

# **Effort internes, contraintes... vers le dimensionnement**

## **Calcul roulements BV**

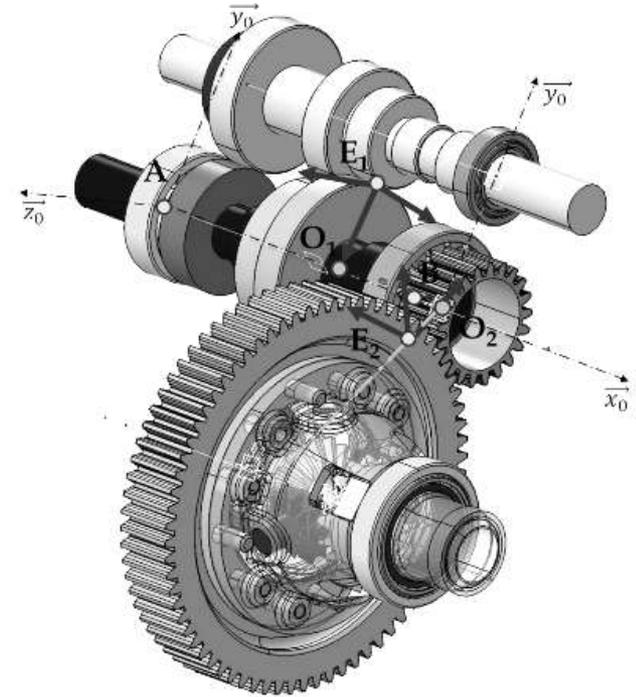
# Problématiques du calcul des roulements

---

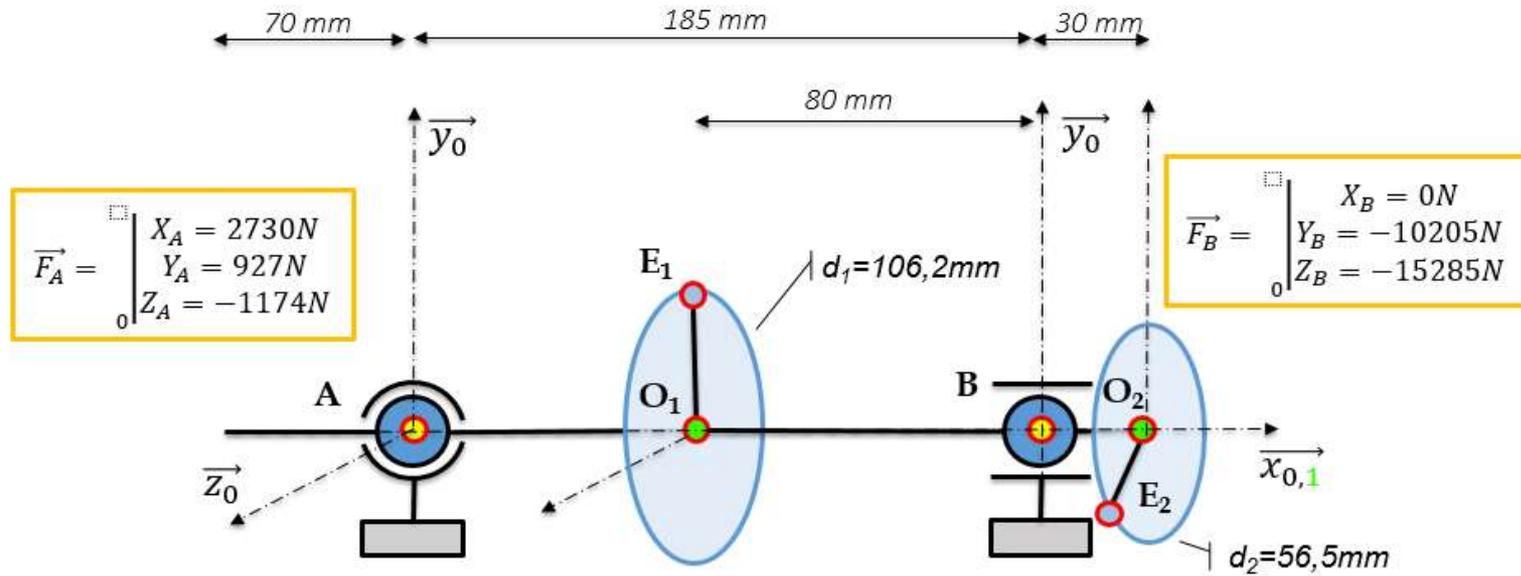
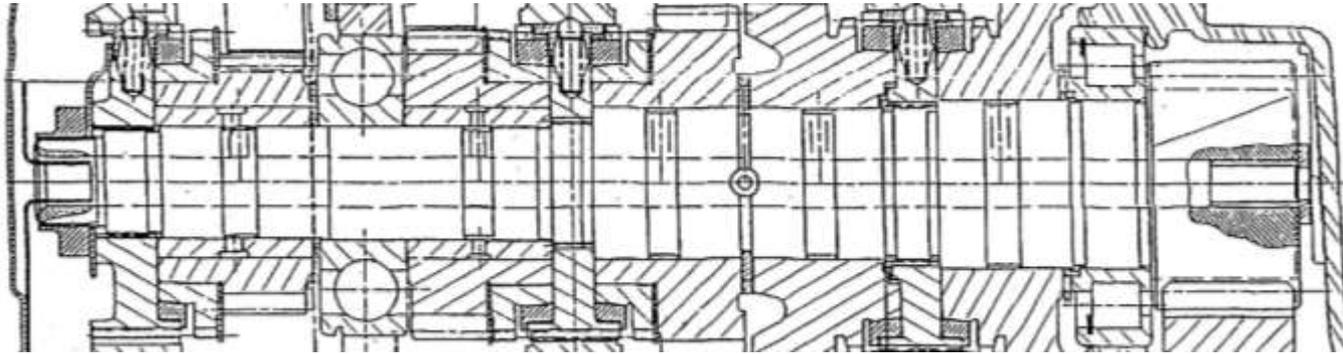
- Roulements, Architectures, Chargements connus
  - Calcul de la durée de vie
- Architectures, Chargements connus, Durée de vie imposée
  - Choix des roulements dans une Base de Données constructeur

## Objectifs :

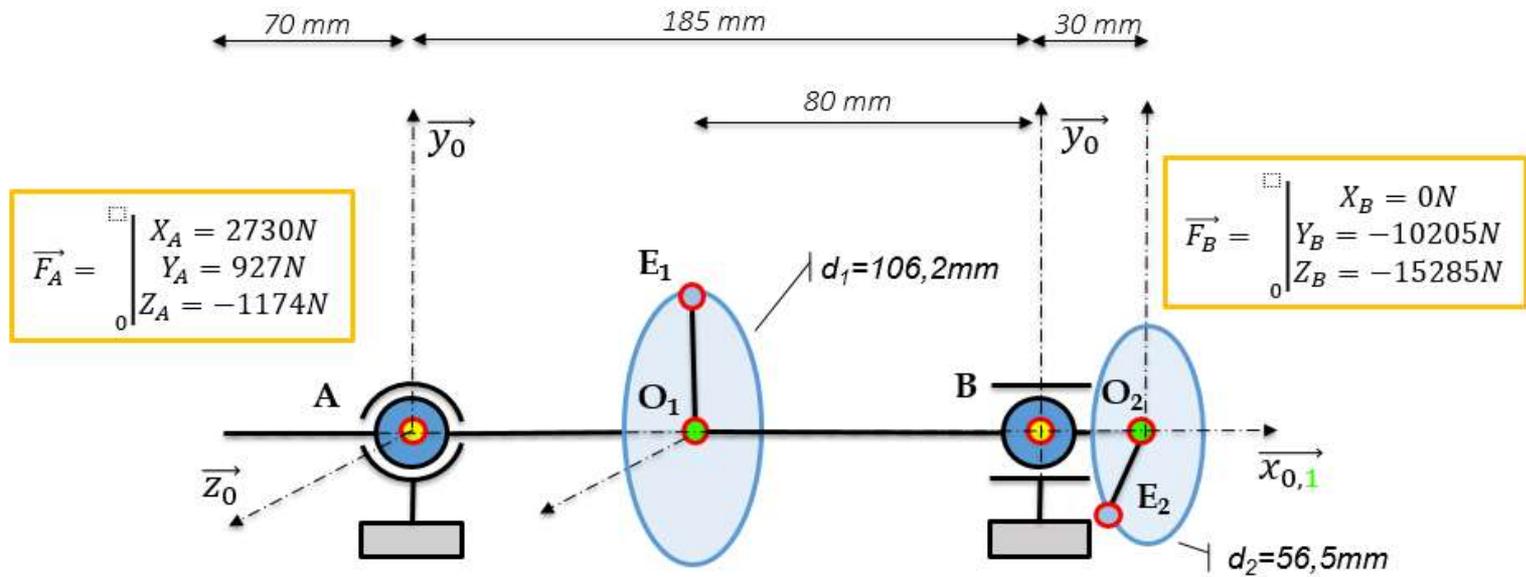
- Valider (ou non) le choix des roulements pour un niveau de charge
  - Calcul des efforts radiaux équivalents
  - Calcul en statique
  - Calcul de la durée de vie L10
  - Conclusion
- Calcul de la durée de vie avec différents niveaux de charge et différents régimes
  - Mise en équation « à la main »
  - Utilisation d'un environnement informatique (tableur)
  - Conclusion



# Analyse solution existante



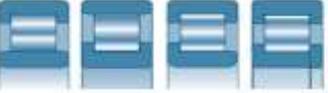
# Calcul Durée de Vie L10



**en A : 6306 fournisseur SKF**  
 d=30 ; D=72 ; B = 19 ;  
 C=28100N ; C0=16000N

**en B : N208 fournisseur SKF**  
 d=40 ; D=80 ; B = 18 ;  
 C=62000N ; C0=53000N

# Rappel roulements

Symbole	Type de roulement	Symbole	Type de roulement	Symbole	Type de roulement
60 X 62 X 63 XX 64 XX 160 XX 618 XX 619 XX 622 XX 623 XX	Roulement à billes à contact radial   A 1 rangée de billes	N..2 XX N..3 XX N..4 XX N..10 XX N..22 XX N..23 XX	Roulement à rouleaux cylindriques   NU N NJ NUP	72 XX 73 XX 718 XX	Roulement à billes à contact oblique   A 1 rangée de billes
2 XX 3 XX	 Avec encoche	12 XX 13 XX 22 XX 23 XX	Roulement à rotule sur billes  	QJ2 XX QJ3 XX	 A 4 points de contact
42 XX 43 XX	 A 2 rangées de billes	112 XX 113 XX	 Bague intérieure large Butée à rotule sur rouleaux	32 XX 33 XX	 A 2 rangées de billes
302 XX 303 XX 313 XX 320 XX 322 XX 323 XX	Roulement à rouleaux coniques  	293 XX 294 XX	 Butée à billes	52 XX 53 XX	 A 2 rangées de billes ZZ ou EE
		511 XX 512 XX 513 XX 514 XX		213 XX 222 XX 223 XX 230 XX 231 XX 232 XX	Roulement à rotule sur rouleaux  

