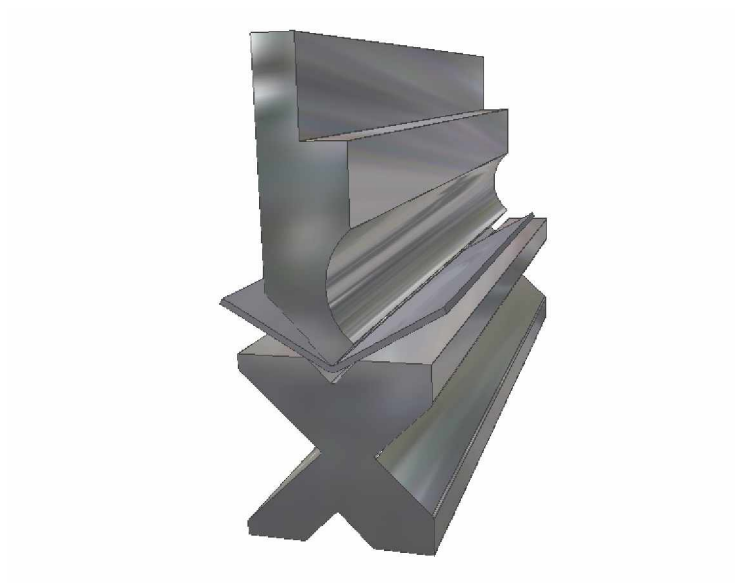


Le pliage des tôles



Chapitre 3

La perte au pli Cas général

1. Tableaux de valeurs :

1.1. Perte au pli de $E_p = 0,6 \text{ mm}$ à $E_p = 5 \text{ mm}$ – Tableau de valeurs initial:

Nota : Le terme « perte » au pli est du à la valeur presque toujours négative de ce paramètre :

Ep	Vé	Ri	F 10 ⁴ N	b	180°	165°	150°	135°	120°	105°	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°
0,6	6	1	4	4	0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,3	-1,0	-0,6	-0,3	0,0	0,3	0,7
0,6	8	1,3	4	5,5	0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,4	-1,0	-0,6	-0,2	0,3	0,7	1,1
0,8	6	1	8	4	0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-1,1	-1,6	-1,3	-0,9	-0,6	-0,3	0,1	0,4
0,8	8	1,3	5	5,5	0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-1,1	-1,7	-1,3	-0,8	-0,4	0,0	0,4	0,8
0,8	10	1,6	4	7	0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,8	-1,2	-1,8	-1,3	-0,8	-0,3	0,2	0,7	1,2
1	6	1	13	4	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,3	-1,9	-1,6	-1,2	-0,9	-0,5	-0,2	0,2
1	8	1,3	9	5,5	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,4	-2	-1,6	-1,1	-0,7	-0,3	0,2	0,6
1	10	1,6	7	7	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,4	-2,1	-1,6	-1,1	-0,5	0,0	0,5	1,0
1	12	2	6	8,5	0	-0,2	-0,4	-0,6	-1	-1,5	-2,2	-1,6	-1	-0,3	0,3	0,9	1,6
1,2	6	1	20	4	0	-0,2	-0,5	-0,8	-1,1	-1,6	-2,3	-1,9	-1,5	-1,2	-0,8	-0,5	-0,1
1,2	8	1,3	14	5,5	0	-0,2	-0,5	-0,7	-1,1	-1,6	-2,3	-1,9	-1,4	-1	-0,6	-0,1	0,3
1,2	10	1,6	11	7	0	-0,2	-0,4	-0,7	-1,1	-1,6	-2,4	-1,9	-1,4	-0,6	-0,3	0,2	0,8
1,2	12	2	8	8,5	0	-0,2	-0,4	-0,7	-1,1	-1,7	-2,5	-1,9	-1,3	-0,8	0,0	0,7	1,3
1,2	16	2,6	6	11	0	-0,2	-0,4	-0,7	-1,2	-1,8	-2,7	-1,9	-1	-0,3	0,5	1,3	2,1
1,5	8	1,3	22	5,5	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,4	-2	-2,8	-2,4	-1,9	-1,5	-1,0	-0,5	-0,1
1,5	10	1,6	16	7	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,4	-2	-2,9	-2,4	-1,8	-1,3	-0,7	-0,2	0,4
1,5	12	2	13	8,5	0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,4	-2,1	-3	-2,4	-1,7	-1	-0,4	0,3	1,0
1,5	16	2,6	9	11	0	-0,3	-0,5	-0,9	-1,4	-2,1	-3,2	-2,4	-1,5	-0,7	0,1	1,0	1,8
1,5	20	3,3	7	14	0	-0,2	-0,5	-0,9	-1,4	-2,1	-3,4	-2,4	-1,4	-0,4	0,7	1,7	2,7
2	10	1,6	32	7	0	-0,4	-0,8	-1,3	-1,9	-2,7	-3,7	-3,2	-2,6	-2	-1,4	-0,9	-0,3
2	12	2	24	8,5	0	-0,4	-0,8	-1,2	-1,9	-2,7	-3,8	-3,1	-2,5	-1,8	-1,1	-0,4	0,3
2	16	2,6	16	11	0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,9	-2,7	-4	-3,1	-2,3	-1,4	-0,5	0,3	1,2
2	20	3,3	12	14	0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,9	-2,8	-4,2	-3,2	-2,1	-1	0,0	1,1	2,2
2	25	4	9	17,5	0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,9	-2,9	-4,5	-3,2	-1,9	-0,7	0,6	1,8	3,1
2,5	12	2	42	8,5	0	-0,5	-1	-1,6	-2,3	-3,3	-4,7	-4	-3,2	-2,5	-1,8	-1,1	-0,4
2,5	16	2,6	29	11	0	-0,5	-0,9	-1,5	-2,3	-3,3	-4,8	-3,9	-3	-2,1	-1,2	-0,3	0,6
2,5	20	3,3	20	14	0	-0,4	-0,9	-1,5	-2,3	-3,4	-5	-3,9	-2,8	-1,7	-0,6	0,5	1,6
2,5	25	4	15	17,5	0	-0,4	-0,9	-1,5	-2,3	-3,5	-5,2	-3,9	-2,6	-1,4	-0,1	1,2	2,5
2,5	32	5	11	22	0	-0,4	-0,9	-1,5	-2,4	-3,6	-5,6	-4	-2,4	-0,8	0,7	2,3	3,9
3	16	2,6	49	11	0	-0,6	-1,2	-1,9	-2,8	-4	-5,7	-4,7	-3,8	-2,9	-2,0	-1,1	-0,1
3	20	3,3	32	14	0	-0,5	-1,1	-1,8	-2,8	-4	-5,8	-4,7	-3,6	-2,5	-1,3	-0,2	0,9
3	25	4	23	17,5	0	-0,5	-1,1	-1,8	-2,8	-4,1	-6	-4,7	-3,4	-2,1	-0,7	-0,6	1,9
3	32	5	16	22	0	-0,5	-1,1	-1,8	-2,8	-4,2	-6,3	-4,7	-3,1	-1,5	0,1	1,7	3,3
3	40	6,5	12	28	0	-0,5	-1	-1,8	-2,9	-4,5	-6,8	-4,8	-2,8	-0,8	1,3	3,3	5,3
4	20	3,3	66	14	0	-0,7	-1,6	-2,5	-3,7	-5,3	-7,5	-6,3	-5,2	-4	-2,8	-1,6	-0,4
4	25	4	48	17,5	0	-0,7	-1,5	-2,5	-3,7	-5,3	-7,7	-6,3	-4,9	-3,5	-2,1	-0,7	0,7
4	32	5	30	22	0	-0,7	-1,5	-2,4	-3,7	-5,4	-7,9	-6,3	-4,6	-2,9	-1,2	0,4	2,1
4	40	6,5	22	28	0	-0,7	-1,4	-2,4	-3,7	-5,6	-8,4	-6,3	-4,2	-2,1	0,0	2,1	4,2
4	50	8	16	35	0	-0,6	-1,2	-2,4	-3,8	-5,8	-8,9	-6,4	-3,9	-1,3	1,2	3,7	6,2
5	25	4	60	17,5	0	-0,9	-1,9	-3,1	-4,6	-6,6	-9,4	-7,9	-6,5	-5,1	-3,6	-2,2	-0,7
5	32	5	51	22	0	-0,9	-1,9	-3,1	-4,6	-6,7	-9,6	-7,9	-6,1	-4,4	-2,7	-0,9	0,8
5	40	6,5	36	28	0	-0,9	-1,8	-3	-4,6	-6,8	-10	-7,8	-5,7	-3,5	-1,3	0,8	3,0
5	50	8	25	35	0	-0,8	-1,8	-3	-4,7	-7	-10	-7,9	-5,3	-2,7	0,1	2,5	5,1
5	63	10	16	45	0	-0,8	-1,7	-3	-4,7	-7,3	-11	-8	-4,8	-1,7	1,5	4,6	7,8

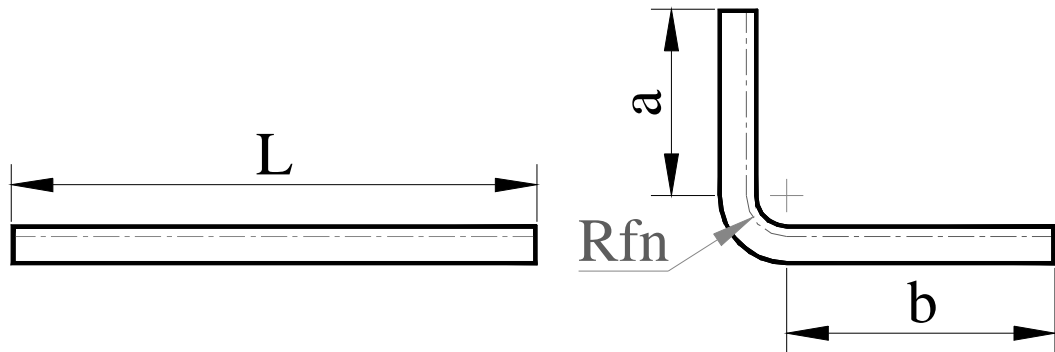
1.2. Perte au pli de $E_p = 6 \text{ mm}$ à $E_p = 50 \text{ mm}$ – Tableau de valeurs initial:

Ep	Vé	Ri	F 10 ⁴ N	b	180°	165°	150°	135°	120°	105°	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°
6	32	5	75	22	0	-1,1	-2,3	-3,8	-5,5	-8	-11	-9,5	-7,7	-6,9	-4,1	-2,3	-0,6
6	40	6	60	28	0	-1,1	-2,3	-3,7	-5,5	-8,1	-12	-9,4	-7,2	-5	-2,7	-0,5	1,7
6	50	8	48	35	0	-1	-2,2	-3,6	-5,5	-8,2	-12	-9,4	-6,8	-4,1	-1,4	1,2	3,9
6	63	10	38	45	0	-1	-2,1	-3,6	-5,6	-8,5	-13	-9,5	-6,2	-3	0,2	3,4	6,6
6	80	13	30	55	0	-1	-2,1	-3,6	-5,7	-8,9	-14	-9,6	-5,6	-1,5	2,5	6,6	11,0
8	40	6	107,0	28	0	-1,5	-3,1	-5	-7,4	-11	-15	-13	-10	-8	-5,7	-3,3	-1
8	50	8	85,0	35	0	-1,4	-3	-4,9	-7,4	-11	-15	-13	-9,8	-7	-4,3	-1,5	1,3
8	63	10	68,0	44	0	-1,4	-2,9	-4,9	-7,4	-11	-16	-13	-9,2	-5,8	-2,5	0,9	4,2
8	80	13	53,0	56	0	-1,3	-2,9	-4,8	-7,5	-11	-17	-13	-8,4	-4,2	0	4,2	8,4
8	100	16	43,0	70	0	-1,3	-2,8	-4,8	-7,6	-12	-18	-13	-7,7	-2,7	2,3	7,4	12
10	50	8	134,0	35	0	-1,9	-3,9	-6,3	-9,3	-13	-19	-16	-13	-10	-7,2	-4,3	-1,5
10	63	10	105,0	44	0	-1,8	-3,8	-6,2	-9,2	-13	-19	-16	-12	-8,8	-5,3	-1,8	1,6
10	80	13	85,0	56	0	-1,7	-3,7	-6,1	-9,2	-14	-20	-16	-11	-7	-2,7	1,7	6
10	100	16	67,0	70	0	-1,7	-3,6	-6	-9,3	-14	-21	-16	-11	-5	-0,2	5	10
10	125	20	53,0	88	0	-1,6	-3,5	-6	-9,5	-15	-22	-16	-9,7	-3,4	2,9	9,2	16
12	63	10	153,0	44	0	-2,2	-4,6	-7,5	-11	-16	-23	-19	-15	-12	-8,3	-4,7	-1,1
12	80	13	120,0	56	0	-2,1	-4,5	-7,4	-11	-16	-23	-19	-14	-9,9	-5,5	-1	3,4
12	100	16	96,0	70	0	-2,1	-4,4	-7,3	-11	-16	-24	-19	-14	-8,2	-2,9	2,4	7,8
12	125	20	78,0	88	0	-2	-4,3	-7,2	-11	-17	-25	-19	-13	-6,1	0,4	6,8	13
12	160	26	60,0	112	0	-1,9	-4,2	-7,2	-12	-18	-27	-19	-11	-3,1	5	13	21
15	80	13	188,0	56	0	-2,8	-5,8	-9,4	-14	-20	-28	-24	-19	-15	-9,8	-5,2	-0,6
15	100	16	150,0	70	0	-2,7	-5,6	-9,2	-14	-20	-29	-24	-18	-13	-7,1	-1,6	3,9
15	125	20	120,0	88	0	-2,6	-5,5	-9,1	-14	-21	-30	-24	-17	-10	-3,6	3,1	9,7
15	160	26	95,0	112	0	-2,5	-5,3	-9	-14	-21	-32	-24	-15	-7	1,3	9,6	18
15	200	33	75,0	140	0	-2,4	-5,2	-9	-14	-22	-34	-24	-14	-3,6	6,7	17	27
20	125	20	215,0	88	0	-3,6	-7,6	-12	-18	-27	-38	-31	-25	-18	-11	-3,7	3,3
20	160	26	170,0	112	0	-3,5	-7,3	-12	-19	-27	-40	-31	-23	-14	-5,4	3,3	12
20	200	33	135,0	140	0	-3,3	-7,1	-12	-19	-28	-42	-32	-21	-10	-0,4	11	22
20	250	41	108,0	175	0	-3,2	-7	-12	-19	-29	-45	-32	-19	-6,2	6,6	20	32
20	320	53	85,0	224	0	-3,1	-6,8	-12	-20	-31	-49	-33	-17	-0,6	16	32	48
25	160	26	265,0	112	0	-4,5	-9,4	-15	-23	-34	-48	-39	-30	-21	-12	-3,4	5,6
25	200	33	210,0	140	0	-4,3	-9,1	-15	-23	-34	-50	-39	-28	-17	-6,3	4,7	16
25	250	41	170,0	175	0	-4,2	-8,9	-15	-23	-35	-53	-39	-26	-13	0,3	14	27
25	320	53	130,0	224	0	-4	-8,7	-15	-24	-37	-57	-40	-24	-7	9,6	26	43
25	400	65	105,0	280	0	-3,8	-8,5	-15	-25	-39	-61	-41	-21	-1,3	19	38	58
30	200	33	300,0	140	0	-5,3	-11	-18	-28	-40	-58	-47	-36	-25	-13	-2	9,3
30	250	41	240,0	175	0	-5,1	-11	-18	-28	-41	-61	-47	-34	-20	-6,4	7,2	21
30	320	53	190,0	224	0	-4,9	-11	-18	-28	-43	-64	-48	-31	-14	3,4	20	37
30	400	65	150,0	280	0	-4,8	-10	-17	-29	-45	-68	-48	-28	-7,7	13	33	51
30	500	83	120,0	350	0	-4,6	-10	-18	-30	-48	-75	-50	-25	0,7	26	51	76
40	320	53	340,0	224	0	-6,9	-15	-24	-37	-55	-80	-63	-45	-28	-9,9	7,7	25
40	400	65	270,0	280	0	-6,6	-14	-24	-37	-56	-84	-63	-42	-21	0	21	42
40	500	83	215,0	350	0	-6,4	-14	-24	-38	-59	-90	-64	-38	-12	14	40	66
50	400	65	420,0	280	0	-8,6	-18	-30	-46	-68	-99	-78	-57	-35	-13	8,3	30
50	500	83	340,0	350	0	-8,3	-18	-30	-47	-70	-99	-79	-52	-25	1,4	28	55

