Zeitschrift: IABSE surveys = Revue AIPC = IVBH Berichte

Band: 8 (1984)

Heft: S-27: Techniques for checking structural designs

Artikel: Les techniques de vérification des projets des structures

Autor: Mathieu, Henri

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-48517

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les techniques de vérification des projets des structures

Vorgehensweisen bei der Prüfung von Projekt-Unterlagen

Techniques for Checking Structural Designs

Henri MATHIEU
Insp. Gén. Ponts et Chaussées
SETRA (IGOA)
Bagneux, France

Henri Mathieu, né en 1925, est ingénieur diplômé de l'Ecole Polytechnique et de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris. Pendant 13 ans il a été chef d'une Division centrale des ponts en France. Outre ses fonctions actuelles d'inspection générale pour activités relatives aux ponts, il préside plusieurs Commissions nationales et internationales pour la plupart chargées de problèmes associés à la sécurité des structures.

RÉSUMÉ

Les qualités désirables des projets sont diverses et ne peuvent faire l'objet d'une unité de mesure commune et objective. Leurs vérifications doivent être organisées et effectuées dans le cadre des principes généraux de l'assurance de qualité. Pour les dessins, les techniques de vérification, sont pragmatiques. Pour les calculs, on doit généralement recourir à une combinaison de trois techniques théoriques (vérifications directes, par calculs parallèles et par recoupements). Il existe diverses sortes de vérifications atténuées.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Anforderungen an die Qualtät von Projektunterlagen sind vielfältig und können nicht mit einem einzigen und objektiven Massstab erfasst werden. Die Prüfung solcher Unterlagen ist im Rahmen allgemeiner Grundsätze der Qualitätssicherung zu organisieren und durchzuführen. Die Prüfung von Zeichnungen folgt pragmatischen Grundsätzen, diejenige von Berechnungen sollte im allgemeinen in einer Kombination von drei Methoden erfolgen (Nachrechnung, unabhängige Kontrollrechnung, vergleichende Gegenüberstellung). Verschiedene Grade der Annäherung sind möglich.

SUMMARY

Desirable qualities of designs are varied and cannot be measured by one objective measurement unit. Verifications of designs should be organized and performed within the framework of the general principles for quality assurance. For drawings, verification techniques are pragmatic. For calculations, a combination of three theoretical techniques (direct, by parallel calculations and by cross-checkings) should generally be used. Several kinds of lightened verifications do exist.

1. OBJET

Le présent mémoire porte sur les modalités de vérification des projets de structures à construire, indépendamment de leur type. Ne sont donc considérés ni les problèmes afférents au second oeuvre ni ceux relatifs aux structures existantes (il peut alors être fait appel à d'autres sources d'information et donc à d'autres techniques de vérification).

2. CONSISTANCE D'UN PROJET

2.1. Un projet est constitué de dessins, de spécifications écrites et de calculs.

En principe seuls les dessins et les spécifications définissent les ouvrages et constituent donc le "produit final" des études. Les calculs ne donnent que les bases du dimensionnement mécanique qui sont ensuite reportées sur les dessins, et ils sont ensuite utilisés pour la gestion des ouvrages ; mais en raison de leur rôle central dans les projets, leur qualité est importante et leur vérification constitue une partie très importante de la vérification des projets.

2.2 On distingue souvent dans les projets trois stades de conception qui correspondent à trois phases successives d'études :

- la conception primaire, de nature fonctionnelle, consiste à recenser les contraintes de l'opération, à déterminer les exigences auxquelles elle doit satisfaire (programme de l'opération), à définir l'emplacement de la construction et son "plan de masse", avec peu ou pas de calculs à l'appui ;

- la conception secondaire consiste à choisir le type de structure, le mode de construction et certaines dimensions de base (par exemple portées, épaisseurs) ; les calculs effectués à l'appui de ces choix n'ont pour but que de démontrer la faisabilité de l'opération selon les bases choisies : ils sont donc sommaires, et sont même parfois effectués par simple comparaison à des projets antérieurs, ou remplacés par la lecture d'abaques ;

- la conception tertiaire consiste à définir le détail des dispositions des ouvrages y compris tout ce qui est nécessaire à leur exécution ; le projet prenant alors un caractère définitif, elle nécessite donc des calculs définitifs et suffisamment complets ; pour la structure et le second oeuvre, elle est distincte et nécessite seulement une coordination.

3. QUALITES DESIRABLES DES PROJETS

3.1 Les qualités des projets nécessaires à ces trois stades de conception sont de natures très différentes. Il en résulte de grandes différences dans les manières d'obtenir ces qualités, et dans les buts et techniques de vérification.

D'autre part ce ne sont pas les mêmes qualités qui sont nécessaires, tout au moins directement, pour le client, pour le vérificateur du projet et pour le chantier. Ainsi l'aspect coût de l'ouvrage peut jouer de façons très différentes, voire opposées, en faveur du client et en faveur de l'entrepreneur, selon la manière dont celui-ci est rémunéré. Pour le client, le projet n'est d'ailleurs qu'un intermédiaire dans la réalisation ; et l'expérience prouve que même pour l'ouvrage terminé le client n'explicite souvent ses exigences que de façon très incomplète (quoique l'évolution actuelle des codes tende à favoriser cette explicitation). La lisibilité des calculs concerne directement le seul vérificateur. En ce qui concerne le chantier, il faut de façon générale que le projet soit :

- aisément compréhensible pour qu'on n'ait pas besoin de faire des interprétations incertaines,

- suffisamment complet pour qu'on n'ait pas besoin d'improviser sur le chantier,

- réalisable et simple, car les opérations compliquées risquent d'être mal comprises et mal exécutées.

Cependant ces qualités ne sont pas utiles au même degré selon le niveau des moyens intellectuels disponibles sur le chantier. En outre, dans une certaine mesure, assurer une bonne liaison entre bureau d'études et chantier peut remédier à certaines imperfections du projet.

3.2 Compte tenu des paragraphes précédents, les vérifications des projets peuvent porter sur :

a - la qualité de la solution proposée, en ce qui concerne :

. les exigences fondamentales et les conditions fonctionnelles, relatives à l'environnement ou imposées,

. l'esthétique,

. la satisfaction des exigences mécaniques (en termes d'états-limites ultimes et de service, de robustesse, de durabilité ...),

. la possibilité (pour ce qui concerne le projet) d'inspection pendant la construction et pour la maintenance,

. le coût,
. les délais d'exécution,
. etc ...

b - la qualité de la description de cette solution.

c - la qualité de la justification de cette solution (en particulier les calculs).

La liste donnée en a n'est pas limitative et peut être précisée et diversifiée ; par exemple la vérification du coût peut porter soit seulement sur le respect de l'estimation acceptée, soit aussi sur la recherche d'économies possibles. La durabilité est un but qui est en relation avec plusieurs postes de cette liste et peut en sus faire l'objet de certaines vérifications supplémentaires.