# Données fabricant

Dimensions d'encombrement			Charges de base		Limite de fatigue	Vitesses de base		Masse	Désignation
d	D	B	dynamique C	statique C <sub>0</sub>		Vitesse de référence	Vitesse limite		
mm			kN		kN	tr/min		kg	–
25	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	61805
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	22 000	0,045	61905
	47	8	8,06	4,75	0,212	32 000	20 000	0,06	* 16005
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,078	* 6005
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	18 000	0,13	* 6205
	52	15	17,8	9,8	0,4	28 000	18 000	0,12	6205 ETN9
	62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	16 000	0,23	* 6305
	62	17	26	13,4	0,57	24 000	16 000	0,22	6305 ETN9
	80	21	35,8	19,3	0,815	20 000	13 000	0,54	6405
	28	58	16	16,8	9,5	0,405	26 000	16 000	0,17
68		18	25,1	13,7	0,585	22 000	14 000	0,3	63/28
30	42	7	4,49	2,9	0,146	32 000	20 000	0,025	61806
	47	9	7,28	4,55	0,212	30 000	19 000	0,049	61906
	55	9	11,9	7,35	0,31	28 000	17 000	0,089	* 16006
	55	13	13,8	8,3	0,355	28 000	17 000	0,12	* 6006
	62	16	20,3	11,2	0,475	24 000	15 000	0,2	* 6206
	62	16	23,4	12,9	0,54	24 000	15 000	0,18	6206 ETN9
	72	19	29,6	16	0,67	20 000	13 000	0,35	* 6306
	72	19	32,5	17,3	0,735	22 000	14 000	0,33	6306 ETN9

# Résistance « statique »

En valeur absolue !

$$C_0 > s_0 \times P_0 \quad P_0 = \max (F_r, X_0 \cdot F_r + Y_0 \cdot F_a)$$

Mode de Fonctionnement	Roulement en rotation						Roulement à l'arrêt	
	Exigences de silence de fonctionnement							
	Faible		Normales		Elevées		Billes	Rouleaux
Billes	Rouleaux	Billes	Rouleaux	Billes	Rouleaux			
Régulier sans vibrations	0.5	1	1	1.5	2	3	0.4	0.8
Normal	0.5	1	1	1.5	2	3.5	0.5	1
Chocs prononcés	≥ 1.5	≥ 2.5	≥ 1.5	≥ 3	≥ 2	≥ 4	≥ 1	≥ 2

Coefficient de sécurité  $s_0$   
(Source SKF)

## $X_0$ et $Y_0$ selon ISO 76

Type de roulements		1 rangée		2 rangées		
		$X_0$	$Y_0$	$X_0$	$Y_0$	
Roulements à billes	à contact radial	0.6	0.5	0.6	0.5	
	à rotules	0.5	$0.22 \cdot \cotg \alpha$	1	$0.4 \cdot \cotg \alpha$	
	à contact oblique	$\alpha = 15^\circ$	0.5	0.46	1	0.92
		$\alpha = 20^\circ$	0.5	0.42	1	0.84
		$\alpha = 25^\circ$	0.5	0.38	1	0.76
		$\alpha = 30^\circ$	0.5	0.33	1	0.66
		$\alpha = 35^\circ$	0.5	0.29	1	0.58
		$\alpha = 40^\circ$	0.5	0.26	1	0.52
$\alpha = 45^\circ$	0.5	0.22	1	0.44		
Roulements à rouleaux	à rouleaux coniques	0.5	$0.22 \cdot \cotg \alpha$	1	$0.44 \cdot \cotg \alpha$	
	à rotules	0.5	$0.22 \cdot \cotg \alpha$	1	$0.44 \cdot \cotg \alpha$	

Vérifier la résistance « Statique » des roulements de la BV pour un fonctionnement normal

## Résistance « statique »

- Roulement à rouleaux cylindriques

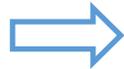
$$\vec{F}_B = \begin{matrix} X_B = 0N \\ Y_B = -10205N \\ Z_B = -15285N \\ 0 \end{matrix}$$

$$F_{rB} = \sqrt{Y_B^2 + Z_B^2} = 18379 \text{ N}$$

$$S_o = 1,5$$

$$C_o = 53\,000 \text{ N}$$

$$P_o = 18\,379 \text{ N}$$



$$S_o \cdot P_o = 27\,570 < C_o$$

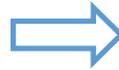


Résistance vérifiée

## Résistance « statique »

- Roulement à billes  $\vec{F}_A = \begin{matrix} X_A = 2730N \\ Y_A = 927N \\ Z_A = -1174N \\ 0 \end{matrix}$

$$F_{rA} = \sqrt{Y_A^2 + Z_A^2} = 1500 \text{ N}$$
$$F_{aA} = |X_A| = 2730 \text{ N}$$

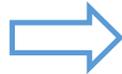


$$P_o = \max(1500 ; 0.6 * 1500 + 0.5 * 2730)$$
$$= 2265 \text{ N}$$

$$S_o = 1$$

$$C_o = 16000 \text{ N}$$

$$P_o = 2265 \text{ N}$$



$$S_o \cdot P_o = 2265 < C_o$$



Résistance vérifiée

## Durée de Vie

Capacité de charge dynamique (N) :  
charge radiale appliquée pour que  
90% des roulements testés aient  
une durée de vie  $\geq 1$  Millions de  
tours

Durée de vie en  
Million de tours

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^n$$

Coefficient dépendant du type  
de contact

- ponctuel (bille)  $n = 3$
- linéaire (rouleaux)  $n = 10/3$

Charge radiale équivalente

Et aussi charge radiale minimale

$P > 0,01 C$  pour les billes

$P > 0,02 C$  pour les rouleaux

### Problématiques

- Charges radiales pures constantes
- Charges combinées constantes
- Charges variables (constantes par niveau)

## Charge radiale pure « constante » : Roulement cylindrique

$$F_{rB} = \sqrt{Y_B^2 + Z_B^2} = 18379 \text{ N}$$

$$C = 62\,000 \text{ N}$$

$$n = 10/3$$



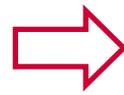
*Durée de vie en Nb de kilomètres*

## Charge radiale pure « constante » : Roulement cylindrique

$$F_{rB} = \sqrt{Y_B^2 + Z_B^2} = 18379 \text{ N}$$

$$C = 62\,000 \text{ N}$$

$$n = 10/3$$



$$P > 0,02 C = 1240 \text{ N}$$

$$L_{10} = 57 \text{ Mtr}$$

*Durée de vie en Nb de kilomètres*

diamètre du pneu de 630 mm,  
rapport en entrée de différentiel de 3,7

Nb de tours effectués par l'essieu :  $57 / 3,7 = 15,4 \text{ Mtr}$

Distance parcourue en 1 tr :  $0,63 * \pi = 1,98 \text{ m}$


$$L_{km} = 30\,500 \text{ km}$$

**ATTENTION :** les efforts aux roulements ont été calculés pour un couple moteur max et pour le rapport de seconde, cela ne correspond pas à des conditions de fonctionnement normales du véhicule

## Charge combinée « constante »

$$\text{Si } Fa/Fr > e : P = X Fr + Y Fa$$

$$\text{Si } Fa/Fr \leq e : P = Fr$$

Fa/C0	e	X	Y
0,014	0,19	0,56	2,3
0,028	0,22	0,56	1,99
0,056	0,26	0,56	1,71
0,084	0,28	0,56	1,55
0,11	0,3	0,56	1,45
0,17	0,34	0,56	1,31
0,28	0,38	0,56	1,15
0,42	0,42	0,56	1,04
0,56	0,44	0,56	1

*Pour le roulement à billes*

$$F_{rA} = 1500 \text{ N}$$

$$F_{aA} = 2730 \text{ N}$$

$$C_0 = 16\,000 \text{ N}$$

$$C = 28\,100 \text{ N}$$

## Charge combinée « constante »

**Si  $F_a/F_r > e$  :  $P = X F_r + Y F_a$**

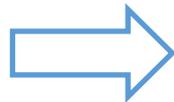
**Si  $F_a/F_r \leq e$  :  $P = F_r$**

*Pour le roulement à billes*

$F_a/C_0$	$e$	$X$	$Y$
0,014	0,19	0,56	2,3
0,028	0,22	0,56	1,99
0,056	0,26	0,56	1,71
0,084	0,28	0,56	1,55
0,11	0,3	0,56	1,45
0,17	0,34	0,56	1,31
0,28	0,38	0,56	1,15
0,42	0,42	0,56	1,04
0,56	0,44	0,56	1

$F_{rA} = 1500 \text{ N}$

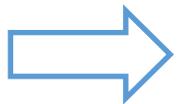
$F_{aA} = 2730 \text{ N}$



$F_a / C_0 = 0,17 \rightarrow e = 0,34 \quad X = 0,56 \quad Y = 1,31$

$C_0 = 16\,000 \text{ N}$

$C = 28\,100 \text{ N}$



$F_a / F_r = 1,83 > e \rightarrow P = 0,56 \cdot 1500 + 1,31 \cdot 2730 = 4416 \text{ N}$



$L_{10} = 258 \text{ Mtr}$

C'est à dire 138 000 km, ce qui paraît plus raisonnable

## Charges variant par niveaux

Les k niveaux sont associés à

- une charge radiale **Fri**
- une charge axiale **Fai**
- un nombre de tours réalisés à ce niveau **ni**

On définit

$$\alpha_i^{tr} = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^k n_j}$$

Pour chaque niveau on calcule la charge radiale équivalente :  $P_i$

On définit la charge radiale équivalente aux k niveaux  $P_{equi} = \sqrt[n]{\sum_i \alpha_i^{tr} \cdot (P_i)^n}$

