondaire
- DisoPred: Prédiction désordre (=> IUP)
- MEMSAT: Prédiction ségments transmembranaires
- Choix du template doit être fait manuellement pour choisir les structures qui correspondent au même état fonctionel que la cible.
- Possible de choisir plusieurs templates en même temps pour mieux couvrir la séquence de la cible

# Alignement cible - template

# Étapes

template = support 3D ou patron

- 1 alignement initial séquence-structure  $\Leftrightarrow$  choix des templates
- 2 trouver les zones d'alignement qui demandent un ajustement
- 3 amélioration de l'alignement

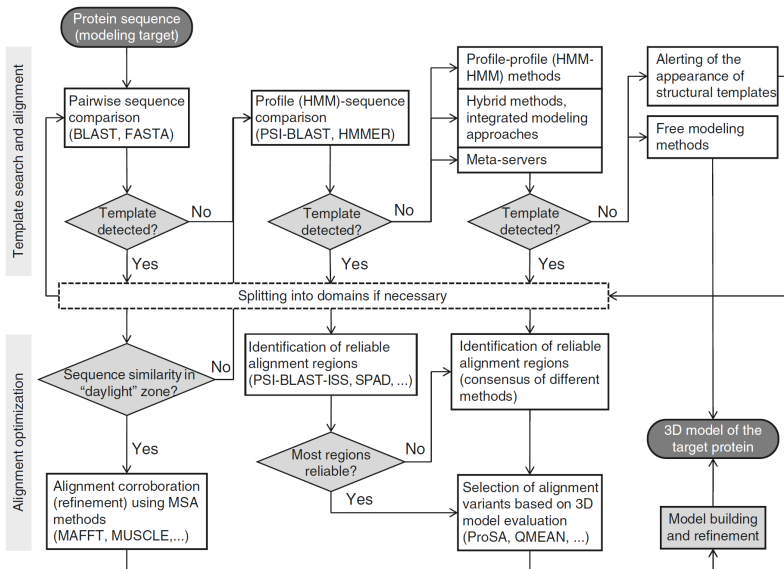


Fig. 6. Flowchart of major steps in sequence to structure alignment.

# BLAST

- suffit si identité de séquence  $> 40\%$  et statistiquement significatif (E value  $< 0.001$  (expectation value))
- mais il est quand même recommandé d'assembler un jeu de séquences homologues avec BLAST puis de les aligner avec une méthode MSA



## Databases pour BLAST

- BLAST database: "Non-redundant protein sequences" ("nr"):
  - 20 millions de séquences le 29/09/2012
  - 100 millions de séquences le 27/09/2016
  - 238 millions de séquences le 22/03/2019
  - 509 millions de séquences le 06/10/2022
  - 480k séquences SwissProt 142k séquences PDB
  - <http://blast.ncbi.nlm.nih.gov>
- PDB database:
  - 60091 structures 3D le 29/09/2012
  - 86698 structures 3D le 27/09/2016
  - 109709 structures 3D le 07/04/2019
  - 196108 structures 3D le 06/10/2022
  - et 1 millions "computed structure models (CSM)"

# PSI-BLAST

- Le nombre de séquences dans la PDB est trop petit pour appliquer PSI-BLAST directement
- Procédure "PDB-BLAST":
  - 1 plusieurs itérations avec PSI-BLAST avec la base "nr"
  - 2 utiliser le profil construit pour faire une dernière itération avec les séquences de la PDB
  - 3 Un serveur: <http://protein.bio.unipd.it/pdbblast/>



## Séparation en domaines structurales

- Si la cible est une protéine multi-domaine, il est nécessaire de la séparer en ses domaines structurales
- Les domaines seuls peuvent être plus proche par rapport aux templates

## Pas de template :-)

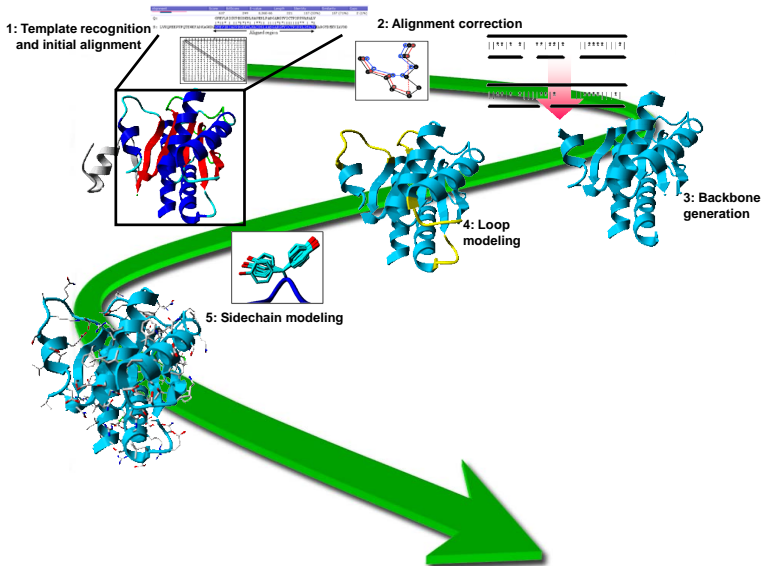
Si il n'y a vraiment pas de template dans la PDB, alors il reste comme options:

- 1 Si ce n'est pas urgent, attendre qu'un template est ajouté à la PDB.  
Système automatique d'alerte: PDBAlert (utilise HHsearch, très sensible)
- 2 Free Modeling (FM):
  - Robetta (serveur basé sur Rosetta)
  - I-TASSER
  - SAM-T08
  - MULTICOM
- 3 FM marche raisonnablement pour des protéines de petite taille (< 100 résidus) et de topologie simple

# Construction du modèle

## Assemblage de corps rigides

- Assemblage des templates en tant que corps rigide
- Basé sur la décomposition naturel de la protéine en:
  - 1 Coeur/Noyau conservé
  - 2 Boucles variables qui lient les régions conservé
  - 3 Chaînes latérales qui décorent le squelette



