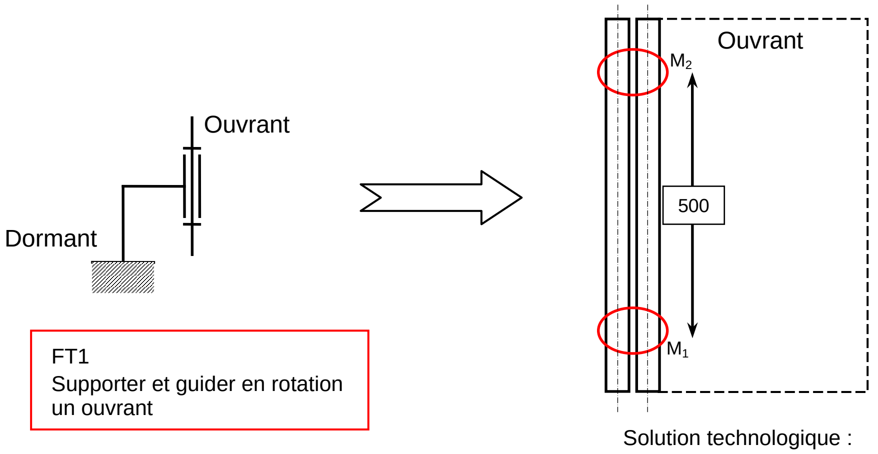
Tolérancement de la charnière

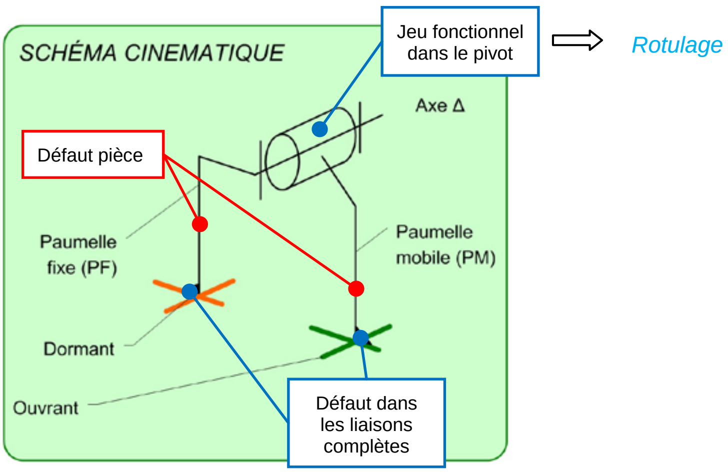
PROBLEME POSE

On revient dans un premier temps sur le problème technique à résoudre :



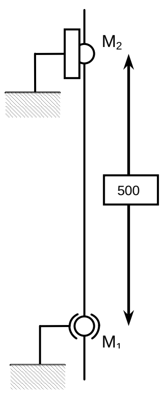
Solution technologique : Deux charnières, décrites actuellement par un schéma architectural détaillé

Pour chaque charnière, si on prend en compte les sources de défaut par rapport au schéma cinématique initial, on a :



On peut déjà observer que si les défauts des pièces sont incontournables, les défauts dus aux jeux créent des contacts connus – si les efforts de liaison sont connus – ou permettent des réglages, dans le cas des liaisons complètes lors du serrage. On exploitera ces éléments plus loin.

En imposant à ce stade d'étude d'avoir un rotulage suffisant dans les liaisons constituées par chaque charnière, on arrive au schéma ci-contre très classique - pour lequel la liaison rotule a été choisie arbitrairement en M1 :



Il résulte donc que, par rapport aux deux conditions fonctionnelles imposées, pour la liaison à créer :

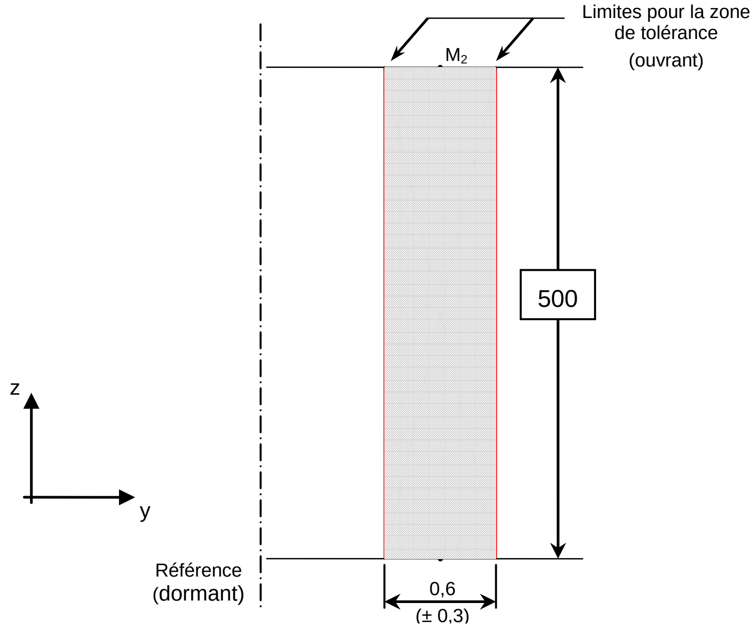
- tout rotulage des charnières, dû aux jeux internes ne crée pas de difficulté fonctionnelle ;
- tout défaut radial, dû aux mêmes jeux internes, aura une incidence directe, et donc est à limiter.