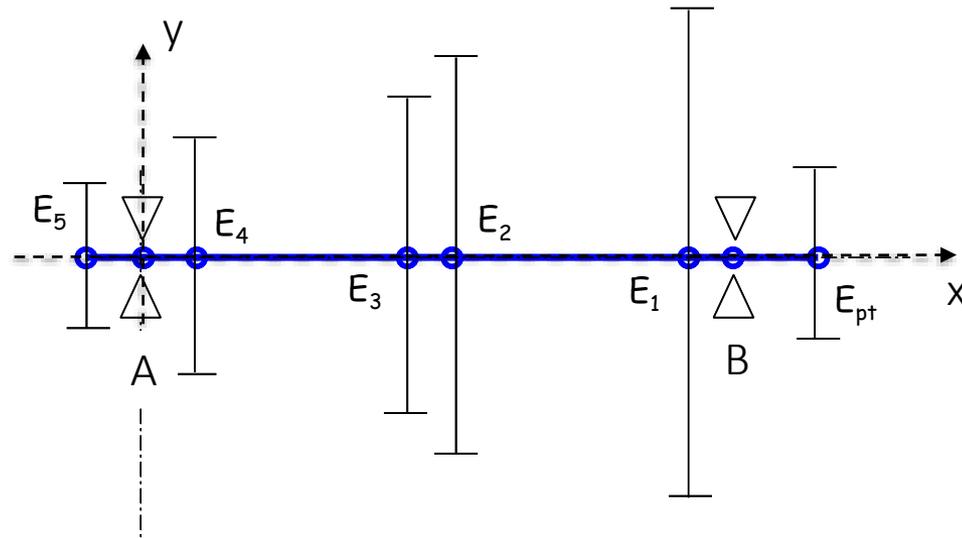
On calcule la durée de vie  $L = \left(\frac{C}{P_{equi}}\right)^n$

# Application

## Rapport de couple Sortie / Entrée

$C_{\text{moteur}} = 50 \text{ N.m,}$   
 $\Omega_{\text{moteur}} = 2500 \text{ tr/mn}$

1	2	3	4	5
3,46	1,86	1,28	0,96	0,75



## Efforts aux roulements

Rapport	1	2	3	4	5
$Y_A$ (N)	-825	+206	-68	+258	+297
$Z_A$ (N)	1536	10	15	-1016	-1120
$X_A$ (N)	-1324	-678	-345	-179	-25
$Y_B$ (N)	-479	-933	-374	-582	-506
$Z_B$ (N)	-12205	-6112	-4418	-2439	-1740

# Application

	1 <sup>ère</sup>	2 <sup>nde</sup>	3 <sup>ème</sup>	4 <sup>ème</sup>	5 <sup>ème</sup>
% utilisation en temps	5 %	15 %	30 %	20 %	30 %
$\alpha^t$	0,05	0,15	0,3	0,2	0,3

**Problème** : comment passer d'une répartition en temps à une répartition en tours ?

Pendant un temps T on va faire :

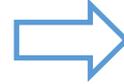
$$\begin{array}{l} \text{ni tours au niveau } i \\ \text{un nombre total de tours} \end{array} \quad \begin{array}{l} n_i = T \alpha_i^t \cdot N_i \\ n_r = T \cdot \sum \alpha_i^t \cdot N_i \end{array} \quad \Rightarrow \quad \alpha_i^{\text{tr}} = \frac{\alpha_i^t \cdot N_i}{\sum_j \alpha_j^t \cdot N_j}$$

Déterminer la durée de vie des roulements à l'aide d'une feuille excel

Avec N vitesse de rotation de l'arbre secondaire

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

1 : 5% du temps 2<sup>nde</sup>  
2: 95% du temps 4<sup>eme</sup>



$$\alpha_{t1} =$$

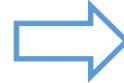
$$\alpha_{t2} =$$

Rapport réduction couple boite

2<sup>nde</sup> : 1,86

4<sup>eme</sup> : 0,96

$\Omega_{\text{moteur}} = 2500 \text{ tr/mn}$



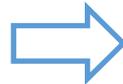
Vitesse rotation arbre secondaire

$$N1 =$$

$$N2 =$$

Taux d'utilisation en tours

$$\alpha_i^{\text{tr}} = \frac{\alpha_i^t \cdot N_i}{\sum_j \alpha_j^t \cdot N_j}$$

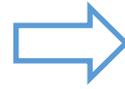


$$\alpha_1^{\text{tr}} =$$

$$\alpha_2^{\text{tr}} =$$

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

1 : 5% du temps 2<sup>nde</sup>  
2: 95% du temps 4<sup>eme</sup>



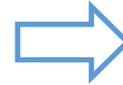
$$\alpha_{t1} = 0,05 \quad \alpha_{t2} = 0,95$$

Rapport réduction couple boite

2<sup>nde</sup> : 1,86

4<sup>eme</sup> : 0,96

$$\Omega_{\text{moteur}} = 2500 \text{ tr/mn}$$



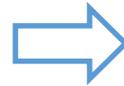
Vitesse rotation arbre secondaire

$$N1 = 2500/1,86 = 1344 \text{ tr/mn}$$

$$N2 = 2500/0,96 = 2604 \text{ tr /mn}$$

Taux d'utilisation en tours

$$\alpha_i^{\text{tr}} = \frac{\alpha_i^t \cdot N_i}{\sum_j \alpha_j^t \cdot N_j}$$



$$\alpha_1^{\text{tr}} = \frac{\alpha_{t1} \cdot N_1}{\alpha_{t1} \cdot N_1 + \alpha_{t2} \cdot N_2} = 0.03$$

$$\alpha_2^{\text{tr}} = 1 - \alpha_1^{\text{tr}} = 0.97$$

# Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente à chaque niveau de charge

*Niveau 1 : 2<sup>nde</sup>*

Efforts aux roulements

Rapport	2
$Y_A$ (N)	206
$Z_A$ (N)	10
$X_A$ (N)	-678
$Y_B$ (N)	-933
$Z_B$ (N)	-6112

$$P_{rA} =$$

$$P_{rB} =$$

# Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente à chaque niveau de charge

Niveau 1 : 2<sup>nde</sup>

Efforts aux roulements	
Rapport	2
Y <sub>A</sub> (N)	206
Z <sub>A</sub> (N)	10
X <sub>A</sub> (N)	-678
Y <sub>B</sub> (N)	-933
Z <sub>B</sub> (N)	-6112

$$P_{rA} =$$

$$P_{rB} = \sqrt{Y_B^2 + Z_B^2} = 6183 \text{ N}$$

# Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente à chaque niveau de charge

Niveau 1 : 2<sup>nde</sup>

Efforts aux roulements

Rapport	2
Y <sub>A</sub> (N)	206
Z <sub>A</sub> (N)	10
X <sub>A</sub> (N)	-678
Y <sub>B</sub> (N)	-933
Z <sub>B</sub> (N)	-6112

$$A_{rA}/Co = 0,042$$

Fa/Co	e	X	Y	
0,014	0,19	0,56	2,3	
0,028	0,22	0,56	1,99	
0,056	0,26	0,56	1,71	
0,084	0,28	0,56	1,55	
0,11	0,3	0,56	1,45	
0,17	0,34	0,56	1,31	
0,28	0,38	0,56	1,15	
0,42	0,42	0,56	1,04	
0,56	0,44	0,56	1	

$$e = 0,26$$

$$A_{rA}/R_{rA} = 3,29 > e$$

Si  $Fa/Fr > e$  :  $P = X Fr + Y Fa$        $P_A = 1275 \text{ N}$

$$R_{rA} = 206 \text{ N}$$

$$A_{rA} = 678 \text{ N}$$

$$Co = 16\,000 \text{ N}$$

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente à chaque niveau de charge

Niveau 2 : 4<sup>ème</sup>

Efforts aux roulements	
Rapport	4
$Y_A$ (N)	258
$Z_A$ (N)	-1016
$X_A$ (N)	-179
$Y_B$ (N)	-582
$Z_B$ (N)	-2439

$$P_{rA} =$$

$$P_{rB} =$$

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente à chaque niveau de charge

*Niveau 2 : 4ème*

Efforts aux roulements

Rapport	4
$Y_A$ (N)	258
$Z_A$ (N)	-1016
$X_A$ (N)	-179
$Y_B$ (N)	-582
$Z_B$ (N)	-2439

$$P_{rA} =$$

$$P_{rB} = \sqrt{Y_B^2 + Z_B^2} = 2507 \text{ N}$$

# Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente à chaque niveau de charge

## Niveau 2 : 4ème

### Efforts aux roulements

Rapport	4
$Y_A$ (N)	258
$Z_A$ (N)	-1016
$X_A$ (N)	-179
$Y_B$ (N)	-582
$Z_B$ (N)	-2439

$$A_{rA}/Co = 0,011$$

Fa/Co	e	X	Y	
0,014	0,19	0,56	2,3	

La valeur  $Fa/Co$  n'existe pas, on prend (choix)  $e=0,19$

$$A_{rA}/R_{rA} = 0,17 < e$$

$$\text{Si } Fa/Fr \leq e : P = Fr \quad P_A = 1050 \text{ N}$$

$$R_{rA} = 1050 \text{ N}$$

$$A_{rA} = 179 \text{ N}$$

$$Co = 16\,000 \text{ N}$$

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente pour chaque roulement

$$P_{equi} = \sqrt[n]{\sum_i \alpha_i^{tr} \cdot (P_i)^n} \quad \begin{array}{l} \alpha_1^{tr} = 0.03 \\ \alpha_2^{tr} = 0.97 \end{array}$$

Roulement A (billes n=3)

$$P_{rA1} = 1275 \text{ N}$$

$$P_{rA2} = 1050 \text{ N}$$

Roulement B (Rouleaux n=10/3)

$$P_{rB1} = 6183 \text{ N}$$

$$P_{rB2} = 2507 \text{ N}$$

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Charge équivalente pour chaque roulement

$$P_{equi} = \sqrt[n]{\sum_i \alpha_i^{tr} \cdot (P_i)^n} \quad \begin{array}{l} \alpha_1^{tr} = 0.03 \\ \alpha_2^{tr} = 0.97 \end{array}$$