2. Etude d'un modèle : l'isoligne :

► **Hypothèses** : Nous supposons que la déformation de la tôle se fait suivant des portions de cylindres de révolution de rayon constant. La « fibre neutre » y est représentée par un arc de cercle de rayon constant R_{fn} . Le matériau est supposé isotrope car les différences de comportement mécanique en fonction de l'orientation du pli par rapport au sens de laminage sont négligées. L'épaisseur reste constante.

- Etudions le modèle de la « fibre neutre » et son application dans le pliage des tôles.
- La « fibre neutre », dans son aspect dimensionnel, est une ligne continue (d'où le terme fibre) dont la longueur est identique (d'où le qualificatif neutre) avant et après pliage.
- Représentons cette « fibre neutre » dans le cas d'un pli unique à 90° :



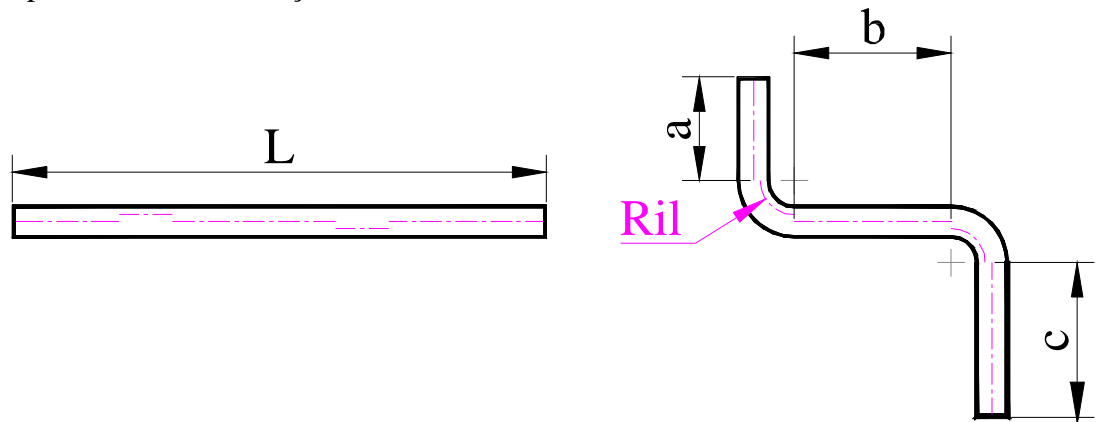
$$L = a + R_{fn} \times \pi/2 + b$$

- représentons la « fibre neutre » dans le cas de deux plis à 90° de sens alterné :



- Dans ce cas, la représentation de la « fibre neutre » ne peut s'effectuer convenablement car sa situation dans l'épaisseur ne peut être définie.

- Pour éviter tout problème de représentation, nous allons utiliser une ligne discontinue qui ne conserve que les propriétés dimensionnelles de la « fibre neutre ». Nous nommerons cette ligne théorique l'**isoligne** et nous la représenterons de la façon suivante :



- L'**isoligne** est constituée de segments de droites situés conventionnellement à mi-épaisseur et d'arcs de cercle positionnés dans l'épaisseur selon leur rayon « **Ril** » (Rayon d'**isoligne**).
- La longueur L est égale à l'addition des segments rectilignes et des longueurs d'arcs de cercle au niveau des plis :

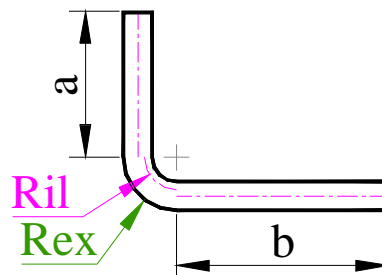
$$L = a + \text{Ril} \times \pi/2 + b + \text{Ril} \times \pi/2 + c$$

3. Comparaison entre perte au pli et isoligne :

3.1. Reprenons la représentation de l'isoligne dans le cas d'un pli unique à 90° :

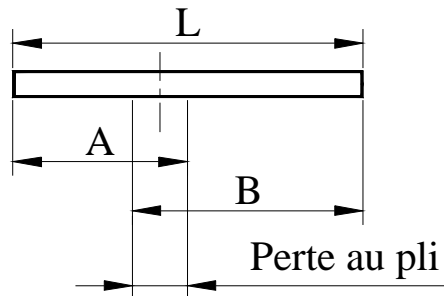
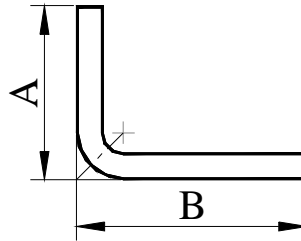


$$L = a + \text{Ril} \times \pi/2 + b$$



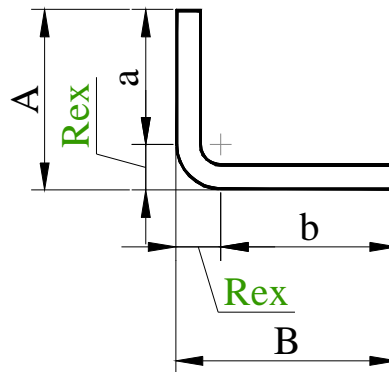
Nommons **Rex** le rayon extérieur du pli.

3.2. Représentons la perte au pli dans ce cas :



(La perte au pli est toujours négative à 90°)

$$L = A + \text{perte au pli} + B$$



Or $A = a + R_{ex}$
 et $B = b + R_{ex}$

$$\text{Donc } L = a + R_{ex} + \text{perte au pli} + b + R_{ex}$$

Combinons les deux relations § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

$$a + R_{in} \times \pi/2 + b = a + R_{ex} + \text{perte au pli} + b + R_{ex}$$

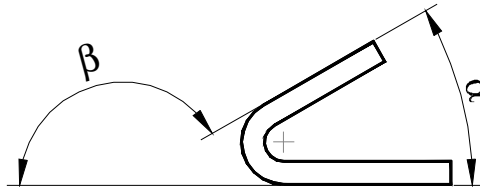
Simplifions notre relation en enlevant a et b aux deux membres de l'égalité :

$$Ril \times \pi/2 = Rex + \text{perte au pli} + Rex$$

$$\text{Perte au pli} = Ril \times \pi/2 - 2 \times Rex$$

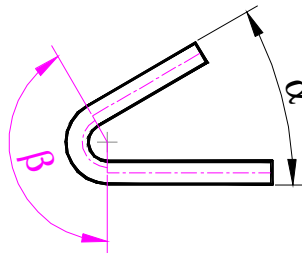
3.3. Définition des angles dans la mesure des pièces pliées :

Nous distinguerons deux angles :



- α **l'angle du pli** ou **angle d'ouverture** formé par les faces planes de part et d'autre du pli :
- β **l'angle de pliage** qui exprime la déformation générée par l'opération de pliage :
Les deux angles sont supplémentaires : $\alpha + \beta = 180^\circ$

Nous retrouvons l'angle β pour identifier l'arc d'isoline :



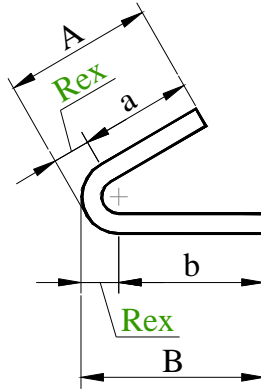
Notas :

- la longueur de l'arc d'isoline est égale à $Ril \times (\pi/180) \times \beta^\circ$ ou encore à $Ril \times \beta^{rd}$
 - dans le cas d'un pli à 90° les deux angles sont identiques : $\alpha = \beta$
- Exprimons maintenant la perte au pli en fonction de β .

3.4. Expression de la perte au pli en fonction de Ril, de Rex et de β :

3.4.1. Lorsque α est inférieur ou égal à 90° :

La perte au pli est alors définie en référence à l'extérieur du pli comme déjà exprimé au § **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** :



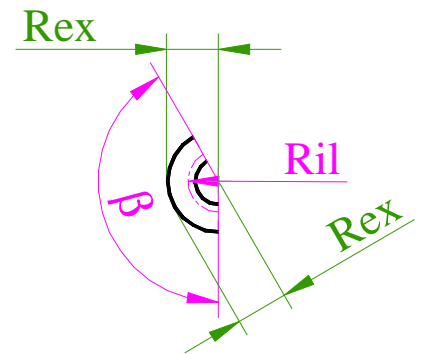
Relation 1 pour $\alpha \leq 90^\circ$:

$$\text{Perte au pli} = \text{Ril} \times (\pi/180) \times \beta^\circ - 2 \times \text{Rex}$$

Ou encore :

$$\text{Perte au pli} = \text{Ril} \times \beta^{\text{rd}} - 2 \times \text{Rex}$$

Ce qui peut s'illustrer de la façon suivante :



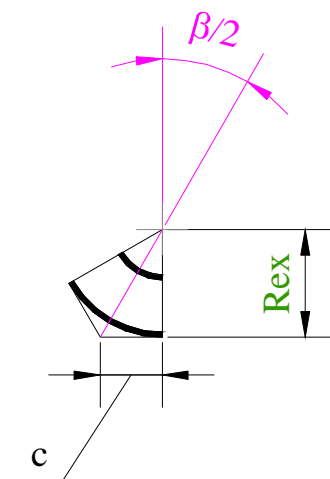
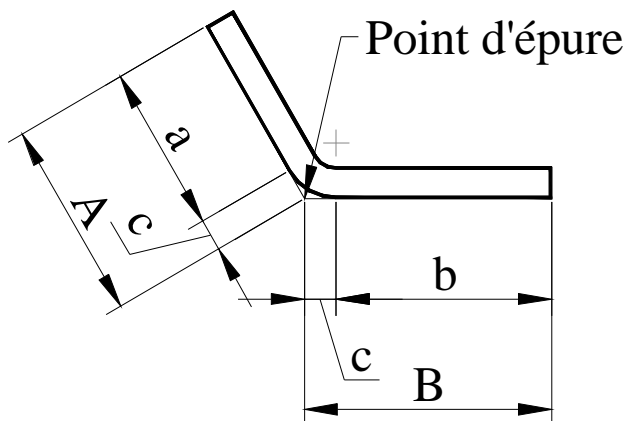
On notera que cette relation est affine, du type $y = a x + b$.

Car, pour une épaisseur et un vé donné, on suppose que le couple $\text{Ril} \text{ Rex}$ est constant.

La variable est β .

3.4.2. Lorsque α est supérieur ou égal à 90° :

Dans ce cas, la perte au pli ne se définit plus par rapport à l'extérieur du pli mais en référence à une droite d'épure théorique. Cette droite est la ligne d'intersection des deux faces planes extérieures du pli. La référence reste donc l'extérieur du pli. Le point d'épure ci-dessous illustre le raccourci total de cette droite d'épure.



$$c = \text{Rex} \times \tan(\beta/2)$$

$$L = a + \text{Ril} \times (\pi/180) \times \beta^\circ + b$$

$$L = A + \text{perte au pli} + B$$

Or $A = a + c = a + \text{Rex} \times \tan(\beta/2)$
et $B = b + c = b + \text{Rex} \times \tan(\beta/2)$

$$\text{Ø} \quad a + \text{Ril} \times (\pi/180) \times \beta^\circ + b = a + \text{Rex} \times \tan(\beta/2) + \text{perte au pli} + b + \text{Rex} \times \tan(\beta/2)$$

Simplifions notre relation en enlevant a et b :

$$\text{Ø} \quad \text{Ril} \times (\pi/180) \times \beta^\circ = \text{perte au pli} + 2 \times \text{Rex} \times \tan(\beta/2)$$

Relation 2 pour $\alpha \geq 90^\circ$:

$$\text{Ø} \quad \text{Perte au pli} = \text{Ril} \times (\pi/180) \times \beta^\circ - 2 \times \text{Rex} \times \tan(\beta/2)$$

Ou encore :

$$\text{Ø} \quad \text{Perte au pli} = \text{Ril} \times \beta^{\text{rd}} - 2 \times \text{Rex} \times \tan(\beta/2)$$

Cette fois la fonction n'est plus affine.

