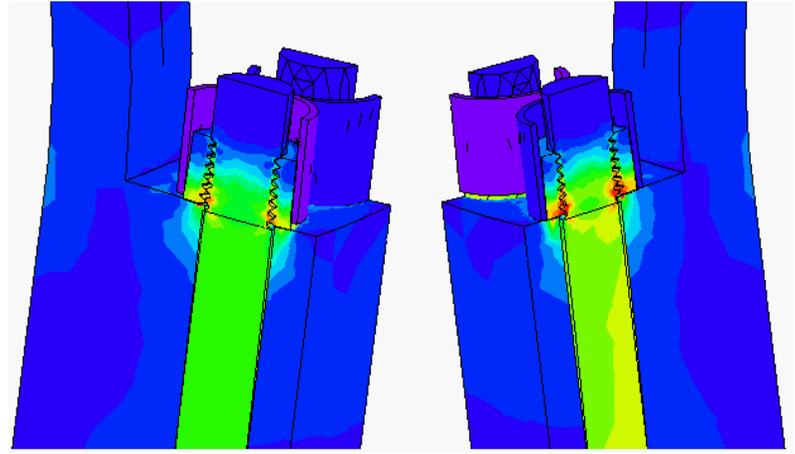
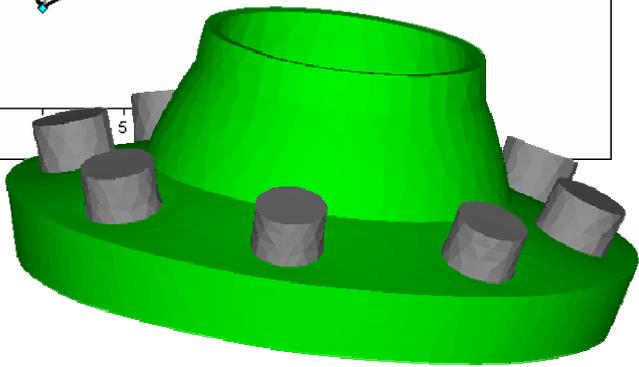
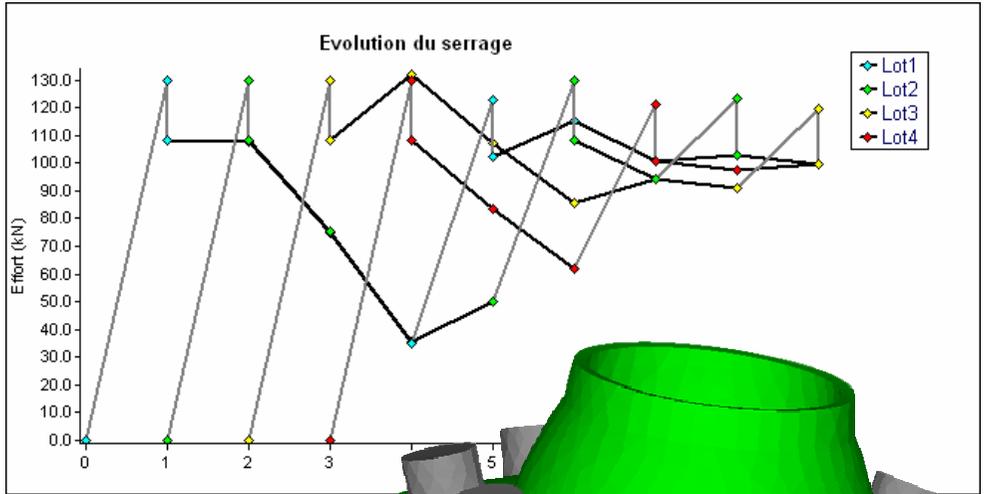
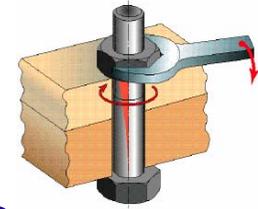


Optimisation du serrage des assemblages boulonnés



Contexte

Serrage des boulons bien souvent perçu comme une opération banale et secondaire dans la conception des équipements mécaniques.



Pourtant

Serrage, insuffisant, excessif ou hétérogène
⇒ **30 % des défaillances statiques**

Mauvaises conditions de serrage
⇒ **45 % des défaillances en fatigue**

Problématique générale

Nécessité de maîtriser l'opération de serrage elle-même, grâce à un outillage précis et fiable



?

Multiplicateur de couple



?

Tendeur mécanique

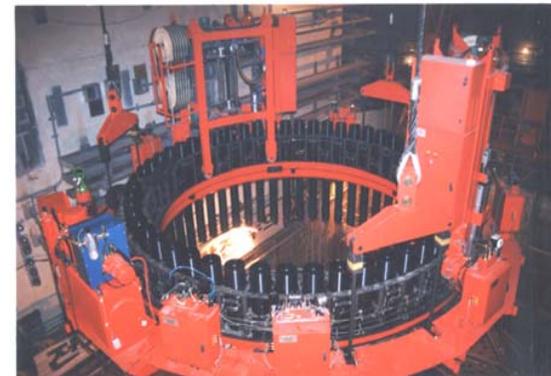


?

Tendeur hydraulique

Définition des Procédures de Serrage :

- Facile à mettre en œuvre
- Garantie d'un serrage homogène sur tous les boulons
- Minimum d'opérations



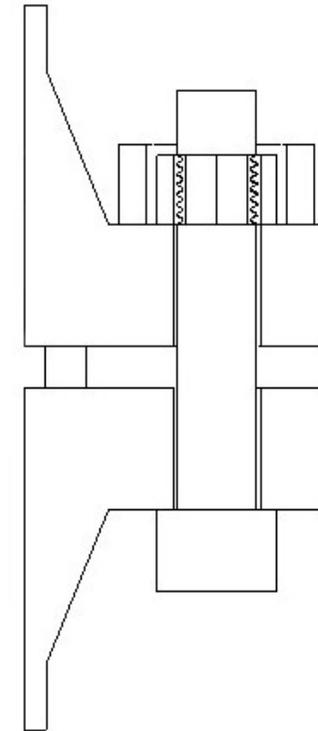
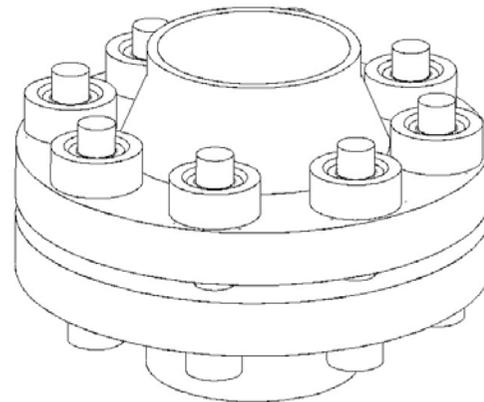
Problème étudié



Brides Pétrochimique

Caractéristiques

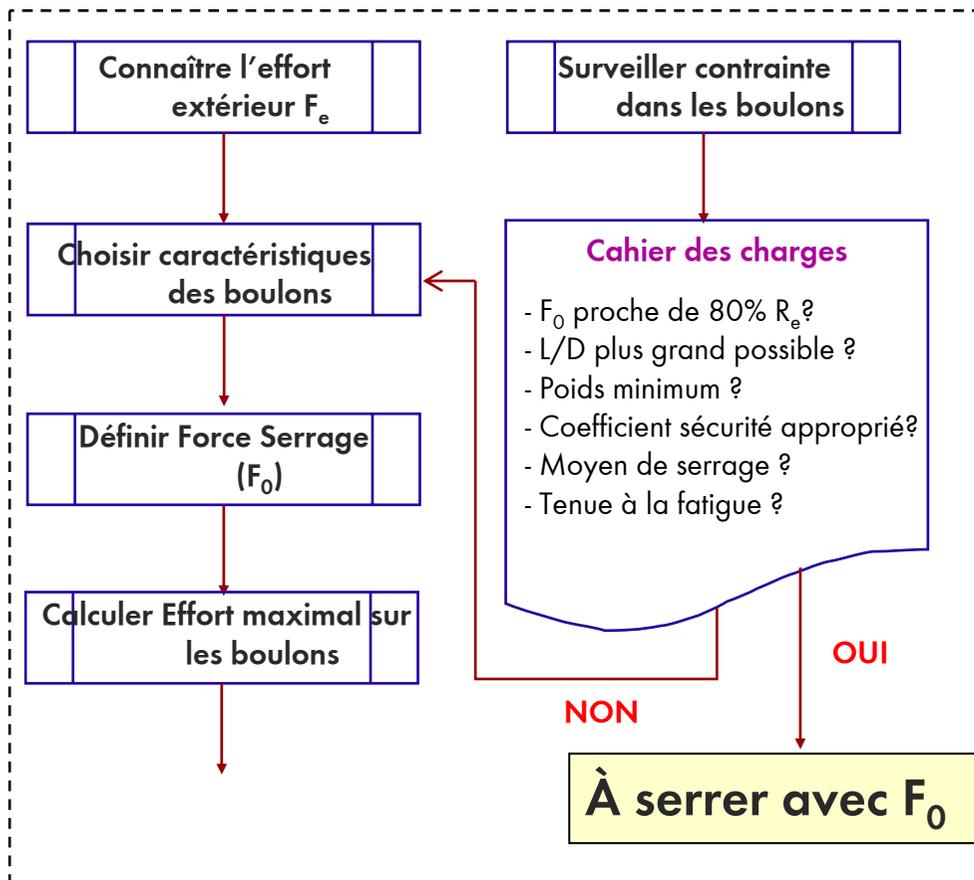
- 8 boulons (vis + écrou)
- Présence porte-à-faux (joint métallique)



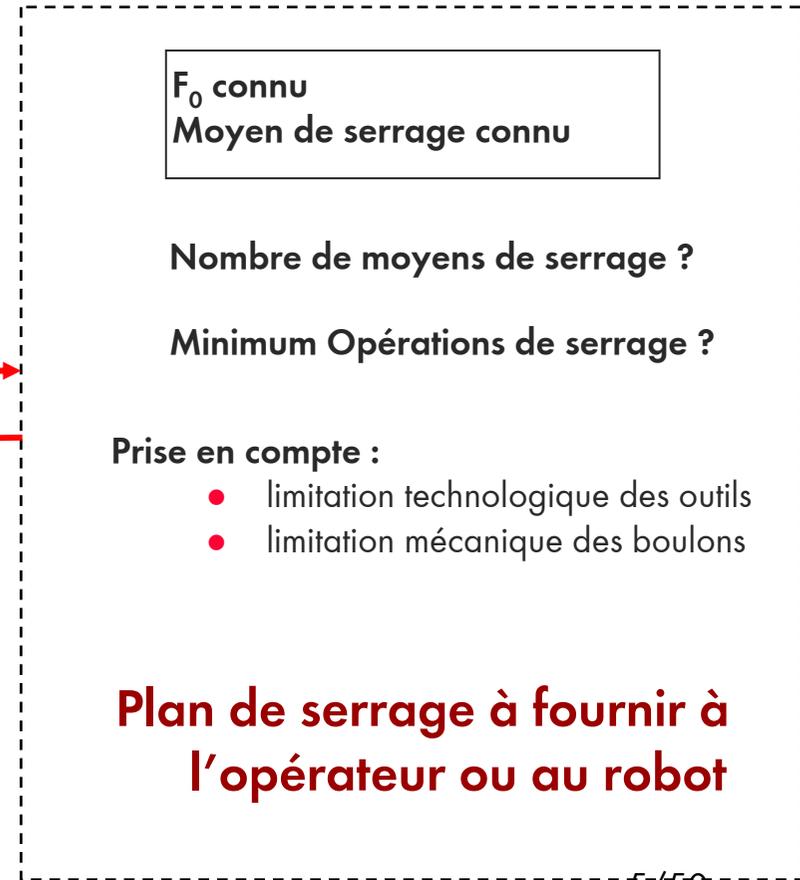
Même effort de serrage (F_0) sur tous les boulons !