Roulement A (billes n=3)

$$P_{rA1} = 1275 \text{ N}$$

$$P_{rA2} = 1050 \text{ N}$$

$$P_{equA} = 1058 \text{ N}$$

Roulement B (Rouleaux n=10/3)

$$P_{rB1} = 6183 \text{ N}$$

$$P_{rB2} = 2507 \text{ N}$$

$$P_{equB} = 2875 \text{ N}$$

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Durée de vie pour chaque roulement

$$L = \left( \frac{C}{P_{equi}} \right)^n$$

Roulement A (billes n=3)

$$P_{equA} = 1058 \text{ N}$$

$$C = 28\,100 \text{ N}$$

Roulement B (Rouleaux n=10/3)

$$P_{equB} = 2875 \text{ N}$$

$$C = 62\,000 \text{ N}$$

## Pour bien comprendre : Application – 2 Niveaux de charges

Durée de vie pour chaque roulement

$$L = \left( \frac{C}{P_{equi}} \right)^n$$

Roulement A (billes n=3)  
C = 28 100 N

$$P_{equA} = 1058 \text{ N}$$

$$L_A = 18\,722 \text{ Mtr}$$

Roulement B (rouleaux n=10/3)  
C = 62 000 N

$$P_{equB} = 2875 \text{ N}$$

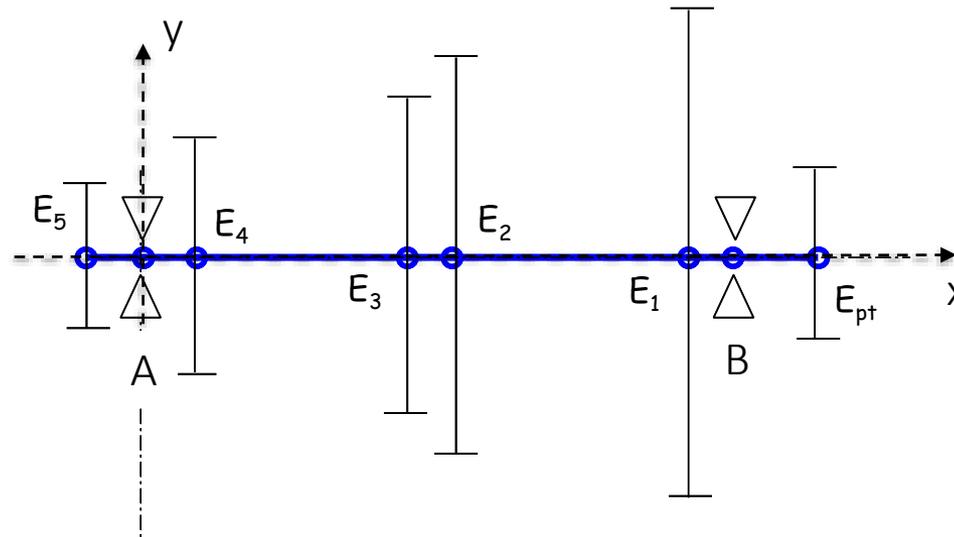
$$L_B = 27915 \text{ Mtr}$$

# Application

## Rapport de couple Sortie / Entrée

$C_{\text{moteur}} = 50 \text{ N.m,}$   
 $\Omega_{\text{moteur}} = 2500 \text{ tr/mn}$

1	2	3	4	5
3,46	1,86	1,28	0,96	0,75



## Efforts aux roulements

Rapport	1	2	3	4	5
$Y_A$ (N)	-825	+206	-68	+258	+297
$Z_A$ (N)	1536	10	15	-1016	-1120
$X_A$ (N)	-1324	-678	-345	-179	-25
$Y_B$ (N)	-479	-933	-374	-582	-506
$Z_B$ (N)	-12205	-6112	-4418	-2439	-1740

## Utilisation feuille excel

Rapport de réduction						
	1	2	3	4	5	Differentiel
	3,46	1,86	1,28	0,96	0,75	3,7
Vitesse arbre secondaire						
	723	1344	1953	2604	3333	
Efforts aux roulements						
Rapport	1	2	3	4	5	
$Y_A$ (N)	-825	206	-68	258	297	
$Z_A$ (N)	1536	10	15	-1016	-1120	
$X_A$ (N)	-1324	-678	-345	-179	-25	
$Y_B$ (N)	-479	-933	-374	-582	-506	
$Z_B$ (N)	-12205	-6112	-4418	-2439	-1740	
Fr et Fa						
FrA	1744	206	70	1048	1159	
FaA	1324	678	345	179	25	
FrB	12214	6183	4434	2507	1812	

<b>Durée vie</b>						
<b>Diametre roue</b>		0,63	m			
	1 <sup>ère</sup>	2 <sup>nde</sup>	3 <sup>ème</sup>	4 <sup>ème</sup>	5 <sup>ème</sup>	
<b>% utilisation en temps</b>	5%	15%	30%	20%	30%	
$\alpha^I$	0,05	0,15	0,3	0,2	0,3	
$N.\alpha^I$	36,13	201,61	585,94	520,83	1000,00	2344,51
$\alpha^{II}$	0,02	0,09	0,25	0,22	0,43	

## Distance avec les roulements à rouleaux

<i>Roulement à rouleaux</i>					
Co	53000				
C	62000	Pmin	1240		
n	3,33				
Charge radiale	12214	6183	4434	2507	1812
P/Pmin	9,85	4,99	3,58	2,02	1,46
(Pi)^n	4,19669E+13	4,3379E+12	1,4319E+12	2,1419E+11	7,2542E+10
	6,46678E+11	3,7304E+11	3,5787E+11	4,7581E+10	3,0941E+10
Peq	4456,127131				
<b>L10</b>	<b>6478</b>	<b>Mtr</b>			

Soit 3,5 millions de km

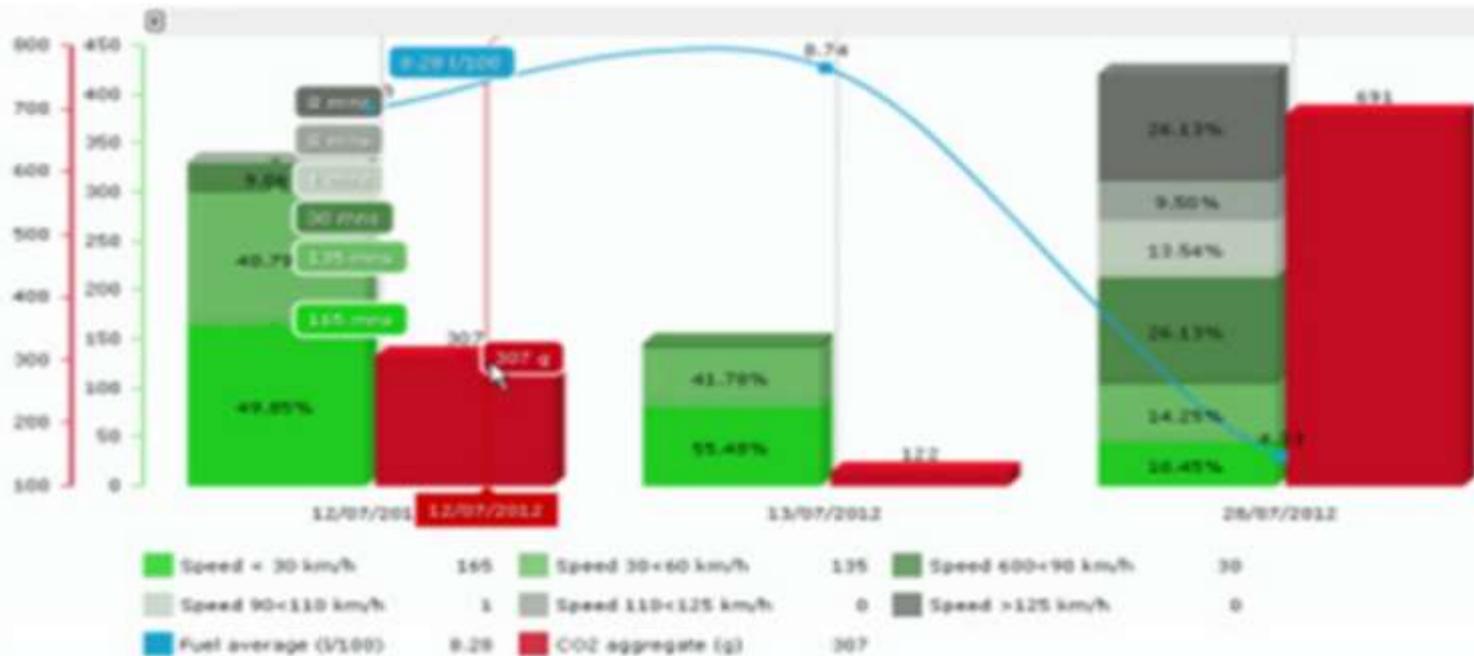
## Distance avec les roulements à billes

<i>Roulement à billes</i>						
Co	16000					
C	28100	Pmin	281			
n	3,00					
Fr	1744	206	70	1048	1159	
Fa	1324	678	345	179	25	
Fa/Co	0,08275	0,042375	0,0215625	0,0111875	0,0015625	
e	0,28	0,26	0,2	0,19	0,19	
X	0,56	0,56	0,56	0,56	2,3	
Y	1,55	1,71	2,1	0,56	2,3	
Fa/Fr	0,759375946	3,28739106	4,95442209	0,17076142	0,02157572	
Pi	3028,580677	1274,87584	763,495466	1048	1159	
Pi/Pmin	10,77786718	4,53692471	2,71706572	3,73041336	4,12352334	
alph.P^n	428054531	0,08599359	0,24991886	0,2221501	0,42652819	
Peq	753,6442092					
<b>L10</b>	<b>51834,61298</b>					