DEFINITION DES CONDITIONS FONCTIONNELLES AU NIVEAU DE CHAQUE CHARNIERE

Dans ce qui suit, on ne s'intéresse pas aux valeurs nominales. On ne considère que la dispersion.

Prenons pour exemple la condition 2 ± 0,3.

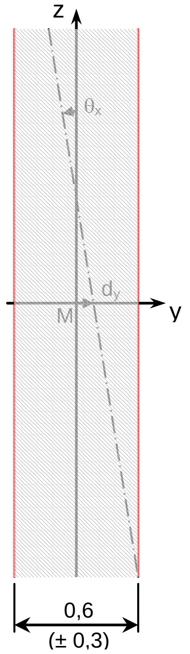
Sa traduction graphique simplifiée sera vue ainsi :



Pour les deux positions limite de la rainure de l'ouvrant, les conditions fonctionnelles imposent donc :

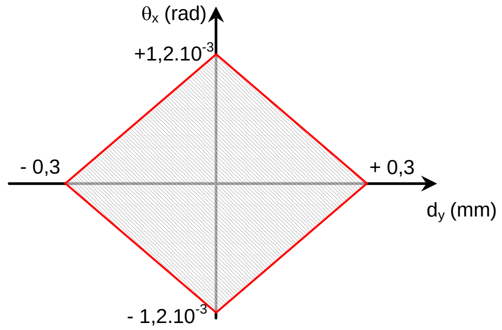
- un défaut de position maximal dy maxi = ± 0,3 pour un défaut d'orientation minimal $\theta x = 0$;
- un défaut de position minimal dy = 0 pour un défaut d'orientation maximal $\theta_{x\ maxi} = \pm \frac{0,6}{500} = \pm 1,2.10^{-3}$ rad ;

Toute autre combinaison est possible, par exemple :

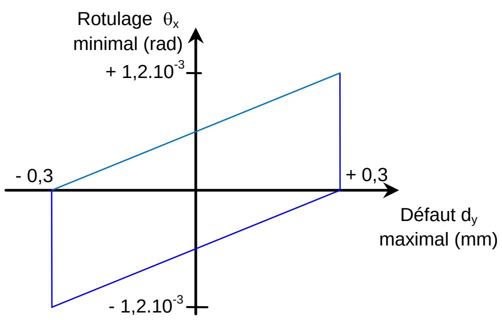


soit $d_y + \frac{500}{2}\,\theta_x = 0{,}3$

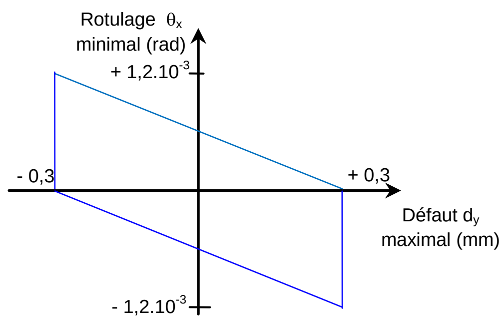
, ce qui permet une représentation graphique de la condition fonctionnelle au point M pour la liaison dormant – ouvrant :



Il en résulte deux conditions à réaliser pour les charnières :

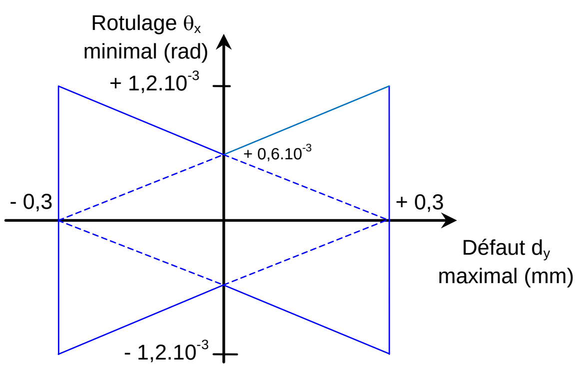


Charnière basse (condition en M1)



Charnière haute (condition en M2)

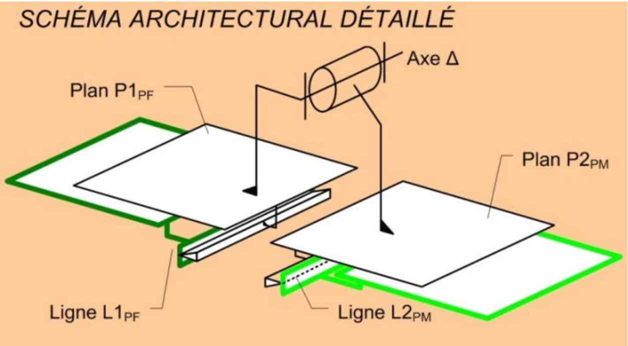
Comme une charnière doit pouvoir indifféremment s'installer en position haute ou basse, on se fixe donc comme objectif de vérifier la réunion des deux domaines, soit en chaque point Mi :



Pour simplifier, on cherchera donc à garantir pour une charnière un défaut dy maxi = ± 0,3 mm et un rotulage θx mini = ± $1{,}2.10^{-3}$ rad.