Objectifs

1- Assemblage à concevoir



2- Assemblage conçu à serrer



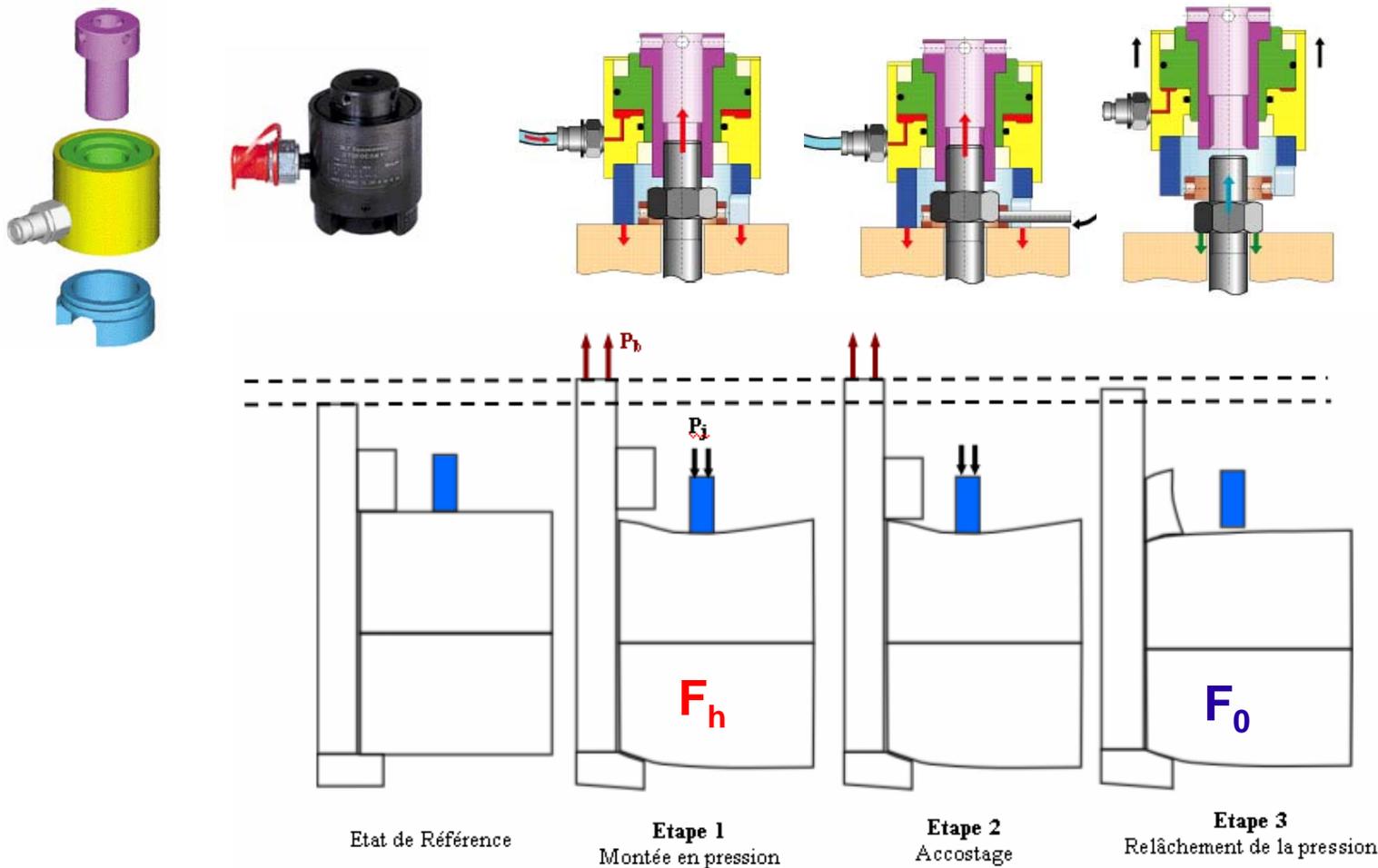
Périmètre de l'étude

- Assemblage supposé **conçu**
- Moyen de Serrage retenu : **Traction Hydraulique**
- Nombre de tendeurs imposé par le client = **Deux** (pour des considérations de coûts)
- Plan de serrage sera donné en termes d'efforts hydrauliques (F_h) à appliquer

Tendeur HYDROCAM



Principe traction hydraulique



Deux sous-problèmes

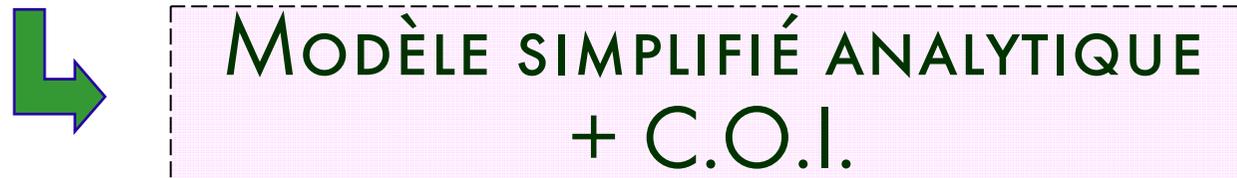
1- Au niveau d'un boulon



2- Au niveau de l'assemblage

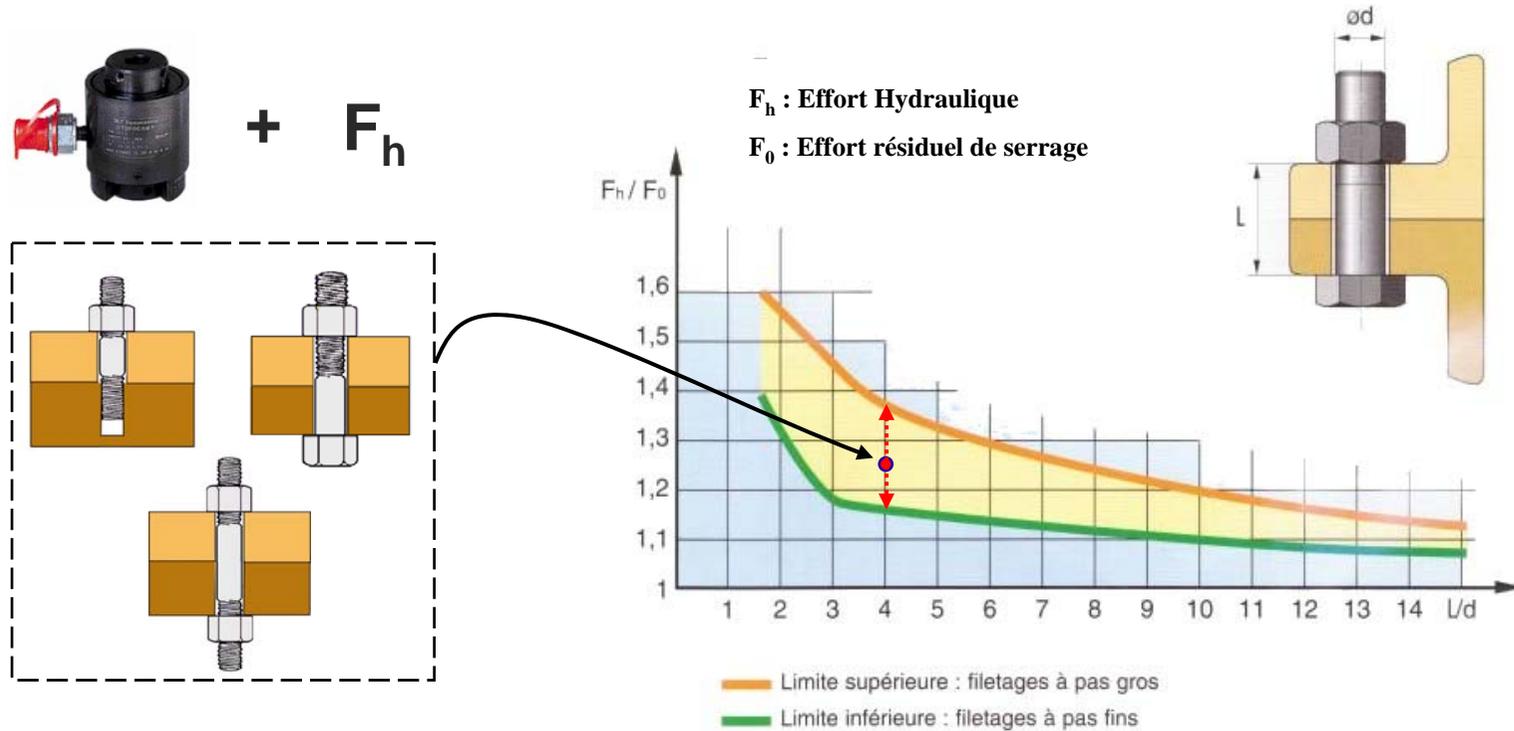
Quelle stratégie pour définir le plan de serrage optimal ?

i.e. Prise en compte des interactions entre les boulons



Description du problème Mono-Boulon

TROUVER LE RAPPORT F_H/F_0 LE PLUS PRÉCIS POSSIBLE



OPTIMISATION DU SERRAGE DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

Description Primitive

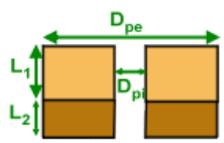
Problème Mono-Boulon

Définition des brides

Bibliothèques

Géométrie

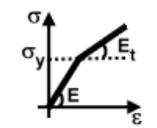
Les brides SUP et INF ont la même géométrie



D_{pe} (mm)	84.00
D_{pi} (mm)	14.560
L_1 (mm)	42.00
L_2 (mm)	42.00

Matériau

Les brides SUP et INF ont le même matériau



Ref. Utilisateur

E_{p1} (MPa)	200000
E_{p2} (MPa)	200000

Les brides sont supposées suivre un comportement purement élastique

OK Annuler

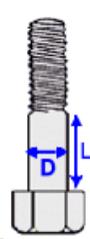
Définition de la visserie

Type Bibliothèques

Géométrie

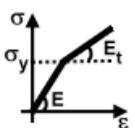
Ref. M20x2.5_ISO

D (mm)	20.00
Pas (mm)	2.500
L_{trf} (mm)	70.60



Matériau

Ref. 3 Acier c18.8 H127



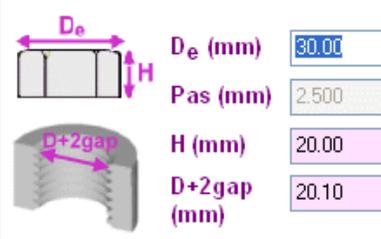
E_b (MPa)	210000
ν	0.300
E_{tb} (MPa)	1650.0
σ_{yb} (MPa)	640.0