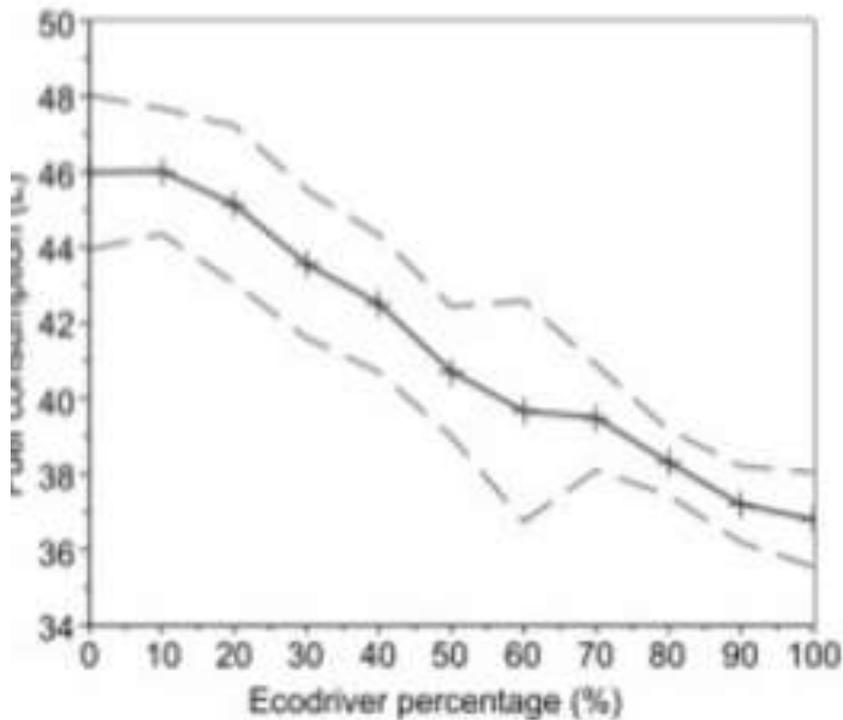
Soit 28 millions de km

# Impacts sur la consommation et le rejet de CO2

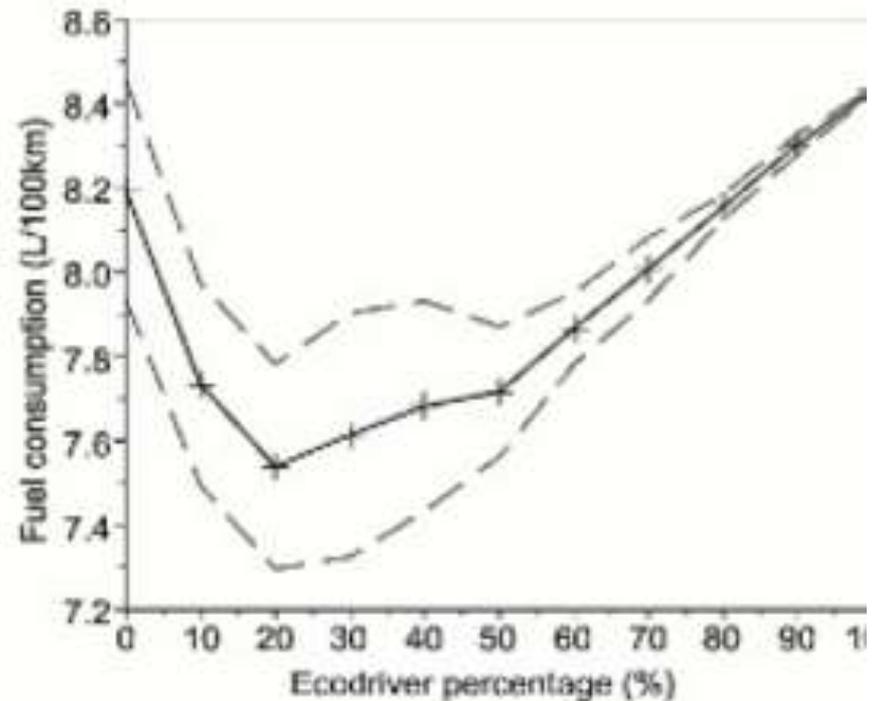
- Simulations de l'éco conduite pour un temps donné/ conduite agressive : 3 scénarios avec CO2 et consommation associée



# Impact éco-conduite



*Consommation de carburant dans un trafic urbain congestionné*



*Consommation de carburant dans un trafic interurbain proche de la saturation*

# Facteurs principaux de baisses des émissions de particules pour 2020 avec le plan de protection de l'atmosphère

### Principaux facteurs de diminution des émissions de PM10 du scénario « 2020 fil de l'eau »

#### **-Secteur résidentiel et tertiaire avec - 34 % d'émissions par rapport à 2008 :**

Réduction des consommations de bois de chauffage, taux d'équipement constant et renouvellement vers des installations plus performantes en consommation énergétique et à l'émission

#### **-Transport routier avec - 53 % d'émissions par rapport à 2008 :**

Facteurs d'émission Euro V et VI très contraignants et taux de renouvellement

### Principaux facteurs de diminution supplémentaire des émissions de PM10 du scénario « 2020 + PPA »

#### **- Secteur résidentiel et tertiaire avec - 27 % d'émissions par rapport au tendanciel:**

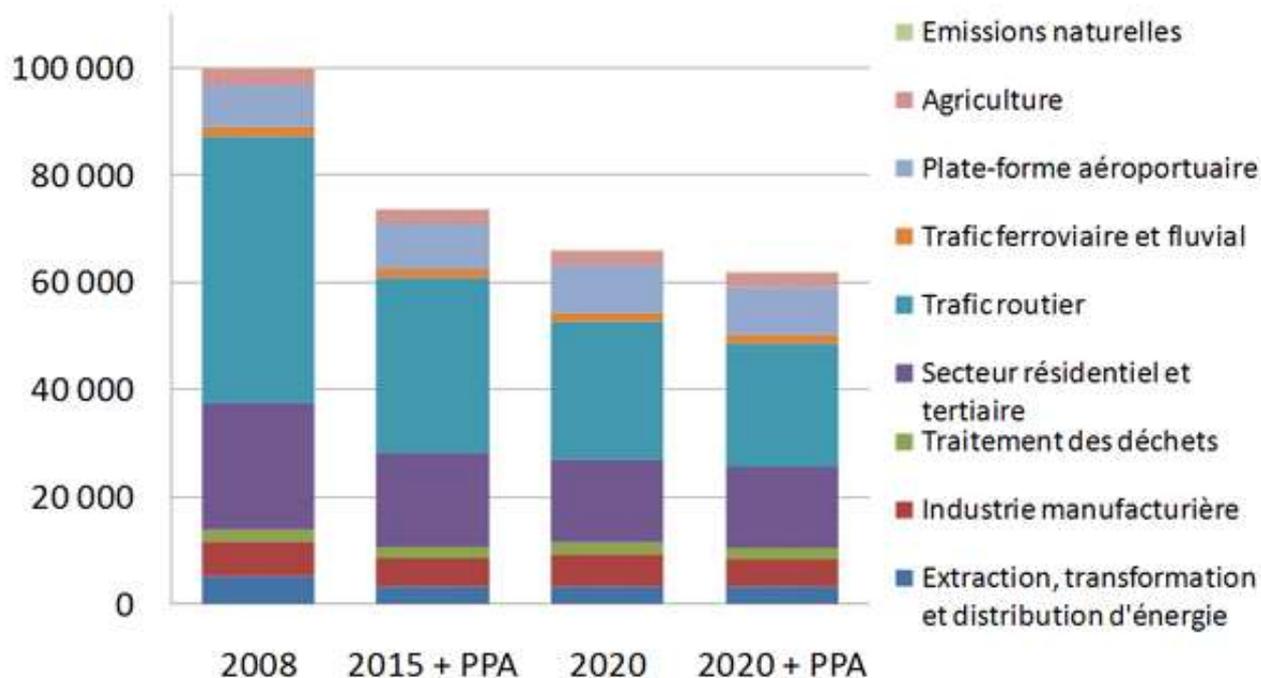
Baisse supplémentaire des consommations de bois à Paris et Petite Couronne et réduction des facteurs d'émissions sur l'ensemble de l'Ile-de-France suite à l'interdiction des foyers ouverts

#### **- Transport routier avec - 9 % d'émissions par rapport au tendanciel:**

Baisse du trafic routier (PDU, ZAPA), de la consommation moyenne (Eco-conduite) et des facteurs d'émissions (ZAPA)

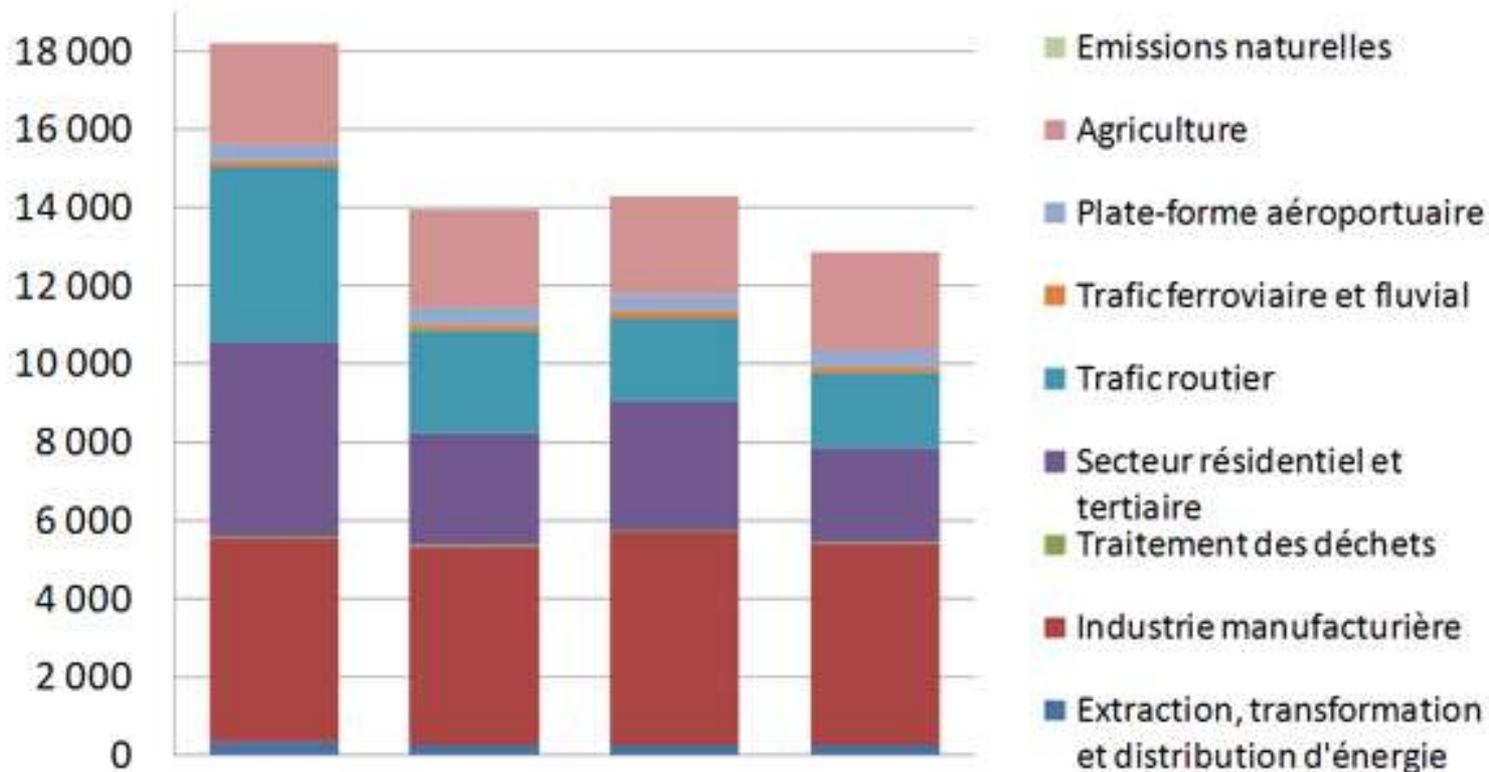
# Prise en compte de l'éco-conduite dans les prévisions 2020

