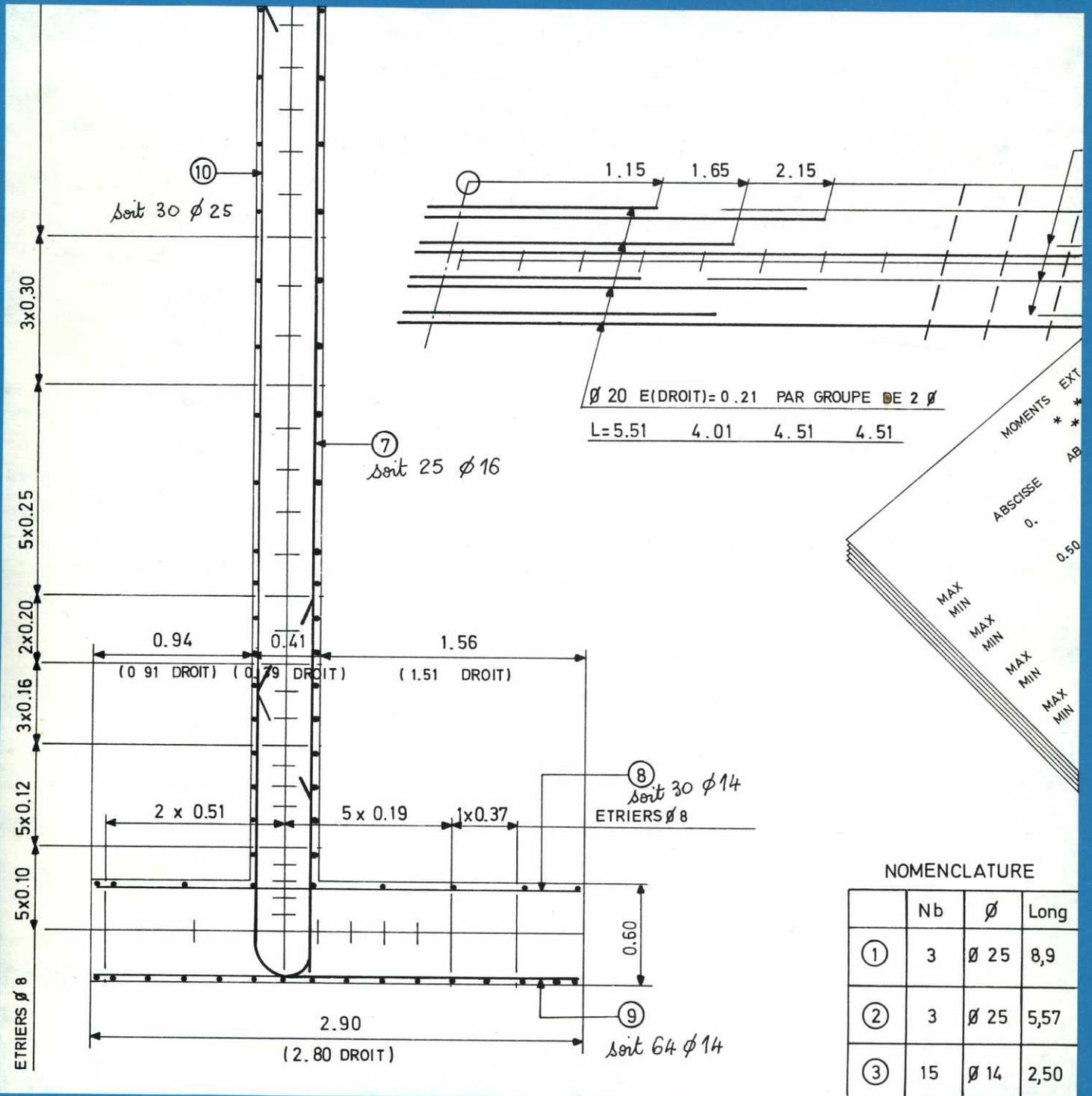


VEE 77

SETRA

DIVISION
DES
OUVRAGES D'ART B

RECOMMANDATIONS POUR LA VÉRIFICATION DES ÉTUDES D'EXÉCUTION DES OUVRAGES D'ART



2-015

Les présentes Recommandations, rédigées par H. MATHIEU, sont diffusées par la Division des Ouvrages d'Art B du S.E.T.R.A. Elles sont également gérées par cette même Division (cf. CAT 75), les gestionnaires étant en premier lieu M. M. THENOZ et en second lieu M. H. MATHIEU, Ingénieurs en Chef des Ponts et Chaussées.

Ce document n'a pu être établi que grâce à des apports à caractère fondamental de MM. Ch. SALZMANN, Ingénieur E.P.Z. et M. THENOZ, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées. Mais il a en outre bénéficié de participations très importantes émanant notamment de MM. A. MOGARAY, Ingénieur Général des Ponts et Chaussées, M. PRADE et M. VILLEMAGNE, Ingénieurs en Chef des Ponts et Chaussées, J.L. BRAULT, H. GRELU, F. HANUS et J. NOURISSON, Ingénieurs des Ponts et Chaussées, J. MONOT, Ingénieur Divisionnaire et Ph. LECROQ, Ingénieurs des Travaux Publics de l'Etat. Pour en donner une idée, nous précisons que le volume total de ces participations dépasse le volume du document lui-même.

SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES
DES ROUTES ET AUTOROUTES
S.E.T.R.A.



RECOMMANDATIONS
POUR LA VERIFICATION DES ETUDES D'EXECUTION
DES OUVRAGES D'ART
V.E.E. 77
TABLE DES MATIERES

	N° de page
1. - INTRODUCTION	1
1,1. - Origine du document	1
1,2. - Nature du document	1
1,3. - Ouvrages considérés par le présent document-type.	2
1,4. - Place par rapport aux autres documents-types	2
1,5. - Importance du sujet traité.....	3
1,6. - A qui s'adresse le présent document ?	3
1,7. - Références	3
2. - APERCU SUR LES ROLES, DEVOIRS ET RESPONSABILITES	4
2,1. - Les ambiguïtés et le caractère évolutif de la situation présente	4
2,2. - Les diverses natures de responsabilités	4
2,3. - Les différentes fonctions exercées	5
3. - LES OBJECTIFS A ATTEINDRE A L'OCCASION DES VERIFICATIONS	7
3,1. - Les quatre critères principaux	7
3,2. - Précisions complémentaires (pérennité à rechercher, esthétique, qu'est-ce que se convaincre ? précision nécessaire des calculs, robustesse de l'ouvrage).	9
4. - LA CONSISTANCE DES ETUDES D'EXECUTION	12
4,1. - Où commencent les études d'exécution ?.....	12
4,2. - Où se terminent les études d'exécution ? (que doit fournir l'entrepreneur ? que doit-on vérifier ? jusqu'où pousser les calculs ? rôle du vérificateur vis-à-vis de la consistance)	12
5. - LES DIFFERENTS CAS POUVANT CONDUIRE A DES METHODES DIFFERENTES DE VERIFICATION	15
5,1. - Selon les ouvrages (ou parties d'ouvrages) à réaliser	15
5,2. - Selon les conditions dans lesquelles on va devoir faire le contrôle	15
5,3. - Selon la composition de l'équipe de vérification	18

6. - LA PREMIERE PHASE DE LA VERIFICATION	22
6,1. - Rappel des opérations préliminaires	22
6,2. - Premier survol des études d'exécution	24
6,3. - Premier jugement de l'étude d'exécution	25
6,4. - Dessins d'exécution incomplets	26
6,5. - Rejet d'études d'exécution de qualité par trop insuffisante	26
7. - LA DEUXIEME PHASE DE LA VERIFICATION	28
7,1. - Vérification détaillée des dessins; faisabilité ...	28
7,2. - Les méthodes théoriques de vérification des calculs (vérification directe, vérification par calculs parallèles, vérification par sondages et recoupements)	31
7,3. - La méthode pratique de vérification des calculs ..	35
7,4. - Règles de détail des vérifications (principes fondamentaux de la sécurité et de la qualité, liste de ce qui est à vérifier, justifications non fournies par l'entreprise)	37
7,5. - Exemples d'application	41
7,6. - Conclusion de la vérification	42
7,7. - Attitude et qualités nécessaires du vérificateur .	44
8. - CAS NON CONSIDERES DANS LES CHAPITRES PRECEDENTS	45
8,1. - Ouvrages provisoires	45
8,2. - Ouvrages types (ou éléments-types) du S.E.T.R.A. ...	47
8,3. - Ouvrages types autres que ceux du S.E.T.R.A.	48
8,4. - Etudes pour la modification ou la reconstruction d'ouvrages existants	49
8,5. - Etudes pour l'admission de convois exceptionnels sur les ponts existants	49
8,6. - La vérification inversée	50
8,7. - La vérification de 2ème lecture	52
ANNEXE A - Analyse des diverses sortes de responsabilités	54
ANNEXE B - Développement et illustration des principes fondamentaux de la sécurité et de la qualité	63
ANNEXE C - Indications sur les dommages les plus couramment causés par des défauts d'études d'exécution	69
ANNEXE D - Programmes élémentaires de calcul du S.E.T.R.A. à utiliser pour des opérations partielles de vérification.....	75
ANNEXE E - Article 3.05,34 du C.P.S.T. de 1969, mise à jour n° 2 : Calculs automatiques produits par l'entrepreneur ..	76
ANNEXE F - Paragraphe 3.4.2.4. du document D.J. 75 : Calculs justificatifs définitifs	78
ANNEXE G - Indications provisoires pour la vérification de calculs automatiques selon les programmes MRB.....	80

RECOMMANDATIONS
POUR LA VERIFICATION DES ETUDES D'EXECUTION
DES OUVRAGES D'ART

V.E.E. 77

1. - INTRODUCTION.

1,1. - ORIGINE DU DOCUMENT :

Le présent document-type répond à une demande qui nous a été adressée depuis plus de dix ans, rappelée à plusieurs reprises depuis cette époque, et qui vient d'être renouvelée par le groupe responsable du thème 1 du cycle d'études 1976-77 de la D.R.C.R.

On peut a priori s'étonner que ces demandes réitérées n'aient pas été plus rapidement satisfaites. La cause en est la difficulté du sujet, qui ne peut être valablement traité par des moyens simples (genre check-list) qui seuls à l'origine avaient été envisagés.

En raison de cette difficulté, ce document-type n'a pu être établi que grâce à la participation d'une dizaine d'Ingénieurs de grande expérience extérieurs au S.E.T.R.A, dont on trouvera les noms au verso de la page de garde. Cette participation elle-même n'a pu leur être demandée qu'en proposant à leurs réflexions une étude de base suffisamment substantielle.

Cette étude de base est due à une très heureuse initiative de SCETAU-ROUTE qui en a chargé M. Ch. SALZMANN, Ingénieur E.P.Z., bien connu par les services distingués qu'il a rendus au cours des 15 dernières années pour les études des ouvrages d'art de multiples autoroutes, notamment dans le quart Sud-Est de la France. Elle comportait la description détaillée de plusieurs méthodes de travail et des résultats constatés.

Une première enquête, lancée fin Octobre 1976 sur cette étude de base, a suscité plusieurs dizaines de pages de réponses dont le dépouillement, le classement et le développement ont permis d'aboutir fin Décembre 1976 à un "Essai" de 57 pages qui a à son tour donné lieu à une nouvelle et très substantielle série de réponses, à l'issue desquelles le présent document-type a pu être préparé.

Nous devons ajouter qu'à la même époque nous avons eu la chance de bénéficier de réflexions approfondies menées sur plusieurs sujets étroitement connexes, notamment dans le cadre du Conseil Général des Ponts et Chaussées et du Cycle d'études, et d'informations sur les méthodes suivies par les services de la construction de la République Fédérale d'Allemagne.

1,2. - NATURE DU DOCUMENT :

Il s'agit d'un document-type, essentiellement méthodologique, mais qui est de nature pédagogique plus qu'il ne constitue un véritable guide pour les ingénieurs concernés.

Tant en raison de la difficulté du sujet (qui comme on le verra résulte en particulier de sa diversité) que de la nouveauté d'un tel document,

nous n'avons pas été jusqu'à établir une Directive, et nous bornons à formuler des Recommandations. Cette formule se justifie aussi par le fait que des études sont en cours pour préciser les responsabilités et les devoirs professionnels dans le cadre et en dehors de l'Administration, et qu'il peut donc en résulter des textes réglementaires qui évidemment une fois diffusés par la voie hiérarchique s'imposeront alors en priorité à chacun.

1,3. - OUVRAGES CONSIDERES PAR LE PRESENT DOCUMENT-TYPE :

Les présentes Recommandations sont établies avant tout pour la vérification des études d'exécution des ponts spéciaux*. Elles restent, en gros, valables pour les vérifications relatives à des ouvrages-types autres que ceux du S.E.T.R.A, et à des ouvrages provisoires.

Pour les ouvrages-types (ou éléments-types) du S.E.T.R.A, les vérifications sont généralement beaucoup plus simples grâce à l'existence de notes de calcul automatique très complètes et très claires, et des dossiers-pilotes; le plus souvent, l'usage de ces derniers suffira sans qu'il soit besoin de recourir au présent document.

Les grands ouvrages (ponts construits par encorbellement, ponts poussés, ponts à haubans, etc ...) restent en dehors du présent document-type. Certes celui-ci a largement bénéficié du fait que presque tous ceux qui ont participé à son élaboration avaient une certaine expérience - souvent même très poussée - dans ce domaine. Mais il a été reconnu que, lorsqu'un tel ouvrage est à étudier (et il n'y en a à construire que quelques dizaines par an) il est préférable, pour les Maîtres d'oeuvre qui n'auraient pas déjà une très grande expérience dans ce domaine, de recourir à l'aide de services spécialisés (C.E.T.E, S.E.T.R.A) plutôt que de s'appuyer sur un document-type qui n'étant pas particulier à un type d'ouvrage reste nécessairement assez général.

Enfin, les études pour la modification ou la reconstruction d'ouvrages existants ou pour l'admission de convois exceptionnels sur des ponts existants ne seront que sommairement abordées dans le présent document-type.

1,4. - PLACE PAR RAPPORT AUX AUTRES DOCUMENTS-TYPES :

Conformément aux principes qui sont à la base de notre bibliothèque, le présent document-type correspond à la seule phase de réalisation pour laquelle il a été établi. C'est dire qu'il se situe :

- à l'aval :

. du Catalogue et Manuel du projeteur (actuellement CAT 75) relatif aux bases des études,

. du document BET (actuellement BET 70) principalement relatif à l'établissement des projets,

. des documents-types relatifs à la consultation des entreprises (actuellement CPST de 1969 avec ses mises à jour - cf. notamment articles 3.05 et 3.12) et au jugement des offres (actuellement directive DJ 75),

. des documents-types PRP, PEF ... et dossiers-pilotes relatifs aux calculs automatiques,

- mais à l'amont des Guides de chantier (excepté les premiers chapitres du GMO 70, qui sont relatifs aux relations avec l'entreprise et à la manière d'engager l'opération).

* Le classement des ouvrages est présentement défini par la Circulaire 75-146 du 24.9.1975, pages 13, 14 et 68 (avec renvoi au CAT, chapitre 10); il est rappelé ici que les ponts spéciaux sont les ponts courants non types.

Néanmoins des raccordements aux documents cités ci-dessus seront effectués, ainsi que les renvois pour des problèmes spécifiques.

De façon schématique, il est admis que la conception générale de l'ouvrage est définitivement arrêtée (et est acceptable), et qu'il fait l'objet d'un marché dont les termes sont classiques, définitivement arrêtés et suffisants. Les problèmes relevant uniquement de l'exécution ne seront pas abordés.

1.5. - IMPORTANCE DU SUJET TRAITÉ.

Cette importance résulte de ce que cette vérification donne la dernière occasion de déceler et corriger les erreurs ou insuffisances contenues dans les études de l'ouvrage. Lorsqu'il s'agit d'erreurs ou insuffisances n'apparaissant pas dans les études antérieures, cette occasion est même la seule. Or l'expérience prouve que la majorité des accidents ou incidents qui surviennent en matière d'ouvrages d'art et ont leur cause dans les études, résultent de détails et/ou concernent des ouvrages provisoires ou des phases d'exécution.

1.6. - A QUI S'ADRESSE LE PRESENT DOCUMENT ?

Ce document s'adresse directement aux Ingénieurs des DDE qui, en tant que chefs d'Arrondissement ou par délégation, ont la charge de vérifier des études d'exécution de ponts relevant de la maîtrise de l'ouvrage de l'Etat. On verra en effet que le cadre administratif n'est pas sans influence sur la consistance des vérifications. Nous appelons en particulier l'attention sur le rôle personnel minimal indispensable du chef d'arrondissement en matière d'organisation, au cas où il ne procède pas lui-même aux vérifications.

En fait, cependant, il est évident que le document peut être plus largement utilisé : d'une part lorsque le cadre administratif est analogue, d'autre part parce que le contenu technique du document a une valeur intrinsèque.

Aussi le présent document nous paraît pouvoir servir à la formation permanente (et pourquoi pas initiale ?) des Ingénieurs. En particulier nous conseillons son usage à des Ingénieurs qui ayant déjà eu, il y a quelques années, à s'occuper d'ouvrages d'art simples, vont avoir la charge d'un ensemble d'ouvrages comprenant un ou plusieurs ponts spéciaux, et ont besoin d'actualiser leurs connaissances dans ce domaine.

1.7. - REFERENCES.

En sus des documents cités au § 1.4, et ceux dont des extraits sont reproduits en divers passages, les présentes Recommandations se réfèrent aux textes suivants :

Nouveau C.C.A.G. en date du 21 Janvier 1976.

Nouvelle D.I.G. ("Guide des maîtres d'ouvrage et des maîtres d'oeuvre pour les marchés publics des travaux") en date des 19 Octobre - 2 Décembre 1976, pages 22, 33 et 146 à 151.

Lettre circulaire du 15 Avril 1976 du Directeur des Routes et de la Circulation Routière prescrivant systématiquement le visa des études d'exécution des entreprises.

2. - APERCU SUR LES ROLES, DEVOIRS ET RESPONSABILITES.

2,1. - LES AMBIGUITES ET LE CARACTERE EVOLUTIF DE LA SITUATION PRESENTE :

Une situation idéale serait celle dans laquelle des textes officiels fixeraient de façon parfaitement claire et réaliste, au moins sur le plan des principes, ce que chacun doit faire. Le présent document n'aurait qu'à s'appuyer sur ces textes et les prolonger au point de vue technique.

Malheureusement on est fort loin d'une telle situation : non seulement sur les plans de la clarté et du réalisme, mais même par rapport à une situation dans laquelle les obligations de chacun seraient définies par des textes unique ou coordonnés, reconnus valables sur les plans tant contractuel qu'administratif et que pénal. De façon concrète, aucun texte n'indique en quoi précisément consiste une vérification et jusqu'où telle personne est tenue de la pousser.

Un certain nombre d'évènements ont mis en évidence que les ingénieurs - et particulièrement les ingénieurs de l'Administration - étaient "assis entre deux chaises" : vivement incités (pour prendre un exemple parmi d'autres), jusqu'à la veille d'un accident, à faire confiance à l'entrepreneur, et le lendemain sommés de se justifier (devant d'autres autorités) d'avoir personnellement tout vérifié. C'est pourquoi des études ont été entreprises pour remédier aux ambiguïtés de la situation présente, et il est prévisible que des textes seront publiés dans ce but.

2,2. - LES DIVERSES NATURES DE RESPONSABILITES :

Dans cette attente, nous plaçons en annexe au présent document une courte analyse des diverses natures de responsabilités dans la situation présente, et nous bornons ici à indiquer que celles-ci sont au nombre de trois :

- civile (légale et/ou contractuelle),
- administrative,
- pénale,

et que l'étendue des responsabilités et leur répartition entre Maître d'oeuvre et Entrepreneur sont différentes selon leur nature. En particulier les clauses contractuelles ne s'imposent pas nécessairement au juge pénal, et seule une jurisprudence encore quelque peu hésitante prend en compte la place de chacun dans l'organisation administrative pour établir a posteriori quels étaient ses devoirs personnels.

D'autre part la jurisprudence (le secteur privé étant principalement concerné) admet certaines délégations de responsabilités, mais sous certaines conditions et en particulier sous condition que le délégué ait une compétence suffisante pour que la délégation apparaisse a priori justifiée.

Pour ce qui concerne la situation future, nous ne pouvons évidemment la décrire alors que les décisions correspondantes ne sont pas encore prises. Nous pensons cependant pouvoir indiquer comme probable à nos yeux qu'elle soit largement basée sur une distinction entre responsabilités de premier rang (dans le cas d'espèce : celle de l'auteur de l'étude d'exécution) et responsabilités de second rang (dans le cas d'espèce : celle de celui qui accorde le visa).

2,3. - LES DIFFERENTES FONCTIONS EXERCEES :

Le présent document-type se place dans le cadre d'une D.D.E réalisant des ouvrages d'art pour le compte de l'Etat. De ce fait, la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'oeuvre sont (cf. C.C.A.G. article 2.1) :

- publiques, ce qui a pour conséquence que les textes relatifs à l'ingénierie privée ne leur sont pas applicables de plein droit; il faut en fait pour cela qu'elles aient fait l'objet d'instructions précises par la voie hiérarchique,

- collectives (personnes morales), quoique l'habitude existe de désigner sous le nom de Maître d'oeuvre l'Ingénieur d'Arrondissement (ce que nous éviterons dans le présent document),

- exercées par les mêmes personnes; la maîtrise d'ouvrage n'est d'ailleurs pas concernée par le présent document et, pour ce motif, il ne semble pas y avoir de contre-indication à ce que son contenu soit valable pour les ouvrages d'art départementaux.

La maîtrise d'oeuvre étant collective, il n'est pas interdit, et il peut même être nécessaire, à l'Ingénieur d'Arrondissement, sous le contrôle de son chef de service, de déléguer à certains de ses collaborateurs tout ou partie de la vérification des études d'exécution, voire le visa des dessins et des calculs.

Rien ne lui interdit non plus de faire appel à un CETE ou à un bureau privé pour la vérification. Mais dans ce dernier cas il n'est pas considéré comme normal que cette délégation doive s'étendre à la signature ; le recours à un BET est évoqué dans le document-type BET 70 (§ 2,1, dernier alinéa).

(
(
(
(
(
(
Dans tous les cas, l'Ingénieur d'Arrondissement doit aviser l'Entrepreneur de la délégation qu'il a donnée en matière de vérification et éventuellement de visa, dans toute la mesure où la mission correspondante peut nécessiter des contacts avec l'Entreprise ou avec ses sous-traitants (ce qui est généralement le cas en matière d'études).

Dans le présent document, nous désignerons sous le nom de "vérificateur" la personne qui est au titre de la maîtrise d'oeuvre chargée de vérifier l'étude d'exécution de l'entreprise. Cette appellation montre que cette mission ne s'identifie pas à celle qu'assurent, essentiellement pour des bâtiments du secteur privé, des "bureaux de contrôle" qui interviennent pour assurer la couverture de la construction par les assurances *.

Rien n'empêche d'ailleurs de confier une mission de vérification à un tel bureau de contrôle, mais à deux conditions :

- s'assurer que la vérification sera assurée par un ingénieur nommément désigné, non seulement qualifié, mais suffisamment spécialisé par rapport à l'ouvrage à construire,

* Nota : lors de la rédaction du présent document, une importante réforme de l'assurance-construction était en cours, et il en résultera des modifications dans les missions de ces "bureaux de contrôle".

- lui définir avec précision la consistance de la vérification qu'il aura à assurer ; de façon concrète, la différence devra être faite sans équivoque entre cette vérification et une "normalisation du risque" dont se contentent les compagnies d'assurances et qui est habituellement définie dans les conditions générales imprimées sur des pages à en-tête de ce bureau.

Enfin, dans bien des cas, il est souhaitable (cf GMO 70, § 2,6) de recourir aux conseils d'un organisme extérieur à la DDE (SETRA, CETE ou BET) pour la solution de problèmes d'exécution se situant à la limite de celles-ci (épreuves, visites ...) ou plus à l'aval. Cette extension des missions, qui sort de l'objet du présent document-type, est citée ici pour mémoire; ses modalités sont en effet très différentes de celles de la vérification des études.

En conclusion, et sans aucunement exclure que l'Ingénieur d'Arrondissement, conformément à sa mission traditionnelle, procède lui-même à des vérifications, nous distinguerons dans le présent document, les deux fonctions :

- de "vérificateur" (que nous supposerons assumées soit par des ingénieurs de la D.D.E., soit par des ingénieurs d'un C.E.T.E., soit par des ingénieurs du secteur privé),

- de "chef d'arrondissement" seul habilité, pour ce qui concerne le présent document, à prendre les décisions préliminaires (constituer l'équipe de vérification, définir certains objectifs ...) et à viser l'étude d'exécution (sans exclure que cette fonction soit exercée par délégation, par exemple par un Ingénieur T.P.E. chef du bureau d'études de l'Arrondissement ou chef d'une subdivision d'E.T.N).

3. - LES OBJECTIFS A ATTEINDRE A L'OCCASION DES VERIFICATIONS :

Les devoirs et les responsabilités en la matière n'étant définis que de façon très vague, comme il ressort du § 2 qui précède et de l'annexe à laquelle il renvoie, il est nécessaire de rechercher quels sont les objectifs à atteindre à l'occasion des vérifications, pour en déduire ce qu'il est nécessaire de faire :

3,1. - LES QUATRE CRITERES PRINCIPAUX :

Les objectifs à atteindre peuvent se ranger suivant quatre critères* :

3,11. - Du point de vue de la valeur technique :

La valeur technique comporte plusieurs aspects, parmi lesquels on peut citer notamment : la sécurité, la qualité intrinsèque (incluant elle-même la pérennité, l'esthétique ...), la qualité fonctionnelle (circulations à assurer, y compris pendant les travaux ; performances mécaniques, également appelées "niveau de service" ; confort ...), la faisabilité, la possibilité d'entretien.

Dans le cas présent, où normalement la "conception tertiaire" est seule en cause, certains de ces aspects (par exemple la qualité fonctionnelle) sont peu à considérer.

Les exigences réglementaires à elles seules ne sont pas toujours suffisantes. Non seulement des "règles de l'art" non codifiées sont généralement à respecter en sus dans les détails des études, mais en outre, lorsqu'on a retenu un mode de construction non classique, les exigences réglementaires principales sont toujours à reconsidérer ou compléter.

En de tels cas il est évidemment souhaitable d'avoir, au stade de la dévolution, inséré dans le marché les clauses remédiant aux lacunes de la réglementation au regard de la solution retenue. Mais si cela n'a pas été fait (ou n'a pas été entièrement fait), il ne convient pas de se laisser arrêter par l'absence de prescription, car :

- l'exigence de sécurité prime toutes autres exigences, en cas de contradiction,

- la qualité, en matière d'ouvrages d'art, occupe par rapport aux autres exigences une place certes variable selon ce qui est en jeu, mais généralement très importante.

De façon générale la vérification doit conduire finalement le vérificateur à se convaincre que, dans la mesure où cela dépend des études, et en considérant les diverses phases de l'exécution aussi bien que la durée de vie escomptée, l'ouvrage aura une bonne valeur technique sous tous ses aspects.

La vérification doit notamment déceler les dispositions qui, à certaines phases d'exécution mais aussi dans certaines conditions non courantes (par exemple affouillement) conduisent à des situations dangereuses ou à une exécution difficile (par exemple lorsque la réussite de l'opération nécessite des phasages délicats).

Au total on voit que l'objectif à atteindre nécessite un certain élargissement de la notion de vérification.

Bien entendu la conclusion de la vérification peut être négative : soit que les études d'exécution ne soient pas bonnes, soit que la conception

* On retrouve pratiquement les cinq critères de jugement des offres, à l'exception des garanties professionnelles et financières. Ces critères sont assez généraux (cf document-type DJ 75) pour englober facilement d'autres critères possibles, tels que le respect de clauses diverses des marchés.

elle-même soit en cause. Il appartient en ce cas au vérificateur de le relever, mais nous entrons ici dans les détails, ce qui déborde de l'objet du présent paragraphe.

3,12. - Du point de vue du coût de l'ouvrage :

De ce point de vue le but de la vérification est loin d'être aussi évident. Plusieurs objectifs sont en effet possibles :

- que l'ouvrage soit le plus économique possible,
- que l'ouvrage puisse être réalisé dans les limites du montant provisoire du marché,
- que le montant forfaitaire du marché ne soit pas remis en cause.

Ces objectifs ne sont pas limitatifs ; on peut, par exemple, imaginer aussi de fixer aux dépenses un plafond qui ne soit pas le montant provisoire du marché, ou de limiter le coût des vérifications (parfois il est moins cher, et plus "payant", de rajouter à bon escient quelques aciers que de développer trop de calculs).

Il n'appartient pas au vérificateur de choisir de lui-même entre ces objectifs; c'est au chef d'arrondissement, après en avoir s'il y a lieu référé à son chef de service, de lui fixer l'objectif à cet égard.

Bien entendu ce choix ne sera souvent pas libre, mais plus ou moins conditionné par les contraintes de l'opération.

Néanmoins il est évident qu'aucun objectif ne saurait prévaloir sur l'objectif de sécurité (§ 3,11); et il va de soi que si des aspects de la valeur technique autres que la sécurité devaient être en opposition avec l'objectif financier, le vérificateur doit en avertir explicitement le chef d'Arrondissement.

C'est d'ailleurs pour éviter de telles oppositions sur les objectifs que certains modes de règlement sont actuellement interdits dans notre Administration.

3,13. - Du point de vue des délais :

Il peut se présenter des cas dans lesquels l'étude d'exécution est à vérifier en ayant en vue sa compatibilité avec le respect des délais : par exemple les dispositions prévues permettront-elles de réaliser certaines phases avant une période de crues ? On peut aussi devoir examiner si elle suppose des délais partiels aux conséquences coûteuses : par exemple durée de ralentissement de trains ou de détournement de circulation. Mais le plus souvent c'est à considérer à propos de la conception.

Par contre le délai de vérification, lié à la date et éventuellement à l'échelonnement de la remise de l'étude à vérifier, est évidemment lui-même toujours un objectif. Normalement cet objectif s'identifie avec le respect de l'article correspondant du marché (cf. article 305,1 du C.P.S.T.). Il est cependant malheureusement trop fréquent que d'autres objectifs de délai pèsent sur les conditions dans lesquelles se fera la vérification, le plus souvent du fait d'autres articles du marché lui-même (délai global notamment).

3,14. - Du point de vue de la maintenance de l'ouvrage :

Outre la possibilité d'entretien, citée ci-dessus au titre de la valeur technique, la vérification doit permettre, pour ce qui concerne les études d'exécution, de disposer après la réalisation d'un dossier d'ouvrage suffisamment complet et exact pour une bonne maintenance et notamment une bonne exploitation de l'ouvrage.

Ceci implique notamment de disposer, à l'issue de la vérification, d'une note de calculs fiable et commodément exploitable par un tiers, qui permette par exemple d'étudier les incidences d'un passage de convoi exceptionnel sur l'ouvrage.

3,2. - PRECISIONS COMPLEMENTAIRES :

3,21. - Quelle est la pérennité à rechercher (cf. § 3,11) ?

La pérennité étant une propriété assez vague, la question peut être formulée de façon plus précise : quelle est la longévité à rechercher ?

Il n'existe aucune prescription officielle à ce sujet.

Dans la Directive provisoire D.J. 75 nous avons cherché à combler cette lacune par des recommandations (voir § 3.1.3.3 et 3.3) qui, en gros, tendent à rechercher des durées de vie de l'ordre du siècle, avec quelques exceptions (buses métalliques, terre armée, certains équipements remplaçables sans trop de difficulté) lorsque certaines conditions précises sont remplies. Cette valeur s'entend pour la structure des tabliers ; elle est normalement plus faible pour les équipements, et très souvent plus grande pour les appuis ; l'inverse serait évidemment anormal.

Il appartient évidemment au chef d'Arrondissement de préciser au vérificateur, le cas échéant, l'objectif en matière de longévité. Mais dans la très grande majorité des cas la longévité recherchée reste sans incidence sur la vérification, le vérificateur ne pouvant guère moduler ses conclusions selon la longévité. Et dans une partie des autres cas (cas notamment des buses métalliques sous remblais) la longévité sera à considérer plutôt au titre de la conception que de la vérification des études d'exécution. La question reste par contre plus ouverte en cas de recours à la terre armée.

3,22 - Quelles sont les conséquences de l'étude d'exécution d'un ouvrage sur son esthétique (cf § 3,11) ?

L'esthétique des ouvrages dépend de bien des facteurs. Ceux qui sont conditionnés par l'étude d'exécution sont principalement les détails qui ont une incidence sur la qualité des parements : reprises de bétonnage mal tracées ou permettant la mise en oeuvre de bétons de couleurs différentes, trous laissés en attente pour motifs divers ou perforations ultérieures (pourtant généralement interdites par le marché), préfabrication partielle conduisant à des différences de couleurs (par exemple corniches dans le cas où contrairement à nos recommandations le type de corniche ne serait pas fixé au stade du projet). Cependant l'esthétique est également subordonnée au respect des profils du projet, qui selon le cas peut dépendre de la qualité des calculs de déformation (poutres préfabriquées notamment) ou du type même de l'échafaudage.

3,23. - Que doit-on entendre par "se convaincre" (cf. § 3,11) ?

Au cours des enquêtes qui ont précédé la préparation du présent document, des discussions passionnées ont eu lieu, LITRE et LAROUSSE à l'appui, sur les nuances des mots "vérification" et "contrôle", sur l'attitude active ou passive que l'on devrait avoir selon le mot employé, et sur les incidences qui devaient en résulter sur les responsabilités.

Nous précisons ici que conformément à la note circulaire du 15 Avril 1976 du D.R.C.R., il s'agit pour la maîtrise d'oeuvre, appelée à viser l'étude d'exécution, d'assumer vis-à-vis de cette étude une responsabilité de second rang qui la conduit à assurer des vérifications très substantielles. Si cela exclut à nos yeux une attitude totalement directive, cela ne s'accommode pas d'une attitude totalement passive.

Quant à la signification du mot "se convaincre", nous admettrons qu'elle est largement subjective et qu'elle ne peut résulter d'une définition limitative de la consistance des vérifications; celles-ci sont donc délimitées par l'appréciation du vérificateur.

Cela dit, la question se pose de la précision que le vérificateur doit reconnaître aux calculs effectués.

3,24. - Quelle est la précision nécessaire des calculs ?

Certes des prescriptions ont été données dans le fascicule 61 VI du C.P.C. de 1970 (article 68) qui exige une précision arithmétique de 3 % de toute contrainte maximale susceptible de dépasser la limite admissible (celle-ci étant fixe), et ce sous condition que le sens des écarts ne soit aucunement systématique. D'autres prescriptions comparables ont été discutées dans le cadre du C.E.B.

Néanmoins, même en se limitant à la précision arithmétique, il n'est pas possible de fixer de façon générale une limite aux tolérances. Cela provient de ce que souvent, et de façon générale dans le cas du béton précontraint, la contrainte (ou la sollicitation) qui est à comparer à la contrainte admissible (ou à la sollicitation admissible) est le résultat d'une différence : les équations s'écrivent en effet alors

$$(S \text{ ou } \sigma) (G \pm Q - P) \leq (R \text{ ou } \bar{\sigma}).$$

On se rend compte qu'une imprécision sur un des premiers termes, sur P par exemple, peut conduire à une imprécision beaucoup plus grande sur le total, et dépendant beaucoup de l'importance relative des différents termes. Qui plus est, lorsqu'on considère un état de décompression, $\bar{\sigma} = 0$ et l'idée même de pourcentage perd toute signification. En fait un écart de 3 % sur la précontrainte peut, selon les cas, signifier une traction de 1 ou 2, voire 3 ou 4 MPa (40 bars, 400 tf/m²). Et il peut en aller de même de divers intermédiaires de calcul* (cas par exemple d'un élément de matériau).

Si on remonte aux causes, on constate par exemple que les charges permanentes (poids propre et superstructures) sont le résultat d'une construction qui s'effectue à l'aide d'un instrument de mesure qui est le double-mètre. La précision est, par voie de conséquence, celle du centimètre. Elle peut donc représenter des pourcentages très variés selon qu'on a affaire à des pièces de structure minces ou épaisses.

De plus, la précision ne peut pas être définie en y incluant la représentativité du calcul; celle-ci est en effet très mal déterminée et en partie couverte par les coefficients de sécurité (γ_{s3} et γ_m dans le cas des réglements aux états-limites).

C'est pourquoi :

- l'idée de pourcentage uniforme d'imprécision tolérable est sans signification : inutilement exigeante dans certains cas, elle peut être dangereuse dans d'autres,

- seule l'expérience de l'ingénieur peut lui montrer, dans chaque cas d'espèce, quelle est la tolérance qu'il peut admettre et la façon de l'exprimer,

- il est donc indispensable que les vérificateurs (de même que les projeteurs) réfléchissent à la signification et par suite à l'importance de ce qu'ils admettent; c'est au total une affaire de doigté et de bon sens.

C'est cela également qui explique l'intérêt de certaines méthodes de vérification qui seront exposées plus loin.