On notera que les deux relations 1 et 2 sont identiques pour un pli à 90° car, dans ce cas, $\tan(\beta/2) = \tan(45^\circ) = 1$

4. Illustration graphique des résultats numériques du modèle :

Pour notre illustration graphique, nous prendrons une épaisseur de tôle de 2 mm, une largeur de vé de 12 et nous retiendrons arbitrairement :

- un rayon extérieur $\text{Rex} = 4$ mm.
- un arc d'isoligne situé au quart intérieur de l'épaisseur soit $\text{Ril} = 2,5$ mm,

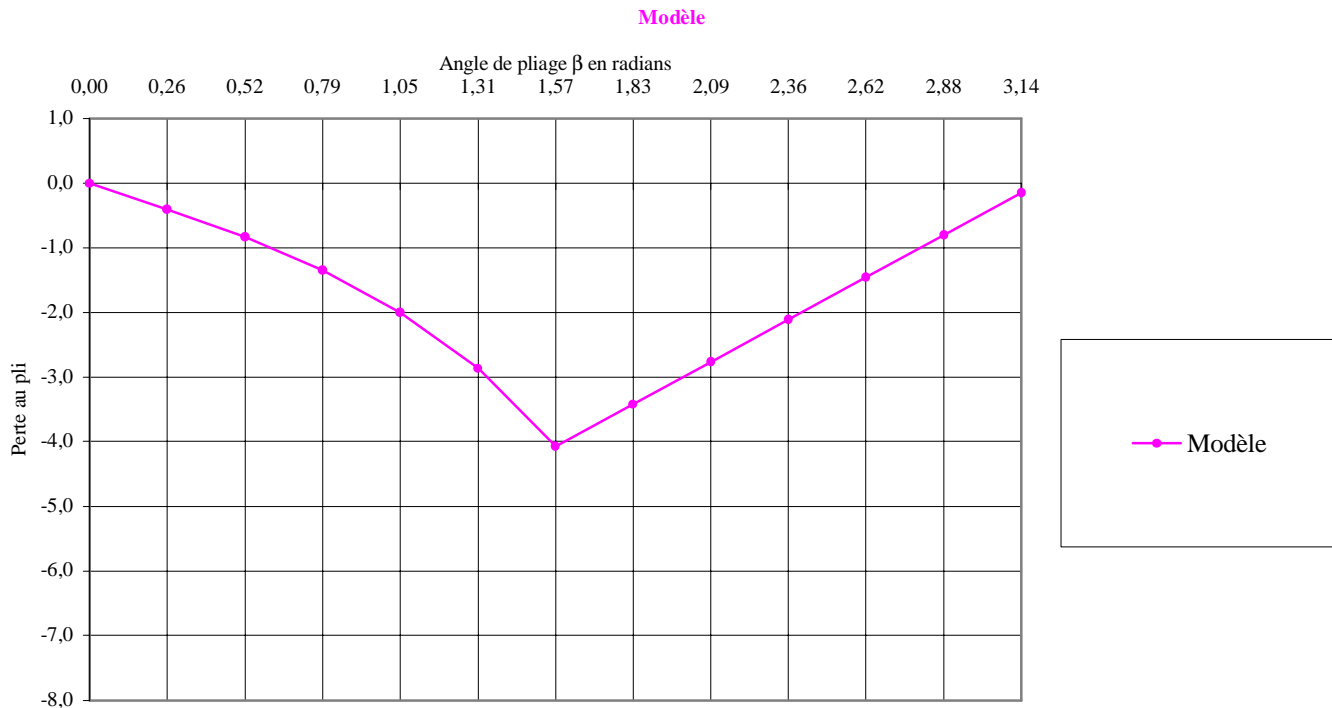
4.1. *Déterminons un tableau de valeurs des pertes au pli :*

A l'aide de nos deux relations 1 et 2 :

α°	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0
β°	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
β^{rd}	0,00	0,26	0,52	0,79	1,05	1,31	1,57	1,83	2,09	2,36	2,62	2,88	3,14
Modèle	0,00	-0,40	-0,83	-1,35	-2,00	-2,87	-4,07	-3,42	-2,76	-2,11	-1,46	-0,80	-0,15

Perte au pli calculée pour un Ril et un Rex donnés et en fonction de β^{rd} .

4.2. *Traçons la représentation graphique du modèle ainsi défini :*



Remarques :

- Les points sont reliés par des segments de droite (normalement, l'arc de la partie gauche de la courbe représentative tangente une droite $y \approx -0,38x$ à $\beta = 0$).
- Le mode de mesure de la perte au pli, différent selon que β° est plus petit ou plus grand que 90° , est seul responsable de la discontinuité observée : courbe pour $\beta^\circ \leq 90^\circ$ (mesure au point d'épure) et rectiligne pour $\beta^\circ \geq 90^\circ$ (mesure par rapport au rayon extérieur).
- ⊖ En choisissant d'exprimer l'angle β en radians le coefficient directeur de la partie rectiligne est égal à Ril , le rayon d'isoline. (Perte au pli = $Ril \times \beta^{rd} - 2 \times Rex$)
- ⊖ L'ordonnée à l'origine de la partie rectiligne est égale à : $-2 \times Rex$.

5. Comparaison du modèle et du tableau de valeurs initial :

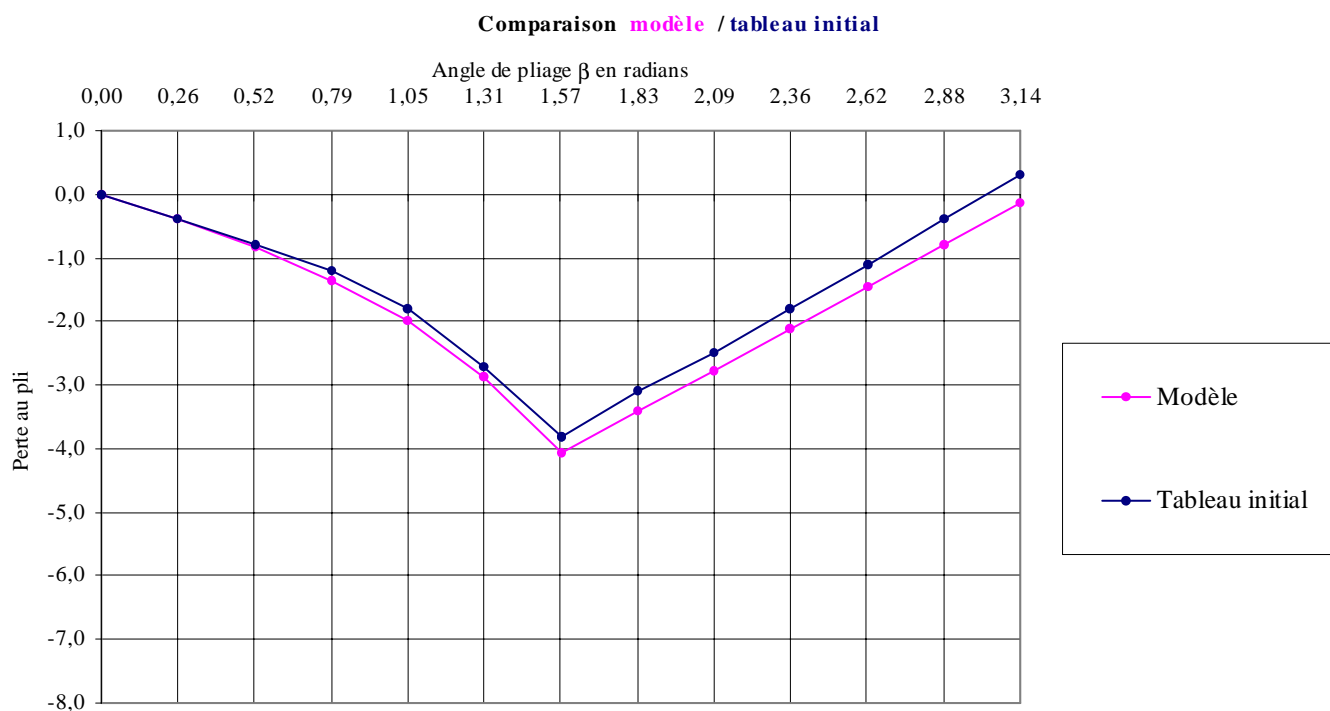
5.1. représentation graphique modèle – tableau initial :

Tableau de valeurs initial pour une tôle de 2 mm et un Vé de 12 mm :

α°	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0
Tableau initial	0,0	-0,4	-0,8	-1,2	-1,8	-2,7	-3,8	-3,1	-2,5	-1,8	-1,1	-0,4	0,3

→ Pertes au pli fournies par les constructeurs.

Présentons, sur le même graphique, le modèle et son correspondant dans le tableau de valeurs initial :

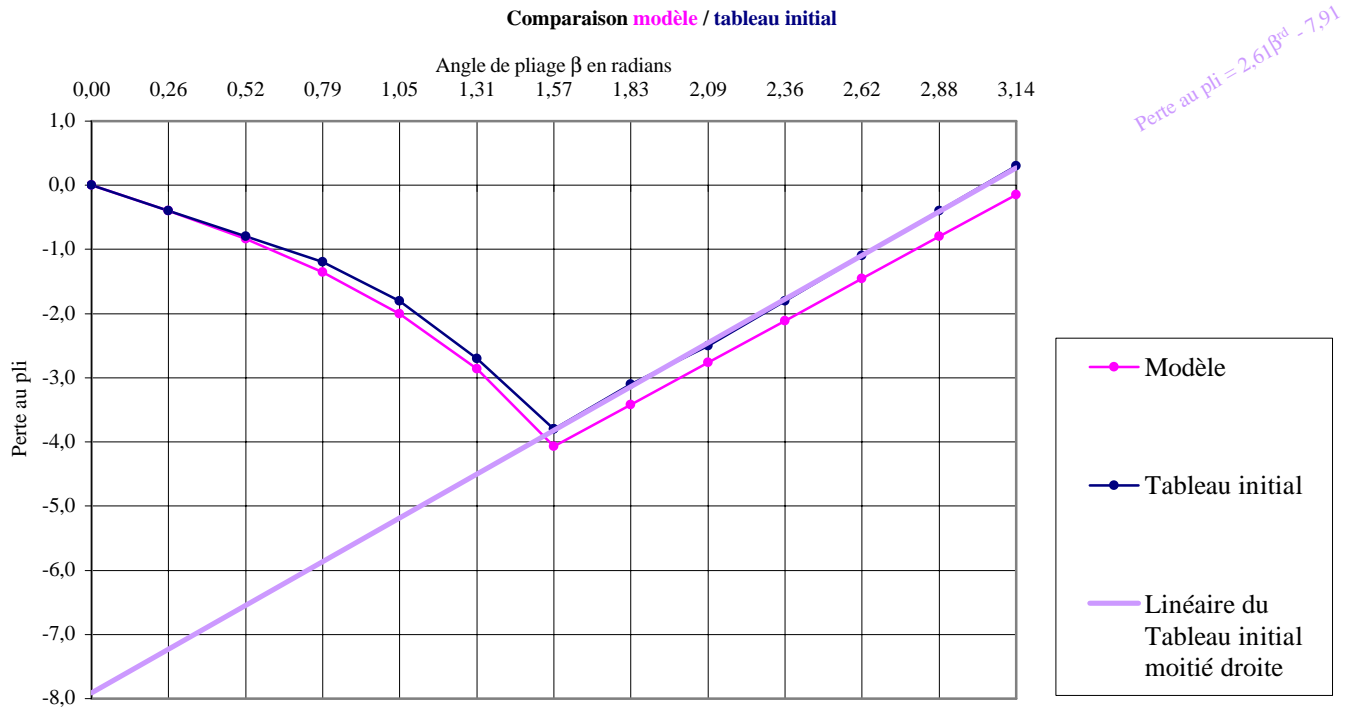


La parenté entre le tableau de valeurs initial et notre modèle ne fait aucun doute et valide nos hypothèses. En effet, il nous suffit désormais d'ajuster les valeurs du rayon d'isoline et du rayon extérieur pour superposer nos deux représentations graphiques.

5.2. Ajustement du modèle :

5.2.1. Recherche de R_{il} et de R_{ex} :

- Au § 3.4.1 nous avons observé que : $Perte\ au\ pli = R_{il} \times \beta^{rd} - 2 \times R_{ex}$, notre relation 1, était du type $y = a x + b$. Elle correspond à la partie rectiligne située sur la moitié droite de notre graphique pour $\beta \geq 90^\circ$ ou $1,57^{rd}$ sur l'axe des abscisses.
- Ainsi, nous confirmons la réalité de l'existence du Rayon d'isoline R_{il} .
- Si nous isolons cette partie dans notre tableau de valeurs initial, nous pourrions effectuer une recherche de droite de régression linéaire correspondant à ces valeurs.
- Au § 4.2, nous avons remarqué que :
 - En choisissant d'exprimer l'angle β en radians le coefficient directeur de la partie rectiligne est égal à R_{il} , le rayon d'isoline.
($Perte\ au\ pli = R_{il} \times \beta^{rd} - 2 \times R_{ex}$)
 - L'ordonnée à l'origine de la partie rectiligne est égale à : $-2 \times R_{ex}$.
- L'équation de la droite de régression aura alors une pente égale à R_{il} , le rayon d'isoline et une ordonnée à l'origine égale à $-2 \times R_{ex}$.
- Illustrons notre propos par une représentation graphique :



$$\text{Perte au pli} = \text{Ril} \times \beta^{\text{rd}} - 2 \times \text{Rex}$$

$$\text{Ici : Perte au pli} = 2,61 \times \beta^{\text{rd}} - 7,91$$

Dans ce cas, **Ril** = 2,61 mm et **Rex** = -7,91 / -2 = 3,96 mm.

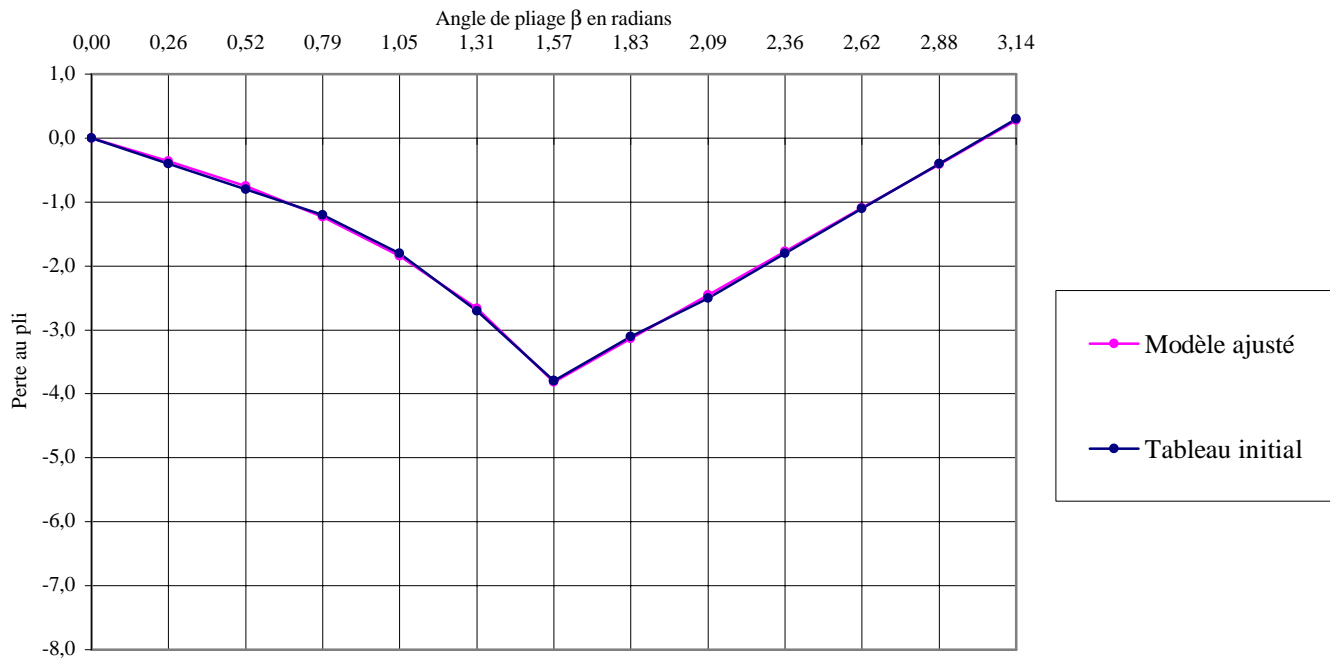
5.2.2. Modèle ajusté et tableau initial — représentation graphique :

- Pour **Ril** = 2,61 mm et **Rex** = 3,96 :

α°	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0
Modèle ajusté	0,00	-0,36	-0,76	-1,23	-1,84	-2,66	-3,82	-3,14	-2,45	-1,77	-1,09	-0,41	0,28

- Représentation graphique :

Comparaison modèle ajusté / tableau initial



Nous pouvons observer une quasi-superposition des deux représentations.