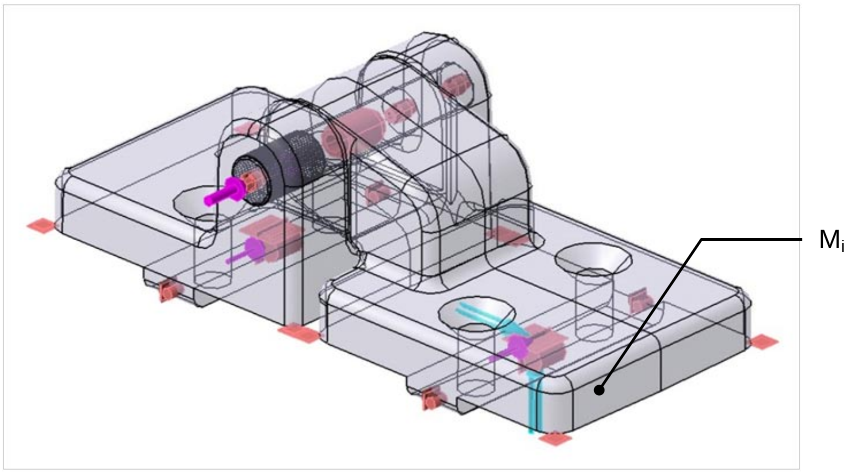
CONSTRUCTION D'UN MODELE D'ETUDE DU TOLERANCEMENT A L'AIDE DU LOGICIEL MECAMASTER

A son dernier niveau, le FAST a permis d'identifier les liaisons élémentaires à réaliser :

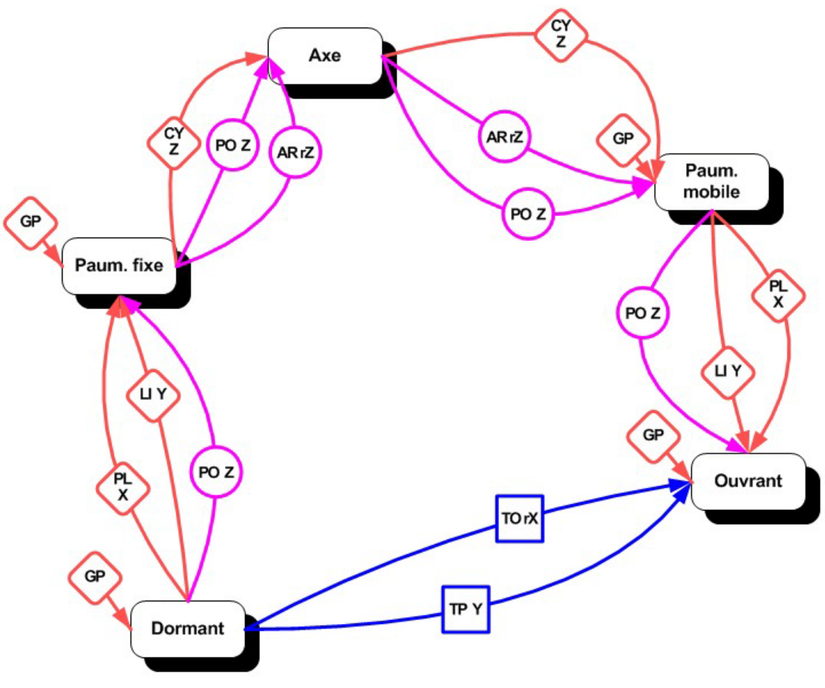


Le modèle d'étude sera construit à partir de cette description.

Pour mieux situer les liaisons, le modèle est bâti sur la définition CAO, mais à ce stade de l'étude, on pourrait parfaitement s'appuyer sur un squelette :



ce qui correspond à :

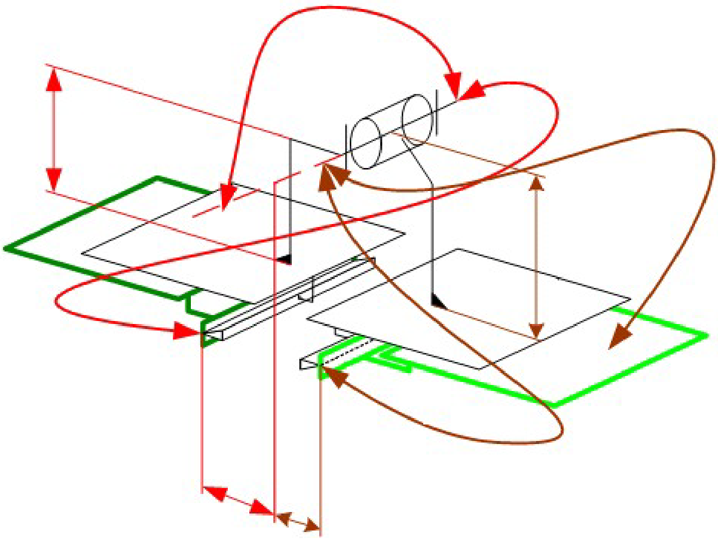


Notons que :

