Impact Testing of Reinforced Concrete Slabs

J. Dulac
Electricité de France, SEPTEN, Tour EDF-GDF, F-92080 Paris la Défense, Cédex 8, France

J.P. Giraud
Electricité de France, CEMETE, Quartier Valcros CD No. 65, F-13100 Aix-en-Provence, France

INTRODUCTION - When a reinforced concrete slab is subjected to an accidental short time load, as for instance an aircraft crash or a pipe rupture, the conventional elastic design requires a dense network of reinforcement to withstand the overall bending. In order to reduce the construction costs of anti-missile structures, it would be of interest to take advantage of the potential plastic behaviour of reinforced concrete slabs.

ELECTRICITE DE FRANCE has initiated a research program on the non linear behaviour of RC slabs subjected to short time loads, such as soft missiles. This program includes an experimental part and a theoretical analysis to simulate, through computation models, the behaviour of tested plates and try to deduce some pratical rules for plastic design. The ultimate purpose is to show that it is possible to drastically reduce the bending reinforcement of anti-missile slabs without fearing failure or even large deflection. We present in this paper the first test results regarding accidental loads due to small aircrafts (LEAR JET or CESSNA).

THE TESTS - The final aim being to develop a computation model, it is not attempted to reproduce exactly on a reduced scale the behaviour of a given anti-missile wall under a given impact (LEAR JET or CESSNA). We only try to reproduce in the test slabs the same type of phenomena as in real slabs, that is low shearing and overall flexion.

To achieve this, tests are conducted on slabs at 1/10 scale. The exact shape of the loading signal F (t) is not reproduced, but the peak level of this force is kept (and made compatible with the scale) to derive the same type of behaviour in flexion, and the same loading area is kept (still at a 1/10 scale) to simulate the same shearing stresses around the contact area.

The tested slabs are square (about 2.m long and 12 cm thick), either simply supported or clamped at the edges. They are loaded in their center and the loading results from the dynamic crushing (in the axial direction) of 1 or 2 steel pipes by a falling mass. Before the test the pipes are simply standing on the upper face of the slabs and maintained by a steel bearing plate which is used to control the loading area. The concrete strength on the test day, the reinforcement strength, the loading force with respect to time F (t) and the central displacement W (t) are mesured at each test.

The experimental process is developed in the following way : to a given geometry of the slab and a given loading must correspond an elastic design. A less reinforced slab will have a non-linear behaviour.

The purpose of the testing is to subject to the same loading a set of slabs with different rates of bending-reinforcement, in order to see at which one (with respect to the elastic design) the failure occurs. Twenty slabs have already been tested.

CONCLUSIONS - These first tests show that in the case of accidental loading due to small plane crashes :

1 - There is no risk of shearing failure even though the slabs have no shear reinforcement.
2 - It is possible to reduce significantly the bending-reinforcement (by 50 %) without provoking large deformations or failure (with plastic hinges and mechanisms).

I - INTRODUCTION - Dans le dimensionnement des ouvrages de Génie Civil, des agressions externes de même probabilité d'occurence doivent être traitées avec des marges de sécurité comparables vis-à-vis de la ruine.

Or on admet actuellement, pour la tenue locale d'un mur sous l'impact d'un projectile dur, de dépasser largement le domaine élastique des matériaux. Il est donc logique d'admettre, pour la tenue d'un mur sous l'impact d'un avion, d'une tuyauterie rompue ou de tout autre projectile mou, un dimensionnement dans le domaine plastique.

Nous limitons ici notre analyse au problème des petits avions - LEAR JET et CESSNA - qui sont des cas de charge réglementaires en FRANCE. L'impact d'un petit avion de ce type ne pose pas de problème majeur d'ébranlement des bâtiments, ni de problème important de cisaillement à la périphérie de la zone d'impact. Le seul problème est d'assurer la tenue en flexion du voile soumis au choc.