Valider Annuler

Définition de l'écrou

Bibliothèques

Géométrie

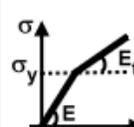


D_e (mm)	30.00
Pas (mm)	2.500
H (mm)	20.00
$D+2gap$ (mm)	20.10

gap

Matériau

Ref. Utilisateur

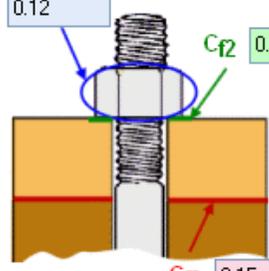


E_e (MPa)	200000
E_{te} (MPa)	1650.0
σ_{ye} (MPa)	640.0

OK Annuler

Autres paramètres

Coefficients de frottement



C_{f1}	0.12
C_{f2}	0.15
C_{f3}	0.15

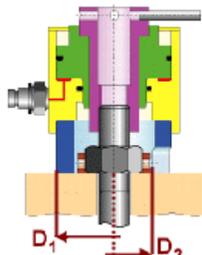
OK Annuler

Définition manuelle du tendeur

Non du tendeur

HTH R 567

D_1 (mm)	255.0
D_2 (mm)	217.0
S_h (cm ²)	567.0
P_{max} (MPa)	150.0



Valider Annuler

Construction Base de Données

Problème Mono-Boulon

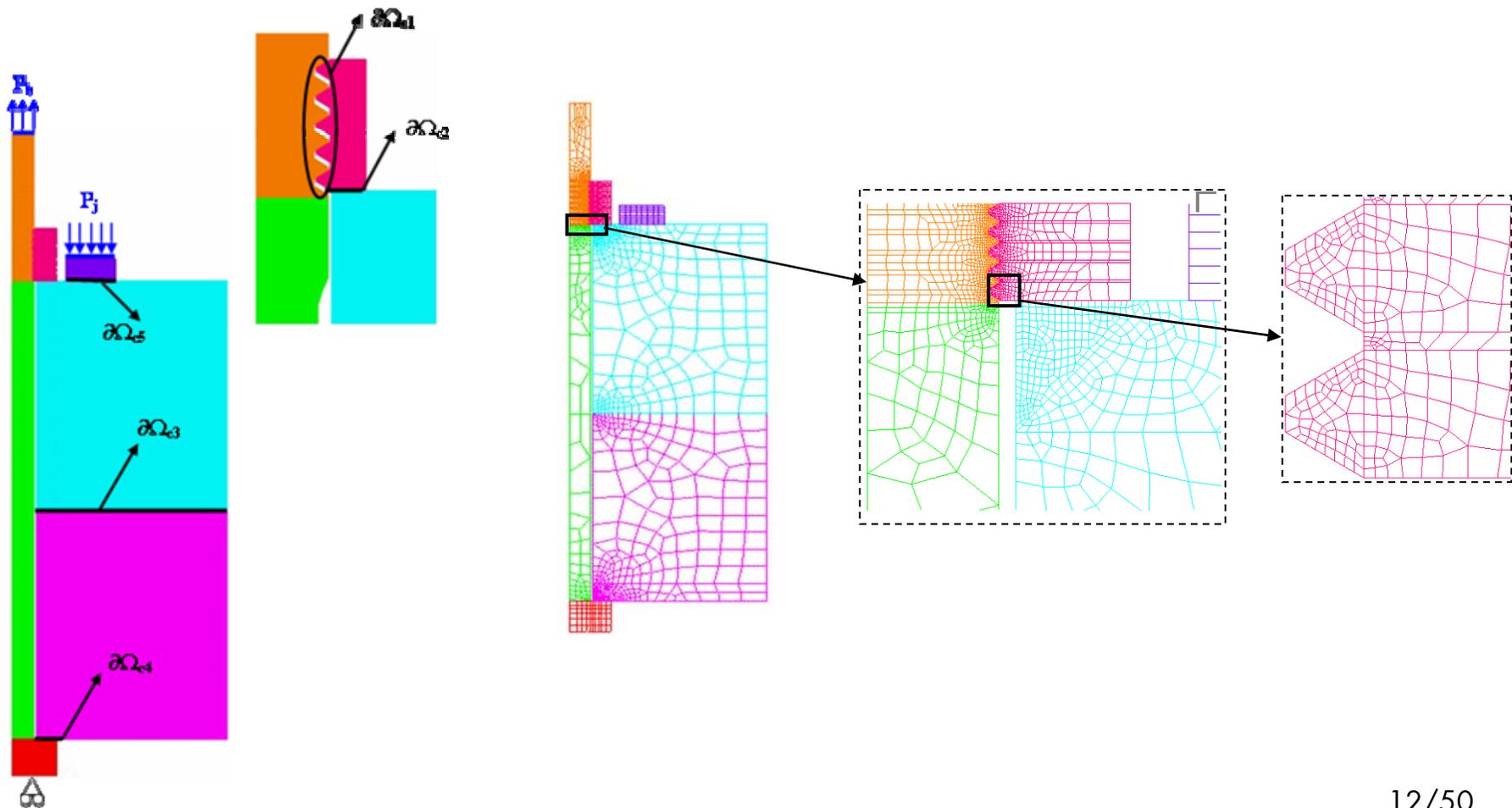
SIMULATIONS NUMÉRIQUES

$$F_h \xrightarrow{\text{Problème direct}} F_0 ?$$

- **Modèle Axisymétrique**
- **Elastoplasticité**
 - Écrouissage cinématique linéaire
- **Contacts/frottement**
- **Prise en compte du filetage**
- **Simulation du processus complet de serrage**
 - Phases de traction/acostage/relâchement de la pression
- **Simulation du double acostage**

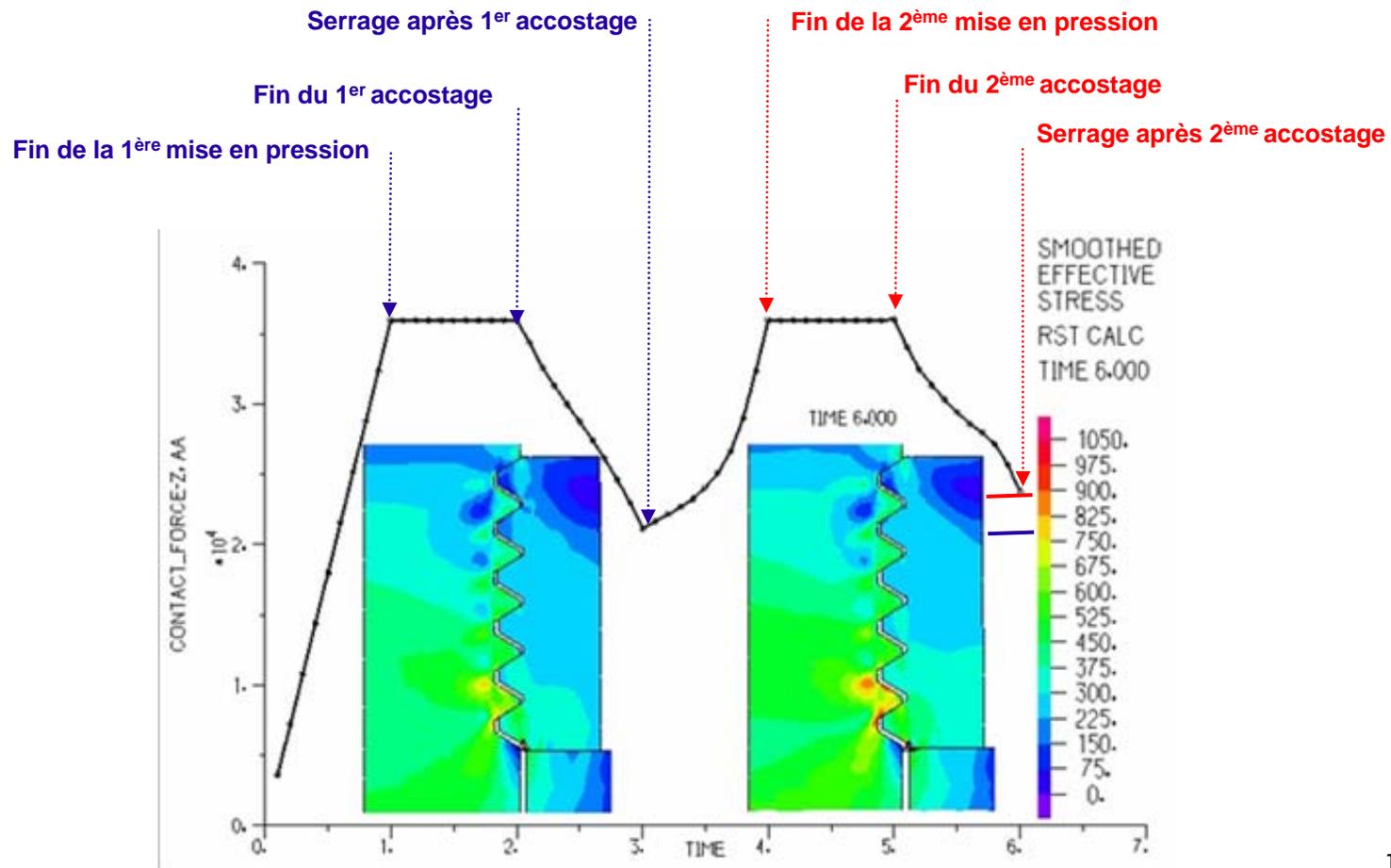
Construction de la BD

Problème Mono-Boulon



Construction de la BD

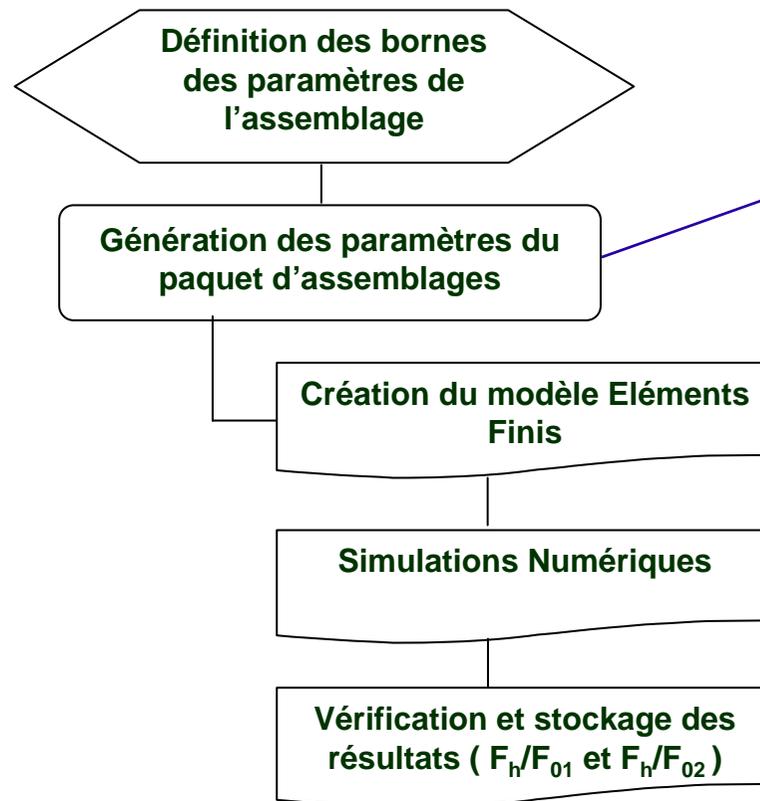
Problème Mono-Boulon



Construction de la BD

Problème Mono-Boulon

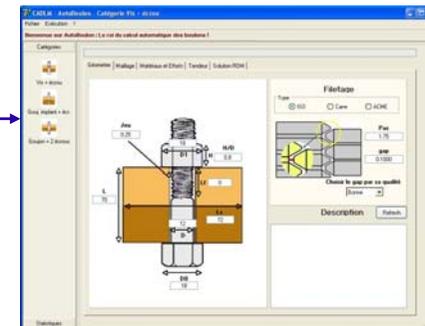
CHAÎNE DE CALCUL



480 cas dont:

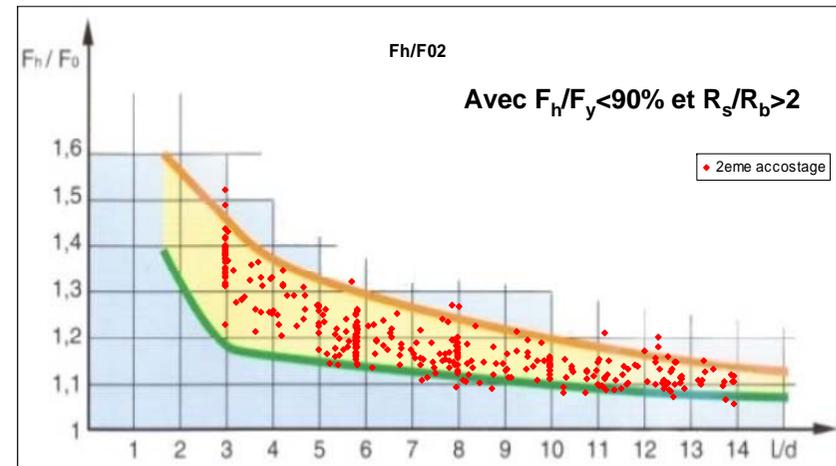
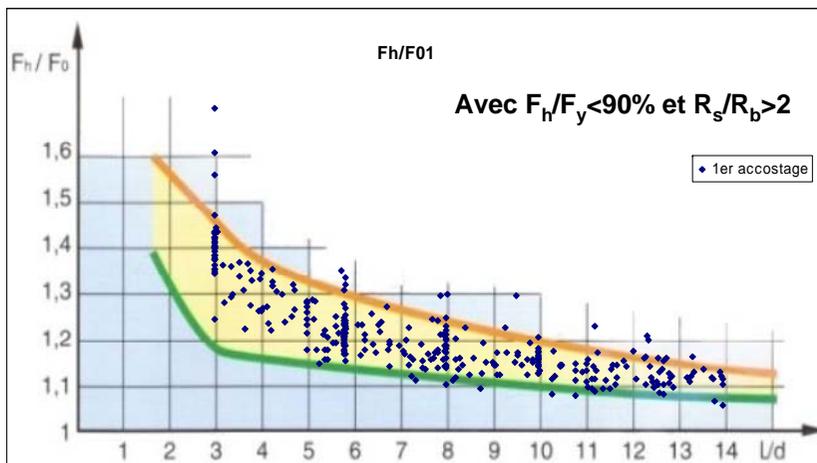
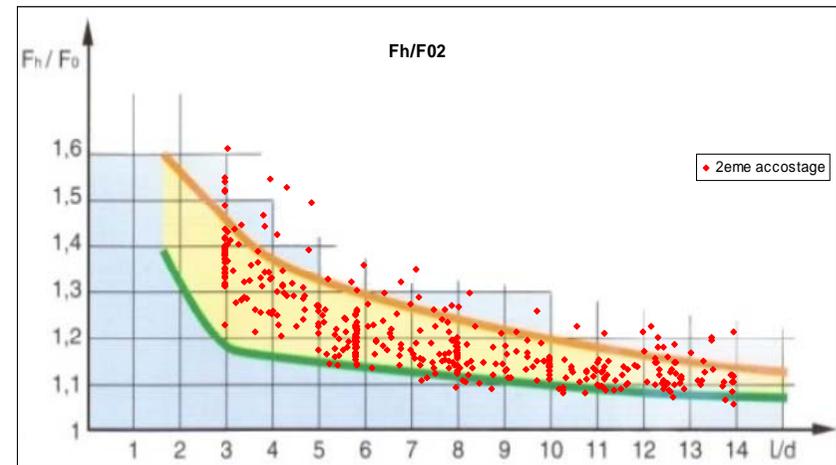
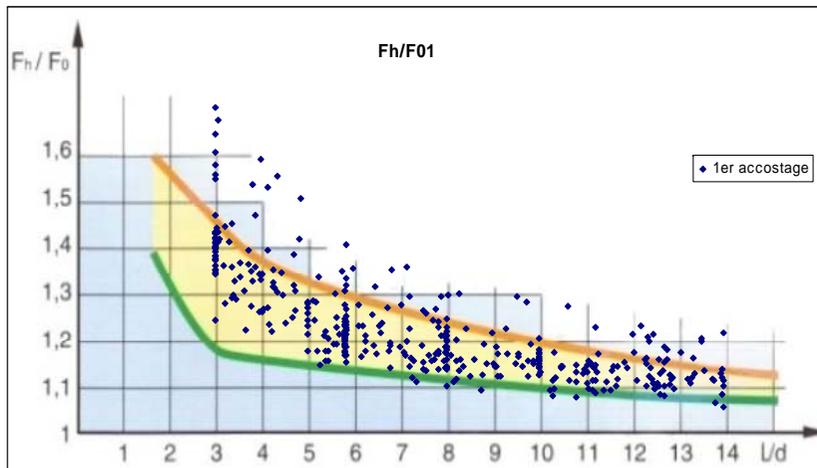
- 59 cas technologiques
- 12 cas frontières
- 409 cas aléatoires contrôlés

AutoBoulon



Construction de la BD

Problème Mono-Boulon



Description Intelligente

Problème Mono-Boulon

La description primitive est dans notre problème insuffisante pour prédire de manière fiable la réponse F_h/F_0

Il faut donc introduire de l'intelligence !

Descripteurs RDM de 1^{ère} Catégorie

Toute quantité qui a un sens physique, qui découle directement des connaissances des experts et qui ne représente pas une estimation directe de la réponse du problème.

Descripteurs RDM de 2^{ème} Catégorie

Fournissent une estimation directe de la réponse du problème. Ils peuvent être obtenus soit à partir de solutions analytiques simplifiées ou soit à partir d'un apprentissage automatique de la réponse d'un sous problème.

Descripteurs pseudo-intelligents

Quantités intermédiaires qui n'ont pas nécessairement de signification physique mais qui aident les générateurs de système expert dans la recherche des règles

Description Intelligente

Problème Mono-Boulon

Confidentiel

Id.	Desc.	Type	Min	Max
1	L/D	In/Prim	3.000	14.000
2	D _e /D	In/Prim	1.300	2.000
3	H/D	In/Prim	0.500	1.500
4	p/D	In/Prim	0.038	0.156
5	D _p /D	In/Prim	5.000	10.000
6	D ₁ /D	In/Prim	1.600	7.750
7	D ₂ /D	In/Prim	1.400	6.000
8	D _f /D	In/Prim	0.020	0.100
9	G _f /D	In/Prim	0.001	0.041
10	E _b /σ _{vb}	In/Prim	91.660	733
11	E _s /σ _{vb}	In/Prim	62.500	733
12	E _{tb} /σ _{vb}	In/Prim	0.8	73
13	E _{tc} /σ _{vb}	In/Prim	0.8	75
14	σ _{ve} /σ _{vb}	In/Prim	0.250	4.000
15	C _{f1}	In/Prim	0.050	0.350
16	C _{f2}	In/Prim	0.050	0.350
17	C _{f3}	In/Prim	0.050	0.350
18	F _k /F _{vb}	In/Prim	0.400	1.000

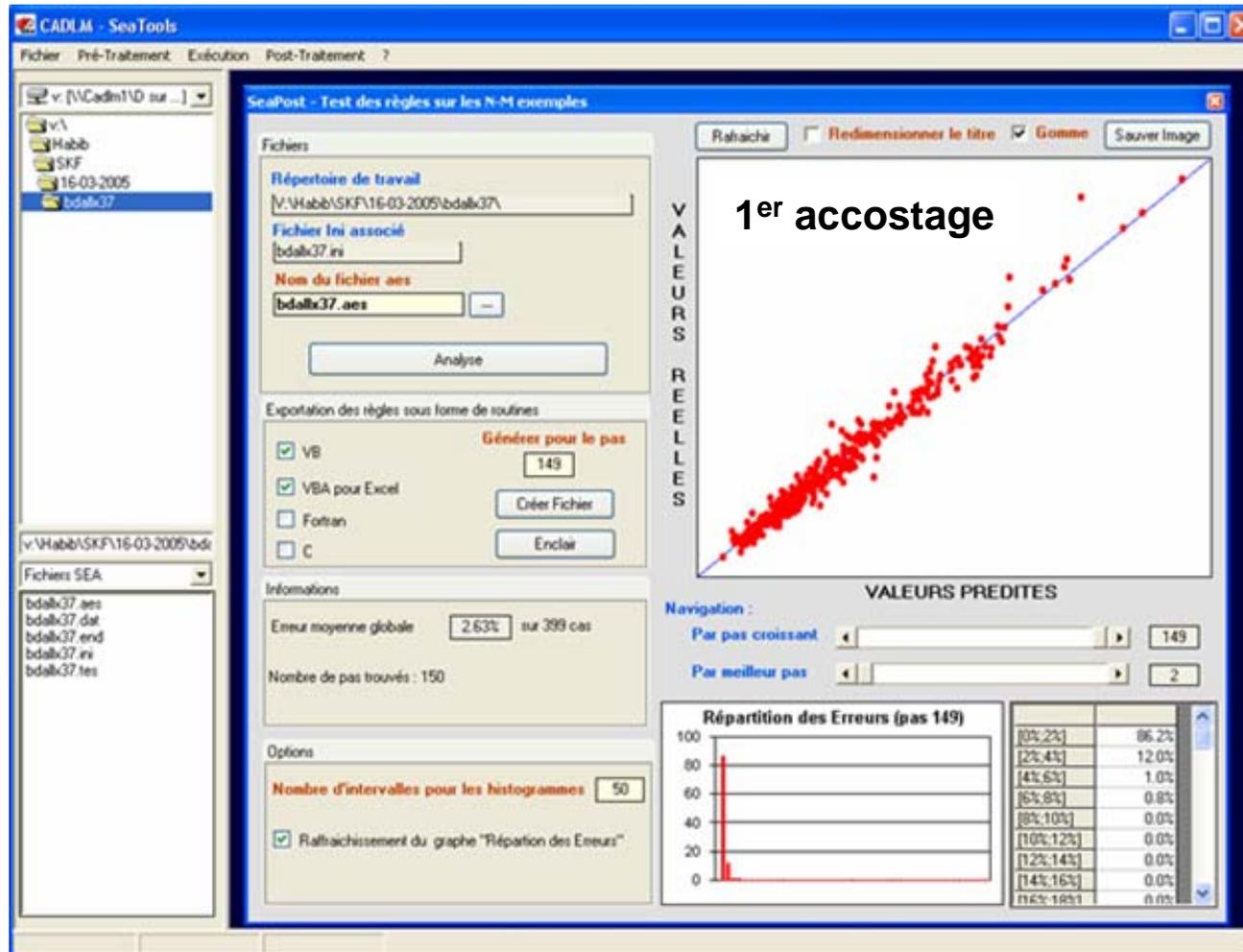
19	N _{dent}	In/Intel1	4.000	22.000
20	R _b /R _v	In/Intel1	5.795	191.985
21	R _t /R _v	In/Intel1	165.	1444
22	R _s /R _v	In/Intel1	30	791
23	R _i /R _v	In/Intel1	33	1161
24	R _e /R _v	In/Intel1	44.386	848
25	R _{bc} /R _v	In/Intel1	11	165
26	R _{ec} /R _v	In/Intel1	261	7594
27	R _v /R _v	In/Intel1	52.818	5472
28	R _{bt} /R _v	In/Intel1	332	12237
29	R _{et} /R _v	In/Intel1	303	34055
30	(F _k /F ₀) _{RdM}	In/Intel2	1.064	1.836
31	P ₂ /D	In/Intel3	0.038	0.256
32	R _{e2} /R _v	In/Intel3	35	848
33	(F _k /F ₀) _{RdM2}	In/Intel3	1.064	2.278
28	F ₀₁ /F _v	Out	0.290	0.908
29	F ₀₂ /F _v	Out	0.292	0.909
30	F _k /F ₀₁	Out	1.043	1.736
31	F _k /F ₀₂	Out	1.043	1.609