- toutes les liaisons du schéma architectural détaillé sont représentées. Le logiciel permet d'utiliser des fonctions de contact bien adaptées au problème (contact plan – plan PL, contact plan – ligne LI, contact cylindre – cylindre CY) ;
- l'axe a été ajouté, avec ses liaisons aux deux paumelles ;
- certaines liaisons ont été rajoutées (liaison ponctuelle et liaison arrêt en rotation, qui n'est pas normalisée), afin de supprimer des mobilités qui pourraient empêcher le calcul ultérieurement, suivant l'exploitation envisagée ;
- les points caractéristiques du modèle de calcul sont construits dans un même plan.

L'objectif étant de vérifier les valeurs de défaut dy et θz, deux « capteurs » sont créés entre les pièces ***Ouvrant*** et ***Dormant***, au point correspondant à Mi.

Enfin, l'étude de spécification avait fait apparaître certaines contraintes géométriques et dimensionnelles propres aux pièces (en rouge ou marron, sur le schéma suivant).



Ici on les a introduits donc dans des ***groupes***  associés au modèle.

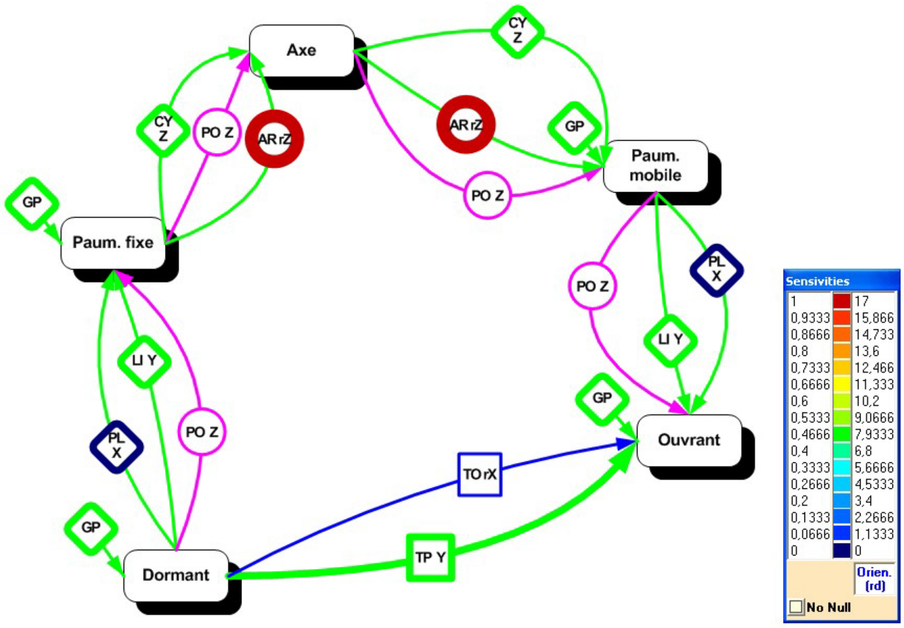
Les spécifications connues du dormant et de l'ouvrant sont indiquées de la même façon.

Cas du défaut linéaire dy

Dans un premier temps, on ne fait aucune distinction sur les types de défaut (liaison ou pièce).

L'exploitation du modèle de calcul montre évidemment ici que les liaisons interviennent à l'identique (l'influence est de 1 – voir aussi tableau page suivante -, et on aboutirait à la même chose en construisant une chaîne de cotes)[1]:

[1] On rappelle que les ponctuelles et arrêts en rotation sont hors étude.



On choisit alors des valeurs de tolérances :

- un jeu dans profilé – paumelle de 0,2 ± 0,2 (l'IT de la rainure est déjà de 0,3);
- un ajustement H9e9 pour la liaison pivot, dans la liaison axe – paumelle mobile ;
- pour les paumelles, des tolérances de 0,12 pour les positions (qualité ~ 11) et de 0,06 (qualité ~ 9) pour le parallélisme.