Il n'y a pas de correspondance directe entre les différents postes de cette liste et les différents stades de conception. Cependant la satisfaction des exigences mécaniques, qui seules font l'objet de la plupart des études structurales, concerne principalement la conception tertiaire (alors que les exigences fondamentales et conditions fonctionnelles concernent principalement la conception primaire).

4. DEGRES DE QUALITE DES PROJETS

4.1 Les différents aspects de la qualité des projets ne sont pas tous mesurables, et beaucoup d'entre eux ne peuvent être appréciés que de façon subjective. En particulier, en ce qui concerne les calculs ;

- les hypothèses et bases numériques doivent être fiables et explicitées ; mais jusqu'à quel point ?

- les calculs peuvent être plus ou moins complets en ce qui concerne par exemple la recherche des cas de charge et combinaisons d'actions déterminants,

- ils peuvent être plus ou moins détaillés en ce qui concerne les intermédiaires de calcul en cas de transcription ou d'usage d'ordinateur,

- ils peuvent être plus ou moins aisément lisibles ou compréhensibles,

- ils peuvent être plus ou moins précis numériquement ; mais la précision d'une note de calcul ne peut pas être caractérisée par un scalaire unique, et aucune

valeur numérique des imprécisions admissibles ne peut être commune à un ensemble varié de structures.

Il n'existe donc aucune possibilité de représenter scientifiquement par une unité commune de mesure la qualité des projets sous tous ses aspects.

4.2 Par contre, l'expérience pratique faisant apparaître une nette corrélation de certains aspects non numériques de la qualité entre eux et avec le temps consacré au projet par le bureau d'études, il est apparu possible d'établir un classement pragmatique et synthétique des projets, au stade de la conception tertiaire, en quatre degrés de qualité, désignés Q_0, Q_1, Q_2 et Q_3. Ces quatre degrés se réfèrent notamment à la méthode de travail interne au bureau d'études et à diverses qualités de la présentation des dossiers et calculs. Ils sont définis en [4] et [5] .

5. PAR QUELS MOYENS OBTENIR LA QUALITE DESIREE DES PROJETS

5.1 En raison de la très grande diversité (cf. 3.2) des multiples aspects de la qualité des projets et de la difficulté (cf. 4.1) de mesurer ces aspects, c'est seulement au niveau de principes très généraux que certaines indications communes peuvent être données sur la manière d'obtenir la qualité désirée sous tous ses aspects et pour l'ensemble des stades (2.2) de conception des projets. A fortiori les méthodes et techniques à employer pour la vérification sont très différentes les unes des autres.

5.2 De façon générale, l'obtention de la qualité des projets nécessite de suivre les principes généraux de l'assurance de qualité (cf. [2] et [3]). Elle doit donc être basée sur une organisation logique et adéquate, qui nécessairement comporte des contrôles mais ne se limite pas à des contrôles : elle doit en effet comporter aussi un choix judicieux des différents participants, des définitions précises et coordonnées des tâches qui leur sont dévolues ainsi que de leurs responsabilités, et formaliser les procédures, le tout en prenant en compte les contraintes (par exemple délais, recours à des techniques plus ou moins nouvelles)et incitations imposées aux participants. En ce qui concerne le rôle du contrôleur :

- si celui-ci peut et doit vérifier la qualité des projets et dans une certaine mesure aider à l'améliorer, ce n'est pas lui qui peut la faire,

- s'il peut et doit relever des erreurs dans les projets, et dans une certaine mesure les risques de mauvaise interprétation de ceux-ci, ce n'est pas son rôle de refaire les projets ; en outre il n'est pas lui-même infaillible, et la minimisation des risques d'erreur doit prendre en compte les risques d'erreur dans la vérification.

Assurer une bonne organisation est en fait aussi important qu'assurer de bonnes vérifications. En pratique cependant la première peut largement compenser une éventuelle insuffisance des autres, et réciproquement.

5.3 Pour cette raison et pour d'autres, l'organisation n'est pas nécessairement à définir à l'avance jusque dans les détails. En conséquence il peut être utile que des personnes chargées de tâches de vérification exercent un rôle préventif à l'égard des défauts dans les projets, et pour cela influent sur le processus d'établissement de ceux-ci, quoique de telles interventions ne fassent pas partie de la vérification proprement dite. Certes le contrôle préventif n'est pas mentionné dans les principes généraux de l'assurance de qualité, mais c'est pour une simple raison de classification des idées et de terminologie, car la prévention des défauts tient en fait une place fondamentale dans l'assurance de qualité, pour l'obtention des meilleurs résultats au meilleur coût. Un certain nombre de mesures préventives souhaitables sont proposées dans [1] . Dans tous les cas,

quoique la vérification ne comporte pas par elle-même de décision, elle comporte nécessairement des jugements, et il est donc normal que l'action du vérificateur ne soit pas purement passive.

5.4 Si on considère, parmi les quelques aspects de la qualité des projets mentionnés en 3.2, ceux qui ne peuvent être définis numériquement (par exemple l'esthétique), ou qui au contraire peuvent être définis numériquement de façon très simple (par exemple le respect d'exigences fonctionnelles), il y a assez peu matière à des développements détaillés sur les procédures de vérification. Il semble de façon générale que l'obtention de ces aspects de la qualité repose essentiellement sur l'organisation et les actions préventives. De plus il est généralement avantageux de procéder le plus tôt possible à des vérifications, fussent-elles partielles, de manière à éviter que les projets soient développés dans un sens défavorable : on évite ainsi des pertes de temps et d'argent.

Ce sont ces idées générales qui sont à la base de la distinction des trois stades de conception et de la présentation d'avant-projets de compositions définies (on prévoit même couramment la présentation successive d'avant-projets sommaires et détaillés).

En revanche il importe de ne pas étendre excessivement les vérifications partielles dans le domaine des calculs, pour ne pas s'exposer aux risques qui seront exposés en 9.1.2.

5.5 Dans la suite du présent mémoire, on se limitera aux aspects "classiques" de la qualité des projets, c'est-à-dire à ceux qui sont de nature mécanique et liés à l'application des Codes : c'est pour ces aspects qu'il y a présentement matière à des développements sur les méthodes et techniques à utiliser.

6. CONSISTANCE DE LA VERIFICATION D'UN PROJET. MODULATION

6.1 On a établi en 3.2 que les objectifs eux-mêmes des vérifications peuvent varier, dans une certaine mesure, selon l'échelon qui prescrit des vérifications. Aussi, aucun texte international ni national, à caractère juridique ou technique, ne définit leur consistance, même pour les aspects "classiques" de la qualité, si ce n'est sous forme de généralités extrêmement vagues. En particulier aucun n'indique jusqu'où quelqu'un est tenu de pousser ses vérifications. On ne peut donc que considérer que la vérification doit être poussée jusqu'au point de permettre au vérificateur de se convaincre si, dans la mesure où cela dépend du projet, la construction aura une bonne valeur technique sous divers aspects.