- In/Prim : Descripteur d'entrée primitif
- In/Intel1 : Descripteur intelligent de 1^{ère} catégorie
- In/Intel2 : Descripteur intelligent de 2^{ème} catégorie

- In/Intel3 : Descripteur de 3^{ème} catégorie
- Out : Descripteur de sortie

Apprentissage Automatique

Problème Mono-Boulon

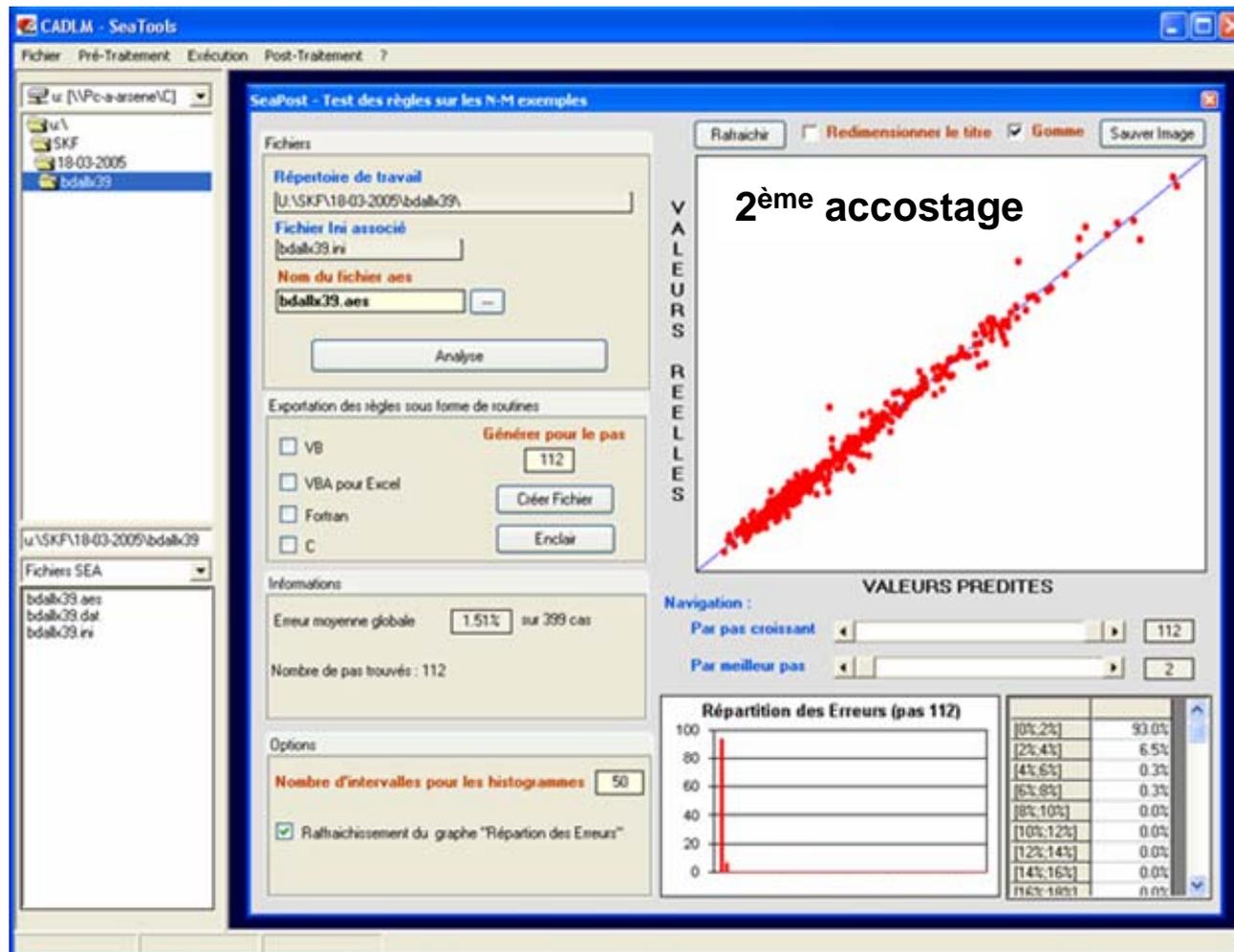


Confidentiel

Règles visibles sous forme de fonction informatique

Apprentissage Automatique

Problème Mono-Boulon

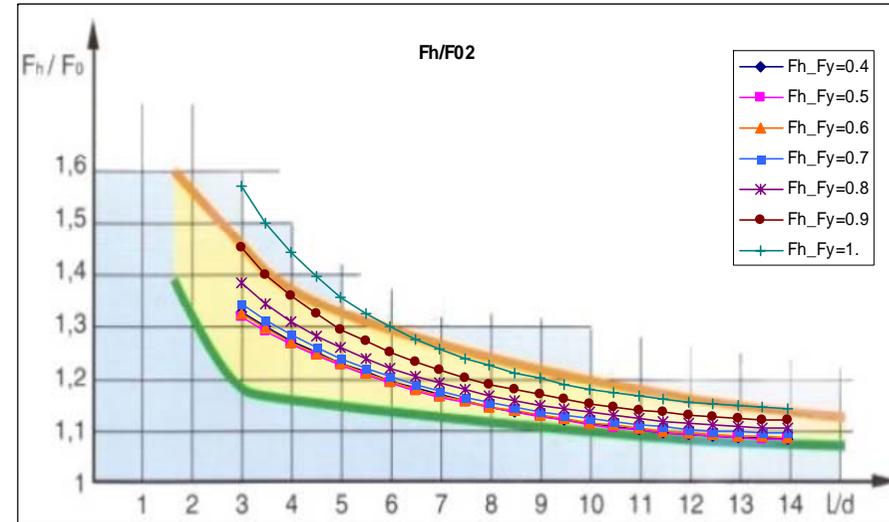
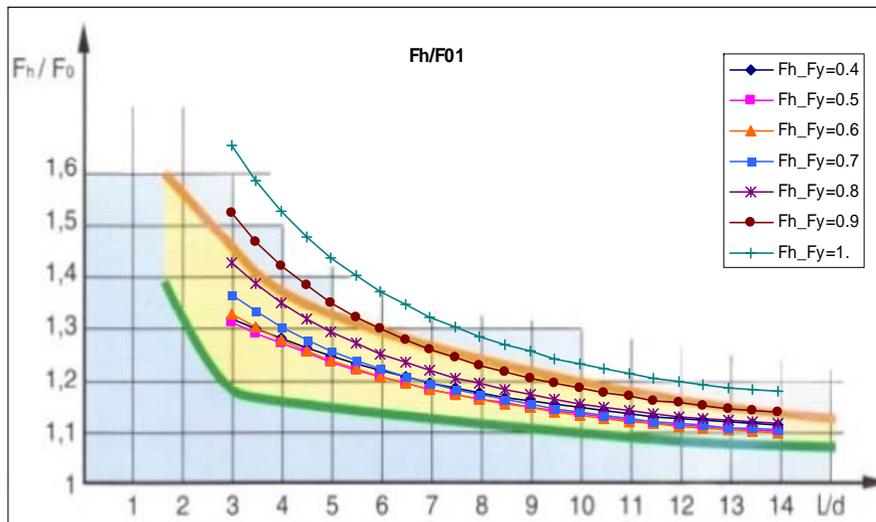