Un deuxième calcul permet de calculer la valeur de la condition fonctionnelle :

```
Pour la tolerance :
***  DONNEE numero   13  *** ------.---------.---------.---     -----
Tolerance de type .......... TOLERANCE EN POSITIO
      entre ................ dormant
      et ................... ouvrant
Nom de la tol. en position .
Point de determination .....    -10.628    63.914     -.098
Direction de la tolerance ..       .000     1.000      .000
Precisions  des  appuis. . . 0.1 0.1

(Unite de LONGUEUR: celle choisie,  Unite d'ANGLE: le RADIAN)


Valeur de la tolerance resultante:

ATTENTION !   Calcul realise pour des valeurs de tolerances independantes.
-----------
--|------- Noms -------|------ Pieces ------| Tolerance | Influence | Contribu
                        dormant                   .000 \
PL X                                              .000  x     .000  =     .000
                        paum. fixe                .000 /           trn     .0%
                         -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        dormant                   .000 \
                                                  .000  x  .075000  =     .000
                        paum. fixe                .000 /           ori     .0%
==============================================================================
   excentration  "+-"   . . interface . .      .100000  x    1.000  |  .100000

                        G dormant                 .000 \
LI Y                                              .000  x    1.000  =     .000
                        paum. fixe                .000 /           trn     .0%
                         -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        G dormant                 .000 \
                                               .100000  x    1.000  =  .100000
                        paum. fixe                .000 /           ori   14.6%
==============================================================================
                        G paum. fixe              .000 \
CY XY                                             .000  x    1.000  =     .000
                        axe                       .000 /           trn     .0%
                         -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        G paum. fixe              .000 \
                                                  .000  x    1.000  =     .000
                        axe                       .000 /           ori     .0%
==============================================================================
                        paum. fixe                .000 \
AR rZ                                             .000  x   17.000  =     .000
                        axe                       .000 /                   .0%
------------------------------------------------------------------------------
   excentration  "+-"   . . interface . .      .025000  x    1.000  |  .025000

                        axe                       .000 \
CY XY                                             .000  x    1.000  =     .000
                        G paum. mobile            .000 /           trn     .0%
                         -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        axe                       .000 \
                                               .015000  x    1.000  =  .015000
                        G paum. mobile            .000 /           ori    2.2%
==============================================================================
                        axe                       .000 \
AR rZ                                             .000  x   17.000  =     .000
                        paum. mobile              .000 /                   .0%
------------------------------------------------------------------------------
                        paum. mobile              .000 \
PL X                                              .000  x     .000  =     .000
                        ouvrant                   .000 /           trn     .0%
                         -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        paum. mobile              .000 \
                                                  .000  x  .076163  =     .000
                        ouvrant                   .000 /           ori     .0%
==============================================================================
   excentration  "+-"   . . interface . .      .100000  x    1.000  |  .100000

                        paum. mobile              .000 \
LI Y                                              .000  x    1.000  =     .000
                        G ouvrant                 .000 /           trn     .0%
                         -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        paum. mobile              .000 \
                                               .100000  x    1.000  =  .100000
                        G ouvrant                 .000 /           ori   14.6%
==============================================================================
                        dormant                .100000 \
TP Y                                                    x    1.000  =  .200000
                        ouvrant                .100000 /                 29.2%
------------------------------------------------------------------------------
                        paum. fixe             .030000  x    1.000  =  .030000
                                                                   trn    4.4%
GR Y  Tol. paumelle fixe    -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        paum. fixe             .030000  x    1.000  =  .030000
                                                                   ori    4.4%
==============================================================================
                        paum. mobile           .030000  x    1.000  =  .030000
                                                                   trn    4.4%
GR Y  Tol. paumelle mobile     -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        paum. mobile           .030000  x    1.000  =  .030000
                                                                   ori    4.4%
==============================================================================
                        dormant                .074125  x    1.000  =  .074125
                                                                   trn   10.8%
GR Y  Tolerance dormant  -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        dormant                .000875  x 1.000000  =  .000875
                                                                   ori     .1%
==============================================================================
                        ouvrant                .074125  x    1.000  =  .074125
                                                                   trn   10.8%
GR Y  Tolérance ouvrant  -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        ouvrant                .000875  x    1.000  =  .000875
                                                                   ori     .1%
==============================================================================
------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante              Valeur de l'excent. "+-" |  .225000

Calcul ARITHMETIQUE (infl non nulles)       Valeur de la tolerance   =  .685000

/ Pour les liaisons          \   / Part due aux defauts des pieces   =  .470000
\ exclusivement en position /   \ Part   due   aux   interfaces     =  .215000


Valeur de la tolerance resultante:

ATTENTION !   Calcul statistique pour donnees statist. independantes (Gauss)
-----------   N'utiliser les valeurs avec !!! qu'en connaissance de causes.
                             ---------------------------------------------
    Valeur de la tolerance:     |Probabilite d'obtention des tolerances fixees|
       1 des 9 valeurs.         |    0.9544         0.9973         0.9999     |
------------------------------------------------------------------------------
Probabilite d'obtention 0.9544 |    .209290    |    .139527!!!|    .104645!!! |
souhaitee de la         0.9973 |    .313935    |    .209290   |    .156967!!! |
tolerance resultante    0.9999 |    .418580    |    .279053   |    .209290    |
------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante            Valeur de l'excent. "+-"   |  .225000

Calcul STATISTIQUE.                   Valeur courante de la tolerance   =  .209290
```

valeur associée à l'indétermination des contacts dans les jeux

Au pire cas, le défaut de position vaut ± (0,225 ± 0,685) mm, ce qui est très éloigné de la condition imposée. Du fait de la simplicité de ce problème et au vu des valeurs des tolérances des profilés, le résultat était prévisible !