Dans tous les cas, et malgré la diversité des règles légales d'un pays à un autre, une vérification doit évidemment déceler si dans certaines conditions courantes ou non courantes la structure se trouvera en danger de ruîne ou de dommage plus grave qu'escompté, ou si son exécution sera difficile ou si elle vieillira mal. On pourrait dire en principe : "si elle a une probabilité plus grande qu'escompté de ne pas remplir sa fonction" ; mais ce n'est qu'un principe car la dite probabilité n'est pas définissable dans l'absolu, et l'usage de probabilités conventionnelles est insuffisant à cet égard. En général la vérification devra prendre en considération les diverses phases de la construction aussi bien que la durée de vie escomptée. On peut en outre attacher à la vérification certains buts secondaires, par exemple reconnaître si les calculs donnent une base techniquement valable pour prendre ultérieurement certaines décisions relatives à l'exploitation de la structure.

L'expression "se convaincre" a une signification largement subjective et ne peut être associée à une définition limitative de la consistance des vérifications ; celles-ci sont donc délimitées par l'appréciation du vérificateur.

6.2 En conséquence il est très difficile de définir ce que pourrait être une

modulation de l'étendue et du caractère approfondi des vérifications. En fait de telles modulations ne peuvent généralement être définies que de façons indirectes. On peut, par exemple :

- limiter la vérification à certains aspects (sécurité des personnes, conformité à un règlement ...),

- limiter à diverses valeurs le temps ou l'argent à y consacrer,

- prescrire certaines modalités différentes des procédures de vérification ; ainsi on peut faire concrétiser celle-ci par un simple accord, ou par la remise d'un rapport détaillé, ou l'assortir de sanctions éventuelles inégales, etc ...

Quant à l'opportunité de moduler les vérifications, elle pose en principe un problème d'optimisation, dans le cadre évidemment des règles légales. En pratique elle peut dépendre de circonstances très diverses (destination et type de la structure, exécutants, délais, situation, etc ...). Elle doit aussi dépendre de l'échelon de contrôle chargé de la vérification considérée (autocontrôle, contrôle "interne", contrôle extérieur) : par exemple la vérification attachée à un contrôle extérieur nécessite d'être très inégalement poussée selon l'existence et la fiabilité d'un contrôle interne, les autres circonstances étant inchangées (cf § 12 plus loin).

7. ORGANISATION GENERALE D'UNE VERIFICATION. SURVOL PRELIMINAIRE

7.1 Dans ce qui suit (§ 11 excepté), on s'attachera seulement à une vérification faite au titre d'un contrôle extérieur (cf [2]), tout en considérant qu'il y a peu de différences avec une vérification pour contrôle interne (cette différence est essentiellement que le contrôle interne est généralement plus imbriqué dans le processus d'élaboration du projet, et que la vérification est donc plus fractionnée). Une vérification supplémentaire par l'autorité publique présentera certaines analogies avec les précédentes. Par contre un autocontrôle personnel sera généralement effectué pas à pas en de multiples phases, et il ne semble pas que l'auteur d'un projet puisse faire valablement des vérifications analogues à celles que peuvent faire d'autres échelons de contrôle.

7.2 La vérification elle-même doit être organisée, conformément aux principes généraux de l'assurance de qualité, pour deux sortes de raisons :

- d'une part pour l'efficacité et la fiabilité de la vérification elle-même,

- mais aussi, d'autre part, parce que si la conclusion de la vérification doit être négative (ce qui doit toujours être envisagé) il y a intérêt à le savoir le plus tôt possible et avant d'y avoir consacré beaucoup d'efforts.

Ces deux considérations ne tendent pas à faire adopter les mêmes méthodes : la première tend vers des méthodes d'une logique rigoureuse, la seconde vers des méthodes plus intuitives. Un compromis peut consister à faire d'abord un survol (intuitif) du projet avant de procéder (si cela est jugé utile à l'issue de la phase précédente) à une vérification parfaitement logique et complète.

7.3 Dans ce survol préliminaire on examinera aussi bien les dessins que les calculs, sous l'angle notamment des qualités mentionnées plus haut en 3.2 b et c, et on jugera en particulier et de façon définitive leur suffisance, leurs raccordements et la qualité de leur présentation. Le survol peut normalement comporter aussi le calcul et l'usage de ratios (par exemple quantités d'acier par m3 de béton), voire certaines vérifications préliminaires de calculs telles ques celles indiquées en 10.5. La manière détaillée d'effectuer un tel survol est décrite en [1] . On conclura sur les omissions et les défauts éventuels manifestement inacceptables, et on notera les anomalies constatées ou soupçonnées. Si les défauts relevés sont majeurs, on fera modifier le projet avant de reprendre la vérification.

7.4 De même, essentiellement pour des constructions de grandes dimensions, mais aussi selon la manière dont le projet est élaboré, on procède parfois en un premier stade à la vérification de la conception secondaire. Le processus de présentation du projet doit alors être adapté à cet effet.

8. VERIFICATION DETAILLEE DES DESSINS ET SPECIFICATIONS

8.1 La vérification détaillée des dessins, si par exemple il s'agit de structures en béton, doit porter essentiellement sur la convenance des dispositions prévues pour les ferraillages, les cablages, le second oeuvre et éventuellement pour les ouvrages provisoires (installations de chantier, échafaudages porteurs et non porteurs, etc ...). Pour toutes les structures elle sera faite de trois points de vue (la qualité générale de consistance et présentation étant supposée vérifiiée par le survol préliminaire défini en 7.3) :

- caractère complet et exactitude. Par exemple, en ce qui concerne les câbles de précontrainte, dépister plus particulièrement les erreurs d'échelle et de cote, dont pourraient résulter à l'exécution des contre-courbures involontaires ; vérifier les courbures maximales et vérifier l'absence ou localiser la présence de poussée au vide marquée ; s'assurer de la présence et de la position correcte d'évents (aux points hauts) et de décharges (aux points bas) ;

- faisabilité et qualité technologique des dispositions prévues. Par exemple, pour une structure en béton, les positions des aciers résultant des différents dessins sont-elles géométriquement compatibles ? l'ordre de mise en place des différentes nappes d'armatures est-il défini, cohérent et réalisable ? le ferraillage est-il compatible avec un bon bétonnage, et en particulier avec la possibilité de vibrer ? là où des gaînes sont en contact, leur injection simultanée est-elle prévue, ou sont-elles constituées de tubes étanches ? les tolérances d'exécution sont-elles définies ? la qualité de parements souhaitée pourra-t-elle être obtenue ?