# Assemblage de corps rigides

Exemple avec COMPOSER:

- 1 Templates sont superposées
- 2 *Framework* = Moyenne des coordonnées  $C_\alpha$  des régions structurellement conservées
- 3 Superposer sur le framework le coeur du meilleur template comme début pour le modèle
- 4 Générations des boucles par une recherche dans une banque de structure 3D de boucles
- 5 Chaînes latérales sont modélisées avec leur préférences conformationnelles intrinsèque
- 6 Affinement par minimisation d'énergie ou dynamique moléculaire

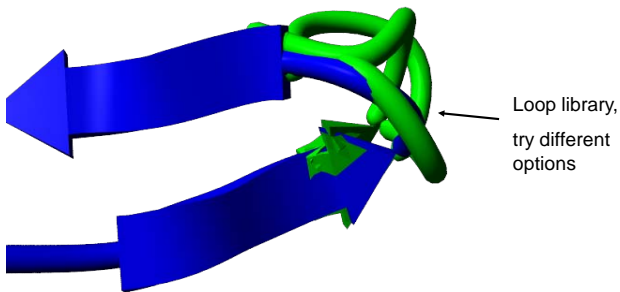
## Modélisation par satisfaction de contraintes spatiales

- Concept similaire que pour la détermination d'une structure par RMN
- Contraintes de distances obtenues depuis le template
- Application d'un champ de force de mécanique moléculaire
- Modèle doit satisfaire le plus de contraintes que possible
- Exemple: MODELLER

# 4: Loop modeling

Known structure **GVCMYIEA---LDKYACNC**

Your sequence **GECFMVKDLSNPSRYLCKC**





## Modélisation des boucles

- Souvent: l'insertion de boucles à la surface
- Ces boucles sont importants pour la liaison de ligands
- Une modélisation correcte de ses boucles est important pour pouvoir utiliser le modèle par la suite dans des études de docking de ligand.
- Mini protein folding problem:  
On ne connaît que la séquence.  
Par contre les boucles sont trop courts pour avoir assez d'information sur leur conformation.
- Points d'ancrage sur la structure
- Difficile de modéliser des boucles au delà de 8 résidus
- La plupart des insertions sont plus courtes que 10-12 résidus

# Modélisation des boucles

Deux approches:

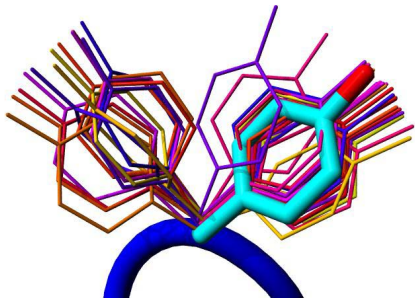
- 1 Recherche dans la PDB pour trouver des segments qui sont compatibles avec les points d'ancrage.

Limites:

- Le nombre de conformations possibles croît exponentiellement avec la longueur de la boucle.
  - Limitation en taille de boucle  $< 9$  résidus
- 2 Recherche conformationnelle: optimisation avec score  
Exemple: MODELLER: gradient conjugué et dynamique moléculaire avec recuit simulé

## 5: Side-chain modeling

- Several options
- Libraries of preferred rotamers based upon backbone conformation



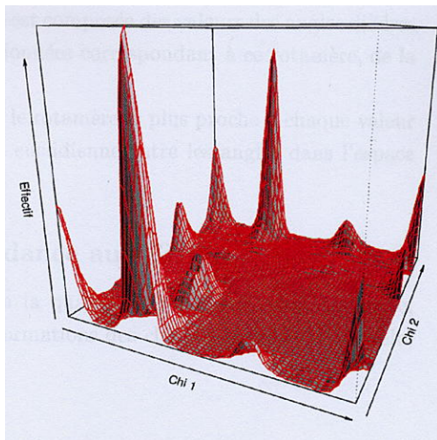
# Modélisation des chaînes latérales

Observations:

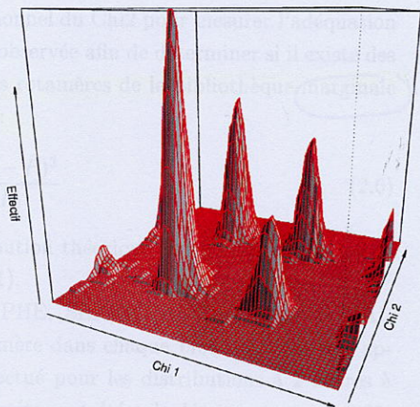
- 1 Un échange d'acides aminés laisse le squelette souvent inchangé  
=> Squelette rigide lors de la recherche des conformations des chaînes latérales
- 2 Nombre de conformations est limité (contraintes stéréochimiques et énergétiques)  
=> Banque de rotamères des chaînes latérales
- 3 Limitation: le score et non l'échantillonnage

# Rotamères

ARG



PHE



### 3. Modélisation similitude: minim énergie

- Dernière étape de la modélisation moléculaire
- Suppression de l'encombrement stérique des chaînes latérales
- Mise en conformité avec les valeurs canoniques des angles de valence, des dièdres....