L'intérêt du dimensionnement de ces voiles dans le domaine plastique, au lieu du dimensionnement élastique classique, est de permettre des économies notables sur les ferraillages de flexion.

Le but de l'étude entreprise à Electricité de France est de mettre au point une méthode de dimensionnement dans le domaine plastique des dalles de protection en Béton Armé. Le programme comprend deux aspects : le développement de modèles de calcul et la réalisation d'essais de validation.

II - LES ESSAIS - Il n'est pas question de reproduire à petite échelle (environ 1/10) l'effort de chargement F (t) produit par un impact d'avion - Figure 1 - Les essais devant servir à valider un modèle de calcul, il suffit d'y reproduire les mêmes phénomènes physiques que lors d'un impact sur une dalle réelle : cisaillement faible et comportement essentiel en flexion. Mais il n'est pas nécessaire de respecter la forme complète du signal F (t).

Le chargement dans les essais est obtenu en écrasant, suivant son axe, sur la face supérieure de la dalle, un tube métallique à l'aide d'un mouton de 500 kg tombant d'une hauteur de chute de 5 à 7 m - Figure 3 - Le niveau moyen de ce chargement - Figure 2 - correspond à la force de flambage dynamique du tube et dépend essentiellement des caractéristiques de ce même tube (diamètre, épaisseur...). Les tubes utilisés ici (roulé - soudé 72 - 76 mm) donnent un effort moyen de 10^5 N environ.

Toutes les dalles d'essais sont carrées, chargées au centre et leur ferraillage est le même sur les deux faces et suivant les deux directions.

La démarche expérimentale est la suivante : pour une géométrie de dalle donnée et un charfement donné, il existe un dimensionnement élastique. Toute dalle qui serait moins ferraillée aura un comportement non linéaire. Les essais consistent à réaliser toute une famille de dalles ne différant entre elles que par le ferraillage de flexion, toutes soumises au même chargement, et à voir à quel niveau de sous ferraillage (par rapport au dimensionnement élastique) se produit la ruine.

Deux familles de dalles sont présentées ici :

* Les dalles en appuis simples - 1.80 m X 1.80 m entre appuis 12 cm d'épaisseur.

* Les dalles encastrées - 1.90 m X 1.90 m - 12 cm d'épaisseur.

Les caractéristiques des dalles sont récapitulées dans le tableau I.

Certaines dalles ne présentent pas après un premier chargement "monotube" (écrasement d'un seul tube) de signes nets de plasticité : flèche résiduelle faible, fissures peu visibles... Elles sont alors soumises à plusieurs essais successifs identiques ou à des essais de chargement double réalisés en écrasant simultanément 2 tubes - essais "bitube".

L'ensemble des résultats expérimentaux figure dans le tableau II. Ces résultats peuvent aussi être présentés sous une forme graphique. L'usage de variables adimensionnelles permet alors de regrouper sur un même dessin les essais "monotube" et "bitube" d'une même famille de dalles - voir figure 4 - résultats des dalles en appuis simples.

Comparaison Essais - Calculs. Sans entrer dans le détail des modèles de calcul, qui ont été présentés par ailleurs [1], et qui prennent simplement en compte la plasticité en flexion des dalles BA (théorie des plaques minces - critère de plasticité de JOHANSEN - loi d'écoulement plastique associée...) il est intéressant de reporter sur cette même figure 4 les résultats de calculs correspondant aux essais.

III - CONCLUSIONS - L'ensemble des résultats précédents appelle les remarques suivantes :

* Sur l'exemple précis de chargement réalisé dans ces essais, on observe que la ruine n'apparait (avec la dalle 10) que pour une réduction du ferraillage de flexion de 60 % par rapport à un dimensionnement élastique. Cet exemple laisse espérer, pour d'autres chargements, des réductions intéressantes de ferraillage, tout en adoptant une marge de sécurité correcte.

* Un modèle de calcul prenant simplement en compte la plasticité en flexion des dalles (critère de JOHANSEN) est en mesure de retrouver ce niveau de ruine. Cette validation demande à être confirmée.