α°	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0
Tableau initial	0,0	-0,4	-0,8	-1,2	-1,8	-2,7	-3,8	-3,1	-2,5	-1,8	-1,1	-0,4	0,3
Modèle calculé	0,00	-0,36	-0,76	-1,23	-1,84	-2,66	-3,82	-3,14	-2,45	-1,77	-1,09	-0,41	0,28

6. Généralisation du modèle :

- Nous venons de voir que la connaissance des valeurs de **Ril** et de **Rex** suffit à définir l'ensemble des pertes au pli pour une tôle de 2 mm dans un vé de 12mm.
- Désormais il n'est plus utile d'effectuer une interpolation linéaire (imprécise quand $\beta^\circ < 90^\circ$) pour déterminer la perte au pli d'un angle ne figurant pas dans le tableau de valeurs initial : Nos deux relations nous permettent un calcul à partir de n'importe quel angle de pliage.
- On observera par ailleurs un effet de « lissage » des résultats du à l'utilisation des deux formules.
- D'autre part, la prise en compte possible de l'épaisseur réelle de la tôle au lieu de l'épaisseur nominale, affine encore le résultat. Enfin, la largeur réelle du vé peut être prise en compte si un outillage spécial, en dehors des standards habituels, est employé.
- Il nous serait possible de répéter l'opération pour toutes les épaisseurs de tôle et tous les vés de pliage. Mais l'éventualité de cette recherche nous conduit à nous interroger sur l'évolution de ces deux valeurs **Ril** et **Rex** pour l'ensemble des épaisseurs de tôle

et des vés de pliage. Nous allons étudier cette évolution et tenter d'en déterminer les lois :

6.1. Relations entre une tôle de 2 et une tôle de 20 :

- Dans un premier temps, comparons le tableau de valeurs initial pour une tôle de 2 dans un vé de 16 et une tôle de 20 dans un vé de 160 :

	α°	180	165	150	135	120	105	90	75	60	45	30	15	0
Vé de 16	Tôle de 2	0,0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,9	-2,7	-4,0	-3,1	-2,3	-1,4	-0,5	0,3	1,2
Vé de 160	Tôle de 20	0	-3,5	-7,3	-12	-19	-27	-40	-31	-23	-14	-5,4	3,3	12

- Ce tableau montre que le coefficient dix appliqué aux épaisseurs et aux vés se traduit par une perte au pli elle aussi multipliée par dix, les valeurs étant arrondies à la première décimale.
- Faisons une recherche de **Ril** et de **Rex** pour lesquels le même rapport de 1 à 10 devrait être observé :

Ril 2 mm	=	PENTE(perces au pli pour β de 90° à 180°)	=	3,30
Ril 20 mm	=	PENTE(perces au pli pour β de 90° à 180°)	=	33,04
Rex 2 mm	=	ORDONNEE.ORIGINE(perces au pli pour β de 90° à 180°) / -2	=	4,59
Rex 20 mm	=	ORDONNEE.ORIGINE(perces au pli pour β de 90° à 180°) / -2	=	45,93

- Là aussi les deux valeurs sont effectivement multipliées par dix.
- Si nous exprimons nos valeurs par rapport à l'épaisseur nous obtenons le tableau suivant :

Nous nommerons :

- **VéEp** le rapport Vé / Epaisseur
- **RilEp** le rapport **Ril** / Epaisseur
- **RexEp** le rapport **Rex** / Epaisseur

	VéEp	RilEp	RexEp
Epaisseur 2	16 / 2	3,30 / 2	4,59 / 2
Epaisseur 20	160 / 20	33,04 / 20	45,93 / 20

Effectuons les opérations :

	VéEp	RilEp	RexEp
Epaisseur 2	8	1,65	2,30
Epaisseur 20	8	1,65	2,30

Nous pouvons constater que les trois rapports sont bien les mêmes. Que se passe-t-il pour **RilEp** et **RexEp** lorsque VéEp = 8 ?

6.2. Relations pour un rapport VéEp = 8 :

Observons maintenant toutes les valeurs de ces rapports lorsque VéEp = 8

Vé	Epaisseur	VéEp	RilEp	RexEp
8	1	8,00	1,66	2,31
12	1,5	8,00	1,70	2,35
16	2	8,00	1,65	2,29
20	2,5	8,00	1,68	2,32
32	4	8,00	1,60	2,24
40	5	8,00	1,65	2,30
80	10	8,00	1,66	2,31

160	20	8,00	1,65	2,30
200	25	8,00	1,68	2,32
320	40	8,00	1,68	2,32
400	50	8,00	1,65	2,29
Valeurs moyennes :		8,00	1,66	2,30

Ce dernier tableau montre qu'au rapport VéEp = 8 les valeurs des rapports **RilEp** et **RexEp** sont pratiquement constants : **RilEp** = 1,66 et **RexEp** = 2,30

6.3. Généralisation des valeurs de **RilEp** et de **RexEp** en fonction de VéEp :

Ce que nous venons d'observer pour un rapport VéEp = 8 nous allons l'observer pour tous les rapports VéEp. Calculons d'abord tous les rapports **RilEp**, **RexEp** et VéEp :

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
0,6	6	10,00	2,09	2,73
0,6	8	13,33	2,68	3,29
0,8	6	7,50	1,60	2,26
0,8	8	10,00	2,00	2,62
0,8	10	12,50	2,39	3,00
1	6	6,00	1,34	2,01
1	8	8,00	1,66	2,31
1	10	10,00	1,99	2,62
1	12	12,00	2,41	3,01
1,2	6	5,00	1,15	1,85
1,2	8	6,67	1,39	2,05
1,2	10	8,33	1,69	2,33
1,2	12	10,00	2,03	2,67
1,2	16	13,33	2,54	3,11
1,5	8	5,33	1,16	1,86
1,5	10	6,67	1,40	2,07
1,5	12	8,00	1,70	2,35
1,5	16	10,67	2,13	2,74
1,5	20	13,33	2,60	3,18
2	10	5,00	1,09	1,79
2	12	6,00	1,30	1,98
2	16	8,00	1,65	2,29
2	20	10,00	2,04	2,66
2	25	12,50	2,41	3,01

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
2,5	12	4,80	1,10	1,80
2,5	16	6,40	1,38	2,04
2,5	20	8,00	1,68	2,32
2,5	25	10,00	1,95	2,57
2,5	32	12,80	2,41	3,01
3	16	5,33	1,17	1,87
3	20	6,67	1,43	2,09
3	25	8,33	1,57	2,23
3	32	10,67	2,04	2,65
3	40	13,33	2,57	3,16
4	20	5,00	1,13	1,83
4	25	6,25	1,34	2,01
4	32	8,00	1,60	2,24
4	40	10,00	2,01	2,63
4	50	12,50	2,41	3,00
5	25	5,00	1,10	1,80
5	32	6,40	1,33	2,00
5	40	8,00	1,65	2,30
5	50	10,00	1,95	2,56
5	63	12,60	2,40	2,99

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
6	32	5,33	1,12	1,82
6	40	6,67	1,44	2,12
6	50	8,33	1,69	2,33
6	63	10,50	2,07	2,69
6	80	13,33	2,63	3,22
8	40	5,00	1,12	1,82
8	50	6,25	1,32	2,00
8	63	7,88	1,62	2,28
8	80	10,00	2,03	2,66
8	100	12,50	2,40	3,00
10	50	5,00	1,11	1,82
10	63	6,30	1,32	2,00
10	80	8,00	1,66	2,31
10	100	10,00	1,99	2,62
10	125	12,50	2,41	3,01
12	63	5,25	1,15	1,85
12	80	6,67	1,41	2,07
12	100	8,33	1,70	2,34
12	125	10,42	2,03	2,65
12	160	13,33	2,55	3,13

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
15	80	5,33	1,17	1,87
15	100	6,67	1,40	2,08
15	125	8,33	1,70	2,34
15	160	10,67	2,12	2,74
15	200	13,33	2,60	3,18
20	125	6,25	1,31	1,99
20	160	8,00	1,65	2,30
20	200	10,00	2,04	2,66
20	250	12,50	2,46	3,05
20	320	16,00	3,10	3,66
25	160	6,40	1,36	2,03
25	200	8,00	1,68	2,32
25	250	10,00	2,03	2,65
25	320	12,80	2,54	3,13
25	400	16,00	3,03	3,59
30	200	6,67	1,43	2,10
30	250	8,33	1,74	2,38
30	320	10,67	2,15	2,77
30	400	13,33	2,55	3,13
30	500	16,67	3,21	3,77
40	320	8,00	1,68	2,32
40	400	10,00	2,01	2,63
40	500	12,50	2,48	3,08
50	400	8,00	1,65	2,29
50	500	10,00	1,99	2,59

- Classons les valeurs en fonction de l'ordre croissant de VéEp :

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
2,5	12	4,8	1,1	1,8
1,2	6	5	1,15	1,85
2	10	5	1,09	1,79

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
1,2	8	6,67	1,39	2,05
1,5	10	6,67	1,4	2,07
3	20	6,67	1,43	2,09

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
0,6	6	10	2,09	2,73
0,8	8	10	2	2,62
1	10	10	1,99	2,62

Ep	Vé	VéEp	RilEp	RexEp
0,8	10	12,5	2,39	3
2	25	12,5	2,41	3,01
4	50	12,5	2,41	3

4	20	5	1,13	1,83
5	25	5	1,1	1,8
8	40	5	1,12	1,82
10	50	5	1,11	1,82
12	63	5,25	1,15	1,85
1,5	8	5,33	1,16	1,86
3	16	5,33	1,17	1,87
6	32	5,33	1,12	1,82
15	80	5,33	1,17	1,87
1	6	6	1,34	2,01
2	12	6	1,3	1,98
4	25	6,25	1,34	2,01
8	50	6,25	1,32	2
20	125	6,25	1,31	1,99
10	63	6,3	1,32	2
2,5	16	6,4	1,38	2,04
5	32	6,4	1,33	2
25	160	6,4	1,36	2,03

6	40	6,67	1,44	2,12
12	80	6,67	1,41	2,07
15	100	6,67	1,4	2,08
30	200	6,67	1,43	2,1
0,8	6	7,5	1,6	2,26
8	63	7,88	1,62	2,28
1	8	8	1,66	2,31
1,5	12	8	1,7	2,35
2	16	8	1,65	2,29
2,5	20	8	1,68	2,32
4	32	8	1,6	2,24
5	40	8	1,65	2,3
10	80	8	1,66	2,31
20	160	8	1,65	2,3
25	200	8	1,68	2,32
40	320	8	1,68	2,32
50	400	8	1,65	2,29
1,2	10	8,33	1,69	2,33
3	25	8,33	1,57	2,23
6	50	8,33	1,69	2,33
12	100	8,33	1,7	2,34
15	125	8,33	1,7	2,34

1,2	12	10	2,03	2,67
2	20	10	2,04	2,66
2,5	25	10	1,95	2,57
4	40	10	2,01	2,63
5	50	10	1,95	2,56
8	80	10	2,03	2,66
10	100	10	1,99	2,62
20	200	10	2,04	2,66
25	250	10	2,03	2,65
40	400	10	2,01	2,63
50	500	10	1,99	2,59
12	125	10,42	2,03	2,65
6	63	10,5	2,07	2,69
1,5	16	10,67	2,13	2,74
3	32	10,67	2,04	2,65
15	160	10,67	2,12	2,74
30	320	10,67	2,15	2,77
1	12	12	2,41	3,01

8	100	12,5	2,4	3
10	125	12,5	2,41	3,01
20	250	12,5	2,46	3,05
40	500	12,5	2,48	3,08
5	63	12,6	2,4	2,99
2,5	32	12,8	2,41	3,01
25	320	12,8	2,54	3,13
0,6	8	13,33	2,68	3,29
1,2	16	13,33	2,54	3,11
1,5	20	13,33	2,6	3,18
3	40	13,33	2,57	3,16
6	80	13,33	2,63	3,22
12	160	13,33	2,55	3,13
15	200	13,33	2,6	3,18
30	400	13,33	2,55	3,13
20	320	16	3,1	3,66
25	400	16	3,03	3,59
30	500	16,67	3,21	3,77