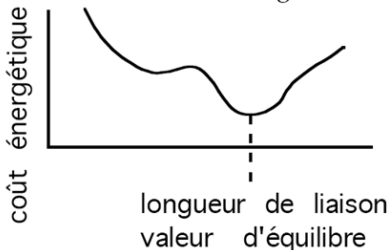
# Minimisation

L'assemblage du modèle terminé, il faut minimiser l'énergie de la protéine  $\Rightarrow$  stéréochimie canonique

PG = Charmm, X-Plor, Amber, Gromos

Energies de liaison :

$$\sum_{\text{liaisons}} K_r (r - r_{eq})^2$$



Angles de liaison :

$$\sum_{\text{angles\_valences}} K_\theta (\theta - \theta_{eq})^2$$

Energies de torsion :

$$\sum_{\text{angles\_dièdres}} \sum_{n=1}^3 \frac{K_n}{2} (1 + \cos(n\phi - \phi_n))$$

Liaisons de van der Waals :

$$\sum_{\text{atomes\_non\_liés}} \frac{A_{ij}}{R_{ij}^{12}} - \frac{B_{ij}}{R_{ij}^6}$$

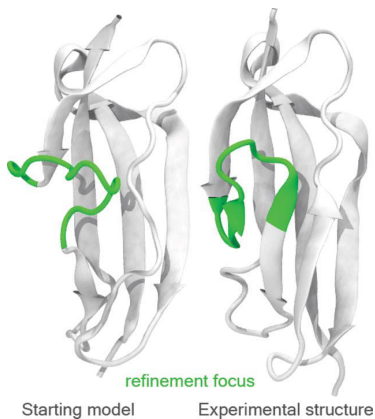
Interaction électrostatiques :

$$\sum_{\text{atomes}} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r r_{ij}}$$

# Affinement du modèle

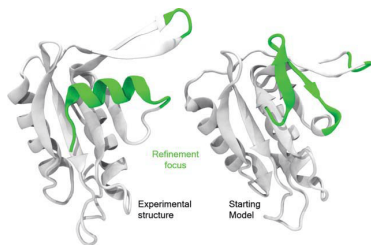


## Exemple simple



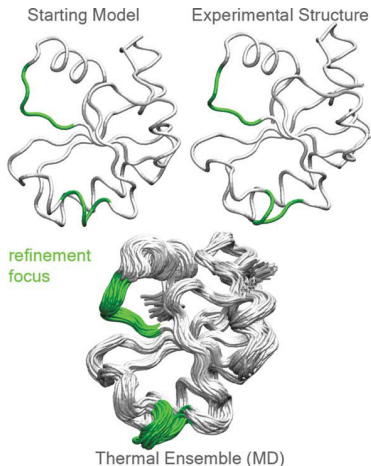
Justin L. MacCallum et al. (2011). en. In: *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*  
79.S10

## Exemple difficile

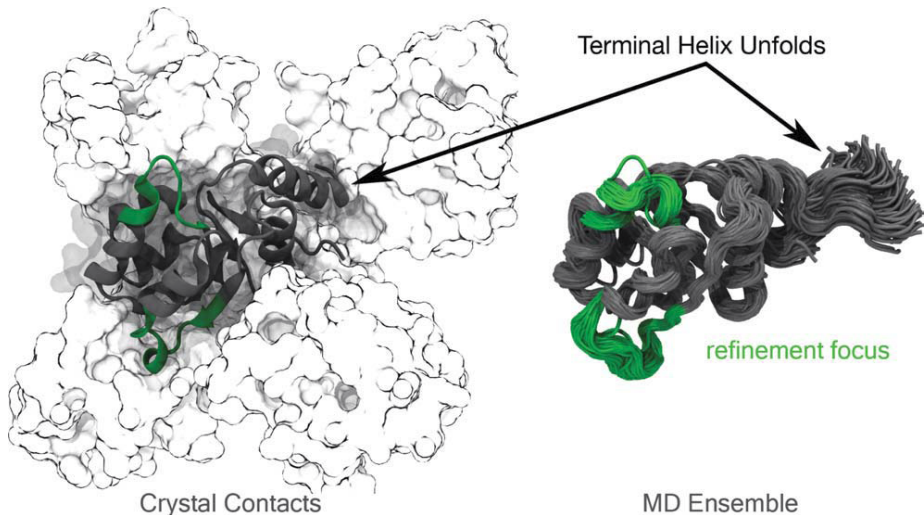


Justin L. MacCallum et al. (2011). en. In: *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*  
79.S10

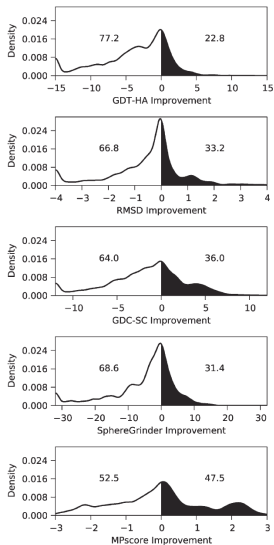
## Exemple difficile



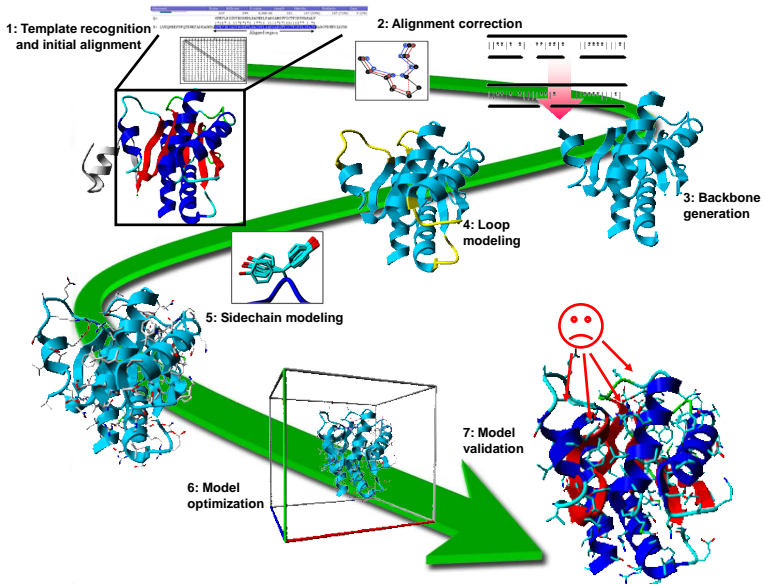
## Exemple difficile



## CASP 9 - résultats



# Évaluation du modèle



# Outils pour vérifier un modèle

- Précision/Exactitude locale: ANOLEA, QMEAN, Gromos
- Qualité globale: DFire
- Stéréochimie: Whatcheck, Procheck
- Structure (super-)secondaires: DSSP, Promotif
- ModEval, ModFOLD
- Meilleurs à CASP 10: ProQ2clust2 et IntFOLD2 (ModFOLD)
- Meilleurs à CASP 12: MESHI, ProQ3, SVMQA