3,25. - Robustesse de l'ouvrage :

A la jonction des § 3,11 et 3,12, on est amené à se poser la question suivante : convient-il, au delà de la valeur technique minimale strictement exigible, et contrairement à l'objectif du coût minimal possible, de chercher à s'assurer de certaines surabondances en certains points de la structure qui pourraient se révéler des points faibles dans certaines circonstances improbables ou imprévues ?

Cette question ne constitue en fait qu'un prolongement de la discussion menée à la fin du § 3,12, et conduit à confirmer l'absurdité d'un objectif de coût minimal dans le cadre des règlements. Cette absurdité a été maintes fois mise en évidence ; ainsi, aux Pays Bas, la "leçon de Cora" (voir rapport final du Congrès A.I.P.C. de TOKYO - 1976) a consisté en ceci : un programme de calcul automatique (CORA), dit d'optimisation du coût, ayant été mis au point, il a été constaté que de façon diabolique il plaçait à tout coup l'optimum à l'extrême limite de validité des règles ou en choisissant des dispositions non envisagées lors de l'établissement des règlements, au grand dam de la sécurité et de la qualité.

Néanmoins, on ne devrait pas conclure du fait que la force portante d'un ouvrage peut souvent, pour 1,5 % de dépense supplémentaire, être augmentée de 15 %, que le supplément de dépense soit opportun. En effet, ceci étant supposé fait, on pourrait se reposer la question pour 1,5 % de plus à nouveau et 15 % de nouveau supplément de portance. Il faut bien admettre qu'en règle générale les règlements ont déjà procédé à une certaine optimisation, et ne pas s'en écarter systématiquement.

En fait c'est seulement par une comparaison à la pratique courante, ou en ayant une certaine idée des circonstances improbables ou imprévues qui pourraient se produire (par exemple passage de certaines charges lourdes inhabituelles, tassements d'appui ou fluage plus prononcés que prévu ...) qu'on peut définir les surabondances souhaitables - nécessairement de coût modeste - qui pourront conférer à une structure une bonne robustesse.

Il n'est pas de la mission du vérificateur de prendre seul les décisions de renforcement, et c'est d'ailleurs une des raisons pour lesquelles à notre avis le visa ne peut être normalement délégué. Mais il faut considérer qu'il est de sa mission de faire part au chef d'arrondissement de ce qu'il estimerait utile d'ajouter, et qu'un vérificateur qui négligerait de la faire ne pourrait être considéré comme véritablement compétent.

4. - LA CONSISTANCE DES ETUDES D'EXECUTION.

La question examinée ici est de savoir ce qui doit être considéré comme appartenant, ou devant appartenir, aux études d'exécution.

La DIG (b 4, c 4 et n 3) indique essentiellement que ces études, avec les spécifications techniques détaillées établies par le concepteur de l'ouvrage, constituent la conception tertiaire qui doit définir exactement l'ouvrage dans tous ses détails. Elle renvoie pour le surplus aux textes relatifs à l'ingénierie privée, qui ne contiennent eux mêmes pas de précision supplémentaire sur cette consistance. Tout ceci reste donc extrêmement général, ne contient rien qui tienne compte de ce qui est spécifique des ouvrages d'art, et de toute manière n'a normalement pas de caractère contractuel pour les marchés de notre Administration.

C'est en fait essentiellement en fonction du marché que la consistance nécessaire des études d'exécution doit être appréciée.

4,1. - OU COMMENCENT LES ETUDES D'EXECUTION ?

Du point de vue de la consistance, leur début doit se situer exactement là où la conception s'est arrêtée au stade de la passation du marché (qu'il s'agisse d'un marché pour la réalisation d'une solution variante aussi bien que pour la réalisation d'une solution conforme).

Il va néanmoins de soi que lorsque le marché prévoit (cf. article 3.05 du C.P.S.T.) l'établissement et la délivrance par l'Administration à l'entreprise d'une note de calcul automatique (ou de toute autre prestation), l'étude d'exécution dont il s'agit ici commence à l'aval de cette prestation.*

En fait des difficultés ne sont rencontrées généralement que dans les cas (malheureusement trop fréquents) où des options ont été prises de façon insuffisamment réfléchie à l'amont des études d'exécution et donc de leur vérification. La chose est particulièrement classique en cas de variante. Ce risque, inégal selon les cas, est d'ailleurs à l'origine de certains des conseils de la directive DJ 75 (§ 3414, 3424, 626 et 9 notamment) et de certains conseils donnés plus loin pour la vérification.

A nos yeux, il est évident que le vérificateur des études d'exécution doit :

- éviter de remettre en cause la conception générale pour de simples considérations d'opportunité, dans le seul but de faire "mieux",

- mais certainement remettre en cause cette conception lorsqu'il apparaît que celle-ci est dangereuse, ou mène à une impasse, plus généralement lorsqu'il existe des raisons majeures en faveur d'une telle remise en cause; et il doit en ce cas faire cette remise en cause le plus tôt possible).

4,2. - OU SE TERMINENT LES ETUDES D'EXECUTION ?

4,21. - Que doit fournir l'entrepreneur ?

En principe le C.P.C. définit, selon la nature des travaux, la liste des documents relatifs à l'exécution que l'entrepreneur est tenu de soumettre à la Maîtrise d'oeuvre.

* Voir en 8,21 ce qui est à faire en cas de remise de note de calcul automatique, et en 8,63 les limites que nous conseillons en matière d'autres prestations.

Néanmoins cette liste ne peut être considérée comme exhaustive ni comme précise, chaque fois qu'on se trouve devant un ouvrage ou des conditions complexes. C'est pourquoi, en de tels cas il importe, autant que possible, que le marché complète le C.P.C. à ce sujet.

On trouvera pour cela un certain nombre de conseils dans le C.P. S.T. et dans ses mises à jour, ainsi que dans les fascicules du G.G.O.A. (niveau 3) et éventuellement dans d'autres documents-types. Il est bien entendu qu'il n'y a pas à hésiter à compléter ces indications, spécialement pour des ouvrages ou travaux spéciaux. Pour certains équipements, les exigences nécessaires sont portées dans les Spécifications, parfois dans leurs commentaires.

Et si n'est pas prévu au C.P.C. ni au marché, quelque chose qui apparaît nécessaire pour les objectifs évoqués plus haut, notamment pour éviter toute improvisation sur chantier (risque de mauvaise valeur technique), il n'y a pas à hésiter à le réclamer à l'entrepreneur.

Il convient néanmoins de préciser, conformément à la D.I.G. (n 3.6) que sont à considérer comme ne faisant pas partie de l'étude d'exécution "les dessins de fabrication en atelier ou de façonnage sur chantier, qui ne traduisent pas l'objectif stipulé par le marché et ne sont que des moyens d'exécution".

Malgré cela, certaines questions subsistent pour certains ouvrages provisoires. Il se pose en effet à leur sujet certaines questions de principe, qui ne pourront être réglées que par des instructions complémentaires à la D.I.G., dont le principe a déjà été affirmé par le C.G.P.C. Dans cette attente, l'article 3,12 du C.P.S.T. (mise à jour n° 3) contient une recommandation détaillée pour les échafaudages des ponts courants, qui représentent les ouvrages provisoires les plus fréquents. Mais des questions subsistent pour d'autres ouvrages importants ou fréquents (par exemple quid des blindages de fouilles et autres soutènements provisoires ?).

4,22. - Dans ce que doit fournir l'entrepreneur, qu'est-ce qui doit être vérifié au titre de la vérification des études d'exécution ?

Il est difficile de donner une réponse exhaustive à cette question, et nous considérons qu'il appartient au chef d'Arrondissement de préciser à cet égard au vérificateur sa mission dans chaque cas d'espèce.

A titre de première approche, nous suggérons ceci :

a - ce qui concerne les matériaux, sans incidence sur les dessins de l'ouvrage, peut généralement rester ignoré du vérificateur; bien sûr cela peut être important, mais à chacun ses propres responsabilités, et non celles des autres.

b - le programme des travaux et le plan de bétonnage ne relèvent pas du vérificateur, mais doivent généralement être connus de lui, au moins pour l'essentiel.

c - les avant-métrés prescrits par le C.P.C. ne sont à vérifier par le vérificateur que dans les cas où le chef d'Arrondissement le lui demande; (voir G.M.O. 70 § 20,61,4ème règle) mais ils doivent toujours lui être fournis comme éléments d'appréciation pour la vérification des dessins et calculs, donc en même temps que les dessins et calculs.

d - le programme de mise en tension doit être soumis au vérificateur, au moins pour qu'il s'assure que ce programme ne créera pas de phase provisoire dangereuse pour l'ouvrage et, dans le cas d'ouvrages à exécuter en plusieurs phases, pour lui permettre les vérifications à chaque phase.

Cependant il paraît nécessaire d'appeler ici l'attention de tous sur la difficulté d'apprécier autrement que par expérience les conséquences d'une absence de contrôle de certaines dispositions provisoires. On peut citer divers cas où après avoir estimé superflu de contrôler le projet de coffrage de poutres préfabriquées VIPP ou de pièces adjacentes à un appareil d'appui, on s'est trouvé devant des poutres mal faites ou des appareils d'appui ne fonctionnant pas, et on a hésité, et souvent renoncé, à refuser la poutre et à faire modifier profondément le dispositif d'appui. Il n'en résulte pas qu'il faille vérifier toute disposition provisoire, mais qu'il existe des cas où, selon la difficulté de l'opération et l'expérience de l'entreprise, il est très utile de vérifier davantage ; pour les définir, le recours au réseau de compétence et éventuellement une initiative du vérificateur, en tant que conseiller, vis-à-vis du chef d'arrondissement sont souhaitables. De même pour les liaisons entre études et chantier.

4,23. - Jusqu'où doivent être poussés les calculs d'exécution ?
Il est impossible de définir cela dans le détail, mais il est utile que le marché précise certains points connus comme critiques de façon classique. Là aussi il n'y a pas à hésiter à compléter les indications du C.P.S.T. et des documents-types, notamment pour des ouvrages ou travaux spéciaux. On peut citer par exemple, pour certains types d'ouvrages précontraints, des sections voisines des appuis lors de la mise en tension (voir note d'information du 15 Octobre 1976). On peut citer aussi, pour certains types d'ouvrages, la vérification à la mise en service (charges totales, pertes partielles).

4,24. - Rôle du vérificateur à l'égard de la consistance des études d'exécution :

Quelle que soit la méthode de vérification pratiquée dans le cadre des recommandations données plus loin, il nous paraît évident que cela ne saurait justifier une attitude passive du vérificateur à l'égard de la consistance des études d'exécution : s'il ne lui est pas toujours possible de connaître toutes les conditions de détail du site, sa qualité de spécialiste averti exige de lui qu'il décèle toute lacune importante indépendante des dits détails, dans les études d'exécution de l'entrepreneur, et prenne des initiatives en conséquence.

5. - LES DIFFERENTS CAS POUVANT CONDUIRE A DES METHODES DIFFERENTES DE VERIFICATION :

Il apparaît que ces différents cas peuvent être définis selon divers critères.

5,1. - SELON LES OUVRAGES (OU PARTIES D'OUVRAGES) A REALISER :

Dans l'introduction du présent document (§ 1,3) nous avons indiqué que nos Recommandations étaient établies avant tout pour la vérification des études d'exécution des ponts spéciaux. Nous donnons au chapitre 8 quelques indications spécifiques pour d'autres types d'ouvrages, notamment pour les ouvrages provisoires et pour les ouvrages types.

5,2. - SELON LES CONDITIONS DANS LESQUELLES ON VA DEVOIR FAIRE LE CONTRÔLE.

Les conditions principales concernent les délais disponibles et, compte tenu de ce délai, la connaissance plus ou moins bonne que le vérificateur peut avoir de l'ouvrage à réaliser au moment d'entreprendre sa mission. D'autres conditions concernent la manière dont l'entrepreneur présente ses études au contrôle.

Dans le cas où la vérification est confiée à un organisme séparé (C.E.T.E., B.E.T.), ces conditions concernent également la manière dont Maître d'ouvrage et Maître d'oeuvre jouent leur propre rôle :

- vis-à-vis de l'entrepreneur, en définissant clairement et valablement le travail qu'il doit accomplir, et en tenant ensuite la main au respect par lui de ce qui a été préalablement prévu,

- vis-à-vis du vérificateur, en lui précisant clairement les limites de sa mission et les objectifs à atteindre (voir § 3 ci-dessus).

Des conditions défavorables pouvant peser sur l'efficacité de la vérification, il convient quand il s'en présente, de ne pas les accepter de façon passive, mais d'abord de s'efforcer de les améliorer.

5,21. - Les délais :

Comme il ressort du rapport du groupe Rôles et Responsabilités et de la directive provisoire D.J. 75 (§ 3.6.3), les délais trop courts sont un des principaux ennemis de la qualité.

Souvent, à l'amont de la vérification, un délai trop court aura pesé sur la valeur de la conception (étude trop sommaire, jugement de l'appel d'offres douteux). Il y aura déjà du retard à rattraper, voire des contre-ordres à envisager, dès l'origine de la vérification.

Ensuite les études d'exécution de l'entrepreneur vont être établies dans la précipitation, présentées par fractions successives (ce qui doit généralement être évité, sauf pour les grands ouvrages), et le vérificateur sera invité à conclure de même, sous la pression du chantier. Les méthodes de vérification ne peuvent que s'en ressentir.

Cette situation sera trop souvent invoquée par l'entrepreneur auprès du Maître d'oeuvre pour l'amener à se contenter d'études d'exécution plus ou moins bâclées.

On cherchera parfois à gagner du temps par des tours de force, par exemple sur la cadence d'étuvage; éventuellement ces changements de conditions d'exécution seront contradictoires avec les études.

A la limite, il est parfois demandé des accords partiels anticipant sur l'accomplissement des vérifications (par exemple accord pour une nomenclature d'aciers à commander); ou le dossier est soumis pour vérification et décision en admettant des hypothèses qui pourront se révéler erronées : par exemple en supposant qu'on obtiendra une résistance du béton très élevée alors qu'on n'a aucune certitude de l'obtenir. Ou même le chantier anticipera sur le visa, en dépit du C.C.A.G., et il sera demandé d'accepter pour régularisation le fait accompli et de vérifier en conséquence la suite de l'étude d'exécution.

5,22. - La connaissance de l'ouvrage à réaliser :

La connaissance dont il s'agit est celle qu'en ont les personnes qui seront chargées de la vérification. Mais dans une large mesure cette connaissance peut dépendre de la connaissance qu'en a le chef d'Arrondissement. Et de l'autre côté de la barrière, la qualité de l'étude à vérifier dépendra fortement de la connaissance de l'ouvrage que l'on aura côté entreprise.

Cette connaissance se subdivise en deux parties :

- la partie "objective", qui concerne les données techniques matérielles du problème, dont résultent ses difficultés, voire ses traîtrises intrinsèques; ces données doivent d'une part exister et être suffisantes, d'autre part être disponibles,

- la partie "subjective", qui concerne le degré de certitude et le bien-fondé des décisions prises à l'amont de l'étude d'exécution : telle "décision" est-elle authentique ? est-elle ferme ? ses conséquences restent-elles à découvrir ? est-elle susceptible d'être remise en cause au cas où elle s'avèrerait trop fâcheuse ? quand devrait intervenir cette remise en cause ?

L'expérience démontre que l'affaire se présente mal lorsque la vérification débute dans de mauvaises conditions de connaissance de l'ouvrage à réaliser. Certes quelques palliatifs peuvent être trouvés en ce cas (voir par exemple le § 6,14); mais il ne s'agit que de palliatifs, et d'ailleurs les causes du manque de connaissance (désordre des études, manque de compétence, délais trop courts) subsisteront généralement et empêcheront d'y recourir suffisamment. Voir à ce sujet de nombreux passages du document DJ 75.

C'est pourquoi il est capital que l'affaire soit en ordre lorsque la vérification va devoir être entreprise, au lieu de compter sur la vérification pour la remettre en ordre. Et en particulier, lorsqu'un service de l'Administration ne sera pas en mesure de procéder lui même aux vérifications, il est très vivement recommandé qu'il commence à associer l'organisme vérificateur à l'opération dès les phases préparatoires :

- soit en le chargeant de l'étude qui précède l'appel d'offres,
- soit au moins en l'associant au jugement des offres,

ce qui lui permettra d'entreprendre la vérification en connaissant déjà les tenants et aboutissants de l'affaire.

Pour la même raison, lorsque la vérification est faite dans la DDE, il est souhaitable qu'y participent les ingénieurs qui ont effectué les études antérieures.

En pratique la connaissance que l'on a de l'ouvrage dépend assez souvent du fait que la solution retenue est une solution conforme ou une variante.

C'est notamment pour éviter des insuffisances de cette connaissance que la directive provisoire D.J. 75 recommande, de façon générale, conformément à la Circulaire de la D.R.C.R. du 25 Septembre 1975, de ne pas considérer les variantes sur un pied d'égalité avec les solutions conformes.

Cependant beaucoup de cas sont intermédiaires entre la solution conforme pure et simple et la variante "large" (selon terminologie de la D.J. 75). Ce sont les offres conformes assorties de propositions technique (couvertes, ou non couvertes, par un agrément), les variantes limitées mineures et les variantes limitées "majeures", selon la terminologie de la D.J. antérieure à la nouvelle D.I.G. Ainsi l'offre variante mineure d'un V.I.P.P. laisse une possibilité de dimensionnement automatique.

Plus généralement, la vérification sera d'autant plus difficile que l'ouvrage posera plus de problèmes, par exemple pour un pont très spécial même en solution conforme. La difficulté sera évidemment d'autant plus grande que l'avant-projet aura été moins approfondi ; en sens inverse elle peut être fortement atténuée par la disposition de précédents.

Enfin l'affaire ne sera réellement en ordre que pour autant que n'aurent pas été laissées dans l'indétermination, lors du jugement de l'appel d'offres, certaines options relatives aux calculs justificatifs définitifs. Voir à ce sujet dans la D.J. 75 les § 3.4.2.2 (relatif aux règlements de calcul applicables) et 3.4.2.4 (relatif aux modalités des calculs justificatifs définitifs, qu'en raison de ses incidences directes sur la vérification nous reproduisons plus loin en Annexe).

5,23. - A qui aura-t-on affaire côté entreprise ?

C'est-à-dire qui fera les études d'exécution, et qui les discutera le cas échéant ? c'est souvent la même personne, mais ce n'est pas toujours le cas.

On aura souvent affaire à un bureau d'études sous-traitant, et non au bureau d'études de l'entreprise. Il est en ce cas essentiel que le chef d'Arrondissement examine si les conditions de sous-traitance proposées sont acceptables, et ce sur trois plans :

- sur le plan de la désignation,

- sur le plan de la rémunération (il est recommandé de payer par un prix séparé l'étude d'exécution et d'examiner le montant de ce prix afin de s'assurer que l'entrepreneur ne condamne pas son sous-traitant à une étude au rabais - voir à ce sujet D.J. 75 § 3.2.2.3),

- sur le plan de la localisation des études (cf. B.E.T. 70).

De façon plus générale, c'est-à-dire qu'il y ait ou non sous-traitance, il importe de ne pas accepter d'avoir affaire à n'importe qui (voir la D.J. 75 § 3.5 et questionnaires en annexe) ou dans n'importe quelles conditions. Que l'on n'oublie pas, en particulier, que la réputation d'une entreprise ou d'un bureau d'études ne garantit pas la compétence de toute personne lui appartenant, et ne garantit même souvent pas que cette personne ne sera pas plus ou moins abandonnée à elle-même. La meilleure garantie qu'on puisse avoir est de savoir qui personnellement est chargé de l'étude. Les raisons qui nous ont poussé à personnaliser contractuellement le responsable des études des ouvrages provisoires (voir l'article 3.12 du C.P.S.T. - mise à jour n° 3) sont en partie valables aussi pour l'étude d'exécution des ouvrages définitifs. De même qu'en matière de travaux, ne pas oublier que référence d'exécution ne signifie pas nécessairement référence de qualité.

Tout ceci est d'autant plus important que le jeu des appels d'offres risque de mettre l'Administration en rapport avec certains bureaux d'étude dont la compétence est réduite.

5,24. - Les conditions dans lesquelles sont engagées les études à vérifier :

Chronologiquement, les études d'exécution peuvent commencer dès que l'entrepreneur est désigné. C'est en principe plus à l'amont (préparation du D.C.E., jugement des offres - cf. D.J. 75 § 3.4.2.4 reproduit plus loin en Annexe F, § 3.5.4.2 et 6.1.6 - qu'il convient de définir selon leur difficulté, les conditions dans lesquelles ces études seront faites. Néanmoins il est rare qu'on puisse considérer avoir réglé alors toutes les difficultés, et il y a donc lieu, dès la désignation de l'entrepreneur, de se poser les questions suivantes :

- des difficultés d'étude paraissent-elles à prévoir ? (selon le type d'ouvrage et les informations recueillies à l'appel d'offres).

- les bases de l'étude paraissent-elles évidentes, ou doivent-elles largement dépendre de l'appréciation ? (données dépendant des conditions du site ou des conditions d'exécution, techniques non réglementées).

- quelles sont les incitations que le mode de règlement des travaux (forfait, métré, réfections notamment) risque d'avoir sur le comportement de l'entreprise et par conséquent sur ses études d'exécution ?

- vers quels recours à l'ordinateur s'oriente l'entrepreneur ?

- sera-t-il possible au vérificateur de faire avec le bureau d'études un tour d'horizon préalable des problèmes à régler, et de recevoir ensuite l'étude d'exécution en bloc ? Cette situation idéale est loin d'être systématique,

- la qualité, y compris la présentation (plans et calculs illisibles ou en désordre ou n'explicitant pas les hypothèses) des études d'exécution sera-t-elle bonne ou mauvaise ?

- les calculs seront-ils suffisamment complets ou non ?

- ne sont-ils pas excessivement sommaires ?

Il est bien évident que les modalités des vérifications devront être adaptées aux réponses qu'on pourra donner à ces différentes questions.

C'est pourquoi il est souhaitable que les relations Administration-entreprise relatives aux études d'exécution avant établissement de celles-ci ne se bornent pas à l'agrément du chargé de ces études (§ 5,23) si celles-ci doivent être délicates, mais comportent en ce cas un entretien préalable au cours duquel seront abordées certaines des questions mentionnées en 5,21, en 6,14 et ci-dessus ; une des plus importantes de ces questions concerne le choix des programmes de calcul à utiliser, car l'engagement des études d'exécution sur la base de programmes non idoines ou mal connus risque de mener par la suite à un blocage ou du moins à des retards. Cet entretien (où toutes autres questions de coordination et de chantier peuvent également être abordées - cf. GMO 70) peut aussi avoir une utilité psychologique.

5,3. - SELON LA COMPOSITION DE L'EQUIPE DE VERIFICATION :

Les paramètres dont résulte la valeur de l'équipe sont :

- le nombre,

- la solidité de chacun des membres (combinaison de l'aptitude, de la formation initiale et de l'expérience),

- et la disponibilité de chacun.

5,31. - La composition de l'équipe est-elle une donnée ?

Cette question est parallèle au conseil donné dans le préambule du § 5,2.

Il est bien évident qu'en cas de vérification par les propres moyens d'une D.D.E., et même dans une large mesure en cas de vérification par un organisme extérieur (C.E.T.E. ou B.E.T.), la possibilité de composer l'équipe de façon optimale en fonction des particularités de chaque ouvrage est dans une large mesure une vue de l'esprit.

Dans les meilleurs des cas la composition de l'équipe fait l'objet de contraintes. Dans beaucoup de cas la composition se présente pratiquement comme une donnée parce que seulement une, deux ou trois personnes sont en place et en mesure d'effectuer la vérification.

Il ne convient pas cependant de s'en tenir à cette constatation, mais d'examiner la convenance de cette équipe (ou de la meilleure équipe possible) par rapport aux besoins pour le travail à exécuter (cf. § 5,32), et, si la disparité apparaît trop grande, d'en tirer les conséquences en recourant à des moyens extérieurs.

5,32. - Que doit être normalement l'équipe ?

Cette question a fait l'objet d'échanges de vues détaillés basés sur les expériences personnelles des diverses personnes qui ont répondu aux enquêtes préalables à la rédaction du présent document. Au terme de cette discussion, nos recommandations sont les suivantes.

a - Quand il s'agit d'ouvrages d'étude assez difficile et/ou de problèmes pour lesquels on manque d'expérience, il est indispensable que l'ensemble de la vérification soit dirigé par un ingénieur confirmé (dans la spécialité ouvrages d'art évidemment) qui lui-même accomplira une partie des opérations (comportant nécessairement un examen des dessins) et jugera l'ensemble de l'étude.

La vérification devant généralement être longue en ce cas, il sera habituellement nécessaire qu'une partie du travail soit effectuée par un jeune ingénieur ou un bon technicien.

Il est, de plus, très souhaitable que l'ingénieur confirmé ne soit pas isolé, mais fasse partie d'un "réseau de compétence" qui lui donne la possibilité d'échanger des idées avec d'autres ingénieurs confirmés, afin de diminuer les risques de n'avoir pas pensé à tout ce qui était nécessaire.* Ces autres ingénieurs confirmés peuvent être soit des spécialistes du S.E.-T.R.A., soit des ingénieurs polyvalents qu'on peut trouver dans les C.E.T.E. ou les B.E.T. réputés; ce peut être le chef d'Arrondissement lui-même s'il ne s'identifie pas au vérificateur principal, ou un de ses collègues géographiquement voisin.

b - Quand il s'agit d'ouvrages plus simples, ces exigences s'imposent moins.

Tout d'abord le recours au réseau de compétence devient généralement sans grand objet.

Ensuite l'équipe peut :

- soit être ramenée à un jeune ingénieur et un technicien, sous condition généralement d'avoir une possibilité de contact avec un ingénieur confirmé; s'il s'agit d'ouvrages types, ce recours peut être remplacé par le dossier-pilote et un téléphone,

* Voir par exemple Annexe B § B6.

- soit comprendre toujours l'ingénieur confirmé avec un technicien, voire un dessinateur ; mais le technicien ou le dessinateur effectuera une plus grande part des opérations de vérification que dans le cas précédent.

c - Bien entendu, la vérification d'un ensemble d'études d'exécution peut très bien comporter plusieurs vérificateurs ou cellules de vérification agissant en parallèle sous la direction du même ingénieur confirmé ; la chose est même tout-à-fait courante dans tout organisme d'une certaine dimension.

- enfin le problème du partage des responsabilités, en un tel cas, n'est pas actuellement résolu.

Ces difficultés ne doivent cependant pas être considérées comme dirimantes, l'essentiel étant de faire faire la vérification par des ingénieurs d'une compétence suffisante.

d - Dans tout ce qui précède, nous n'avons évoqué que les fonctions techniques à remplir, et les conditions de compétence technique vis-à-vis de la spécialité concernée. Nous ne pouvons nous mêmes établir la correspondance nécessaire entre ces fonctions et les fonctions administratives, parce que cette correspondance est nécessairement conditionnée par la situation de chaque service qui, du fait de son effectif total, du jeu des affectations et de ses différentes charges, est nécessairement très différente d'un service à un autre du point de vue de la disponibilité et de la compétence personnelle de ses différents membres (cf. notamment les contraintes discutées au § 5,31). Par ailleurs les besoins ne sont pas les mêmes d'un ouvrage à un autre, sans qu'il y ait véritablement de discontinuité.

C'est pourquoi le rôle de l'ingénieur confirmé peut, selon le cas, être tenu par le chef d'Arrondissement lui-même, ou par le chef de bureau d'études de l'Arrondissement, ou par le subdivisionnaire E.T.N. Ce qui par contre appartient dans tous les cas au chef d'Arrondissement, c'est de juger la capacité (solidité technique et disponibilité) de chacun, y compris la sienne propre, au regard des besoins définis plus haut, et de décider en conséquence de l'organisation interne ou des concours extérieurs auxquels il sera fait appel.

e - En cas de recours à un organisme extérieur, il y a peu de commentaires à faire lorsque cet organisme est un CETE.

S'il s'agit d'un B.E.T., nous rappelons d'abord qu'un tel recours est envisagé par le document-type B.E.T. 70, quoique celui-ci soit principalement consacré aux études de conception générale, et que ce document donne un certain nombre de conseils en vue du choix du bureau et sur les modalités de ce recours.

En particulier la question de l'indépendance effective vis-à-vis de l'entreprise est fondamentale ; la question de la spécialisation (et non de la simple qualification) devient importante quand l'ouvrage est très spécial. Sous ces réserves, lorsqu'un B.E.T. est déjà intervenu sur le même ouvrage à un stade antérieur, il y a avantage à le conserver pour les vérifications plutôt que d'en charger un autre bureau qui ignorera tout de l'ouvrage.

D'autre part le document-type B.E.T. 70 contient des définitions précises (§ 1,2 p. 4) des différents niveaux de qualification du personnel du B.E.T., des abus "inflationnistes" étant trop courants dans les désignations quand des précautions ne sont pas prises à cet égard.

Une difficulté mal résolue concerne l'évaluation du juste prix d'un contrôle : son coût dépend nécessairement, dans des proportions considérables, de la qualité qu'aura l'étude à contrôler. D'après les statistiques d'un C.E.T.E., le coût moyen de la vérification serait de l'ordre de 1,3 % du montant H.T. du marché, avec évidemment une dispersion plus importante. Il serait plus élevé lorsqu'il s'agit d'une variante (1,9 %) que lorsqu'il s'agit d'un projet de base (0,7 %). A titre de comparaison, le coût d'établissement d'un A.P.D. d'ouvrage relativement classique s'établit autour de 2 % (avec une dispersion importante allant de 0,5 à 3 %).

Cela dit, il reste quelques autres difficultés pour recourir à un B.E.T. :

- une D.D.E. qui ne serait pas elle-même capable (ou presque), sous l'angle de la compétence, de faire le travail qu'elle lui demande risque souvent de n'être pas capable de l'utiliser convenablement,

- dans des cas simples et courants, ne faut-il pas pour officialiser et régler son intervention, des formalités administratives et comptables représentant un travail d'une longueur comparable à celle du contrôle lui-même ?

6. - LA PREMIERE PHASE DE LA VERIFICATION.

6,1. - RAPPEL DES OPERATIONS PRELIMINAIRES :

Ces opérations relèvent essentiellement du chef d'Arrondissement. Elles peuvent aussi, pour une part, relever du chef de l'équipe de vérification dans le cas où les deux fonctions sont séparées.

6,11. - Nous énumérons d'abord les opérations dont on a exposé la nécessité et les modalités dans les chapitres précédents :

- constituer l'équipe de vérification (cf. § 5,3); en cas de recours à un organisme extérieur, lui indiquer en même temps l'objet et la nature exacte de sa mission (cf. par exemple § 2,3) et, évidemment, lui remettre les documents du marché et toutes autres informations techniques disponibles nécessaires ou utiles à l'accomplissement de sa mission (y compris notamment levés, sondages, informations sur les autres travaux à exécuter sur le même site),

- lui préciser, dans la mesure nécessaire :

. ce qui relève de sa vérification (cf. § 4,22) avec toutes précisions utiles en ce qui concerne les ouvrages provisoires,

. les objectifs à atteindre (cf. § 3,12, éventuellement 3,13),

. les délais de vérification (cf. § 5,21),

. s'il y a lieu, les options à prendre, les options prises de manière ferme et celles qui peuvent être reconsidérées (cf. § 5,22),

. si le vérificateur est un organisme extérieur, la nature des contacts qu'il est autorisé, voire incité, à avoir avec l'entreprise, et la procédure d'envoi des observations écrites ;

- agréer, au moins en cas de sous-traitance, le bureau d'études qui sera chargé d'établir l'étude d'exécution (cf. § 5,23).

6,12. - Nous renvoyons en outre aux paragraphes 2,4 (2,44 B notamment) et 3,3 du document G.M.O. 70 du Guide général de chantier sur la manière d'engager une opération (premières relations avec l'entreprise notamment). Sept ans après publication de ce document, ces recommandations gardent presque toute leur actualité. Disons en bref qu'il s'agit de tenir dès le début la main à l'application pure et simple du marché, notamment en ce qui concerne les délais et la consistance de l'étude d'exécution (voir en particulier page 35 du G.M.O. 70 les commentaires formulés à ce sujet, et relire les § 4,21 et 5,24 du présent document).

En ce qui concerne plus particulièrement les délais, plusieurs personnes dont nous-même, ayant participé aux recherches qui ont précédé la rédaction du présent document, ont eu à connaître des situations dans lesquelles les études d'exécution ont été établies ou menées à terme avec de grands retards. Elles soupçonnent même que dans certains cas le retard a été délibéré soit en vue d'éluder tout ou partie des vérifications, soit pour faire pression sur la maîtrise d'oeuvre en vue d'obtenir certains changements aux dispositions prévues par le marché. Même sans cela, il serait toujours regrettable que l'étude d'exécution se trouve sur le "chemin critique" de la réalisation, la nécessité d'une mise au point de l'étude étant par principe toujours possible. Pour cette raison nous recommandons qu'en cas d'études complexes le marché prescrive un calendrier de présentation des études d'exécution qui soit réaliste compte tenu de la complexité de l'ouvrage, tant pour l'établissement des études que pour leur vérification. A tout le moins, il importe que le chef d'Arrondissement (ou le chef de l'équipe de vérification) convienne de ce calendrier avec l'Entrepreneur dès leur premier entretien et le lui confirme aussitôt par écrit.

6,13 - D'autre part il appartient à l'équipe de vérification, si elle ne l'a pas déjà fait, de "faire connaissance avec l'ouvrage", c'est-à-dire de prendre une connaissance approfondie de tout le dossier des études qui ont précédé l'étude d'exécution, de manière à se faire une idée claire et complète :

- des données de l'étude (vérifier notamment s'il n'en manque pas),
- des contraintes de l'opération

et d'en déduire aussitôt une première liste des difficultés à prévoir. Ces difficultés peuvent être très diverses et sont en grande partie celles qu'on peut rencontrer dans le jugement de l'appel d'offres (cf. D.J. 75, § 3.4.2 et chapitre 6 notamment). Par exemple quels peuvent être les cas de charge prépondérants dans le dimensionnement de telle ou telle partie de la structure (convoi militaire ou engins lourds de terrassement pour les hourdis, efforts tranchants pour les âmes des poutres ou caissons, etc ...) ?

Dans le cas où le vérificateur est conduit à soupçonner une difficulté peu apparente, il y a avantage à ce qu'il en fasse part verbalement au bureau d'études de l'entreprise, dans le seul but d'attirer son attention sur ce point.

6,14. - Enfin il peut dans certains cas être nécessaire de faire procéder par l'entreprise, au stade des opérations préliminaires, à une mise au point préalable du "projet".

Sous le nom de "projet" nous désignons ici un avant-projet détaillé suffisamment approfondi (pour donner une idée : définissant le dimensionnement exact des épaisseurs des goussets des poutres et caissons) et accompagné d'une note de calcul d'ensemble valable à titre de dégrossissage.

Cette mise au point, si l'Avant-projet est resté moins poussé (cas très fréquent s'il s'agit d'une variante) peut devoir constituer un stade préliminaire des études d'exécution. Sa nécessité est fréquente pour les ouvrages qui ont fait l'objet de variantes. Elle devrait logiquement être connue lors du jugement de l'appel d'offres et donc prévue dans le calendrier des études d'exécution évoqué en 6,12. Il arrive cependant qu'elle ne soit découverte qu'à l'issue de l'examen défini en 6,13, auquel cas il est du devoir du vérificateur d'en faire part immédiatement au chef d'Arrondissement.

Le but de cette mise au point est simple : éviter d'être "piégé" en découvrant à la fin de l'étude d'exécution (ou de sa vérification) que quelque chose "ne passe pas" et remet en cause une très grande partie de l'étude.

Ceci est particulièrement important lorsque, pour une raison ou une autre, les études d'exécution doivent être échelonnées dans le temps (ce qui est systématiquement le cas pour les grands ouvrages, mais peut l'être aussi pour les ponts spéciaux) : en effet, si on doit alors accepter les études d'exécution en commençant par les fondations, il n'en reste pas moins qu'un pont se détermine en allant du haut vers le bas; si donc on fait l'étude finale dans un ordre différent, il est nécessaire en étudiant chaque étage d'avoir une approximation suffisante de ce qui est au dessus.

6,2. - PREMIER SURVOL DES ETUDES D'EXECUTION :

Ici encore on se place dans le cas de l'étude d'exécution d'un pont spécial, donc d'étude délicate, en admettant que cette étude est remise en bloc. S'il s'agit d'un pont simple (par exemple pont-type) ce survol peut être très simplifié par rapport à ce qui suit, surtout si on dispose d'une note de calcul automatique du S.E.T.R.A. Si par contre l'étude est fractionnée, la méthode subsiste mais est d'application plus difficile; d'où le palliatif préconisé en 6,14; il ne doit cependant pas être accepté que le fractionnement soit excessif.

Il ne faut pas commencer en se lançant tête baissée dans la vérification des calculs, mais commencer par survoler le dossier et le mettre en face du dossier de "projet". Nous recommandons pour cela la méthode ci-après, qui est à considérer comme une méthode de base susceptible d'adaptation selon les cas d'espèce.

a - Examiner d'abord les plans. Sont-ils lisibles et clairement présentés ? Comment s'articulent-ils les uns avec les autres ? En particulier les plans de coffrage sont-ils distincts des plans de ferrailage et de précontrainte ? Forment-ils un ensemble complet ? Les échelles sont-elles convenables ?