On peut diminuer l'incertitude en réalisant un réglage au montage, lors du serrage des paumelles sur les profilés (dans le logiciel, on réalise un traitement particulier pour les défauts des contacts plan – ligne). On obtient cette fois ± ((0,025 + 0,4) ± 0,485) – le 0,4 étant associé au réglage maximal possible - et on constate bien sûr que la valeur est encore trop grande :

```
                         ouvrant                    .074125   x     1.000   =  .074125
                                                                          trn    15.3%
GR Y   Tolérance ouvrant   -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                         ouvrant                    .000875   x     1.000   =  .000875
                                                                          ori      .2%
==============================================================================
------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante            Valeur de l'excent. "+-" |  .425000

Calcul ARITHMETIQUE (infl non nulles)     Valeur de la tolerance    =  .485000

/ Pour les liaisons         \   / Part due aux defauts des pieces   =  .470000
\ exclusivement en position /   \ Part   due   aux   interfaces     =  .015000


Valeur de la tolerance resultante:

ATTENTION !   Calcul statistique pour donnees statist. independantes (Gauss)
-----------   N'utiliser les valeurs avec !!! qu'en connaissance de causes.
                              ------------------------------------------------
    Valeur de la tolerance:     |Probabilite d'obtention des tolerances fixees|
       1 des 9 valeurs.         |    0.9544        0.9973        0.9999       |
------------------------------------------------------------------------------
Probabilite d'obtention 0.9544 |    .183854    |    .122569!!!|    .091927!!! |
souhaitee de la         0.9973 |    .275781    |    .183854   |    .137891!!! |
tolerance resultante    0.9999 |    .367708    |    .245139   |    .183854    |
------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante          Valeur de l'excent. "+-"    |  .425000

Calcul STATISTIQUE.                Valeur courante de la tolerance   =  .183854
```

Cependant, compte tenu du nombre de maillons de la chaîne de cote 3D sur laquelle on travaille, on peut aussi exploiter le résultat statistique[2]. On constate alors qu'avec ± ((0,025 + 0,4) ± 0,183) le défaut devient acceptable, sous réserve d'envisager un réglage au montage.

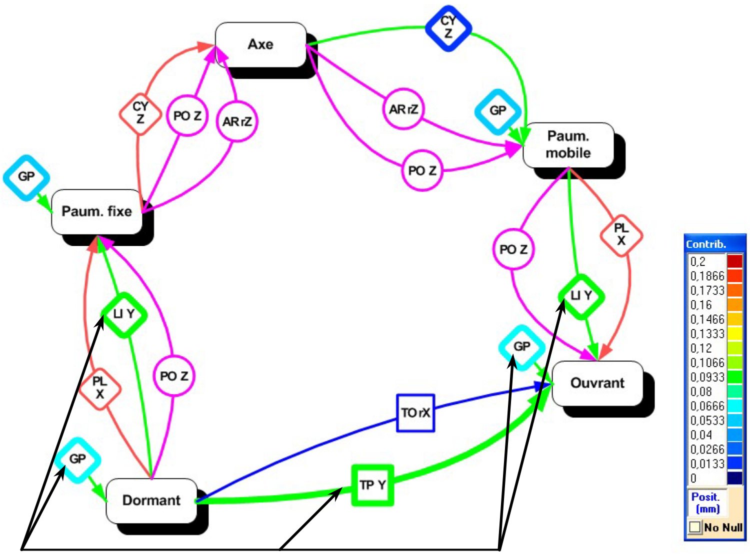
Sinon, sans réglage, avec ± (0,225 ± 0,209) le calcul statistique nous amène au-dessus de la limite de ± 0,3.

Finalement, pour que la condition puisse être vérifiée, il faut un <u>réglage au montage</u> et l'acceptation du <u>calcul statistique</u> pour notre cas[3].

Pour orienter la conduite à tenir pour le tolérancement, on pourrait utiliser la représentation graphique des contributions, et chercher à réduire la part importante due aux pièces (± 0,47).

[2] Par défaut, la valeur est donnée en calcul quadratique 6 σ - 6 σ.

[3] Le logiciel permet facilement de poursuivre cette exploitation statistique par une simulation des combinaisons (méthode de Monte-Carlo).