- compatibilité des dispositions prévues avec celles des ouvrages provisoires, avec celles du second oeuvre et avec la maintenance ultérieure. Par exemple des scellements prévus sont-ils compatibles avec le ferraillage ? des trous réservés pour la visite n'affaibliront-ils pas notablement la structure ?

8.2 De la vérification des spécifications écrites il y a peu à dire, car leur présentation nécessairement linéaire sous forme de texte réduit leur contenu à ce qui est assez simple pour pouvoir être présenté ainsi.

8.3 Pour les vérifications des spécifications, et dans une certaine mesure aussi pour celles des dessins, la normalisation et l'usage de documents-types sont de nature à simplifier l'usage des documents. Le vérificateur, outre qu'il est lui-même intéressé à ce sujet, peut avoir à examiner si le projet y a suffisamment recouru.

9. METHODES (TECHNIQUES) THEORIQUES DE VERIFICATION DES CALCULS

Trois méthodes théoriques sont indiquées ci-après. Elles sont qualifiées de théoriques parce qu'il s'agit de méthodes limites et que très souvent, comme on le verra plus loin, on est amené à les utiliser ensemble pour la vérification d'une note de calcul.

9.1 Vérification directe

9.1.1 Définition : il s'agit de la méthode traditionnelle de vérification. Elle consiste à suivre pas à pas la note de calcul du projet, en refaisant toutes les opérations.

Lorsque la méthode est employée à l'état pur, l'ordre des vérifications est le même que l'ordre de la note de calcul.

9.1.2 Inconvénients, palliatifs et avantages : Le principal inconvénient se présente lorsqu'il s'agit de structures spéciales, et surtout de structures comportant des innovations. Il est à craindre que le vérificateur soit influencé par le déroulement de la note de calcul, et soit ainsi amené à ne vérifier entièrement que la matérialité des calculs eux-mêmes et non pas la logique et les bases du raisonnement, en particulier lorsqu'elles ne sont pas totalement explicitées. Or les défauts les plus graves constatés à la suite d'un défaut de calcul sont dûs le plus souvent non pas à une faute matérielle de calcul, mais à un oubli ou une erreur de raisonnement, notamment dans le choix de la modélisation ou des bases numériques des calculs (système statique faussement analysé, non prise en compte de déformations différées, mauvais transfert d'efforts localisés, etc ...). Si le recours à un conseiller expérimenté peut attirer l'attention du vérificateur principal sur un certain nombre de points délicats, il n'en reste pas moins que [1] "le vérificateur trop près de la note (du projeteur) 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 projeteur et celle du vérificateur ; les deux pensées peuvent à cause de cette dépendance faire la même erreur-clef". On remarquera, à cette occasion, que cela met en évidence des limites à l'efficacité d'un autocontrôle du projeteur.

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 projeteurs, 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 flots de sorties d'ordinateur n'a même généralement pas d'autre but.

En conséquence, 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" (modélisations) 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 qu'étudier ce qu'elle contient,

- que les bases numériques (données de base) ont été bien choisies et, si l'on a fait usage de l'ordinateur, bien introduites dans le programme.

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

- en cas de divergence avec le projeteur, 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 le projeteur pourra donc s'appuyer sur une base entièrement commune et sera simplifiée au maximum ;

- après réalisation de la structure, on disposera d'un calcul bien défini et fiable pour sa gestion et sa maintenance.

9.2 Vérification par calculs parallèles

9.2.1 Définition : il s'agit d'une méthode qui a d'abord été assez largement pratiquée par les bureaux de contrôle du batiment et qui s'est ensuite beaucoup développée avec l'usage de l'ordinateur. Elle consiste à dissocier entièrement les

calculs du vérificateur des calculs du projeteur (et non pas seulement les opérations numériques). Cela n'implique pas que le vérificateur fasse tous ses calculs en bloc avant de rien comparer aux calculs du projet, mais seulement qu'il fasse chacun de ses calculs avant de se reporter aux calculs correspondants du projet.

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

9.2.2 Avantages et inconvénients : le principal avantage résulte a contrario de ce qui est indiqué à propos de la vérification directe : moindre risque qu'une erreur de quelque nature que ce soit, en particulier de raisonnement (éventuellement par omission) puisse avoir d'influence sur le vérificateur et ne soit ainsi pas décelée. D'autre part cette méthode de vérification se prête bien à l'emploi de calculs simplifiés (cf 12.1) ; et elle est de nature à remédier à certaines impossibilités qui se présentent en cas de calcul automatique ou, plus généralement, lorsque la qualité insuffisante de présentation des calculs rendrait trop laborieuse, voire impossible, la vérification directe.

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 connaissances et d'expérience (ou de talent) 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 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 ; malheureusement cela est relativement rare, et peu compatible avce des calculs simplifiés.

- Ou les résultats sont seulement 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, et les résultats assez favorables, pour qu'on puisse apprécier favorablement le dimensionnement ?

. s'il en est ainsi, le caractère modéré des divergences ne résulte-t-il cependant 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 ? En un tel cas, la réalité pourrait être nettement différente des 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. Le vérificateur ne peut en effet normalement pas se borner à opposer au projeteur les résultats d'un calcul entièrement séparé du sien : s'il n'est pas tenu de lui indiquer l'erreur précise qu'il a commise, du moins doit-il 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 des autres méthodes. Encore faut-il généralement pour cela disposer d'assez de résultats intermédiaires dans l'un et l'autre calculs.

Bien entendu toutes ces confrontations sont orientées au mieux si le vérificateur est très expérimenté ou peut s'appuyer sur un conseiller expérimenté. Néanmoins

elles risquent de mener bien tardivement à la conclusion que la note de calcul du projet 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 du projet. 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 du projet pour une première confrontation,
- si celle-ci est suffisamment favorable, engager un deuxième stade de la vérification (par exemple en déterminant des lignes d'influence ou en estimant les forces de précontrainte) et procéder alors à une deuxième confrontation,
- passer ensuite 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 du projet les améliorations éventuellement nécessaires pour qu'elle puisse être considérée comme fiable pour la gestion ultérieure de la construction. 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.

9.3 Vérification par recoupements

9.3.1 Définition : il s'agit d'une méthode très rarement utilisée à l'état pur, et dont la nature fondamentale n'a pour cette raison pas été parfaitement identifiée dans diverses publications antérieures. Elle consiste à utiliser un ensemble de résultats intermédiaires et finaux de la note de calcul du projet pour démontrer leur validité. Pour cela on doit établir avec certitude :

- qu'ils sont cohérents entre eux et avec les hypothèses de base de calculs,
- qu'ils constituent l'unique ensemble de résultats compatible avec ces hypothèses.

Ainsi on peut, à partir de la solution indiquée dans le projet, d'un système d'équations, vérifier que cette solution satisfait les équations.