Les plans de ferrailage sont-ils bien accompagnés de nomenclatures qui reprennent pour chaque diamètre utilisé les dessins précis des différents fers, la longueur développée de chacun, le poids, la nature de l'acier et les observations relatives à la soudabilité, aux conditions de cintrage, etc ... ?

b - Feuilletter alors la note de calcul. Va-t-elle être lisible et vérifiable ? Y-a-t-il une table des matières ? Comporte-t-elle une partie sortie de l'ordinateur ? En ce cas, apparaît-il de quel programme elle est issue, et connaît-on ce programme ? Toujours dans ce cas, peut-on discerner les données du calcul automatique, les résultats intermédiaires (p. ex. lignes d'influence) et les résultats définitifs (p. ex. lignes enveloppes) ? Quelle est l'articulation de la note de calcul ? Aurait-on a priori adopté la même articulation ? Sinon, refermer la note de calcul, ouvrir les plans d'ensemble de l'ouvrage, porter sur une feuille de papier l'articulation qu'on aurait soi-même prévue ; revenir alors à la note de calcul de l'entreprise, établir la correspondance entre les deux articulations, et s'en servir pour voir si la note de calcul de l'entreprise apparaît a priori complète. S'efforcer dès à présent de commencer à détecter les points délicats. Le pas, ou le maillage, adopté dans la note de calcul de l'entreprise n'apparaît-il pas immédiatement trop grossier ?

c - Revenir aux plans d'ensemble et de détail du coffrage, les confronter avec les dessins du "projet". Y-a-t-il conformité ? Les cotes manquantes ou qu'on peut considérer comme approximatives dans le projet ont-elles été précisées ? N'apparaît-il a priori pas d'anomalie ?

d - Reprendre alors les plans de cablage et ferrailage. Dans le cas et dans la mesure où les diamètres, nombres et espacements des armatures et les arrêts de cables ne sont pas portés sur les dessins eux-mêmes, mais seulement en nomenclature ou sur d'autres dessins, les reporter sur les dessins. Les recouvrements de fers sont-ils définis ? bien apparents ? cotés ? Les phases d'exécution et les reprises de bétonnage sont-elles définies et figurées ?* Compléter dans toute la mesure du possible de manière que chaque dessin se suffise à soi-même.

* Pour les ponts métalliques les questions correspondantes concernent les soudures, les boulonnages des différents types (ou les rivures), les joints de construction, les parties à ajuster, les profils exacts à la construction et les raidisseurs.

e - Examiner si les équipements sont représentés par de véritables dessins d'exécution (et non par une simple reproduction des dessins du D.C.E) lorsqu'il y a lieu (cf. Spécifications); vérifier qu'ils sont reportés sur les plans de ferrailage; les plus importants pour cela sont les appareils d'appui, les évacuations d'eau et les dispositifs de retenue, car ils ont des incidences notables sur les ferrailages. A défaut, faire les reports possibles et nécessaires.

f - Examiner alors les plans du ferrailage et essayer :

- par la pensée de s'imaginer qualitativement le fonctionnement de détail des différentes parties de l'ouvrage (par exemple zones d'application d'efforts concentrés et points de transmission d'efforts d'une pièce à une autre); trouve-t-on des armatures partout là où on pense qu'il devrait y en avoir ?

- par l'expérience de porter une première appréciation sur la convenance des diamètres des fers et sur leur forme.

Noter toutes les anomalies présumées.

g - Confronter l'articulation des calculs définie en b (peu importe laquelle pourvu qu'elle soit complète) aux plans du ferrailage*. Dans la mesure du possible, feuilleter à nouveau la note de calculs en face des plans de cablage et ferrailage déployés. Reporter sur les plans au crayon de couleur les numéros des pages de la note de calcul où ces cables et fers sont définis ou justifiés. En déduire s'il subsiste apparemment des omissions importantes dans les calculs.

h - Récapituler alors toutes les remarques ainsi faites au titre de ce survol.

6.3. - PREMIER JUGEMENT DE L'ETUDE D'EXECUTION.

Au terme du survol de l'étude d'exécution, un certain nombre de points de cette étude doivent être considérés comme suspects; ils sont à réserver pour réexamen à l'occasion des vérifications approfondies définies au chapitre 7.

Par contre des conclusions doivent dès à présent être arrêtées concernant la convenance et la suffisance générales de l'étude. Si ces conclusions sont nettement défavorables sur certains points, ils doivent donner lieu à une action immédiate vis-à-vis de l'entreprise. En effet si certaines améliorations ne sont pas faites par celle-ci, la vérification risquera de se trouver bloquée avant son terme. Or nous avons souligné l'importance des délais dans les opérations de vérification, dans l'intérêt commun des parties, d'ailleurs.

Or si les conclusions relatives à la convenance seront généralement certaines, celles relatives à la suffisance seront généralement incertaines, puisqu'on n'aura alors procédé qu'à un survol de l'étude d'exécution. C'est pourquoi nous recommandons d'avoir immédiatement un entretien téléphonique avec le représentant du bureau d'études de l'entreprise pour lui faire part avant tout des doutes, mais aussi des certitudes, et recueillir ses explications. Après quoi, et compte tenu bien entendu des explications, il conviendra que les observations définitivement retenues et qui appellent de sa part une suite (compléments ou améliorations) soient confirmées par écrit, selon la procédure définie en 6,11. Prendre à ce sujet la précaution de bien préciser dans la lettre ou note d'observations, qu'il s'agit d'observations préliminaires.

* Cette même opération peut être faite souvent aussi pour quelques dimensions de coffrage (par exemple largeurs d'âmes, goussets).

6,4. - DESSINS D'EXECUTION INCOMPLETS :

Si, comme on le verra en 7,43, il est très fréquent que les calculs soient nettement incomplets, il l'est moins que les dessins le soient très gravement, car l'entreprise elle-même en a besoin pour ses commandes et ses métrés. Néanmoins la chose peut arriver, et elle est même extrêmement fréquente pour les échafaudages, dans toute la mesure précisément où il s'agit de détails et pièces secondaires ne donnant pas lieu à commandes et métrés.

En effet, dans bien des cas les prescriptions du C.P.C. même complétées par des rédactions du C.P.S. type ne suffisent pas et doivent être revues et complétées en fonction de l'ouvrage à réaliser. Or les expressions telles que "on verra bien sur le chantier", "on adaptera" ..." à l'entrepreneur de se débrouiller", ne peuvent et ne doivent pas faire partie de la conception que le vérificateur doit avoir de sa mission. Elles sont causes de déboires soit pour le Maître d'ouvrage (mauvaises qualités, non adaptations des ouvrages), soit pour le Maître d'oeuvre (surprises financières), soit pour l'entrepreneur (travail mal défini, aléas financiers), soit pour les trois. C'est pourquoi, même en l'absence de précision dans les documents contractuels, une insuffisance ne doit pas être acceptée. Et si parfois on peut être amené à poursuivre la vérification en suppléant avec l'aide de la note de calcul à l'insuffisance de certains dessins, on ne doit pas pour autant dispenser l'entreprise d'un report des indications manquantes sur les plans, car le chantier ne disposera pas de la note de calcul.

C'est notamment parce qu'il vaut toujours mieux prévenir que guérir que nous avons toujours souligné l'importance particulière des articles 305 et 312 du C.P.C. type (mises à jour n° 2 et n° 3). C'est d'ailleurs l'expérience qui a conduit aux prescriptions du dit article 312 dont le développement montre qu'il est bien facile pour une étude d'exécution d'échafaudage d'être dangereuse pour avoir été incomplète.

L'insuffisance est également fréquente pour les cintres autolanceurs et autres appareillages de construction plus spécifiques des grands ouvrages, mais cela pour une autre raison : c'est que les entreprises qui les possèdent sont souvent jalouses de leur propriété intellectuelle.

6,5. - REJET D'ETUDES D'EXECUTION DE QUALITE PAR TROP INSUFFISANTE :

Nous recommandons de ne pas hésiter à rejeter une étude d'exécution dont la qualité est par trop insuffisante :

- dessins illisibles ou excessivement incomplets ou non à l'échelle,
- calculs illisibles ou incompréhensibles, ou manifestement trop grossiers,
- études remises par petits bouts (ou déclarées "provisoires"),
- étude ne définissant pas une construction de qualité.

Dans cette décision, il faut tenir compte non pas seulement de la difficulté de la vérification, mais aussi des risques d'erreur par le chantier (par exemple risque d'oubli de certains fers peu apparents sur les dessins); en effet il ne faut pas oublier que les dessins aboutissent finalement et sans explication supplémentaire au chef de chantier de l'entreprise, et il ne faut surestimer sa capacité d'interpréter au mieux (non plus que celle du Surveillant de l'Administration). De plus, quand il n'y a pas rejet, il convient de ne pas oublier que l'entrepreneur doit fournir finalement de quoi constituer un dossier d'ouvrage utilisable.

Certes une mesure de rejet est grave car elle peut avoir des conséquences sérieuses sur le planning des travaux et sur l'équilibre financier de l'entreprise. Il va donc de soi que les rejets doivent être entérinés par la maîtrise d'oeuvre et doivent être rapides et notifiés en bonne et due forme.

Dans certains cas limites, il peut être même nécessaire de demander à l'entrepreneur de changer son bureau ou son ingénieur.

7. - LA DEUXIEME PHASE DE LA VERIFICATION.

Il s'agit de la phase principale de la vérification.

Elle comporte d'une part une vérification approfondie des dessins, d'autre part la vérification des calculs et des dimensionnements correspondants.

Elle est susceptible d'être fractionnée, par exemple entre ouvrages provisoires et définitifs, voire entre parties d'ouvrages ; la décision à ce sujet a dû être prise à l'issue de la première phase (cf. § 6,2 et 6,5).

Nous l'abordons en supposant que la première phase a été effectuée et qu'elle n'a conduit à formuler que des observations relativement mineures à l'égard de la convenance et de la suffisance de l'étude d'exécution. S'il en est ainsi, la vérification peut se poursuivre sans attendre.

Au préalable nous précisons que si dans ce qui suit nous nous efforçons de définir une méthodologie et de signaler à l'attention des causes d'échec classiques, celles-ci ne constituent pas une "check-list" car la diversité des ouvrages est telle qu'il est impossible en la matière d'être complet. D'où la nécessité dans chaque cas d'espèce de réfléchir à chaque stade du raisonnement en vue de compléter la liste des exemples que nous citons.

7,1. - VERIFICATION DETAILLEE DES DESSINS - FAISABILITE :

Alors qu'en 6,2 on s'est assuré que les dessins définissaient bien l'ouvrage dans tous les détails, on va en reprendre l'examen en vérifiant la convenance des dispositions prévues pour les ferraillages, les cablages, les ouvrages provisoires et les équipements.

7,11. - Une première partie de cet examen porte sur la bonne définition, l'exactitude et la technologie de la structure.

Reprenant successivement les différents dessins, s'assurer de façon détaillée s'ils sont bien à l'échelle, notamment en ce qui concerne les rayons de courbure des fers et les profils des câbles de précontrainte.

En ce qui concerne les aciers de béton armé, dépister à cette occasion les courbures non définies, et se méfier particulièrement des fers \emptyset 20 ou davantage éventuellement représentés par un simple trait. Les crochets sont-ils bien définis en dimension et en position ?

En ce qui concerne les câbles de précontrainte, dépister plus particulièrement les erreurs de cote, dont pourraient résulter à l'exécution des contre-courbures. Les événements (aux points hauts) et décharges (aux points bas) nécessaires sont-ils prévus et exactement situés ? Penser en outre, à cette occasion, à l'incidence éventuelle de la saison en période d'hiver. Pour les ouvrages qui comportent des câbles en paquets, ou des câbles qui se croisent avec contact, noter que les injections de ces câbles devront être simultanées sauf dispositions spéciales.

Si certains rayons paraissent faibles, s'assurer de leur compatibilité avec les agréments. Ceux-ci définissent également, pour les armatures de précontrainte, les diamètres et épaisseurs des gaines, les dimensions d'ancrages, diverses limites à leurs implantations dans la section, les dimensions des coupleurs, etc....

Les emplacements et espacements des différentes armatures sont-ils tous bien définis, notamment en coupe transversale et dans les zones de recouvrement ? Les enrobages sont-ils convenables ? Les cales nécessaires pour matérialiser ces enrobages (CPC F65) sont-elles bien définies sur les dessins.

7,12. - Une deuxième partie concerne les dispositions constructives, les règles de l'art et, plus généralement, la faisabilité de la structure.

Tout d'abord les positions des aciers résultant des différents plans sont-elles géométriquement compatibles ? Ne pas oublier à cette occasion que l'encombrement d'un acier HA est voisin de 1,2 fois son diamètre nominal.

L'ordre de mise en place des différents lits d'armatures est-il bien défini, cohérent et réalisable ?

Y-a-t-il compatibilité avec un bon bétonnage, et en particulier avec la possibilité de vibrer ?

Y-a-t-il également compatibilité mécanique (en particulier limitation de la puissance des câbles selon l'épaisseur de la pièce) ?

Les conditions principales à respecter sur ces deux points sont constituées par les articles 20 et 21 du BAEL et l'article 47 de l'IP 2* et concernent surtout les zones critiques. Pour leur application, se méfier particulièrement des zones de recouvrement d'armatures (où on a nécessairement une accumulation de fers), surtout si ces recouvrements ne sont pas parfaitement définis ou ne sont que sommairement représentés. Cependant ces conditions ne sont pas exhaustives et il faut par exemple :

- s'assurer qu'un câble ne tendra pas à en écraser un autre qui traverserait sa zone d'ancrage ou serait recouvert par lui dans une zone de forte courbure

- déceler toute poussée au vide tant d'armatures passives que de précontrainte ; déceler même tout risque de poussée au vide (méplats d'armatures de précontrainte à proximité d'un parement).

Les recouvrements d'armatures sont-ils convenablement répartis ? Ne les a-t-on pas, dans un esprit de facilité, groupés abusivement dans les mêmes sections (reprises de bétonnage par exemple) ? Ne les a-t-on pas prévus en nombre excessif (CPST article 209,2) ce qui entraînerait une moins bonne qualité mécanique en même temps qu'un excès de tonnage d'acier ?

La faisabilité ne se limite pas à la compatibilité des armatures entre elles et avec les coffrages. Elle peut concerner des points extrêmement divers de l'étude de la structure, dont nous ne pouvons que citer quelques exemples :

- a-t-on défini la matérialisation des joints de l'épaisseur voulue ?

- les reprises nécessaires de bétonnage sont elles définies (non seulement emplacement, mais forme, traitement et fers en attente s'il y a lieu) ?

- en cas de préfabrication, les pièces munies de leurs fers en attente pourront elles être mises en place sans incompatibilité du fait de leur enchevêtrement ? Penser à ce problème globalement dans l'espace, et non pas séparément dans chaque plan principal ;

- pour les échafaudages des ponts courants, de nombreux détails évoqués à l'article 3.12 du CPST concernent la faisabilité ; penser notamment aux modalités de décintrement, et ce en fonction de ce qui est éventuellement au dessous de l'ouvrage ;

* Dans le cas où le marché se réfère au F61 VI de 1970 ou à l'IP 1, ces règles doivent également être appliquées : elles doivent alors être considérées comme règles de l'art non écrites.

- de façon plus subtile, le problème des déformations susceptibles d'affecter la précision de l'exécution, peut-il être considéré comme maîtrisé, du moins d'après ce qui ressort de l'étude d'exécution (phasage, fluage, étaitements, tassements ...)?

- plus généralement encore (tant pour la préfabrication que pour la construction sur échafaudages) les tolérances principales à respecter sont elles définies ou rappelées dans les études, ainsi que les moyens de les respecter? Ne pas oublier à ce sujet l'aspect contractuel des tolérances.

7,13. - Une troisième partie concerne la disposition correcte des équipements et dispositions pour la maintenance de la structure, et leur compatibilité avec la structure.

Nous rappelons que le document-type CES 71 et la pièce 1.4 du dossier-pilote P.P. 73 contiennent beaucoup d'indications sur les conditions à satisfaire pour que les dispositions générales des équipements puissent être satisfaisantes.

Il ne s'agit pas seulement d'une compatibilité générale; la compatibilité doit aussi être assurée dans le détail. Par exemple :

- les défoncements nécessaires pour loger des équipements (garde-corps, descentes d'eau ...) nécessitent que les ferrailages soient prévus en conséquence,

- les scellements ne doivent pas être nécessaires dans des zones de ferrailage dense; et on doit pouvoir les effectuer sans tomber sur un gros fer ou, pire, endommager un câble de précontrainte.

En ce qui concerne les besoins de la maintenance future, il faut évidemment qu'elle soit possible, et de préférence qu'elle soit aisée; on doit ainsi considérer par exemple :

- possibilités d'accès dans des caissons (position convenable des tampons et échelles d'accès, passage à travers entretoises éventuelles, etc...)

- bossages pour construction, inspection, réglage et remplacement ultérieur d'appareils d'appui

- etc

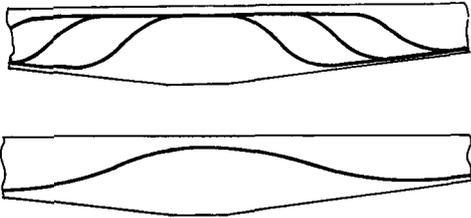
Mais il faut aussi qu'il y ait compatibilité avec la structure; par exemple les trous pour visite ne doivent pas affaiblir celle-ci; à tout le moins, des armatures supplémentaires doivent être prévues; souvent un calcul complémentaire est nécessaire (par exemple pour un trou dans un chevêtre porteur).

Ces recommandations sont également valables pour que la compatibilité des échafaudages et moyens de manutention avec la structure soit convenablement assurée : il ne doit pas être admis que les entreprises procèdent pour cela à des percements ou réservations dommageables; et la déformabilité doit être limitée (cf. par exemple GMO 70 § 11,31 et 11,32, fascicule 3.5 du GGOA 70 § 5,2, et CPST § 312,21 de la mise à jour n° 3).

7,14. - A l'occasion de ces vérifications, on pourra être amené à constater :

- l'existence d'anomalies apparentes, telles par exemple que des sections d'armatures apparemment très faibles ou des arrêts mal placés d'armatures ; le vérificateur notera ces points pour reconsidération lors de l'examen de la note de calcul

- et/ou la maladresse de certaines dispositions ; par exemple la première disposition ci-contre d'armatures de précontrainte est, dans le plan représenté, mécaniquement équivalente à la seconde, même pour l'effort tranchant, à ceci près qu'elle donne lieu à des pertes de précontrainte beaucoup plus élevées, du fait que chaque câble subit une plus grande déviation angulaire totale ; selon la gravité de la maladresse et la difficulté d'y



remédier, le vérificateur la signalera au chef d'Arrondissement immédiatement ou avec ses autres conclusions.

7,2. - LES METHODES THEORIQUES DE VERIFICATION DES CALCULS :

Nous présentons ci-après trois méthodes générales théoriques :

- la vérification directe
- la vérification par calculs parallèles
- la vérification par sondages et recoupements.

Il s'agit de méthodes théoriques en ce sens que dans la plupart des cas aucune d'entre elles n'est satisfaisante, voire même possible, pour la vérification de l'ensemble des calculs. Pour cette raison la méthode pratique de vérification recommandée qui sera exposée en 7,3, est une méthode modulée selon les cas d'espèce, et dont ces trois méthodes générales constituent les limites possibles.

7,21. - La vérification directe :

7,211. - Définition : il s'agit de la méthode traditionnelle de vérification. Elle consiste à suivre pas à pas la note de calcul de l'entreprise, en refaisant toutes les opérations.

Du point de vue pratique, lorsque la méthode est employée à l'état pur, l'ordre des vérifications est le même que l'ordre de la note de calcul ; il n'en est pas de même dans les autres cas (voir 7,23 et 7,3).

7,212. - Inconvénients et avantages : Le principal inconvénient, lorsqu'il s'agit d'ouvrages spéciaux, et surtout d'ouvrages comportant des innovations, est que le vérificateur peut être influencé par le déroulement de la note de calcul, et être ainsi amené à ne vérifier que la matérialité des calculs eux-mêmes et non pas la logique du raisonnement. Or les défauts les plus graves constatés sur ouvrages à la suite d'un défaut de conception sont dûs le plus souvent non pas à une faute de calcul, mais à une erreur de raisonnement (système statique faussement analysé, non prise en compte des déformations différées, mauvaise reprise d'efforts localisés, etc...). Si le recours au "réseau de compétence" évoqué en 5,32 a peut attirer l'attention du vérificateur principal sur un certain nombre de points délicats, il n'en reste pas moins que "le vérificateur trop près de la note de calcul de l'entrepreneur peut éventuellement ne pas se rendre compte qu'il dérive. Une inattention, une fatigue peut avoir des conséquences graves ... aucun vérificateur même chevronné ne pouvant se prétendre être à l'abri d'une faute d'aiguillage". Bref "le risque de cette méthode réside dans la dépendance des deux pensées : celle du calculateur de l'entreprise et celle du vérificateur ; les deux pensées peuvent à cause de cette dépendance faire la même erreur-clef."

Il s'agit, en somme, d'un risque psychologique. Non seulement ce risque est certain dans les cas indiqués ci-dessus, mais il est même parfois exploité. En effet certains entrepreneurs, pour obtenir le visa de calculs justifiant des variantes ou solutions nouvelles "sont très forts pour développer abondamment ce qu'on sait être évident et passer comme chat sur braise sur des sujets" dont ils souhaitent qu'ils ne suscitent pas la curiosité du vérificateur. Noyer le vérificateur sous des kilos de sorties d'ordinateur n'a même généralement pas d'autre but.

En fait, en cas de large recours à un ou des programmes de calcul privés (ceux du SETRA faisant presque tous exception), la vérification directe devient très souvent très difficile, et dans bien des cas n'est même plus possible, sinon à un vérificateur de très haut niveau (voir exemples plus loin en 7,5). Aussi, en pratique, en un tel cas, ou le programme de calcul est connu comme fiable et l'on peut se limiter au contrôle des hypothèses, ou il ne l'est pas et il est alors nécessaire de recourir à des calculs parallèles ou à un vérificateur de très haut niveau.

Au total, en cas de vérification directe, il importe de ne pas se borner à refaire les opérations, mais d'y ajouter, avant ou après, un stade de réflexion au cours duquel on vérifiera :

- que les hypothèses de calcul sont valables,

- que toutes les vérifications nécessaires ont été effectuées, ce qui revient à dire qu'il faut à ce stade plus chercher ce qui manque dans la note de calculs que ce qu'elle comporte,

- que les données de base ont été bien choisies et, si l'on a fait usage de l'ordinateur, bien rentrées dans le programme (c'est ainsi qu'un maître d'oeuvre a détecté des erreurs dans l'introduction des données dans un calcul électronique).

Quant aux avantages de la vérification directe, ils sont les suivants :

- en cas de divergence avec l'entreprise, l'emplacement et la cause de la divergence sont immédiatement et exactement connus, et ce qui ne fait pas l'objet de divergence est reconnu valable ;

- la discussion qui suivra éventuellement avec l'entreprise pourra donc s'appuyer sur une base parfaitement commune, et sera simplifiée au maximum.

7,22. - La vérification par calculs parallèles :

7,221. - Définition : il s'agit d'une méthode assez largement pratiquée par les bureaux de contrôle privés du bâtiment. Elle consiste à dissocier entièrement les calculs du vérificateur des calculs de l'entreprise (et non pas seulement les opérations numériques) de manière qu'une erreur de raisonnement commise par le premier ne puisse avoir d'influence sur les calculs du second. Cela n'implique pas que le vérificateur fasse tous ses calculs en bloc avant de rien comparer aux calculs de l'entreprise, mais seulement qu'il fasse chacun de ses calculs avant de se reporter aux calculs correspondants de l'entreprise.

Du point de vue pratique, les comparaisons sont facilitées par l'emploi de tableaux comparatifs des résultats, ou mieux encore de graphiques comparatifs.

7,222 - Avantages et inconvénients : le principal avantage résulte de ce qui est indiqué en 7,221 : moindre risque qu'une erreur de principe (éventuellement par omission) ne soit pas décelée ; en outre cette méthode de

vérification est de nature à remédier à certaines impossibilités signalées en 7,212.

Un premier inconvénient, lorsqu'il s'agit de vérifier manuellement des calculs manuels, est qu'elle risque d'être beaucoup plus longue que la vérification directe, à moins de ne procéder qu'à des calculs partiels ou de recourir à des méthodes simplifiées, les uns et les autres judicieusement choisis et parfaitement interprétés (par exemple caractère majorant ou minorant des résultats, en cas d'emploi de méthodes simplifiées); aussi son emploi systématique exige beaucoup plus de talent (ou d'expérience) de la part du vérificateur, que la vérification directe. Lorsqu'il s'agit de calculs automatiques, son premier inconvénient est qu'elle risque d'être fort coûteuse à moins, là encore, de se contenter de calculs simplifiés.

Un premier exemple de méthode simplifiée consiste à confronter par règles de trois certains résultats de l'entreprise aux résultats provenant d'un précédent suffisamment semblable (sous condition d'en disposer). Les projeteurs expérimentés savent bien qu'un tel moyen permet même d'aller presque immédiatement à un dimensionnement définitif qu'il n'y aura plus qu'à justifier.

Un autre exemple de méthode simplifiée consiste à assimiler une variation d'inertie à une loi théorique pour la détermination de sollicitations dans certains cas de charge généralement prépondérants (par exemple usage de la brochure de la DOA.A "Poutres continues de hauteur variable ; tables numériques").

Un autre exemple encore consiste à procéder à un calcul par un programme général de calcul de structure (ensemble de barres, réseau de poutres ou éléments finis ou calcul analogique) avec une définition grossière du maillage.

Un second inconvénient est qu'à l'issue d'une vérification par cette méthode trois cas peuvent se présenter :

- ou les résultats sont presque exactement les mêmes ; en ce cas il y a quasi-certitude d'exactitude ; malheureusement cela est relativement rare ;

- ou les résultats sont dans l'ensemble assez voisins ; en ce cas une confrontation est nécessaire pour arrêter des conclusions :

. les écarts sont-ils acceptables ? c'est-à-dire sont-ils assez limités, pour chaque résultat particulier, pour qu'on puisse conclure à la bonne tenue de l'ouvrage ?

. si tel est le cas, le caractère modéré des divergences ne résulte-t-il pas, par hasard, d'erreurs faites d'un côté comme de l'autre, et qui allant dans le même sens se compensent en partie au seul niveau de la comparaison ? S'il en était ainsi, il serait à craindre que la réalité ne soit pas contenue entre les deux résultats ;

- ou enfin les résultats sont manifestement excessivement divergents ; en ce cas on peut certes procéder à un troisième calcul, généralement partiel, pour affermir sa conviction ; mais en général on ne peut échapper à une confrontation assez poussée des deux calculs en vue de détecter la cause (ou, souvent, les causes) ou du moins le lieu des divergences ; on ne peut en effet se borner à opposer à l'entreprise les résultats d'un calcul entièrement séparé du sien ; si l'Administration n'est pas tenue de lui indiquer l'erreur précise qu'elle a commise, du moins doit elle lui prouver l'existence d'une erreur de sa part (par exemple en prouvant l'inexactitude ou l'incompatibilité de certains de ses résultats ; ceci doit généralement être fait en recourant à une autre méthode : celle des sondages et recoupements, qui est exposée en 7,23); encore faut-il généralement pour cela disposer d'assez de résultats intermédiaires dans l'un et l'autre calcul.

Bien entendu toutes ces confrontations sont orientées au mieux s'il est recouru au "réseau de compétence" évoqué en 5,32a. Néanmoins elles risquent de mener bien tardivement à la conclusion que la note de calcul de l'entreprise est erronée depuis le début (erreur sur une donnée de base par exemple) auquel cas on risque d'avoir perdu beaucoup de temps et d'efforts.

C'est pourquoi il n'est pas souhaitable de faire tous les calculs parallèles sans se reporter à la note de calcul de l'entreprise. Mieux vaut fractionner une telle vérification en plusieurs stades, et par exemple :

- en un premier stade définir soi-même, au vu des plans, le modèle de fonctionnement mécanique qu'on va adopter, arrêter sa formulation mathématique et les bases numériques du calcul

- se reporter alors à la note de calcul de l'entreprise pour une première confrontation

- si celle-ci est suffisamment favorable, engager un deuxième stade de la vérification, en déterminant par exemple des lignes d'influence ou une estimation de la précontrainte, et procéder alors à une deuxième confrontation

- passer alors à un troisième stade de la vérification (par exemple calcul des contraintes normales)

- etc....

Un troisième et dernier inconvénient de cette méthode de vérification est qu'elle ne conduit pas directement à apporter à la note de calcul de l'entreprise les améliorations éventuellement nécessaires pour qu'elle puisse figurer au dossier d'ouvrage comme reconnue fiable. Dans une certaine mesure un palliatif peut être trouvé en portant au dossier le rapport du vérificateur auquel sont annexés ses propres calculs ou, du moins, ses propres résultats.

7,23. - La vérification par sondages et recoupements :

7,231. - Définition : il s'agit d'une méthode souvent conçue et employée de façon caricaturale. Elle doit être ici comprise comme consistant à parvenir aussi rapidement que possible à l'examen des dimensionnements, en limitant les opérations numériques de vérification en fonction de l'importance des intermédiaires de calcul et des résultats, et de leur caractère répétitif.

Ainsi, par exemple, dans un tableau de valeurs numériques (par exemple caractéristiques mécaniques des sections, contraintes dans les différentes sections), on vérifie exactement les valeurs relatives aux sections déterminantes, et éventuellement une autre section prise au hasard (à titre de garantie vis-à-vis de l'emploi d'une telle procédure par l'entreprise elle-même); et, en faisant les différences de ligne en ligne ou par report graphique, on s'assure que les autres valeurs du tableau ne sont pas anormales. Le tableau est alors réputé exact. Le sondage lui-même est fait par vérification directe ou par calcul parallèle selon le cas.

On peut aussi se servir de certains résultats donnés par l'entreprise, pour vérifier a posteriori qu'ils résultent bien des bases indiquées. Ainsi on peut souvent plus rapidement retrouver les sollicitations à partir des contraintes qu'en suivant la démarche de la note de calcul. Plus généralement on peut, connaissant la solution d'un système d'équations, plus rapidement vérifier que cette solution satisfait les équations en y reportant les résultats qu'en résolvant une nouvelle fois le système. On peut également vérifier directement la distribution des sollicitations de charge permanente en s'assurant, par trois intégrations successives, de la compatibilité des déformations au droit des appuis dans les deux travées qui les encadrent ; en ce dernier cas, quand cette compatibilité est établie, on peut considérer comme valables au moins les ordonnées moyennes des lignes d'influence des moments sur

appuis. Enfin des exemples de sondages et de recoupements plus spécifiques de certaines sortes de programmes de calcul automatique sont donnés dans l'Annexe G et dans les documents P.R.P. 75 (§ II.6) et P.E.F. 76 (§ 5.1).

La condition essentielle de recours à cette méthode est de constituer un ensemble de vérifications suffisamment complet (les recoupements devant à cet effet relier les sondages) pour qu'on soit assuré de l'absence de toute erreur importante.

7,232. - Avantages et inconvénients : L'avantage essentiel de cette méthode est sa rapidité. Dans la mesure où des calculs répétitifs vérifiés par sondages proviennent de l'ordinateur, les conclusions sont plus sûres que si ces calculs sont manuels. Ses inconvénients par contre peuvent être sérieux.

Tout d'abord elle n'est pas toujours possible ; ou du moins elle peut rester insuffisante dans un certain nombre de cas.

En second lieu elle est, des trois méthodes, la plus difficile ; bien la pratiquer est un véritable art.

Pour cette raison elle risque de sombrer dans la caricature si elle est pratiquée par des vérificateurs d'expérience ou de conscience professionnelle insuffisante.

7,3. - LA METHODE PRATIQUE DE VERIFICATION DES CALCULS.

On vient de voir que chacune des trois méthodes théoriques a ses avantages et inconvénients, qui non seulement dépendent du cas d'espèce, mais aussi peuvent dépendre de la partie considérée du calcul.

C'est ce qui conduit à recommander comme méthode pratique de vérification, dans les cas complexes, une méthode modulée faisant appel tantôt à l'une ou à une autre des méthodes théoriques.

7,31. - Au préalable nous précisons que l'auteur de l'étude d'exécution, et par conséquent l'entreprise elle-même, ne devra jamais pouvoir savoir à l'avance comment l'étude sera contrôlée, c'est-à-dire en particulier quelle sera la modulation adoptée.

7,32. - Nous nous plaçons toujours dans le cas d'un pont spécial dont les calculs sont assez complexes.

En un tel cas il convient de distinguer dans les calculs diverses parties :

a - parties qu'on peut considérer a priori comme devant être classiques (calculs de charges, d'inerties, de pertes de précontrainte, de sections...) et à l'intérieur de ces différentes parties :

a1. celles qui n'ont pas de caractère répétitif

a2. celles qui l'ont et sont donc à présenter sous forme de tableaux de calcul

b - parties qu'on ne peut considérer comme classiques (parties dans lesquelles intervient largement le caractère innovant ou le caractère spécial de l'ouvrage ou son mode de construction ; parties pour lesquelles l'entreprise n'aura pu recourir qu'à un programme de calcul automatique peu connu, détails du projet pour lesquels il n'est pas d'usage de remettre une justification écrite).

En première approche :

- les parties a1 relèvent de façon préférentielle de la vérification directe
- les parties a2 relèvent de façon préférentielle de la vérification par sondages et recoupements
- les parties b relèvent de façon préférentielle de la vérification par calculs parallèles.

Mais il est bien précisé que :

- ceci ne constitue qu'une première approche ; par exemple on trouvera plus loin en 7,52 un exemple de la catégorie b pour lequel une vérification par calculs parallèles aurait été pratiquement impossible
- le choix de telle ou telle méthode doit dépendre de l'expérience des vérificateurs (connaissance a priori des points délicats des calculs et des ordres de grandeur numériques) et, pour certaines méthodes, de leur capacité de pratiquer seuls et d'imaginer ; nous devons mettre en garde contre les dangers d'un comportement présomptueux ou léger sur ce point
- il doit dépendre de précédents disponibles et de leur similitude à l'ouvrage à étudier (rapports de dimensions notamment)
- une séparation d'une étude entre diverses parties ne doit pas conduire à un fractionnement excessif
- on ne peut exiger certaines choses de l'entreprise (sauf à lui donner un motif fondé de réclamation) que pour autant que le marché l'a prévu; ceci concerne notamment l'article 305,34 du CPST en cas de recours à un programme de calcul privé (cf. Annexe F).

Du fait de toutes ces conditions, la liberté de choix est en pratique souvent restreinte, voire nulle. Dans la mesure où cette liberté existe, on pourrait être tenté de faire le choix en donnant la préférence :

- soit à la netteté de la situation juridique
- soit au coût de la vérification ; en cas de vérification manuelle, ce coût s'identifie à peu près au temps passé ; en cas de vérification avec recours étendu à l'ordinateur, il en est à peu près indépendant
- soit à l'efficacité (chances d'éviter les incidents).

En fait nous pensons que l'élément majeur du choix sera surtout l'idée qu'on se fera a priori de la qualité des calculs de l'entreprise ; cet élément est en relation étroite avec le coût de la vérification par les différentes méthodes.

7,33. - Dans la mesure où subsiste une possibilité de choix, ceci mène à l'idée de progressivité de la vérification. Ceci signifie que la méthode pratique de vérification ne suivra pas l'ordre de la note de calcul de l'entreprise, mais commencera par certains sondages et recoupements. Ainsi, pour commencer :

- on vérifiera que la somme des réactions permanentes d'appui est égale au poids total de l'ouvrage (à étendre à des cas de charge donnés)

- on vérifiera que la demi-somme des moments sur appuis, augmentée du moment à mi-portée, est égale au moment dans la travée supposée indépendante (ou approximativement à $\sum p \ell^2/8$)

- on déduira des avant-métrés des ratios (quantité de béton/m² S.U. de tablier, quantités d'aciers de différentes catégories/m³ de béton, etc....) et on les appréciera pour détecter la présence d'anomalies éventuelles

- on reportera sous forme graphique des valeurs relevées dans les tableaux numériques de la note de calcul à vérifier, afin de vérifier leur variation régulière (application de la méthode des recoupements) ; ainsi le re-



port graphique ci-contre de contraintes minimales extraites d'une note de calcul automatique a-t-il pu mettre immédiatement sur la piste d'un ordre frauduleux introduit dans le programme

- et si une anomalie est détectée, elle fera immédiatement l'objet d'examen plus approfondi de la partie correspondante du calcul, généralement par vérification directe, parfois par d'autres moyens (cf. Annexe E).

7,34. - Pour terminer ce paragraphe, quelques précisions sont à donner sur l'usage de méthodes approchées.

a - Il est toujours souhaitable de procéder à certaines vérifications fines (au millième près) de certaines données, certains intermédiaires de calcul ou certains résultats, pour s'assurer du soin pris par l'entreprise en établissant la note de calcul (certaines, si on les laisse faire, se bornent à des calculs de prédimensionnement, par exemple par réemploi de calculs provenant de précédents).

b - Malgré l'impossibilité (cf § 3,24) de fixer de façon générale la précision nécessaire des calculs, on peut avancer, comme ordre de grandeur, comme habituellement admissibles des écarts entre calculs approchés et note de calcul :

- de 10 % sur les sollicitations d'origine extérieure et les sollicitations hyperstatiques de précontrainte

- de 3 % sur les sollicitations isostatiques de précontrainte.