# Meilleures méthodes de validation

- **IntFOLD:** <http://www.reading.ac.uk/bioinf/IntFOLD/>
- **ProQ2:** <http://www.bioinfo.ifm.liu.se/ProQ2/>
- **ProQ3:** <http://proq3.bioinfo.se/>
- **SVMQA:**  
[http://lee.kias.re.kr/SVMQA/SVMQA\\_eval.tar.gz](http://lee.kias.re.kr/SVMQA/SVMQA_eval.tar.gz)

#### 4 Programmes / Serveurs

- Banques de données / outils
- Programmes / Serveurs - Introduction
- CASP
- SWISS-MODEL
- Logiciels graphiques locales
- Protein Model Portal (PMP)

# Banques de données / outils

# Banques de données

<b>Sequence databases</b>	
Uniprot (141)	<a href="http://www.uniprot.org">http://www.uniprot.org</a>
NCBI (142)	<a href="http://www.ncbi.nlm.nih.gov/">http://www.ncbi.nlm.nih.gov/</a>
<b>Structure databases</b>	
PDB (2)	<a href="http://www.pdb.org">http://www.pdb.org</a>
<b>Protein structure classifications</b>	
SCOP (10)	<a href="http://scop.mrc-lmb.cam.ac.uk/scop/">http://scop.mrc-lmb.cam.ac.uk/scop/</a>
CATH (12)	<a href="http://www.cathdb.info/">http://www.cathdb.info/</a>
SISYPHUS (28)	<a href="http://sisyphus.mrc-cpe.cam.ac.uk/">http://sisyphus.mrc-cpe.cam.ac.uk/</a>
3D complex (27)	<a href="http://www.3Dcomplex.org">http://www.3Dcomplex.org</a>
<b>Structural neighbourhoods</b>	
MMDB (142)	<a href="http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?db=structure">http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?db=structure</a>
FSN (137)	<a href="http://fatcat.burnham.org/fatcat-cgi/cgi/FSN/fsn.pl">http://fatcat.burnham.org/fatcat-cgi/cgi/FSN/fsn.pl</a>
Dali DB (135, 143)	<a href="http://ekhidna.biocenter.helsinki.fi/dali/start">http://ekhidna.biocenter.helsinki.fi/dali/start</a>
COPS (136)	<a href="http://cops.services.came.sbg.ac.at/">http://cops.services.came.sbg.ac.at/</a>

Andreeva, "Homology Modeling", ch. 1, Methods in Mol. Biol.(2012)

# Banques de données

## Other resources

DisProt (84)	<a href="http://www.disprot.org/">http://www.disprot.org/</a>
PROSITE (26)	<a href="http://www.expasy.org/prosite">http://www.expasy.org/prosite</a>
Consurf (140)	<a href="http://consurf.tau.ac.il/">http://consurf.tau.ac.il/</a>
Database of membrane proteins (152)	<a href="http://blanco.biomol.uci.edu/Membrane_Proteins_xtal.html">http://blanco.biomol.uci.edu/Membrane_Proteins_xtal.html</a>
Pratt (38)	<a href="http://www.ebi.ac.uk/Tools/pratt/index.html">http://www.ebi.ac.uk/Tools/pratt/index.html</a>
Jalview (139)	<a href="http://www.jalview.org/">http://www.jalview.org/</a>

Andreeva, "Homology Modeling", ch. 1, Methods in Mol. Biol.(2012)

## PDB, PDBsum

- **PDB** <http://www.rcsb.org>
- **PDBsum** <http://www.ebi.ac.uk/pdbsum/>

## Home

News & Publications  
 Policies  
 FAQ  
 Contact  
 Feedback  
 About Us

## Deposition

All Deposit Services  
 Electron Microscopy  
 NMR  
 Validation Server  
 BioSync Beamline  
 Related Tools

## Search

Advanced Search  
 Latest Release  
 Latest Publications  
 Sequence Search  
 Ligand Search  
 Unreleased Entries  
 Browse Database  
 Histograms

## Explorer:

Last Structure: 1U3I

## Tools

File Downloads  
 File Formats  
 Services: RESTful | SOAP  
 Widgets  
 Compare Structures

## Education

Looking at Structures  
 Malaria of the Month

Summary [Derived Data](#) [Sequence](#) [Seq. Similarity](#) [Literature](#) [Biol. & Chem.](#) [Methods](#) [Geometry](#) [Links](#)

## Crystal structure of glutathione S-transferase from *Schistosoma mansoni*

DOI:10.2210/pdb1u3i/pdb

## Primary Citation

Crystal structure of *Schistosoma mansoni* glutathione S-transferase  
 Chomilier, J.<sup>1</sup>, Vaney, M.-C.<sup>2</sup>, Labesse, G.<sup>3</sup>, Trottein, F.<sup>4</sup>, Capron, A.<sup>5</sup>,  
 Mormon, J.-P.<sup>6</sup>  
 To be Published

Not in PubMed

## Molecular Description

Hide

Classification: **Transferase**  
 Structure Weight: 24201.12  
 Molecule: Glutathione S-transferase 28 kDa  
 Polymer: 1 Type: polypeptide(L) Length: 211  
 Chains: A  
 EC#: **2.5.1.18** 

## Source

Hide

Polymer: 1  
 Scientific Name: ***Schistosoma mansoni***  Expression System: ***Escherichia coli***

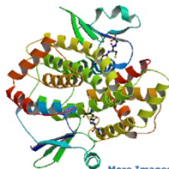

## Related PDB Entries

Hide

Id	Details
1oe7	GST from <i>Schistosoma hematobium</i>
1oe8	GST from <i>Schistosoma hematobium</i>

1u3i

 Display Files   
 Download Files   
 Print this Page  
 Share this Page

Biological Molecule 

More Images...