Mais on visualise bien que le problème vient des profilés, et la condition ± 0,3 est trop sévère …

Cas du défaut angulaire θz

On peut conduire un premier calcul avec les valeurs précédentes :

```
                        ouvrant                 .074125   x     .000   =     .000
                                                                      trn     .0%
GR Y  Tolérance ouvrant  -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        ouvrant                 .000875   x  .057143   =  .000050
                                                                      ori     .3%
===============================================================================
-------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante              Valeur de l'excent. "+-" |  .014554
                                                              Deg:  .833858d

Calcul ARITHMETIQUE (infl non nulles)     Val. de la tol. (radians)  =  .018898
                                                              Deg:    1.083d

/ Pour les liaisons         \   / Part due aux defauts des pieces   =  .005594
\ exclusivement en position /   \ Part   due   aux   interfaces    =  .013304


Valeur de la tolerance resultante:

ATTENTION !   Calcul statistique pour donnees statist. independantes (Gauss)
-----------   N'utiliser les valeurs avec !!! qu'en connaissance de causes.
                                  ---------------------------------------------
    Valeur de la tolerance:      |Probabilite d'obtention des tolerances fixees|
       1 des 9 valeurs.          |    0.9544          0.9973          0.9999   |
-------------------------------------------------------------------------------
Probabilite d'obtention 0.9544 |    .006555    |    .004370!!!|    .003277!!! |
souhaitee de la         0.9973 |    .009832    |    .006555   |    .004916!!! |
tolerance resultante    0.9999 |    .013110    |    .008740   |    .006555    |
-------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante            Valeur de l'excent. "+-"   |  .014554
                                                              Deg:  .833858d

Calcul STATISTIQUE.                  Valeur courante de la tolerance   =  .006555
                                                              Deg:  .375561d
```

On obtient un défaut d'orientation au pire cas θx = ± (14.10^{-3} ± 19.10^{-3}) rad.

En fait, il faut examiner les résultats avec plus d'attention car on n'a pas distingué le jeu de la liaison pivot, qui produit le rotulage qu'on souhaite, et les défauts des autres liaisons qui peuvent, dans un cas défavorable, compenser ce rotulage.

Il faut isoler la contribution du rotulage :

```
=========================================================================
   excentration  "+-"   . . interface . .      .025000  x  .125000  |  .003125

                        axe                       .000 \
CY XY                                             .000  x     .000  =     .000
                        G paum. mobile            .000 /            trn     .0%
                         -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                        axe                       .000 \
                                               .015000  x  .125000  =  .001875
                        G paum. mobile            .000 /            ori    6.8%
=========================================================================
```

On voit donc que sans précaution de montage, le faible rotulage ± ($3,1.10^{-3}$ ± $1,8.10^{-3}$) est très nettement insuffisant pour contenir les défauts possibles ± ($11,4.10^{-3}$ ± $16,9.10^{-3}$) (même en calcul statistique).

Il faut donc identifier la possibilité de réglage. On peut procéder comme pour dy :

```
                       ouvrant                     .074125   x      .000   =     .000
                                                                          trn      .0%
GR Y  Tolérance ouvrant  -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --
                       ouvrant                     .000875   x   .057143   =   .00005o
                                                                          ori      .7%
================================================================================
--------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante            Valeur de l'excent. "+-" |  .025982
                                                              Deg:    1.489d

Calcul ARITHMETIQUE (infl non nulles)    Val. de la tol. (radians)  =  .007469
                                                              Deg:  .427938d

/ Pour les liaisons         \   / Part due aux defauts des pieces   =  .005594
\ exclusivement en position /   \ Part   due   aux   interfaces     =  .001875


Valeur de la tolerance resultante:

ATTENTION !   Calcul statistique pour donnees statist. independantes (Gauss)
-----------   N'utiliser les valeurs avec !!! qu'en connaissance de causes.
                                   ---------------------------------------------
    Valeur de la tolerance:       |Probabilite d'obtention des tolerances fixees|
       1 des 9 valeurs.           |     0.9544          0.9973          0.9999   |
--------------------------------------------------------------------------------
Probabilite d'obtention 0.9544 |    .003211    |    .002141!!!|    .001606!!! |
souhaitee de la         0.9973 |    .004817    |    .003211   |    .002408!!! |
tolerance resultante    0.9999 |    .006422    |    .004282   |    .003211    |
--------------------------------------------------------------------------------
Excentration  "+-"  resultante            Valeur de l'excent. "+-"   |  .025982
                                                              Deg:    1.489d

Calcul STATISTIQUE.                 Valeur courante de la tolerance  =  .003211
                                                              Deg:  .183991d
```

Tient compte de l'incertitude des contacts pour la liaison

Contribution de la liaison pivot seule

On obtient un défaut d'orientation ± ($22,8.10^{-3}$ ± 5,5.10-3) – le $22,8.10^{-3}$ étant associé au réglage maximal possible, absorbable par le jeu des liaisons profilés – paumelles - (le minimum étant nul).

La compensation des défauts pièce devient possible, et le rotulage minimal est alors atteint puisque $1,3.10^{-3} > 1,2.10^{-3}$ rad.