7,4. - REGLES DE DETAIL DES VERIFICATIONS.

7,41. - Les principes fondamentaux de la sécurité et de la qualité :

Nous avons personnellement explicité et développé ces principes, avec exemples à l'appui, dans le chapitre XIII du Manuel de Sécurité des Structures publié par le C.E.B. (Bulletins 106 et 107).

Dans la première partie de ce chapitre, qui est relative au rôle et à l'organisation des différents échelons, nous avons en matière d'études (et cela vaut également pour les vérifications) indiqué (§ 13,3) la nécessité de pouvoir recourir, dans les bureaux d'étude de quelque importance, à un spécialiste de la sécurité des structures; nous avons ensuite défini l'articulation nécessaire des rôles de ce spécialiste et des autres ingénieurs de ce bureau.

Dans la deuxième partie (§ 13,4) nous avons formulé et détaillé ce que nous avons appelé les cinq principes fondamentaux de la sécurité des constructions.

On trouvera en Annexe B aux présentes Recommandations des développements et exemples d'application de ces cinq principes, extraits dans leur presque totalité du Manuel. Nous nous bornons ici à indiquer ce que sont ces cinq principes :

1°/ - Reconnaître tous les facteurs de dispersion qui interviennent de façon importante dans les justifications de sécurité, et en tenir compte dans les calculs.

2°/ - Mener les calculs de façon cohérente.

3°/ - Ne pas tenir pour nul ce qui n'entre pas habituellement dans les calculs.

4°/ - Suivre "pas à pas" la transmission des efforts, depuis l'application des actions jusqu'aux réactions d'appuis ; reconnaître à chaque pas les états-limites imaginables (et la modélisation à utiliser pour le calcul).

5°/ - Reconnaître les risques de rupture fragile, et ne pas prendre en compte une ductilité incertaine.

7,42. - La liste de ce qui est à vérifier*

Comme déjà indiqué, l'extrême diversité des ouvrages exclut l'idée d'une "check-list" donnant le détail des vérifications. On peut cependant donner à ce sujet des indications générales, et pour cela nous reproduisons ce qui figure dans la réglementation allemande (loi sur la construction du Land de Schleswig-Holstein) :

a - Si toutes les forces - y compris les états structuraux intermédiaires - ont été complètement prises en compte, leur transmission poursuivie jusque dans le sous-sol, et si les pressions admissibles sur le sol n'ont pas été dépassées ;

b - Si les hypothèses de base des calculs ainsi que les modes de calcul satisfont aux Prescriptions concernées, si leurs résultats sont justes et les mises en équation sans erreur ;

c - Si toutes les équations ont bien été calculées et si les valeurs numériques présentes dans les équations ont été reprises avec exactitude, dans la mesure où elles proviennent d'autres calculs ;

d - Si toutes les cotes des plans d'exécution, le nombre des éléments de construction et leur qualité, ainsi que tous les assemblages, sont conformes avec le calcul de résistance ;

e - Si un calcul statique ** existe pour toutes les parties de l'ouvrage nécessitant une justification de la résistance et de la stabilité ;

f - Si la géométrie de l'ouvrage s'adapte parfaitement bien du point de vue des voies de communication et des conditions de terrain,*** existantes ou planifiées, si les besoins de l'entretien ultérieur ont été pris en ligne

* Il s'agit ici de la consistance technique minimale; pour le reste, se reporter aux § 4,22 et 7,6.

** Par "calcul statique" (terminologie allemande) il faut comprendre une justification vis-à-vis de l'ensemble des états-limites possibles.

*** Nota : s'il faut entendre par là tout ce qui concerne l'état des lieux, ceci ne peut pas à notre avis permettre de se limiter à une vérification en chambre; de toute manière il se pose là un problème de raccordement entre rôles du vérificateur et des Ingénieurs de l'Administration.

de compte et si la sécurité et la facilité d'écoulement de la circulation sont garanties conformément aux principes du Projet contrôlé".

Cette liste peut faire l'objet de divers commentaires et développements.

Tout d'abord l'usage de cette liste suppose un pointage général dans la note de calcul de l'entreprise. Si on constate alors que certaines bases de la note n'y sont pas explicitées, compléter à la main si elles ne font pas de doute; sinon, consulter l'auteur de la note.

On trouvera en Annexe C au présent document une liste des omissions dommageables les plus couramment constatées; on verra qu'elles portent largement, d'une part sur les principes de sécurité (Annexe B), et d'autre part sur les dispositions constructives.

Nous soulignons l'importance particulière du point b lorsque l'étude comporte des calculs automatiques : les modes de calcul adoptés en ce cas diffèrent en effet alors fréquemment des modes de calcul classiques qui ont été établis pour le calcul manuel; d'autre part il faut toujours vérifier les données et souvent vérifier les hypothèses qu'elles traduisent ou recouvrent (cf. § 8,64 plus loin).

Plus généralement, lorsque plusieurs modèles mécaniques sont possibles pour l'analyse, il importe de s'assurer si le modèle adopté dans le cas d'espèce entre bien dans son domaine de validité et si les conséquences en sont tirées.
Ainsi :

- un tablier peut être, sous charge excentrée, considéré comme soumis à un moment fléchissant non uniformément réparti (excentré) ou un moment fléchissant uniformément réparti (centré) et à un moment de torsion (cf formules de Bresse) ; en fait, dans bien des cas, et notamment si le tablier est souple à la torsion, on sera dans le cas dit du gauchissement gêné, et les contraintes normales qui en résultent rétablissent en fait la distribution de contraintes du moment de flexion excentré;

- un tablier à poutres multiples (VIPP ou autre) peut être calculé selon diverses hypothèses de répartition transversale des efforts supposant, selon le cas, une grande rigidité transversale (méthode de Courbon), ou un faible intervalle des poutres (méthode de Guyon Massonnet), ou faisant appel à la rigidité de torsion des poutres ; il importe de n'employer les deux premières méthodes que pour certaines dispositions ou proportions du tablier, et d'adopter une hypothèse au moins aussi défavorable pour l'évaluation des efforts transversaux à prendre en compte ; quant à la troisième méthode, elle nécessite que les moments de torsion soient pris en compte pour le calcul des sections.

Ces exemples pourraient être multipliés, et on pourrait en particulier citer bien des cas où tel ou tel paramètre ou phénomène est négligé à la base d'une analyse. Il faut d'abord en retenir que l'idée de domaine de validité est fondamentale pour le choix ou l'acceptation d'une analyse. Le domaine de validité est suffisamment défini dans des dossiers-pilotes ou documents types pour les structures les plus courantes. Dans les autres cas le plus efficace est de recourir au réseau de compétence (CETE ou SETRA) grâce auquel on pourra soit connaître directement la réponse en ce qui concerne l'ouvrage particulier considéré, soit savoir quelles sont les vérifications de compatibilité auxquelles procéder pour s'assurer si cet ouvrage est à l'intérieur de ces limites.

Nous signalons néanmoins que la notion de domaine de validité n'est qu'une notion pratique assez grossière, et que dans des cas assez rares elle doit être remplacée ou complétée par la notion de précision, pour le choix du modèle et pour son usage. Parfois, cette précision peut devoir être étudiée a posteriori.

Quant aux conséquences à tirer du choix du modèle, les exemples ci-dessus montrent qu'elles consistent à assurer la cohérence de l'ensemble de l'analyse.

Enfin, compte tenu de la réglementation française, et pensant ici à la qualité plus qu'à la sécurité, nous ajouterons qu'il importe lorsqu'un procédé a fait l'objet d'un agrément (officiel comme dans le cas des procédés de précontrainte, ou non lorsqu'il s'agit par exemple de précédents déjà admis par le S.E.T.R.A.), de bien comprendre que ces agréments, lorsqu'ils concernent les études, sont des agréments de qualité, mais qu'ils laissent essentiellement à la charge des ingénieurs (et donc du vérificateur) d'apprécier l'opportunité de l'emploi en fonction notamment de l'ouvrage à réaliser. C'est ainsi par exemple que l'emploi d'armatures de précontrainte agréées, condition nécessaire pour la qualité intrinsèque et la régularité administrative, ne dispense nullement de refuser l'emploi de ces armatures lorsque par exemple elles sont d'une grosseur anormalement forte par rapport aux dimensions (épaisseur notamment) de telle pièce à précontraindre.

7,43. - Justifications non fournies par l'entreprise :

Il a été mentionné en 6,3 et en 6,4 que les insuffisances importantes des études d'exécution, apparaissant dès la première phase de la vérification devaient faire l'objet d'une action immédiate envers l'entreprise. Dans la deuxième phase de la vérification, il est très courant qu'on découvre en sus l'absence de justification sinon ponctuelles, du moins plus limitées. Il s'agit soit de manques dans les calculs justificatifs, soit de dimensions non justifiées.* Quelle est l'attitude à adopter à leur égard ?

Force est de constater que, comme il ressort des enquêtes qui ont précédé l'établissement du présent document, les entreprises ont généralement tendance à offrir le minimum de prestations : tout juste celles prévues d'une manière non ambiguë dans les dossiers de marchés. D'où, au préalable, l'importance de prescriptions contractuelles précises et détaillées. Nous avons d'ailleurs, pour ce motif entre autres, toujours souligné l'importance particulière des articles 305 et 312 du C.P.S. type.

Souvent, en tout cas, on se trouve placé devant les dilemmes suivants :

- la note de calcul de l'entrepreneur ne contient pas certaines vérifications réglementaires (par exemple certains cas de charge), et le bureau d'études de l'entrepreneur interrogé à ce sujet déclare n'avoir pas produit cette vérification parce qu'il a reconnu ce cas comme non déterminant (soit qu'il déclare l'avoir vérifié, soit qu'il déclare le savoir sur la base de précédents),

- la note de calcul de l'entrepreneur saute certaines séquences de calcul pour le motif que le bureau d'études a en fait déterminé un résultat intermédiaire par une méthode simplifiée "maison" qu'il considère comme plus ou moins équivalente à la méthode réglementaire.

Que doit faire le vérificateur ? exiger le complément ou suppléer lui-même au manque ?

Il n'y a évidemment pas de réponse générale à cette question ; tout est affaire de mesure. Il est clair à nos yeux qu'un contrôle totalement passif ne serait pas raisonnable, et même à la limite ne serait pas possible sauf dans des cas exceptionnellement simples.

Il convient donc quand les "impasses" dans les calculs sont limitées :

- de n'intervenir d'abord que verbalement auprès du bureau d'études de l'entreprise pour recueillir ses explications

* Un des meilleurs moyens pour découvrir celles-ci est le report préconisé en 6,2 g.

- de procéder alors à une vérification par la méthode des calculs parallèles

- et si la conclusion est possible, de ne rien demander de plus à l'entreprise, mais, par quelques notes laissées dans le document de l'entreprise, rendre le document plus valable et plus compréhensible pour les usages ultérieurs.

Un exemple typique est fréquent concerne l'absence de prise en compte du système B_c de charges civiles (F 61 II du C.P.C.). Il est très aisé de vérifier la non-prépondérance de ce système par un calcul parallèle simplifié en utilisant les charges réparties équivalentes B' (l) et B'' (l) définies dans la pièce 2 du dossier-pilote SURCH 71.

Quant aux ferraillements non justifiés par le calcul, il convient d'abord d'apprécier si ces fers sont à considérer comme fers de répartition ou de construction, auxquels cas la production de véritables calculs serait sans objet (et il convient de vérifier directement la convenance de ces fers). Pour les autres, faire comme pour les impasses dans les calculs.

7.5. - EXEMPLES D'APPLICATION.

Ces exemples concernent des vérifications, par la méthode directe ou par sondages et recoupements, d'études d'exécution basées sur l'emploi d'ordinateurs.

7,51. - Un premier exemple concerne le calcul de voûtes minces au moyen d'un programme de barres en milieu élastique. La méthode détaillée a été la suivante :

- se faire communiquer les expressions algébriques des termes de la matrice de rigidité utilisées pour une barre en milieu élastique,

- vérifier algébriquement les formules correspondantes,

- vérifier numériquement sur un ou deux cas que l'on retrouvait les résultats du programme, étant admis que les déplacements des extrémités des barres étaient ceux fournis par le programme,

- éventuellement, vérifier numériquement l'équilibre d'un ou deux noeuds (a priori, sur ce point, la probabilité d'erreur était faible), car vraisemblablement des ordres Fortran d'un autre programme avaient été repris.

Le calcul aurait pu également être vérifié au moyen d'un calcul parallèle par un autre programme de barres ; on aurait même pu opérer de façon approximative à l'aide d'un programme ne prenant pas en compte le milieu élastique, en considérant des barres plus courtes en plus grand nombre avec des ressorts à leurs extrémités.

7,52. - Un second exemple concerne le recalcul (ouvrage existant) d'un pont Gisclard à cable de tête. L'entreprise avait établi un programme spécial. En quelques semaines, un vérificateur de haut niveau avait vérifié :

- que les simplifications admises (notamment développement limité d'ordre 2 pour la courbe définissant les câbles, assimilation de la tangente aux extrémités d'un câble à la corde) n'entraînaient pas d'erreur appréciable,

- que le mode de calcul proposé avait été effectivement mis dans le programme,

- que la convergence vers la solution était bonne, ou plus exactement que les valeurs trouvées satisfaisaient avec une bonne approximation les équations (une partie importante du calcul consistait schématiquement à résoudre

par tâtonnements une équation algébrique); cette vérification était faite de manière fine dans les sections déterminantes.

Dans cet exemple, un calcul parallèle aurait été impossible.

7,53. - Un troisième exemple concerne la vérification à l'intérieur du SETRA, de la pièce 3,6 du dossier EUGENE B73. Elle a consisté à vérifier :

- d'une manière fine (10^{-3} environ)
 - . les résultats correspondants au moment fléchissant et au moment de torsion en une section, une charge unité étant placée en telle autre section,
 - . les valeurs des lignes enveloppes correspondant à une section, les lignes d'influence étant supposées valables.
- de manière plus grossière les valeurs des lignes enveloppes sur appui et en milieu de travée ; en général la précision est restée bonne (2 %), avec une exception pour un point, exception qui s'explique aisément.

Pour un ouvrage réel, on aurait dû vérifier en sus :

- les moments hyperstatiques de précontrainte, ce qui est fait dans Eugène B 73
- les sections situées de part et d'autre d'arrêts de cables éventuels.

On peut penser que de telles vérifications ne donnent pas une sécurité absolue, mais doivent permettre d'éliminer des erreurs grossières ou des programmes fantaisistes (tel un programme qui contenait des coefficients numériques farfelus pour le calcul de dalles biaises). On peut penser qu'elles peuvent suffire pour donner une bonne garantie vis-à-vis d'un risque d'effondrement du fait des calculs concernés. Vis-à-vis d'un risque d'erreurs de moindre importance, la garantie qu'elles donnent est moindre, mais on peut se poser la question de la rentabilité de vérifications plus poussées.

7,54. - D'autres exemples concernent l'usage de programmes de réseaux de poutres (cf. document-type PRP 75), par exemple STRESS et STRUDL. Cet usage permet de calculer, de façon plus ou moins fine au choix de l'utilisateur, toutes sortes de structures; citons notamment :

- les ponts à béquilles,
- les ponts à deux (ou plusieurs) nervures reliées par un hourdis,
- les caissons multicellulaires,
- les dalles de forme quelconque.

Ces programmes ne permettent pas de calculer automatiquement les lignes enveloppes d'efforts internes, mais seulement les valeurs de ceux-ci pour quelques cas de charge; c'est suffisant pour effectuer un calcul parallèle. La méthode pratique de vérification peut alors comporter, outre ce calcul parallèle, une vérification directe partielle des calculs de l'entreprise, consistant à s'assurer à partir des surfaces d'influence, quels sont les phases et cas de charge prépondérants.

7,6. - CONCLUSION DE LA VERIFICATION.

7,61. - La vérification des études d'exécution est une des tâches qui incombent à la maîtrise d'oeuvre. La filière de ces tâches étant dans son ensemble suffisamment définie, il ne se pose de questions importantes sur

l'aboutissement de la vérification que dans le cas où il est recouru pour la vérification à un organisme extérieur au Service chargé de la maîtrise d'oeuvre : CETE ou BET.

Ces questions doivent être réglées pour l'essentiel par le contrat définissant la mission de l'organisme vérificateur et, pour le détail et les ajustements éventuels, par le chef d'arrondissement ou son délégué. Les options (cf. § 4,22 ci-dessus) paraissent devoir dépendre des conditions particulières à l'opération et des besoins du Service maître d'oeuvre.

7,62. - A la différence de ce qui se fait en Allemagne, où la mission de vérification est définie officiellement comme une activité séparée, il ne convient pas dans notre pays de faire conclure la vérification par un visa par le vérificateur des plans et calculs qui seront retournés à l'entrepreneur : en France en effet, en la situation présente, il ne convient pas que l'entrepreneur ait à connaître de positions personnelles intérieures à la maîtrise d'oeuvre. Nous ne voyons par contre que des avantages à ce que de tels visas figurent sur le seul exemplaire des plans et calculs qui sera conservé dans les bureaux de l'Arrondissement. Seul le chef d'Arrondissement (ou son délégué) visera l'exemplaire retourné à l'entrepreneur.

A défaut, ou à titre complémentaire, nous ne voyons aucun inconvénient à ce que la vérification donne lieu à l'émission par le vérificateur de notes écrites séparées, destinées au chef d'Arrondissement.

7,63. - Il peut être utile qu'une telle note écrite séparée comporte des conseils pour la surveillance du chantier : il s'agit d'attirer l'attention sur des points délicats, de manière que les hypothèses admises à la base des études d'exécution soient satisfaites. L'opportunité d'une telle mesure dépend essentiellement de la nature de l'ouvrage et de son mode de construction ; sa consistance peut dépendre de l'organisation plus ou moins poussée de la surveillance. Néanmoins, dans tous les cas, il est souhaitable que le vérificateur indique si certaines dispositions qui se situent à la limite des études d'exécution (chaises assurant la tenue des ferraillements, fixation des chemises de circulation provisoires au dessus des coffrages) sont ou non définis dans ces études.

Rien ne s'oppose non plus à ce que la mission de l'organisme vérificateur se prolonge par une participation à la surveillance, sous forme d'une assistance sur le terrain à la Maîtrise d'oeuvre (cf. § 2,3 ci-dessus).

7,64. - La vérification doit elle prendre fin quand quelques réserves subsistent (soit sur l'étude elle même, soit sur des conditions supposées à vérifier sur place) ? Il n'y a pas de réponse générale à cette question, à laquelle il peut seulement être répondu que la mission de l'organisme extérieur peut être terminée quand l'Arrondissement maître d'oeuvre peut prendre le relai de l'organisme vérificateur.

7,65. - Il peut être utile, ainsi qu'il est prescrit en Allemagne de conclure la vérification par un rapport final. Cela a l'avantage de laisser une situation nette évitant des erreurs par suite de malentendu : d'une part lorsque l'Arrondissement prend vis-à-vis de l'entrepreneur le relai de l'organisme vérificateur, mais aussi par la suite pour l'usage du dossier d'ouvrage. Cela constitue en outre une garantie en ceci que cela interdit au vérificateur de se borner à survoler superficiellement l'étude. Toutefois cette obligation peut être difficile à respecter quand on doit vérifier l'étude de façon échelonnée.

8. - CAS NON CONSIDERES DANS LES CHAPITRES PRECEDENTS.

8,1. - OUVRAGES PROVISOIRES.

8,10. - Généralités : La vérification pour ces ouvrages ne relève pas de méthodes fondamentalement différentes des méthodes de vérification pour les ponts spéciaux. Mais ces ouvrages relèvent de techniques spécifiques, leurs études d'exécution ne sont pas précédées de projets, et les objectifs de la vérification sont eux aussi assez spécifiques.

8,11. - Rôle de la maîtrise d'oeuvre : Tout d'abord la distinction n'est pas toujours nette entre :

- ouvrages provisoires (échafaudages porteurs, batardeaux, etc...) et certains matériels déplaçables de l'entrepreneur (par exemple poutres de manutention),

- ouvrages provisoires et situation provisoire des ouvrages définitifs (il peut y avoir interaction).

Sur le rôle de la maîtrise d'oeuvre vis-à-vis des ouvrages provisoires, la D.I.G. n'apporte pas les clartés nécessaires. On y lit en effet :

- p. 149 (alinéa b) : "Les plans d'exécution des ouvrages provisoires n'ont à être ni visés ni approuvés ; toutefois, pour certaines ouvrages provisoires importants le C.C.A.P. peut prévoir leur visa ..."

- p. 151 : "Si c'est à l'entrepreneur de s'organiser ... le Maître d'oeuvre ne doit pas pour autant rester passif lorsqu'un entrepreneur ne prend pas, en temps voulu les initiatives nécessaires à l'accomplissement de ses obligations, notamment celles concernant la sécurité ou l'hygiène" (celles-ci devant, dans l'esprit des rédacteurs de ces textes, concerner le personnel de l'entreprise).

- p. 152 : "Le contrôle est indispensable" ... celui-ci s'applique ..." aux matériaux, produits et composants de construction ... que ceux-ci soient destinés à être incorporés dans les ouvrages définitifs ou qu'ils soient nécessaires pour des ouvrages provisoires (échafaudages, étais, coffrages, palplanches etc...".

En fait il paraît probable que dans cette situation, des instructions seront données par l'Administration supérieure de l'Equipement sur la conduite à tenir, et que pour ce qui concerne la vérification des études correspondantes, ces instructions seront en gros les suivantes :

- pour les ouvrages provisoires d'importance réduite (la plupart de ceux qui n'ont qu'un rôle de moyen d'accès ou de circulation du personnel, les blindages de fouilles les plus courants, les batardeaux en terre, les coffrages) : pas d'intervention de la maîtrise d'oeuvre dans les études,

- pour les autres ouvrages provisoires, soit par référence à leur nature (notamment échafaudages porteurs, batardeaux), soit par référence à leur situation (ouvrages dont la défaillance menacerait de façon grave et manifeste une circulation publique) : visa des études d'exécution par la maîtrise d'oeuvre, ou par un vérificateur extérieur à la maîtrise d'oeuvre, devant intervenir dans des conditions qui restent à préciser.

Ces instructions laisseront vraisemblablement une certaine liberté aux services dans les domaines marginaux. Dans ces conditions, en cas de recours à un vérificateur dans le cadre de la maîtrise d'oeuvre, il va de soi que ce sera au chef d'arrondissement qu'il appartiendra de définir au vérificateur quels sont les ouvrages provisoires à vérifier.

8,12. - Objectifs des vérifications : Les aspects spécifiques des objectifs de la vérification peuvent être résumés comme suit :

- les aspects principaux sont la sécurité vis-à-vis de la ruïne, et la qualité à l'égard de l'ouvrage définitif (pas de déformations excessives ou incontrôlées, pas d'introduction de contraintes parasites notables, pas de trous superflus ...),

- un aspect d'une certaine importance est la faisabilité de certaines opérations (par exemple possibilité de réglage, de décintrement, d'enfoncement des palplanches, de mise en place de cadres de batardeaux sans risque de blocage, etc ...);

- par contre la pérennité et l'esthétique de l'ouvrage provisoire lui-même sont généralement d'importance faible ou négligeable;

- enfin l'objectif relatif au coût se limitera généralement au respect du marché, sous réserve de la compatibilité avec les objectifs de sécurité et de qualité.

8,13. - Manière de vérifier : En ce qui concerne la manière de mener les vérifications, les chapitres 6 et 7 restent dans l'ensemble variables. Nous insistons seulement sur certains points particuliers.

Pour les échafaudages porteurs, qui sont les ouvrages provisoires importants les plus fréquemment utilisés, l'article 312 du C.P.S.T. de 1969 (mise à jour n° 3) définit de façon détaillée, en l'absence de texte officiel d'ordre général, les conditions auxquelles doit satisfaire l'étude. Il importe de s'y référer.

De façon plus générale, une première difficulté fréquente proviendra de la tendance de beaucoup d'entreprises à remettre des études d'exécution insuffisantes. Se reporter à ce sujet aux § 6,4 et 6,5.

Un sujet de vérification souvent délicat est constitué par la détermination des actions permanentes et variables, voire accidentelles, et des données relatives au site (topographie, données géotechniques), à introduire dans les calculs.

Les sollicitations ne seront souvent pas déterminables avec précision, du fait que l'exécution elle-même ne pourra pas être très précise. Lorsqu'il s'agira de structures hyperstatiques (par exemple appui de palplanches sur plusieurs cadres) cette imprécision ne sera généralement susceptible que de conséquences limitées, sous réserve de ductilité suffisante et de l'absence de risque de flambement. Mais il en ira tout autrement en cas de pièces isostatiques et grêles (excentrement inévitable des charges appliquées dans des fourches de support de coffrages). Enfin certaines pièces hyperstatiques de constitution complexe (triangulées et à noeuds souvent excentrés) sont inaccessibles au calcul et ne peuvent relever que d'une justification par l'expérimentation.

Enfin une autre difficulté fréquente concernera la vérification des résistances :

- du fait de l'emploi de matériaux de nuance et de qualité (soudures) mal connues, voire indéterminées de même que leur origine,

- du fait de l'usage de produits de réemploi qui auront pu être faussés et qui s'ils sont redressés, resteront de résistance réduite,

- faute d'essais suffisants pour connaître la résistance d'éléments préfabriqués justifiables par l'expérimentation et surtout la dispersion (souvent importante) de cette résistance.

Aussi une part relativement importante des soins du vérificateur devra s'employer à vérifier les données de base et la validité générale de l'étude.

Nous ajoutons que l'article 312 du C.P.S.T. (avec ses commentaires), de même que le chapitre 11 du Guide de chantier G.M.O. 70, contient de nombreuses indications techniques en vue du bon raccordement des études aux activités du chantier.

8.2. - OUVRAGES TYPES (OU ELEMENTS-TYPES) DU S.E.T.R.A.

8.20. - Généralités : Ce cas est évidemment le plus simple, mais il n'est pas toujours net, loin de là.

Tout d'abord, comme nous l'avons montré dans l'article que nous avons publié sur ce sujet dans le Bulletin du P.C.M. de Septembre 1976, il n'existe à la base que des éléments-types, de sorte que certains ponts peuvent contenir des éléments-types et d'autres éléments non types. De plus le degré de typification est inégal selon les dossiers-pilotes.

D'autre part il n'y a pas toujours simultanéité entre élément type et note de calcul automatique (et éventuellement dessin automatique).

Par conséquent le cas Ouvrages types correspond à une situation idéale qui, selon les ouvrages, sera réalisée entièrement ou partiellement.

Retenons, pour ce qui concerne la vérification des études, que les éléments-types font généralement l'objet d'une note de calcul automatique selon programme du S.E.T.R.A. ou, à défaut (ou en complément), d'une méthode de calcul adoptée et présentée par le S.E.T.R.A.

8.21. - Rôles de la maîtrise d'oeuvre et du S.E.T.R.A. : De façon générale il doit être considéré que le S.E.T.R.A. en fournissant des règles et des notes de calcul assure une participation aux études de l'Administration. Cette participation décharge la D.D.E. (et non l'entrepreneur) des missions que sans cela elle aurait dû assumer, mais ne la décharge pas de ses missions qui sont à remplir à l'amont et à l'aval de la prestation du S.E.T.R.A. Il est utile de préciser ces missions dans le cas de fourniture par le S.E.T.R.A. d'une note de calcul automatique. Ces précisions sont essentiellement un rappel général des indications à ce sujet du Catalogue CAT. 75 (chap. 9) et des dossiers-pilotes.

A l'amont, outre le rôle de la maîtrise d'oeuvre en matière de conception générale, celle-ci assure la responsabilité du bordereau des données de la commande du calcul, si c'est elle qui passe la commande.

A l'aval, les tâches à assurer en matière de calculs en complément de celle du S.E.T.R.A. sont plus importantes.

Elles consistent :

a - dans tous les cas, à vérifier le bordereau des données reproduit par la note de calcul, afin de s'assurer que ces données sont correctes et notamment qu'aucune erreur de transcription n'a été commise.

b - dans tous les cas également, à examiner si des messages d'avertissement figurent en certains points dans la note de calcul (en début ou, plus souvent, en bas de page).

c - dans tous les cas aussi, à procéder aux opérations définies, selon le programme concerné, dans le sous-dossier "Calcul automatique" du dossier-pilote correspondant.

d - et enfin, s'il y a lieu, à procéder à tous compléments, reprises et ajustements qui peuvent être nécessaires du fait de particularités de l'ouvrage non prises en compte par le programme.

En principe ces quatre opérations peuvent être réparties de diverses manières entre maîtrise d'oeuvre et entreprise, de même que l'établissement des dessins d'exécution. Mais ce qui est fait par l'un doit être vérifié par l'autre, et nous recommandons particulièrement que dans tous les cas les tâches a et b qui ne sont que des vérifications, mais d'une particulière importance, soient effectuées par l'un et par l'autre. Ceci définit les tâches du vérificateur attaché à la maîtrise d'oeuvre; en ce qui concerne la vérification matérielle des calculs du S.E.T.R.A., elle incombe en principe à l'entrepreneur.

8,22. - Objectifs de la vérification et manière de vérifier : Il y a peu à dire à ce sujet, car il s'agit d'opérations particulièrement simples :

- en ce qui concerne les objectifs, il s'agira essentiellement de s'assurer de la conformité avec les stipulations du marché et les indications du dossier-pilote,

- en ce qui concerne la manière de vérifier côté maîtrise d'oeuvre, la première phase sera très brève et au total le principal consistera :

. d'une part à s'assurer de la validité des hypothèses de base des calculs automatiques, eu égard aux particularités de l'ouvrage; cela peut nécessiter quelques calculs parallèles basés sur des hypothèses différentes,

. d'autre part à procéder par la méthode directe à la vérification des calculs complémentaires de l'entrepreneur.

En ce qui concerne les vérifications côté entreprises, se reporter au § 8,6 et notamment en 8,64.

8,23. - Emploi éventuel de programmes de calcul autres que ceux du S.E.T.R.A. : Nous rappelons qu'il est inopportun d'admettre sans nécessité l'usage de programmes de calcul autres que ceux du S.E.T.R.A. (voir le § 3.4.2.4 de la D.J 75, reproduit en annexe F, et notamment ses deux derniers alinéas). De tels usages, qui ont été admis dans certains cas à l'occasion de variantes qui restaient en fait dans le cadre des dossiers-pilotes, ont le plus souvent conduit à des calculs incompréhensibles et/ou incomplets, à des sous-dimensionnements, et parfois à des dommages. On pourrait certes procéder à leur vérification par calculs parallèles au moyen du programme du S.E.T.R.A., mais c'est un non-sens que d'employer pour un tel usage le programme le plus performant. Il va de soi qu'autoriser sans nécessité en cours d'exécution le recours à des programmes incompréhensibles, insuffisants ou suspects serait en opposition complète avec les présentes Recommandations.

Ces recommandations, toutefois, ne sont pas à étendre sans réserve à certains cas limites (ponts-types comportant certaines particularités); en de tels cas l'usage de programmes de calcul autres que ceux du S.E.T.R.A. peut être admis s'ils sont plus performants à l'égard de ces particularités, et le programme du S.E.T.R.A. peut fournir un moyen de calcul parallèle d'excellente qualité.

8,3. - OUVRAGES TYPES AUTRES QUE CEUX DU S.E.T.R.A.

Il s'agit de solutions-types étudiées par des fabricants, des entreprises, le B.C.E.O.M., la S.N.C.F. On peut citer par exemple des buses métalliques, des voûtes minces armées, des ouvrages en terre armée, des tabliers à poutrelles enrobées.

Ce cas s'apparente alors plutôt à celui des ouvrages spéciaux, dans la mesure où il n'existe pas de véritable dossier-pilote (comment considérer par exemple les catalogues des fabricants de buses métalliques ?). La principale différence est que dans la plupart des cas il sera possible d'obtenir du S.E.T.R.A. des informations utiles, d'abord au stade du choix et ensuite en vue de la vérification. D'autre part le fabricant ou l'entreprise peut justifier de précédents et d'expérience; mais il apparaît qu'il est souvent tenté de réduire les sécurités et d'abrèger les justifications, et que c'est parfois à tort.

8,4. - ETUDES POUR LA MODIFICATION OU LA RECONSTRUCTION D'OUVRAGES EXISTANTS.

Dans la mesure où l'ancien ouvrage intervient dans l'étude (ce n'est souvent que dans certaines parties de l'étude), ce cas est analogue au cas des ponts spéciaux. Les degrés de complexité sont très variables. Certains cas, par exemple certains cas d'élargissement, s'apparentent aux cas les plus spéciaux des ponts spéciaux.

Du point de vue du vérificateur une difficulté fréquente est que les problèmes de conception ont souvent été mal maîtrisés à l'amont de son intervention.

Une autre particularité, qui est systématique, est la nécessité de connaître l'ancien ouvrage lorsqu'il doit être pris en compte.

Ces particularités font que la séparation des tâches de vérification des autres tâches de la maîtrise d'oeuvre est pour de tels travaux particulièrement délicate et souvent même malaisée. Il est capital et de la responsabilité des ingénieurs de la D.D.E. de faire en sorte que le vérificateur dispose de toutes les informations utiles soit préexistantes (ressortant du dossier d'ouvrage), soit résultant des constatations faites à mesure de l'avancement des travaux.

Il importe que le vérificateur prenne l'initiative de poser des questions et formuler des hypothèses sur l'état des parties d'ouvrage à réutiliser; néanmoins on peut difficilement escompter que son intervention suffira à dégager la D.D.E. des conséquences directes :

- d'un mauvais état, parfois à peu près non décelable de ces parties d'ouvrage,
- des insuffisances, de l'inexactitude, voire de l'absence de dossier d'ouvrage.

8,5. - ETUDES POUR L'ADMISSION DE CONVOIS EXCEPTIONNELS SUR LES PONTS EXISTANTS.

Il ne s'agit pas à proprement parler d'études d'exécution; et bien entendu les objectifs de la vérification sont très spécifiques, puisqu'en principe l'ouvrage ne peut plus être modifié. Il n'y a pas d'entrepreneur, mais un demandeur d'autorisation; ni de Maître d'oeuvre, mais un gardien de l'ouvrage.

Ce cas est évoqué ici uniquement du fait qu'il peut être recouru à un vérificateur pour autoriser ou non cette admission. Mais il résulte de ce qui précède que les conditions dans lesquelles s'exerce la vérification sont tout-à-fait particulières.

Il présente avec le cas envisagé en 8,4 certaines analogies du fait de l'importance de l'état de l'ouvrage et de la connaissance de cet état, pour la décision à intervenir.

On peut dans une certaine mesure rattacher à ce cas le problème de l'admission d'engins lourds de terrassements sur les ouvrages.

Ces deux catégories de problèmes ont en particulier en commun l'importance particulière des charges qu'il s'agit d'admettre, et les risques qui peuvent en résulter pour la sécurité et le bon état des ouvrages. Bien entendu ils ont des aspects techniques spécifiques.

Nous signalons l'existence, pour leur étude, d'une méthodologie comportant divers textes officiels et divers documents-types (voir le Catalogue, le dossier SURCH, les documents CLE et DELTA); cette méthodologie est en évolution.

8,6. - LA VERIFICATION INVERSEE :

8,61. - Définition :

En ce cas l'Administration établit elle-même tout ou partie de l'étude d'exécution et la remet à l'entreprise. Il appartient alors à celle-ci de procéder à la vérification définie par l'article 29.2 du CCAG; d'où le nom de vérification inversée.

8,62. - Modalités de détail :

Il est bien clair que la prestation de l'Administration doit être établie après la dévolution des travaux lorsque l'étude d'exécution doit dépendre, soit d'une proposition technique de l'entrepreneur, soit de moyens d'exécution non contractualisés. Dans le premier de ces deux cas (par exemple étude comportant l'emploi d'un système de précontrainte) il peut n'y avoir pas de difficulté particulière à procéder ainsi; il n'en va généralement pas de même dans le deuxième cas.

La prestation de l'Administration peut par contre être établie avant l'appel d'offres pour les ouvrages définitifs simples en béton armé.

Une telle prestation de l'Administration est couramment assurée pour les calculs automatiques d'ouvrages types par le S.E.T.R.A.; se reporter en ce cas au § 8,2 .

On a jadis souvent été bien au delà en établissant non seulement des dessins d'exécution des ferrailages, mais même, d'après l'ancien Cahier des charges général, des échafaudages. Pour cette dernière partie des études cette méthode est maintenant entièrement abandonnée.

Des modalités intermédiaires ont aussi été pratiquées. Elles consistent à fournir, à l'aval de la note de calcul du S.E.T.R.A., des dessins illustrant celle-ci et qui sont soit établis par ordinateur (dessins automatiques du S.E.T.R.A.), soit plus rarement établis à la main, et en ce cas sont généralement des plans types non à l'échelle. L'entreprise n'est pas pour autant dispensée d'établir des dessins d'exécution.

8,63. - Avantages et inconvénients :

Ne considérant que les principes, on pourrait a priori penser que dans cette situation il y a un simple décalage de frontière entre les activités de l'Administration et de l'entreprise, et qu'il n'en résulte pas de problème particulier, le cas entrant dans le cadre du CCAG dont il résulte que ce que fait l'une est vérifié par l'autre et réciproquement. Dans la réalité il en va tout autrement.