De même, partant d'un tableau de la note de calcul d'un projet donnant les moments fléchissants tous les dizièmes de travée d'une poutre d'inertie constante, sous l'effet de charges réparties, on vérifiera :

- par une ou deux intégrations numériques dans chaque travée, que les rotations de part et d'autre de chaque appui intermédiaire sont égales,
- en calculant des valeurs numériques telles que $(X_{i-1} - 2\,X_i + X_{i+1})/0{,}01\ l^2$, que la courbure de la ligne de moments est en tout point de calcul égale à la densité de charge en ce point.

9.3.2 Avantages et inconvénients : l'avantage essentiel de cette méthode est sa rapidité, qui souvent peut être beaucoup plus grande que celle des autres méthodes. Par ailleurs la méthode présente à peu près les mêmes avantages que la vérification directe, et en particulier elle permet de démontrer et situer une erreur éventuelle du projet presque aussi bien que la vérification directe.

Un inconvénient important est qu'elle ne permet de s'écarter en rien de la note

de calculs du projet. Elle ne permet en particulier aucune rectification. Une conséquence en est qu'elle présente un risque psychologique analogue à celui que présente la vérification directe, tout au moins en ce qui concerne certaines parties des raisonnements et des bases de calculs.

Un autre inconvénient est qu'elle n'est pas toujours possible, en particulier lorsqu'on ne dispose pas d'un ensemble de résultats intermédiaires suffisant pour démontrer tout ce que l'on doit. Plus souvent encore elle n'est que partiellement possible.

Pour ces raisons, elle est particulièrement adéquate pour procéder à des vérifications partielles (avec lesquelles elle a, dans des documents antérieurs, été identifiée), ce qui est à la fois un avantage et un inconvénient ; on peut ainsi être amené à se contenter d'une présomption d'exactitude de l'ensemble des calculs, en ayant démontré seulement l'absence d'erreur, ou de certaines erreurs, dans certaines parties de ceux-ci (se reporter en 12).

A cause des inconvénients qu'elle présente et de la diversité de la manière de l'utiliser, cette méthode nécessite beaucoup d'ingéniosité du vérificateur, et elle est souvent la plus difficile à pratiquer des trois méthodes théoriques. Bien la pratiquer est en fait un véritable art.

10. METHODES PRATIQUES DE VERIFICATION DES CALCULS

Ce qui suit sous ce titre traite de la vérification "normale" (c'est-à-dire habituelle) des calculs manuels. Ce qui s'écarte de la vérification normale sera traité en 11 et en 12. Quoique ce qui suit soit aussi valable, en général, pour la vérification de calculs faits avec l'aide d'ordinateurs, ce dernier cas a des aspects spécifiques supplémentaires qui seront traités en 13.

10.1 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.

Cela conduit à recommander, sauf dans des cas simples, de recourir à plusieurs des méthodes théoriques, en les combinant au mieux, en proportions généralement très inégales, et sans laisser l'auteur du projet savoir à l'avance comment l'étude sera contrôlée, c'est-à-dire en particulier quelle sera la modulation adoptée.

10.2 Un premier exemple particulièrement typique de combinaison des méthodes de vérification consiste, dans un tableau de résultats, à vérifier une ou quelques valeurs (par exemple certains moments fléchissants d'une structure hyperstatique) par calculs directs ou parallèles, puis à vérifier le reste du tableau par recoupements en s'aidant des valeurs préalablement vérifiées (celles-ci permettant dans cet exemple de se ramener au cas d'une structure isostatique).

10.3 Comme deuxième exemple, considérons 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,

b - parties qu'on ne peut pas considérer comme classiques (parties de calcul laborieux dans lesquelles intervient largement le caractère spécial de l'ouvrage ou son mode de construction ; parties pour lesquelles le projeteur 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 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 il se présente des cas où, par exemple en cas d'innovation, une vérification par calculs parallèles de parties b serait pratiquement impossible ;

- le choix de telle ou telle méthode doit dépendre de l'expérience du vérificateur (connaissance a priori des points délicats des calculs et des ordres de grandeur numérique) et, pour certaines méthodes, de sa capacité de pratiquer seul et d'imaginer ; un comportement présomptueux ou léger sur ce point peut être dangereux ;

- ce choix peut dépendre des buts légaux et contractuels de la vérification, de l'échelon de contrôle auquel est attachée la vérification et du caractère plus ou moins approfondi, voire partiel, qu'il est prévu de lui donner ;

- il peut dépendre des moyens de calculs parallèles ainsi que des précédents dont on dispose, et de la similitude de ces derniers à la structure à étudier (rapports de dimensions notamment) ;

- une séparation d'une étude entre diverses parties ne doit pas conduire à un fractionnement excessif.

10.4 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 a priori être tenté de faire le choix en donnant la préférence :

- soit au coût de la vérification ; en cas de vérification manuelle, ce coût s'identifie à peu près au temps passé par le vérificateur ; 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, possibilités de conclusion rapide),

- soit à la netteté de la situation juridique.

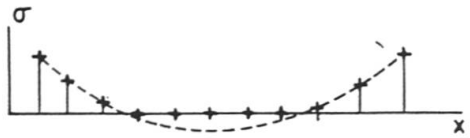
En fait il semble que dans beaucoup de cas l'élément majeur du choix sera surtout l'idée qu'on se fera a priori de la qualité intrinsèque et de présentation des calculs du projet ; cet élément est en relation étroite avec le coût estimé de la vérification par les différentes méthodes.

10.5 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 du projet, mais commencera par certains recoupements qui ne constituent pas une vérification complète. Ainsi, pour commencer (ceci pouvant d'ailleurs être fait en tout ou en partie lors du survol défini en 7.3) :

- 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 moyenne arithmétique des moments sur deux appuis successifs, augmentée du moment à mi-portée, est égale au moment dans la travée supposée indépendante (ou approximativement à $p\ l^2/8$),

- 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 ; ainsi le report 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 méthodes.

11. VERIFICATIONS RENFORCEES

Des vérifications allant au delà de ce qui précède ne sont faites que dans des cas relativement rares, généralement en raison de particularités de la structure à construire ou de son environnement ou des conditions auxquelles elle est soumise, parfois en raison de certaines présomptions d'insuffisance des calculs du projet.

Généralement elles consistent à faire des vérifications supplémentaires expérimentales : par exemple on pèse une réaction d'appui pour vérifier la position du centre de gravité de la structure au cours d'une manoeuvre de lancement, ou pour vérifier globalement l'effet de déformations différées du béton en même temps que le respect du programme d'exécution. Parfois encore on procède à des essais sur modèle réduit, dans les cas de plus en plus rares où on ne dispose pas d'autre moyen fiable d'analyser un comportement.

Cependant il est aussi parfois possible de vérifier le comportement de la structure par des calculs supplémentaires basés sur des hypothèses volontairement différentes de celles admises par projeteur (modélisation différente, situation accidentelle ...). De telles vérifications n'ont pour but que de chercher à s'assurer si le comportement de la structure n'est pas trop sensible à un écart par rapport aux hypothèses adoptées. La méthode théorique de base est alors le calcul parallèle. Celui-ci peut n'être que partiel, mais peut aussi être basé sur un modèle ou une procédure plus affinés.