En calcul arithmétique, on peut bien sûr imaginer des cas où le réglage n'est pas suffisant pour compenser le défaut ± $5,5.10^{-3}$. Deux solutions sont envisageables :

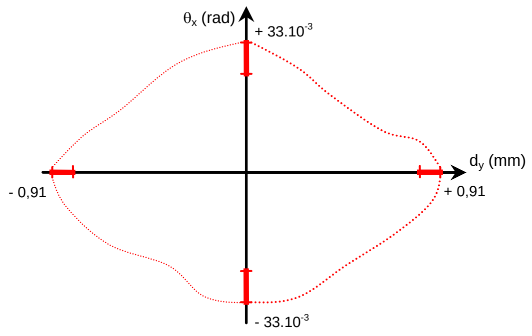
- *Créer un réglage minimum toujours suffisant* : Il suffit pour cela de modifier la largeur de la languette pour avoir un jeu minimal toujours suffisant (par exemple avec $5^{-0,18}_{-0,2}$) ;
- Réduire le défaut ± $5,5.10^{-3}$, en diminuant la tolérance de parallélisme dont la contribution s'avère élevée. Avec un parallélisme de 0,02 pour les deux paumelles, on obtient ± $1,9.10^{-3}$ (et même ± $0,9.10^{-3}$ en calcul statistique), ce qui est convenable.

On pourrait aussi augmenter le jeu minimal dans la liaison pivot (par exemple avec H9 d9) Comme on a raisonné aussi à rotulage minimal, il ne semble pas indispensable de modifier davantage les tolérances des pièces[4].

Remarque

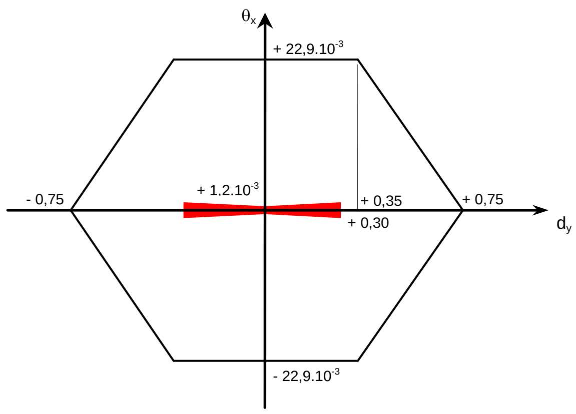
On peut remarquer qu'en dehors des valeurs extrêmes dy max = ± 0,91 mm et θx max = ± 33.10^{-3} rad, le logiciel ne permet pas de montrer toutes les combinaisons possibles pour les deux défauts simultanément. Autrement dit, les limites du contour du domaine défaut ne sont pas accessibles directement et ce domaine n'est donc pas exactement connu[5] :

[4] On pourrait ici aussi réaliser une simulation par Monte-Carlo.
[5] Il est cependant possible par un post-traitement hors logiciel de reconstruire ce domaine.



En ajoutant les domaines défaut de chaque liaison, et en exprimant le résultat au point Mi, il est cependant possible de représenter ce domaine.

En se limitant par exemple aux seuls défauts des profilés, on obtient :



Comme sur ce domaine la condition fonctionnelle est aussi représentée, on constate l'importance du défaut apporté par ces pièces !

Etude de la condition 0 ± 0,25

Une étude très similaire à la précédente conduit à garantir un défaut radial dy maxi = ± 0,25 mm et un rotulage
θx mini = ± 10^{-3} rad.

Par la simulation :

- pour le défaut de position, au pire cas, on obtient ± (0,025 ± 0,135) mm, ce qui est donc acceptable sans condition ;
- pour le défaut d'orientation, au pire cas, le rotulage ± ($3{,}1.10^{-3}$ ± $1{,}8.10^{-3}$) rad n'est pas suffisant pour contenir les défauts pièce ± $5{,}5.10^{-3}$ (ou ± $2{,}9.10^{-3}$ en calcul statistique). Avec la même modification de la tolérance de parallélisme précédente, on obtient ± $1{,}8.10^{-3}$ (ou ± $0{,}9.10^{-3}$). Pour obtenir facilement le rotulage fonctionnel, il peut être prudent d'augmenter le jeu minimal de la liaison pivot, par exemple avec H9 c9.

CONCLUSION

L'étude du tolérancement réalisée avec Mecamaster est bien adaptée à l'approche architecturale développée dans l'étude des contacts. La décomposition en liaisons cinématiques et en liaisons de contact – qui gèrent seules la dépendance des défauts linéaires et angulaires – permettent de décrire de très nombreux problèmes.

Mais l'étude n'est pas toujours aussi simple à conduire que dans le cas de la charnière !

La plupart du temps, la difficulté va provenir d'hyperstaticités découlant du graphe de contacts. Dans ce cas, tout calcul est impossible, et il faut modifier les liaisons pour obtenir un modèle acceptable.

Un autre problème peut provenir de l'indépendance des valeurs des défauts, avec laquelle est conduit le calcul. Pour la charnière par exemple, il existe des solutions de réglage qu'on a examiné aux valeurs limites. Mais en pratique, il est clairement impossible de faire à la fois un réglage linéaire maximal et angulaire maximal !

Enfin, le cas étudié nécessitait des précautions pour l'exploitation puisque les jeux des liaisons ne jouaient pas le même rôle dans le mécanisme.