8,631. - Un premier avantage qu'on a pu trouver à cette façon de faire est l'avantage qu'on peut escompter d'une méthode très directive, essentiellement lorsque pour une raison ou une autre on préfère ne pas laisser d'initiative à l'entreprise. Cette situation qui se justifie lorsque l'Administration possède un programme de calcul très sûr et très répandu, ne peut être considérée comme très normale lorsqu'elle porte sur l'établissement manuel des dessins. Quant à l'établissement automatique de dessins, dans la situation présente on peut en dire ceci : il pourrait en principe présenter les mêmes avantages que celui de l'établissement automatique des calculs; mais dans l'immédiat il semble plutôt devoir être utilisé pour la vérification des dessins de l'entreprise par comparaison directe, que par l'entreprise pour leur établissement; cette situation pourra évoluer et dépendre de l'ouvrage à étudier (type et particularités).

Un autre avantage est de familiariser les ingénieurs de l'Administration avec les réalités des études d'exécution : la qualité de leurs conceptions dans les études futures ne pourra qu'y gagner.

Enfin cela permet de prendre de l'avance dans les études d'exécution.

8,632. - L'inconvénient majeur est que, si on pousse trop loin cette façon de faire, il ne reste plus à l'entreprise à effectuer elle-même que des tâches mineures en matière d'études, et des vérifications. Compte tenu qu'il est fort difficile de s'assurer du degré des vérifications qu'effectuent réellement les entreprises, il apparaît qu'en un tel cas l'entreprise serait fortement incitée à faire l'économie d'un bureau d'études, ou à n'affecter à ces tâches que du personnel de dernier ordre; de toute manière on ne peut compter voir affecter de très bons ingénieurs, côté entreprise, à un tel travail; et ce n'est pas l'apposition d'une signature côté entreprise sur l'étude d'exécution qui changera le fond des choses. Or la suppression de la vérification ou sa médiocrité porterait une atteinte directe à la sécurité, à moins que cette atteinte soit compensée en tout ou en partie par la qualité très sûre de l'étude de l'Administration.

Il risque bien moins d'en aller de même lorsqu'il reste à l'entreprise à accomplir une tâche non négligeable à l'aval des études de l'Administration; constater la manière dont elle l'accomplit constitue d'ailleurs de la part de l'Administration un contrôle de l'intervention soignée d'ingénieurs compétents, côté entreprise, dans l'opération.

8,633. - C'est pourquoi en général nous déconseillons une telle façon de faire poussée jusqu'au point de ne laisser à l'entreprise presque aucune initiative dans les études. Des exceptions sont évidemment possibles dans des cas d'espèce, en particulier selon l'étude particulière et quand on sait à qui on aura affaire; en la matière, tout est d'ailleurs question de mesure.

A cette occasion nous appelons d'autre part l'attention sur le fait que dans de nombreux cas il reste des compléments, voire des retouches, à apporter aux calculs automatiques du S.E.T.R.A. : programmes en rodage, ouvrages présentant des particularités ... Voir à ce sujet les premiers paragraphes du chapitre 9 du CAT 75.

8,64 - Méthodes auxquelles les entreprises peuvent recourir pour vérifier les études de l'Administration :

Ce sont les mêmes que celles qui sont décrites au chapitre 7 ci-dessus. Quelques précisions sont cependant à y ajouter.

Tout d'abord, au cas (que nous déconseillons) où il serait remis à une entreprise une note de calcul automatique du S.E.T.P.A. établie à partir d'un programme "non homologué" (§ 9,11 du CAT. 75), la vérification devra être très complète.

D'autre part, dans le cas très fréquent où la note de calcul à vérifier est une note de calcul de pont-type, une opération préalable essentielle consiste à s'assurer si l'ouvrage dont il s'agit est à tous égards un pont type sans aucune particularité.

On se reportera ensuite au paragraphe 8,2 ci-dessus.

En ce qui concerne la vérification de la matérialité des calculs par le programme, le minimum dont on peut se contenter dans les seuls cas les plus simples, consiste à procéder à des sondages dans les résultats, par comparaison avec les règles de prédimensionnement contenues dans le dossier-pilote correspondant. Des vérifications par comparaison avec un précédent assez semblable sont aussi fréquemment possibles (cf. § 7,222 ci-dessus).

Dans le cas où la note de calcul à vérifier est une note automatique dont certaines données sont le résultat d'un calcul préliminaire (cas fréquent surtout pour le calcul de ponts spéciaux), on devra vérifier ce calcul préliminaire, non seulement du point de vue matériel, mais aussi et surtout en ce qui concerne la validité de ses bases (par exemple réalisme de l'épaisseur initiale ou finale de revêtement correspondant au poids de superstructures figurant en données) ; il sera même bon de chercher à se rendre compte de la sensibilité des résultats intermédiaires et finaux à l'égard d'un changement des hypothèses de base. Cet examen critique devra être étendu aux hypothèses de base incluses explicitement ou implicitement dans les données et, plus généralement dans le calcul : actions et cas de charge pris en compte, par exemple.

Enfin, dans le cas particulier où la note de calcul à vérifier a été établie selon M.R.B., il y a lieu de se reporter à l'Annexe G, dans l'attente de la publication d'un complément au dossier-pilote. Le caractère spécial d'un tablier ainsi calculé peut être très inégal d'un ouvrage à un autre.

8,7. - LA VERIFICATION DE 2^{ème} LECTURE :

Nous évoquons, pour terminer, l'éventualité d'une vérification fragmentaire qui a été assez souvent envisagée, mais n'a jamais encore pu être définie avec précision. Cette idée a été motivée par le désir de trouver, en sus d'un processus normal et complet de vérification, une garantie supplémentaire à l'égard des seuls défauts très graves :

- vérification superficielle ayant pour but la recherche d'erreurs évidentes subsistantes (conduisant essentiellement à des fautes sur des ordres de grandeur),

- vérification plus approfondie dans un domaine limité (tenant le reste pour bon).

La première nature de vérification fragmentaire se heurte à la difficulté qu'il est impossible qu'elle constitue une garantie, car la ruine peut résulter d'erreurs de détail, et déceler les défauts d'ordre de grandeur est particulièrement difficile en cas d'emploi du béton précontraint; et on peut s'imaginer les cas de conscience auxquels on exposerait un vérificateur chargé d'une mission qu'il peut à bon droit considérer comme risquée sinon même impossible (même si on parvient à y associer officiellement une définition d'une responsabilité de 3ème rang). De plus on peut craindre que l'existence de ce contrôle supplémentaire conduise les autres échelons à relâcher leur vigilance.

La seconde nature de vérification fragmentaire est par contre couramment pratiquée par les Ingénieurs de la D.O.A.-B gestionnaires des programmes de calculs automatiques, au vu des seuls bordereaux des données de commande des calculs. L'expérience prouve que de telles vérifications ne sont pas inutiles; la définition de la tâche du gestionnaire, qui ne voit en principe que le bordereau des données, ne laisse par ailleurs pas de doute sur le caractère limité de ses vérifications. Et il est bien précisé que cette tâche reste en principe inchangée (sauf convention explicite particulière) quand tel ou tel plan est joint à titre explicatif au bordereau de données.

ANNEXE A

ANALYSE DES DIVERSES SORTES
DE RESPONSABILITES

(cf. § 2,2)

La présente Annexe a pour objet, comme annoncé au paragraphe 2,2 du présent document-type, de faire le point de la situation présente compte tenu notamment des avis recueillis lors des enquêtes qui ont précédé l'établissement du document.* Au préalable nous devons rappeler que malgré les progrès réalisés ces dernières années, il subsiste en la matière un certain flou qui a son origine dans diverses lacunes ou ambiguïtés des textes officiels.

A1 - Les diverses natures de responsabilités et leurs fondements.

Comme l'établissent les rapports du groupe Rôles et Responsabilités et du Cycle d'études, les responsabilités sont de diverses natures :

- civile (légale et/ou contractuelle),
- administrative,
- pénale.

Leur étendue et leur répartition entre Maître d'oeuvre et Entrepreneur sont différentes selon cette nature. Quand à la responsabilité spécifique du vérificateur des études d'exécution, elle sera évoquée aux § A 1,5 et A 2,4.

A 1,1. - Responsabilité civile :

Pour des constructions publiques, ainsi que l'a exposé M. PRADE, cette responsabilité est essentiellement définie par les articles 29 et 35 du nouveau CCAG (et par les articles du Code Civil relatifs à la responsabilité décennale). Nous reproduisons ci-après l'analyse fournie par M. PRADE et qui commence par une citation du CCAG :

"ARTICLE 29 (Plans d'exécution, notes de calcul, études de détail) :

...

" 29.13 - Les plans, notes de calculs, études de détail et autres documents établis par les soins ou à la diligence de l'entrepreneur sont soumis à l'approbation du maître d'oeuvre, celui-ci pouvant demander également la présentation des avant-métrés.

" Toutefois, si le C.C.A.P. le prévoit, tout ou partie des documents énumérés ci-dessus ne sont soumis qu'au visa du maître d'oeuvre.

" 29.14 - L'entrepreneur ne peut commencer l'exécution d'un ouvrage qu'après avoir reçu l'approbation ou le visa du maître d'oeuvre sur les documents nécessaires à cette exécution.

" Ces documents sont fournis en trois exemplaires, dont un sur calque, sauf stipulation différente du C.C.T.G. ou du C.C.A.P.

* Nous ne traiterons cependant pas ici les problèmes, évoqués au cours de ces enquêtes, des conséquences qu'un manque de compétence ou alourdissement des responsabilités peuvent avoir sur le coût des ouvrages, qui est en définitive supporté par la nation.

" 29.2 - (Documents fournis par le maître d'oeuvre) :

" Si le marché prévoit que le maître d'oeuvre fournit à l'entrepreneur des documents nécessaires à la réalisation des ouvrages, la responsabilité de l'entrepreneur n'est pas engagée sur la teneur de ces documents. Toutefois, l'entrepreneur a l'obligation de vérifier, avant toute exécution, que ces documents ne contiennent pas d'erreurs, omissions ou contradictions qui sont normalement décelables par un homme de l'art; s'il relève des erreurs, omissions, ou contradictions, il doit les signaler immédiatement au maître d'oeuvre par écrit.*

"ARTICLE 35 (Dommages divers causés par la conduite des travaux ou les modalités de leur exécution) :

" L'entrepreneur a, à l'égard du maître de l'ouvrage, la responsabilité pécuniaire des dommages aux personnes et aux biens causés par la conduite des travaux ou les modalités de leur exécution, sauf s'il établit que cette conduite ou ces modalités résultent nécessairement de stipulation du marché ou de prescriptions d'ordre de service, ou sauf si le maître de l'ouvrage, poursuivi par le tiers victime de tels dommages, a été condamné sans avoir appelé l'entrepreneur en garantie devant la juridiction saisie.

" Les stipulations de l'alinéa précédent ne font pas obstacle à l'application des dispositions de l'article 34." (fin de citation du C.C.A.G.).

A cette citation du C.C.A.G., M. PRADE ajoute ceci :

" L'article 35 indique clairement la limite de la responsabilité de l'entrepreneur telle qu'elle est organisée par l'article 29.

" En définitive, l'entrepreneur a, à l'égard du maître de l'ouvrage, la responsabilité pécuniaire des dommages aux personnes et aux biens causés par la conduite des travaux ou les modalités de leur exécution, sauf s'il établit que cette conduite et ces modalités résultent nécessairement de stipulations du marché ou de prescriptions d'ordre de service, ou sauf si le maître de l'ouvrage, poursuivi par le tiers victime de tels dommages a été condamné sans avoir appelé l'entrepreneur en garantie avant la juridiction saisie. En application de ces stipulations, l'Administration devra donc parfois supporter la charge définitive de la responsabilité; elle restera responsable notamment quand un ordre de service apparaîtra comme étant la cause exclusive et directe du dommage, alors même que, ce faisant, l'auteur de l'ordre de service n'aura pas nécessairement commis à proprement parler de faute.

" Bien plus, en supposant que les pièces du marché aient inclus des clauses d'irresponsabilité au profit du maître de l'ouvrage, l'Administration ne pourra pas toujours se retourner contre son partenaire pour se faire couvrir par celui-ci des condamnations prononcées contre elle; en effet, si le dommage se révèle imputable à une faute lourde du maître de l'ouvrage, le juge administratif refusera de faire application de cette clause (CE. 3. Juin 1960 - Ministre de la défense nationale - R. 391)."

A 1,2 - Responsabilité administrative :

Les sanctions de cette responsabilité sont bien connues :

* Nota (S.E.T.R.A.) : il nous semble que ceci peut être considéré comme la base d'une définition d'une responsabilité de 2ème rang (cf. § 2,2). Il reste cependant à approfondir le mot "normalement" qui est venu remplacer le mot "facilement" utilisé précédemment, et conservé par le groupe Rôles et Responsabilités du C.G.P.C. dans certaines de ses propositions ; en particulier, doit il être compris comme signifiant "par des moyens habituels", ou de façon plus exigeante pour des structures plus spéciales que d'ordinaire ? Par ailleurs, quelles conséquences sont à tirer de la dissymétrie de rédaction des articles 29.1 et 29.2 du C.C.A.G. ?

- pour un agent de l'Etat participant à la maîtrise d'oeuvre, les sanctions prévues au statut de la Fonction publique (avertissement, blâme, mutation d'office, suspension, mise à la retraite, révocation),

- pour l'Entrepreneur (ou un B.E.T.), l'exclusion temporaire ou définitive des marchés de l'Etat.

Par contre les critères de mises en jeu de cette responsabilité ne sont pas définis par les textes. On sait cependant qu'il s'agit de faute ou d'incapacité à remplir ses missions. Ceci est relativement subjectif; mais il n'apparaît pas que ces sanctions soient jamais maniées à la légère.

A 1,3. - Responsabilité pénale :

Cette responsabilité se fonde sur les articles 319 et 320 du Code Pénal*, que nous reproduisons ci-après.

"Article 319. (Décret-loi 30 Octobre 1935). Quiconque, par maladresse, imprudence, inattention, négligence ou inobservation des règlements aura commis involontairement un homicide, ou en aura été involontairement la cause sera puni d'un emprisonnement de trois mois à deux ans et d'une amende (L. n° 56-1327 du 29 Décembre 1956). "de 1.000 F à 20.000 F".

"Article 320. (Ord. n° 45-2241 du 4 Octobre 1945). S'il est résulté du défaut d'adresse ou de précaution des blessures, coups ou maladies entraînant une (Ord. n° 60.529 du 4 Juin 1960) "incapacité totale de travail personnel" pendant plus de (Ord. n° 58-1297 du 23 Décembre 1958) "trois mois", le coupable sera puni d'un emprisonnement de quinze jours à un an et d'une amende (L. n° 56-1327 du 29 Décembre 1956)"de 500 F à 15.000 F" ou de l'une de ces deux peines seulement."

Selon ces articles, elle n'est donc mise en cause devant le tribunal correctionnel qu'en cas de décès ou de blessures graves (incapacité de travail d'une durée supérieure à 90 jours). Dans le cas contraire, elle relève du tribunal de simple police.

On remarquera que selon ces mêmes articles, les critères de cette responsabilité sont "la maladresse, l'imprudence, l'inattention, la négligence ou l'inobservation des règlements".

Ces critères sont actuellement fortement critiqués en ceci qu'ils sont moralement très différents et largement subjectifs.

Cette subjectivité explique que les clauses contractuelles relatives à la responsabilité ne s'imposent pas au juge pénal.** Nous reproduisons ci-après l'analyse fournie par M. PRADE (et qui est tout-à-fait conforme à ce qu'a retenu le groupe Rôles et Responsabilités).

* Le groupe Rôles et Responsabilités a relevé aussi le Code du Travail (cf. les articles 173 et 59 de son livre II); mais la responsabilité correspondante ne semble présentement (cf. nouveau C.C.A.G. et nouvelle D.I.G.) incomber qu'à l'entrepreneur.

** Il est à remarquer en outre que certains jugements n'ont nullement cherché à établir s'il y avait lien direct ou non entre les fautes retenues et l'accident.

" Si l'on se base sur la jurisprudence récente en la matière, il semble que les agents de l'Administration sont susceptibles d'être poursuivis en fonction :

- d'une part, du rôle effectif joué par tel ou tel agent dans la genèse de l'accident,

- d'autre part, du rôle qui en droit devait être le sien, en fonction de la place qu'il occupait dans la structure hiérarchique de l'Administration, des pouvoirs de décision qui lui avaient été dévolus et des moyens matériels et financiers qu'il pouvait mettre en oeuvre pour assumer sa tâche.

" Il est probable que la combinaison de ces deux préoccupations conduira habituellement à poursuivre l'agent qui aura, en vertu des textes (relatifs à l'organisation interne du service, aux mesures de déconcentration, aux délégations de pouvoirs et de signature) ou des ordres de ses supérieurs, la direction et la surveillance des travaux d'un chantier déterminé; si d'aventure, cet agent ne peut légitimement être présent constamment sur place, la responsabilité pourra, selon les circonstances, ou bien ne plus lui incomber et retomber alors sur l'agent chargé sur place de le représenter en permanence, ou bien incomber simultanément à l'un ou l'autre. Il est vraisemblable que, sauf en cas d'initiatives intempestives et individualisables, les agents d'exécution placés au dernier rang de la hiérarchie ne courent pas grand risque de voir leur responsabilité pénale engagée sur la base des articles 319 et 320, sauf pour ceux d'entre eux qui conduisent ou font manoeuvrer des engins de travaux publics. Ces derniers devront, en effet, répondre de leur maladresse, de leur imprudence, etc ..., soit pour infraction au Code de la Route, soit pour infraction aux articles 319 ou 320.

" Même si la jurisprudence évolue sensiblement, il est vraisemblable que les agents occupant un rang élevé dans la hiérarchie administrative continueront d'être moins exposés aux poursuites pénales, pour la simple raison que la plupart des accidents susceptibles en raison de leurs conséquences de mettre en mouvement l'action publique, surviennent sur les lieux d'exécution des travaux pendant la durée d'ouverture du chantier et ne peuvent manifestement, en raison de la nature des faits fautifs, être imputés qu'à un échelon très proche du chantier.

" Cependant, quand l'action résulte par exemple de l'effondrement d'un pont, ou de l'effondrement de la voûte d'un tunnel, et que la cause de l'effondrement réside dans un vice de conception de l'ouvrage ou d'un défaut de surveillance de son état ou d'une insuffisance d'entretien, il est très probable que des sanctions pénales atteindront les principaux chefs de service concernés par la conception du projet, la surveillance de l'état de l'ouvrage, l'entretien de celui-ci et même, peut-être, par le financement des travaux de réparation. Il est vrai que la complexité des structures administratives et le cloisonnement des services, notamment des services techniques et des services financiers, risquent de compliquer singulièrement la tâche des juridictions répressives et de les inciter, par conséquent, à la prudence. Il y a d'ailleurs fort à parier que la Cour de Cassation saura mettre en frein aux hardiesses des juridictions inférieures.

(" L'examen sommaire des problèmes que soulève la mise en jeu de la responsabilité pénale des fonctionnaires et agents publics montre surtout l'intérêt qui s'attache à ce que l'ensemble des règles qui se rapportent à l'organisation interne du service, à la dévolution des pouvoirs au sein de la hiérarchie administrative et à la mise à la disposition de moyens matériels et financiers indispensables à l'exercice des pouvoirs ainsi conférés, soient énoncées de façon claire, détaillée et précise."

C'est apparemment pour cette raison, aussi bien que pour promouvoir la sécurité, que sont intervenus les décrets des Länder d'Allemagne fédérale.

A 1,4. - Les différentes parts de responsabilité :

MM. SALZMANN dans les textes initiaux (et MOGARAY dans sa réponse à l'enquête) ont fait ressortir des ambiguïtés en matière de responsabilité :

"D'une manière évidente un entrepreneur contrôlé aussi bien dans la présentation de son dossier d'exécution que dans l'exécution des travaux ne peut plus être tenu pour entièrement responsable, quels que soient les textes qui garantissent l'impunité civile, pénale (et morale ?) du Maître d'oeuvre. Les textes reflètent les conditions d'une époque. Cette époque est révolue, il convient de changer de textes sans se faire d'illusion sur la pérennité de ceux que nous allons élaborer.

"Le problème, pour nous, ne consiste pas tellement à rechercher qui est responsable, mais d'essayer de rechercher comment nous pouvons éviter qu'il y ait motif de non-satisfaction dans les ouvrages d'art que nous construisons."

A notre avis, il ne peut y avoir séparation complète des responsabilités si on ne veut pas supprimer les doubles sécurités. Ce maintien des doubles sécurités nous paraît indispensable; citons de nouveau à ce sujet M. SALZMANN :

"Quand on voit la qualité des ingénieurs qui ont fait de grossières erreurs, nous ne pouvons pas être assez orgueilleux pour prétendre être à l'abri d'une faute d'aiguillage.

" Je fais des erreurs grossières, comme tout le monde; je ne suis peut-être pas un ingénieur de qualité. A mon avis le problème n'est pas là, il s'agit d'un problème de rapport humain. Les chefs comme les autres ont droit de se tromper, ils sont aussi capables de mal intégrer la totalité d'une situation, de commettre un oubli important, de faire une faute de raisonnement. La fatigue, la surcharge, le manque de temps, la trop grande confiance en soi peuvent diminuer les facultés d'attention. La hiérarchie dans le secteur public, le mandarinat dans le secteur privé faussent les rapports humains. Il est facile pour un subordonné de se fier (sans trop se poser de questions) à un maître à penser qui, en vérité, n'aime pas être mis en cause. Nous sommes tous dans une hiérarchie, nous sommes tous le mandarin de quelqu'un. C'est tellement plus facile pour tout le monde. Ceci dit, je constate que bien des ouvrages ayant donné lieu à des déboires ont été construits par des bureaux réputés dirigés par des ingénieurs de très haut niveau. Les déboires sont souvent dûs à des fautes de conception. Il est impensable que des erreurs de ce genre ne soient faites qu'à un niveau subalterne."

Notons cependant qu'une atténuation nécessaire à la confusion des responsabilités est apportée par la distinction des responsabilités de premier rang et de second rang. Cette distinction mise en évidence dans le rapport du Groupe Rôles et Responsabilités a son origine dans les termes employés par le C.C.A.G. "obligation de vérifier, avant toute exécution, que ces documents ne contiennent pas d'erreurs, omissions ou contradictions qui sont normalement décelables par un homme de l'art". De même les décrets allemands font une place à part aux erreurs "manifestes" (offenkundig). Mais jusqu'où doit s'étendre la responsabilité de 2ème rang* ? Il y a là présentement une indétermination qu'on retrouvera plus loin.

* Par exemple sera-t-elle invoquée seulement en cas de faute lourde ou aussi en cas de faute simple ? Qu'en sera-t-il quand les ingénieurs chargés de la maîtrise d'oeuvre (ou de la maîtrise d'ouvrage) sont en même temps les gardiens d'une voirie où s'exécutent des travaux et que des tiers y sont victimes d'accident, malgré les articles 31,41 et 35 du nouveau C.C.A.G. ?

A 1,5. - La responsabilité spécifique du vérificateur :

Les textes relatifs aux responsabilités des diverses natures n'évoquent pas les responsabilités spécifiques du vérificateur. Seule la jurisprudence relative à des constructions privées a, depuis quelque temps, retenu une responsabilité de bureaux de contrôle en dépit de textes contractuels qui l'excluaient. En fait il faut observer que comme indiqué au § 2,3 du présent document, la situation juridique de ces bureaux est nettement différente de celle du vérificateur qui, dans le cas qui nous intéresse ici, exerce une fonction faisant partie de la maîtrise d'oeuvre.

Dans le cas qui nous concerne, il semble que la responsabilité civile du vérificateur ne pourrait être recherchée qu'au "2ème degré", et que pour cela il faudrait qu'il soit appelé en garantie par le maître d'ouvrage ou le maître d'oeuvre* ; cette responsabilité civile ne peut, bien entendu, être normalement recherchée que si le vérificateur est extérieur à l'Administration. Il semble également que sa responsabilité de quelque nature que ce soit ne serait qu'une responsabilité de 2ème rang (puisque'elle découle de la responsabilité de maîtrise d'oeuvre) sauf si les documents contractuels en ont disposé autrement (approbation).

A 1,6. - Conclusion sur les diverses natures de responsabilités :

La définition contractuelle des responsabilités n'est admise par les Tribunaux que dans certaines limites, qui ne sont d'ailleurs pas les mêmes selon la nature considérée de la responsabilité.

Le juge devant apprécier librement chaque fois qu'un vide juridique existe, il sera utile que des textes officiels précisant les missions et responsabilités interviennent pour éviter des abus de jurisprudence. Selon la nature qu'on leur donnera, ces textes s'imposeront au juge ou se borneront à l'éclairer.

Dans l'attente de ces textes, il est souhaitable que les textes contractuels veillent à ne pas laisser de doute sur le rang de responsabilité. Il semble devoir être naturellement admis que la responsabilité de premier rang attachée à un document d'étude appartienne à l'auteur de ce document s'il a une compétence suffisante et possède éventuellement les informations nécessaires (cas des modifications d'ouvrages existants). Que tout au moins les documents contractuels n'introduisent pas de confusion ou d'abus à ce sujet !

Tel est le but des prescriptions de la lettre Circulaire du 15 Avril 1976 du Directeur des Routes, prescrivant systématiquement le visa des études d'exécution des entreprises, que la conception de l'ouvrage résulte ou non d'une variante de l'entreprise.

Il importe aussi (ce que nous admettons) que le Maître d'oeuvre veille à n'admettre, côté entreprises, qu'une entreprise principale et des sous-traitants (bureau d'études notamment) qui ne puissent en cas de dommage ou d'accident plaider leur incompétence en vue d'obtenir un transfert de responsabilité sur lui.

A2 - Les devoirs personnels :

A 2,1. - Il convient d'abord de préciser qu'à notre époque l'entreprise et la maîtrise d'oeuvre dépassent souvent l'activité d'un seul individu. De ce fait

* Et il va de soi que le Chef d'Arrondissement devra au moins prendre des précautions précises (cf. décrets allemands) s'il entend laisser au vérificateur la charge totale et exclusive de la vérification.

une sous-répartition des responsabilités entre individus intervient dans le cadre de l'entreprise aussi bien que dans le cadre de la maîtrise d'oeuvre.

En particulier, quand la maîtrise d'oeuvre appartient à l'Administration, elle est attachée à un service*, non à un échelon unique. Quoique le rôle du Chef d'Arrondissement y soit généralement prépondérant, ce rôle n'est jamais exclusif, et il n'y a que des avantages à ce que la répartition des rôles soit précisée dans les différentes affaires.**

A 2,2. - Dans la situation présente, les devoirs personnels en matière de sécurité attachés à la Maîtrise d'oeuvre sont peu définis sur un plan général.

La lettre-circulaire du 15 Avril 1976, après avoir prescrit le visa, ajoute :

"Les instructions données ci-dessus ne devraient avoir en aucun cas pour effet de vous amener à diminuer le contrôle des notes de calcul ou plans d'exécution établis par l'entrepreneur. Leur vérification sérieuse s'impose plus que jamais. Indépendamment de l'aspect juridique du problème, nos services ont une longue tradition de constructeurs que l'intérêt général commande de maintenir."

A 2,3. - La dernière phrase de cette lettre-circulaire est en pratique un rappel du critère de compétence, largement employé par la jurisprudence pour conférer des responsabilités.***

L'appréciation de compétence est largement subjective. Dans le cadre des enquêtes, M. BRAULT s'est cependant efforcé de la définir :

"Je crois qu'il n'existe pas de maîtrise d'oeuvre valable en dehors :

" - d'une connaissance des ordres de grandeur et d'une appréhension des points potentiellement délicats; celles-ci ne s'acquièrent que par une pratique personnelle des études;

" - d'une bonne information sur la technologie. Il faut pour cela une expérience abondante, émaillée le cas échéant de quelques déboires".

On remarquera que la compétence ainsi définie se trouve attachée plutôt à la spécialisation qu'à la simple qualification; ce qui rejoint les conseils du document-type BET 70 en vue du choix de bureaux privés.

A 2,4. - On peut penser que le devoir et la responsabilité personnelle de quelqu'un sont également fonction des missions qui lui sont confiées.

Ainsi la mission confiée à un vérificateur peut être plus ou moins étendue. Des exemples en sont donnés en différents points du présent document (§ 2,3, chap. 3, § 5,2 et § 7,6 notamment). En l'absence d'une définition de cette mission par un texte officiel (à la différence de la situation dans d'autres pays), cette définition ne peut résulter que de son contrat, ou d'instructions qui lui sont données par le chef d'arrondissement.

* cf. article 2.1 du nouveau C.C.A.G.

** Proposition du groupe Rôle et Responsabilités.

*** Il ne faut cependant pas croire qu'on puisse s'excuser en plaidant sa propre incompétence, sauf dans le cas où on aurait très explicitement confié son propre travail à un tiers suffisamment compétent.

(
(Il importe d'être bien conscient que, cette mission étant, pour les
(travaux considérés dans le présent document, une sous-traitance partielle de la
(maîtrise d'oeuvre, les ingénieurs chargés de la maîtrise d'oeuvre conservent néces-
(sairement une importante part de responsabilité :

(
(- responsabilité en ce qui concerne organisation, désignation du vérifi-
(cateur, etc ... ,

(
(- responsabilité pour ce qu'ils n'auront pas explicitement sous-traité
(et qui serait considéré, pour la nature de responsabilité dont il s'agira, comme
(relevant de la mission de maîtrise d'oeuvre.

A 2,5. - Il doit a priori être considéré que les devoirs et responsabi-
lités attachés à la maîtrise d'oeuvre ne seront pas les mêmes selon qu'il s'agira
de viser ou d'approuver l'étude d'exécution; sinon, que pourrait signifier cette
distinction établie dans les textes officiels ?

Quoique le visa soit la règle générale dans notre Administration pour
les ouvrages considérés par le présent document, il convient afin de préciser sa
signification, d'étudier les deux cas.

Assez curieusement, alors que cette différence était définie dans le
fascicule 1 du C.P.C. (article 6 : "Ce visa, lorsqu'il est donné, n'atténue en rien
la responsabilité de l'entrepreneur ... Cette approbation engage, à l'égard de l'en-
trepreneur, la responsabilité du Maître de l'ouvrage sur les dispositions et sur
les éléments explicités ..."), elle n'a pas été reprise dans le nouveau C.C.A.G.
dont l'approbation a été accompagnée de l'annulation dudit fascicule 1. Nous n'avons
pas pu savoir si cette disparition a été volontaire, ni quels ont été ses motifs.

Nous pensions a priori qu'en l'absence d'un nouveau texte officiel les
tribunaux ne pourraient que reprendre l'ancienne définition. Les nouveaux éléments
d'appréciation dont nous disposons nous conduisent maintenant à en douter.

Tout d'abord, des discussions passionnées ont eu lieu, LITRE et LAROUSSE
à l'appui, lors des enquêtes qui ont précédé le présent document, sur les différen-
ces de signification entre "visa" et "approbation", et entre "vérification" et
"contrôle" :

- pour certains, visa et approbation sont synonymes; pour d'autres le
premier terme implique une attitude passive à l'égard de l'étude, alors que le se-
cond l'exclut,

- pour certains, vérification et contrôle sont synonymes; pour d'autres
le premier terme exclut toute attitude directive ou participative dans l'établisse-
ment de l'étude, alors que le second l'implique.

En fait, à défaut de définitions terminologiques, les intentions des au-
torités supérieures sur ce qui doit être fait paraissent ressortir assez bien,
quoique sous une forme très générale, des textes officiels ci-après.

Tout d'abord la nouvelle D.I.G. contient les indications suivantes :

(
("§ n. 3.6... Ce visa n'est pas un simple accusé de réception; l'entrepre-
(neur ne pouvant commencer les travaux avant de l'avoir obtenu, il est un feu vert
(pour l'exécution des ouvrages et le Maître d'oeuvre ne doit le donner qu'après avoir
(vérifié que les documents en cause :

- (. traduisent bien les plans de conception primaire et secondaire ...
- (. ne contiennent pas d'erreurs, omissions ou contradictions normalement
- (décelables par un homme de l'art.

"§ n.3.7.c... L'approbation des plans d'exécution par le Maître d'oeuvre donnerait à ce dernier une responsabilité directe dans la conception ... Le Maître d'oeuvre a l'obligation de vérifier, avant d'apposer son visa, que les plans et autres documents techniques ne contiennent pas d'erreurs, omissions ou contradictions normalement décelables par un homme de l'art.

"§ n.3.7d... La procédure du visa ... rendrait l'entrepreneur responsable direct de la conception tertiaire" ... ce qui serait contraire à l'arrêté du 29 Juin 1973 (relatif à l'ingénierie privée).

Rappelons ensuite à nouveau que la lettre circulaire du 15 Avril 1976 du Directeur des Routes précise :

"Les instructions données ci-dessus ne devraient avoir en aucun cas pour effet de vous amener à diminuer le contrôle des notes de calcul ou plans d'exécution établis par l'entrepreneur. Leur vérification sérieuse s'impose plus que jamais. Indépendamment de l'aspect juridique du problème, nos services ont une longue tradition de constructeurs que l'intérêt général commande de maintenir".

Au total il semble que si l'ancien fascicule 1 du C.P.C. n'envisageait que la responsabilité civile, la D.I.G. ne s'en tient apparemment pas à ce seul plan; et la "responsabilité directe" qu'elle évoque paraît s'identifier à la responsabilité de 1er rang de la Commission Rôles et Responsabilités, et présumer donc sans doute un rang identique pour toutes natures de responsabilité.

Pour notre part en tout cas, nous considérons qu'approbation implique des responsabilités de 1er rang, alors que visa n'implique que des responsabilités de 2ème rang, à l'égard des dispositions explicitées.

Cela dit, il ne nous paraît pas évident que la responsabilité de 2ème rang soit limitée au seul cas où le responsable de 1er rang aurait comme une bévue énorme et évidente. Et cette incertitude ne peut être que renforcée par le fait que l'étude d'exécution n'étant pas une opération isolée, mais un élément d'une filière d'études, il pourra dans bien des cas se poser des problèmes de frontières au cas où une étude d'exécution s'avèrerait a posteriori défectueuse.

A 2,6 - Quant à l'insuffisance des moyens dont on peut disposer, il ne semble pas qu'elle puisse être retenue comme excuse, sauf si malgré des demandes écrites adressées à la hiérarchie on reste réellement empêché d'accomplir sa tâche faute de moyens.

A 2,7. - Du point de vue pratique enfin, il doit être considéré qu'en France la maîtrise d'oeuvre est souveraine vis-à-vis de l'entrepreneur, sans autre limite que quelques cas très spéciaux (tels par exemple que certains droits à résiliation du marché) spécifiés par le C.C.A.G.

Il en résulte que le vérificateur est souverain sous la seule réserve que ses conclusions soient entérinées par le chef d'arrondissement ou son délégué.

- (Dans ces conditions il est évident qu'aucun vérificateur digne de ce nom
- (ne saurait abandonner quoi que ce soit de sa liberté de jugement devant l'entrepre-
- (neur ni même accepter un quelconque arbitrage entre lui et l'entrepreneur, autre
- (que celui du chef d'arrondissement (qui en ce cas engagera sa responsabilité dans cet
- (arbitrage).

ANNEXE B

DEVELOPPEMENT ET ILLUSTRATION DES PRINCIPES FONDAMENTAUX
DE LA SECURITE ET DE LA QUALITE

(cf § 7,41)

Le contenu de la présente Annexe provient pour l'essentiel du Manuel de sécurité des structures (Bulletin 107 du Comité Européen du Béton, chapitre 13).

Les principes fondamentaux sont au nombre de cinq. On peut les introduire en disant de façon générale qu'en matière de sécurité le principal n'est pas de calculer avec une grande précision numérique, mais de raisonner juste (remarque de M. LONDE), et en particulier d'intégrer toutes les données utiles du problème sans en oublier aucune (remarque de M. SALZMANN).

B1 - 1er principe : Reconnaître tous les facteurs de dispersion qui interviennent de façon importante dans les justifications de sécurité, et en tenir compte dans les calculs.

Ceci nécessite évidemment de connaître ce que contiennent les équations et coefficients habituellement utilisés.

Les facteurs de dispersion sont, le plus souvent, ceux qui sont considérés dans le manuel du CEB. Parfois leur dispersion est beaucoup plus grande qu'il n'a été prévu ; parfois aussi, d'autres facteurs peuvent intervenir ; des calculs préalables sommaires peuvent être utiles pour montrer leur importance.

Dans ces deux cas, les formules de la méthode semi-probabiliste sont à reconsidérer, de façon analogue à la manière dont elles ont été établies et en suivant, autant que possible, la méthode générale exposée en tête du paragraphe 9,4 du Manuel.

Il n'y a, par contre, pas lieu de modifier les formules pour tenir compte des dispersions qui ne font pas partie des plus importantes : pour en donner une explication imagée, il suffit de rappeler que $\sqrt{s_1^2 + s_2^2}$ est très voisin de s_1 , et même plus proche de s_1 que de $(s_1 + s_2)$ si s_2 est petit par rapport à s_1 .