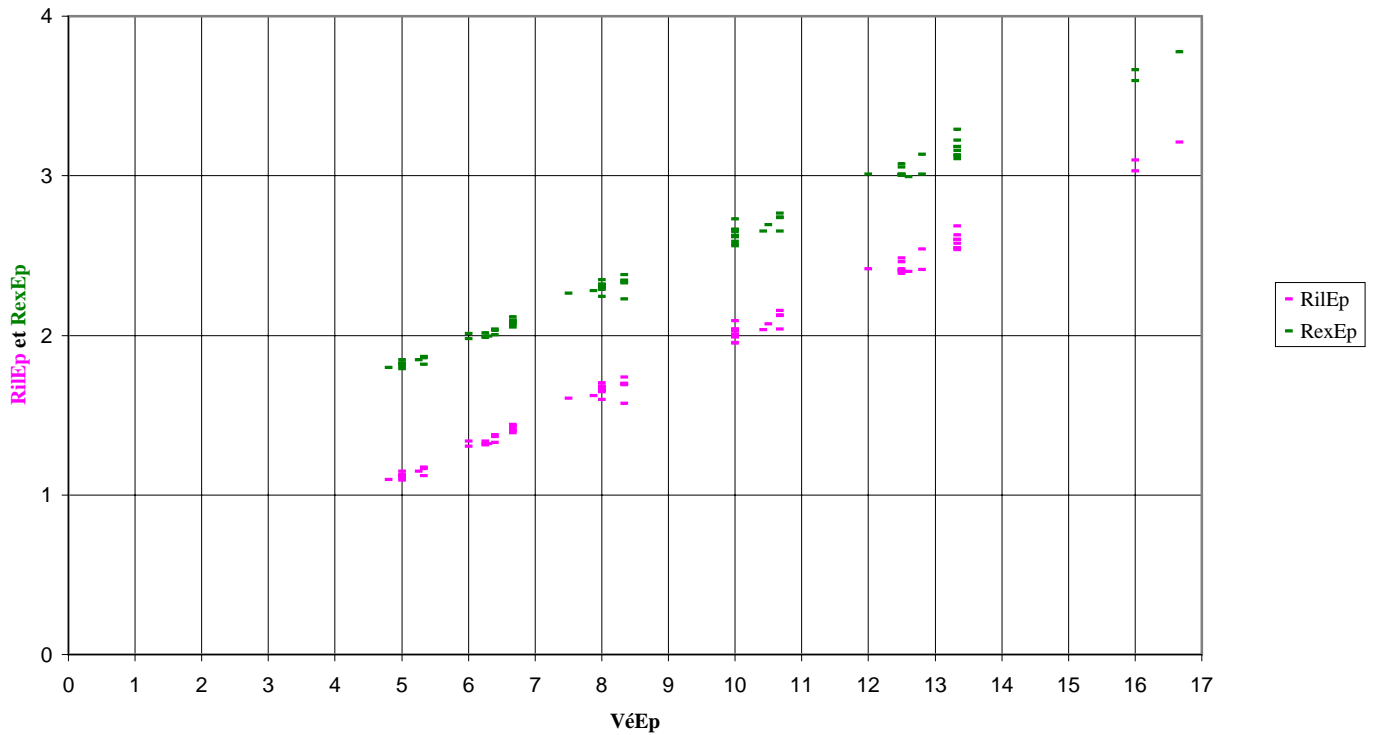
- La valeur du vé évolue de 4,8 à 16,67 fois l'épaisseur (VéEp).
- A chaque VéEp correspond un couple quasi constant **RilEp**, **RexEp**.

6.4. Recherche des relations générales :

6.4.1. Graphique des valeurs de **RilEp** et de **RexEp** en fonction de VéEp :

Procédons à une représentation graphique des valeurs du dernier tableau :

RilEp et RexEp en fonction de VéEp

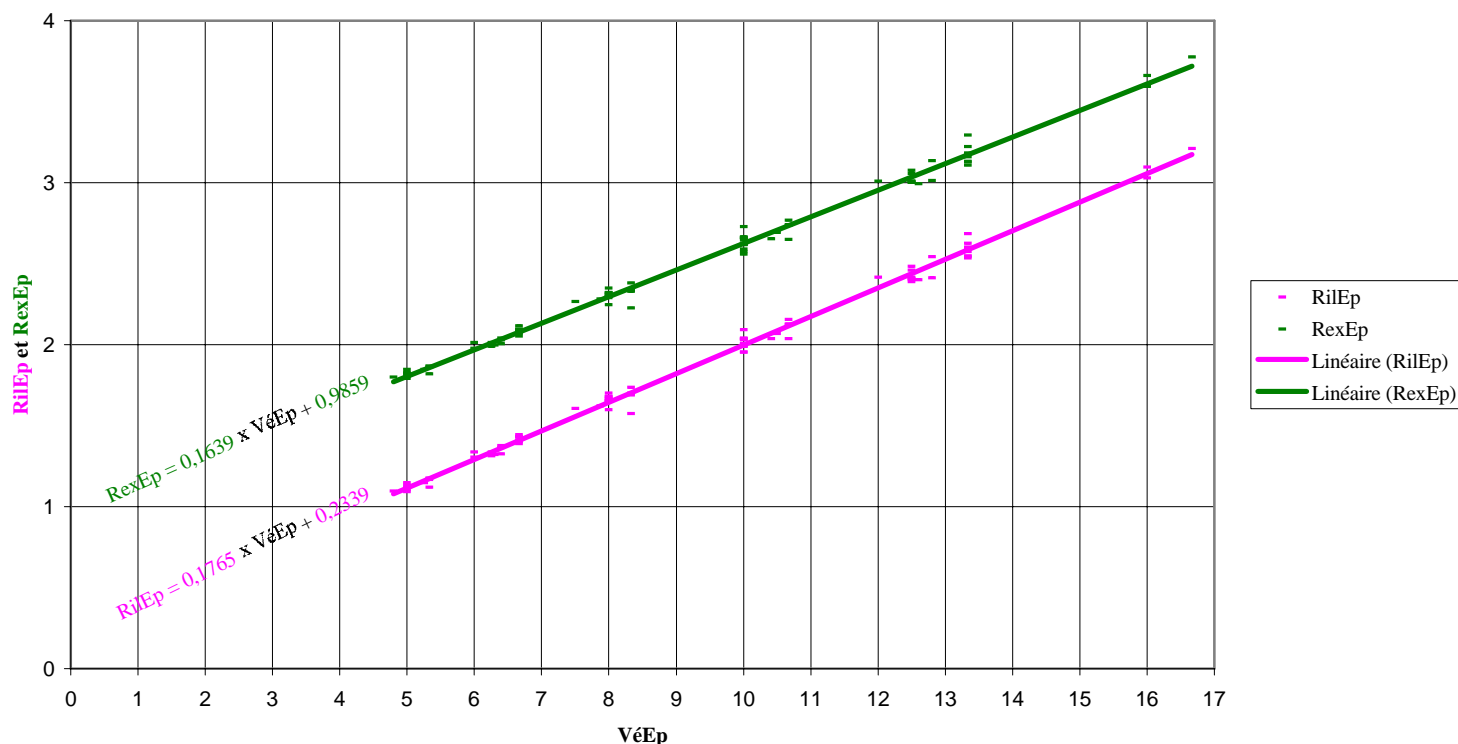


La configuration de ces deux « nuages de points » permet de penser raisonnablement à une évolution proportionnelle des deux rapports RilEp et RexEp en fonction du rapport VéEp.

Les fluctuations observées peuvent être en partie attribuées aux valeurs enregistrées et à la manière dont elles ont été mesurées et arrondies au dixième de mm dans le tableau de valeurs initial.

Afin de traduire cette proportionnalité nous allons à nouveau utiliser la technique des droites de régression linéaire et exprimer, par des équations relativement simples les variations des deux rapports :

RilEp et RexEp en fonction de VéEp



$$\begin{aligned}
 RexEp &= 0,1639 \times VéEp + 0,9859 \\
 RilEp &= 0,1765 \times VéEp + 0,2339 \\
 \tilde{O} \text{ Rex} &= 0,1639 \times Vé + 0,9859 \times Ep \\
 \tilde{O} \text{ Ril} &= 0,1765 \times Vé + 0,2339 \times Ep \\
 \tilde{O} \text{ Ri} &= Rex - Ep = 0,1639 \times Vé + (0,9859 - 1) \times Ep \\
 \tilde{O} \text{ Ri} &= 0,1639 \times Vé - 0,0141 \times Ep
 \end{aligned}$$

Désormais, nous pouvons exprimer la perte au pli en fonction d'une épaisseur, d'un vé et d'un angle donnés. Nous pourrions aussi exprimer la largeur théorique d'un Vé en fonction d'un Ri et d'une Ep donnés :

$$\tilde{O} \text{ Vé} = (\text{Ri} + 0,0141 \times Ep) / 0,1639$$

6.4.2. Exemple :

Reprenons nos deux relations initiales :

$$\tilde{O} \text{ Relation 1 Pour } \beta \geq 90^\circ \text{ Perte au pli} = Ril \times \beta^{rd} - 2 \times Rex$$

$$\tilde{O} \text{ Relation 2 Pour } \beta \leq 90^\circ \text{ Perte au pli} = Ril \times \beta^{rd} - 2 \times Rex \times \tan(\beta/2)$$

Choisissons, à titre d'exemple, une tôle d'épaisseur 5 pliée à 135° (angle α du pli) dans un vé de 50 mm.

$$Ep = 5$$

$$Vé = 50$$

$$\alpha = 135^\circ$$

Le tableau initial nous fournit une perte au pli de -3 mm.

Pour le calcul, c'est la relation 2 qui s'applique car l'angle du pli est de 135° :

$$\begin{aligned} \text{Perte au pli} &= Ri \times \beta^{rd} - 2 \times Rex \times \tan(\beta/2) \\ \text{Perte au pli} &= (0,1765 \times V\acute{e} + 0,2339 \times Ep) \times \text{RADIANS}(180-\alpha^\circ) \\ &\quad - 2 \times (0,1639 \times V\acute{e} + 0,9859 \times Ep) \times \tan(\text{RADIANS}(180-\alpha^\circ)/2) \end{aligned}$$

Le calcul nous fournit la réponse suivante :

Perte au pli = **-3.03 mm**

La formule à entrer dans le tableur est la suivante :

= SI

$$\begin{aligned} &(\alpha < 90 \\ &\quad ; Ri * \text{RADIANS}(180 - \alpha) - 2 * (Rex) \\ &\quad ; Ri * \text{RADIANS}(180 - \alpha) - \\ &\quad \quad 2 * (Rex) * \tan(\text{RADIANS}((180 - \alpha)/2)) \\ &) \end{aligned}$$

Œ Relation 1 pour $\alpha \leq 90$:

$$\begin{aligned} \text{Perte au pli} &= (0,1765 \times V\acute{e} + 0,2339 \times Ep) \times \text{RADIANS}(180-\alpha^\circ) \\ &\quad - 2 \times (0,1639 \times V\acute{e} + 0,9859 \times Ep) \end{aligned}$$

Œ Relation 2 pour $\alpha \geq 90$:

$$\begin{aligned} \text{Perte au pli} &= (0,1765 \times V\acute{e} + 0,2339 \times Ep) \times \text{RADIANS}(180-\alpha^\circ) \\ &\quad - 2 \times (0,1639 \times V\acute{e} + 0,9859 \times Ep) \times \tan(\text{RADIANS}(180-\alpha^\circ)/2) \end{aligned}$$

RiEp

Valeur de la pente : 0,176458923777475

Valeur de l'ordonnée à l'origine : 0,233899999999998

RexEp

Valeur de la pente : 0,163916766583276

Valeur de l'ordonnée à l'origine : 0,9858999999999973

A titre indicatif et afin de permettre des comparaisons vous trouverez au § 7.1 et § 7.2 les tableaux de pertes au pli calculés à partir des formules présentées précédemment et la valeur de **Ri**, le rayon intérieur, obtenue par la relation :

$$Ri = Rex - Ep.$$

Le plus simple est de préparer une feuille de calcul dans un tableur et d'obtenir directement la perte au pli en fonction des trois données que sont :

- l'épaisseur
- la largeur du vé
- l'angle du pli

selon le modèle suivant par exemple :

Saisie des données :	
Ep=	5mm
Vé=	50mm
Alpha=	135°

Résultat :	
Perte au pli=	-3,03mm

7. Tableaux de valeurs calculés :

7.1. Perte au pli de $E_p = 0,6 \text{ mm}$ à $E_p = 5 \text{ mm}$:

Le rayon intérieur a été recalculé à partir de la relation $R_i = R_{ex} - E_p$.