12. VERIFICATIONS ATTENUEES

Différentes sortes de vérifications atténuées sont souvent pratiquées. Il importe de les distinguer les unes des autres, car elles n'ont en commun que leur raison d'être, qui est la recherche d'une économie de temps et d'argent dans les vérifications.

12.1 Les vérifications approchées sont celles dont le but est d'établir, avec certitude, mais avec une assez large tolérance numérique, la validité des résultats des calculs du projet.

Leurs inconvénients sont les suivants :

a - Il est très difficile d'estimer a priori les tolérances admissibles dans la précision des résultats (cf 4.1 ci-dessus) et la précision qui sera effectivement obtenue. Malgré cela, on peut avancer, en ordre de grandeur, que les écarts ci-après entre calculs approchés et note de calcul sont habituellement admissibles si on cherche seulement à éviter des désordres dans la structure :

- 10 % sur les sollicitations d'origine extérieure (un peu moins pour une structure précontrainte) et sur les sollicitations hyperstatiques de précontrainte,

- 5 % sur les sollicitations isostatiques de précontrainte (cette valeur peut dépendre notamment de ce que le code utilisé place ou non "en sécurité" vis-à-vis de ces sollicitations).

b - L'emploi fréquent de telles méthodes, venant nécessairement à être connu, est de nature à inciter les projeteurs à se contenter eux-mêmes de calculs approchés. On peut éviter ce risque en procédant systématiquement à la vérification fine (au millième près) de certains intermédiaires ou résultats de calculs.

En ce qui concerne la consistance des vérifications approchées, la discrétion est de règle et il n'existe donc guère de publications à ce sujet. On peut néanmoins donner quelques exemples de modalités possibles :

- simple approximation numérique (par exemple usage de représentations graphiques ou de la règle à calcul),

- détermination de fonctions par des points très espacés ; un degré supplémentaire est franchi dans l'approximation quand on considère connaître a priori, de façon empirique et non par interpolation, la forme de la courbe correspondante et qu'on se contente d'en fixer de un à trois points ;

- modélisation simplifiée ; par exemple on utilise des tables numériques reposant sur des hypothèses (par exemple lois de variation d'inertie) assez grossières mais qu'on sait par expérience donner des résultats assez précis ; ou bien on utilise un programme général d'analyse structurale (ensemble de poutres, éléments finis ...) avec une définition grossière du maillage ;

- abaques déduits de précédents calculs exacts ;

- démarquage, par similitude, d'un calcul antérieur (ou de plusieurs).

Dans une large mesure on peut dire que ces méthodes sont analogues aux méthodes de prédimensionnement que les projeteurs utilisent eux-mêmes en cours d'établissement des projets.

Dans les premiers cas ci-dessus, les vérifications approchées peuvent être des vérifications directes ou par recoupements ; dans les cas qui suivent elles sont faites, en tout ou en partie, à base de calculs parallèles.

12.2 Les vérifications fragmentaires sont celles dont le but est d'établir, avec certitude, l'exactitude ou la validité de certaines parties seulement des calculs. Si la conclusion est favorable, le reste du calcul ou des résultats sera soit directement présumé exact (il s'agit alors d'une simple vérification par sondages), soit soumis à une simple vérification superficielle (voir 12.3).

Tous les degrés sont a priori possibles dans le caractère fragmentaire. Il paraît logique de vérifier des sections déterminantes des structures. Il est évidemment très souhaitable de procéder aussi, de façon systématique, à la vérification de certains autres résultats déterminés au hasard.

La vérification fragmentaire peut être faite par chacune des méthodes théoriques définies en 9. L'usage de la méthode des recoupements conduit souvent le vérificateur à se contenter de vérifications fragmentaires ; elle a pour cette raison été assimilée à de telles vérifications dans divers documents antérieurs.

Si on se réfère aux méthodes générales de l'assurance de qualité, de telles vérifications sont courantes et normales pour vérifier le fonctionnement normal d'un autocontrôle (ce qu'on désigne parfois par le mot de supervision). Mais ceci suppose expressément que le dit autocontrôle a été défini. D'autre part la supervision comporte généralement aussi des vérifications, par sondages, de la régularité avec laquelle l'autocontrôle met en oeuvre les règles qui lui ont été fixées.

S'agissant de la vérification de projets et non d'une production industrielle, il est difficile et en tout cas rare de disposer d'un autocontrôle organisé, et donc de parvenir à des présomptions solides sur l'ensemble des calculs. C'est pourquoi de telles vérifications ne peuvent pas être considérées comme apportant des garanties, même si en réduisant le nombre des erreurs non décelées elles apportent des résultats partiels. Si elles sont pratiquées dans des conditions quelconques, tant

en ce qui concerne les conditions d'établissement du projet que celles de la vérification, elles risquent même de sombrer dans la caricature.

12.3 Les vérifications superficielles enfin sont celles dont le but est d'établir une présomption de validité des résultats, basée seulement sur la conviction que les calculs du projet ont été faits (et déjà vérifiés) avec un soin suffisant ; éventuellement d'évaluer cette présomption.

Une vérification superficielle peut consister seulement, par exemple, en cas de calculs manuels, à se servir de différentes parties de la note de calcul de projet pour les contrôler par recoupement mutuel. Ainsi, en faisant dans un tableau de résultats numériques des différences de ligne en ligne ou par report graphique, on peut vérifier que les valeurs varient régulièrement et sans anomalie apparente. Une telle méthode suppose un haut degré d'intuition pour interpréter ces constatations. Il est évident qu'elle suppose l'absence d'une erreur commune aux différents résultats comparés, et nécessite en principe un examen de leurs bases communes.

Elle peut aussi consister à contrôler l'ordre de grandeur des résultats finaux ou intermédiaires, en se référant à l'expérience du vérificateur, à des ratios, etc ...

Il est bien clair qu'une telle nature de vérification ne peut apporter :

- soit qu'une information préliminaire pour apprécier par exemple le degré à donner à une vérification plus précise à effectuer, ou la manière de l'organiser (cf 7.3 ci-dessus),

- soit qu'une information complémentaire destinée à affermir une présomption préexistante, en principe favorable (cf par exemple 13.2.4).

Dans la réalité de telles vérifications sont loin d'être exceptionnelles. Leur emploi peut être parfaitement normal. Leur inconvénient évident est que, basé dans tous les cas sur des présomptions, leur maniement est toujours subjectif. C'est pourquoi, très souvent, il y est recouru d'une manière peu ou pas sérieuse.