Confidentiel

Règles visibles sous forme de fonction informatique

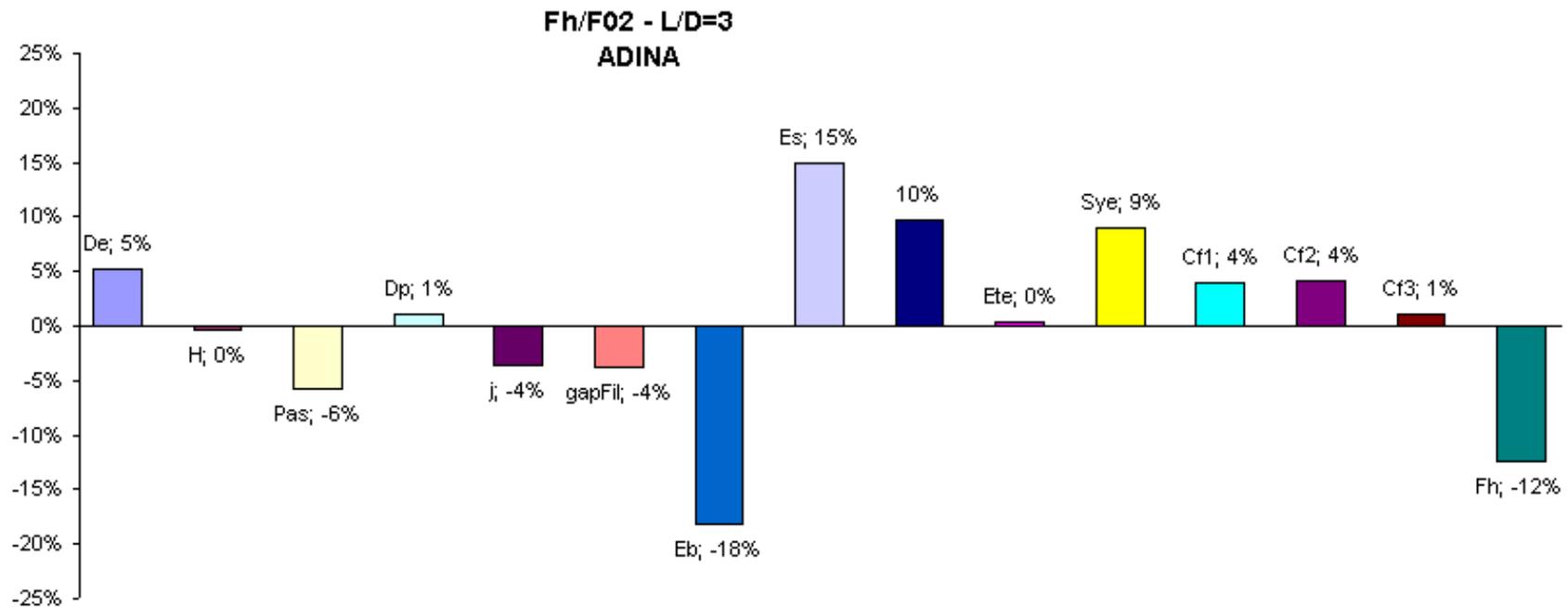
Analyse de sensibilité

Problème Mono-Boulon



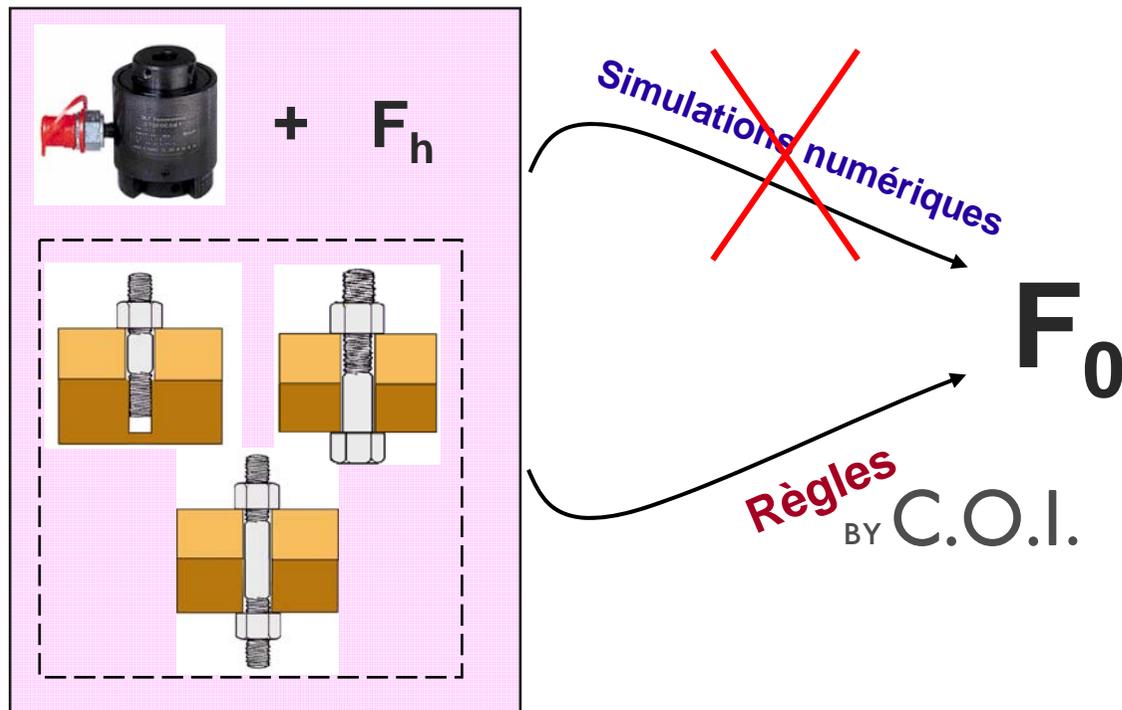
Analyse de sensibilité

Problème Mono-Boulon



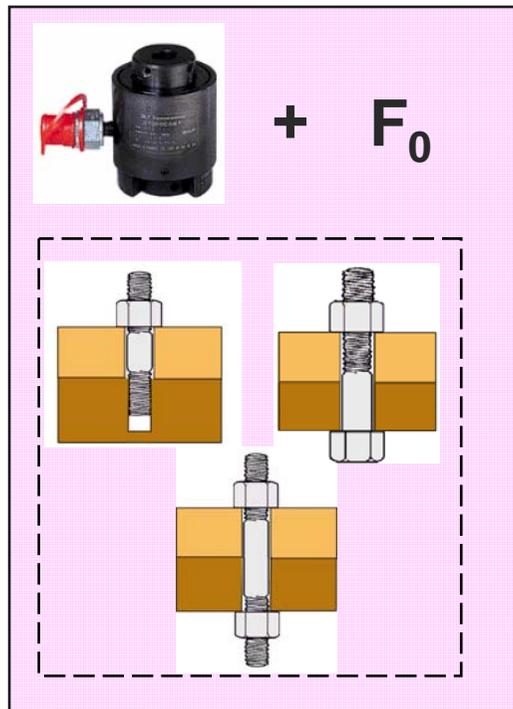
Problème Direct

Problème Mono-Boulon



Problème inverse

Problème Mono-Boulon



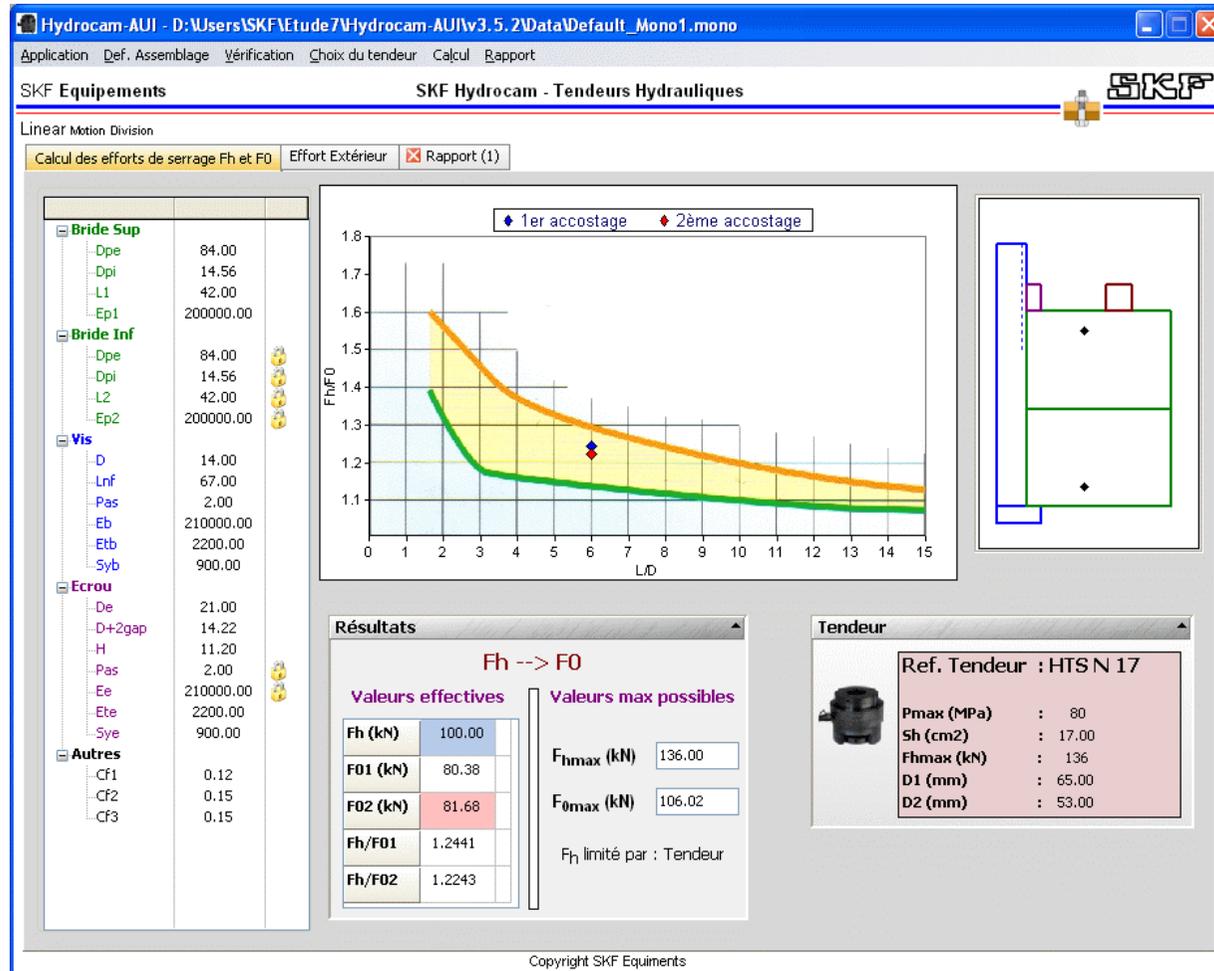
F_h

Utilisation d'algorithmes génétiques

⇒ Itérations sur des problèmes directs
(applications des règles)

Intégration dans Hydrocam-AUI

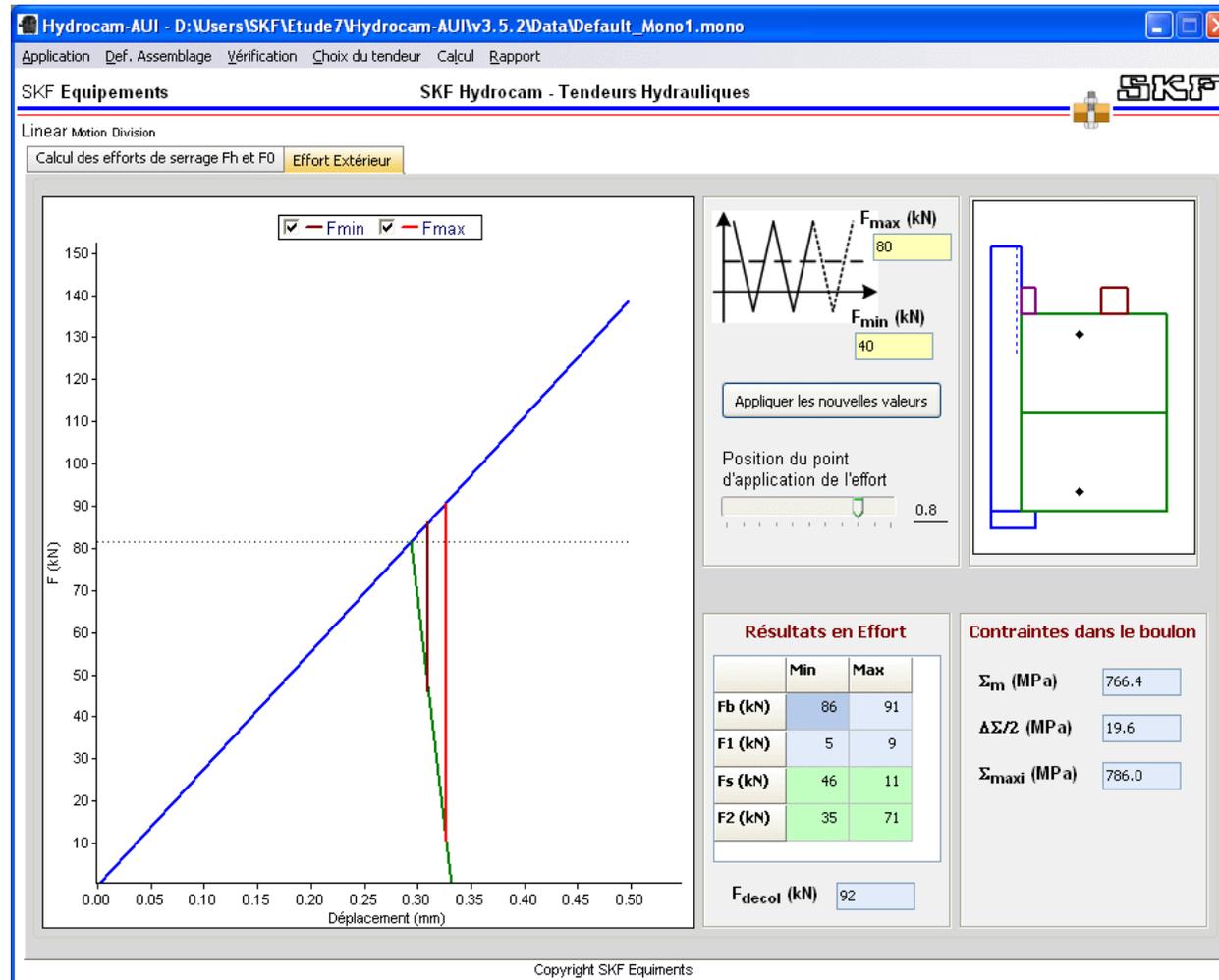
Problème Mono-Boulon



OPTIMISATION DU SERRAGE DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

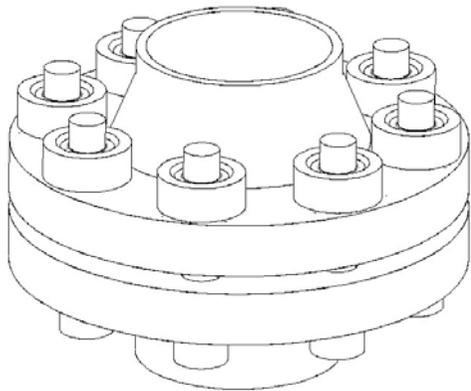
Intégration dans Hydrocam-AUI

Problème Mono-Boulon



Description du problème Multi-Boulons

Trouver le plan de serrage, en termes de F_n , conduisant à un serrage homogène F_0 sur tous les boulons en un minimum d'opérations.