 View in Jmol

SimpleViewer  
 Protein Workshop  
 Other Viewers 

Oligomeric State: DIMERIC

## Deposition Summary

Hide

Authors: **Chomilier, J.**, **Vaney, M.-C.**, **Labesse, G.**, **Trottein, F.**, **Capron, A.**, **Mormon, J.-P.**

# Fichier PDB

Coordonnées atomiques disponibles dans une banque de structures, la Protein Data Bank <http://www.rcsb.org/pdb/>

```
HEADER DNA-BINDINGPROTEIN          20-MAY-94 1ENH  1ENH  2
COMPND ENGRAILEDHOMEODOMAIN          1ENH  3
SOURCE (DROSOPHILA MELANOGASTER) RECOMBINANT FORM EXPRESSED IN  1ENH  4
SOURCE 2 (ESCHERICHIA COLI)          1ENH  5
AUTHOR N.D.CLARKE,C.R.KISSINGER,J.DESJARLAIS,G.L.GILLILAND,C.O.PABO 1ENH  6
REVDAT 1 31-AUG-94 1ENH  0          1ENH  7
SCALE3  0.000000 0.000000 0.008466   0.000000          1ENH  61
ATOM   1 N  ARG   3   2.937 44.573 53.291 1.00 62.68  1ENH  62
ATOM   2 CA  ARG   3   3.220 44.968 51.871 1.00 61.88  1ENH  63
ATOM   3 C  ARG   3   1.922 45.475 51.229 1.00 62.67  1ENH  64
ATOM   4 O  ARG   3   0.984 44.702 51.017 1.00 65.49  1ENH  65
ATOM   5 CB  ARG   3   3.758 43.763 51.101 1.00 58.73  1ENH  66
ATOM   6 CG  ARG   3   3.642 43.884 49.610 1.00 57.06  1ENH  67
ATOM   7 CD  ARG   3   3.776 42.528 48.965 1.00 54.58  1ENH  68
ATOM   8 NE  ARG   3   5.083 42.365 48.340 1.00 56.07  1ENH  69
ATOM   9 CZ  ARG   3   6.183 41.961 48.980 1.00 57.06  1ENH  70
ATOM  10 NH1 ARG   3   6.141 41.670 50.274 1.00 57.63  1ENH  71
ATOM  11 NH2 ARG   3   7.335 41.841 48.325 1.00 57.77  1ENH  72
```

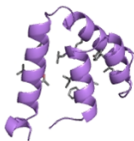
Natom      Nrésidu      X      Y      Z      Q      B



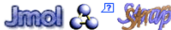
Steroid binding

PDB id

1utg

<http://www.ebi.ac.uk/pdbsum/>

Asymmetric unit



Contents

## Description

[Header details](#)[Header records](#)[References](#)[PROCHECK](#)

## Protein chain

[70 a.a.](#)

Waters x83

## Tools

[Image Generation](#)[AstexViewer™@MSD-EBI](#)[Run PROCHECK](#)[Clefs Calculation](#)Biological unit\*, dimer  
(\*as deduced by PQS)

PDB id: 1utg

Name: Steroid binding

Title: Refinement of the c2221 crystal form of oxidized uteroglobin at 1.34 angstroms resolution

Structure: Uteroglobin. Chain: a. Engineered: yes

Source: *Cryptotlagus curniculus*

Biological unit: Dimer (from PQS)

UniProt: [P02779](#) (UTER\_RABIT) [\[Pfam\]](#)

Seq: 91 a.a.

Struc: 70 a.a.

Key: PfamA domain Secondary structure

Function: [\(see GO annotation below\)](#)

Resolution: 1.34Å

R-factor: 0.230

Authors: I.Morize, E.Surcouf, M.C.Vaney, M.Buehner, J.P.Mornon

Key ref: I.Morize et al. (1987). Refinement of the C222(1) crystal form of oxidized uteroglobin at 1.34 Å resolution. *J Mol Biol*, **194**, 725-739. [PubMed id: 3656405] [DOI: 10.1016/0022-

## Quick links

[RCSB](#)  
[MSD](#)  
[SRS](#)  
[MMDB](#)  
[JenaLib](#)  
[OCA](#)  
[Proteopedia](#)  
[CATH](#)  
[SCOP](#)  
[FSSP](#)  
[HSSP](#)  
[PQS](#)  
[ProSAT](#)  
[Whatcheck](#)

## Procheck



## Clefs



## Surface



# Outils

## Tools for analysis

### Tools for sequence comparison and similarity searches

BLAST & PSIBLAST (85)	<a href="http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast">http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast</a>
FASTA3 (144)	<a href="http://www.ebi.ac.uk/Tools/fasta33">http://www.ebi.ac.uk/Tools/fasta33</a>
HMMER (86)	<a href="http://selab.janelia.org/">http://selab.janelia.org/</a>

### Tools for structure comparison and similarity searches

Dali (143)	<a href="http://ekhidna.biocenter.helsinki.fi/dali_server/">http://ekhidna.biocenter.helsinki.fi/dali_server/</a>
VAST (145)	<a href="http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Structure/VAST/vastsearch.html">http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Structure/VAST/vastsearch.html</a>
SSAP (146)	<a href="http://www.cathdb.info">http://www.cathdb.info</a>
FATCAT (147)	<a href="http://fatcat.burnham.org/">http://fatcat.burnham.org/</a>
CE (148)	<a href="http://cl.sdsc.edu/">http://cl.sdsc.edu/</a>
Mammoth (149)	<a href="http://ub.cbm.uam.es/mammoth/mult/">http://ub.cbm.uam.es/mammoth/mult/</a>
Topmatch (150)	<a href="http://topmatch.services.came.sbg.ac.at/TopMatchFlex.php">http://topmatch.services.came.sbg.ac.at/TopMatchFlex.php</a>
TM-align (151)	<a href="http://zhanglab.ccmb.med.umich.edu/TM-align/">http://zhanglab.ccmb.med.umich.edu/TM-align/</a>