Evolution des émissions de NOx - Ile-de-France



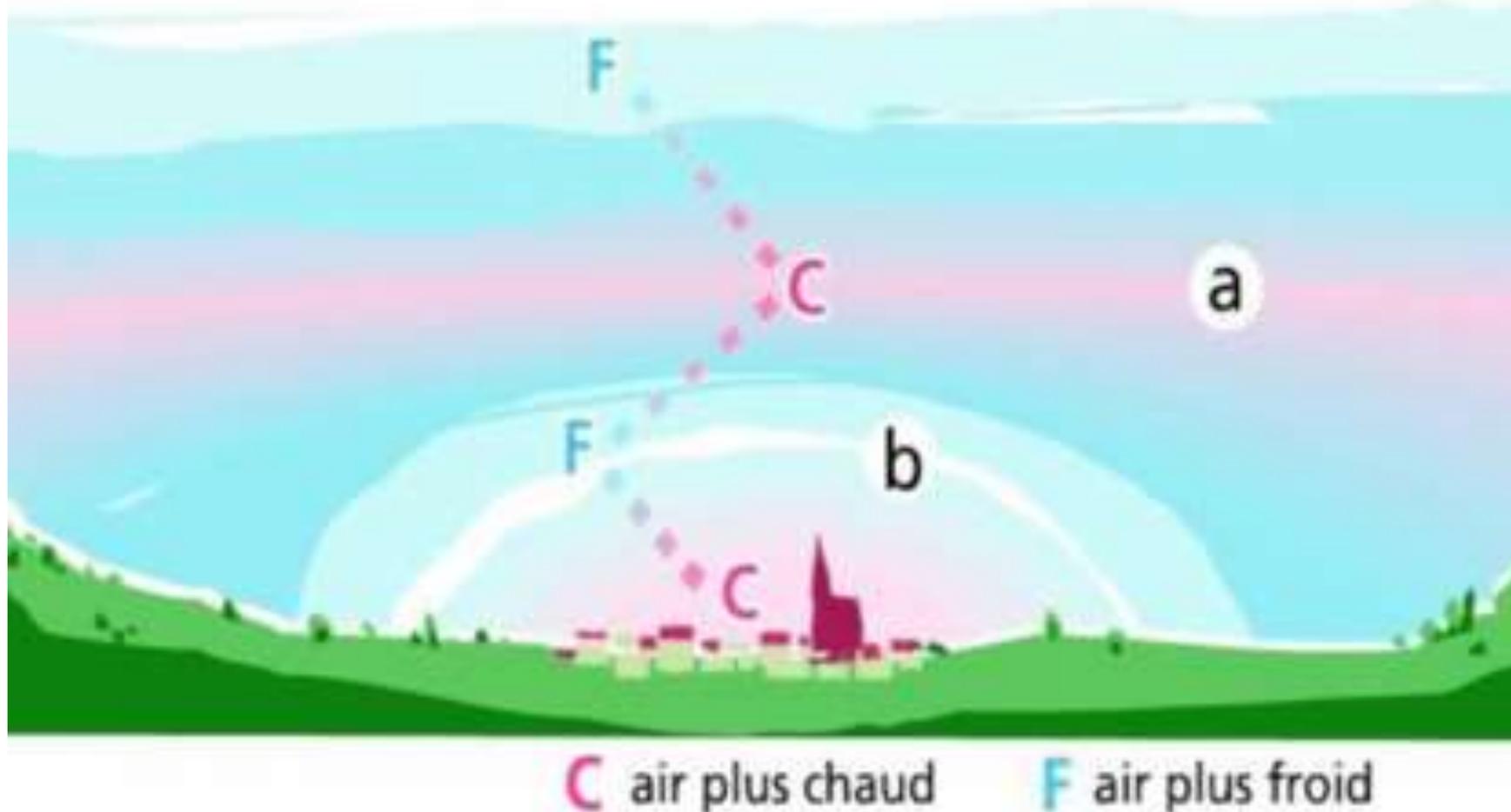
# Prise en compte de l'éco-conduite dans les prévisions 2020

## Evolutions des émissions de PM10 - Ile-de-France

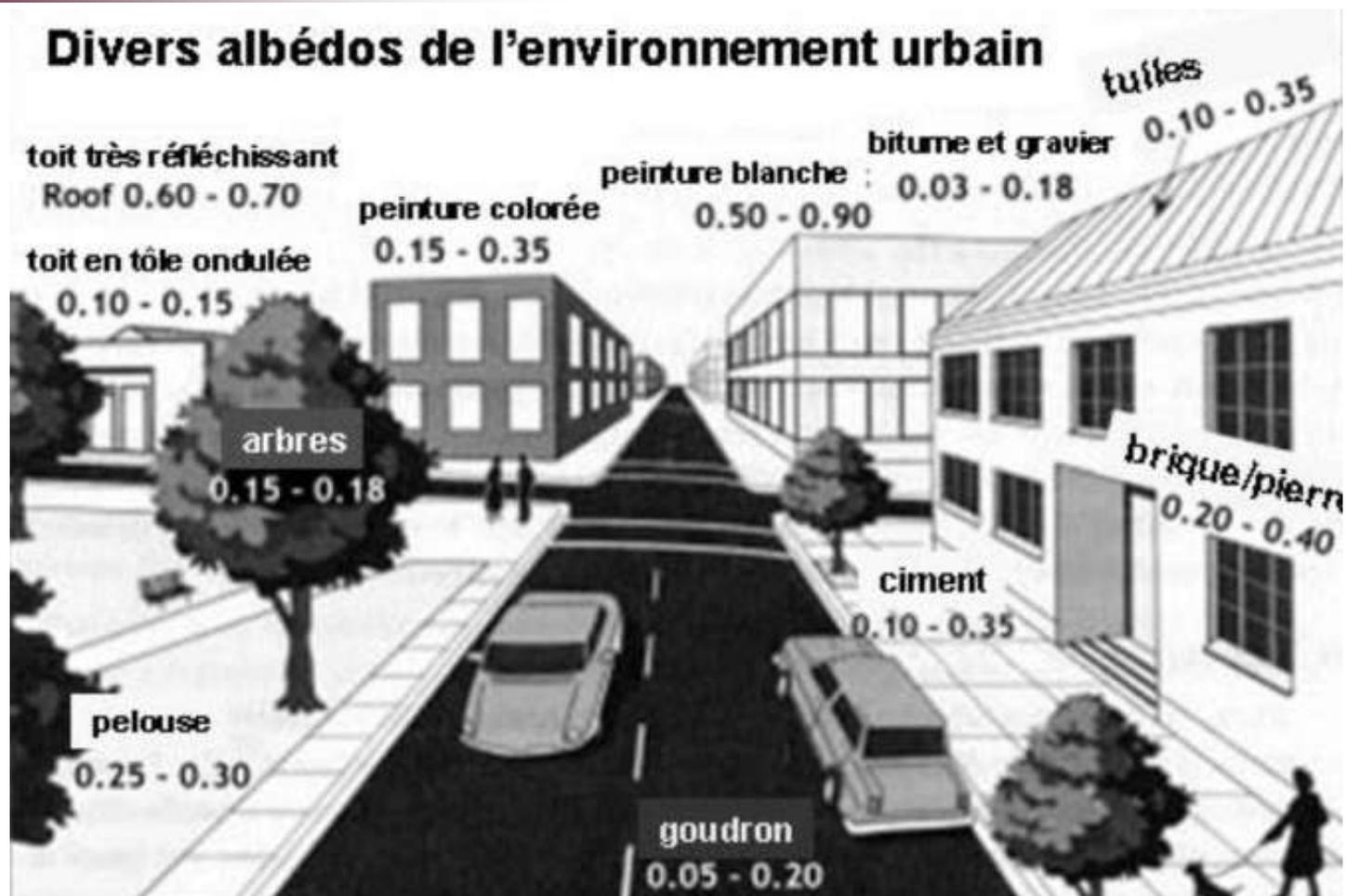


## Le dôme urbain et l'inversion de températures en hiver

Le sol refroidit fortement pendant la nuit tandis que l'atmosphère se réchauffe rapidement . Les polluants, notamment émis le matin par le trafic routier, se trouvent piégés sous un effet de couvercle d'air chaud. Ils ne peuvent plus s'élever et être évacués .



## Effet de l'albédo en ville

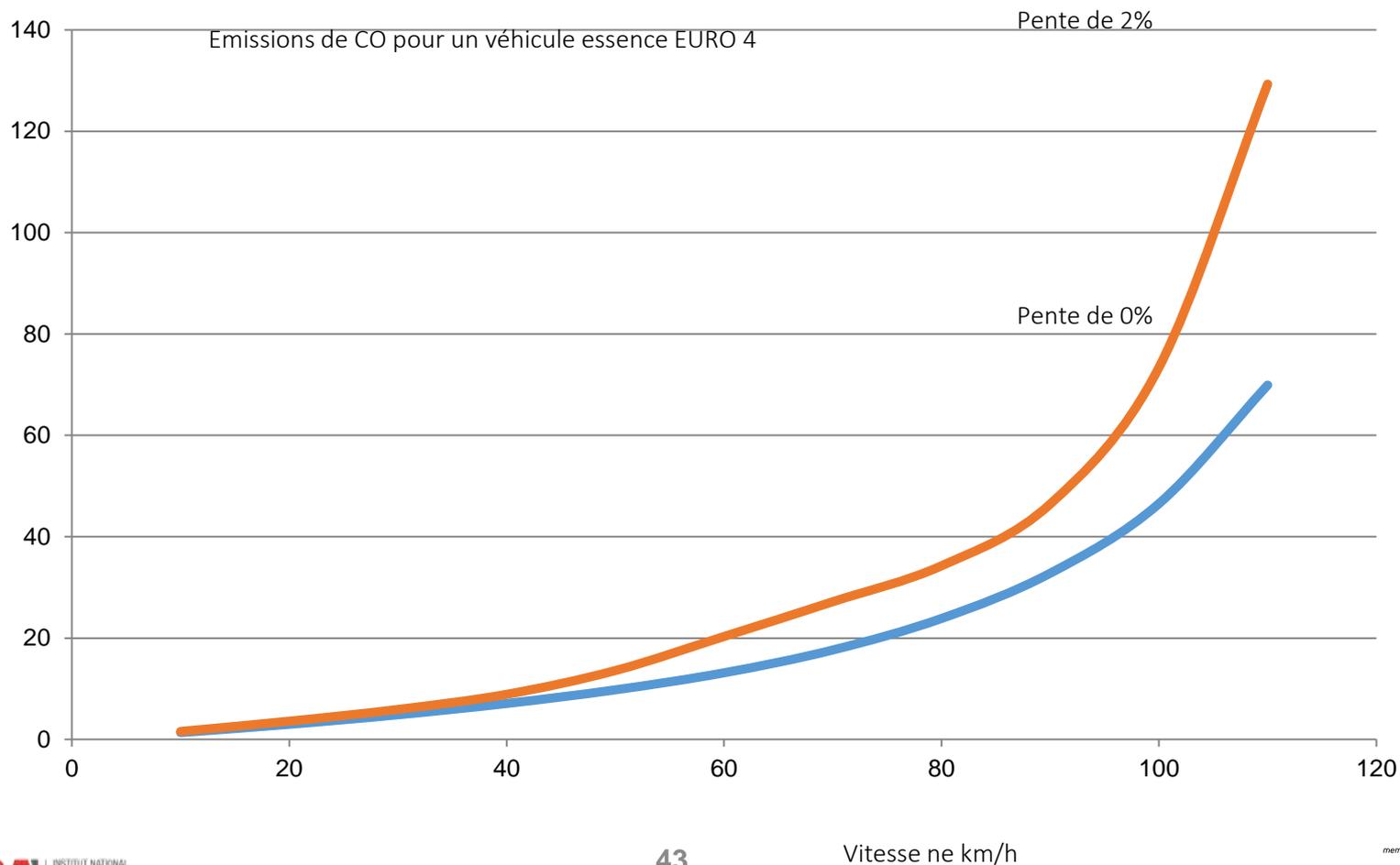
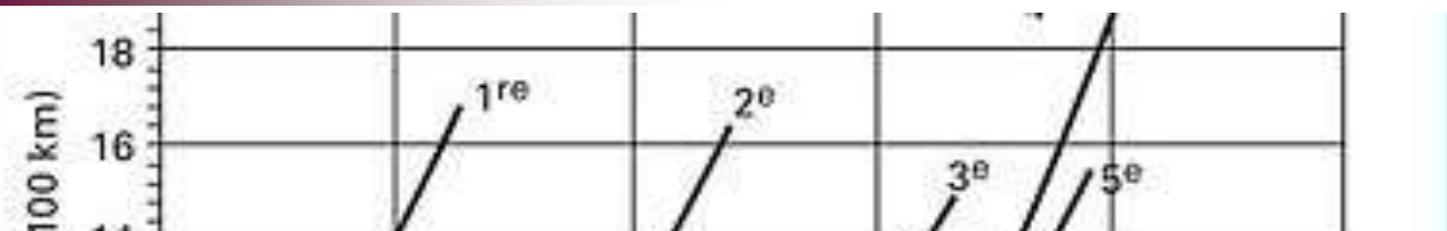