Ep	Vé	Ri	F 10 ⁴ N	b	180°	165°	150°	135°	120°	105°	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°
0,6	6	1,0	4,0	4	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,3	-1,0	-0,6	-0,3	0,0	0,3	0,6
0,6	8	1,3	3,0	5,5	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,4	-1,0	-0,6	-0,1	0,3	0,7	1,1
0,8	6	1,0	7,2	4	0,0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,7	-1,1	-1,6	-1,3	-0,9	-0,6	-0,3	0,0	0,4
0,8	8	1,3	5,4	5,5	0,0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,8	-1,1	-1,7	-1,3	-0,9	-0,4	0,0	0,4	0,8
0,8	10	1,7	4,3	7	0,0	-0,1	-0,3	-0,5	-0,8	-1,2	-1,8	-1,3	-0,8	-0,3	0,3	0,8	1,3
1	6	1,0	11,2	4	0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,3	-1,9	-1,6	-1,2	-0,9	-0,6	-0,2	0,1
1	8	1,3	8,4	5,5	0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,4	-2,0	-1,6	-1,1	-0,7	-0,3	0,1	0,6
1	10	1,7	6,7	7	0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,4	-2,1	-1,6	-1,1	-0,5	0,0	0,5	1,0
1	12	2,0	5,6	8,5	0,0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,9	-1,5	-2,2	-1,6	-1,0	-0,4	0,3	0,9	1,5
1,2	6	1,0	16,1	4	0,0	-0,2	-0,5	-0,7	-1,1	-1,6	-2,2	-1,9	-1,5	-1,2	-0,8	-0,5	-0,1
1,2	8	1,3	12,1	5,5	0,0	-0,2	-0,5	-0,7	-1,1	-1,6	-2,3	-1,9	-1,4	-1,0	-0,6	-0,1	0,3
1,2	10	1,7	9,7	7	0,0	-0,2	-0,4	-0,7	-1,1	-1,7	-2,4	-1,9	-1,4	-0,8	-0,3	0,2	0,8
1,2	12	2,0	8,1	8,5	0,0	-0,2	-0,4	-0,7	-1,1	-1,7	-2,5	-1,9	-1,3	-0,6	0,0	0,6	1,2
1,2	16	2,7	6,1	11	0,0	-0,2	-0,4	-0,7	-1,1	-1,8	-2,7	-1,9	-1,1	-0,3	0,5	1,3	2,1
1,5	8	1,3	18,9	5,5	0,0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,4	-2,0	-2,8	-2,4	-1,9	-1,4	-1,0	-0,5	0,0
1,5	10	1,7	15,1	7	0,0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,4	-2,0	-2,9	-2,4	-1,8	-1,3	-0,7	-0,1	0,4
1,5	12	2,0	12,6	8,5	0,0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,4	-2,1	-3,0	-2,4	-1,7	-1,1	-0,4	0,2	0,9
1,5	16	2,7	9,5	11	0,0	-0,2	-0,5	-0,9	-1,4	-2,1	-3,2	-2,4	-1,6	-0,7	0,1	0,9	1,8
1,5	20	3,3	7,6	14	0,0	-0,2	-0,5	-0,9	-1,4	-2,2	-3,4	-2,4	-1,4	-0,4	0,6	1,7	2,7
2	10	1,7	26,9	7	0,0	-0,4	-0,8	-1,2	-1,8	-2,6	-3,7	-3,1	-2,5	-2,0	-1,4	-0,8	-0,2
2	12	2,0	22,4	8,5	0,0	-0,4	-0,8	-1,2	-1,8	-2,7	-3,8	-3,1	-2,5	-1,8	-1,1	-0,4	0,2
2	16	2,7	16,8	11	0,0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,9	-2,7	-4,0	-3,2	-2,3	-1,4	-0,6	0,3	1,2
2	20	3,3	13,5	14	0,0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,9	-2,8	-4,2	-3,2	-2,1	-1,1	0,0	1,0	2,1
2	25	4,2	10,8	17,5	0,0	-0,3	-0,7	-1,2	-1,9	-2,9	-4,5	-3,2	-1,9	-0,6	0,6	1,9	3,2
2,5	12	2,0	35,0	8,5	0,0	-0,5	-1,0	-1,5	-2,3	-3,3	-4,6	-3,9	-3,2	-2,5	-1,8	-1,1	-0,4
2,5	16	2,7	26,3	11	0,0	-0,4	-0,9	-1,5	-2,3	-3,3	-4,8	-3,9	-3,0	-2,1	-1,3	-0,4	0,5
2,5	20	3,3	21,0	14	0,0	-0,4	-0,9	-1,5	-2,3	-3,4	-5,0	-3,9	-2,9	-1,8	-0,7	0,4	1,4
2,5	25	4,2	16,8	17,5	0,0	-0,4	-0,9	-1,5	-2,3	-3,5	-5,3	-4,0	-2,7	-1,4	0,0	1,3	2,6
2,5	32	5,3	13,1	22	0,0	-0,4	-0,9	-1,5	-2,4	-3,7	-5,6	-4,0	-2,4	-0,7	0,9	2,5	4,2
3	16	2,7	37,8	11	0,0	-0,5	-1,1	-1,9	-2,8	-3,9	-5,6	-4,7	-3,8	-2,9	-1,9	-1,0	-0,1
3	20	3,3	30,3	14	0,0	-0,5	-1,1	-1,8	-2,8	-4,0	-5,8	-4,7	-3,6	-2,5	-1,4	-0,3	0,8
3	25	4,2	24,2	17,5	0,0	-0,5	-1,1	-1,8	-2,8	-4,1	-6,1	-4,7	-3,4	-2,1	-0,7	0,6	2,0
3	32	5,3	18,9	22	0,0	-0,5	-1,1	-1,8	-2,8	-4,3	-6,4	-4,8	-3,1	-1,4	0,2	1,9	3,5
3	40	6,7	15,1	28	0,0	-0,5	-1,0	-1,8	-2,9	-4,4	-6,8	-4,8	-2,8	-0,7	1,3	3,3	5,4
4	20	3,3	53,8	14	0,0	-0,7	-1,5	-2,5	-3,7	-5,2	-7,4	-6,3	-5,1	-3,9	-2,8	-1,6	-0,4
4	25	4,2	43,1	17,5	0,0	-0,7	-1,5	-2,5	-3,7	-5,3	-7,7	-6,3	-4,9	-3,5	-2,1	-0,7	0,7
4	32	5,3	33,6	22	0,0	-0,7	-1,5	-2,4	-3,7	-5,5	-8,0	-6,3	-4,6	-2,9	-1,1	0,6	2,3
4	40	6,7	26,9	28	0,0	-0,7	-1,4	-2,4	-3,8	-5,7	-8,4	-6,4	-4,3	-2,2	-0,1	2,0	4,1
4	50	8,3	21,5	35	0,0	-0,6	-1,4	-2,4	-3,8	-5,9	-9,0	-6,4	-3,8	-1,3	1,3	3,8	6,4
5	25	4,2	67,3	17,5	0,0	-0,9	-1,9	-3,1	-4,6	-6,5	-9,3	-7,8	-6,4	-4,9	-3,4	-2,0	-0,5
5	32	5,3	52,6	22	0,0	-0,9	-1,9	-3,1	-4,6	-6,7	-9,6	-7,9	-6,1	-4,3	-2,5	-0,7	1,1
5	40	6,7	42,1	28	0,0	-0,9	-1,8	-3,1	-4,6	-6,9	-10,0	-7,9	-5,7	-3,6	-1,4	0,7	2,9
5	50	8,3	33,6	35	0,0	-0,8	-1,8	-3,0	-4,7	-7,1	-10,6	-7,9	-5,3	-2,7	-0,1	2,5	5,1
5	63	10,5	26,7	45	0,0	-0,8	-1,7	-3,0	-4,8	-7,3	-11,2	-8,0	-4,8	-1,6	1,7	4,9	8,1

7.2. Perte au pli de $E_p = 6 \text{ mm}$ à $E_p = 50 \text{ mm}$:

Ep	Vé	Ri	F 10 ⁴ N	b	180°	165°	150°	135°	120°	105°	90°	75°	60°	45°	30°	15°	0°
6	32	5,3	75,7	22	0,0	-1,1	-2,3	-3,7	-5,5	-7,9	-11,2	-9,4	-7,6	-5,7	-3,9	-2,0	-0,2
6	40	6,7	60,6	28	0,0	-1,1	-2,3	-3,7	-5,5	-8,1	-11,7	-9,4	-7,2	-5,0	-2,8	-0,6	1,6
6	50	8,3	48,4	35	0,0	-1,0	-2,2	-3,7	-5,6	-8,3	-12,2	-9,5	-6,8	-4,1	-1,4	1,2	3,9
6	63	10,5	38,4	45	0,0	-1,0	-2,1	-3,6	-5,6	-8,5	-12,8	-9,5	-6,3	-3,0	0,3	3,6	6,8
6	80	13,3	30,3	55	0,0	-0,9	-2,1	-3,6	-5,7	-8,9	-13,7	-9,6	-5,6	-1,5	2,6	6,6	10,7
8	40	6,7	107,7	28	0,0	-1,5	-3,1	-5,0	-7,3	-10,5	-14,9	-12,5	-10,2	-7,8	-5,5	-3,2	-0,8
8	50	8,3	86,1	35	0,0	-1,4	-3,0	-4,9	-7,4	-10,7	-15,4	-12,6	-9,8	-7,0	-4,2	-1,4	1,4
8	63	10,5	68,4	44	0,0	-1,4	-3,0	-4,9	-7,4	-11,0	-16,0	-12,6	-9,2	-5,8	-2,4	1,0	4,4
8	80	13,3	53,8	56	0,0	-1,3	-2,9	-4,8	-7,5	-11,3	-16,9	-12,7	-8,5	-4,3	-0,1	4,0	8,2
8	100	16,7	43,1	70	0,0	-1,3	-2,8	-4,8	-7,6	-11,7	-17,9	-12,8	-7,7	-2,6	2,5	7,6	12,8
10	50	8,3	134,6	35	0,0	-1,8	-3,8	-6,2	-9,2	-13,1	-18,6	-15,7	-12,7	-9,8	-6,9	-4,0	-1,0
10	63	10,5	106,8	44	0,0	-1,8	-3,8	-6,2	-9,2	-13,4	-19,2	-15,7	-12,2	-8,7	-5,1	-1,6	1,9
10	80	13,3	84,1	56	0,0	-1,7	-3,7	-6,1	-9,3	-13,7	-20,1	-15,8	-11,5	-7,2	-2,9	1,4	5,8
10	100	16,7	67,3	70	0,0	-1,7	-3,6	-6,1	-9,4	-14,1	-21,1	-15,9	-10,6	-5,4	-0,2	5,1	10,3
10	125	20,8	53,8	88	0,0	-1,6	-3,5	-6,0	-9,5	-14,6	-22,4	-16,0	-9,6	-3,2	3,2	9,6	15,9
12	63	10,5	153,8	44	0,0	-2,2	-4,6	-7,4	-11,0	-15,8	-22,4	-18,8	-15,2	-11,5	-7,9	-4,2	-0,6
12	80	13,3	121,1	56	0,0	-2,1	-4,5	-7,4	-11,1	-16,1	-23,3	-18,9	-14,4	-10,0	-5,6	-1,2	3,3
12	100	16,7	96,9	70	0,0	-2,1	-4,4	-7,3	-11,2	-16,5	-24,3	-19,0	-13,6	-8,3	-2,9	2,5	7,8
12	125	20,8	77,5	88	0,0	-2,0	-4,3	-7,2	-11,3	-17,1	-25,6	-19,1	-12,6	-6,1	0,5	7,0	13,5
12	160	26,7	60,6	112	0,0	-1,9	-4,1	-7,1	-11,4	-17,8	-27,4	-19,2	-11,1	-3,0	5,1	13,3	21,4
15	80	13,3	189,2	56	0,0	-2,7	-5,7	-9,3	-13,8	-19,7	-28,1	-23,5	-18,9	-14,3	-9,7	-5,0	-0,4
15	100	16,7	151,4	70	0,0	-2,7	-5,6	-9,2	-13,9	-20,2	-29,1	-23,6	-18,1	-12,5	-7,0	-1,4	4,1
15	125	20,8	121,1	88	0,0	-2,6	-5,5	-9,1	-14,0	-20,7	-30,4	-23,7	-17,0	-10,3	-3,6	3,1	9,8
15	160	26,7	94,6	112	0,0	-2,5	-5,4	-9,0	-14,1	-21,4	-32,2	-23,9	-15,6	-7,2	1,1	9,4	17,7
15	200	33,3	75,7	140	0,0	-2,4	-5,2	-8,9	-14,3	-22,2	-34,2	-24,0	-13,9	-3,7	6,4	16,6	26,8
20	125	20,8	215,3	88	0,0	-3,6	-7,5	-12,3	-18,4	-26,7	-38,4	-31,4	-24,4	-17,4	-10,4	-3,4	3,6
20	160	26,7	168,2	112	0,0	-3,5	-7,4	-12,2	-18,6	-27,4	-40,2	-31,6	-23,0	-14,3	-5,7	2,9	11,5
20	200	33,3	134,6	140	0,0	-3,4	-7,2	-12,1	-18,8	-28,3	-42,2	-31,8	-21,3	-10,8	-0,4	10,1	20,6
20	250	41,7	107,7	175	0,0	-3,2	-7,0	-12,0	-19,0	-29,3	-44,8	-32,0	-19,2	-6,4	6,3	19,1	31,9
20	320	53,3	84,1	224	0,0	-3,0	-6,7	-11,8	-19,3	-30,7	-48,3	-32,3	-16,3	-0,3	15,7	31,7	47,7
25	160	26,7	262,8	112	0,0	-4,5	-9,4	-15,4	-23,1	-33,5	-48,2	-39,3	-30,4	-21,4	-12,5	-3,6	5,3
25	200	33,3	210,3	140	0,0	-4,4	-9,2	-15,3	-23,2	-34,3	-50,2	-39,5	-28,7	-17,9	-7,2	3,6	14,4
25	250	41,7	168,2	175	0,0	-4,2	-9,0	-15,1	-23,5	-35,3	-52,8	-39,7	-26,6	-13,5	-0,5	12,6	25,7
25	320	53,3	131,4	224	0,0	-4,0	-8,7	-14,9	-23,8	-36,8	-56,3	-40,0	-23,7	-7,4	8,9	25,3	41,6
25	400	66,7	105,1	280	0,0	-3,7	-8,3	-14,7	-24,1	-38,4	-60,4	-40,4	-20,4	-0,3	19,7	39,7	59,7
30	200	33,3	302,8	140	0,0	-5,3	-11,3	-18,4	-27,7	-40,3	-58,3	-47,2	-36,1	-25,0	-14,0	-2,9	8,2
30	250	41,7	242,2	175	0,0	-5,2	-11,0	-18,3	-27,9	-41,3	-60,8	-47,4	-34,0	-20,6	-7,2	6,1	19,5
30	320	53,3	189,2	224	0,0	-5,0	-10,7	-18,1	-28,2	-42,8	-64,3	-47,7	-31,1	-14,5	2,1	18,8	35,4
30	400	66,7	151,4	280	0,0	-4,7	-10,4	-17,9	-28,6	-44,4	-68,4	-48,1	-27,8	-7,4	12,9	33,2	53,5
30	500	83,3	121,1	350	0,0	-4,4	-9,9	-17,6	-29,0	-46,5	-73,5	-48,5	-23,6	1,3	26,3	51,2	76,2
40	320	53,3	336,4	224	0,0	-7,0	-14,8	-24,4	-37,2	-54,9	-80,4	-63,2	-45,9	-28,7	-11,5	5,8	23,0
40	400	66,7	269,1	280	0,0	-6,7	-14,4	-24,2	-37,5	-56,5	-84,4	-63,5	-42,6	-21,7	-0,7	20,2	41,1
40	500	83,3	215,3	350	0,0	-6,4	-14,0	-23,9	-38,0	-58,6	-89,5	-64,0	-38,4	-12,9	12,7	38,2	63,8
50	400	66,7	420,5	280	0,0	-8,7	-18,5	-30,5	-46,5	-68,6	-100,5	-78,9	-57,4	-35,9	-14,3	7,2	28,8
50	500	83,3	336,4	350	0,0	-8,4	-18,0	-30,3	-46,9	-70,6	-105,5	-79,4	-53,2	-27,1	-0,9	25,3	51,4

8. Précautions d'emploi :

8.1. *Des écarts pour certaines valeurs de perte au pli :*

Les valeurs calculées sont particulièrement fiables pour les épaisseurs de 0,6 mm à 25 mm : nous retrouvons pratiquement toujours les résultats du tableau de valeurs initial en dehors de quelques exceptions pour lesquelles les valeurs restent très proches. Rappelons l'effet de lissage produit par l'emploi des formules. Pour les épaisseurs de 30, 40 et 50 mm des différences notables apparaissent cependant mais seulement pour des angles α inférieurs à 30° . N'oublions pas certaines des imperfections du modèle : il ne faut pas négliger les nombreuses hypothèses que nous avons faites parmi lesquelles les évolutions linéaires de plusieurs de nos paramètres.

Les formules permettent d'évaluer les pertes au pli avec un nombre très important de décimales mais on pourra se contenter d'arrondir au dixième de mm près.

8.2. *L'hypothèse du volume constant :*

Une hypothèse essentielle et évidente n'a pas été retenue dans notre recherche : le volume de la pièce dépliée doit être égal au volume de la pièce pliée ou, ce qui revient au même, l'aire de la section de la pièce dépliée doit être égale à l'aire de la section de la pièce pliée.

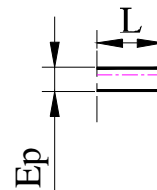
Le calcul permet de confirmer rapidement que cette hypothèse n'est pas tout à fait vérifiée par le tableau de valeurs initial et les relations que nous en avons déduites.