Andreeva, "Homology Modeling", ch. 1, Methods in Mol. Biol.(2012)

## Comparaison de structure 3D

### **DALI server**

`http:`

`//ekhidna.biocenter.helsinki.fi/dali_server/start`

### **DALI banque**

`http://ekhidna.biocenter.helsinki.fi/dali/start`

### **CE**

`http://source.rcsb.org/jfatcatserver/ceHome.jsp`

### **3D-Blast**

`http://threedblast.loria.fr/`

### **YAKUSA**

`http://bioserv.rpbs.jussieu.fr/Yakusa/index.html`

# Programmes / Serveurs - Introduction

**Table 1. Commonly Used Tools and Services for Protein Structure Modeling and Prediction**

Tool or Service	Web Site
Protein Model Portal	<a href="http://www.proteinmodelportal.org">http://www.proteinmodelportal.org</a> (Arnold et al., 2009; Haas et al., 2013)
Model Archive	<a href="http://modelarchive.org">http://modelarchive.org</a>
HHpred	<a href="http://toolkit.tuebingen.mpg.de/hhpred">http://toolkit.tuebingen.mpg.de/hhpred</a> (Hildebrand et al., 2009)
IMP	<a href="http://www.salilab.org/imp">http://www.salilab.org/imp</a> (Russel et al., 2012; Yang et al., 2012)
IntFOLD	<a href="http://www.reading.ac.uk/bioinf/IntFOLD/">http://www.reading.ac.uk/bioinf/IntFOLD/</a> (Roche et al., 2011)
I-Tasser	<a href="http://zhanglab.cmb.med.umich.edu/I-TASSER/">http://zhanglab.cmb.med.umich.edu/I-TASSER/</a> (Zhang, 2013)
ModBase	<a href="http://salilab.org/modbase/">http://salilab.org/modbase/</a> (Pieper et al., 2011)
Modeler/ModWeb	<a href="http://salilab.org/modeller/">http://salilab.org/modeller/</a> (Pieper et al., 2011; Yang et al., 2012)
Pcons.net	<a href="http://pcons.net/">http://pcons.net/</a> (Larsson et al., 2011)
PHYRE2	<a href="http://www.sbg.bio.ic.ac.uk/phyre2/">http://www.sbg.bio.ic.ac.uk/phyre2/</a> (Kelley and Sternberg, 2009)
Robetta	<a href="http://rosetta.bakerlab.org/">http://rosetta.bakerlab.org/</a> (Raman et al., 2009)
Rosetta	<a href="https://www.rosettacommons.org">https://www.rosettacommons.org</a> (Das and Baker, 2008)
SWISS-MODEL Repository	<a href="http://swissmodel.expasy.org/repository">http://swissmodel.expasy.org/repository</a> (Kiefer et al., 2009)
SWISS-MODEL Workspace	<a href="http://swissmodel.expasy.org/workspace/">http://swissmodel.expasy.org/workspace/</a> (Arnold et al., 2006; Bordoli and Schwede, 2012)

CASP

# CASP - Critical Assessment of protein Structure Prediction

- <http://predictioncenter.org/>
- tous les deux ans:  
CASP 10: 2012, CASP 11: 2014, CASP 12: 2016, CASP 13: 2018
- et depuis 2011: en continue => CASP ROLL

# CASP - Modeling categories

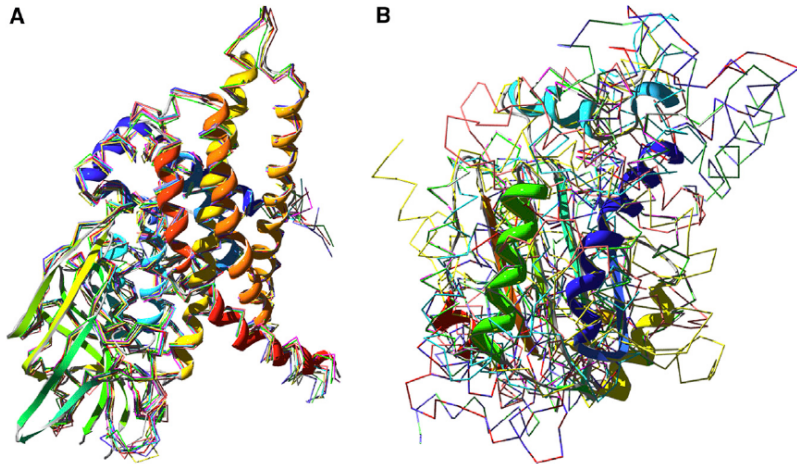
- 1 Template-based modeling (TBM)
  - 1 comparative modeling
  - 2 fold recognition
- 2 Free modeling (FM)
  - 1 Knowledge-based *de novo* modeling
  - 2 *ab initio* modeling from first principles
- 3 Refinement



## CASP - Other modeling categories

- 1 Contact-assisted structure modeling
- 2 Chemical shifts guided modeling of NMR structures
- 3 Structure modeling based on molecular replacement with ab initio models and X-ray data
- 4 Detecting residue-residue contacts in proteins (RR).
- 5 Identifying disordered regions in target proteins (DR).
- 6 Function prediction (prediction of binding sites) (FN).
- 7 Quality assessment of models in general (without knowing native structures) and the reliability of predicting certain residues in particular (QA).