Chaleur anthropique, notamment en hiver : chauffage, climatisation, industries, circulation automobile, éclairage, ...=>

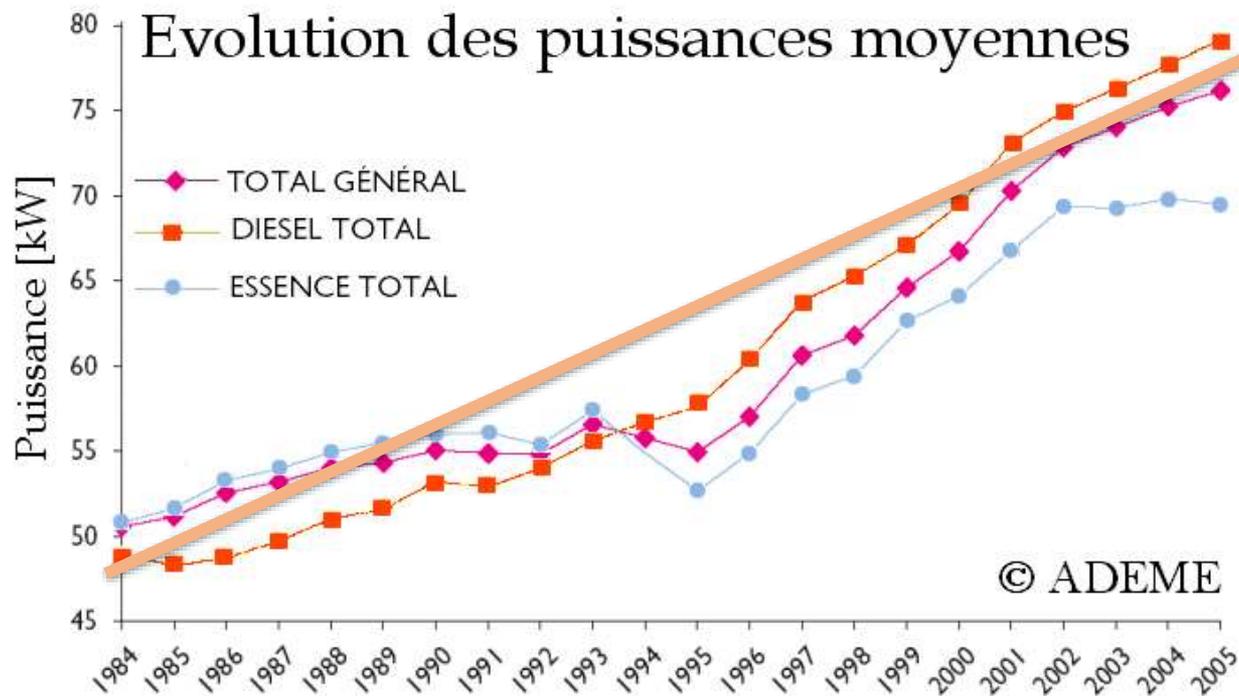
Hausse des températures et de la pollution

Par exemple, une route éclairée aura une température d'1°C supérieure par rapport à une route non éclairée.

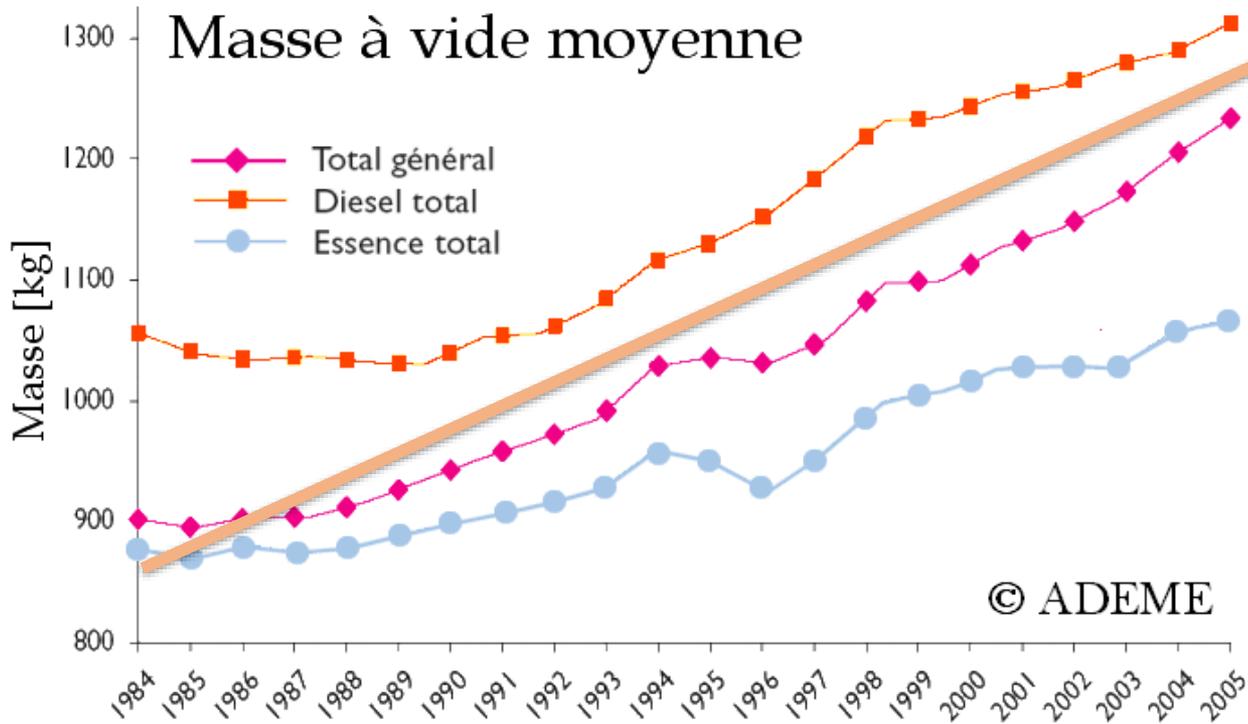
# Effet de la vitesse et de la pente sur l'émission des polluants