* Certaines des dalles essayées ne comportaient aucun ferraillage d'effort tranchant (dalles 11 et 12). Leur comportement est analogue à celui des autres dalles, ce qui permet de penser qu'un tel ferraillage est inutile pour un problème à faible cisaillement comme celui du petit avion. Ceci aussi mérite confirmation.

[1] Inelastic Behaviour of reinforced concrete slabs subjected to impact loads - Experimental and numerical analysis
J.L. COSTAZ - J. DULAC - J.F. LABOUDIGUE - papier J 7/4 SMIRT 5.

TABLEAU I : CARACTERISTIQUES DES DALLES D'ESSAIS

	N° de la dalle	Ferraillage de Flexion			b (10^5 Pa)	Me (10^4 N)	Effort tranchant
		Ø (mm)	maille (cm)	e (10^7 Pa)			
Appuis simples	1	HA 8	10 X 10	55	360	2.60	HA 6
	2	HA 6	8 X 8	50	380	1.56	HA 6
	6	HA 8	10 X 10	50	540	2.20	HA 6
	7	HA 14	10 X 10	45	460	5.60	HA 6
	8	HA 10	10 X 10	50	520	3.40	HA 6
	9	HA 6	8 X 8	50	570	1.60	HA 6
	10	HA 6	12 X 12	50	540	1.15	HA 6
	11	HA 10	10 X 10	50	450	3.4	0
	12	HA 6	8 X 8	50	460	1.6	0
Encastrement	3	HA 10	10 X 10	47	470	3.15	HA 6
	4	HA 8	10 X 10	47	430	2.06	HA 6
	5	HA 6	8 X 8	44	570	1.40	HA 6

Ø diamètre des aciers de flexion - e limite élastique des aciers de flexion - b résistance moyenne à la compression simple du béton - Me moment élastique limite de la dalle.
Effort tranchant : le ferraillage d'effort tranchant est constitué dans la zone centrale des dalles (diamètre 70 cm) de 2 HA par noeud de ferraillage et ailleurs de 1 HA.

TABLEAU II : RESULTATS DES ESSAIS

dalle	N° essai	Chargement	Wmax 1 (mm)	Wres (mm)	tmax 1 (ms)
1	1	M	4.5	-	8.0
	4	B	25.1	4.9	14.
	5	B	25.8	3.9	14.
2	1	M	5.0	-	8. → 10.
	2	B	33.1	17.1	24.
	3	B	33.3	13.9	18.5
	4	B	34.1	12.9	17.
6	1	M	1.08	0.19	7.5
	2	M	1.15	0.08	8.
	3	B	19.	5.8	17.
	4	B	25.2	6.7	14.
7	1	M	1.85	0.23	7.
	2	B	8.	1.	11.
	3	B	> 8.8	0.44	8.5
	4	B	> 8.8	0.24	10.
	5	B	10.8	0.1	10.
	6	B	11.4	0.3	9.5
8	1	B	17.	4.5	15.
	2	B	20.5	3.3	14.
	3	B	21.5	2.	13.

TABLEAU II : (Suite)

dalle	N° essai	Chargement	Wmax 1 (mm)	Wres (mm)	tmax 1 (ms)
9	1	B	35.0	17.5	24
	2	B	38.5	18.	21
10	1	B	63.5	45	32
11	1	M	2.	0.5	6.
	2	M	2.9	0.25	7.
	3	B	13.8	2.2	10.5
	4	B	14.5	0.75	11.
12	1	M	2.9	0.75	9.5
	2	M	5.	0.75	8.5
	3	B	39.	19.	24.5
3	1	M	2.61	0.7	9.5
	2	M	2.42	0.3	6.5
	3	M	2.46	0.2	-
	4	M	2.58	0.08	-
	5	B	5.3	0.4	6.5
	6	B	6.5	0.3	6.
4	1	M	2.07	0.65	7.
	2	M	1.85	0.23	7.5
	3	B	4.6	0.8	7.5
	4	B	6.8	0.7	6.5
	5	B	7.2	0.6	6.
5	2	M	1.92	0.15	7.
	3	B	5.	1.4	8.
	4	B	6.9	0.9	8.5
	5	B	7.8	0.9	9.