## CASP 10 - easy VS difficult target for TBM



# CASP - Liste des meilleurs serveurs

I-TASSER - <http://zhanglab.ccmb.med.umich.edu/I-TASSER/>

ROBETTA - <http://robetta.bakerlab.org/>

HHpred - <http://toolkit.tuebingen.mpg.de/hhpred/>

METATASSER -

<http://cssb.biology.gatech.edu/skolnick/webservice/MetaTASSER/>

MULTICOM - [http://casp.rnet.missouri.edu/multicom\\_3d.html](http://casp.rnet.missouri.edu/multicom_3d.html)

Pcons - <http://pcons.net/>

SAM-T08 - [http://compbio.soe.ucsc.edu/SAM\\_T08/T08-query.html](http://compbio.soe.ucsc.edu/SAM_T08/T08-query.html)

3D-Jury - [http://meta.bioinfo.pl/submit\\_wizard.pl](http://meta.bioinfo.pl/submit_wizard.pl)

THREADER - <http://bioinf.cs.ucl.ac.uk/threader/>

RaptorX - <http://raptorx.uchicago.edu/>

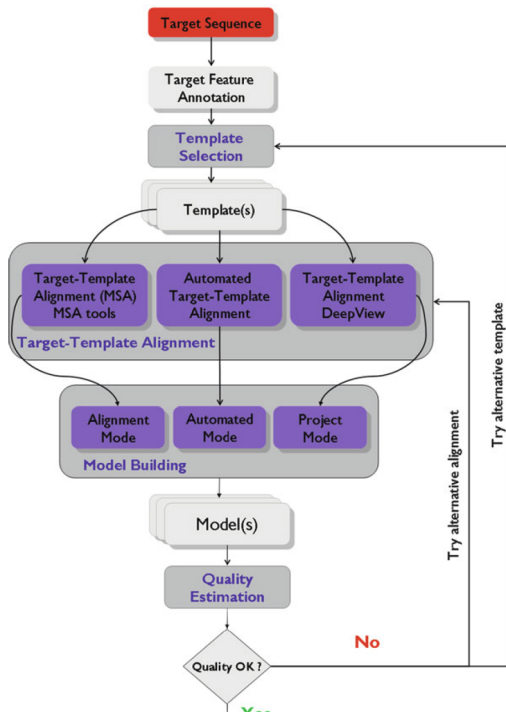
Autre serveurs populaires:

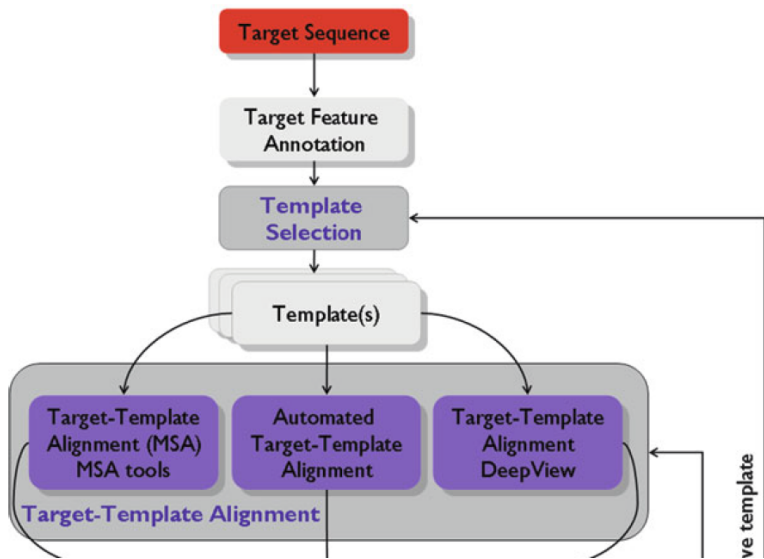
- SwissModel
- MODELLER

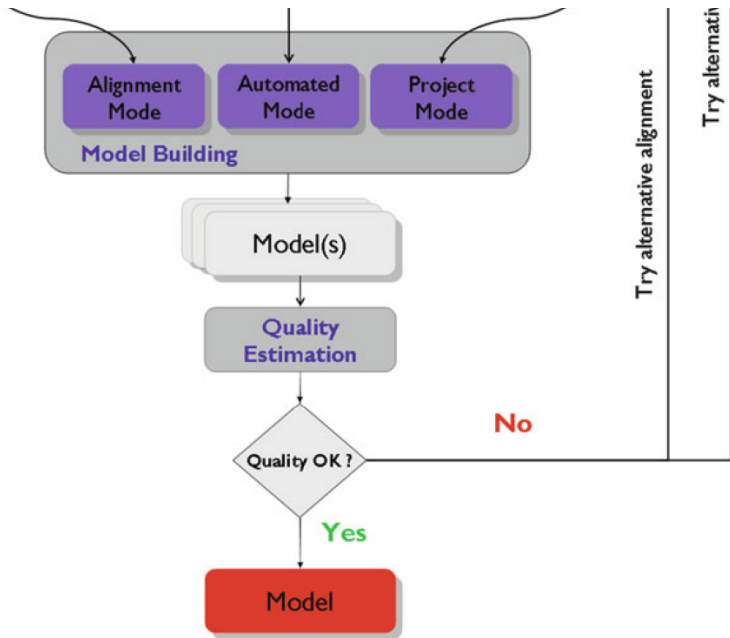
# SWISS-MODEL

<http://swissmodel.expasy.org/>

- Web-serveur automatisé pour la modélisation par homologie
- Existe depuis 20 ans
- Dernière version: SWISS-MODEL Workspace (2006)
- Accessible pour les non-experts en bioinfo
- Automatisation permet une meilleure reproductibilité









## Trois modes

En fonction de la distance évolutive, on choisit un des trois modes:

- 1 Automated: que besoin de la séquence de la cible, le génération du modèle par homologie est entièrement automatisé. Conseillé pour les cas simples (identité de séquence >60%)
- 2 Alignment: MSA corrigé manuellement doit être fournit. Conseillé pour des cas non-triviaux.
- 3 Project: L'alignement cible-template peut-être inspecté et modifié avec DeepView (= Swiss-Pdb Viewer)