RESTRICTION DU PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

- Le tendeur est choisi compatible avec les données géométriques de l'assemblage
- Le nombre de tendeurs est imposé
- Le scénario de serrage est imposé

Description du problème Multi-Boulons

TENDEURS

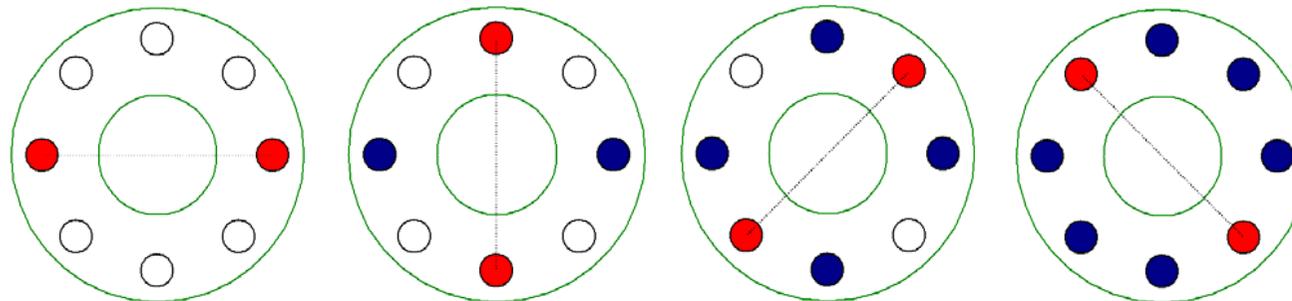
2 tendeurs Hydrocam



Tendeur	
Ref. Tendeur :	HTS 17
D1 (mm)	: 60.00
D2 (mm)	: 42.00
Fhmax (kN)	: 170
Sh (mm ²)	: 17.00

SCÉNARIO

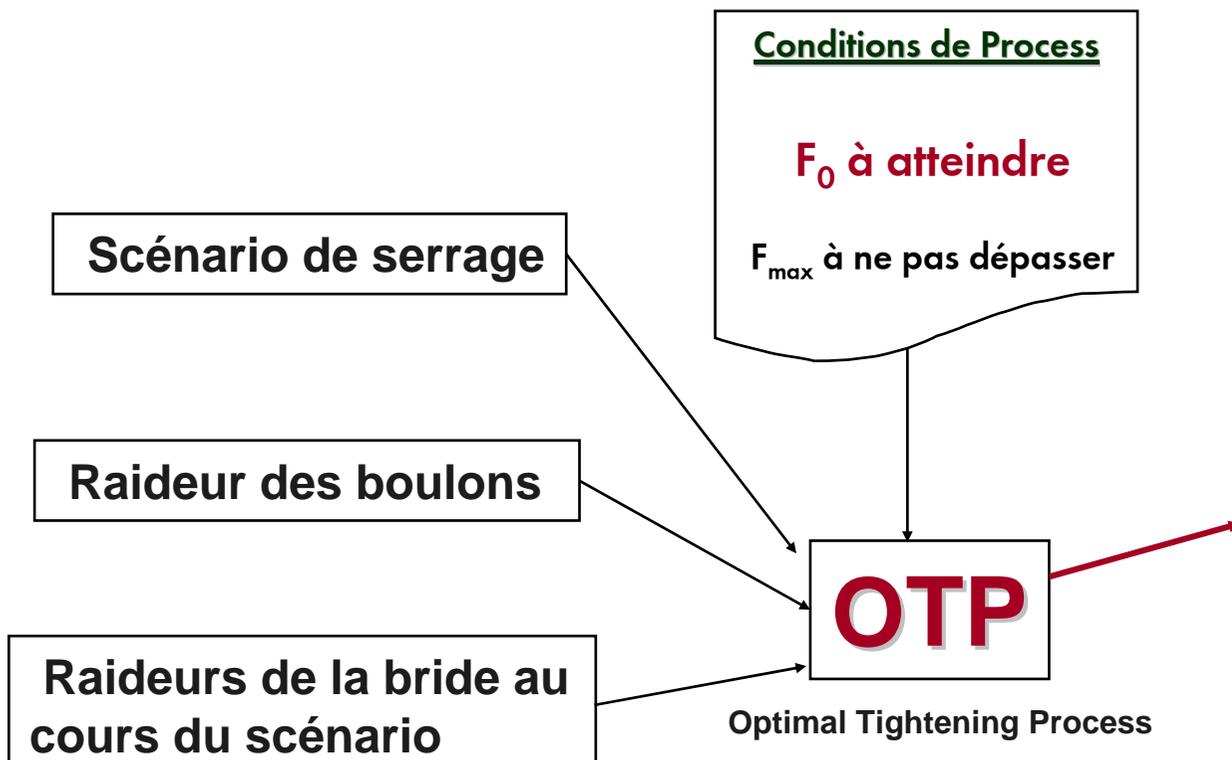
Scénario « traditionnel » - Bride ENIM – 2 tendeurs



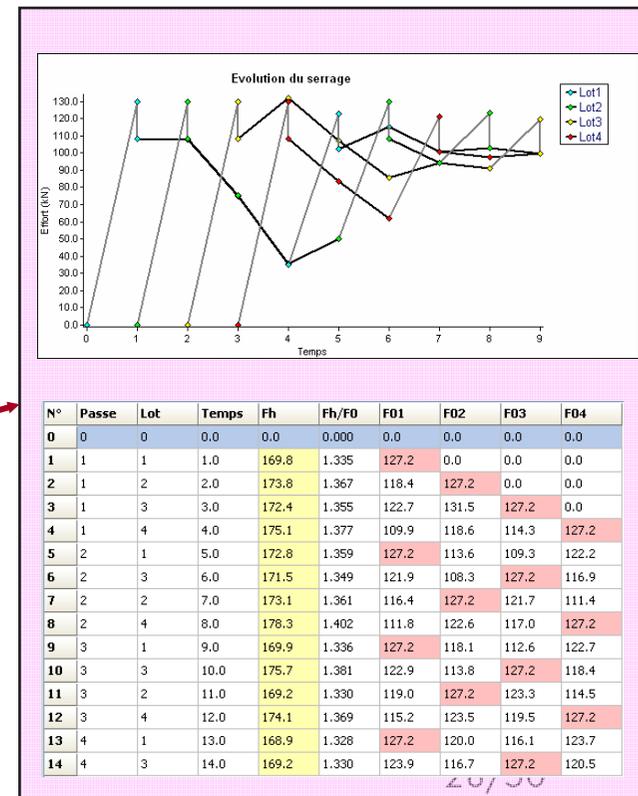
Modèle simplifié analytique sous-jacent

Problème Multi-Boulons

Confidentiel



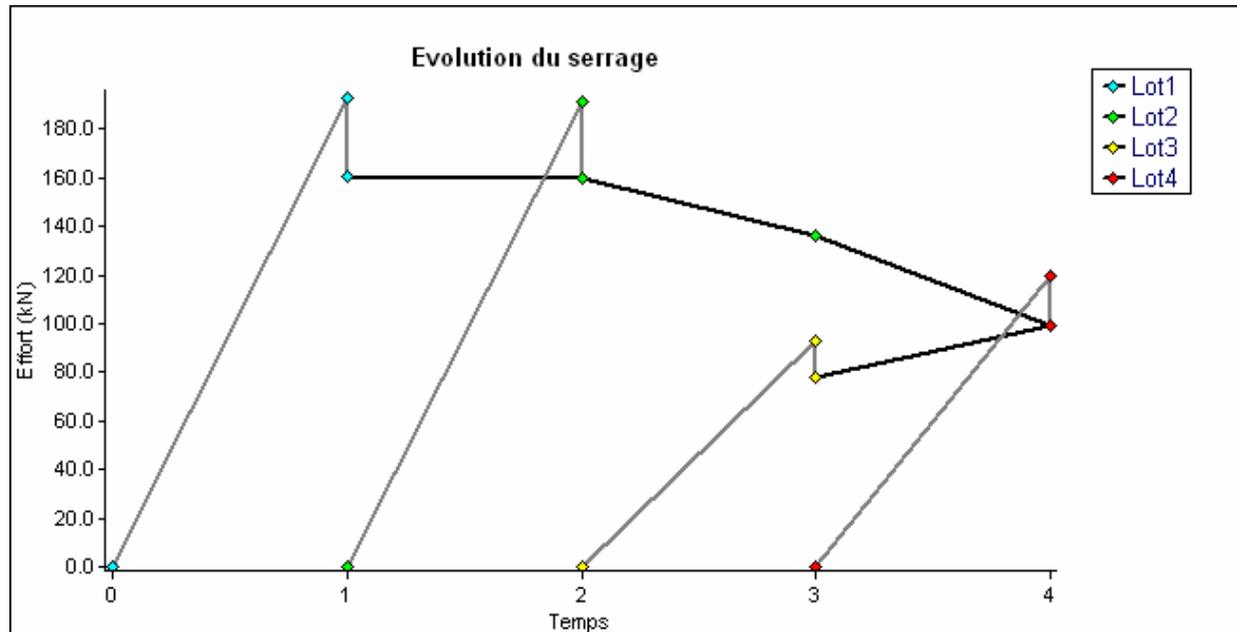
BY C.O.I.