C'est en application de ce principe que par exemple on doit distinguer les actions stabilisantes des actions non stabilisantes du poids propre des structures, dans les justifications d'équilibre statique (chapitre 8 du Manuel) et lorsque la sollicitation agissante pouvant donner lieu à un état-limite ultime de rupture résulte de la différence entre deux actions favorable et défavorable du poids propre très voisines (§ 9,35).

C'est également en application de ce principe qu'on cherchera, quand des recherches sont nécessaires pour connaître la grandeur d'une donnée, à examiner quelle précision est nécessaire pour que le résultat soit correct : pour certaines données secondaires une précision de 1000 % peut parfois suffire, alors que pour des données principales, et surtout quand elles agissent en sens opposés, il est couramment nécessaire que l'imprécision ne dépasse pas quelques pour-cent.

B2 - 2ème principe : Mener les calculs de façon cohérente.

Pour beaucoup d'actions et, plus généralement, de phénomènes, les valeurs minimales (nulles ou non nulles) peuvent avoir, pour certaines justifications, plus d'importance que les valeurs maximales. On est donc amené à étudier successivement l'éventualité des valeurs maximales et celle des valeurs minimales. Et comme cela peut concerner différentes actions ou phénomènes, il faut en principe étudier successivement les différentes combinaisons possibles de maximums et de minimums (on constate cependant souvent que certaines combinaisons sont sans objet parce qu'elles donneraient nécessairement des résultats intermédiaires).

D'autre part certaines valeurs ne peuvent être maximales ou minimales que dans certaines circonstances qui ne sont pas compatibles avec le maximum ou le minimum (éventuellement nul) d'autres valeurs.

Un premier aspect du principe de cohérence consiste à ne pas introduire de contradiction dans la combinaison de valeurs maximales et minimales qui correspond à chacun de ces calculs successifs.

Ainsi on ne doit pas :

- prendre en compte un maximum de température extérieure avec une charge de neige (le minimum de celle-ci étant nul) ;

- prendre en compte le maximum d'un moment hyperstatique de précontrainte en même temps que le minimum de moment isostatique ou effort normal de cette précontrainte.

Il n'est par contre pas contraire au principe de cohérence de modifier en sens inverses différentes composantes d'une même action, pour tenir compte de différentes incertitudes et non des variations de l'action elle-même. C'est pourquoi il importe de connaître l'objet et le contenu de chaque coefficient.

Dans beaucoup d'autres cas le principe de cohérence nécessite des appréciations, et leur résultat n'est pas toujours évident. Ainsi, par exemple, on peut immédiatement considérer comme absurde, ou de probabilité négligeable, que les pressions horizontale et verticale d'un liquide soient différentes, ou que l'épaisseur du revêtement de chaussée d'un pont soit maximale dans une travée en même temps que minimale dans une autre. Mais il sera nécessaire d'analyser les différentes causes possibles des pertes de précontrainte pour décider s'il est ou non cohérent que des câbles de précontrainte longitudinaux aient une tension maximale si les câbles transversaux ont une tension minimale. Dans les cas les plus difficiles, on sera amené :

- soit, pour simplifier (et surtout si les conséquences n'en sont pas importantes), à ne pas respecter entièrement le principe de cohérence, de manière à encadrer la réalité ; ainsi peut-on par exemple prendre en compte la composante horizontale maximale d'une poussée des terres en même temps que la composante verticale minimale ;

- soit faire accompagner une valeur maximale d'une valeur moyenne, quand on a reconnu que la réalité est intermédiaire (corrélation partielle).

Nous rappellerons ici pour mémoire un autre aspect du principe de cohérence : la cohérence dans l'analyse de la structure, qui est traitée au § 7,42.

B3 - 3ème principe : ne pas tenir pour nul ce qui n'entre pas habituellement dans les calculs.

Ce principe complète le premier : certains phénomènes dont habituellement l'effet est négligeable peuvent dans certains cas particuliers nécessiter une prise en compte séparée ; d'autre part certains phénomènes qu'on ne sait pas introduire dans les calculs peuvent devenir vis-à-vis de certains états-limites des facteurs de dispersion importants.

On trouvera dans l'Annexe C (C8) des exemples du premier cas. Dans ce qui suit, on va développer le second cas.

Ainsi l'inclinaison d'une pièce théoriquement verticale (par exemple pièce d'échafaudage) peut devenir un facteur de dispersion important pour la sécurité de la structure intéressée. Or la distribution de cette inclinaison ne peut être connue. Voir exemples en 12,741.

Ce qu'il faut alors, c'est agir sur les dispositions constructives de la structure de telle sorte que le phénomène ne soit plus un facteur de dispersion important pour la sécurité.

Ce principe de robustesse vis-à-vis des phénomènes parasites peut être appliqué de façon quantitative à l'aide de quelques calculs sommaires : par exemple on introduira dans certains calculs une action fictive ("idéelle") égale à 1/100 des actions verticales.

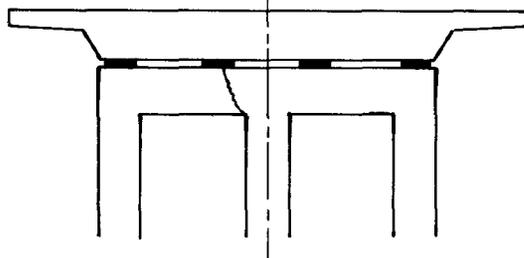
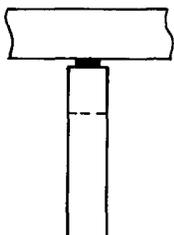
Une extension de ce principe consiste à ne pas tenir pour nulle la probabilité d'occurrence d'un état-limite, même ultime, lorsqu'on a respecté les règles normales de sécurité. Il importe donc de reconnaître quelles seraient les conséquences d'une telle occurrence. Le plus important à cet égard est de déceler les risques d'effondrement d'ensemble de la construction. Cependant M. TICHY signale aussi la possibilité qu'un dépassement d'état-limite d'utilisation dans une pièce entraîne un tel dépassement dans une autre, le fait peut se produire en particulier en raison du changement brusque de rigidité d'un tirant (pièce tendue) lors de sa fissuration.

B4 - 4ème principe : suivre "pas à pas" la transmission des efforts, depuis les points d'application des actions jusqu'aux réactions d'appui ; reconnaître à chaque pas les états-limites imaginables (et la modélisation à utiliser pour le calcul).

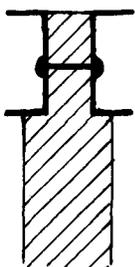
Il s'agit d'un principe de sécurité qui, sans être probabiliste, a été la "règle d'or" de tous les bons constructeurs. Il est trop important pour ne pas être mentionné à la suite des trois précédents.

De façon symbolique, il exprime que dans la "chaîne" de transmission des efforts, ne doit se trouver aucun "maillon" trop faible.

La reconnaissance des états-limites, c'est-à-dire des modes de rupture possibles, fait partie de l'art de l'ingénieur. Elle nécessite de se représenter les pièces dans les trois dimensions, et non par une seule coupe. Les points les plus délicats de la chaîne sont les points de passage d'une pièce à l'autre, les zones de changement de section, les zones d'introduction d'efforts externes (charges, précontrainte, réactions d'appuis) ou internes (modification de densité du ferrailage, du câblage). En voici quelques exemples.



1er exemple : placer quatre appareils d'appui entre un pont-dalle et une pile à trois poteaux liés en tête par un chevrete nécessite d'étudier un état limite d'effort tranchant entre certains appuis et poteaux.

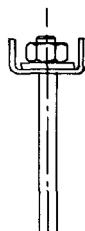
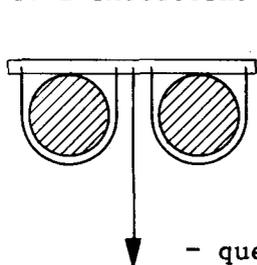


2ème exemple : appuyer deux fers U en tête d'un poteau en bois nécessite d'étudier la transmission de l'effort tranchant dans les U à l'effort normal dans le poteau :

- soit par le boulon : pression diamétrale de l'âme des U sur le boulon, puis cisaillement du boulon, puis flexion du boulon, puis pression diamétrale du boulon sur le poteau ;

- soit par flexion de l'âme et de l'aile inférieure des U, puis compression de la partie de poteau située sous l'aile des U.

L'un ou l'autre mode de fonctionnement est possible selon la précision de l'exécution.



3ème exemple : l'accrochage d'une tige de suspension à un U lui-même fixé à deux cables porteurs nécessite, non seulement que la pièce U ait un module de résistance à la flexion suffisant et soit convenablement attachée aux cables, mais aussi :

- que l'écrou puisse reprendre l'effort de la tige ;

- que l'effort de compression du boulon sur l'âme de l'U ne poinçonne pas cette âme, ni la plie transversalement ; des plaques de répartition suffisamment rigides peuvent être indispensables pour cela entre le boulon et l'âme ;

- que les ailes de l'U aient une résistance au cisaillement suffisante.

Quant au choix de la modélisation pour le calcul, il a un aspect fort général, puisqu'il peut concerner aussi bien la détermination des sollicitations agissantes que résistantes. Pour que ce choix soit correct (plusieurs choix corrects étant assez souvent possibles), diverses précautions de validité et de compatibilité sont nécessaires ; la principale d'entre elles fait l'objet du 5ème principe ci-après.

B5 - 5ème principe : reconnaître les risques de rupture fragile, et ne pas prendre en compte une ductilité incertaine.

Il s'agit d'un principe qui a un aspect aléatoire quoique cet aspect soit parfois secondaire et qu'on ne puisse généralement exprimer ce caractère aléatoire en termes de probabilités.

Ce principe conduit à se garder vis-à-vis d'une rupture prématurée due au fait que certaines parties de la structure perdraient toute résistance avant que d'autres atteignent leur effort résistant maximal.

Cette notion de fragilité a un caractère relatif, le plus souvent du fait qu'elle résulte d'une comparaison entre les propriétés de différentes parties de la structure. On va le montrer par quelques exemples.

1er exemple : il suffit dans certaines pièces métalliques d'une petite entaille pour que ces pièces se déchirent progressivement sous un effort beaucoup plus faible que la résistance du calcul ;

2ème exemple : une poutre continue peut ou non périr par flexion à mi-portée avant que les sections sur appui aient atteint leur capacité portante ; cela dépend du matériau et des dimensions.

On remarquera, à propos de ce dernier exemple, que ce principe de sécurité conduit, quand la rupture fragile paraît possible, à justifier séparément la résistance de chaque partie de la pièce, et non globalement leur résistance totale.

Parfois le caractère relatif de la notion de fragilité provient de ce que la structure doit pouvoir supporter des déformations finies d'origine externe ou d'origine interne (par exemple conséquence du retrait ou du fluage du béton).

B6 - Application pratique : choix des ingénieurs responsables des études :

Le présent paragraphe concerne plus particulièrement l'application des trois premiers principes. Cette application est à envisager dès le stade de la conception générale, mais elle est à considérer aussi au stade des études d'exécution.

On a pu croire à certaines époques, dans certains pays, qu'il suffisait, pour assurer la sécurité des constructions, de les calculer conformément aux règlements (certains détails faisant cependant en outre, mais essentiellement en vue de la qualité, l'objet de "règles de l'art" partiellement non codifiées).

Ceci a pu être presque vrai quand on n'avait guère à calculer que des structures relativement simples et que les règlements imposaient des marges de sécurité en moyenne très grandes. Ce ne l'est plus aujourd'hui. C'est pourquoi divers choix restent à faire par les ingénieurs responsables des études, et plus particulièrement par ceux qui ont une certaine spécialisation dans les problèmes de sécurité.*

a - reconnaissance des limites de validité des règles et formules réglementaires : de très nombreuses règles reposent sur certaines hypothèses et ont un domaine de validité limité. Certes ces hypothèses sont habituellement valables, et les règles proposées sont valides dans tous les cas courants. Il existe cependant des exceptions, et il appartient aux Ingénieurs responsables des études de reconnaître ces exceptions et les étudier de façon adéquate. Il doit pour cela être fait souvent appel à l'appréciation motivée.

Du point de vue pratique, ces exceptions peuvent porter sur de très nombreux points : il suffit, pour en avoir un classement, de relire la liste des chapitres du Manuel de sécurité. On ne peut les rappeler toutes ici. Mais chacune est rare. Il n'est pas possible en pratique d'astreindre tout ingénieur à devenir un spécialiste de la sécurité des constructions. Il est donc logique que la grande majorité des ingénieurs n'aient sur ces problèmes que des idées sommaires et n'aient pas, dans leur travail quotidien, à se poser à ce sujet d'autre question que celle-ci : "La construction, ou la partie de structure que je calcule, a-t-elle ou non quelque caractère non courant ?"

Les constructions pour lesquelles le caractère aléatoire de certains phénomènes prend une importance non courante nécessitent le recours à un spécialiste de la sécurité. Le plus souvent le rôle de ce spécialiste, qui se situera à un niveau relativement élevé dans le réseau de compétence, sera seulement d'analyser l'aspect particulier du problème et d'indiquer la règle à suivre. Le calcul pourra ensuite être fait par un non-spécialiste de la sécurité. On doit surtout retenir que tout bureau d'études qui désire ou accepte de faire certaines études tant soit peu particulières, ou innover sur certaines dispositions, doit pouvoir consulter un spécialiste de la sécurité.

Il ne faut pas croire que de façon générale les spécialistes de sécurité doivent se croire autorisés à déroger aux règlements : en règle générale, en effet, leur intervention à propos de la validité des règlements doit les conduire, soit à confirmer les règles dans le cas particulier étudié, soit à recommander des précautions supplémentaires.

b - choix de compléments aux règles et formules réglementaires : il s'agit ici des problèmes qui ne sont pas traités par les règlements. On peut rencontrer de tels problèmes à tous les stades des calculs et même de l'exécution.

* Tout ce qui suit à propos de la prise en compte du caractère aléatoire de certains phénomènes, est généralisable pour l'ajustement des méthodes de calcul et des règles de l'art (recours au "réseau de compétence", cf. § 5,32).

Les plus fréquemment rencontrés concernent des bases d'établissement des études, et notamment les actions liées aux usages particuliers des constructions, à introduire dans les calculs : dans le cadre de la méthode semi-probabiliste, il s'agit de choisir les valeurs caractéristiques des actions, lorsqu'elles ne sont pas fixées par les règlements ou normes (et, dans le cadre des études d'exécution et des vérifications, lorsqu'elles n'ont pas été fixées dans les projets ou marchés; le cas est particulièrement fréquent pour les structures provisoires et les situations temporaires ou accidentelles des structures définitives).

Il convient en particulier :

- de distinguer les valeurs caractéristiques des valeurs probables ("moyennes") ;

- de faire couvrir par les valeurs caractéristiques principales ("de courte durée") tout ce qui est normalement prévisible et, en particulier, pour ce qui concerne les charges permanentes de superstructures, les conséquences des modifications qu'on pourra, à long terme, apporter à la construction du fait de son usage* : addition de cloisons, de revêtements de sols, etc.... ;

- de faire fixer, éventuellement, certaines limites à la simultanéité de certaines actions, de façon absolue ou probabiliste (choix des valeurs "de longue durée"), de faire préciser le caractère accidentel de certaines situations, etc... ;

- de faire fixer certaines limites à la répétitivité (état-limite de fatigue), à la durée probable d'application (états-limites d'utilisation : fissures et déformations), éventuellement à l'agressivité chimique ;

- de faire préciser le sens et toutes les conséquences des éventuelles exigences particulières du service responsable de la gestion future des ouvrages.

Tous ces choix doivent être confirmés par écrit et rappelés sur les plans, calculs et consignes d'exploitation.

c - fixation de conditions d'exécution : plans et calculs doivent également, même dans les cas les plus courants, rappeler tous les choix faits en ce qui concerne les propriétés des matériaux à utiliser, le sol de fondation, les pieux à exécuter, etc...

Dans des cas particuliers, ce n'est pas suffisant, et il convient aussi, par exemple, de préciser :

- les tolérances à admettre
- les contrôles d'exécution à effectuer.

* Il est même bon, quoique ce soit une question d'économie et non de sécurité, de faire préciser le cas échéant les modifications fondamentales à prévoir pour la construction : élargissement par exemple.

ANNEXE C

INDICATIONS SUR LES DOMMAGES
LES PLUS COURAMMENT CAUSES PAR DES DEFAUTS D'ETUDES D'EXECUTION
(cf. § 7,42)

Le contenu de la présente Annexe provient pour l'essentiel des documents relatifs à la pathologie des ouvrages, cités au § 12,32 du Catalogue CAT. 75 et de sa mise à jour n° 1. Seuls les défauts découlant des études d'exécution sont repris dans ce qui suit.

C1 - Non-prise en compte de certaines actions dans les calculs : Il s'agit essentiellement :

- du gradient thermique (cf circulaire du 2 Avril 1975)
- des engins lourds de terrassement en cours de travaux (cf § 1,84 du CAT 75 et de sa mise à jour n° 1).
- du séisme (cf. § 3.05,23 du C.P.S.T. - mise à jour n° 2 et dossier-pilote SURCH 71),
- des chocs sur dispositifs de retenue (cf. 3.05,26 du C.P.S.T., mise à jour n° 2).

Cette liste n'est pas limitative (chocs sur piles, convois militaires, changements d'appareils d'appui) quoique dans les autres cas le problème est plutôt à considérer dès le stade de la conception générale.

C2 - Non-prise en compte du retrait différentiel dans une section construite en plusieurs phases successives : Ceci concerne la quasi-totalité des tabliers composites (à poutres préfabriquées VIPP ou PRAD, ou en ossature mixte OM), mais aussi d'autres tabliers à nervures coulées en place sensiblement avant le bétonnage de tout ou partie du hourdis. La manière d'évaluer ce retrait différentiel, souvent aléatoire, et d'en tirer les conséquences est définie dans les dossiers-pilotes précités.

C3 - Non-prise en compte des redistributions de sollicitations par fluage dans une structure constituée de tronçons successifs : Des redistributions de sollicitations par fluage sont inévitables dans toute structure en béton sans état neutre. Ces redistributions souvent favorables en certains points, ne s'y manifestent qu'au bout d'un assez long délai, et sont presque toujours défavorables en d'autres points; d'où la nécessité d'envisager les deux situations avant ou après les redistributions. Elles sont particulièrement importantes en présence d'une précontrainte. Les fissurations qui en un premier stade résultent de leur oubli peuvent parfois en un deuxième stade provoquer la ruine de l'ouvrage.

C4 - Non-prise en compte d'un écart normalement prévisible entre une disposition théorique et la réalité : De nombreux exemples peuvent être cités, parmi lesquels :

- oubli, notamment pour l'évaluation de la charge permanente, des reprofilages nécessaires avant exécution de la chaussée, du fait du manque de précision de l'exécution et du fluage



- oubli du fait qu'un tassement important n'est généralement pas vertical
- oubli du fait que l'implantation et la direction d'un pieu peuvent différer notablement des dispositions théoriques ; ceci est particulièrement dommageable en cas de pieu unique ou de file unique (ou de paroi moulée à prolonger par un piédroit).

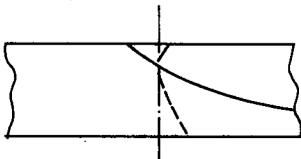
C5 - Justification d'un nombre insuffisant de sections :

Cette insuffisance est spécifique des pièces précontraintes aux environs des arrêts de câbles et des points d'appui intermédiaires. Les variations brusques ou rapides des moments fléchissants (moments de précontrainte compris) aux environs de ces points font que des contraintes sur les fibres extrêmes peuvent s'inverser de signe sur de très courtes longueurs (par exemple au 1/20 de portée à partir d'un appui intermédiaire). Cette inversion est d'autant plus à craindre que la section est dissymétrique (par exemple tablier à poutres continues et hourdis) et que la poutre est haute (du fait de la courbure limitée des câbles). Voir à ce sujet la note d'information DOA.B du 15 Octobre 1976 sur les ponts précontraints à nervures hautes.

C6 - Oubli ou sous-estimation des conséquences d'un arrêt de câble de précontrainte : Ces conséquences sont de deux ordres :

- d'une part sollicitations locales au voisinage de l'ancrage du câble (voir IP 2 et traité de Guyon) ;

- d'autre part changement des sollicitations générales d'un côté à l'autre de l'ancrage ; ce changement est :



. brusque sur la face de la pièce où est disposé l'ancrage, et pour l'effort tranchant

. progressif et plus ou moins aléatoire sur l'autre face de la pièce ou dans une pièce adjacente (hourdis) ; voir IP 2 et dossier-pilote VIPP.

On peut en outre signaler les dangers de dommage local au cas où un câble transversal est présent dans la zone de diffusion de la précontrainte : cette présence équivaut en effet à celle d'un vide dans cette zone où les compressions sont élevées.

C7 - Oubli de certaines sollicitations dans des caissons et autres pièces de forme complexe ou de forte dimension : On ne peut que citer quelques exemples :

- flexion latérale des âmes d'un caisson sous l'effet des charges appliquées au hourdis, ou d'une précontrainte du hourdis

- torsion sous l'effet de charges excentrées

- diffusion progressive, non seulement de la précontrainte, mais aussi des contraintes de flexion ; par exemple, près d'un appui, la largeur utile de hourdis est réduite ; dans un pont-dalle, au droit d'un appui ponctuel intermédiaire, les moments principaux dans les deux directions se concentrent aux environs du point d'appui.

C8 - Oubli de poussées au vide : les poussées au vide peuvent prendre des formes très diverses :

- poussées au vide involontaires de câbles de précontrainte :

. un câble théoriquement plat près d'une paroi (extrados de dalle, âme de poutre) peut ne pas l'être tout-à-fait et, en se redressant lors de la mise en tension, faire éclater le béton de couverture ; en raison de ce risque, il est préférable de prévoir un tracé un peu convexe près des parois ;

. un câble de forme théoriquement régulière peut être en fait quelque peu ondulé faute de fixation suffisante ou de réglage soigné, et en se redressant

lors de la mise en tension, faire éclater la pièce dans sa masse ; d'où l'utilité de fixations suffisantes des cables, constituant en outre un minimum d'armatures verticales ;

- poussées au vide d'armatures passives courbes ;
- poussées au vide de pièces courbes (hourdis inférieur de caissons d'épaisseur variable) ou de cables de précontrainte contenus dans ces pièces.

Il peut être nécessaire de se représenter dans l'espace le fonctionnement des pièces pour ne pas omettre des risques de poussée au vide : dans le dernier exemple ci-dessus, les poussées au vide proviennent des moments longitudinaux, mais ont pour effet des moments transversaux dans les hourdis.

Ces dommages sont une illustration par défaut du 3ème principe de sécurité (§ B3, 1ère partie) : quand la portée transversale du hourdis est faible, le ferrailage minimal constructif suffit pour reprendre les efforts correspondants ; au delà, la prise en compte dans les calculs s'impose pour fixer le dimensionnement.

C9 - Manque de description précise des fixations des armatures : L'absence ou l'insuffisance de ces descriptions (aciers de fixation, cales ...) sur les dessins d'exécution a pour conséquence principale que le chantier n'établit pas les fixations nécessaires, ce dont résultent notamment :

- des ondulations anormales d'armatures de précontrainte, donnant lieu aux dommages signalés en C8 ;
- de très importants écarts de contraintes dans les pièces minces précontrainte (hourdis notamment); de façon générale, plus une pièce précontrainte est mince, et plus la position des cables de précontrainte doit être précise ;
- des écarts relativement importants sur la position des armatures passives, ce qui conduit :

. à certains enrobages très insuffisants pour que les armatures soient protégées de la corrosion

. et/ou à des enrobages excessifs conduisant à des fissures largement ouvertes et à des pertes de résistance élevées dans les pièces minces.

C10 - Manque de précautions au voisinage des "points de moment nul" : Cette expression est quelque peu imagée pour le béton précontraint et même pour le béton armé ; elle doit être comprise ici comme désignant des points à partir desquels des armatures ne sont, d'après les calculs, théoriquement plus nécessaires.

Ces points sont des zones préférentielles d'apparition de dommages dès lors que le fonctionnement de la structure n'est pas conforme à son analyse, car l'écart devient un pourcentage infini de la sollicitation prévue. La cause de l'écart peut être absolument quelconque : actions non prises en compte (par exemple gradient thermique ou tassements), rigidité ou fluage différent des prévisions, etc...).

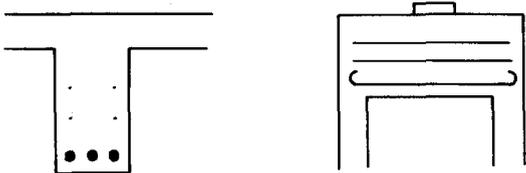
Aussi, en ces points, il importe d'être prudent, de ne pas croire trop aveuglément aux résultats des calculs, et de s'assurer que quelques aciers subsistent pour faire face à l'imprévu.

C11 - Fragilité par insuffisance d'armatures passives dans des zones susceptibles de subir des tractions mal connues : Il convient de rappeler qu'au dessous d'un certain taux d'armatures, défini en traction simple par $\bar{\omega} = \frac{A}{B} = \frac{\sigma_j}{\sigma_e}$ (cf CPC, F61 VI de 1970, article 19), une fissuration éventuelle est généralement constituée d'une ou d'un petit nombre de fissures très largement ouvertes, donc très dommageables. C'est pourquoi :

- ou il est nécessaire, si on ferraille au dessous de ce seuil, de ne pas sous-estimer les sollicitations, compte tenu des phénomènes parasites éventuels ; cette condition ne peut généralement être considérée a priori comme satisfaite que dans des cas consacrés par l'expérience ;

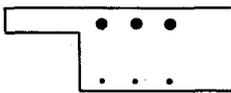
- ou il importe de considérer le seuil de fragilité comme un minimum absolu pour le pourcentage d'armatures.

C12 - Mauvaise répartition des armatures dans une poutre de grandes dimensions de béton armé : ceci concerne des pièces fléchies relativement étroites de plus



de 80 cm à 1 m de hauteur telles que ci-contre, ou dont les proportions sont plutôt celles d'une poutre-cloison que d'une pièce linéaire (cas par exemple de certaines entretoises ou de certains voiles de pile). Il n'est en de tels cas pas admissible, sans

risque de fissurations importantes à des niveaux intermédiaires, de concentrer la totalité des armatures principales près des fibres extrêmes, car cela revient à laisser une partie importante des pièces dans une situation de fragilité (cf. C11). En particulier la manière de ferrailer correctement une poutre-cloison est définie en annexe au F61 VI du CPC.



On peut assimiler à ce cas celui d'encorbellements peu ou pas armés :

- soit qu'ils soient adjacents à une dalle continue armée longitudinalement

- soit qu'ils soient adjacents à une dalle précontrainte, mais coulés en place après précontrainte de la dalle et donc peu ou pas précontraints, ou même mis en traction par les déformations de fluage.

C13 - Concentration excessive des ancrages des armatures de précontrainte ou des arrêts ou recouvrements d'armatures passives : Arrêter trop d'armatures dans une même section ou dans des sections voisines les unes des autres entraîne plusieurs inconvénients :

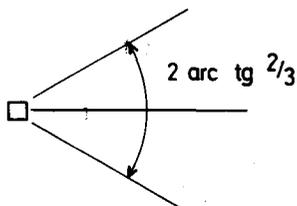
- perturbations locales considérables de la distribution des contraintes (en particulier apparition de fortes tractions locales derrière les ancrages, pouvant donner lieu à des fissures largement ouvertes après fluage)

- discontinuité importante de la courbe des efforts résistants avec comme conséquence apparition d'une section faible où les déformations parasites tendent à se concentrer

- difficultés et défauts prévisibles de bétonnage en raison de la densité localement très forte d'aciers.

Ces défauts, lorsqu'ils se produisent, proviennent presque systématiquement des études d'exécution ; ils doivent être évités grâce à la vérification.

C14 - Sous-estimation des incertitudes relatives à la répartition des sollicitations locales aux environs de forces concentrées : Ces incertitudes sont considérables dans les structures en béton, du fait de la fissuration et de la non-linéarité de ses déformations. Un exemple suffit à le montrer : la diffusion de la force



à l'ancrage d'une armature de précontrainte peut être envisagée :

- par compression d'un certain secteur de béton ; l'angle de diffusion est généralement supposé assez petit (IP 2 article 20,1) pour garantir contre un risque d'écrasement du béton ; mais il peut être nécessaire d'envisager un angle plus grand (par exemple 100 grades, cf IP 2 article 20,1) si on veut être garanti contre une "évasion de la précontrainte" ;

- par moitié par compression devant l'ancrage et par moitié par traction derrière l'ancrage ; c'est ce qui résulte de la théorie élastique ; en fait cette théorie est généralement éloignée de la réalité en ce qui concerne la distribution des contraintes dans les ouvrages en béton (IP 2, commentaire de tête de l'article 20) ; mais elle explique que des fissures tendent à s'ouvrir derrière les ancrages, et que des armatures y soient nécessaires.

On voit que selon la conséquence à étudier, différentes répartitions des sollicitations locales doivent être envisagées sous peine de dommages. De tels examens sont d'autant plus nécessaires qu'on a affaire à des forces concentrées plus importantes, c'est-à-dire par exemple qu'on a affaire à des armatures de précontrainte plus grosses.

C15 - Reprises de bétonnage non cousue ou insuffisamment cousue : Le résultat en sera l'ouverture d'une large fissure le long de la reprise, voire un décollement des deux parties du béton séparées par la reprise, avec en ce cas non transmission des efforts de cisaillement. Dans ce dernier cas il peut en résulter des conséquences très graves, par exemple :

- séparation d'une membrure d'une poutre de son âme
- séparation d'une entretoise d'une poutre (très grave si l'entretoise a un rôle porteur et pas seulement de répartition).

C16 - Mauvaises implantations d'appareils d'appui ou des armatures dans les zones d'about : Ces défauts peuvent avoir divers aspects, et il peut en résulter diverses conséquences :

a - Implantation des appareils d'appui trop près de l'about, ou ancrage insuffisant des armatures compte tenu de cette implantation. Il peut en résulter des risques graves par manque de résistance. Voir à ce sujet, à titre d'exemple, le dossier PRAD 73, mise à jour n° 1.

b - Implantation des appareils d'appui défectueuse en hauteur, ou insuffisamment précisée. Ces défauts concernent essentiellement les bossages et les ferrail- lages correspondants ; ils ont comme conséquences principales des difficultés pour la maintenance et divers inconvénients pour la durabilité. Voir à ce sujet

C17 - Considération insuffisante des efforts susceptibles d'être exercés sur des dispositifs de retenue (glissières et surtout barrières) : Ces efforts, qui sont fixés par le CPST (article 305,26 de la mise à jour n° 2) sont élevés. Tout le monde n'a pas encore compris que ces efforts sont d'un tout autre ordre de grandeur que ceux susceptibles d'être supportés par des garde-corps. Il en résulte couramment de graves insuffisances dans les études d'exécution pour la transmission correcte de ces efforts aux structures :

- fixation incorrecte au pied (par exemple par chevilles, contrairement au dossier-pilote)

- mauvaise reprise des efforts dans les corniches faute de dimensions suffisantes ou d'aciers suffisants ou d'aciers bien placés

- mauvaise fixation des corniches aux structures pour les mêmes raisons

- insuffisante résistance locale des structures au point d'attache des corniches (encorbellements trop minces ou mal armés ou présence d'ancrages de cables).

Il en résulte qu'en cas de choc le dispositif de retenue ne jouera pas son rôle et/ou que la structure sera gravement endommagée.

C18 - Défauts technologiques : ils peuvent être très divers, surtout pour les armatures de précontrainte. Citons seulement quelques exemples : rayons de courbure trop courts, non réalisables pour des aciers passifs de gros diamètre ; dispositions des gânes telles qu'on ne puisse injecter correctement, ou qu'en période d'hiver on ne puisse éviter la présence d'eau qui en se transformant en glace fera éclater le béton.

C19 - Ouvrages provisoires : Les défauts les plus fréquents sont les suivants : défaut de contreventement, mauvais ancrages ou calages (les défauts prenant des formes très diverses), mauvais arrimage des pièces fixées ou en mouvement, flambement général, instabilité statique, flambement local d'âme (zone d'appui ou de chargement notamment), noeud d'assemblage non concourant, possibilité de sous-minage des appuis provisoires, glissement du sol sous des appuis provisoires, renard, mauvais cadrage des batardeaux, flottement des batardeaux.

Pour plus de détails en ce qui concerne les échafaudages porteurs, se reporter à la mise à jour n° 3 du CPST (articles 312,2 et 312,3).

C20 - Ouvrages-types du SETRA : Se reporter au document-type P.O.C. 76, § 1.

C21 - Ouvrages-types autres que ceux du SETRA : Il s'agit surtout des ouvrages sous remblais (buses métalliques ou voûtes minces). Se reporter aux publications les plus récentes du SETRA à leur sujet (présentement note d'information du 15 Octobre 1976).

C22 - Conclusion : La liste qui précède confirme et illustre les recommandations du texte principal et de l'Annexe B. En particulier les insuffisances des calculs peuvent certes être funestes, mais ce sont les insuffisances qualitatives qui le sont le plus fréquemment.

Il paraît néanmoins utile d'insister sur le fait que pour les structures en béton, et notamment pour les structures en béton précontraint, les meilleurs calculs ne peuvent souvent avoir qu'une précision limitée vis-à-vis de la réalité. Cette imprécision pourra néanmoins généralement rester non dommageable si des armatures de densité suffisante et judicieusement disposées assurent à la matière une certaine résistance à la traction et une certaine ductilité là où l'imprécision risque d'être la plus sensible.

ANNEXE D

PROGRAMMES ELEMENTAIRES DE CALCUL
DU S.E.T.R.A.
A UTILISER POUR DES OPERATIONS
PARTIELLES DE VERIFICATION

Il s'agit essentiellement des programmes évoqués au CAT 75 (§ 9,418). Ces programmes sont énumérés et décrits dans une brochure "Programmes élémentaires pour calculs d'ouvrages d'art" datée de Juillet 1973 (diffusion générale faite par la D.O.A.-A à toutes les D.D.E.). Ces programmes ont été écrits en FORTRAN (2 versions) pour être utilisés sur l'ordinateur du S.E.T.R.A. (avec emploi de consoles) et sur de petits ordinateurs. Ils peuvent être facilement utilisés ou adaptés pour d'autres ordinateurs. Leur mode d'emploi est détaillé, selon la version intéressée, dans deux brochures "Mode d'emploi des programmes élémentaires de la bibliothèque OART du S.E.T.R.A.) datées également de Juillet 1973 et qui peuvent être obtenues sur demande adressée au S.E.T.R.A. (D.O.A.-B).

On y trouve :

- des programmes de calcul de caractéristiques de section, NETRA, NERPOG, CAMIX, RIGTOR,

- des programmes permettant d'effectuer des intégrations numériques, SOMSI, ROTRA, SOMHV, SMORGD, OMEGA,

- des programmes permettant de traiter des problèmes de RDM, RAFOCI, MOSAPC, BIAIS, SCPOU,

- des programmes effectuant des calculs de section de béton armé, CONTRA, FAFLCO,

- des programmes de calculs de pertes de tension de béton précontraint, PERFAT et TENSIA,

- des programmes de calcul de section et de raidissage d'ouvrages mixtes ou métalliques, COMIX et RAIRI.

Il est venu depuis s'y ajouter deux autres programmes :

- OMEGA, qui effectue les mêmes calculs que ROTRA et SOMHU mais dans le cas où les sections de calcul ne sont pas également espacées,

- TENSIA, qui effectue des calculs tout-à-fait analogues à TENSIO mais tient compte des modifications apportées à l'I.P. 1 par la circulaire n° 74-60 du 23.04.74.

Ces programmes peuvent être employés de façon isolée ou de façon successive. L'utilisation successive permet de procéder à des vérifications relativement poussées. Par exemple l'usage successif de programmes de caractéristiques de sections, puis de programmes d'intégration, permet de calculer les coefficients de souplesse des éléments de structures plus complexes (portiques, ponts à béquilles, etc ...) permettant de résoudre assez aisément l'hyperstatisme des systèmes et de déterminer les sollicitations pour des cas de charge donnés.

ANNEXE E

REPRODUCTION DE L'ARTICLE 3.05, 34 DU C.P.S. TYPE
DE 1969, MISE A JOUR N° 2

(VOIR DANS LE COMMENTAIRE COMPLEMENTAIRE LES PARAGRAPHERS CONCERNES DU VEE 77)

TEXTE

3.05,34 - CALCULS AUTOMATIQUES PRODUITS PAR L'ENTREPRENEUR.

1. - Au cas où l'entrepreneur ferait établir, par des moyens de calcul automatique, tout ou partie des calculs qui lui incombent, il joindra une notice indiquant de façon complète les hypothèses de base des calculs, leur processus, les formules employées et les notations.

2. - Les "sorties" de tout programme de calcul utilisé devront être suffisamment nombreuses et comporter, outre les données particulières du calcul, assez de résultats intermédiaires pour que les options tant techniques que logiques, soient mises en évidence et que les fractions du calcul, comprises entre deux options consécutives, puissent être isolées en vue d'une éventuelle vérification. Sur demande du Maître d'Oeuvre, l'entrepreneur lui fournira tout autre résultat intermédiaire du calcul qu'il estimerait utile; au cas où la note de calcul automatique serait très volumineuse, l'entrepreneur fournira un extrait faisant paraître les résultats déterminants du dimensionnement proposé.