12.4 Un survol orienté vers la vérification des seuls points critiques a été assez souvent envisagé. Cette idée repose sur la constatation que la majorité des erreurs lourdes de conséquences peuvent être décelées par un contrôleur expérimenté sans qu'il ait besoin de procéder à une vérification systématique.

La consistance d'un tel survol et sa place dans un processus général de vérification ne semblent en fait jamais avoir été définies avec précision. Les conclusions à tirer d'un tel survol sont au moins en partie des présomptions et sont donc nécessairement subjectives tout comme l'est l'identification des points critiques.

Il semble que, placé au stade final du processus, un tel survol pourrait dégager des conclusions techniques analogues à certaines conclusions provisoires qu'apporterait le survol préliminaire mentionné plus haut en 7.3. Du point de vue de la logique sur laquelle il s'appuie, il ne semble pas qu'il puisse représenter une quatrième sorte de vérification atténuée, mais au contraire qu'il doive ressortir, selon le cas, d'une quelconque des trois précédentes.

12.5 En conclusion les méthodes de vérifications atténuées sont fort diverses, et la plupart d'entre elles recourent à des moyens indirects. Elles ont fait leurs preuves d'efficacité dans les cas où des vérifications systématiques étaient effectuées par ailleurs, ou tout au moins prévues : sous réserve de la remarque portée à la fin du paragraphe 10.1 ci-dessus, elles ont en effet un effet psychologique certain sur les autres participants aux études ; en outre il semble qu'elles peuvent permettre de réduire notablement le nombre et la gravité des erreurs, à condition de les considérer comme éventuelles et préliminaires ou complémentaires à des vérifications systématiques, et non comme un substitut à celles-ci.

13. ASPECTS SPECIFIQUES DES VERIFICATIONS DES CALCULS EFFECTUES PAR ORDINATEURS (COMPUTERS).

En principe, la vérification peut être faite à l'amont (au niveau du programme) ou à l'aval (au niveau de la note de calcul particulière à chaque projet).

13.1 La vérification à l'amont a pour but de "certifier" le programme. Elle est évidemment beaucoup plus longue et laborieuse que la vérification d'un seul calcul particulier, mais elle peut être très avantageuse s'il s'agit d'un programme destiné à être utilisé de nombreuses fois (et éventuellement de la même manière).

S'il s'agit d'un programme très simple, elle peut être faite par vérification directe du "listing".

S'il s'agit d'un programme complexe, elle ne peut l'être en pratique que par un autocontrôle et un contrôle interne spécifiques complétés par des tests de nature empirique et des vérifications fragmentaires et superficielles (par exemple vérification directe de la logique du programme ou de sa notice d'utilisation). Ces méthodes ne peuvent pas être considérées comme rigoureuses. Cependant l'expérience montre que dans certaines conditions des résultats remarquables ont pu être atteints.

C'est ainsi que, de 1962 à 1977, l'Administration française chargée des ponts-routes a établi une vingtaine de programmes dont chacun, comptant de l'ordre de 10.000 instructions FORTRAN, était capable d'établir le projet complet d'un pont ou d'une partie de pont (par exemple tablier ou ensemble de piles) en fonction d'une cinquantaine de données numériques particulières, et les a utilisées pour plus de 10.000 ponts qui ont été réalisés. On a certes constaté quelques erreurs subsistantes, généralement très visibles, pour chaque programme, au cours d'une "période de rodage" de l'ordre de 2 ans ; mais pas un seul ouvrage n'a subi de dommage du fait d'erreur de ces programmes, et très vite on a limité à peu de chose ou même abandonné complètement, au niveau des utilisateurs, les vérifications qu'on avait veillé à rendre possibles par des "sorties" et des notices détaillées avec le plus grand soin.

Ces résultats ont été obtenus moyennant des conditions très rigoureuses d'établissement, d'autocontrôle, de contrôle interne et des modalités d'usage des programmes. De telles conditions ne peuvent être réalisées qu'exceptionnellement. En particulier il est constant que pour l'immense majorité des programmes utilisés en matière de construction, les logiciels fassent l'objet de modifications fréquentes par des équipes de programmation diverses, sans une rigueur de méthodes suffisante. Ceci concerne particulièrement les extensions des programmes et leurs adaptations à des matériels divers. Pour cette raison, en dehors de cas exceptionnels (mais importants) tels que celui mentionné plus haut, la certification de programmes s'est avérée une illusion et n'est pas pratiquée de façon opérationnelle. Toutefois, pour les options les plus fréquemment utilisées de certains programmes d'analyse structurale conçus et utilisés à échelle internationale, on peut approcher de la situation décrite ci-dessus à propos des ponts-routes types français.

13.2 Quant aux vérifications à l'aval, elles présentent diverses spécificités par rapport aux vérifications des calculs manuels.

13.2.1 Force est d'abord de constater qu'elles ne sont le plus souvent possibles que par des méthodes de calculs parallèles :

- souvent du fait de la nature des problèmes traités,

- mais tout aussi souvent parce que les sorties, notices, etc ... ne sont presque jamais établies avec la logique, le soin et la pédagogie nécessaires pour permettre l'emploi des autres méthodes, et qu'elles le sont même souvent avec l'intention de conserver, par la dissimulation du contenu détaillé du programme, la propriété exclusive de ce contenu.

une action concertée et soutenue des destinataires de tels calculs, sous forme de prescriptions standardisées sur les conditions de présentation de ces calculs, serait sans doute nécessaire pour améliorer cette situation.

13.2.2 Un autre aspect spécifique concerne la vérification des hypothèses de calcul et des données particulières aux projets.

La vérification des hypothèses de calcul (modélisations, cas traités, approximations incorporées, etc ...) est un préalable nécessaire à toute autre opération de vérification. A quoi bon, en effet, aller au delà s'il n'y a pas accord sur ces hypothèses ? Mais une telle vérification suppose d'abord une explicitation complète des dites hypothèses, ce qu'il est souvent très laborieux d'obtenir lorsqu'il ne s'agit pas d'un programme déjà à peu près connu.

Quant à la vérification des données particulières au projet, elle est toujours indispensable et doit être faite à deux stades au moins :

- par autocontrôle du projeteur, au vu du rappel des données telles qu'elles ont été effectivement utilisées. A cet effet elles doivent être répétées dans leur totalité dans la note de calcul fournie par l'ordinateur : ceci est nécessaire pour éliminer les erreurs de transcription,

- par le vérificateur, à titre de contrôle partiel direct de la note de calcul et pour définir les bases de son calcul parallèle, dès le début de sa vérification. A ce sujet il importe qu'aucune erreur de donnée ne puisse être commune au calcul initial et au calcul parallèle. Pour cela il convient que la vérification des données ait son origine sur les dessins du projet, pour toutes les données qu'on peut y trouver. En général d'ailleurs les données nécessaires au calcul parallèle ne sont pas toutes identiques à celles qui ont été nécessaires au calcul de projet.