Chargement "monotube" M au "bitube" B - Wmax 1 premier maximum de la flèche
Wres flèche résiduelle après impact - tmax 1 temps d'apparition du premier maximum de la flèche

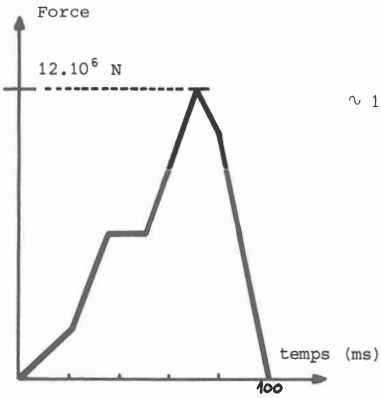

Figure 1 : Effort d'impact d'un LEAR JET 23 à 100 m/s

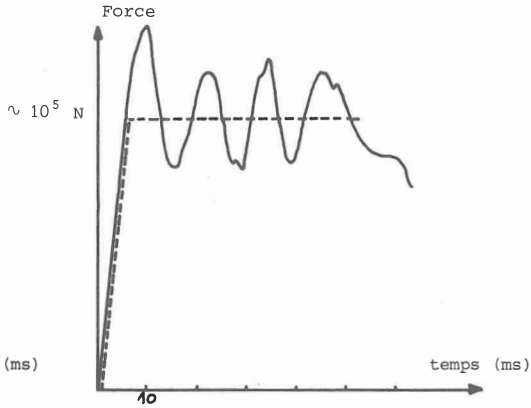

Figure 2 : Effort d'écrasement dynamique d'un tube (——) et simplification (---) pour les calculs