Reprenons notre exemple pour une tôle de 5 dans un V de 50 à 135° .

$$\begin{aligned} \text{Rex} &= 0,1639 \times V\acute{e} + 0,9859 \times E_p \\ \text{Rex} &= 13,1245 \text{ mm} \\ \text{Ril} &= 0,1765 \times V\acute{e} + 0,2339 \times E_p \\ \text{Ril} &= 9,9945 \text{ mm} \end{aligned}$$

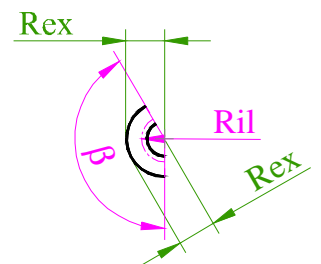
8.2.1. A_d : Aire de la section dépliée :

$$\begin{aligned} L &= \text{Ril} \times \beta^{\text{rd}} \\ L &= 9,9945 \times 0,79 = 7,85 \text{ mm} \\ A_d &= L \times E_p \\ A_d &= 7,85 \times 5 = 39,25 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



8.2.2. A_p : Aire de la section pliée :

$$\begin{aligned} A_p &= ((\pi \times \text{Rex}^2) - (\pi \times (\text{Rex} - E_p)^2)) / 360 \times \beta^\circ \\ A_p &= 41,72 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$



8.2.3. Les deux aires sont inégales :

Valeur de la différence entre les deux aires :

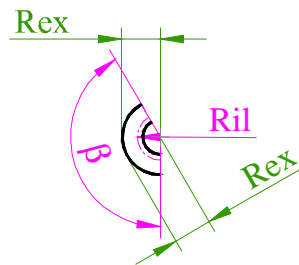
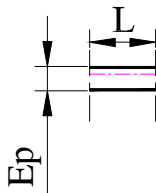
$$A_p - A_d = 41,72 - 39,25 = 2,47 \text{ mm}^2$$

Soit environ **6%** de l'aire de la section pliée.

8.3. conclusion :

Malgré toutes les précautions prises il restera toujours à la charge de l'opérateur la réalisation d'essais concrets qui viendront confirmer nos hypothèses ou lui permettre, le cas échéant, de rectifier les valeurs obtenues par notre modèle ou encore – pourquoi pas – d'en rechercher un autre plus adapté.

9. Le calcul de l'allongement pour cent A% :



9.1. hypothèses et précautions d'emploi :

Nous considérerons que seule la partie cylindrique de rayon **Rex** est prise en compte dans notre calcul et nous négligerons la progressivité de la déformation à la proximité immédiate du cylindre extérieur.

Il faut rappeler que la valeur l'allongement pour cent (A%) est déterminée en intégrant les effets de la striction et de la rupture dans les mesures. Le résultat n'est donc pas fiable en tant que tel et n'est déterminé ainsi que de façon conventionnelle. Sa valeur reste surtout intéressante en tant qu'élément de comparaison entre les capacités de déformations plastiques de plusieurs matériaux. (Pour en faire un outil plus représentatif il faudrait peut-être créer un « A% rationnel » – comme il existe une limite rationnelle de rupture à la traction – en prenant comme référence la section de rupture afin de déduire la dimension rationnelle de L.)

9.2. détermination de l'allongement pour cent A% :

La relation générale qui permet de connaître A% est la suivante :

$$A\% = ((L - L_0) / L_0) * 100$$

Pour le pliage, il est couramment admis que cette relation devient :

$$A\% = ((\text{Rex} * \beta^{rd} - \text{Ril} * \beta^{rd}) / \text{Ril} * \beta^{rd}) * 100$$

Soit, après simplification:

$$A\% = ((\text{Rex} - \text{Ril}) / \text{Ril}) * 100$$

D'où, d'après nos valeurs :

$$A\% = (((0,1639 * V\acute{e} + 0,9859 * E_p) - (0,1765 * V\acute{e} + 0,2339 * E_p)) / (0,1765 * V\acute{e} + 0,2339 * E_p)) * 100$$

$$A\% = ((0,1639 * V\acute{e} + 0,9859 * E_p - 0,1765 * V\acute{e} - 0,2339 * E_p) / (0,1765 * V\acute{e} + 0,2339 * E_p)) * 100$$

$$\text{O} \quad A\% = ((0,752 * E_p - 0,0126 * V\acute{e}) / (0,2339 * E_p + 0,1765 * V\acute{e})) * 100$$

9.3. exemple d'application :

Reprenons notre exemple : une tôle d'épaisseur **5** pliée à **135°** (angle α du pli) dans un vé de **50** mm.

$$A\% = ((0,752 * E_p - 0,0126 * V\acute{e}) / (0,1765 * V\acute{e} + 0,2339 * E_p)) * 100$$

$$A\% = ((0,752 * 5 - 0,0126 * 50) / (0,1765 * 5 + 0,2339 * 50)) * 100$$

$$A\% = 24,89 \%$$

Pour un S235, les valeurs de A% couramment enregistrées vont aux alentours de 28 à 30% au maximum. Ces valeurs intègrent la striction et la rupture.

Ø On notera que le résultat est indépendant de l'angle du pli.

9.4. calcul de A% pour les autres Vés :

Pour notre exemple, d'autres Vés standards peuvent être utilisés selon les constructeurs de presses plieuses :

- 25 mm
- 32 mm
- 40 mm
- 50 mm
- 63 mm

Le calcul de A% donne les résultats suivants :

Vé de	A%
25	51,19
32	40,12
40	31,80
50	24,89
63	18,99

Nous savons que les tôles en S235 peuvent être pliées sans difficultés dans ces conditions sans obtenir obligatoirement de ruptures à l'extérieur du pli (en gras les valeurs recommandées) ce qui montre vraisemblablement une très forte surestimation de A% par ce mode de calcul.

En effet, certaines valeurs de A% obtenues ici vont très au-delà des limites maximum de A% couramment admises pour un S235.

10. Le paramétrage d'un modeleur en trois dimensions :

Le modeleur étudié ici est Inventor d'Autodesk mais d'autres modeleurs 3D permettent d'intégrer nos paramètres. Nous étudierons les deux paramétrages possibles :

- les tables de pliage,
- le coefficient K-factor.

10.1. Les tables de pliage :

10.1.1. Les outils du modeleur :

Le paramétrage de la fonction dépliage d'Inventor peut s'effectuer, entre autres, en référence à des tables de pliage (en Anglais : Bend Table) situées dans deux fichiers :

- Bend Table (mm). TXT
- Bend Table (mm). XLS

On trouvera ces deux fichiers dans le répertoire :

- C:\Program Files\ Autodesk\Inventor\Samples\Bend Tables

Les deux fichiers existent aussi en pouces : Bend Table (in).

La construction et la modification de ces fichiers ne présente pas de difficultés particulières. Les modèles proposés ne présentent que deux tables exemples :

- l'une pour l'épaisseur 0,5 mm et
- l'autre pour l'épaisseur 2 mm.

Inventor saisit les valeurs

- de l'épaisseur,
- de l'angle du pli et
- du rayon intérieur pour effectuer ses calculs.

Il va ensuite rechercher la table de pliage pour l'épaisseur déclarée (sous réserve que la table existe) puis, en fonction du rayon intérieur et de l'angle du pli, il prendra la valeur d'un paramètre X qui n'est rien d'autre que la perte au pli à une différence près :

$$X = - \text{Perte au pli}$$

En effet, pour Inventor la perte au pli s'exprime de la façon suivante :

$$X = A + B - L$$

alors que, pour nous, la perte au pli s'exprime ainsi :

$$\text{Perte au pli} = L - (A + B)$$

Si les valeurs de saisie du rayon intérieur et de l'angle du pli ne figurent pas dans la table, X serait calculé par interpolations linéaires à partir des valeurs d'encadrement les plus proches présentes dans la table. Par exemple, si vous avez saisi une épaisseur de 1 mm, un Ri de 1,25 mm et un angle α de 28,6° et que dans la **Table de 1mm** on ne trouve que les Ri de 1 mm et de 1,5 mm ainsi que les angles de 25° et de 30°, X serait déterminé par interpolations linéaires par rapport à ces quatre valeurs d'encadrement. D'où l'intérêt de prévoir un pas angulaire relativement faible dans la table, surtout quand α varie dans l'intervalle non linéaire de 90° à 180°. Le pas proposé par Inventor est de 5°.

10.1.2. Les deux formules de calcul de X :

Après analyse, nous allons nous rendre compte que Inventor utilise deux formules aux structures sensiblement proches des deux nôtres :
Après décodage du contenu d'une cellule exprimant la valeur de X nous lisons:

$$= \text{SI} \quad (\alpha > 165$$

$$; 0$$

$$; (\text{SI} \quad (\alpha > 90$$

$$; (2 * (\text{Ri} + \text{Ep}) * \text{TAN}(((180 - \alpha) * \text{PI}() / 180) / 2) - \text{PI}() * ((180 - \alpha) / 180) * (\text{Ri} + (\text{Ep} / 2) * (0,65 + 0,5 * \text{LOG}(\text{Ri} / \text{Ep}))))$$

$$; (2 * (\text{Ri} + \text{Ep}) - \text{PI}() * ((180 - \alpha) / 180) * (\text{Ri} + (\text{Ep} / 2) * (0,65 + 0,5 * \text{LOG}(\text{Ri} / \text{Ep}))))$$

$$)$$

$$)$$

$$)$$

- La valeur de X est systématiquement annulée pour toute valeur de $\alpha > 165^\circ$ car elle est effectivement proche de 0 dans ces cas là.
- Analyse de la première formule quand α est supérieur à 90° :

$$(2 * (\text{Ri} + \text{Ep}) * \text{TAN}(((180 - \alpha) * \text{PI}() / 180) / 2) - \text{PI}() * ((180 - \alpha) / 180) * (\text{Ri} + (\text{Ep} / 2) * (0,65 + 0,5 * \text{LOG}(\text{Ri} / \text{Ep}))))$$

peut s'écrire :

$$(2 * (\text{Rex}) * \text{TAN}(\beta^{\text{rd}} / 2) - \beta^{\text{rd}} * (\text{Ri} + (\text{Ep} / 2) * (0,65 + 0,5 * \text{LOG}(\text{Ri} / \text{Ep}))))$$

- Analyse et réécriture de la seconde formule quand α n'est pas supérieur à 90° :

$$(2 * (\text{Rex}) - \beta^{\text{rd}} * (\text{Ri} + (\text{Ep} / 2) * (0,65 + 0,5 * \text{LOG}(\text{Ri} / \text{Ep}))))$$

Dans ces deux relations, l'expression $(R_i + (E_p/2) \cdot (0,65 + 0,5 \cdot \text{LOG}(R_i/E_p)))$ correspond à la valeur de R_{il} , notre Rayon d'isoligne.

Si sa valeur est exprimée de façon différente, elle donne des résultats pratiquement identiques aux nôtres :

- Par exemple pour une tôle de 2mm pliée dans un vé de 16mm nous avons par notre relation :

$$R_{il} = 0,1765 \times V\acute{e} + 0,2339 \times E_p$$

$$R_{il} = 0,1765 \times 16 + 0,2339 \times 2$$

$$R_{il} = 3,292\text{mm}$$

- et par la relation d'Inventor :

$$\text{où } R_i = 0,1639 \times V\acute{e} - 0,0141 \times E_p = 2,5942\text{mm} \quad (\S 6.4.1)$$

$$R_{il} = 2,5942 + (2/2) \cdot (0,65 + 0,5 \cdot \text{LOG}(2,5942/2))$$

$$R_{il} = 3,301\text{mm}$$

Soient $9 \mu\text{m}$ (microns) d'écart...

Il faut noter que notre préoccupation a, dès le départ, été de déterminer la perte au pli en fonction des trois paramètres : α , l'angle du pli, E_p , l'épaisseur de la tôle et $V\acute{e}$, la **largeur nominale du vé**. Ce dernier paramètre exprime bien notre volonté d'aborder le sujet sous l'angle de la production.

En ce qui concerne Inventor, au $V\acute{e}$ s'est substitué le rayon intérieur R_i qui correspond davantage à un paramètre de conception.

Nous reviendrons, au § 10.1.4, sur la manière dont ces deux paramètres sont liés.

10.1.3. Elaboration de tables de pliage selon les modèles d'Inventor :

Nous allons déterminer les tables de pliage pour les vingt épaisseurs de 0,6 mm à 50 mm.

Il suffira d'incrémenter par exemple tous les 3° pour les valeurs de α : $0^\circ - 3^\circ - 6^\circ - 9^\circ - \dots - 90^\circ - 93^\circ - 96^\circ - 99^\circ - \dots - 180^\circ$.

Pour cela nous utiliserons nos relations dans toute la plage angulaire comme nous l'avons déjà étudiée (§ 6.4.2).

Au lieu de prendre des rayons intérieurs avec un pas de 0,5mm ou de 1mm nous allons rattacher ces rayons intérieurs à ceux théoriquement obtenus dans les outils de pliage standards.

Nous reprendrons le calcul théorique du rayon intérieur, R_i du § 6.4.1 :

$$R_i = 0,1639 \times V\acute{e} - 0,0141 \times E_p$$

Notre modèle de table sera le suivant :

*** TABLE 1

;			
; épaisseur de la tôle			
/S		0,6	
;			
; Vé de			
		6	8
;			
; Ri : Rayon intérieur de pliage :			
/R		0,975041	1,302874
;			
; a = angle d'ouverture : ----- valeur de correction x -----			
;			
/A	0,000000	-0,616982	-1,070039
/A	3,000000	-0,554198	-0,988776
/A	6,000000	-0,491413	-0,907513
Etc... tous les 3° jusqu'à			
/A	180,000000	0,000000	0,000000

A noter : nous ferons apparaître les valeurs recommandées par les constructeurs en rouge dans les tables.

Il nous suffit de reproduire ce modèle jusqu'à l'épaisseur 50mm pour disposer des 20 tables complètes et de sauvegarder le fichier sous le nom BendTable(mm).XLS en lieu et place de l'original.

A chaque épaisseur, les vés déclarés seront ceux utilisés couramment en production.

Il suffira ensuite de recopier le contenu de la feuille de calcul pour générer le fichier texte correspondant (BendTable(mm).TXT) et le sauvegarder comme le précédent (**Attention : le séparateur décimal doit être un point dans ce fichier**).

10.1.4. Expression du rayon intérieur Ri en fonction du Vé :

Au § 6.4.1 nous avons exprimé la relation suivante :

$$Ri = 0,1639 \times Vé - 0,0141 \times Ep$$

Si on souhaite que les dimensions des outils de pliage soient prises en compte dès la conception, il nous faut déclarer précisément la valeur du rayon de pliage correspondant avant de définir les plis.