3. - Le Maître d'Oeuvre pourra faire compléter manuellement toute note de calcul automatique incomplète.

4. - Sur toute demande du Maître d'Oeuvre, l'entrepreneur devra lui fournir de nouvelles notes de calcul, obtenues par le même programme, à partir d'autres données particulières fixées par le Maître d'Oeuvre. Si ces nouvelles notes de calcul faisaient paraître que les notes initiales sont acceptables, les frais nouveaux seront à la charge du Maître de l'ouvrage; dans le cas contraire ceux-ci seront à la charge de l'entrepreneur.

COMMENTAIRES DU C.P.S.T.

3.05,34 -

1. - L'entrepreneur a la charge de faire le nécessaire pour que ces calculs soient aussi aisément exploitables par le Maître d'oeuvre que s'il s'agissait de calculs manuels.

Certaines des indications demandées sur la notice pourront souvent être fournies sous forme de commentaires ajoutés à un exemplaire de note de calcul semblable.

L'article 27 du nouveau fascicule 61, II du C.P.C. admet l'introduction de simplifications dans le programme de charges sous certaines conditions. Un premier exemple (B' et B" (ℓ) est publié dans le dossier SURCH 71 (Application des nouvelles charges réglementaires des ponts-routes).

- 2 et 4. - Il n'est généralement pas possible de demander, pour les programmes faisant appel à un lourd appareil d'analyse numérique, une décomposition permettant de reconstituer manuellement la procédure du traitement. Dans ces conditions :

- des vérifications "globales" faites en remontant des résultats fournis jusqu'aux hypothèses de base, peuvent être beaucoup plus aisées;

- pour certains ouvrages spéciaux, il peut être réservé en outre, pour le Maître d'Oeuvre le droit de faire fournir, à titre de test, une note de calcul supplémentaire selon une configuration autre que celle de l'ouvrage à construire, telle qu'on puisse en vérifier les résultats plus aisément; ce mode de vérification ne vaut que pour des programmes d'une logique élémentaire et dans l'hypothèse où les traitements dans les deux cas font appel aux mêmes circuits logiques. Tel est le cas, par exemple, des programmes de calcul de structure.

COMMENTAIRE COMPLEMENTAIRE
(Raccordement aux Recommandations VEE 77)

Cet article a pour but de proscrire toute attitude désinvolte de l'entreprise en matière de calcul automatique.

Le § 1 doit permettre de comprendre le déroulement des calculs, les hypothèses de base et la présentation des résultats, ce qui est à rattacher aux § 6,2 à 6,5 du présent document.

Le § 2 doit permettre de distinguer différentes parties dans les calculs, ce qui doit permettre l'application du § 7,32 du présent document.

Le § 3 définit une des mesures qui peuvent être nécessaires, selon les § 6,3 et 7,43 du présent document.

Le § 4 permet de vérifier le logiciel utilisé (ou une partie de ce logiciel) au moyen d'un calcul parallèle et éventuellement par sondages et recoupements, portant sur une structure qui se prête plus aisément à la vérification, par exemple si le calcul parallèle préexiste. Il permet aussi d'apprécier la sensibilité des résultats à un changement de certaines données de base.

ANNEXE F

REPRODUCTION DU PARAGRAPHE 3.4.2.4 DE LA
DIRECTIVE PROVISoire D.J. 75
POUR LE JUGEMENT DES APPELS D'OFFRES
(cf. § 5,22 et 8,23)

3.4.2.4. - Calculs justificatifs définitifs.

Le R.P.A.O.T. et le C.P.S.T. art. 3.05.34 ont été rédigés pour attirer l'attention du rédacteur du marché et celle des concurrents sur cette question. Il se trouve que les clauses de portée générale que l'on peut introduire à ce sujet ne peuvent être que des palliatifs vis-à-vis des difficultés qu'on peut craindre, et que leur application laisse inévitablement une large part à l'interprétation. Il est donc indispensable, en cas de variante de conception, que l'Administration se fasse préciser par le concurrent quels moyens de justification celui-ci se propose d'utiliser, et d'en tenir compte dans la comparaison des offres. Une préférence sera donnée, sauf en cas de problèmes spéciaux, aux moyens basés sur des méthodes simples et facilement compréhensibles.

Il faut en effet éviter dans toute la mesure du possible l'emploi de moyens de calculs indéterminés ou mal connus de l'Administration, qui conduiraient à des frais et des délais de vérification supplémentaires certains et à des aléas importants.

Ces aléas peuvent porter sur les points suivants :

- usage de programmes de calculs non fiables ou invérifiables, voire à adapter au cas du pont,
- usage de programmes de calculs trop sommaires et ne permettant pas de traiter certains cas de figure qui peuvent être des cas déterminants,
- combinaison de calculs manuels et automatiques successifs, qui risquent de former des ensembles hétérogènes sans même parfois qu'on puisse le déceler, ou de comporter des erreurs à leurs raccordements,
- impossibilité de prendre en compte des hypothèses de base correctes, ou même de connaître les hypothèses de base, par exemple en ce qui concerne :
 - . les lois d'inertie,
 - . la détermination des cas de charge,
 - . le calcul des pertes de précontrainte.

Il n'est cependant pas toujours possible d'éviter l'emploi de certains moyens liés à certains types de structure, car il pourrait en résulter de grosses inexactitudes. Mais on doit toujours être informé de ces moyens, savoir si on disposera de moyens de recoupement et en tenir compte dans l'appréciation des offres.

.../...

D'autre part certains moyens de calcul sont connus comme insuffisants, suspects ou mal adaptés à certains types d'ouvrages. Pour les ponts courants spéciaux et pour les grands ouvrages il est possible d'obtenir des informations à ce sujet au S.E.T.R.A. (Centre de Calcul des Divisions d'Ouvrages d'Art).

A tout le moins, on ne doit pas accepter qu'une variante mineure relative à un pont type soit le prétexte à l'introduction de modes de calcul autres que les programmes du S.E.T.R.A. ou ceux qui pourront, dans le futur, être homologués par des organismes professionnels.

On n'oubliera pas non plus dans les appréciations qu'au cours de la vie de l'ouvrage, par exemple lorsqu'on devra s'assurer de la possibilité de faire passer un convoi exceptionnel, il sera préférable d'avoir à réutiliser un programme classique plutôt qu'à avoir à rechercher un programme plus ou moins prototype et abandonné ou nécessitant certaines données qu'on ne trouvera pas sur les plans (ex. phases de construction). Quant au marché à passer à l'issue de l'appel d'offres et des discussions évoquées ci-dessus, il devra être parfaitement explicite sur les moyens qui seront seuls employés pour ces calculs justificatifs définitifs.

Remarques (complémentaires à la D.J 75) :

1.- Le présent document se place dans un système selon lequel les calculs doivent être vérifiés. En conséquence la convenance d'un programme, dans le cadre de ce système, ne peut pas résulter de sa seule qualité intrinsèque, mais est fonction de son aptitude à la vérification. En l'absence de notices précises et détaillées, telles que celles contenues dans les dossiers-pilotes, des programmes même de bonne qualité intrinsèque ne répondent pas (ou répondent mal) aux besoins.

2.- Il importe particulièrement de se méfier des analyses de structures dont les résultats seraient très sensibles à un changement de certaines données de base qu'on ne peut connaître avec précision. Ceci est fréquent pour les structures soumises à des différences d'efforts, les données de base les plus incertaines étant notamment des propriétés des sols et le fluage du béton. Lorsque de telles analyses sont automatisées, ce risque est accru du risque que cette sensibilité soit difficile à déceler.

ANNEXE G

INDICATIONS PROVISOIRES POUR
LA VERIFICATION D'UNE NOTE DE CALCUL M.R.B.

G 1 - PREAMBULE.

G 1,1 - Généralités :

Cette annexe a un caractère provisoire ; en effet lors de la parution d'une prochaine mise à jour du dossier MRB.BP 70 cette annexe sera remplacée par une pièce de ladite mise à jour. Par ailleurs les vérifications proposées ici sont manuelles et partielles : il s'agit soit de recoupements soit de sondages, mais il n'est pas question d'indiquer comment l'on peut retrouver tous les résultats de la note de calculs électroniques, à la différence des autres programmes du SETRA utilisables au stade des études d'exécution (voir les dossiers-pilotes correspondants).

Des vérifications plus poussées des notes de calcul MRB nécessitent de recourir à des calculs automatiques parallèles * :

- par des programmes de réseaux de poutres (cf. PRP 75);
- ou par la méthode des éléments finis (cf. PEF 76);
- ou par analogie électrique (cf. MAN 77).

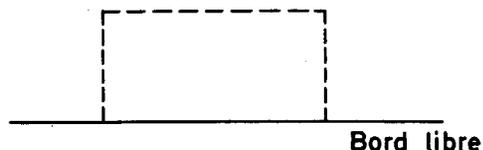
Ces calculs parallèles peuvent n'être que partiels ou simplifiés si on le désire.

Il est aussi possible, dans certains cas, d'apprécier la validité de certains résultats par analogie avec un calcul précédemment effectué pour un tablier suffisamment semblable.

(
(
(
)

De même que pour les calculs de ponts-types (cf. § 8,64), le choix d'une méthode de vérification plus ou moins poussée doit dépendre des particularités de l'ouvrage et de la disponibilité de précédents suffisamment semblables (les sondages définis ici ne nécessitent que de disposer de tables numériques publiées).

Le paragraphe G 2 "Recoupements dans les résultats de M.R.B" définit une méthode applicable non seulement à des ponts-dalles armés ou précontraints ayant des lignes d'appui parallèles ou presque parallèles, mais encore à toutes sortes de dalles calculées par M.R.B., pourvu que l'on puisse trouver des lignes droites qui coupent la dalle en des points où le moment varie régulièrement ; le contre-exemple en serait une dalle reposant sur 3 lignes d'appui formant 3 côtés d'un quadrilatère (fig. ci-dessous); en effet, dans ce cas, une ligne droite coupant la dalle passerait assez près d'un point d'appui, donc dans une zone où le moment varie rapidement sur de très courtes distances.



* La vérification parallèle à l'aide d'essais sur modèle réduit, qui serait théoriquement concevable, est à éliminer en raison des possibilités de calcul automatique.

Cette méthode est extensible aux bandes courbes moyennant certaines adaptations ; en particulier, le moment dû aux charges permanentes sera plus difficile à calculer parce qu'il faudra prendre en compte la distance de chaque noeud à la ligne de coupure.

Le paragraphe G 3 "Sondages dans les résultats MRB par un calcul parallèle" s'applique en principe aux seuls ponts-dalles biais symétriques ayant de une à trois travées, les lignes d'appui étant parallèles. On peut encore l'appliquer moyennant certaines approximations au cas des ponts-dalles peu dissymétriques et/ou dont les lignes d'appui sont de directions voisines mais non parallèles.

Ces sondages pourront être effectués essentiellement pour des charges uniformément réparties telles que la charge permanente ou la charge A (L) appliquée sur une travée ; on peut également effectuer de tels sondages pour vérifier l'effet d'une charge d'exploitation différente (par exemple le char Mc 120) sur certains points de la dalle ; on peut encore en faire pour vérifier l'effet d'un chargement équivalent à une précontrainte, au prix de calculs plus ou moins longs selon la géométrie de l'ouvrage et l'uniformité plus ou moins poussée du chargement représentant la précontrainte.

G 1,2 - Vérifications préalables indispensables dans tous les cas :

- (Dans tous les cas il y a lieu, bien évidemment, d'effectuer les)
(vérifications préalables selon les règles applicables à tous les programmes)
(de calcul automatique du S.E.T.R.A., rappelées au § 8,21 du présent document.)
Ces vérifications peuvent dans le cas du programme MRB, être effectuées au vu, soit du bordereau de commande lui-même, soit des calculs manuels préliminaires (par exemple pour les données particulières relatives au calcul des traverses supérieures des portiques biais), soit de la représentation du bordereau des données sur la note de calcul (par exemple pour les représentations graphiques des cas de chargement).

Le dossier MRB-BP 70 donne au § 2 "Construction du modèle" de la pièce 1.2 "Les programmes d'application" des conseils pour la construction du modèle. Les pièces 1.4 et 1.6 commentent les bordereaux des données. Dans ce qui suit nous commentons les données qui dans le cas du MRB donnent lieu aux choix les plus délicats.

G 1,21 - On doit s'assurer que les éléments du modèle de calcul (maillage, nombre et emplacements des appuis...) ont été choisis de manière à approcher au mieux dans le sens de la sécurité la structure réelle ; par exemple si le biais de l'ouvrage réel est différent des biais normalisés (15,6 - 20,5 - 29,5 - 37,4 - 41 - 50 - 62,50 gr), on vérifiera :

. si l'angle de biais est approché par défaut, que les portées droites (mesurées perpendiculairement aux lignes d'appui) du modèle de calcul sont au moins égales à celles de l'ouvrage réel ;

. s'il est approché par excès, que les portées biaisées (mesurées parallèlement aux bords libres) du modèle de calcul sont au moins égales à celles de l'ouvrage réel.

G 1,22 - Pour les dalles comportant des encorbellements latéraux, on doit s'assurer que les charges permanentes et éventuellement variables placées sur les encorbellements sont correctement simulées par des couples et des efforts tranchants appliqués aux bords libres.

Si de plus une telle dalle est précontrainte, on vérifiera que les actions verticales et la compression moyenne dues à la précontrainte sont définies en grandeur et étendue de façon conforme à la coupe transversale de l'ouvrage réel (et non à celle de la dalle sans encorbellements traitée par l'ordinateur).

G 1,23 - La densité de charge permanente doit tenir compte de façon réaliste du poids des superstructures en phase finale (rechargements compris).

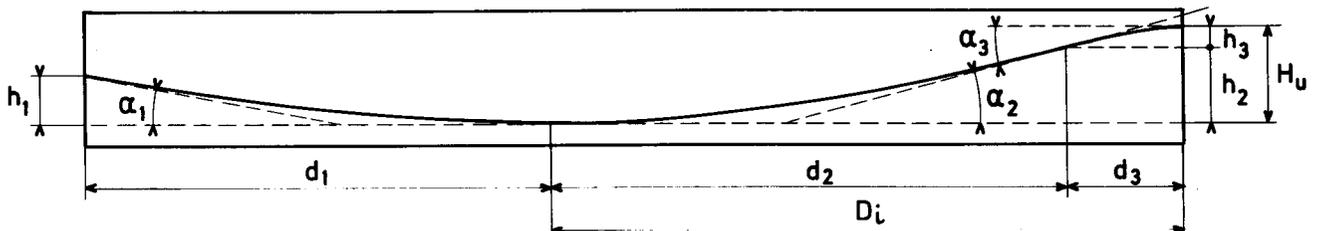
G 1,24 - Pour les ouvrages en béton précontraint, la précontrainte (longitudinale ou transversale) est représentée par un effort normal unitaire (données FPL ou FPT) et des charges verticales (forces de poussée au vide, forces d'extrémités et éventuellement couples d'extrémités).

On doit vérifier notamment :

. que l'ensemble des actions verticales de la précontrainte forme un système équivalent à zéro (si tel n'est pas le cas ce sera le plus souvent l'indice d'un oubli des forces et couples d'extrémité),

et que cette représentation de la précontrainte est compatible avec un tracé de câble conforme aux plans d'exécution de la précontrainte, et en tout cas intérieur à la structure avec des enrobages suffisants.

Plus généralement, si les câbles de précontrainte ont un tracé formé d'arcs de paraboles, la détermination et la vérification de la poussée au vide peuvent être conduites comme suit :



La densité de poussée au vide est égale à $\frac{F_i}{R_i}$, F_i , R_i étant respectivement la force de précontrainte par mètre linéaire et le rayon de courbure du câble dans la section étudiée. Pour chaque tronçon de câble numéroté i , assimilé à un arc de cercle ou de parabole, $\frac{F_i}{R_i}$ est constant,

si, l'on prend F_i égal à la moyenne des forces de précontrainte aux extrémités du tronçon. La poussée au vide par mètre de largeur est donc égale à

$$\int_0^{s_i} \frac{F_i}{R_i} ds = \frac{F_i}{R_i} s_i, s_i \text{ étant la longueur du tronçon de câble considéré.}$$

.../...

Or $\frac{S_i}{R_i}$ est l'angle α_i , en radian, des tangentes aux deux extrémités d'arc de parabole. La poussée au vide par mètre de largeur P_i est donc égale à $\frac{F_i}{R_i} s_i = F_i \alpha_i = \frac{2 F_i h_i}{d_i} = \frac{2 F_i H_u}{D_i}$ (les angles étant faibles peuvent être remplacés par leurs tangentes) ; dans ces expressions h_i et d_i sont respectivement la différence de cotes et la distance des extrémités du tronçon i de câble considéré, et H_u la hauteur utile.

G 1,25 - On doit vérifier que les cas de charge définis par les données sont exactement représentés, bien choisis et suffisants. Ces vérifications seront plus faciles au vu de la présentation graphique de chaque chargement étudié.

Matériellement, la vérification pourra utilement porter sur la bonne prise en compte des coefficients réglementaires non incorporés au programme de calcul (pondération ou non, majoration dynamique ou non, dégressivité transversale), sur la géométrie des charges, sur la position des charges par rapport aux points les plus sensibles aux efforts (angle obtus, bord libre, axe de l'ouvrage, ...).

En ce qui concerne le choix des cas de charge, on devra s'assurer que l'ensemble des cas de charge retenus, dont le nombre doit rester raisonnable pour limiter le coût et le volume de la note de calcul, est suffisamment complet (cf. à ce sujet le § 2.2.3 de la pièce 2.1 et la mise à jour n° 1 du programme M.R.B.-B.P - Pièce 4.5 du dossier SURCH) pour couvrir les charges réglementaires de calcul aux points les plus sollicités de l'ouvrage. On pourra utiliser pour ce contrôle les comparaisons faites entre différentes charges dans les calculs préliminaires ne tenant compte que partiellement du biais, tels que PIPO, PSI.DA ou PSI.DP.

G2 - RECOUPEMENTS DANS LES RESULTATS DE LA NOTE DE CALCULS.

G 2,1 - Exposé de la méthode

G 2,10 - Généralités :

La méthode comporte d'abord un ensemble de recoupements de nature statique consistant à vérifier la compatibilité des réactions d'appui et de certaines sollicitations d'une part, avec les charges d'autre part. Elle comporte ensuite des recoupements de nature élastique tendant à vérifier la compatibilité des champs de sollicitation, d'une part entre eux, d'autre part avec les charges, et dans tous les cas avec le champ des déformations

Ces divers recoupements sont à effectuer séparément par cas de charge (par exemple pour une travée chargée par A (ℓ), et ne comportent pas de contrôle direct des surfaces d'influence.

a - En ce qui concerne la précontrainte, on peut considérer que c'est un cas de charge particulier ; il est d'ailleurs entré dans MRB-BP comme un ensemble de forces verticales aux noeuds du maillage, et de la force moyenne horizontale. La précontrainte présente 2 particularités :

- les forces verticales sont souvent différentes à chaque noeud du maillage,

- les résultats donnés par MRB-BP sont les contraintes sur les faces supérieure et inférieure et non les moments.

La première particularité a pour seule conséquence d'allonger les calculs ; cependant à la fin du § G 2,12 une méthode de calculs plus simple relative à la précontrainte est présentée.

A propos de la seconde particularité, il y a lieu de noter que l'on peut très facilement retrouver les moments à partir des contraintes précitées. Considérons par exemple les moments fléchissants et les contraintes normales suivant la direction Ox ; en appliquant les formules de flexion composée à une poutre fictive de fibres parallèles à Ox et de la largeur unité et en remarquant que l'aire de sa section est l'épaisseur h de la plaque, le module d'inertie $\frac{h^2}{6}$, nous avons :

$$\sigma_{s,x} = \frac{F}{h} + 6 \frac{M_x}{h^2}$$

$$\sigma_{i,x} = \frac{F}{h} - 6 \frac{M_x}{h^2}$$

$$\text{D'où } M_x = \frac{h^2}{12} (\sigma_{s,x} - \sigma_{i,x})$$

On obtiendrait des formules semblables pour My et Mxy.

b - En ce qui concerne le choix des cas de charge, il est souhaitable, dans le cas d'une dalle en béton précontraint, de considérer pour commencer l'état à vide, c'est-à-dire un cas de charge comprenant la charge permanente et la précontrainte.

Comme indiqué précédemment, les calculs relatifs à la précontrainte peuvent être longs ; plutôt que de renoncer à toute vérification il vaut mieux vérifier, par recouvrements, la seule charge permanente ; il est en effet très improbable que la note de calculs soit fautive en ce qui concerne la précontrainte si les moments de charge permanente et les données du calcul relatives à la précontrainte sont exacts. Dans le cas de dalle en béton armé, évidemment, le cas de charge correspondant à la charge permanente est à retenir.

Pour procéder à une vérification moins fragmentaire, on peut au moins effectuer, en sus, des recouvrements relatifs aux chargements uniformes d'une seule travée (charge A (l)), voire à certaines charges roulantes (à l'échelle d'un tablier de pont leur concentration n'est pas telle qu'elle empêche une vérification par recouvrements).

G 2,11 - Principe des recouvrements statiques.

G 2,111 - Il convient d'abord, dans chaque cas de charge, d'effectuer un recouvrement statique global consistant à vérifier que la charge appliquée doit être équilibrée par les réactions d'appui : précisons qu'il faut vérifier non seulement que la somme des réactions d'appui est égale à la charge appliquée, mais encore que la résultante de celle-ci passe par le centre de gravité de la charge ou, ce qui revient au même, que les sommes des moments des réactions d'appui et de la charge appliquée, par rapport à 2 axes Ox, Oy parallèles au feuillet moyen sont nulles.

Il est rappelé à ce sujet que pour les charges réparties définies automatiquement par le programme (charge permanente, charge A (2)), des forces égales à celles des autres noeuds du maillage sont appliquées aux noeuds du maillage situés sur la ligne d'appui.

G 2,112 - Après cette opération préliminaire, on procède à des recoupements avec certaines sollicitations. Pour cela on effectue des coupures suivant des lignes droites passant par des points du maillage où les composantes du tenseur de flexion varient régulièrement ; dans un pont biais à une ou plusieurs travées, des lignes satisfaisant à cette condition sont des parallèles aux directions des appuis passant au voisinage du milieu des portées biaises. Plus précisément on pourra généralement opérer comme suit :

- dans le cas de pont symétrique ou peu dissymétrique, des coupures dans la moitié gauche du pont suffiront,

- dans la travée de rive on effectuera une coupure parallèle à la ligne d'appui extrême,

- dans une travée centrale, si les lignes d'appui ne sont pas parallèles, il sera souvent judicieux de prendre un angle légèrement différent qui simplifie les calculs (45° par exemple).

Si les premiers recoupements ne donnent pas des résultats satisfaisants, il y aura lieu d'augmenter le nombre de lignes de coupures, en tenant compte de ce qui est indiqué en bas de cette page et page 86.

Un recoupage ment consiste à vérifier l'équilibre de la partie située à gauche d'une coupure. Elle est soumise :

- aux réactions d'appui

- aux charges appliquées (charge permanente, charge d'exploitation, poussée au vide due à la précontrainte, force verticale et couple éventuel aux ancrages)

- aux forces et moments répartis le long de la coupure (efforts internes dans la section de béton) exercés par la partie droite sur la partie gauche.

La résultante générale et le moment résultant de l'ensemble de ces forces et moments doivent être nuls. Dans cet équilibre les pertes de précontrainte sont négligées, l'effort normal n'intervient pas, et la réaction d'appui tient compte de l'effet hyperstatique de la précontrainte ; l'équilibre reste possible même si les forces verticales de précontrainte aux ancrages ont été omises, pourvu que les réactions d'appui soient introduites selon la même hypothèse.

Pour le calcul de la résultante des sollicitations de flexion, on pourrait songer à calculer dans un système d'axes $Ox'y'z$ (Ox' étant parallèle à la coupure) les composantes du tenseur flexion en différents points. Mais cela obligerait à utiliser plusieurs fois la formule de changement d'axes ; il est plus simple de passer par le moment moyen, comme indiqué dans l'exemple du paragraphe 2,21.

Des coupures perpendiculaires aux bords libres sont également possibles. Elles permettent des calculs à la fois plus simples et assez précis dans le cas où elles ne coupent pas les lignes d'appui.

On peut aussi effectuer des coupures passant au voisinage des lignes d'appui, ou sur les lignes d'appui elles-mêmes. Pour de telles coupures, la précision du recouplement sera moins grande que pour les lignes de coupure passant par des points de maillage où les composantes du tenseur varient régulièrement. Cependant la précision des recouplements est nettement améliorée si on affine les calculs sur les deux points suivants :

- dans le calcul de la moyenne des moments le long de la coupure : pour les moments fléchissants longitudinaux et transversaux au droit des points d'appui, les valeurs données par la note de calcul MRB, corrigées en fonction de la dimension de l'appareil d'appui, ne sont pas des valeurs ponctuelles mais des valeurs moyennes sur une longueur égale au diamètre de l'appui augmenté de deux fois l'épaisseur de la dalle (cf pièce 1.1 § 4.2.3 Etude de la flexion au droit d'une force concentrée, et pièce 2.2.3 p. 9) ;

- dans le calcul des moments des réactions d'appui au droit de la coupure, il faut compenser le fait que, pour l'évaluation des moments sur appui, la charge relative à une réaction d'appui est répartie par le programme MRB sur l'aire d'un cercle ayant pour rayon (R) 0,066 fois la largeur EDALLE de la dalle ; lorsque la coupure passe par un point d'appui de réaction P, la correction à effectuer consiste à écrêter le moment dû aux réactions et charges, de

$$\Delta M = \frac{P}{2} \cdot \frac{4}{3\pi} R \approx 14.10^{-3} P \cdot EDALLE.$$

G 2,12 - Les deux modes d'usage des recouplements statiques

On peut effectuer un tel recouplement :

- soit pour vérifier la convenance du modèle utilisé, sachant qu'il reflète imparfaitement la réalité (par exemple les lignes d'appui n'ont pas exactement la distance et l'angle de biais des lignes d'appui de l'ouvrage à construire)

- soit pour vérifier que les opérations mathématiques ont été correctement exécutées par l'ordinateur, en particulier que l'inversion de matrice et les troncatures effectuées dans les développements en série n'ont pas perturbé le résultat.

On obtiendra évidemment une meilleure concordance dans le second cas. Les causes en sont d'ailleurs multiples, et en voici un exemple important. Considérons la charge permanente à l'about de la dalle. Théoriquement il aurait fallu, lors de la modélisation, affecter à chaque noeud du maillage voisin d'un about une charge différente correspondant à une aire de dalle élémentaire variable. Pratiquement, dans un but de simplification, on charge tous les noeuds du maillage par la même charge ; en effet, ou bien les appuis sont rapprochés et une charge appliquée passe tout droit dans l'appui, ou bien ils sont éloignés et les "moments de fuite" introduisent sur les moments de flexion des erreurs plus importantes que ce chargement simpliste. Cependant les réactions d'appui sont, elles, nettement modifiées. D'autre part la convenance du modèle peut être vérifiée directement, au moins en première approche (cf G 1,2).

En conséquence ce sont donc des recouplements du second type que nous détaillons ci-après en G 2,2 ; l'on pourra remarquer que l'écart relatif entre les chiffres à comparer reste alors inférieur à 2 %.

.../...

Nous donnerons cependant quelques indications sur les vérifications du 1er type, indications valables pour les ponts-dalles comportant des lignes d'appuis biaises et de directions voisines.

- Quand on considère les charges réparties effectivement appliquées sur l'ouvrage telles que la charge permanente, la charge A (ℓ), on risque d'aboutir à un mauvais recouplement puisque, comme indiqué ci-dessus, les réactions d'appui calculées par MRB ne sont généralement pas celles qui correspondent à la réalité. On peut cependant utiliser la représentation par charge répartie (et non par un ensemble de charges concentrées) pour calculer le moment dû aux charges appliquées, mais à la condition de ne pas trop s'écarter du chargement introduit dans MRB. Or en général aux noeuds du maillage situés sur les lignes d'appuis extrêmes ont été appliquées, lors de la modélisation MRB, des forces égales à celles des autres noeuds du maillage. Il faudra donc en ce cas considérer, lors du recouplement, que la dalle a un about fictif de longueur biaise égale à une demi-maille (la longueur de l'about réel pouvant être différente). En d'autres termes, ce type de recouplements est valable à condition d'en disjoindre la validité de la représentation de la charge due à l'about.

- Quand le modèle du calcul prend en compte une portée ou un biais légèrement différent de celui de la dalle réelle, l'écart relatif entre les 2 chiffres à comparer risque d'atteindre couramment 10 %. Il sera alors nécessaire de réapprécier la modélisation pour pouvoir conclure.

- Lorsque l'on étudie la précontrainte, l'équilibre statique du câble impose que le moment, par rapport à une ligne perpendiculaire au plan vertical entourant le câble, de toutes forces verticales représentant les effets de la partie gauche du câble (plus éventuellement le couple à l'ancrage) soit égal au produit de la force de précontrainte en cette section par l'excentricité e . Dans le cas particulier mais fréquent où tous les câbles sont déduits d'un câble unique par translation biaise parallèle aux lignes d'appui (supposées avoir même direction), l'excentricité e de tous les câbles suivant une ligne de coupure telle que I (cf. figure p 102 est la même, et le moment par rapport à cette ligne droite est :

$$F_{\text{tot}} e \cos \alpha$$

F_{tot} étant la force totale de précontrainte des câbles rencontrés par cette coupure,

α l'angle de la ligne de coupure avec la perpendiculaire aux bords libres.

On peut donc procéder ainsi :

. vérifier que le moment des forces verticales appliquées aux noeuds du maillage à gauche de la coupure est égal à la valeur obtenue par la formule ci-dessus ;

. au cas où cette vérification globale ne serait pas satisfaisante, procéder à une vérification détaillée des forces introduites en données pour représenter la précontrainte.

.../...

G 2,13 - Principe des recoupements élastiques :

Ces recoupements peuvent utilement compléter les recoupements statiques définis ci-dessus, pour vérifier d'une part les moments au droit des appuis intermédiaires (qui sont des points critiques) et d'autre part la compatibilité des résultats MRB avec une hypothèse élastique. Un nombre limité de tels recoupements suffit pour atteindre ces buts. Ils sont dans tous les cas basés sur l'approximation des différences finies; une approximation à cet égard est ici inévitable, du fait que l'application pratique doit être faite sur la base du maillage du calcul MRB ; on a vérifié qu'elle était très acceptable.

Les possibilités de tels recoupements sont très grandes. On présente ci-après une sélection de quelques recoupements particulièrement simples et utiles. Des formules permettant d'améliorer la précision ou d'effectuer d'autres recoupements peuvent être trouvées, par exemple dans l'ouvrage "Theory and analysis of plates - classical and numerical methods" de Rudolf Szilard, édité par Prentice - Hall.

Les recoupements présentés ci-après sont effectués dans les champs de moments par référence aux champs de déformation, et dans les champs de déformation par référence aux charges appliquées. De tels recoupements sont d'autant plus intéressants que le programme MRB calcule de façon indépendante ces différents champs, à partir de tables précalculées des coefficients d'influence correspondants (cf pièce 1.1 § 4 du dossier-pilote).

G 2,131 - La première série de recoupements consiste à recalculer en des points arbitrairement choisis les composantes du tenseur de flexion, à partir des déformations (flèches) aux noeuds voisins. Pour la lisibilité des formules, nous désignerons ici par i et j (au lieu de I et J) les numéros des rangs et colonnes du maillage.

En notant :

. w (i,j) la déformation de la dalle au noeud (i,j)

. $D = \frac{E h^3}{12 (1-\nu^2)}$ la rigidité de la dalle (h étant l'épaisseur et ν le Coefficient Poisson)

. λ = la longueur des mailles,

le tenseur flexion

$$\left\{ \begin{array}{l} M_x = -D \left(\frac{\delta^2 w}{\delta x^2} + \nu \frac{\delta^2 w}{\delta y^2} \right) \\ M_y = -D \left(\frac{\delta^2 w}{\delta y^2} + \nu \frac{\delta^2 w}{\delta x^2} \right) \\ M_{xy} = -(1 - \nu) D \frac{\delta^2 w}{\delta x \delta y} \end{array} \right.$$

peut être approché par différences finies par les expressions suivantes :

.../...

$$\left\{ \begin{aligned} M_x &= -\frac{D}{\lambda^2} \left[(w(i+1,j) - 2w(i,j) + w(i-1,j)) + \nu [(w(i,j+1) - 2w(i,j) + w(i,j-1))] \right] \\ M_y &= -\frac{D}{\lambda^2} \left[(w(i,j+1) - 2w(i,j) + w(i,j-1)) + \nu [(w(i+1,j) - 2w(i,j) + w(i-1,j))] \right] \\ M_{xy} &= -\frac{(1-\nu)D}{4\lambda^2} [w(i+1,j+1) - w(i+1,j-1) - w(i-1,j+1) + w(i-1,j-1)] \end{aligned} \right.$$

Ce recouplement permet non seulement de vérifier la compatibilité des moments et des déformations figurant dans la note de calcul, mais aussi la compatibilité entre elles des différentes composantes du tenseur de flexion puisqu'elles procèdent d'une même fonction de déformation.

Il est rappelé que les calculs de déformations par le programme MRB sont effectués avec un module de déformation différé E_v pour l'état à vide (charge permanente seule pour les calculs MRB-BA, charge permanente + précontrainte pour les calculs MRB-BP) et avec un module de déformation instantané $E_i = 3 E_v$ pour le calcul de la déformation sous les charges.

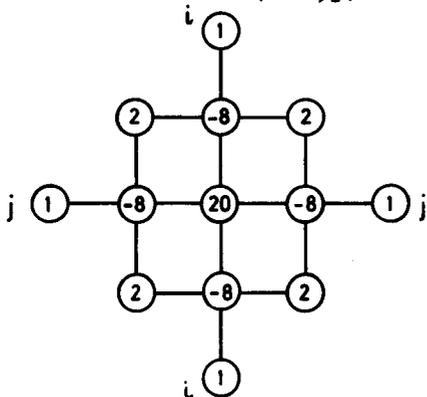
Les calculs de compatibilité entre le champ de déformation et les champs des composantes du tenseur de flexion dans un cas de charge quelconque d'étude sont donc à effectuer en séparant l'effet de la charge permanente de celui des charges variables.

G 2,132 - La deuxième série de recouplements consiste à recalculer en des points arbitrairement choisis à l'écart des bords et des points d'appui, la charge appliquée, à partir des déformations aux noeuds avoisinants.

$$\text{L'équation théorique } p(x,y) = D\Delta\Delta w = D \left(\frac{\delta^4 w}{\delta x^4} + 2 \frac{\delta^4 w}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta^4 w}{\delta y^4} \right)$$

peut être approchée par différences finies par l'expression suivante :

$$p(i,j) \approx \frac{D}{\lambda^4} \left\{ 20 w(i,j) - 8 [w(i+1,j) + w(i-1,j) + w(i,j+1) + w(i,j-1)] + 2 [w(i+1,j+1) + w(i-1,j+1) + w(i+1,j-1) + w(i-1,j-1)] + w(i+2,j) + w(i-2,j) + w(i,j+2) + w(i,j-2) \right\};$$



le schéma ci-contre reproduit les valeurs des coefficients affectant les valeurs des déformations aux différents points.

Pour l'application pratique, la remarque finale du § G 2,131 reste valable.

G 2,2 - Exemples partiels d'application.

Pour les recouvrements statiques, on considère un pont à 3 travées représenté figure 1 (voir plus loin) ; les coupures ont été choisies ainsi :

- la 1ère coupure passe par le point $J = 10, I = 1$, et est parallèle à la 1ère ligne d'appui,

- la 2ème coupure passe par le point $J = 25, I = 1$, et fait un angle de 45° avec les bords libres.

Le cas de charge correspond à la charge permanente $1,867 \text{ T/m}^2$ représentée par des forces de $0,918 \text{ T}$ aux noeuds.

G 2,21 - Coupure I (voir figure)

G 2,211 - Relevé et calculs éventuels des valeurs des moments sur la coupure :

Les calculs éventuels consistent à interpoler linéairement les valeurs des moments pour chaque valeur de I si la coupure ne passe pas exactement par les noeuds.

Exemple : La coupure passe entre les noeuds $J = 12, I = 4$ et $J = 13, I = 4$ à la distance $0,4$ maille du premier noeud (Voir figure 1).

Nous relevons pour les noeuds $(12,4)$ et $(13,4)$ respectivement, les valeurs des moments fléchissants longitudinaux M_y

$$12,03 \text{ Tm/m et } 10,64 \text{ Tm/m}$$

Le Moment M_y sur la coupure est donc

$$M_y = 0,4 (10,64 - 12,03) + 12,03 = 11,47 \text{ Tm/m.}$$

Nous procédons de la même manière pour les moments M_x, M_{xy} , ainsi que pour les autres valeurs de I chaque fois que la coupure ne passe pas exactement par un noeud du maillage.

En ce qui concerne les points sur les bords libres, le calcul se fait par extrapolation linéaire à partir de deux points voisins immédiats sur la coupure.