OPTIMISATION DU SERRAGE DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

Solution en 1 passe

Problème Multi-Boulons



$F_0 = 100 \text{ kN}$ à atteindre

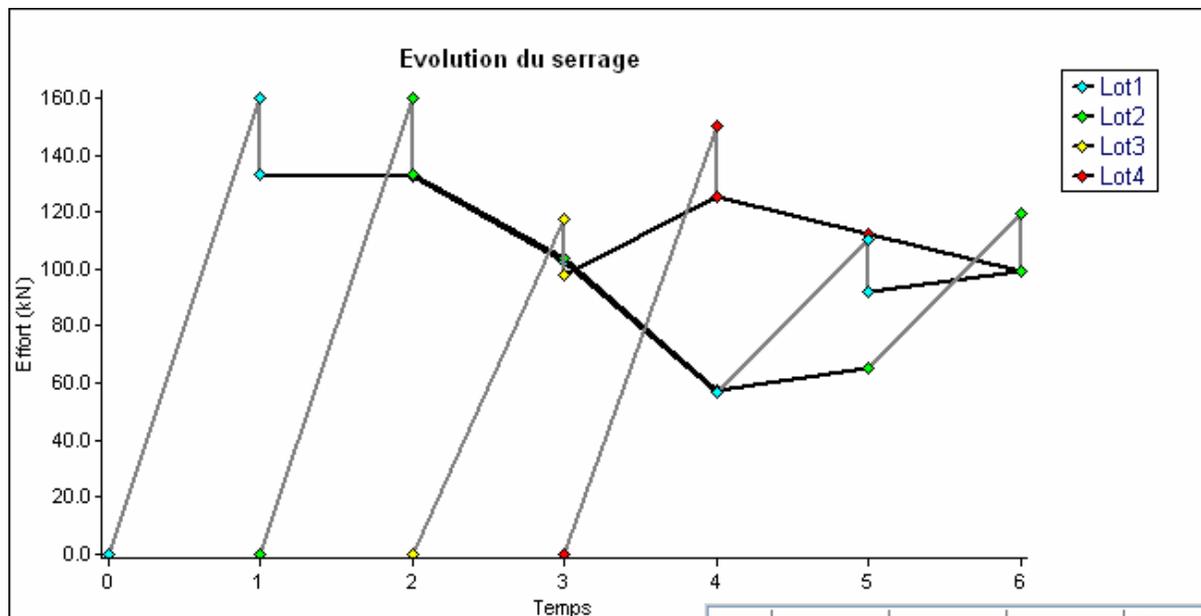
Aucune limitation sur l'effort max

N°	Passé	Lot	Temps	Fh	Fh/F0	F01	F02	F03	F04
0	0	0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	1	1.0	193.0	1.200	160.8	0.0	0.0	0.0
2	1	2	2.0	191.6	1.200	159.7	159.7	0.0	0.0
3	1	3	3.0	93.3	1.200	136.1	136.1	77.7	0.0
4	1	4	4.0	119.3	1.200	99.5	99.5	99.4	99.5

OPTIMISATION DU SERRAGE DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

Solution en plusieurs passes

Problème Multi-Boulons



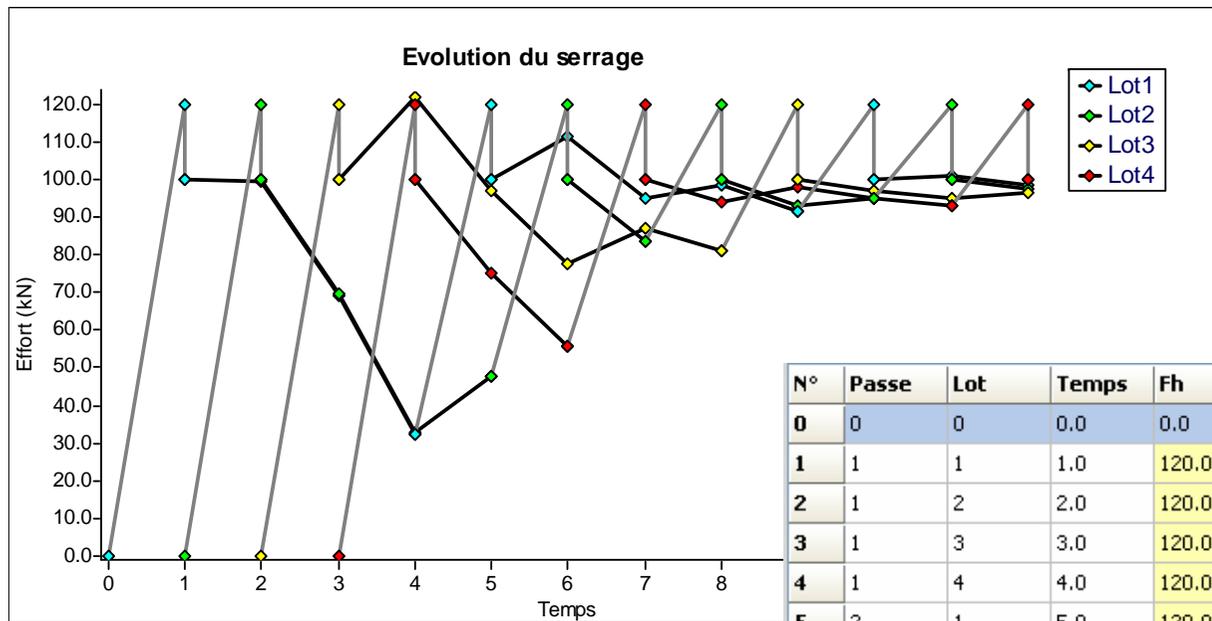
$F_0 = 100 \text{ kN}$ à atteindre

$F_{\max} = 160 \text{ kN}$ à ne pas dépasser

N°	Passe	Lot	Temps	Fh	Fh/F0	F01	F02	F03	F04
0	0	0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	1	1.0	160.0	1.200	133.3	0.0	0.0	0.0
2	1	2	2.0	160.0	1.200	132.4	133.3	0.0	0.0
3	1	3	3.0	117.4	1.200	102.7	103.7	97.8	0.0
4	1	4	4.0	150.2	1.200	56.6	57.5	125.1	125.2
5	2	1	5.0	110.4	1.200	92.0	65.2	112.1	112.1
6	2	2	6.0	119.4	1.200	99.5	99.5	99.4	99.5

Solution en plusieurs passes

Problème Multi-Boulons



$F_0 = 100 \text{ kN}$ à atteindre

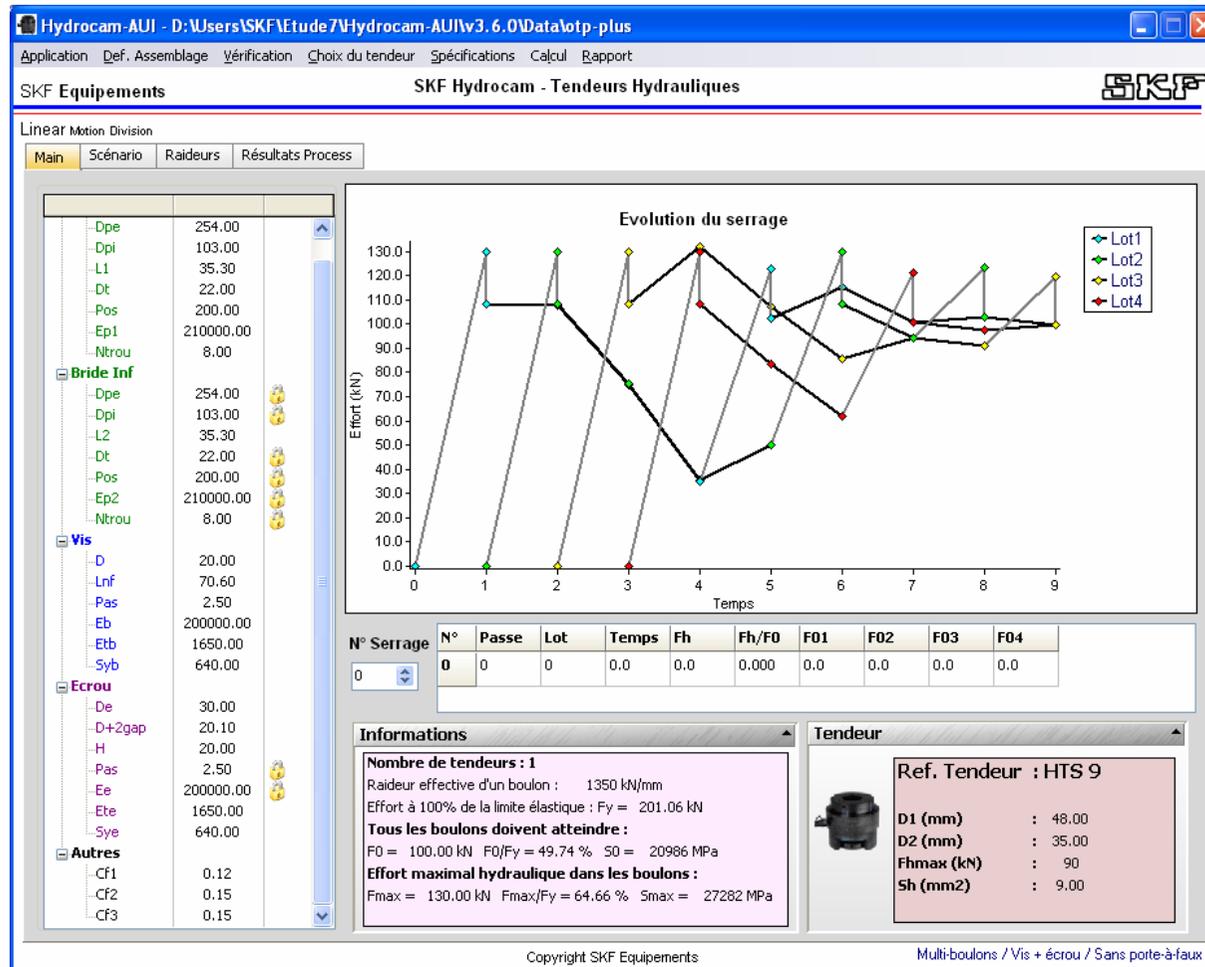
$F_{\max} = 120 \text{ kN}$ à ne pas dépasser

N°	Passe	Lot	Temps	Fh	Fh/F0	F01	F02	F03	F04
0	0	0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	1	1.0	120.0	1.200	100.0	0.0	0.0	0.0
2	1	2	2.0	120.0	1.200	99.3	100.0	0.0	0.0
3	1	3	3.0	120.0	1.200	69.0	69.7	100.0	0.0
4	1	4	4.0	120.0	1.200	32.1	32.8	121.8	100.0
5	2	1	5.0	120.0	1.200	100.0	47.6	96.8	75.0
6	2	2	6.0	120.0	1.200	111.4	100.0	77.5	55.7
7	2	4	7.0	120.0	1.200	95.1	83.7	87.1	100.0
8	3	2	8.0	120.0	1.200	98.6	100.0	81.1	94.0
9	3	3	9.0	120.0	1.200	91.7	93.0	100.0	98.1
10	3	1	10.0	120.0	1.200	100.0	94.8	96.9	95.0
11	4	2	11.0	120.0	1.200	101.1	100.0	95.0	93.1
12	4	4	12.0	120.0	1.200	98.6	97.5	96.5	100.0

OPTIMISATION DU SERRAGE DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS

Intégration dans Hydrocam-AUI

Problème Multi-Boulons



Perspectives

Extension du périmètre d'optimisation

Dans le cas d'un assemblage conçu

- Choix optimal du tendeur
- Choix optimal du nombre de tendeurs
- Choix optimal du scénario de serrage

Dans le cas d'un assemblage à concevoir

- Nombre optimal de boulons
- F_0 Optimal

Optimisation dès la phase de conception !

Bien d'autres Applications

- **En mécanique**
 - Construction de solutions exactes en élastoplasticité
 - Optimisation de forme des longerons au crash
 - Optimisation des composites tissés
 - Optimisation de forme des ressorts automobiles
- **Dans le médical**
- **Dans le bancaire**