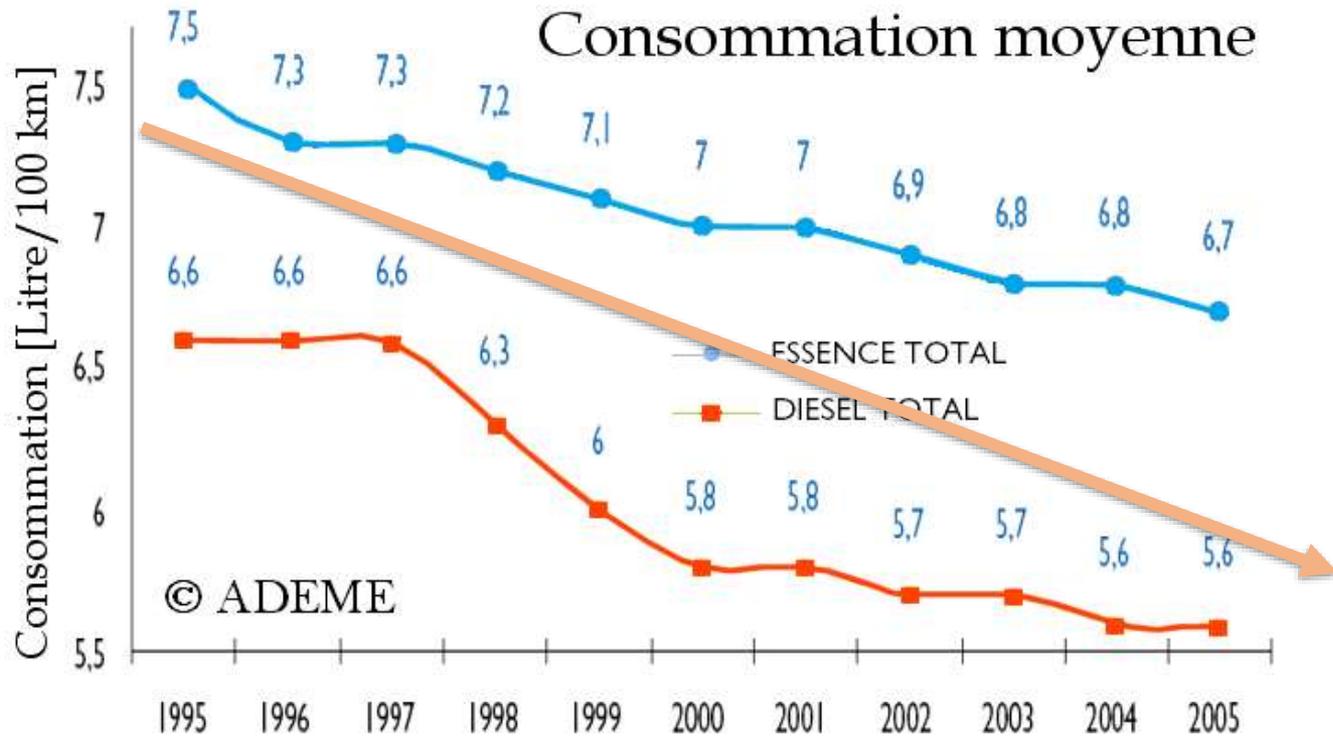
# Perspectives d'évolution



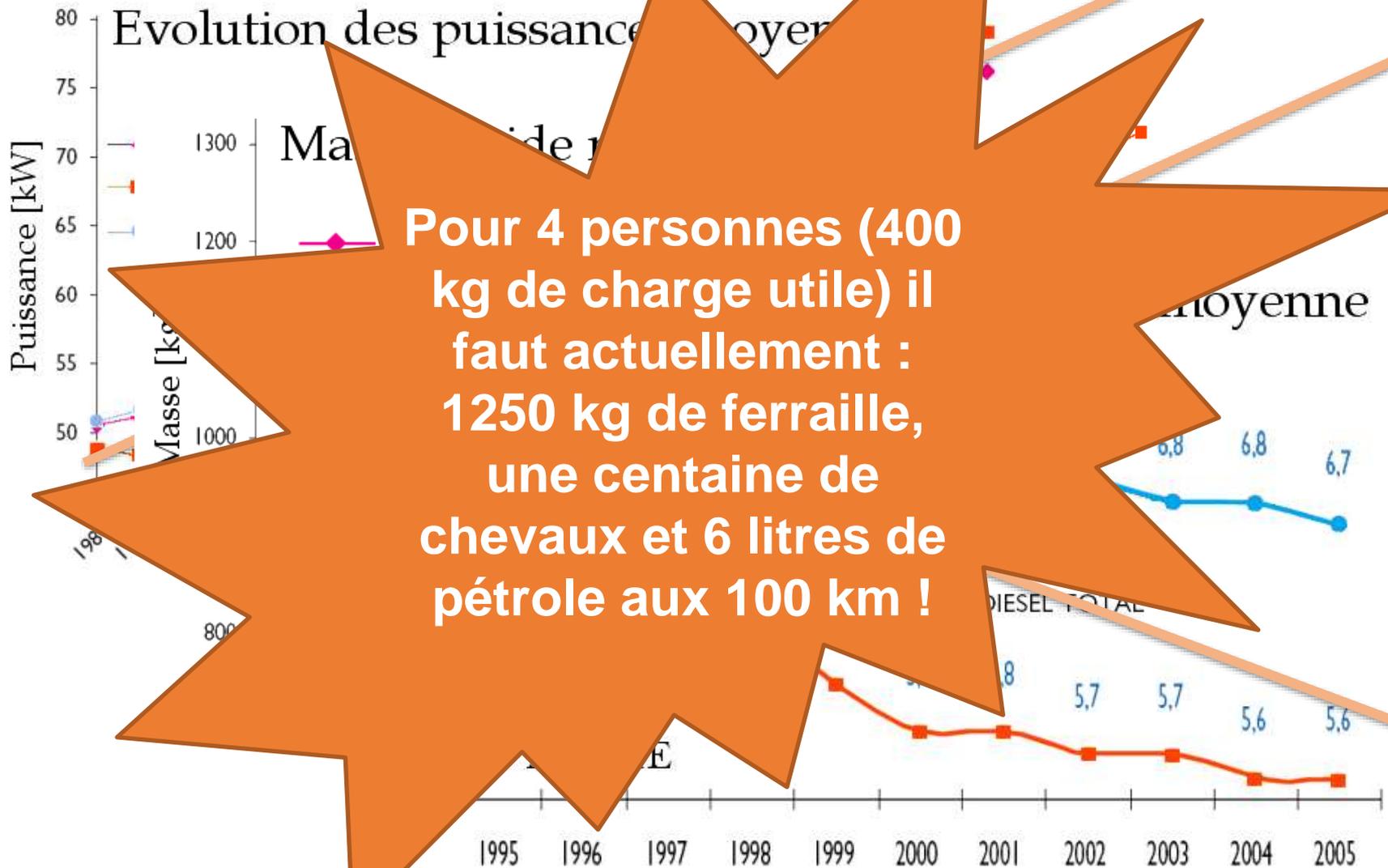
# Perspectives d'évolution



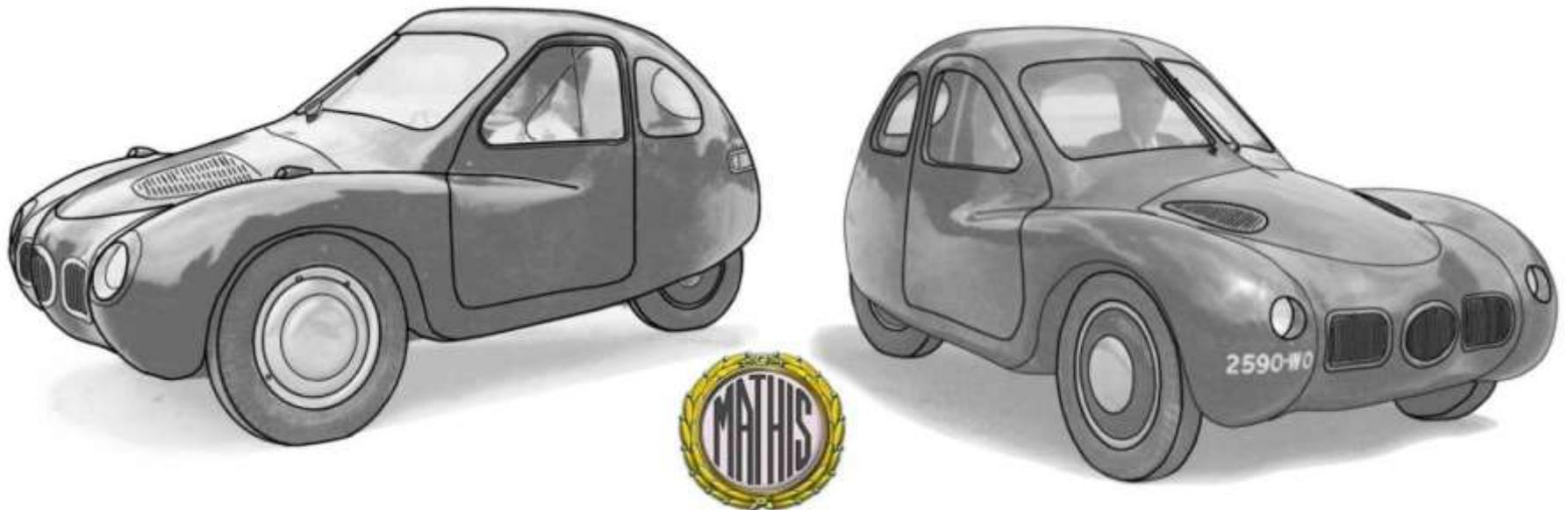
# Perspectives d'évolution



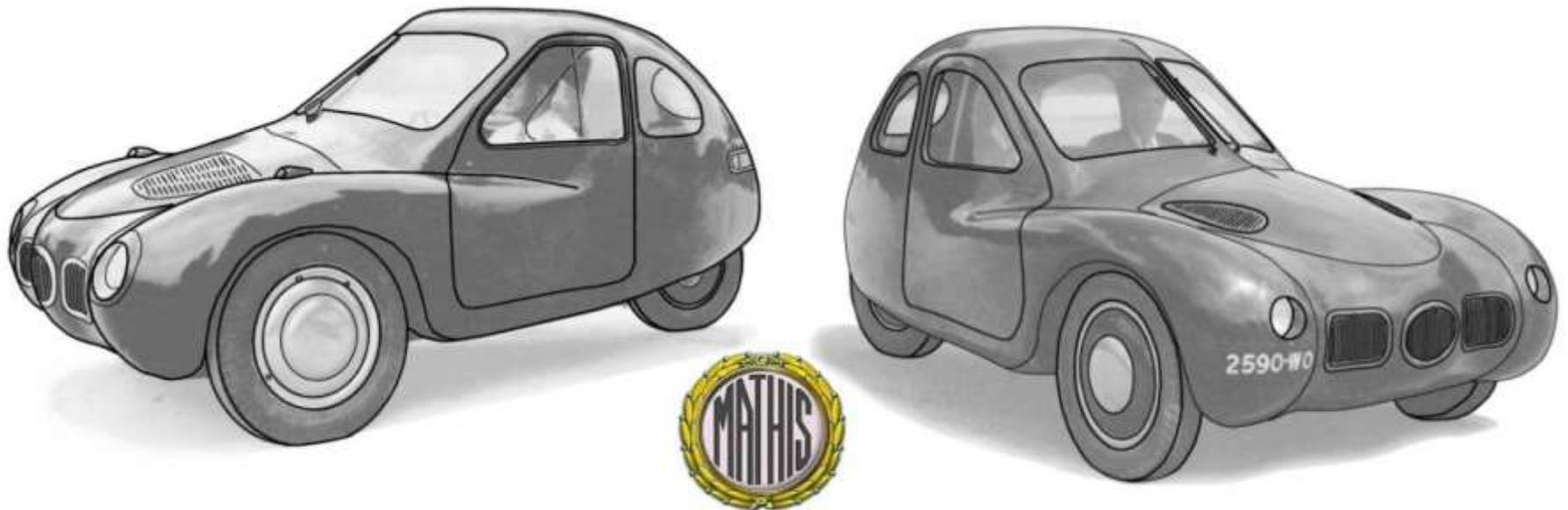
# Perspectives d'évolution



En 1946 on pouvait pour la même performance :  
Avoir seulement 380 kg de masse à vide,  
20 ch au lieu de 100 ch,  
Et 3 litres au 100 km...



La technologie actuelle permettrait d'arriver à :  
1,5 litres au 100 km,  
400 kg de masse à vide (pour le niveau de confort actuel...)  
20 ch au lieu de 100 ch !



La technologie actuelle

1.5 l

400 kg de

arriver

(actuel...)

Et même plus  
loin avec  
l'hybridation  
moteur : 1 litre  
au 100 km



## Architecture type

Un moteur **thermique** irréversible pour fournir la puissance liée au frottement (résistance aérodynamique, contact au sol...)  
+  
Un moteur **électrique** réversible pour la puissance d'inertie, elle-même réversible