Exemple : Soient 2 valeurs de moment en 2 points voisins

$(J = 10, I = 2 \text{ et } J = 10, I = 3) : 13,12 \text{ Tm/m et } 12,46 \text{ Tm/m.}$

La valeur extrapolée au point $(J = 10, I = 1)$ est alors :

$$M_y = 12,67 + 2 (13,12 - 12,67) = 13,57 \text{ Tm/m.}$$

Nous procédons de la même manière sur le moment M_{xy} .
Le moment M_x est nul au bord libre.

En ce qui concerne l'autre bord libre, il faut d'abord noter que la coupure ne rencontre pas ce bord sur un noeud du maillage. Il est alors plus simple (et suffisant puisque les moments y sont faibles) d'extrapoler à partir des valeurs précédemment trouvées ; le moment longitudinal en ce point est donc :

$$- 1.18 + (-1.18 - 0.58) = - 2.94$$

.../...

Nous obtenons ainsi le tableau suivant (moments le long de la coupure):

I =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
M _y	13,57	13,15	12,46	11,47	10,16	8,56	6,64	4,86	3,32	1,96	0,58	- 1,18	- 2,94
M _x	0	0,44	0,44	0,61	0,83	1,26	1,87	2,50	2,84	2,73	2,12	1,11	0
M _{xy}	2,78	3,35	3,72	3,99	4,13	4,10	3,68	2,82	1,60	0,28	- 0,96	- 2,01	- 3,06

G 2,212 - Valeurs moyennes des moments le long de la coupure. Intégration numérique par la méthode de Simpson :

Nous avons dans ce cas 13 points. Δ étant l'intervalle de deux points consécutifs, la formule de l'intégration de Simpson donne alors :

$$M = \frac{\Delta}{3} \cdot \frac{1}{12\Delta} \sum_{i=0}^5 (M_{2i+1} + 4M_{2i+2} + M_{2i+3})$$

$$= \frac{1}{36} \sum_{i=0}^5 (M_{2i+1} + 4M_{2i+2} + M_{2i+3})$$

Nous obtenons donc :

$$M_{ym} = 6.45 \text{ Tm/m}$$

$$M_{xm} = 1.36 \text{ Tm/m}$$

$$M_{xym} = 2.06 \text{ Tm/m.}$$

On peut également utiliser la méthode des trapèzes, qui donne des résultats voisins.

G 2,213 - Valeur des moments sur la coupure après la rotation sur le référentiel attaché à la coupure :

Angle de la coupure :

$$\alpha = - \text{Arctg} \left(\frac{4}{5} \right) = - 38^{\circ} 66$$

Valeur moyenne du moment M_y , après la rotation (Formule (4), page 9 de la pièce 1.2 de M.R.B.B.P. 70) :

$$M_y = 6,48 \text{ Tm/m}$$

Longueur de la coupure :

$$L = 8,415 / \cos \alpha = 10,776 \text{ m}$$

Moment total \mathcal{M}_y , sur la coupure :

$$\mathcal{M}_y = 6,48 \times 10,776 = 69,83 \text{ Tm.}$$

.../...

G 2,214 - Calcul des Moments au droit de la coupure, dus aux réactions d'appui et à la charge permanente :

a - Moment M_r dû aux réactions d'appui ①, ②, ③ :

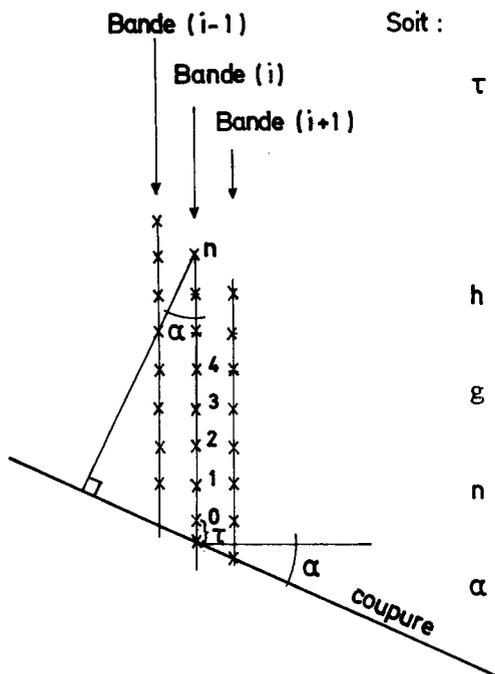
N° des Réactions d'appui	Réactions d'appui en Tonnes	Bras de levier en mètres
1	13,97	$0,701 \times 8,8 \cdot \cos \alpha$
2	40,11	$0,701 \times 8,8 \cos \alpha$
3	14,76	$0,701 \times 8,8 \cos \alpha$

Nous obtenons donc :

$$M_r = 331,72 \text{ Tm}$$

b - Moment M_g dû à la charge permanente :

Le calcul se fait par bandes dont les charges sont concentrées aux noeuds conformément au processus de calcul de M.R.B.



Soit :

τ = fraction de la maille entre l'intersection de la coupure et le 1er noeud de la bande (voir figure ci-contre).

$$0 < \tau \leq 1$$

$$h = \frac{8.415}{12} = 0,701 \text{ m , longueur d'une maille.}$$

$$g = 1.867 \left(\frac{8.415}{12} \right)^2 = 0.91 \text{ T, charge relative à une maille.}$$

n = nombre de noeuds sur une bande, le 1er noeud étant numéroté 0 (voir figure ci-contre)

α = angle de la coupure (voir figure ci-contre)

$$\text{Tg } \alpha = 0.8$$

La contribution d'une bande courante (i), à l'exception des deux bandes des bords libres sur lesquelles les charges sont de moitié, est alors :

$$M_i = gh \cos \alpha [\tau + (\tau+1) + (\tau+2) + \dots + (\tau+n)] = gh \cos \alpha S_n$$

où $S_n = (\tau + \frac{n}{2})(n+1)$; ceci suppose que les noeuds d'extrémité sont chargés autant que les noeuds courants.

Nous obtenons ainsi le tableau suivant :

Bandes	Moments élémentaires des bandes
1	$-\frac{gh}{2} \cos \alpha \quad 5 \times 9$
2	$- gh \cos \alpha \quad 4,8 \times 9$
3	$- gh \cos \alpha \quad 4,6 \times 9$
4	$- gh \cos \alpha \quad 4,4 \times 9$
5	$- gh \cos \alpha \quad 4,7 \times 10$
6	$- gh \cos \alpha \quad 5 \times 9$
7	$- gh \cos \alpha \quad 4,8 \times 9$
8	$- gh \cos \alpha \quad 4,6 \times 9$
9	$- gh \cos \alpha \quad 4,4 \times 9$
10	$- gh \cos \alpha \quad 4,7 \times 10$
11	$- gh \cos \alpha \quad 5 \times 9$
12	$- gh \cos \alpha \quad 4,8 \times 9$
13	$-\frac{gh}{2} \cos \alpha \quad 4,6 \times 9$

Nous trouvons ainsi :

$$M_g = - 260,82 \text{ Tm.}$$

G 2,215 - Vérification de l'équilibre des moments :

Nous avons pour les charges permanentes et les réactions d'appui :

$$M_r + M_g = 331.72 - 260.82 = \underline{70,90 \text{ Tm}}$$

Pour les moments fournis par le calcul :

$$M_y = \underline{69,83 \text{ Tm}}$$

L'équilibre est assez bien vérifié.

G 2,22 - COUPURE II (Voir figure)

G 2,221 - Relevé des valeurs des moments au droit de la coupure :

Ce relevé conduit à un tableau analogue à celui du § G 2,211

G 2,222 - Valeurs moyennes des moments le long de la coupure :

On obtient, à la suite d'une intégration par la méthode de Simpson :

$$M_{ym} = 13,50 \text{ Tm/m} ; M_{xm} = 1,67 \text{ Tm/m} ; M_{xym} = 3,12 \text{ Tm/m.}$$

G 2,223 - Valeurs moyennes des moments le long de la coupure après la rotation du référentiel :

En ce cas $\alpha = 45^\circ$, et par suite $M_{y'} = 10,71 \times 8,415 / \cos 45^\circ = 127,46 \text{ Tm}$

G 2,224 - Moments dus aux réactions d'appui et à la charge permanente :

a - Moment dû aux réactions d'appui :

On établit un tableau analogue celui du § G 2,214 a, en prenant en compte 7 réactions d'appui. On obtient : $M_r = 1906,90 \text{ Tm}$

b - Moment dû à la charge permanente :

On établit un tableau analogue à celui du § G 2,214 b, avec des valeurs de $(\tau + \frac{n}{2}) (n + 1)$ tenant compte de la position de la coupure.

Nous obtenons ainsi le moment total dû à la charge permanente :

$$M_g = - 1777,06 \text{ Tm}$$

G 2,225 - Vérification de l'équilibre :

Nous avons ainsi :

$$M_{y'} = \underline{127,46 \text{ Tm}}$$

$$M_r + M_g = 1906,90 - 1777,06 = \underline{129,84 \text{ Tm}}$$

Remarque - Dans cet exemple nous avons repris entièrement le calcul de toutes les forces appliquées à gauche de la coupure II, alors que l'on aurait pu envisager de reprendre les résultats obtenus pour la coupure I, en particulier le moment $M_{y'}$, ainsi obtenu. Cette dernière manière de procéder est simple (et n'entraîne donc pas de risque d'erreur) si les lignes d'appui et aussi les lignes de coupure sont parallèles ; elle est à conseiller si de plus de nombre de travées est important (supérieur à 3) ; en effet dans ce cas elle permet de ne pas procéder à la somme algébrique de deux nombres M_r et M_g de signes opposés et de valeurs absolues élevées.

.../...

G 2,23 - Recouvrements élastiques dans les champs de flexion à partir du champ de déformation :

La photoréduction fig 2 in fine représente la déformation d'une dalle à 2 travées biaises à 37,4 grades de rigidité $D = \frac{E_p I}{1-\nu^2} = 9866 \text{ tm}^2/\text{m}$ sous l'action d'une charge permanente de 1.7 t/m^2 .

Le calcul par différences finies du tenseur flexion pour quelques points donne les résultats suivants :

Coordonnées (i,j)	Point étudié (réaction d'appui)	Calcul par différences finies			Valeurs lues dans la note de calcul		
		Mx transversal	My longitudinal	Mxy torsion	Mx	My	Mxy
(3.4)	Appui d'extrémité près du bord (17,7t)	- 3,90	- 2,05	- 0,95	- 3,5	- 1,6	- 1,0
(3.14)	En travée près du bord	0,66	14,41	7,35	0,7	14,4	7,4
(3.22)	Appui (116,2t)	- 20,42	- 31,36	2,42	- 17,8	- 28,6	2,4
(4.22)	Entre appareils d'appui	- 7,97	- 20,12	2,49	- 7,2	- 21,9	2,5
(7.10)	Appui d'extrémité sur l'axe (29,43 t)	- 5,77	1,78	1,85	- 5,5	2,0	1,8
(7.14)	En travée sur l'axe	0,96	9,99	6,15	0,9	10,0	6,2
(7.28)	Appui sur l'axe (65,89t)	- 13,39	- 13,62	- 5,45	- 12,8	- 13,0	- 5,6

On remarquera une parfaite concordance des résultats des calculs de vérification et des résultats de la note de calcul en travée, et une concordance un peu moins bonne au droit des points d'appui. Cette dernière concordance pourrait être affinée, comme indiqué en G 2,13, en utilisant des expressions plus précises ; néanmoins il subsistera nécessairement une certaine différence liée à la grandeur de la réaction d'appui et sa concentration qui est prise en compte avec précision par le seul programme MRB.

G 2,24 - Recouvrement élastique dans le champ de déformation, par référence aux charges appliquées :

L'expression donnée en G 2,132 permet, dans la même note de calcul, la comparaison suivante :

Point	Charge calculée à titre de vérification	Charge répartie réelle
(7 - 14) Milieu de travée centrale	1,68 t/m ²	1,71 t/m ²
(10 - 3) Extérieur à la dalle	0,11 t/m ²	0

Les différences, plus sensibles au voisinage des appuis, correspondent à l'approximation que présente la méthode des différences finies, pour les dérivées d'ordre élevé dans des zones de variation peu régulière.

.../...

G 3 - SONDAGE DANS LES RESULTATS MRB PAR UN CALCUL PARALLELE.

Le but de tels sondages peut être double :

- se substituer à une partie notable des recoupements qui précèdent, ou les compléter là où ils ne sont pas possibles (par exemple on ne peut vérifier $p(x,y)$ au droit d'un appui)

- permettre en cas d'écart notable entre la note de calcul MRB et les recoupements, d'aider à élucider la cause et le caractère représentatif de cet écart.

Pour l'un et l'autre buts, ces sondages ont l'avantage de relier directement les données de base du projet aux valeurs finales du calcul.

G 3,1 - Principe et modalités du sondage

Il s'agit de comparer les résultats du calcul MRB avec ceux donnés par une autre méthode, à savoir la méthode des différences finies, que l'on peut pour les ponts à plusieurs travées trouver dans les tableaux et les abaques de l'ouvrage intitulé "Plaques biaises à travées solidaires" de MM. Schleicher et Wegener (S.W.) et édité par Dunod (Paris 1970).

Pour un pont à une travée on utilisera les abaques de MM. RUSCH et HERGENRODER "Einflussfelder der Momente schiefwinkliger Platten" édité par la "Technische Hochschule" de München ; des extraits de ces abaques figurent dans la pièce 2.1.4 du dossier-pilote MRB.70.

Dans les deux cas, le sondage n'a qu'un caractère approché. Dans le premier ouvrage, les deux auteurs ont fourni des éléments de calcul statique pour différentes configurations de ponts-dalles à deux et à 3 travées symétriques, appuyés sur 9 points d'appuis par ligne d'appui. En ce qui concerne le cas du pont dalle à 3 travées calculé par MRB qui nous sert d'exemple et pour lequel nous avons procédé à un recoupement manuel au paragraphe G2, nous avons les configurations suivantes (page 40, ouvrage cité) :

$l_1 : l_2 : l_3$	$\eta = 2b/l_1$
1 : 1,2 : 1	2/3 1 1,5
1 : 1,4 : 1	2/3 1 1,5
1 : 1,6 : 1	2/3 1 1,5

l_1, l_2, l_3 : étant les portées biaises des différentes travées.

2b : largeur biaise de la dalle

Pour ces configurations, les auteurs ont fourni, pour des biais géométriques variant de 20° à 90°, les coefficients d'influence k_1, k_2 et le biais mécanique ψ sous charge répartie sur toute la surface de la dalle, aux points les plus sensibles en travée, sur les bords libres et sur la ligne d'appui intermédiaire (pages 53-68).

Les moments principaux M_1, M_2 seront évalués par :

$$M_1 = k_1 p l_1^2 ; M_2 = k_2 p l_1^2$$

où p est la densité de charge répartie.

Revenons à notre modèle du paragraphe G2.

C'est une dalle à trois travées de biais respectifs de $51,34^\circ$, $53,13^\circ$, $53,13^\circ$ et $51,34^\circ$, de largeur droite de 8,415 m. Les portées biaises moyennes mesurées suivant l'axe médian sont :

$$l_1 = 11,567 \text{ m}, l_2 = 16,824 \text{ m}; l_3 = 13,319 \text{ m}$$

Nous avons donc :

$$l_2/l_1 = 1,454, \quad l_3/l_1 = 1,151 \quad \text{et} \quad \eta = 0,920.$$

Il faudra donc procéder à une interpolation linéaire des abaques de Schleicher-Wegener.

Le sondage sera effectué aux points suivants (voir figure 1) :

- Point A : point le plus sollicité du bord libre de la première travée, du côté de la pile culée. Ce point est situé à 1,97 m de la pile-culée, c'est-à-dire au noeud $J = 13,5$ et $I = 13$ du modèle MRB.

- Point B : point le plus sollicité en travée de la première travée, situé à 3,933 m de la pile-culée, c'est-à-dire au noeud $J = 11,5$ et $I = 7$ du modèle MRB.

- Point C : point le plus sollicité du bord libre de la première travée, du côté de la pile intermédiaire, situé à 6,48 m de la pile-culée, c'est-à-dire au noeud $J = 10,5$ et $I = 1$ du modèle MRB.

- Points D et E : appuis extrêmes (appuis 4 et 7) de la ligne d'appui intermédiaire.

- Point F : point le plus sollicité du bord libre de la deuxième travée, situé à 5,258 m de l'intersection du bord libre et de la ligne d'appui intermédiaire. Ce point correspond au noeud $J = 34,5$ $I = 13$ du modèle MRB.

- Point G : Centre de la travée intermédiaire.

a - Pour illustrer la méthode d'interpolation préconisée ci-dessus, nous donnons le calcul des moments en l'un des points sus-mentionnés, à savoir le point B, sous l'effet de la charge permanente ($p = 1,867 \text{ t/m}^2$).

Pour ce point, l'ouvrage a la configuration suivante : $l_2/l_1 = 1,454$, $l_3/l_1 = 1$ $\eta = 0,92$, biais géométrique = $\frac{51,34 + 53,13}{2} = 52,24^\circ$

Nous procéderons à trois interpolations linéaires à partir de 4 configurations qui encadrent la configuration de l'ouvrage (page 56 de l'ouvrage cité) :

$$l_2 \text{ et } l_3 = (1,4 \text{ et } 1) l_1 ; \eta = \frac{2}{3} \text{ et } 1$$

$$l_2 \text{ et } l_3 = (1,6 \text{ et } 1,4) l_1 ; \eta = \frac{2}{3} \text{ et } 1$$

. Premières interpolations (sur η en gardant les rapports l_1, l_2, l_3 fixes) : coefficient d'interpolation $\frac{0,92 - 2/3}{1 - 2/3} = 0,752$.

Deuxième interpolation (sur l_1, l_2, l_3) : coefficient d'interpolation : $\frac{1,454 - 1,4}{1,6 - 1,4} = 0,270$.

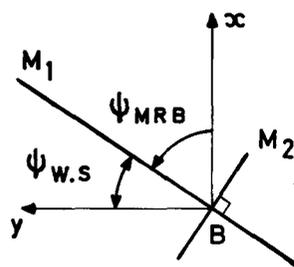
$l_1 : l_2 : l_3$	η	valeurs lues			Premières interpolations			Deuxième interpolation		
		k_1	k_2	$\psi_{W.S.}$	k_1	k_2	ψ_{WS}	k_1	k_2	ψ_{WS}
1 : 1,4 : 1	2/3	0,0525	0,003	17°	0,0525 + (0,0490 - 0,0525) x	0,0045	22,264°	0,0499 + (0,0449 - 0,0499) x	0,0043	20,54°
1 : 1,4 : 1	1	0,0490	0,005	24°	0,752 = 0,0499					
1 : 1,6 : 1	2/3	0,0475	0,003	11°	0,0475 + (0,0440 - 0,0475) x	0,0038	15,888°	0,0486		
1 : 1,6 : 1	1	0,0440	0,004	17,5°	0,752 = 0,0449					

D'où les moments principaux :

$$M_1 = p l_1^2 k_1 = 1,867 \times 11,567^2 \times 0,0486 = 12,140 \text{ tm/m}$$

$$M_2 = p l_1^2 k_2 = 1,867 \times 11,567^2 \times 0,0043 = 1,074 \text{ tm/m}$$

$$\psi_{MRB} = 90 - \psi_{W.S.} = 90 - 20,54 = 69,46^\circ$$



Par une transformation tensorielle, nous aurons les moments fléchissants transversal M_x , longitudinal M_y et de torsion M_{xy} :

$$M_x = M_1 \cos^2 \psi_{MRB} + M_2 \sin^2 \psi_{MRB} = 2,436 \text{ tm/m}$$

$$M_y = M_1 \sin^2 \psi_{MRB} + M_2 \cos^2 \psi_{MRB} = 10,778 \text{ tm/m}$$

$$M_{xy} = (M_1 - M_2) \sin \psi_{MRB} \cos \psi_{MRB} = 3,636 \text{ tm/m}$$

b - Aux points D et E, cette méthode d'interpolation n'est généralement pas à utiliser car la répartition différente des points d'appui selon MRB et SW conduit à faire différemment la comparaison. En effet, dans l'exemple traité, nous avons seulement 4 appuis par ligne pour le modèle MRB alors que les résultats de S.W. ne sont détaillés que dans le cas de 9 appareils par ligne. Nous utiliserons donc pour les points D et E le graphe de la page 74 de l'ouvrage cité, qui permet de prendre en compte 4 appareils d'appui par ligne. On doit s'attendre ici à un écart assez élevé entre les valeurs de Schleicher-Wegener et de MRB, car ce graphe est valable uniquement pour $l_2/l_1 = 1,2$, $l_3/l_1 = 1$, $\eta = 1$ et $\psi = 45^\circ$, pour 4 appuis également espacés dont les deux extrêmes sont à 1,052 m des bords libres.

Pour permettre la comparaison, les moments évalués aux points d'appui D et E doivent donc être corrigés de manière à ce qu'ils correspondent à la même hypothèse de répartition des charges ponctuelles. Dans les calculs MRB la charge relative à un appareil d'appui est remplacée pour l'évaluation du tenseur flexion au droit de l'appareil d'appui par une charge répartie

.../...

sur la surface d'un cercle ayant pour rayon (R) 0,066 fois la largeur de la dalle. Pour le calcul aux différences finies, Schleicher et Wegener indiquent dans leur ouvrage qu'une charge ponctuelle appliquée sur un noeud d'un maillage carré dans la méthode des différences finies, a pour équivalent dans la réalité une charge répartie uniformément sur la surface d'un carré admettant ce noeud pour centre et dont les côtés ont pour longueur 0,6 fois la longueur d'une maille. Les abaques de S.W. étant établies à partir de 8 mailles dans le sens transversal, les charges ponctuelles y sont en pratique réparties sur la surface d'un cercle ayant pour rayon 0,042 fois la largeur de la dalle, inférieur à celui du calcul MRB. Les valeurs lues dans S.W. pour les moments principaux sur appuis, sont donc supérieures en valeur absolue à celles lues dans MRB, et sont donc à réduire pour la comparaison, de $\Delta M_x = \Delta M_y = \frac{P}{4\pi} \ln \left(\frac{R_{MRB}}{R_{SW}} \right) \approx 0,035 P$, soit sous charge permanente :

$$\cdot \text{ Point D : } \frac{83.46}{100} \times 3,50 = 2,92 \text{ tm/m}$$

$$\cdot \text{ Point E : } \frac{92}{100} \times 3,50 = 3,22 \text{ tm/m.}$$

Enfin une deuxième correction est à apporter aux moments longitudinaux donnés par S.W., pour tenir compte des différences des rapports entre la travée intermédiaire et la première travée (1,454 pour MRB et 1,2 pour S et W) : au point E (appui 7), l'influence de la travée intermédiaire étant prépondérante (angle obtus), le moment longitudinal donné par S. et W. est à multiplier par le rapport $\frac{1,454^2}{1,2} = 1,468$; au point D (appui 5) l'influence de la travée de rive étant prépondérante, aucune correction n'est apportée pour prendre en compte la différence géométrique des deux modèles.

G 3,2 - Résultats

Voir le tableau page suivante.

G 3,2 - Résultats.

Dans le tableau suivant, nous donnons les moments M_x , M_y , M_{xy} des 7 points sous charge permanente, compte tenu de toutes les interpolations et corrections définies en G 3,1.

Méthodes		MRB	tm/m	S.W.	tm/m	$\frac{MRB - S.W.}{S.W.}$
Points						
A J = 13,5 I = 13	M_x	- 0,585		0,047		
	M_y	10,135		10,335		2 %
	M_{xy}	1,565		1,282		
B J = 11,5 I = 7	M_x	1,400		2,436		43 %
	M_y	11,410		10,778		6 %
	M_{xy}	3,410		3,636		- 6 %
C J = 10,5 I = 1	M_x	- 0,500		0,088		
	M_y	13,525		13,782		- 2 %
	M_{xy}	3,050		3,193		
D J = 19,5 I = 3 appui 4	M_x	- 10,84		- 10,04		+ 8 %
	M_y	- 27,03		- 22,04		+ 23 %
	M_{xy}	- 2,32		- 0,44		
E J = 25,5 I = 11 appui 7	M_x	- 12,05		- 7,07		+ 70 %
	M_y	- 26,76		- 25,68		+ 4 %
	M_{xy}	- 1,39		- 1,71		
F J = 34,5 I = 13	M_x	- 1,070		- 0,633		
	M_y	21,950		23,615		- 7 %
	M_{xy}	4,720		5,913		
G J = 34,5 I = 7	M_x	2,370		4,909		- 52 %
	M_y	20,530		20,317		1 %
	M_{xy}	5,830		6,937		- 16 %

G 3,3 - Observations.

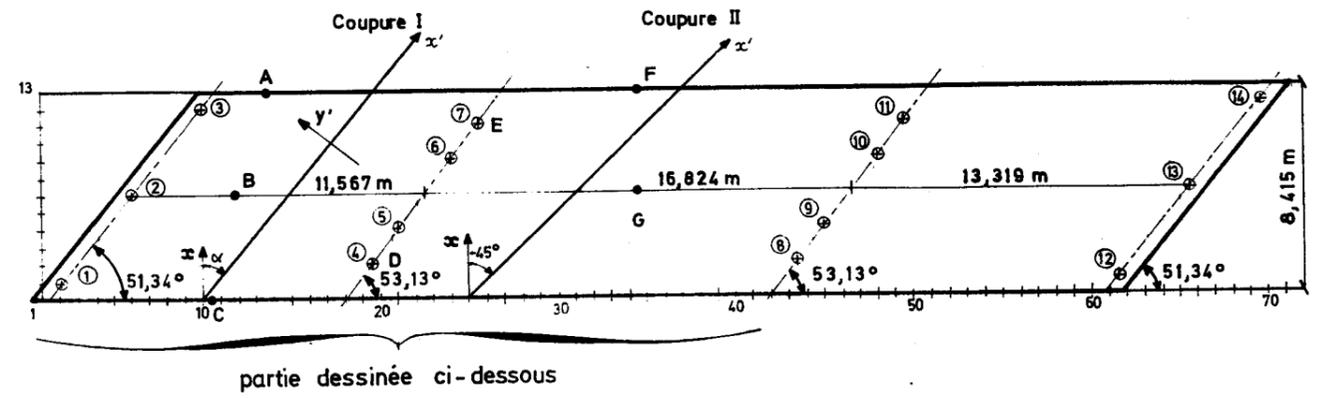
G 3,31 - D'une façon générale, dans les zones où les composantes du tenseur flexion varient régulièrement, les écarts entre les valeurs MRB et les valeurs du calcul parallèle sont faibles pour les moments longitudinaux (de 1 % à 7 % dans le cas étudié). Pour les moments transversaux la comparaison fait apparaître une sous-estimation des valeurs de MRB par rapport aux valeurs du calcul parallèle (S.W.) ; c'est vraisemblablement dû à la modélisation MRB (le modèle MRB est appuyé sur des points isolés et est calculé comme s'il s'agissait d'une bande infinie, alors que celui de S.W. est appuyé d'une façon continue sur chaque ligne d'appui et est limité aux lignes d'appui extrêmes).

G 3,32 - Au voisinage des lignes d'appui intermédiaires, les écarts sont importants, et plus grands que ceux constatés lors des recouvrements élastiques dans les charges de flexion à partir du champ de déformation (cf p. 95). Ceci est en grande partie dû à la différence de géométrie entre le calcul MRB et les ouvrages pour lesquels des abaques sont publiés. Les imprécisions sur M_x et M_{xy} équivalent pratiquement à une rotation du tenseur flexion, et seule la comparaison des M_y doit être considérée comme significative.

G 3,33 - Les abaques de Schleicher et Wegener permettent de faire d'autres comparaisons en des points quelconques de l'ouvrage, à condition d'effectuer une triple interpolation sur le biais, sur le rapport travée centrale/travée de rive et sur le rapport largeur/portée.

G 3,34 - Au total le recours sur calcul parallèle par les abaques de S.W. d'un ouvrage donné calculé par MRB sera intéressant à effectuer surtout lorsque la géométrie de l'ouvrage permettra de supprimer ou de négliger une ou deux interpolations. Il s'approchera en ce cas d'un calcul parallèle par référence à une précédent très semblable.

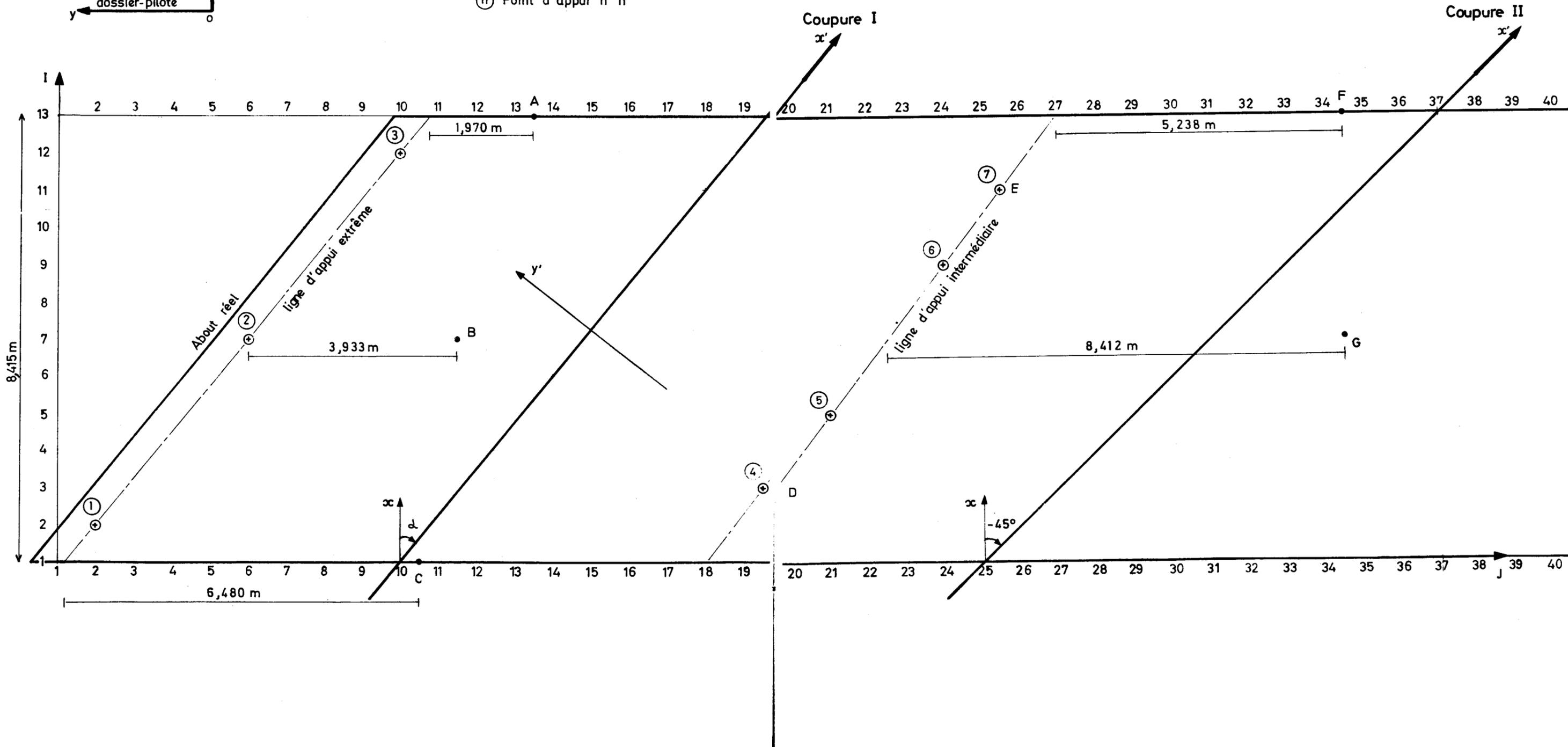
FIGURE 1



Référentiel adopté pour la définition des tenseurs de flexion (trièdre direct $oxyz$, oz vertical ascendant); cf pièce 1.2 du dossier-pilote

Densité de charge : 1,867 T/m²

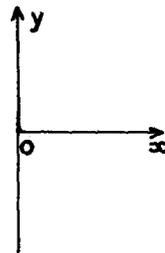
Ⓝ Point d'appui n° n



DEFORMATION DE LA PLACQUE

COMPTEE EN MILLIMETRES AUX NOEUDS DU MAILLAGE CARRE 0.833 * 0.833

NUMERO DU NOEUD	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	-2.2955	-8.9163	-15.3535	-21.7063	-27.8638	-33.8796	-39.7715	-45.5612	-51.2715	-56.9255	-62.5442
3	2.2588	-4.4630	-10.9888	-17.2160	-23.4678	-29.4552	-35.3009	-41.0290	-46.6674	-52.2415	-57.7779
4	6.8311	-6.0000	-6.5723	-12.9336	-19.0908	-25.0529	-30.8471	-36.5075	-42.0559	-47.5531	-52.9968
5	11.4447	4.5688	-2.1176	-8.5615	-14.7424	-20.6768	-26.4172	-32.0039	-37.4753	-42.8658	-48.2080
6	15.9886	9.0787	2.2958	-4.2444	-10.4401	-16.3399	-22.0200	-27.5280	-32.9069	-38.1945	-43.4248
7	20.3267	12.4242	6.6109	-6.0000	-6.1763	-12.0470	-17.6746	-23.1029	-28.3812	-33.5560	-38.6640
8	24.3267	17.5167	10.7900	4.2583	-1.9571	-7.8374	-13.4177	-19.7563	-23.9263	-28.9787	-33.9549
9	27.8386	21.2057	14.6565	8.2518	2.0717	-3.7990	-9.3032	-14.5296	-19.5765	-24.4977	-29.3316
10	30.7042	24.3250	18.0280	11.8346	5.7934	-6.0000	-5.3589	-10.4561	-15.3777	-20.1623	-24.8391
11	32.7683	26.7257	20.7657	14.8919	9.1421	3.6087	-1.6210	-6.5999	-11.3942	-16.0294	-20.5318
12	33.9026	28.2763	22.7416	17.2873	11.9349	6.7378	1.7368	-3.0749	-7.7111	-12.1695	-16.4615
13	34.0057	28.8754	23.8452	18.8905	14.0115	9.2265	4.5527	0.0000	-4.4148	-8.6411	-12.6686
14	33.0189	28.4591	24.0075	19.6268	15.2964	11.0069	6.7562	2.5598	-1.5525	-5.4720	-9.1562
15	30.9328	27.0124	23.2060	19.4743	15.7752	12.0779	8.3557	4.6161	0.9048	-2.6340	-5.8675
16	27.7964	24.5696	21.4748	18.4645	15.4834	12.4766	9.4044	6.2568	3.0740	0.0000	-2.6683
17	23.7228	21.2314	18.8961	16.6750	14.4897	12.2680	9.9531	7.5393	5.0694	2.6869	0.5399
18	18.9062	17.1575	15.6145	14.2280	12.8994	11.5269	10.0446	8.4393	6.7575	5.1004	3.5548
19	13.6306	12.5922	11.8390	11.3119	10.8629	10.3555	9.7126	8.9161	8.0034	7.0512	6.1366
20	8.2979	7.8681	7.8671	8.1876	8.5859	8.8931	9.0265	8.9707	8.7569	8.4496	8.1280
21	3.4719	3.4379	4.1150	5.2114	6.3256	7.3102	8.0808	8.6431	9.0173	9.2683	9.4551
22	-0.0847	-6.0000	1.2169	2.7502	4.3501	5.7660	6.9857	7.9994	8.8271	9.5109	10.1223
23	-1.7700	-1.3999	-0.3220	1.1988	2.8107	4.3786	5.8139	7.1025	8.2320	9.2316	10.1421
24	-1.9637	-1.5904	-0.8134	0.3390	1.7100	3.1650	4.6168	6.0096	7.3015	8.4811	9.5845
25	-1.2124	-1.0551	-0.6649	-0.0000	0.9544	2.1101	3.4079	4.7678	6.1002	7.3536	8.5351
26	0.1162	-0.0419	-0.0805	0.0703	0.4716	1.1850	2.2204	3.4554	4.7261	5.9469	7.0999
27	1.7747	1.2813	0.8172	0.4420	0.2418	0.4177	1.1422	2.1859	3.3006	4.3841	5.4044
28	3.5927	2.7930	1.9661	1.1432	0.4095	-6.0000	0.4077	1.1398	1.9612	2.7867	3.5848
29	5.4179	4.3945	3.2082	2.1909	1.1450	0.4184	0.2408	0.4401	0.8149	1.2789	1.7722
30	7.1189	5.9613	4.7363	3.4619	2.2239	1.1862	0.4713	0.0695	-0.0895	-0.0406	0.1187
31	8.5594	7.3716	6.1125	4.7754	3.4118	2.1115	0.9544	0.0000	-0.6629	-1.0597	-1.2061
32	9.6137	8.5020	7.3152	6.0174	4.6202	3.1657	1.7098	0.3397	-0.8100	-1.5841	-1.9552
33	10.1755	9.2546	8.2460	7.1092	5.8154	4.3772	2.8085	1.1981	-0.3196	-1.3944	-1.7628
34	10.1592	9.5350	8.8400	8.0033	6.9832	5.7999	4.3429	2.7843	1.2139	0.0000	-0.0845
35	9.4989	9.2922	9.0274	8.6423	8.0722	7.2967	6.3101	5.1958	4.1047	3.4245	3.4578



- 104 -
Figure 2

Imp. LES PROCÉDÉS DOREL – Paris