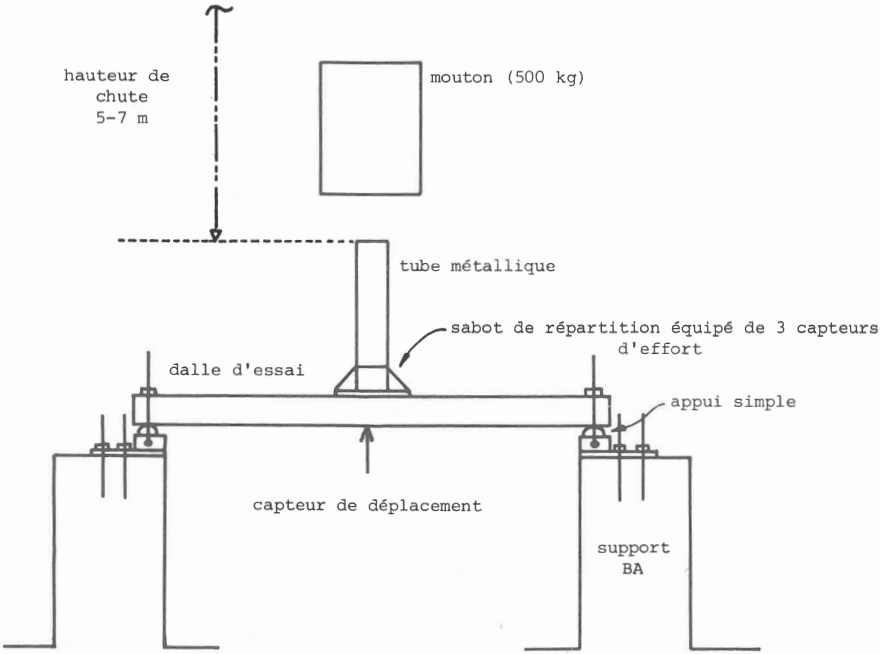

Figure 3 : Dispositif expérimental

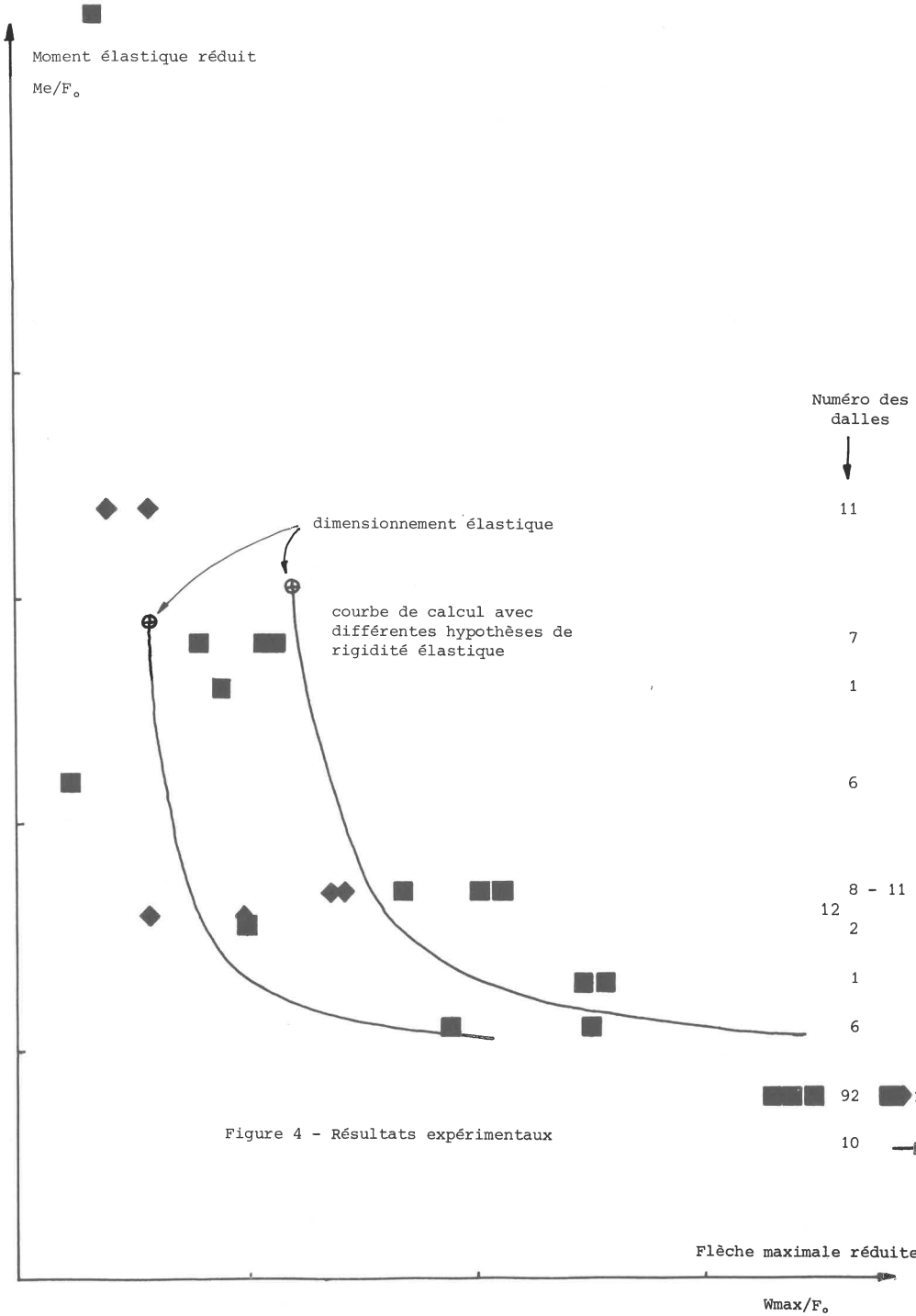

Figure 4 - Résultats expérimentaux