# Outils

- 1 Annotation (séquence, structure, fonction):
  - InterProScan: Identification domaines, motifs, familles
  - PsiPred: Prédiction structure secondaire
  - DisoPred: Prédiction désordre (=> IUP)
  - MEMSAT: Prédiction ségments transmembranaires
- 2 Alignement:
  - BLAST, PSI-BLAST, HHsearch contre la SMTL: SWISS-MODEL Template Library
  - DeepView (=Swiss-Pdb Viewer) pour la correction manuelle
  - Fournit par l'utilisateur: MSA par outils extérieurs
- 3 Validation:
  - Précision/Exactitude locale: ANOLEA, QMEAN, Gromos
  - Qualité globale: DFire
  - Stéréochimie: Whatcheck, Procheck
  - Structure (super-)secondaires: DSSP, Promotif

# Logiciels graphiques locales

## Pour modélisation interactive

- **DeepView (=Swiss-Pdb Viewer):**  
<http://spdbv.vital-it.ch/>
- **MolIDE:** <http://dunbrack.fccc.edu/molide/>
- **MolIDE2 alias BioAssemblyModeler:**  
<http://dunbrack.fccc.edu/BAM/>
- **PyMod:**  
<http://schubert.bio.uniroma1.it/pymod/index.html>
- **D'autres interfaces MODELLER:**  
<http://salilab.org/modeller/wiki/Links>

# Protein Model Portal (PMP)

PSI | The Protein Model Portal

 YLWGFDTTRVAVQFPMILG  
 SDFSNDVFPFEADR  
 SWWWKRGGAVPIGIG

models menu

- [PMP home](#)
- [advanced search](#)
- [interactive modeling](#)
- [quality estimation](#)
- [Protein Modeling 101](#)
- [CAMEO](#)
- [news and events](#)
- [documentation](#)
- [related tools](#)
- [about PMP](#)
- [contact us](#)

psi sbkb menu

- [PSI SBKB home](#)
- [structural biology update](#)
- [targets hub](#)
- [protein structures, sequences, and function hub](#)

Welcome to the  
**Protein Model Portal (PMP)**

PMP gives access to various models computed by comparative modeling methods provided by different partner sites, and provides access to various interactive services for model building, and quality assessment.

Please enter your query.

Examples:  
[\[UniProt AC\]](#) [\[UniProt ID\]](#) [\[RefSeq\]](#) [\[IPI\]](#) [\[PDBID\]](#) [\[Sequence\]](#) [\[Free Text\]](#)

Access all of PMP

Interactive Modeling

**Need a model?**  
Submit your sequence to registered modeling servers and receive results by email

Quality Estimation

**Are you aware of possible errors in a model?**  
Estimate the model accuracy by submitting to registered quality estimation servers

Modeling highlights

**Improved molecular replacement by protein structure optimization.**  
DiMaio, et al. Nature. (2011) 473(7348):540-3

**All Articles**

1 2 3 4 5

Tutorials and Guides

**How reliable is a model?**  
[Introduction to homology modeling.](#)  
[PMP Tutorials \(video\)](#)  
[Ask an Expert!](#)

121

## Description

- But: Promouvoir l'utilisation efficace de modèles moléculaires en recherche biomédicale
- Combine la PDB + modèles 3D théoriques de plusieurs sources
- Interface pour générer des modèles 3D à partir de plusieurs serveurs en parallèle:  
ModWeb, M4T, SWISS-MODEL, I-TASSER, HHpred
- Validation en parallèle: ModEval, ModFOLD, QMEAN
- Tutoriel pour la modélisation par homologie (en anglais):  
<http://www.proteinmodelportal.org/?pid=101>  
Pas très détaillé, plus une collection de liens vers les outils ou banques

## 5 Bibliography



# Bibliography I

- Baltzis, Athanasios et al. (Sept. 2022). “Highly significant improvement of protein sequence alignments with AlphaFold2”. In: *Bioinformatics*, btac625.
- Carpentier, Mathilde and Jacques Chomilier (Oct. 2019). “Protein multiple alignments: sequence-based versus structure-based programs”. In: *Bioinformatics* 35.20, pp. 3970–3980.
- Deorowicz, Sebastian, Agnieszka Debudaj-Grabysz, and Adam Gudyś (Sept. 2016). “FAMSA: Fast and accurate multiple sequence alignment of huge protein families”. en. In: *Scientific Reports* 6.1. Number: 1 Publisher: Nature Publishing Group, p. 33964.
- MacCallum, Justin L. et al. (2011). “Assessment of protein structure refinement in CASP9”. en. In: *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics* 79.S10, pp. 74–90.
- Mirdita, M et al. (Sept. 2021). “Fast and sensitive taxonomic assignment to metagenomic contigs”. In: *Bioinformatics* 37.18, pp. 3029–3031.
- Mirdita, Milot, Konstantin Schütze, et al. (June 2022). “ColabFold: making protein folding accessible to all”. en. In: *Nature Methods* 19.6. Number: 6 Publisher: Nature Publishing Group, pp. 679–682.
- Mirdita, Milot, Martin Steinegger, and Johannes Söding (Aug. 2019). “MMseqs2 desktop and local web server app for fast, interactive sequence searches”. In: *Bioinformatics* 35.16, pp. 2856–2858.
- Schwede, Torsten (Sept. 2013). “Protein Modeling: What Happened to the “Protein Structure Gap”?” In: *Structure* 21.9, pp. 1531–1540.

# Bibliography II

- Steinegger, Martin and Johannes Söding (Nov. 2017). “MMseqs2 enables sensitive protein sequence searching for the analysis of massive data sets”. en. In: *Nature Biotechnology* 35.11. Number: 11 Publisher: Nature Publishing Group, pp. 1026–1028.
- Taly, Jean-Francois et al. (Nov. 2011). “Using the T-Coffee package to build multiple sequence alignments of protein, RNA, DNA sequences and 3D structures”. en. In: *Nature Protocols* 6.11, pp. 1669–1682.
- Warnow, Tandy (2021). “Revisiting Evaluation of Multiple Sequence Alignment Methods”. en. In: *Multiple Sequence Alignment: Methods and Protocols*. Ed. by Kazutaka Katoh. Methods in Molecular Biology. New York, NY: Springer US, pp. 299–317.