13.2.3 Un troisième aspect du calcul par ordinateur est la nécessité d'une vérification de l'exécution normale du programme par la machine, en ce qui concerne l'absence de panne ou d'erreur due au système d'exploitation de l'ordinateur. Cette vérification relève de l'autocontrôle par l'exécutant du calcul ; elle est faite à l'aide de "clés de contrôle" prévues dans le programme lui-même. Elle est tout aussi nécessaire pour le calcul parallèle que pour le calcul du projet.

13.2.4 Les vérifications de l'exécution normale du programme et de l'absence d'erreur de transcription des données sont toujours très utilement doublées par une vérification superficielle de la note de calcul (cf 12.3) dans le cadre de l'autocontrôle. En effet la grande majorité des erreurs dues au calcul automatique changent l'ordre de grandeur des résultats, de telle sorte que ces erreurs sautent aux yeux immédiatement.

13.3 Un autre aspect spécifique en cas d'usage de l'ordinateur réside dans la sous-traitance fréquente des opérations informatiques. Il en résulte diverses conséquences sur l'organisation, la consistance et le partage des tâches, les responsabilités, et donc les vérifications.

Qu'il y ait ou non sous-traitance, la phase préalable de la vérification peut être utilement complétée par un examen de la qualité des moyens informatiques mis en oeuvre :

- vis-à-vis de l'organisme qui a effectué les calculs de projet,

- vis-à-vis du programme utilisé.

13.4 Enfin il peut être ajouté que certaines évolutions dans l'usage de l'ordinateur, notamment celles qui tendent vers la "conception assistée par l'ordinateur" (C.A.O. - computer aided design) auront certaines conséquences sur la consistance, l'articulation et la présentation des notes de calcul de projet, et par conséquent sur les techniques de vérification. Ces conséquences ne semblent toutefois

pas devoir être fondamentales.

14. CONCLUSION D'UNE VERIFICATION

La conclusion d'une vérification comporte nécessairement l'acceptation des dessins et spécifications écrites. Le plus souvent cette acceptation n'intervient qu'après modification, ou (dans les cas les plus simples) sous réserve de certaines modifications. Lorsqu'il s'agit d'un grand ouvrage, cette acceptation est toujours échelonnée.

En ce qui concerne les calculs, elle peut ou non comporter une mise au net de ceux-ci.

Eventuellement enfin, elle peut donner lieu au dépôt d'un rapport final.

Ces diverses modalités sont liées à la modulation des vérifications (cf 6.2) et ne doivent pas être laissées au choix du vérificateur : en effet elles sont nécessairement associées à des responsabilités inégales du vérificateur et à des coûts inégaux des vérifications.

Dans tous les cas une continuité doit (ou devrait) être assurée entre la vérification du projet et le contrôle de l'exécution. En particulier des contrôles en fin d'exécution ou, en cas d'emploi de techniques complexes, en cours d'exécution, doivent assurer la conformité au projet ou réduire les incertitudes subsistant à l'issue du projet. Le vérificateur peut y être utilement associé. Souvent, il pourra prendre utilement l'initiative de faire une proposition pour compléter sa mission en ce sens.

15. QUALITES ET ATTITUDE NECESSAIRES D'UN VERIFICATEUR

15.1 Les qualités nécessaires d'un vérificateur peuvent être facilement dégagées à partir de l'analyse qui a été faite de sa mission et des techniques qu'il doit choisir et employer.

Dans les cas courants, ce sont la compétence plus que le génie, la solidité, le bon sens, l'ouverture d'esprit, mais aussi le sens du danger et l'esprit de décision ; il s'agit pour une part de qualités de tempérament. L'expérience aussi est nécessaire, mais elle peut n'être apportée que par la participation temporaire d'un ingénieur ancien à la vérification.

Dans les cas non courants (innovation, projet très difficile, ...) l'imagination, l'intuition, et éventuellement un bon jugement psychologique sont des qualités supplémentaires très importantes.

Enfin, dans tous les cas, il est indispensable que le vérificateur "fasse le poids" vis-à-vis de l'auteur du projet, et cette condition est d'autant plus exigeante que celui-ci est de grande renommée.

15.2 Quant à son attitude, qui nécessairement doit dépendre des circonstances, elle doit toujours être constructive. Il importe que le vérificateur ne puisse être considéré par l'auteur du projet comme "tâtillon et mesquin". Généralement il ne devra pas être excessivement directif.

16. CONCLUSION GENERALE

Dans le présent mémoire ont été étudiées surtout les techniques de vérification des calculs, qui procèdent de trois méthodes théoriques. Les vérifications des dessins et spécifications écrites résultent de méthodes purement pragmatiques.

La manière d'utiliser ces méthodes doit satisfaire aux principes de l'assurance de qualité, ce qui a conduit à commencer ce mémoire par une étude des qualités

désirables des projets. Elle doit aussi tenir compte des contraintes particulières à chaque réalisation.

Quoique les vérifications ne doivent pas se limiter à la conformité aux codes, la manière de les pratiquer est nécessairement influencée par le contenu des codes Il est prévisible que l'évolution des codes tant dans le sens d'une présentation exigentielle qu'en ce qui concerne les règles de fiabilité rapprochera en fait les codes des considérations dont les bons vérificateurs tiennent déjà compte.

Dans le cadre de cette évolution des codes, peut-être sera-t-il possible de passer, en matière de vérifications, du plan de la recherche à celui de recommandations qui seraient formulées en fonction de différentes catégories de structures pour différents degrés de fiabilité.

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire est le résultat d'une recherche répartie sur près de huit ans, à la base de laquelle se situe une étude préliminaire de M. Ch. SALZMANN et dont le développement a bénéficié d'idées de nombreux ingénieurs français.

L'établissement du mémoire, au cours des deux dernières années, a bénéficié aussi de divers documents cités ci-dessous en bibliographie, ainsi que d'observations de Mme M. KERSKEN BRADLEY et de MM. E. GEHRI, M. HIRT, G. KÄRRHOLM et F. KNOLL.

BIBLIOGRAPHIE

1. S.E.T.R.A : Recommandations pour la vérification des études d'exécution des ouvrages d'art (VEE 77), rédigé par MATHIEU H. ; PARIS, Mai 1977.

2. J.C.S.S : General principles on quality assurance for structures, rédigé par ÖSTLUND L. ; publié par IABSE (report, volume 35), 1981.

3. C.E.B : Quality control and quality assurance for concrete structures, rédigé par MESEGUER A.G. ; Bulletin 157, Mars 1983.

4. CALGARO et TONELLO : Projet d'exécution et contrôle du projet d'exécution, Rapport introductif aux journées nationales de l'A.F.P.C. ; PARIS, Mars 1983.

5. MATHIEU H. : Quality of designs, IABSE RIGI workshop on quality assurance within the building process ; Juin 1983.

Leere Seite
Blank page
Page vide