Sans cette précaution, le modelleur ne sera pas en mesure de fournir un développement conforme aux paramètres de la production.

Le tableau suivant donne les valeurs de **Ri** utilisées par Inventor dans les tables de pliage calculées au § 10.1.3 :

Valeurs du **Rayon intérieur Ri** à déclarer dans Inventor :

Ep	Vé	Ri
0,6	6	0,975
0,6	8	1,303
0,8	6	0,972
0,8	8	1,300
0,8	10	1,628
1	6	0,969
1	8	1,297
1	10	1,625
1	12	1,953
1,2	6	0,967
1,2	8	1,294
1,2	10	1,622
1,2	12	1,950
1,2	16	2,606
1,5	8	1,290
1,5	10	1,618
1,5	12	1,946
1,5	16	2,602
1,5	20	3,257
2	10	1,611
2	12	1,939
2	16	2,594
2	20	3,250
2	25	4,070

Ep	Vé	Ri
2,5	12	1,932
2,5	16	2,587
2,5	20	3,243
2,5	25	4,063
2,5	32	5,210
3	16	2,580
3	20	3,236
3	25	4,056
3	32	5,203
3	40	6,514
4	20	3,222
4	25	4,042
4	32	5,189
4	40	6,500
4	50	8,139
5	25	4,027
5	32	5,175
5	40	6,486
5	50	8,125
5	63	10,256

Ep	V	Ri
6	32	5,161
6	40	6,472
6	50	8,111
6	63	10,242
6	80	13,029
8	40	6,444
8	50	8,083
8	63	10,214
8	80	13,001
8	100	16,279
10	50	8,055
10	63	10,186
10	80	12,972
10	100	16,251
10	125	20,349
12	63	10,158
12	80	12,944
12	100	16,222
12	125	20,320
12	160	26,057

Ep	Vé	Ri
15	80	12,902
15	100	16,180
15	125	20,278
15	160	26,015
15	200	32,572
20	125	20,208
20	160	25,945
20	200	32,501
20	250	40,697
20	320	52,171
25	160	25,874
25	200	32,431
25	250	40,627
25	320	52,101
25	400	65,214
30	200	32,360
30	250	40,556
30	320	52,030
30	400	65,144
30	500	81,535
40	320	51,889
40	400	65,003
40	500	81,394
50	400	64,862
50	500	81,253

Ø Compte tenu de la très faible influence de l'épaisseur de la tôle dans le calcul de **Ri**, les opérateurs sur presse plieuse considèrent souvent, et à juste titre, que le rayon intérieur **Ri** n'est pratiquement fonction que du Vé utilisé soit environ :

$$Ri = 0,1639 * Vé = Vé / 6$$

10.2. Le coefficient K-factor :

10.2.1. calcul de K-factor :

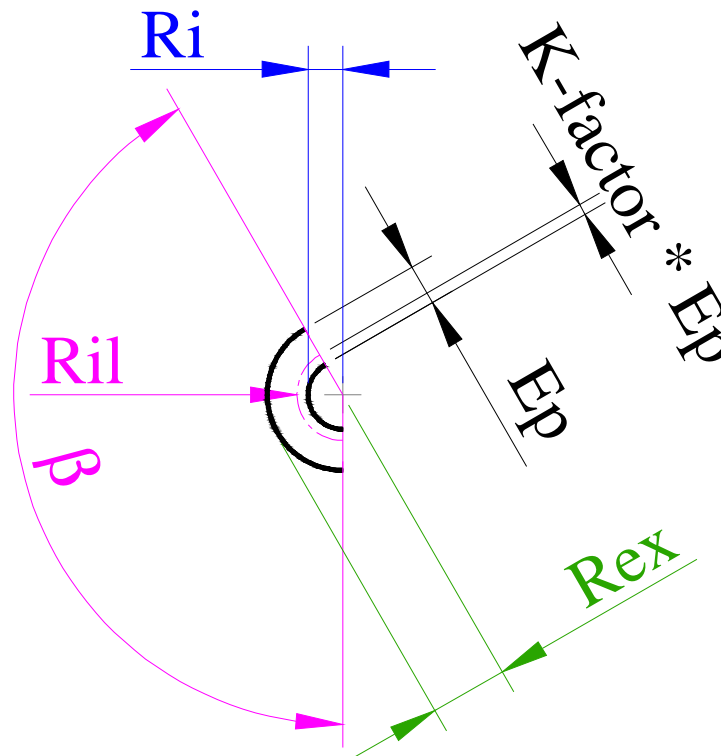
Le modeler permet aussi un paramétrage des mises à plat par l'emploi d'un coefficient nommé K-factor (en français : facteur K ou coefficient K). Comme pour les tables de pliage, on retrouve ce coefficient dans d'autres logiciels.

○ K-factor permet de calculer les mises à plat lorsque R_{il} , le rayon d'isoligne est constant quelque soit l'angle.

La relation qui fait appel à K-factor est la suivante:

$$R_{il} = R_i + E_p * K\text{-factor}$$

Nous pouvons l'illustrer ainsi :



Elle permet de situer l'isoligne dans l'épaisseur de la tôle.

Dans le §10.1.2, nous avons noté que notre Rayon d'isoligne R_{il} , était calculé par Inventor suivant l'expression :

$$R_{il} = (R_i + (E_p/2) * (0,65 + 0,5 * \text{LOG}(R_i/E_p)))$$

Où K-factor prend la valeur suivante :

$$K\text{-factor} = (0,65 + 0,5 * \text{LOG}(R_i/E_p))/2$$

Notre préoccupation de fabriquant va nous conduire à adapter cette expression afin de retrouver nos paramètres de production :

$$R_{il} = R_i + E_p * K\text{-factor}$$

$$\text{Ø } K\text{-factor} = (R_{il} - R_i) / E_p$$

Remplaçons les rayons par leurs valeurs en fonction de Vé et de Ep :

$$\text{Ø } K\text{-factor} = (0,1765 * V\acute{e} + 0,2339 * E_p - 0,1639 * V\acute{e} + 0,0141 * E_p) / E_p$$

$$\text{Ø } K\text{-factor} = (0,1765 * V\acute{e} - 0,1639 * V\acute{e} + 0,2339 * E_p + 0,0141 * E_p) / E_p$$

$$\text{Ø } K\text{-factor} = (0,0126 * V\acute{e} + 0,248 * E_p) / E_p$$

$$\text{Ø } K\text{-factor} = 0,0126 * V\acute{e} / E_p + 0,248$$

Les valeurs de K-factor couramment admises pour les aciers varient dans l'intervalle 0,3085 à 0,4580 mais jamais à plus de 0,50 (mi-épaisseur).

Par exemple pour une tôle de 5 mm nous obtenons :

Vé de	K-factor
25	0,31
32	0,33
40	0,35
50	0,37
63	0,41

Nota : Observer les valeurs recommandées en caractères gras.

10.2.2. Tableau des valeurs **Ri** et de K-factor en fonction de Ep et de Vé :

Ep	Vé	Ri	K-factor
0,6	6	0,975	0,374
0,6	8	1,303	0,416
0,8	6	0,972	0,343
0,8	8	1,300	0,374
0,8	10	1,628	0,406
1	6	0,969	0,324
1	8	1,297	0,349
1	10	1,625	0,374
1	12	1,953	0,399
1,2	6	0,967	0,311
1,2	8	1,294	0,332
1,2	10	1,622	0,353
1,2	12	1,950	0,374
1,2	16	2,606	0,416
1,5	8	1,290	0,315
1,5	10	1,618	0,332
1,5	12	1,946	0,349
1,5	16	2,602	0,382
1,5	20	3,257	0,416
2	10	1,611	0,311
2	12	1,939	0,324
2	16	2,594	0,349
2	20	3,250	0,374
2	25	4,070	0,406
2,5	12	1,932	0,309
2,5	16	2,587	0,329
2,5	20	3,243	0,349
2,5	25	4,063	0,374
2,5	32	5,210	0,409

Ep	Vé	Ri	K-factor
3	16	2,580	0,315
3	20	3,236	0,332
3	25	4,056	0,353
3	32	5,203	0,382
3	40	6,514	0,416
4	20	3,222	0,311
4	25	4,042	0,327
4	32	5,189	0,349
4	40	6,500	0,374
4	50	8,139	0,406
5	25	4,027	0,311
5	32	5,175	0,329
5	40	6,486	0,349
5	50	8,125	0,374
5	63	10,256	0,407
6	32	5,161	0,315
6	40	6,472	0,332
6	50	8,111	0,353
6	63	10,242	0,380
6	80	13,029	0,416
8	40	6,444	0,311
8	50	8,083	0,327
8	63	10,214	0,347
8	80	13,001	0,374
8	100	16,279	0,406
10	50	8,055	0,311
10	63	10,186	0,327
10	80	12,972	0,349
10	100	16,251	0,374
10	125	20,349	0,406

Ep	Vé	Ri	K-factor
12	63	10,158	0,314
12	80	12,944	0,332
12	100	16,222	0,353
12	125	20,320	0,379
12	160	26,057	0,416
15	80	12,902	0,315
15	100	16,180	0,332
15	125	20,278	0,353
15	160	26,015	0,382
15	200	32,572	0,416
20	125	20,208	0,327
20	160	25,945	0,349
20	200	32,501	0,374
20	250	40,697	0,406
20	320	52,171	0,450
25	160	25,874	0,329
25	200	32,431	0,349
25	250	40,627	0,374
25	320	52,101	0,409
25	400	65,214	0,450
30	200	32,360	0,332
30	250	40,556	0,353
30	320	52,030	0,382
30	400	65,144	0,416
30	500	81,535	0,458
40	320	51,889	0,349
40	400	65,003	0,374
40	500	81,394	0,406
50	400	64,862	0,349
50	500	81,253	0,374

Les valeurs recommandées sont en caractères gras.

10.3. Comment choisir entre les tables de pliage BendTables et K-factor :

L'élaboration des tables de pliage est proposée dans le modeleur sur la base d'un modèle dit linéaire c'est-à-dire à rayon d'isoline constant. Et nous savons que c'est précisément ce modèle qui se prête à l'emploi du coefficient K-factor. De plus K-factor ne fait pas appel à l'interpolation linéaire pour déterminer la perte au pli ce qui le rend, semble-t-il, plus performant. Comment interpréter cette possibilité de choix ? On peut penser que les concepteurs du modeleur ont aussi voulu tenir compte des habitudes de travail des utilisateurs de la mise à plat et laisser à chacun le soin de choisir. Les tables de pliage pour les uns, le coefficient K-factor pour les autres.

Rappelons les critères pour paramétrer le modeleur :

- Si la mise à plat fait appel à un rayon d'isoline constant quel que soit l'angle du pli, l'emploi de K-factor est mieux adapté (mais rien ne s'oppose bien sûr à l'emploi des tables).
- Par contre, si vos valeurs de pertes au pli dérivent par rapport aux modèles parce que votre rayon d'isoline n'est pas constant pour une épaisseur et un vé donné, les tables de pliage BendTables conviennent. En effet, les tables de pliage peuvent recevoir vos propres valeurs de pertes au pli déterminées par des essais en production.

10.4. *Comment paramétrer le modeleur :*

Dans Inventor, ce paramétrage sera effectué dans le menu « Tôlerie▼ ».

10.4.1. Paramétrage des tables de pliage Bend Tables :

- Choisir « Styles » et l'onglet « Tôle » où vous déclarerez l' « Epaisseur » et la « Matière » de votre tôle.
- Ensuite, dans le cadre « Mise à plat », sélectionner « Table de pliage » dans « Méthode de dépliage » puis indiquer le chemin à parcourir pour trouver le fichier « Bend Table.TXT ». En principe :
C:\Program Files\Autodesk\Inventor\Samples\Bend Tables
- Dans l'onglet « Pli », déclarer votre « Rayon » intérieur à partir du tableau §10.1.4.

10.4.2. Paramétrage du coefficient K-factor :

- Choisir « Styles » et l'onglet « Tôle » où vous déclarerez l' « Epaisseur » et la « Matière » de votre tôle.
- Ensuite, dans le cadre « Mise à plat », sélectionner « Linéaire » dans « Méthode de dépliage » puis, sous « Valeur méthode de dépliage », activer « Modifier la liste ».
- Dans « Valeur », sélectionner « 0.440 » et le remplacer par votre propre K-factor à partir du tableau §10.2.2.
- Dans l'onglet « Pli », déclarer votre « Rayon » intérieur à partir du tableau §10.2.2.

10.4.3. classement de K-factor en fonction des rapports Vé/Ep :

- pour toutes les Epaisseurs et tous les Vés nous avons 24 K-factor différents.
- Le classement est établi en fonction des valeurs croissantes du rapport.

Ep	Vé	K-factor
2,5	12	0,308
1,2	6	0,311
2	10	0,311
4	20	0,311
5	25	0,311
8	40	0,311
10	50	0,311
12	63	0,314
1,5	8	0,315
3	16	0,315
6	32	0,315
15	80	0,315
1	6	0,324
2	12	0,324
4	25	0,327
8	50	0,327
20	125	0,327
10	63	0,327
2,5	16	0,329
5	32	0,329
25	160	0,329

Ep	Vé	K-factor
1,2	8	0,332
1,5	10	0,332
3	20	0,332
6	40	0,332
12	80	0,332
15	100	0,332
30	200	0,332
0,8	6	0,343
8	63	0,347
1	8	0,349
1,5	12	0,349
2	16	0,349
2,5	20	0,349
4	32	0,349
5	40	0,349
10	80	0,349
20	160	0,349
25	200	0,349
40	320	0,349
50	400	0,349
1,2	10	0,353
3	25	0,353
6	50	0,353
12	100	0,353
15	125	0,353

Ep	Vé	K-factor
0,6	6	0,374
0,8	8	0,374
1	10	0,374
1,2	12	0,374
2	20	0,374
2,5	25	0,374
4	40	0,374
5	50	0,374
8	80	0,374
10	100	0,374
20	200	0,374
25	250	0,374
40	400	0,374
50	500	0,374
12	125	0,379
6	63	0,380
1,5	16	0,382
3	32	0,382
15	160	0,382
30	320	0,382
1	12	0,399

Ep	Vé	K-factor
0,8	10	0,406
2	25	0,406
4	50	0,406
8	100	0,406
10	125	0,406
20	250	0,406
40	500	0,406
5	63	0,407
2,5	32	0,409
25	320	0,409
0,6	8	0,416
1,2	16	0,416
1,5	20	0,416
3	40	0,416
6	80	0,416
12	160	0,416
15	200	0,416
30	400	0,416
20	320	0,450
25	400	0,450
30	500	0,458